

การลดต้นทุนการผลิตในกระบวนการกลึงอัตโนมัติโดยการใช้เงื่อนไขการตัดเฉือนที่เหมาะสม

กฤษฎี นกรชัย

งานนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

เมษายน 2559

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา


คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์และคณะกรรมการสอบงานนิพนธ์ ได้พิจารณา  
งานนิพนธ์ของ คงฤทธิ์ นครชัย จบปีนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

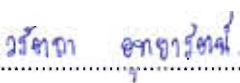
คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(ดร. ทนงศักดิ์ เทพสนธิ)


คณะกรรมการสอบงานนิพนธ์

  
..... ประธาน  
(ดร. ทนงศักดิ์ เทพสนธิ)

  
..... กรรมการ  
(ดร. สุนิสภา คำสุข)

  
..... กรรมการ  
(ดร. วรัตถา อุทัยรัตน์)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ อนุมัติให้รับงานนิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม ของมหาวิทยาลัยบูรพา

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)

วันที่ ๕ เดือน พฤษภาคม พ.ศ. ๒๕๖๑

## กิตติกรรมประกาศ

งานนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร. ทนงศักดิ์ เทพสนธิ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ บริษัท เจเทค โตะอ อโต โมทีฟ ไทยแลนด์ ที่ให้กำลังใจ และให้คำปรึกษาผู้วิจัยเสมอมา ตลอดจนแหล่งความรู้และข้อมูลต่าง ๆ ในการทำวิจัย ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณพ่อแม่ และพี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา คุณค่าและประโยชน์ของงานนิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทิตาแด่ บุพการี บุรพจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

คงฤทธิ นกรชัย

56920957: สาขาวิชา: การจัดการงานวิศวกรรม; วศ.ม. (การจัดการงานวิศวกรรม)

คำสำคัญ: การลดต้นทุนการผลิต/ การกลึงซีเอ็นซี/ เงื่อนไขการตัดเฉือน/ การหาค่าที่เหมาะสม

คงฤทธิ นครชัย: การลดต้นทุนการผลิตในกระบวนการกลึงอัตโนมัติโดยใช้เงื่อนไข

การตัดเฉือนที่เหมาะสม (COST REDUCTION IN CNC TURNING USING CUTTING

PARAMETERS OPTIMIZATION) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: ทนงศักดิ์ เทพสนธิ, Ph.D.

145 หน้า, ปี พ.ศ. 2559.

งานวิจัยนี้นำเสนอการลดต้นทุนการผลิตในกระบวนการกลึงอัตโนมัติโดยการหาเงื่อนไขการตัดเฉือนที่เหมาะสม ซึ่งใช้ทฤษฎีการออกแบบการทดลองของทาгуชิ (Tagushi) ชนิด L9 ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับปัจจัยในการทดลอง 3 ปัจจัย ได้แก่ วัสดุของมีดกลึง อัตราป้อนต่อรอบและความเร็วตัด ซึ่งจะมีระดับปัจจัย 3 ระดับ ได้แก่ ต่ำ ปานกลาง และสูง และทำการทดลองโดยกลึงชิ้นงาน 30 ชิ้นต่อเนื่อง จากนั้นได้ทำการวัดค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน เพื่อวิเคราะห์ขนาดการสึกหรอของมีดกลึง และทำการวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน เพื่อตรวจสอบคุณภาพผิวของชิ้นงาน ให้อยู่ภายใต้ข้อกำหนดตามแบบชิ้นงาน ผลการทดลองได้ถูกวิเคราะห์โดยวิธีการวิเคราะห์อิทธิพลหลักและการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ ซึ่งใช้ในการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตและต้นทุนการผลิต เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เงื่อนไขในการตัดเฉือนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตจริงและเพื่อประยุกต์ใช้เมื่อเงื่อนไขในการผลิตมีการเปลี่ยนแปลง จากผลการวิจัยทางบริษัทสามารถเพิ่มอัตราการผลิตในปัจจุบันจาก 454 ชิ้นต่อวัน เป็น 516 ชิ้นต่อวัน คิดเป็น 13.65% และในขณะเดียวกันลดต้นทุนการผลิตในปัจจุบันจาก 4.443 บาทต่อชิ้น เหลือ 4.102 บาทต่อชิ้น คิดเป็น 7.67%

56920957: MAJOR: ENGINEERING MANAGEMENT; M. Eng. (ENGINEERING MANAGEMENT)

KEYWORDS: COST REDUCTION/ CNC TURNING/ CUTTING PARAMETERS/ OPTIMIZATION

KONGRIT NAKORNCHAI: A COST REDUCTION IN CNC TURNING USING CUTTING PARAMETER OPTIMIZATION. ADVISORY COMMITTEE: THANONGSAK THEPSONTHI, Ph.D. 145 P. 2016.

The research aimed to reduce cost of CNC turning process using cutting parameters optimization. Tagushi methods was applied to the study with 3 experimental factors namely; Cutting tool, Material, Feed per revolution and Cutting speed; and 3 levels for each factors namely; low, medium and high. The cutting experiment was done on 30 consecutive work pieces. Outside diameters of work pieces were measured in order to determined the tool ware. Also surface roughness was tested to ensure that it comply with the specification. The results were then analyzed using main effect plots and mathematical modeling. Graphs showing relationship between production rate and production cost ware plotted. The graphs were analyzed for specific production condition in order to apply the optimum cutting parameters. The results showed that using optimum cutting condition can increase production rate from 454 to 516 pieces per day (13.6 %) and whereas production cost decreased from 4.443 to 4.102 Baht per unit (7.6 %).

## สารบัญ

|                                      | หน้า |
|--------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                 | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....              | จ    |
| สารบัญ.....                          | ฉ    |
| สารบัญตาราง.....                     | ฌ    |
| สารบัญภาพ.....                       | ฎ    |
| บทที่                                |      |
| 1 บทนำ.....                          | 1    |
| ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....  | 1    |
| วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....         | 1    |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....       | 1    |
| ขอบเขตของการวิจัย.....               | 2    |
| 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4    |
| ระบบการผลิต.....                     | 4    |
| การเพิ่มผลผลิตด้วยเทคโนโลยี.....     | 4    |
| การผลิตแบบทันเวลาพอดี .....          | 5    |
| วัสดุเหล็ก .....                     | 6    |
| ไมโครมิเตอร์.....                    | 7    |
| ค่าความหยาบผิว.....                  | 8    |
| งานกลึง.....                         | 9    |
| อายุการใช้งานของเครื่องมือตัด.....   | 18   |
| ต้นทุนการผลิต.....                   | 22   |
| การออกแบบการทดลอง.....               | 25   |
| วิธีการทดลองของทาญูชิ.....           | 35   |
| งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....           | 41   |

## สารบัญ (ต่อ)

| บทที่  | หน้า |
|--|------|
| 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....  | 45   |
| กระบวนการผลิต.....   | 45   |
| ลำดับขั้นตอนการทำงานของเครื่องจักร.....  | 47   |
| คุณลักษณะของชิ้นงาน.....   | 48   |
| เครื่องกลึง.....   | 48   |
| น้ำหล่อเย็น .....  | 49   |
| การกำหนดปัจจัยการทดลอง.....  | 49   |
| การเลือกวัสดุมีดกลึง.....  | 49   |
| การเลือกค่าอัตราป้อนต่อรอบ.....  | 50   |
| การเลือกค่าความเร็วตัด.....  | 51   |
| การออกแบบการทดลอง.....   | 52   |
| ขั้นตอนการทดลอง.....   | 53   |
| การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการหาค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่าน<br>ศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน..... | 54   |
| การวัดความหยาบผิว.....   | 55   |
| การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....  | 56   |
| การคำนวณจำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อคมตัด.....  | 57   |
| การคำนวณเวลาในการผลิต.....   | 58   |
| อัตราการผลิต.....  | 60   |
| ต้นทุนการผลิต.....   | 60   |
| 4 ผลการดำเนินงาน.....  | 62   |
| ผลการทดลอง.....  | 62   |
| การวิเคราะห์อิทธิพลหลัก.....   | 65   |
| การสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์.....   | 70   |

## สารบัญ (ต่อ)

| บทที่  | หน้า |
|--|------|
| ผลการคำนวณจำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อคนตัด.....                | 71   |
| ผลการคำนวณเวลาในการผลิต.....                                 | 73   |
| ผลการคำนวณอัตราการผลิต.....                                  | 75   |
| ผลการคำนวณต้นทุนการผลิต.....                                 | 77   |
| การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นทุนการผลิตและอัตราการผลิต..... | 78   |
| สรุปผลการทดลองและเปรียบเทียบกรณีตัวอย่าง.....                | 87   |
| สรุปเวลาของกระบวนการผลิตก่อนและหลังการทดลอง.....             | 89   |
| 5 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย.....                              | 90   |
| สรุปผลการวิจัย.....  | 90   |
| อภิปรายผลการวิจัย.....                                       | 91   |
| ข้อเสนอแนะ.....  | 91   |
| บรรณานุกรม.....  | 92   |
| ภาคผนวก.....   | 93   |
| ภาคผนวก ก.....   | 94   |
| ภาคผนวก ข.....   | 101  |
| ภาคผนวก ค.....   | 103  |
| ภาคผนวก ง.....   | 113  |
| ภาคผนวก จ.....   | 120  |
| ภาคผนวก ฉ.....   | 122  |
| ประวัติย่อของผู้วิจัย.....                                   | 145  |



## สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 1-1 แผนการดำเนินงาน.....  | 3    |
| 2-1 คำมูมต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับวัสดุงาน.....  | 17   |
| 2-2 ข้อมูลของการทดลอง 2 ปัจจัย.....   | 33   |
| 2-3 การเปรียบเทียบจำนวนการทดลองระหว่างการออกแบบการทดลองแบบสมบูรณ์และ<br>การออกแบบการทดลองตามแนวทางทากูชิ.....                                   | 38   |
| 2-4 การออกแบบการทดลองชนิด L4 (2 <sup>3</sup> ) .....  | 38   |
| 2-5 ตารางการออกแบบการทดลองชนิด L9 (3 <sup>4</sup> ) .....   | 39   |
| 2-6 การออกแบบการทดลองชนิด L16 (4 <sup>5</sup> ) .....   | 39   |
| 3-1 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงาน.....  | 46   |
| 3-2 ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการตัดเฉือน.....  | 47   |
| 3-3 อัตราป้อนที่ใช้ในการทดลอง.....  | 51   |
| 3-4 ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลอง.....  | 52   |
| 3-5 การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ L9.....  | 52   |
| 3-6 พิกัดความถี่เส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นและค่าเพื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบกับ<br>ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานในแต่ละตำแหน่ง..... | 58   |
| 3-7 การคำนวณเวลาการทำงานของเครื่องจักรในปัจจุบัน.....   | 59   |
| 4-1 ผลการทดลองตามแบบการทดลองของทากูชิ L9.....   | 64   |
| 4-2 ตารางแสดงอิทธิพลหลักของประเภทมีดกลึง (T) ต่อค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่าน<br>ศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (E).....                           | 66   |
| 4-3 อิทธิพลหลักของอัตราป้อนต่อรอบ (F) ต่อค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง<br>เริ่มต้นของชิ้นงาน (E) .....                                 | 67   |
| 4-4 อิทธิพลหลักของความเร็วตัด (S) ต่อค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง<br>เริ่มต้นของชิ้นงาน (E).....                                      | 67   |
| 4-5 อิทธิพลหลักของปัจจัยต่อเวลาการผลิตต่อชิ้น (Sec) .....   | 69   |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 4-6 การแปลงค่าระดับปัจจัยให้อยู่ในรูปตัวเลข.....  | 70   |
| 4-7 ข้อมูลที่ใส่ลงใน โปรแกรม Minitab.....   | 71   |
| 4-8 ผลการคำนวณจำนวนชิ้นที่ผลิตได้ต่อคอมตัดจากสมการ Regression.....                              | 72   |
| 4-9 ผลการคำนวณเวลาการผลิตชิ้นงานต่อชิ้น.....  | 74   |
| 4-10 ผลการคำนวณอัตราการผลิต.....  | 75   |
| 4-11 ผลการคำนวณต้นทุนการผลิต.....   | 77   |
| 4-12 ข้อมูลสรุปปัจจัยการทดลองและผลการทดลองจากการคำนวณ.....                                      | 80   |
| 4-13 การเทียบค่าระดับของปัจจัยการทดลองและค่าจริงที่ระดับปัจจัยการทดลองต่าง ๆ<br>แบบละเอียด..... | 85   |
| 4-14 ต้นทุนและอัตราการผลิตบนเงื่อนไขการตัดเดือนที่ดีที่สุด.....                                 | 86   |
| 4-15 ข้อมูลสรุปและเปรียบเทียบกรณีตัวอย่างของแต่ละเงื่อนไขการผลิต.....                           | 88   |
| 4-16 ข้อมูลสรุปเวลาของกระบวนการผลิตก่อนและหลังการทดลอง.....                                     | 89   |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่  | หน้า |
|---|------|
| 2-1 วิธีการคำนวณค่าความหยาบผิวแบบ Ra.....                   | 9    |
| 2-2 การกลึงลักษณะต่าง ๆ.....                                | 10   |
| 2-3 การกลึงปาดหน้า.....                                     | 10   |
| 2-4 มีดกลึงที่ใช้กลึงปาดหน้า.....                           | 11   |
| 2-5 การกลึงปอกภายนอก.....                                   | 11   |
| 2-6 การกลึงปอกภายในหรือการกลึงคว้านรู.....                  | 12   |
| 2-7 ด้ามมีดและมีดกลึงสำหรับการกลึงปอกทั่วไป.....            | 12   |
| 2-8 ด้ามมีดและมีดกลึงสำหรับการกลึงคว้านรู.....              | 13   |
| 2-9 การตั้งมีดกลึงพอดีสุนัข.....                            | 15   |
| 2-10 การตั้งมีดกลึงเอียงเข้าหาหัวเครื่อง.....               | 16   |
| 2-11 การตั้งมีดกลึงเอียงหนีหัวเครื่อง.....                  | 16   |
| 2-12 ภาพด้านข้างของมีดกลึง.....                             | 17   |
| 2-13 ภาพด้านหน้าของมีดกลึง.....                             | 17   |
| 2-14 การสึกหรอของมีดตัด.....                                | 19   |
| 2-15 กราฟการสึกหรอของมีดตัดตามทฤษฎีของ Taylor.....          | 20   |
| 2-16 อัตราการสึกหรอของมีดตัดที่ความเร็วในการตัดต่างกัน..... | 21   |
| 2-17 กราฟลอกกาลิทึม (log-log graph).....                    | 22   |
| 2-18 แผนผังรายละเอียดของต้นทูน.....                         | 23   |
| 2-19 การแบ่งต้นทูนตามส่วนประกอบของการผลิต.....              | 24   |
| 2-20 ตัวแบบทั่วไปของกระบวนการทดลอง.....                     | 26   |
| 2-21 Response จากการทดลอง 2 ปัจจัย ๆ ละ 2 ระดับ.....        | 29   |
| 2-22 กราฟแสดงผลปัจจัยแบบไม่มีอิทธิพลร่วม.....               | 29   |
| 2-23 กราฟแสดงผลปัจจัยแบบมีอิทธิพลร่วม.....                  | 29   |
| 2-24 รูปแบบการทดลองแบบ $2^3$ Factorial design.....          | 34   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่  | หน้า |
|---|------|
| 2-25 รูปแบบการทดลองแบบ 2 <sup>4</sup> Factorial design.....   | 35   |
| 3-1 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง.....  | 48   |
| 3-2 มีดกลึงชนิด DMNG-15-04-08-PM.....   | 50   |
| 3-3 ตำแหน่งและทิศทางการวัดชิ้นงาน.....  | 54   |
| 3-4 ไมโครมิเตอร์.....   | 55   |
| 3-5 เครื่องวัดความหยาบผิวชิ้นงาน.....   | 56   |
| 4-1 ค่าความหยาบผิวชิ้นงานจากการทดลอง.....   | 63   |
| 4-2 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของปัจจัยต่อค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น<br>ของชิ้นงาน ที่ตำแหน่ง D1, D2 และ D3..... | 68   |
| 4-3 ข้อมูลอิทธิพลหลักของปัจจัยต่อเวลาการผลิตต่อชิ้น.....  | 69   |
| 4-4 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราป้อน ความเร็วตัดและจำนวนชิ้นที่ผลิตได้ต่อคมตัด<br>(Number of shaft per edge).....                 | 73   |
| 4-5 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราป้อน ความเร็วตัดและเวลาการผลิตต่อชิ้น.....  | 75   |
| 4-6 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราป้อน ความเร็วตัดและอัตราการผลิต.....  | 76   |
| 4-7 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราป้อน ความเร็วตัดและต้นทุนในการผลิต.....   | 78   |
| 4-8 ความสัมพันธ์ของอัตราป้อน (F) ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการผลิตและต้นทุนการผลิต   | 81   |
| 4-9 ความสัมพันธ์ของความเร็วตัด (S) ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการผลิตและต้นทุนการผลิต   | 82   |
| 4-10 ความสัมพันธ์ของอัตราป้อน (F) และความเร็วตัด (S) ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการผลิต<br>และต้นทุนการผลิต.....                    | 84   |

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตยนต์ในประเทศไทยมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ทำให้อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์มีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องตามไปด้วย ภายใต้สภาวะต้นทุนการผลิตทางด้านวัตถุดิบและค่าจ้างแรงงานที่เพิ่มสูงขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามราคาขายชิ้นส่วนยานยนต์จะต้องมีการปรับลดลงในทุก ๆ ปี ซึ่งเป็นกลไกการแข่งขันของอุตสาหกรรมการผลิตยนต์

แนวทางที่จะทำให้สามารถแข่งขันในกลุ่มอุตสาหกรรมเดียวกัน ได้ก็คือ การลดต้นทุนการผลิต สำหรับกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่ใช้กระบวนการตัดเฉือน (Machining) เช่น การกลึง (Turning) การเจาะ (Drilling) และการกัด (Milling) การลดต้นทุนการผลิตสามารถกระทำได้โดยการใช้เงื่อนไขในการตัดเฉือน (Cutting parameters) ที่เหมาะสม โดยเงื่อนไขการตัดเฉือนที่ดี จะสามารถช่วยเพิ่มอัตราการตัดเฉือน (Material removal rate, MRR) คุณภาพของชิ้นงานภายใต้มาตรฐานที่กำหนด และยังสามารถยืดอายุการใช้งานของมีดกลึงได้อีกด้วย ซึ่งทั้งหมดนี้จะสะท้อนออกมาในรูปของประสิทธิภาพการผลิตที่เพิ่มขึ้น และต้นทุนการผลิตที่ลดลง อันจะเป็นการเพิ่มโอกาสการแข่งขันในกลุ่มอุตสาหกรรมทั้งในปัจจุบันและอนาคต

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ลดต้นทุนการผลิตชิ้นงานในกระบวนการกลึงอัตโนมัติ
2. เพิ่มอัตราการผลิตชิ้นงานในกระบวนการกลึงอัตโนมัติ

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ต้นทุนในการผลิตชิ้นงานต่อชิ้นลดลง
2. อัตราการผลิตชิ้นงานในขั้นตอนการกลึงอัตโนมัติเพิ่มขึ้น

### ขอบเขตของการวิจัย

1. การวิจัยนี้จะทำการศึกษาและทดลองหาเงื่อนไขการตัดเฉือนที่เหมาะสมให้แก่กระบวนการผลิตย่อยเพียงหนึ่งกระบวนการ
2. ในการหาเงื่อนไขการตัดเฉือนที่เหมาะสม จะทำการประเมินจากสามเงื่อนไขการตัดเฉือนหลัก ได้แก่ ความเร็วตัด (Cutting velocity) อัตราป้อน (feed) และประเภทของมีดกลึง
3. การหาเงื่อนไขการตัดเฉือนที่เหมาะสม จะดำเนินการภายใต้ข้อกำหนดทางคุณภาพของชิ้นงานกรณีศึกษา

ตารางที่ 1-1 แผนการดำเนินงาน

| รายละเอียดการดำเนินการ                   | ช่วงระยะเวลา |      |      |      |      |      |       |       |
|--|--------------|------|------|------|------|------|-------|-------|
|  | ก.ย.         | ต.ค. | พ.ย. | ธ.ค. | ม.ค. | ก.พ. | มี.ค. | เม.ย. |
| 1. ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง      | ←→           |      |      |      |      |      |       |       |
| 2. เก็บรวบรวมข้อมูล                      |              | ←→   |      |      |      |      |       |       |
| 3. วิเคราะห์ข้อมูล                       |              |      | ←→   |      |      |      |       |       |
| 4. ออกแบบการทดลอง                        |              |      |      | ←→   |      |      |       |       |
| 5. ทำการทดลอง                            |              |      | ←→   |      |      |      |       |       |
| 6. ประเมินผลการทดลองและเปรียบเทียบข้อมูล |              |      |      |      |      | ←→   |       |       |
| 7. สรุปผลการทดลอง                        |              |      |      |      |      | ←→   |       |       |
| 8. จัดทำรูปเล่มและนำเสนอผลงาน            |              |      |      |      |      |      |       | ←→    |





## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### ระบบการผลิต (Production system)

ระบบการผลิตหมายถึงการนำทรัพยากรที่เป็นปัจจัยนำเข้ามาทำการเปลี่ยนสภาพให้กลายเป็นผลผลิตหรือผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยสามารถนำมาใช้ร่วมกับผลผลิตสินค้าและบริการต่าง ๆ ระบบการผลิตโดยทั่วไปประกอบด้วย 3 ปัจจัยสำคัญ คือ ปัจจัยการผลิต กระบวนการผลิต และผลผลิต ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบ คือ

##### 1. ระบบการผลิตแบบช่วงตอน

เป็นการผลิตที่ไม่เป็นไปตามสายการผลิต เมื่อมีการผลิตชิ้นส่วนก็จะนำชิ้นส่วนเหล่านั้นมาประกอบเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป การผลิตแบบช่วงตอนมีลักษณะ ดังนี้

- 1.1 มีอุปกรณ์และกระบวนการผลิตที่ยืดหยุ่นสามารถผลิตภัณฑ์ได้หลายรูปแบบ
- 1.2 ปัจจัยการผลิตจะเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะงาน
- 1.3 การผลิตจะเปลี่ยนแปลงตามลักษณะงานแต่ละชิ้น
- 1.4 การไหลหรือการเคลื่อนย้ายของงานจะไม่ติดต่อกัน
- 1.5 พนักงานที่ปฏิบัติงานมักจะมีความสามารถระดับปานกลางไปจนถึงระดับสูง

##### 2. ระบบการผลิตแบบต่อเนื่อง

เป็นระบบการผลิตที่มีการจัดระบบไว้เป็นลำดับ ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสุดท้ายออกเป็นผลิตภัณฑ์ เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่มีการผลิตแบบต่อเนื่อง ซึ่งมีลักษณะดังนี้

- 2.1 มีอุปกรณ์และกระบวนการผลิตที่ได้มาตรฐาน
- 2.2 ปัจจัยการผลิตจะมีมาตรฐานแน่นอนไม่มีการเปลี่ยนแปลง
- 2.3 มีลำดับขั้นตอนการผลิตที่แน่นอน
- 2.4 การไหลหรือการเคลื่อนย้ายของงานมักใช้ระบบการผลิตแบบสายพาน
- 2.5 การป้อนงานเข้าหน่วยการผลิตแต่ละหน่วยจะใช้ระบบตามลำดับ (FIFO)
- 2.6 การผลิตจะผลิตสินค้าครั้งละมาก ๆ

#### การเพิ่มผลผลิตด้วยเทคโนโลยี

การเพิ่มผลผลิตด้วยเทคโนโลยี คือ การนำวิทยาการทางวิทยาศาสตร์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในทางปฏิบัติงานด้านอุตสาหกรรม เพื่อช่วยให้การดำเนินงานต่าง ๆ ขององค์กรเป็นไปได้

อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จากการปฏิวัติอุตสาหกรรมของประเทศอังกฤษในศตวรรษที่ 18 เป็นต้นมา ได้มีการสร้างเครื่องมือเครื่องจักรและอุปกรณ์การทำงานต่าง ๆ ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จะเห็นได้ว่าการพัฒนาทางเทคโนโลยีมีผลต่อการเพิ่มผลผลิตเป็นอย่างมากและการเพิ่มผลผลิตด้วยเทคโนโลยีสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1. การใช้เครื่องจักรเครื่องมือในกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มอัตราการผลิตให้สูงขึ้น โดยเฉพาะระบบเครื่องจักรอัตโนมัติ (Automation system) ซึ่งเป็นความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว เครื่องจักรมีทั้งแบบอัตโนมัติและควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ เครื่องจักรเครื่องมือถูกนำมาใช้แทนมนุษย์เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะงานที่เกี่ยวข้องอันตราย งานที่ต้องการทำซ้ำและงานที่ต้องการความแม่นยำสูง ประเทศอุตสาหกรรมชั้นนำทั้งหลายนั้น มักจะใช้วิธีการดังกล่าวในการเพิ่มผลผลิตของตนเอง ซึ่งพนักงานจะมีหน้าที่เดินเครื่องจักรป้อนวัตถุดิบในกระบวนการผลิตและเครื่องจักรจะทำงานโดยอัตโนมัติ ในปัจจุบันได้มีการนำคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการทำงานซึ่งคอมพิวเตอร์มีคุณสมบัติที่ดีในการเก็บข้อมูล การประมวลผลที่รวดเร็ว ทำให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. การใช้เทคโนโลยีในรูปของวิทยาการความรู้หรือการเลือกใช้เทคนิควิธีการปฏิบัติงานที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตให้การปฏิบัติงานรวดเร็วมากขึ้น และใช้เวลาในการผลิตน้อยลง ซึ่งก็จะทำให้อัตราการผลิตเพิ่มสูงขึ้นได้ เช่น เทคนิคทางวิศวกรรมที่จะทำการศึกษากระบวนการทำงานอย่างเป็นระบบ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงาน โดยลดขั้นตอนที่ไม่จำเป็นออกไป การปฏิบัติงานที่ไม่เป็นมาตรฐาน และการทำงานที่ไม่ทำให้เกิดผลผลิต เพื่อยกระดับคุณภาพของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้น รวมถึงการขนส่งที่มีความสะดวก รวดเร็ว และต้นทุนที่ต่ำ

### **การผลิตแบบทันเวลาพอดี (Just in time)**

เป็นเทคนิคการนำชิ้นส่วนที่จำเป็นเข้าสู่กระบวนการผลิตในเวลาที่ต้องการ และปริมาณที่ต้องการ โดยมุ่งเน้นการลดการเก็บวัสดุหรือวัตถุดิบคงคลัง วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตต้องสั่งเข้ามาในปริมาณที่จำเป็นต่อการใช้งาน การมีชิ้นส่วนเข้ามาในปริมาณมากเกินไปและในเวลาที่ไม่ต้องการจะมีผลเสียคือ สิ้นเปลืองเนื้อที่ในการจัดเก็บ และต้องมีการตรวจเช็คพัสดุคงคลังและบำรุงรักษา วัตถุประสงค์หลักของการผลิตแบบทันเวลาพอดี ก็เพื่อลดความสูญเสียดังกล่าวในกระบวนการผลิต การผลิตแบบทันเวลาพอดีจึงเป็นการปรับปรุงการเพิ่มผลผลิตโดยรวมขององค์กรอีกวิธีหนึ่ง โดยวิธีนี้เริ่มต้นและถูกพัฒนาโดย บริษัท โตโยต้ามอเตอร์ ซึ่งในปัจจุบันมีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางทั้งในประเทศไทย และประเทศอื่น ๆ อีกมากมาย

## วัสดุเหล็ก (Ferrous materials)

เหล็กเป็นวัสดุอุตสาหกรรมประเภทโลหะ ที่ถูกนำมาใช้งานในหลายกิจกรรมและหลายรูปแบบ มีประวัติศาสตร์ความเป็นมาที่ยาวนาน เหล็กที่นำมาใช้งานโดยทั่วไปไม่ใช่เหล็กบริสุทธิ์ คุณสมบัติที่สำคัญของเหล็กบริสุทธิ์ คือ อ่อน คงง่าย รับแรงทางกลได้น้อย จะสามารถพบเหล็กบริสุทธิ์ได้จากลูกอกกาบาคหรือดาวตก ซึ่งเหล็กบริสุทธิ์จะไม่ใช่สนิม กรรมวิธีในการถลุงเหล็ก จะได้เหล็กดิบที่มีสถานะเป็นเหล็กเจือปนหรือเหล็กที่ไม่บริสุทธิ์ และเป็นการยากในวิธีการปฏิบัติที่จะทำให้ได้เหล็กบริสุทธิ์เป็นจำนวนมาก เหล็กบริสุทธิ์จึงไม่เหมาะกับการจะนำมาเป็นวัสดุทางช่างหรือเป็นวัสดุอุตสาหกรรมใด ๆ

เหล็กที่พบตามธรรมชาติเรียกว่าแร่เหล็ก แร่เหล็กในรูปของสินแร่เหล็กจะรวมตัวปะปนอยู่กับวัตถุอื่นทั้งที่เป็นสารโลหะและสารอโลหะ ซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบหรือของผสม แหล่งสินแร่เหล็กที่พบมากที่สุดในประเทศไทยมีอยู่ที่ จังหวัดลพบุรี จังหวัดนครสวรรค์ เป็นต้น สินแร่เหล็กที่ค้นพบและนำมาใช้งานมีหลายชนิด เช่น แมกนีไตต์ บราว และเหล็กออกไซด์

ในปัจจุบันได้มีการผลิตเหล็กในหลากหลายรูปแบบ และส่วนผสมต่างก็ทำให้เหล็กแต่ละตัวมีความแตกต่างกัน ซึ่งสามารถแยกเป็นชนิดของเหล็กได้ดังนี้

### 1. เหล็กเหนียว (Wrought iron)

เหล็กเหนียวหรือเหล็กอ่อน เป็นเหล็กที่มีค่าความแข็งต่ำ มีกำลังวัสดุต่ำกว่าเหล็กชนิดอื่น ๆ นำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมเพียงเล็กน้อย มีส่วนผสมของธาตุคาร์บอนต่ำ เหล็กเหนียวที่ดีจะมีธาตุคาร์บอนประมาณ 0.15% เท่านั้น เหล็กเหนียวได้จากการนำเหล็กดิบจากเตาถลุงมากำจัดสารเจือปนให้เหลือเท่าที่ต้องการ ออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในน้ำเหล็กเหลวซึ่งเป็นการลดคาร์บอนให้ต่ำลง ในเหล็กเหนียวจะมีส่วนผสมของธาตุอื่น ๆ เช่น ซิลิกอน 0.1–3% แมงกานีส 0.25–1% กำมะถัน 0.05% และฟอสฟอรัส 0.04%

เหล็กเหนียวที่มีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.25–0.30% จะให้คุณสมบัติทางกลดีพอสมควร มีความแข็งแรงมีความเหนียว แปรรูปได้ง่าย สามารถชุบผิวแข็งได้ ส่วนราคาจะสูงกว่าเหล็กหล่อ ซึ่งจะนิยมใช้งานโดยทั่วไป เช่น สกรู ลวด แผ่นเหล็ก เหล็กยึด ท่อไอเสีย เป็นต้น

### 2. เหล็กกล้า (Steel)

เหล็กกล้ามีลักษณะโดยทั่วไปใกล้เคียงกับเหล็กเหนียว มีส่วนผสมของคาร์บอนในเนื้อเหล็กตั้งแต่ 0.15–1.7% ถ้าคาร์บอนสูงเกินกว่า 1.8% จะมีสภาพเป็นเหล็กหล่อ คาร์บอนในเนื้อเหล็กกล้าทั้งหมดจะแยกตัวเป็นกราฟไฟต์และจะไม่พบคาร์บอนในรูปของสารประกอบ เหล็กกล้าเป็นวัสดุช่างที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง ลักษณะการใช้งานจะแตกต่างกับเหล็กหล่อ เหล็กกล้าสามารถนำมาขึ้นรูปได้หลายวิธี เช่น การกลึง การรีด การเจาะ การเชื่อม การตีในขณะร้อน เป็นต้น

### 3. เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel)

เหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของคาร์บอนเป็นหลัก แต่จะมีสารอื่นผสมอยู่ด้วยตั้งแต่กระบวนการถลุงสินแร่เหล็กในเบื้องต้น เช่น ธาตุซิลิคอน ฟอสฟอรัส แมงกานีส และกำมะถัน เหล็กกล้าคาร์บอนแบ่งตามปริมาณธาตุคาร์บอนส่วนผสมได้ 3 ชนิด คือ

3.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) มีคาร์บอนในส่วนผสมไม่เกิน 0.30% มีคุณสมบัติเหนียวแต่ไม่แข็งแรงมากนัก สามารถนำไปกลึง ใส ตัด เจาะ ได้ง่าย ใช้ทำโครงสร้าง ทำ ลวด สลักเกลียว ทำแผ่นเหล็ก โซ่ ตัวถังรถยนต์ เป็นต้น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำไม่เหมาะสำหรับการจะนำชิ้นงานไปชุบผิวแข็ง เพราะมีปริมาณธาตุคาร์บอนต่ำเกินไป ซึ่งอาจจะต้องนำไปผ่านกรรมวิธีเพิ่มคาร์บอนที่ผิวงานก่อน จึงจะสามารถนำไปชุบผิวแข็งได้

3.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium carbon steel) มีธาตุผสมอยู่ระหว่าง 0.30-0.65% จะมีความแข็งมากขึ้น รับแรงทางกลได้ดี ใช้ทำรางรถไฟ เพล่า เป็นต้น ถ้ามีคาร์บอนมากกว่า 0.50% จะชุบแข็งได้เฉพาะบริเวณผิวงานเท่านั้น

3.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High carbon steel) มีคาร์บอนในส่วนผสมอยู่ระหว่าง 0.65-1.40% มีคุณสมบัติแข็ง รับแรงทางกลได้มากขึ้น ใช้ทำเครื่องมือตัด ดอกสว่าน สกัด กรรไกร มีดกลึง ลูกปืน เป็นต้น สามารถนำไปชุบแข็งได้ดี แต่เมื่อชุบแข็งแล้ว ชิ้นงานจะเปราะแตกหักง่าย ในการใช้งานต้องระวังการแตกหักของชิ้นส่วนด้วย

### ไมโครมิเตอร์ (Micrometer)

ไมโครมิเตอร์ ถูกประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกโดย วิลเลียม กาสคอยน์ นักดาราศาสตร์ชาวอังกฤษ โดยดัดแปลงมาตรเวอร์เนียร์ที่ทำได้เพียงขยับตามความกว้างและความยาวของวัตถุ ให้สามารถวัดได้ละเอียดโดยการหมุน ในครั้งนั้นไมโครมิเตอร์ถูกใช้สำหรับวัดระยะทางเชิงมุมระหว่างดาว และขนาดปรากฏของวัตถุท้องฟ้า ซึ่งต่อมา เฮนรี มอดสลีย์ (Henry Maudsley) วิศวกรชาวอังกฤษได้ประดิษฐ์ไมโครมิเตอร์แบบตั้งโต๊ะ (Bench micrometer) ซึ่งเป็นเครื่องมือรุ่นแรกที่ใช้วัดแล้วได้ผลละเอียดดีมาก จนเขาได้สมญานามว่า "รัฐมนตรียุติธรรม" (The lord chancellor) ในปี พ.ศ.2387 โจเซฟ วิตเวิร์ท (Joseph Whitworth) ได้เปิดเผยการออกแบบไมโครมิเตอร์ชนิดตั้งโต๊ะของเขาที่ดัดแปลงมาจากของมอดสลีย์ ในเอกสารกล่าวไว้ว่า ไมโครมิเตอร์สร้างบนฐานเหล็กหล่อที่แข็งแรง ทั้งสองด้านของฐานมีทรงกระบอกเหล็กขัดมัน ซึ่งสามารถขยับได้โดยการหมุนสกรูปลายของกระบอกเหล็กส่วนที่ใช้วัดทำเป็นรูปครึ่งทรงกลม ที่สกรูมีเฟืองขัดไว้ซึ่งจะขยับทีละหนึ่งในพันนิ้ว

ต่อมาในปี พ.ศ. 2391 ฌ็อง โลว์รอง ปาลเม (Jean Laurent Palmer) ชาวกรุงปารีส คิดค้น ไมโครมิเตอร์ชนิดมือถือ โดยย่อส่วนของไมโครมิเตอร์ที่ฝั่งอังกฤษได้คิดค้นขึ้น ด้วยเหตุนี้ชื่อ ปาลเม จึงได้เป็นชื่อเครื่องมือไมโครมิเตอร์ในฝรั่งเศส นอกเหนือจากที่เรียกกันทั่วไปว่า มิครอเม็ทร์ เครื่องมือที่คิดค้นใหม่นี้ถูกนำไปผลิตขายเชิงพาณิชย์ โดยบริษัท Brown & Sharpe ในปี พ.ศ. 2410 นับแต่นั้นมาไมโครมิเตอร์ได้รับการพัฒนาปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการปรับปรุงที่สำคัญหนึ่งในนั้น ได้แก่ การเพิ่มความเที่ยงตรงของการวัด โดยเอ็ดเวิร์ด มอร์ลีย์ (Edward Morley) นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกันในปี พ.ศ. 2431

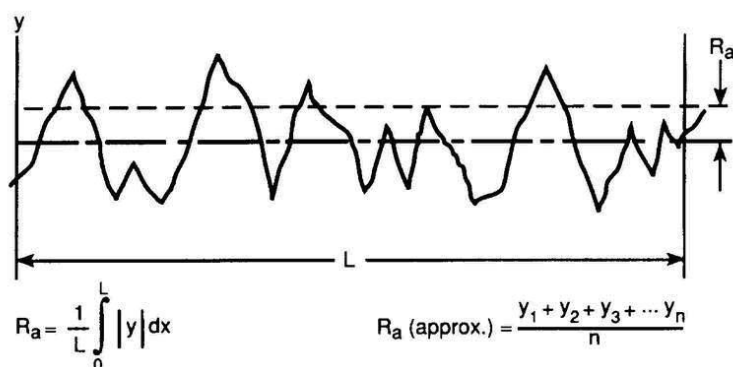
ปัจจุบันไมโครมิเตอร์มีการพัฒนาเป็นหลายชนิด เพื่อให้สามารถวัดวัตถุในลักษณะต่าง ๆ ตามความสะดวก ซึ่งสามารถแยกไมโครมิเตอร์ออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ไมโครมิเตอร์วัดภายนอก ไมโครมิเตอร์วัดภายใน และไมโครมิเตอร์วัดความลึก

### ค่าความหยาบผิว (Surface roughness)

การตรวจสอบสภาพพื้นผิวชิ้นงาน (Surface finish measurement) มีความสำคัญมากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากหลากหลายสาเหตุ แต่หนึ่งในสาเหตุต่าง ๆ เหล่านั้น คือ อิทธิพลจากกระบวนการผลิตที่ซับซ้อนในปัจจุบัน โดยใช้เหตุผลของคุณภาพสูงที่สุดและความน่าเชื่อถือสูงที่สุดของผลิตภัณฑ์ เมื่อนำไปใช้งาน และด้วยเหตุที่ค่าพิคัดเผื่อ (Tolerances) ของชิ้นงานเอง ก็เริ่มที่จะถูกบีบให้มีค่าที่แคบลงเรื่อย ๆ และผลของความเรียบของผิวงานสำเร็จก็เริ่มถูกคำนึงถึงว่ามีส่วนสำคัญเช่นกัน โดยค่าความเรียบผิวจะมีผลหรือสามารถวิเคราะห์หาผลของกรรมวิธีการผลิต เช่น การควบคุมสภาพแวดล้อม ผลของประสิทธิภาพการทำงาน ความเหมาะสมของขบวนการผลิตที่จะทำให้สภาพแวดล้อมการผลิตเหมาะสมต่อชิ้นงาน ขนาดที่แท้จริงของชิ้นงานหลังจากชิ้นงานผ่านการใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง ค่าความเรียบผิวที่เหมาะสม ค่าคุณสมบัติของผิว และวิธีการผลิตที่ถูกต้อง จะทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง จากการออกแบบขั้นตอนการผลิตที่เหมาะสมและถูกต้อง จะทำให้สามารถเลือกกำหนดค่าและวิธีการวัดค่าความหยาบผิวที่เหมาะสมได้ ซึ่งไม่เพียงแต่จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพแต่จะทำให้เกิดขบวนการผลิตที่เหมาะสมภายใต้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำได้

ค่าความหยาบของผิว (Roughness) จะเกิดขึ้นเมื่อวัตถุถูกตัด โดยจะเกิดรอยทางเดินของมีดกลึงวนรอบชิ้นงาน และหากได้มีการขยายบริเวณพื้นผิวขึ้นมาดูจะพบรอยหยาบที่เกิดขึ้นจากทางเดินของมีดกลึง ซึ่งบ่งบอกส่วนประกอบความหยาบผิว (Roughness component) โดยที่เส้นแนวตั้งจะเรียกว่า ส่วนสูง (Amplitude) ที่เกิดจากความลึกป้อน (Depth of cut) และระยะระหว่างสันคลื่นจะเป็นตัวแทนของความยาวคลื่น ซึ่งเกิดจากความเร็วในการหมุน (Rotating speed) และความอัตราป้อน (Feed rate) ของมีดกลึง โดยที่การอ่านค่าความหยาบผิวจะอ่านได้หลายวิธี แต่

ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะค่า Roughness average (Ra) ซึ่งก็คือ ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของผลรวมของค่าจำนวนเต็มที่แทนค่าระยะเบี่ยงเบนของเส้นกราฟออกจากเส้นศูนย์ในช่วงระยะอ่านค่า (L)



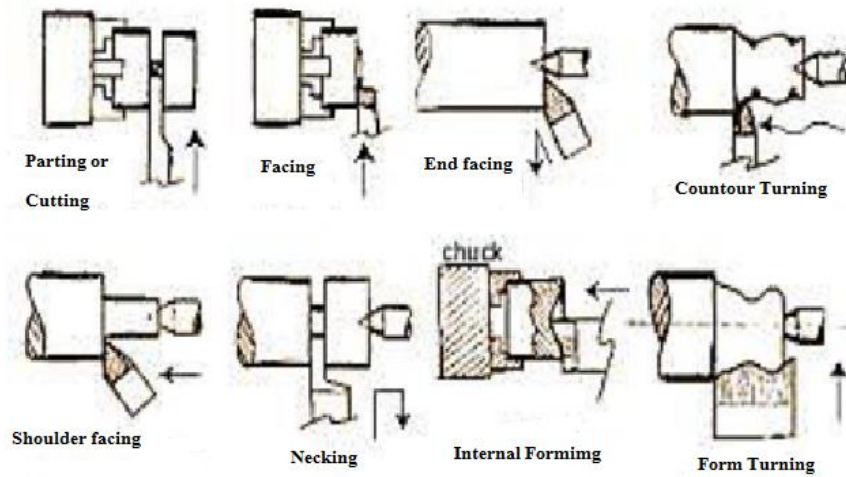
ภาพที่ 2-1 วิธีการคำนวณค่าความหยาบผิวแบบ Ra

### งานกลึง (Turning)

งานกลึงเป็นกระบวนการขึ้นรูปงานในลักษณะของงานทรงกระบอกเป็นหลัก ลักษณะงานกลึงประกอบด้วย งานกลึงปาดหน้า งานกลึงปอก งานกลึงเกลียว งานกลึงคว้านรูใน งานกลึงเจาะร่อง และงานกลึงตัด เป็นต้น

เครื่องจักรที่ใช้ขึ้นรูปงานกลึงคือ เครื่องกลึง (Lathe) มีทั้งเครื่องกลึงที่เป็นการควบคุมแบบธรรมดา (Manual lathe) และเครื่องกลึงที่ควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ (CNC lathe) นอกจากงานที่กล่าวมาในข้างต้นแล้ว เครื่องกลึงยังสามารถทำงานได้อีกหลายอย่าง เช่น เจาะรู (Drill) และตีปเกลียว (Tapping) เป็นต้น

ลักษณะการขึ้นรูปของงานกลึงนั้น ชิ้นงานจะยึดติดอยู่กับที่และหมุนรอบตัวเองอยู่บนหัวจับ (Spindle) ของเครื่องกลึง หลังจากนั้นเครื่องมือตัด (Cutting tool) จะเคลื่อนที่เข้าตัดชิ้นงานเพื่อตัดชิ้นงานให้เป็นรูปร่างต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 2-2

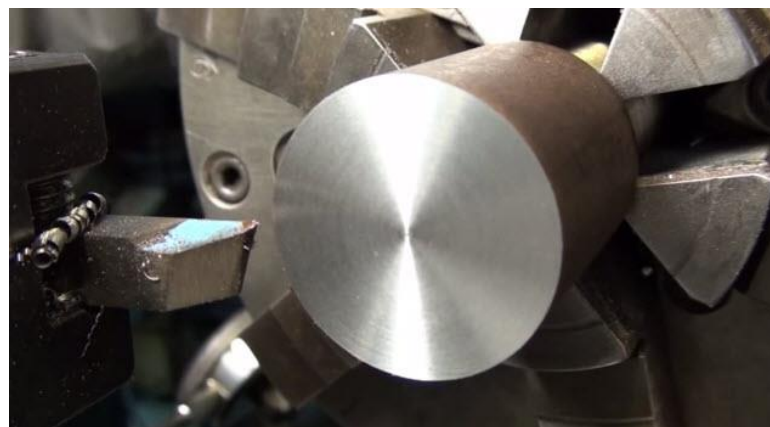


ภาพที่ 2-2 การกลึงลักษณะต่างๆ

## 1. ประเภทของงานกลึง

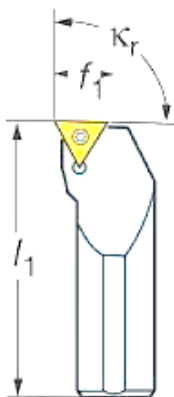
### 1.1 งานกลึงปาดหน้า

งานกลึงปาดหน้าเป็นลักษณะการกลึงปาดผิวหน้าตัดของชิ้นงานออก ซึ่งในขณะที่กลึงชิ้นงานจะหมุนรอบตัวเอง และมีดอกกลึงจะเคลื่อนที่เข้าออกในแนว X (ด้านตั้งฉากกับ spindle) เพื่อปาดผิวหน้า และเลื่อนซ้ายขวาในแนวแกน Z (แนวเดียวกับ spindle) เพื่อควบคุมความยาวของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 การกลึงปาดหน้า

มีดกลึงที่ใช้ในการกลึงปาดหน้ามีหลายรูปทรงแต่ที่นิยมใช้กันมากคือ รูปทรงสามเหลี่ยม หรือมีดกลึงชนิด T (Triangle) ดังแสดงในภาพที่ 2-4 มีมุม 60 องศา สามารถกลึงงานได้ 3 มุม การเลือกขนาดรัศมีปลายมีดกลึง (R) ขึ้นอยู่กับความละเอียดของผิวปาดหน้าที่ต้องการ ถ้าต้องการผิวละเอียดมากก็ใช้ R ที่มีขนาดเล็ก เช่น 0.2-0.4 mm



ภาพที่ 2-4 มีดกลึงที่ใช้กลึงปาดหน้า

## 1.2 งานกลึงปอก

งานกลึงปอกเป็นลักษณะของการกลึงชิ้นงานตามแนวขนานเพลาจับยึดของเครื่องกลึง ถ้าเป็นการกลึงปอกภายนอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานจะเล็กลง ดังแสดงในภาพที่ 2-5 และถ้าเป็นการกลึงปอกภายในหรือกลึงคว้านรู เส้นผ่าศูนย์กลางของรูมีขนาดโตขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2-6



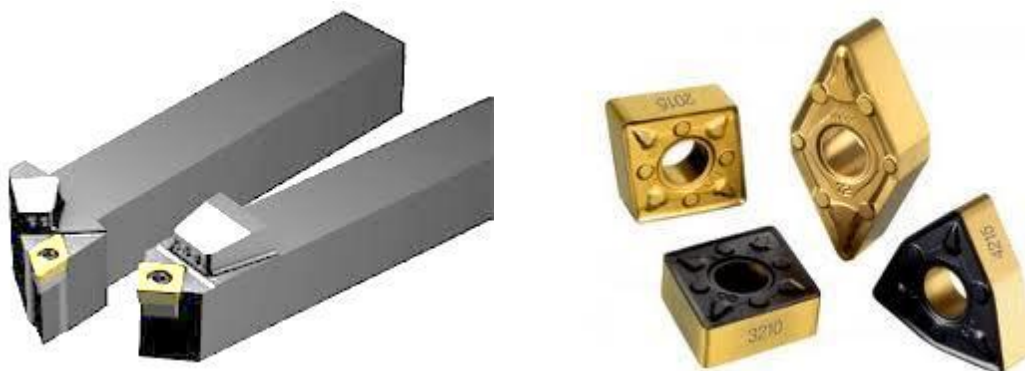
ภาพที่ 2-5 การกลึงปอกภายนอก





ภาพที่ 2-6 การกลึงปอกภายในหรือการกลึงคว้านรู

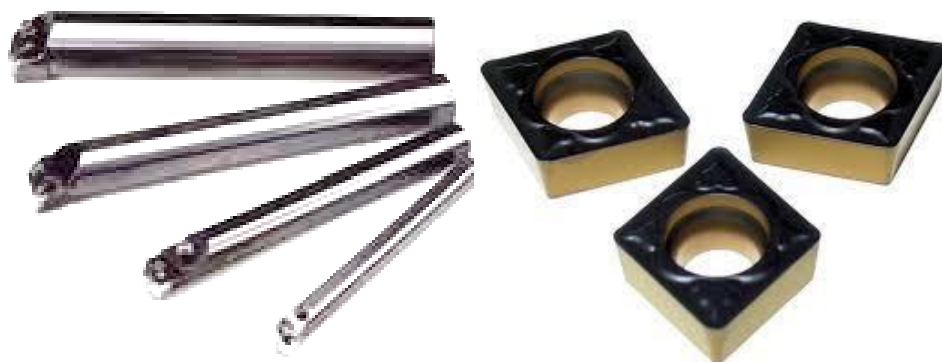
1.2.1 มีดกลึงสำหรับการกลึงปอกภายนอก งานกลึงภายนอกทั่วไป เช่น กลึงลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตลอดแนวความยาว ไม่มีร่อง ไม่มีตักบ่า ส่วนมากจะใช้มีดกลึงที่มีรูปร่างเหมือนตัว W มีข้อดีคือ สามารถรับแรงในการกลึงได้มาก ปกติจะใช้ปลายมีดรัศมี R04 ถึง R08 สำหรับงานที่ไม่ต้องการความละเอียดมากนัก แต่ถ้าหากต้องการผิวงานที่มีความละเอียดมากขึ้น อาจจะต้องใช้มีด T ขนาด R02 เก็บผิวละเอียดอีกครั้ง ลักษณะของค้ำมีดกลึงก็จะเป็นสี่เหลี่ยม มีทั้งมีดซ้ายและมีดขวา ดังแสดงในภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 ค้ำมีดและมีดกลึงสำหรับการกลึงปอกทั่วไป

1.2.2 มีดกลึงสำหรับการกลึงปอกภายในหรือการกลึงคว้านรู ค้ำสำหรับจับยึดมีดกลึงก็จะถูกออกแบบมาให้เป็นทรงกระบอก เนื่องมาจากเป็นการทำงานตัดเฉือนภายในรู ขนาด

เส้นผ่านศูนย์กลางของด้ามจะต้องเล็กกว่าขนาดของรูชิ้นงาน เพื่อป้องกันมีดกลึงชนกับชิ้นงาน สำหรับมีดกลึงในการคว้านรูจะมีขนาดเล็กกว่ามีดกลึงสำหรับการกลึงปอกภายนอก เนื่องจากมีพื้นที่จำกัด ดังแสดงในภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 ด้ามมีดและมีดกลึงสำหรับการกลึงคว้านรู

2. ความเร็วตัด (Cutting speed) คือ ความเร็วที่คมมีดกลึงตัดหรือปาดผิวโลหะออก เมื่อโลหะหมุนครบ 1 รอบ คมมีดกลึงก็จะตัดโลหะเป็นแนวตัดยาวเท่าเส้นรอบวงพอดี ความเร็วตัดมีหน่วยเป็น เมตรต่อนาที หลักเกณฑ์การเลือกใช้ความเร็วตัดมีดังนี้

2.1 วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด (Cutting tools) ที่ทำมาจากเหล็กขอบสูง (High speed steel) สามารถใช้ความเร็วตัดเป็น 2 เท่า ของความเร็วตัดของมีดที่ทำมาจากวัสดุเหล็กคาร์บอน ส่วนวัสดุคมตัดที่มีส่วนผสมพิเศษออกไป สามารถใช้ความเร็วตัดได้มากกว่าเหล็กขอบสูง หรือตามที่ผู้ผลิตแนะนำ

2.2 ชนิดของวัสดุ (Material) ที่จะนำมาทำเครื่องมือตัดเนื่อง โดยทั่วไปวัสดุงานที่แข็งมากจะใช้ความเร็วตัดได้ต่ำกว่าวัสดุที่อ่อนกว่า

2.3 รูปร่างของคมตัด (Geometry cutting tool) มีผลต่อการทำงานอย่างมาก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะการกลึงในแต่ละรูปแบบ

2.4 ความลึกในการตัด (Depth of cut) ถ้าป้อนตัดลึกจะใช้ความเร็วรอบน้อยกว่าป้อนตัดตื้น เนื่องจากจะมีแรงต้านที่มากกว่าจากเศษของการกลึง

2.5 อัตราป้อน (Feed rate) ในการป้อนตัดงานหยาบ ความเร็วที่ใช้ในการตัดจะต่ำกว่าการป้อนตัดละเอียดที่จะใช้ความเร็วรอบได้สูงกว่า

2.6 การระบายความร้อน (Cutting and lubricant) ความเร็วตัดของวัสดุบางชนิดอาจเพิ่มสูงขึ้นได้เมื่อมีการระบายความร้อนที่ถูกต้อง ซึ่งสารระบายความร้อนนี้จะช่วยรักษาอุณหภูมิของคมตัดไม่ให้ร้อนสูงเกินไปในขณะทำงาน ช่วยให้อายุการใช้งานของมีดตัดยาวนานขึ้นได้

2.7 การจับงานให้มั่นคงแข็งแรง (Rigidity of the work) ในกรณีงานที่ถูกจับด้วยหัวจับ โพล์ออกมาสั้น ๆ จะใช้ความเร็วได้สูงกว่างานที่ถูกจับโพล์ออกมายาว

2.8 ความสามารถของสภาพเครื่องที่แข็งแรงมีกำลังสูงจะสามารถใช้ความเร็วตัดได้สูง แต่อย่างไรก็ตามอย่าใช้สูงจนคมตัดใหม่

2.9 กฎทั่วไปในการใช้ความเร็วตัดและอัตราป้อน

2.9.1 ถ้าอัตราป้อนเพิ่มขึ้น ความเร็วตัดต้องลดลง เมื่อความลึกของการตัดคงที่

2.9.2 ถ้าความเร็วตัดเพิ่มขึ้น อัตราป้อนต้องลดลง เมื่อความลึกของการตัดคงที่

2.9.3 ถ้าความลึกในการตัดเพิ่มขึ้น ความเร็วตัดต้องลดลง เมื่ออัตราป้อนคงที่

$$n = \frac{v}{\pi d} \quad (2-1)$$

$V$  = ความเร็วตัดงานกลึง (m/ min)

$n$  = ความเร็วรอบชิ้นงานกลึง (rev/ min)

$d$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานของงานกลึง (mm)

ผลกระทบของความเร็วตัดที่มีต่ออายุการใช้งานของมีดกลึงในการตัดเนื้อชิ้นงาน ถ้าใช้ความเร็วตัดที่ไม่เหมาะสมกับสภาพเงื่อนไขของงาน ซึ่งได้แก่ วัสดุงาน วัสดุมีดกลึง ขนาดของชิ้นงาน ก็จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการทำงานเพิ่มขึ้นได้ เช่น ถ้าใช้ความเร็วตัดสูงเกินไป ก็จะทำให้มีดกลึงสึกหรอได้เร็วกว่าปกติ นั่นก็คือ อายุการใช้งานของมีดกลึงสั้นลง และทำให้เสียเวลาในการเปลี่ยนมีดกลึงใหม่ ซึ่งเป็นการลดความสามารถในการผลิตและลดจำนวนชิ้นงานจากการผลิตลง เป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการทำงานโดยไม่เกิดมูลค่า

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดและอายุการใช้งานของมีดกลึงนั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้ ขณะที่ใช้ความเร็วตัดต่ำ ๆ การสึกหรอของมีดจะเป็นไปอย่างช้า ๆ ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิจากการเสียดสี ระหว่างมีดกลึงกับชิ้นงานจะมีค่าต่ำ แต่ถ้าใช้ความเร็วตัดสูงขึ้น ความร้อนระหว่างผิวมีดกลึงกับชิ้นงาน และเศษตัดจะมีมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการสึกหรอที่บริเวณผิวของมีดกลึงกับชิ้นงานที่เสียดสีกัน ซึ่งจะทำให้อายุการใช้งานของมีดกลึงสั้นลง โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดและอายุการใช้งานของมีดกลึงได้โดยสมการของ Taylor (Taylor's tool life equation)

3. อัตราป้อน (Feed rate) หมายถึง ระยะทางการเดินป้อนของมีดกลิ้งไปตามความยาวของชิ้นงานในแต่ละรอบของการหมุนของเพลลาของเครื่อง อาจพิจารณาจากความหนาของเศษตัด (Chips) เช่น การป้อนตัด 0.5 mm หมายถึง มีดตัดเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 0.5 mm ตามความยาวของชิ้นงานขณะที่ชิ้นงานหมุน 1 รอบ ดังนั้นถ้าเพลลาเครื่องจักรหมุนได้ 20 รอบ คมตัดจะเคลื่อนที่เป็นระยะทาง  $0.5 \times 20 = 10.0$  mm ในกรณีที่ทำการตัดเนื้อผิวงานออกเพียง 2 ครั้ง เพื่อให้ได้ผิวงานสำเร็จขั้นสุดท้าย ควรตัดเนื้อผิวงานออก 1 ครั้ง แล้วจึงตัดเนื้อผิวงานขั้นสุดท้าย เศษกลิ้งขณะที่ทำการกลิ้งไหลออกมาเร็วมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ผิวงานออกมาไม่เรียบ การกลิ้งลักษณะนี้เรียกว่า การกลิ้งหยาบ เศษกลิ้งขณะทำงานไหลออกมาน้อย ผิวงานเรียบ เรียกวิธีการกลิ้งลักษณะนี้ว่า การกลิ้งละเอียด ส่วนมากจะใช้กลิ้งในขั้นสุดท้าย จะได้ผิวเรียบและขนาดถูกต้องตามแบบกำหนด

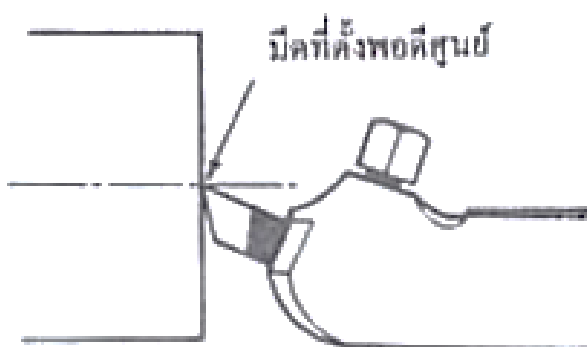
$$\text{ระยะทางเดินมีดกลิ้งต่อนาที} = \text{Feed} \times \text{RPM} \quad (2-2)$$

RPM = จำนวนรอบต่อนาที (rev/ min)

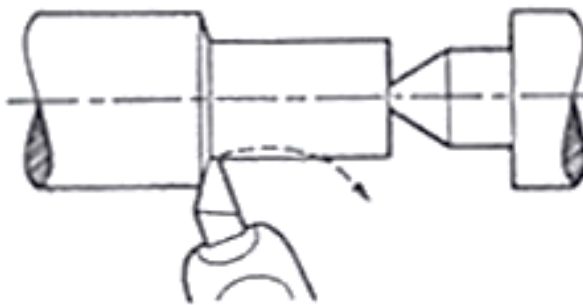
Feed = อัตราป้อนตัด (mm/ rev)

#### 4. การตั้งมีดกลิ้งทำงาน

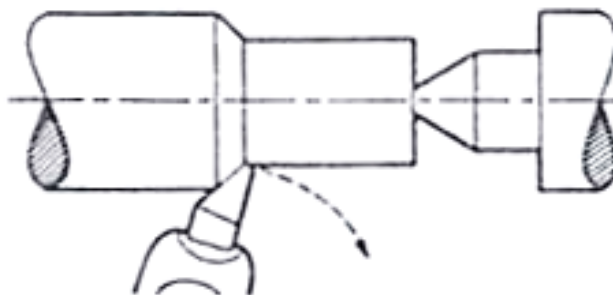
ลักษณะของมีดที่ตั้งต่ำกว่าศูนย์กลาง เมื่อตัดเนื้อแล้วจะเกิดการตัดเนื้อไม่หมด ทำให้เกิดการหักได้ง่าย คมมีดอาจจะแตกบิ่นและทำให้เกิดชิ้นงานเสียหายได้ ลักษณะของมีดที่ตั้งพอดีศูนย์กลางของงาน การปาดผิวหน้าของงานหรือการตัดขาดจะทำได้ดี โดยมีดและงานไม่เสียหาย ลักษณะของมีดที่ตั้งอยู่สูงกว่าศูนย์กลางของงาน ปลายมีดจะอัดกับงานทำให้แตกหักและงานจะถูกตัดเนื้อไม่ตลอดทั้งชิ้นงาน



ภาพที่ 2-9 การตั้งมีดกลิ้งพอดีศูนย์



ภาพที่ 2-10 การตั้งมีดกลึงเอียงเข้าหาหัวเครื่อง

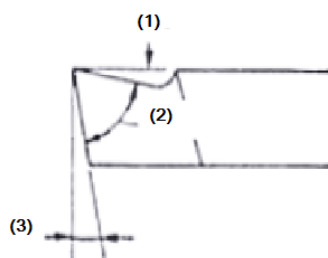


ภาพที่ 2-11 การตั้งมีดกลึงเอียงหนีหัวเครื่อง

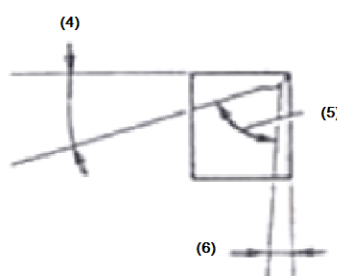
### 5. มุมของมีดกลึงที่เหมาะสมกับวัสดุงาน

มีดกลึงโดยทั่วไปจะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมตันซึ่งมีชื่อขายกันอยู่ทั่วไป ทั้งยังแบ่งเป็นขนาดต่าง ๆ ตามการใช้งาน ก่อนที่จะนำมีดกลึงไปใช้งานจะต้องมีการลับแต่งมีดให้เกิดคมตัดเสียก่อน ส่วนต่าง ๆ ที่ถูกลับออกไปจะทำให้เกิดมุมขึ้น ซึ่งสามารถเรียกมุมต่าง ๆ ได้ ดังนี้

- 5.1 มุมคายเศษ (Top rake angle) ดังแสดงในภาพที่ 2-12 หมายเลข 1
- 5.2 มุมคมตัดหน้า (Front cutting angle) ดังแสดงในภาพที่ 2-12 หมายเลข 2
- 5.3 มุมหลบหน้า (Front clearance angle) ดังแสดงในภาพที่ 2-12 หมายเลข 3
- 5.4 มุมหลบข้าง (Side rake angle) ดังแสดงในภาพที่ 2-13 หมายเลข 4
- 5.5 มุมคมตัดข้าง (Side cutting angle) ดังแสดงในภาพที่ 2-13 หมายเลข 5
- 5.6 มุมหลบข้าง (Side clearance angle) ดังแสดงในภาพที่ 2-13 หมายเลข 6



ภาพที่ 2-12 ภาพด้านข้างของมีดกลึง



ภาพที่ 2-13 ภาพด้านหน้าของมีดกลึง

ลักษณะคมตัด (Tool angle) เมื่อทำการตัดเฉือนผิวงานปลายคมตัดจะตะแคงอยู่ที่ผิวงาน โดยทำการตัดเฉือนเนื้อโลหะออกด้วยมุมตัด แล้วดันเศษโลหะคายออกทางด้านมุมคาย และลดการเสียดสีด้วยการทำมุมหลบ

ค่ามุมต่าง ๆ ของมีดกลึงที่ใช้ในการกลึงวัสดุต่างชนิดกัน เนื่องจากความแข็ง ความเปราะ และความเหนียวของวัสดุแต่ละชนิดไม่เท่ากัน จึงได้มีการทดลองลับมีดที่มุมต่าง ๆ และได้กำหนดเป็นหลักในการลับมุมมีดสำหรับการกลึงงาน ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ค่ามุมต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับวัสดุงาน

| ตารางค่ามุมต่าง ๆ ของมีดที่เหมาะสมกับวัสดุงาน |                    |                   |             |              |                        |                       |
|---|--------------------|-------------------|-------------|--------------|------------------------|-----------------------|
| วัสดุงานที่นำมา<br>กลึง                       | Front<br>clearance | Side<br>clearance | Top<br>rake | Side<br>rake | Front cutting<br>angle | Side cutting<br>angle |
| Low carbon steel                              | 8°                 | 12°               | 15°         | 17°          | 67°                    | 61°                   |
| Medium carbon<br>steel                        | 8°                 | 10°               | 12°         | 15°          | 70°                    | 65°                   |

## ตารางที่ 2-1 (ต่อ)

| ตารางค่ามุมต่าง ๆ ของมีดที่เหมาะสมกับวัสดุงาน |                    |                   |             |              |                        |                       |
|---|--------------------|-------------------|-------------|--------------|------------------------|-----------------------|
| วัสดุงานที่นำมา<br>กลึง                       | Front<br>clearance | Side<br>clearance | Top<br>rake | Side<br>rake | Front cutting<br>angle | Side cutting<br>angle |
| High carbon<br>steel                          | 8°                 | 10°               | 8°          | 12°          | 74°                    | 68°                   |
| Cast iron                                     | 8°                 | 8°                | 5°          | 12°          | 77°                    | 70°                   |
| Brass   | 8°                 | 10°               | 0°          | 0°           | 82°                    | 80°                   |
| Bronze  | 8°                 | 10°               | 0°          | 0°           | 82°                    | 80°                   |
| Aluminum                                      | 8°                 | 12°               | 15°         | 15°          | 47°                    | 63°                   |

## อายุการใช้งานของเครื่องมือตัด (Tool life)

เครื่องมือตัดเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดชิ้นงานให้ได้รูปร่างตามแบบ ซึ่งในการใช้งานจะเกิดการเสื่อมสภาพลงเนื่องจากการเสียดสีและอุณหภูมิที่สูง และถ้าเกิดการพังเสียหายจะมีผลกระทบทำให้ชิ้นงานไม่ได้คุณภาพตามไปด้วย ดังนั้นการกำหนดอายุการใช้งานจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อระบบการผลิตในปัจจุบัน เพราะยิ่งอายุการใช้งานนานเท่าไรนั้นหมายถึงต้นทุนที่ต่ำลงและทำให้สามารถแข่งขันในตลาดการค้าได้ดียิ่งขึ้น

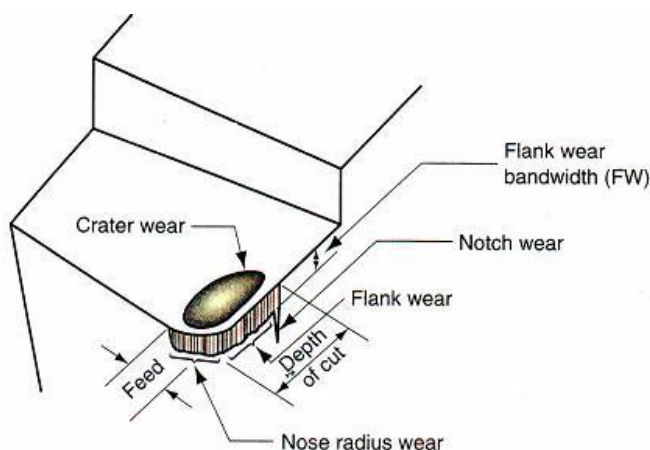
1. การพังของมีดตัด (Tool failure) อันเกิดมาจากการใช้งาน มีสาเหตุมาจากหลาย ๆ รูปแบบ ทั้งในส่วนของวัสดุดิบ อุณหภูมิ และเงื่อนไขในการตัดเฉือน ดังแสดงในภาพที่ 2-14 ซึ่งสามารถแยกตามลักษณะการเสียหายที่เกิดขึ้นได้ 3 ลักษณะ

1.1 การพังเนื่องจากการแตกหัก (Fracture failure) เกิดขึ้นเนื่องจากแรงในการตัดมีค่าสูงมาก วัสดุที่ใช้ทำมีดกลึงไม่สามารถทนรับแรงได้ทำให้เกิดจากแตกหักทันที โดยเฉพาะในวัสดุที่มีความเปราะ

1.2 การพังเนื่องจากอุณหภูมิ (Temperature failure) เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการตัดมีค่าสูงเกินกว่าที่วัสดุที่ใช้ในการทำมีดตัดจะทนได้ หรืออาจเกิดจากระบบการหล่อเย็นที่ด้อยคุณภาพ ทำให้เกิดการอ่อนตัวลงของมีดกลึง และเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของมีดกลึง (Plastic deformation) เป็นผลให้เกิดการสูญเสียคมในการตัด

1.3 การสึกหรอ (Gradual wear) การสึกหรอที่ละเล็กละน้อยของคมตัดจะมีผลต่อการสูญเสียรูปร่างของมีดตัด และการลดลงของประสิทธิภาพการตัด ที่สภาวะสุดท้ายของมีดตัดจะมีลักษณะคล้ายการพังเนื่องจากอุณหภูมิ

การพังเนื่องจากการแตกหักและอุณหภูมิทำให้เกิดสูญเสียการใช้งานของมีดตัดก่อนเวลา ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนาในงานตัด แต่การพังเนื่องจากการสึกหรอนั้นสามารถพิจารณาการใช้งานและยืดอายุการใช้งานของมีดตัดได้ คุณภาพของงานเป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณาเช่นกัน เนื่องจากหากมีดตัดเสื่อมสภาพในระหว่างการตัดจะมีผลต่อผิวสำเร็จของชิ้นงาน อันเป็นผลให้ต้องมีการปรับผิวชิ้นงานใหม่ ความเสียหายเหล่านี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการเลือกสภาวะการตัดให้มีมีดตัดค่อย ๆ สึกหรอมากกว่าที่จะเสื่อมสภาพไปเนื่องจากการแตกหักหรือจากอุณหภูมิสูง และรวมถึงการเปลี่ยนมีดตัดก่อนที่การสูญเสียคมตัดจะเกิดขึ้น การสึกหรอของมีดตัด (Tool wear) จะเกิดขึ้นสองตำแหน่งบนมีดตัด ได้แก่ Top rake face และ Flank ซึ่งการสึกหรอของมีดตัดจะแยกได้เป็น 2 แบบ คือ Crater wear และ Flank wear ดังที่แสดงในภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-14 การสึกหรอของมีดตัด

1.3.1 Crater wear คือ ส่วนที่เป็นแอ่งเว้าลงไปบนผิวคาย (Rake face) ของมีดตัด อันเกิดเนื่องจากการไถลหรือเลื่อนตัวของเศษเหล็กตัดผ่านผิวส่วนนี้ของหน้ามีด ค่าความเค้น (Stress) และอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างมีดตัดและเศษเหล็ก เป็นผลทำให้เกิดการสึกหรอของมีดตัด ค่าการสึกหรอนี้สามารถวัดได้โดยพิจารณาจากขนาดความลึกหรือพื้นที่ของบริเวณที่เกิดการสึกหรอ



1.3.2 Flank wear จะเกิดขึ้นบนผิวหน้ามีดบริเวณที่เรียกว่า Flank หรือ Relief face ของมีดตัด เกิดเนื่องจากการขัดถูของผิวหน้างานใหม่กับขอบของมีดตัดบริเวณที่เรียกว่า Flank face การวัดขนาดของการสึกหรอนี้พิจารณาจากความกว้างของแถบ ดังที่แสดงในภาพที่ 2-14

## 2. สมการของเทย์เลอร์ (Taylor's tool life equation)

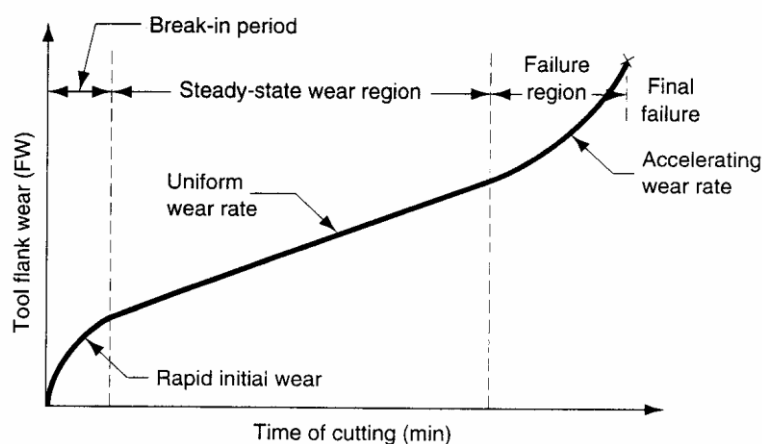
อายุการใช้งานของมีดตัด (Tool life) คือ ระยะเวลาที่สามารถใช้มีดตัดหรือเครื่องมือตัดได้ก่อนจะพัง แต่ในทางปฏิบัติมักจะไม่ใช่ใช้งานมีดตัดจนพัง เพราะยากต่อการนำมาลับคมใหม่ รวมถึงคุณภาพของชิ้นงานที่ต้องเสียไปเนื่องจากการใช้เครื่องมือตัดที่ไม่คมพอ ดังนั้นการพิจารณาอายุการใช้งานของมีดตัดจึงมักพิจารณาจากค่า flank wear เช่น การกำหนดอายุการใช้งานของมีดตัดไว้ที่ค่า  $FW = 0.500 \text{ mm}$  เป็นต้น

จากทฤษฎีของ Taylor สามารถแบ่งช่วงการสึกหรอของเครื่องมือตัดได้เป็น 3 ช่วง ดังที่แสดงในภาพที่ 2-15 คือ

2.1 Break-in-period เกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นของการใช้งานมีดตัด มักเป็น 2-3 นาทีแรกของการตัด ในช่วงนี้คมของมีดตัดจะเกิดการสึกหรออย่างรวดเร็วเนื่องจากแรงกระแทกของมีดตัดและชิ้นงานตอนเริ่มกระบวนการตัด

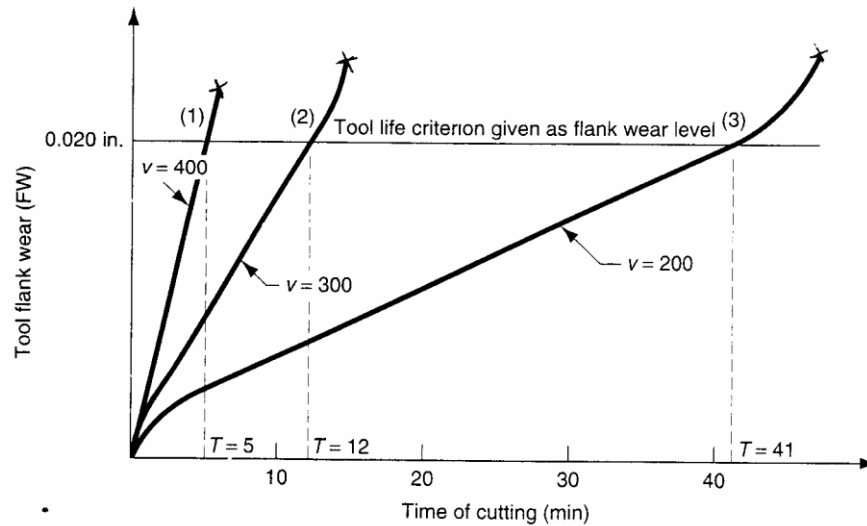
2.2 Steady-state wear region การสึกหรอจะเกิดมากขึ้นตามระยะเวลาของการตัด โดยปกติกราฟจะเป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าอัตราการสึกหรอเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ

2.3 Failure region เป็นช่วงที่อัตราการสึกหรอเกิดขึ้นสูงมาก อันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่บริเวณปลายคมตัดที่สูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการตัดของมีดตัดลดลง ถ้ายังใช้งานมีดตัดต่อจะเกิดการพังของมีดตัด



ภาพที่ 2-15 กราฟการสึกหรอของมีดตัดตามทฤษฎีของ Taylor

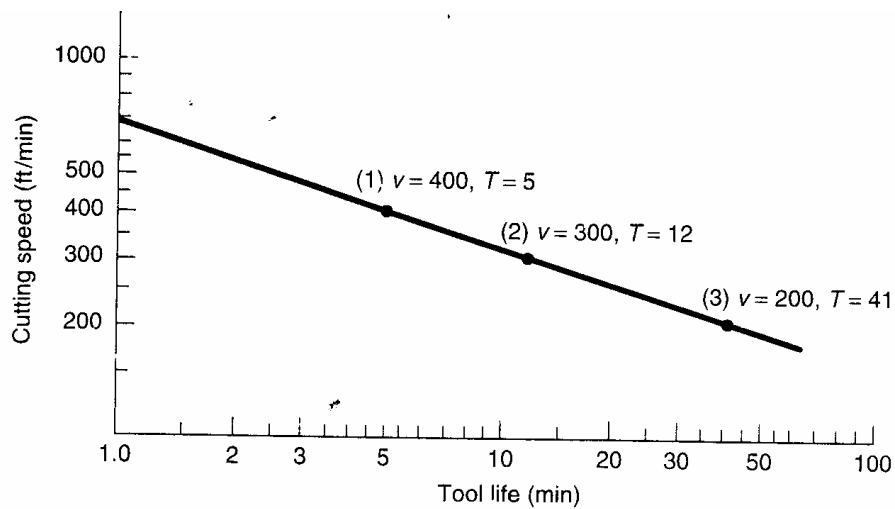
ความชันของเส้นกราฟการสึกหรอในช่วง Steady state จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำมีดตัดและเงื่อนไขการตัดเฉือน โดยวัสดุที่มีความแข็งสูงจะทำให้ค่าอัตราการสึกหรอของมีดตัดมีค่าต่ำลง และเงื่อนไขในการตัดเฉือนก็จะส่งผลต่อการสึกหรอด้วยเช่นกัน เพราะเมื่อมีการตัดเฉือนที่เร็วขึ้นก็จะส่งผลให้ค่าอัตราการสึกหรอสูงขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 2-16 อัตราการสึกหรอของมีดตัดที่ความเร็วในการตัดต่างกัน

ตัวอย่าง กราฟการสึกหรอของมีดตัดตามฟังก์ชันของเวลาที่ความเร็วในการตัด 200, 300 และ 400 ฟุต/ นาที ดังแสดงในภาพที่ 2-16 พบว่ามีดตัดนี้จะมีอายุการใช้งานเท่ากับ 41, 12 และ 5 นาที ตามลำดับ (FW=0.500 mm) หากนำค่าอายุการใช้งานของมีดตัดจากเส้นโค้งทั้งสามเส้นมาสร้างกราฟด้วยสเกลลอการิทึม (log-log graph) ดังแสดงในภาพที่ 2-17 โดยกำหนดให้อายุการใช้งานของมีดตัดเป็นแกนนอน และความเร็วในการตัดเป็นแกนตั้ง จะได้กราฟความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 2-0 ซึ่งความสัมพันธ์นี้ค้นพบโดย F.W. Taylor จึงเรียกสมการในการคำนวณอายุของมีดตัดนี้ว่า สมการอายุการใช้งานมีดตัดของเทย์เลอร์ (Taylor tool life equation) ดังแสดงในสมการที่ 2-3

$$vT^n = C \quad (2-3)$$



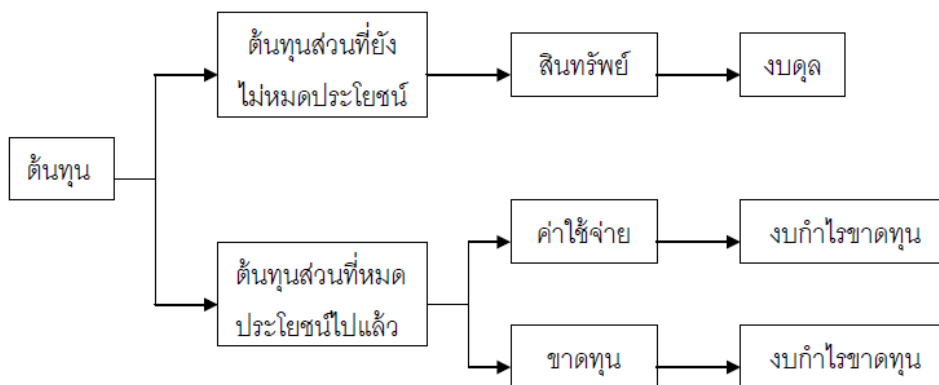
ภาพที่ 2-17 กราฟล็อกกาลีทึม (log-log graph)

ถึงแม้ว่าการใช้ค่าการสึกหรอของมิดตัดหรือค่า FW เป็นเกณฑ์พิจารณาอายุการใช้งานของมิดตัดตามสมการของเทย์เลอร์จะมีความถูกต้องเหมาะสมตามหลักการ แต่ในทางปฏิบัติวิธีนี้จะทำได้ยากโดยเฉพาะในการทำงานในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากความยุ่งยากและระยะเวลาในการวัดค่าการสึกหรอในฟังก์ชันของเวลา ดังนั้นให้พิจารณาความเหมาะสมของการกำหนดอายุการใช้งานของมิดตัดตามแต่ลักษณะการทำงานและนโยบายขององค์กร

### ต้นทุนการผลิต (Production cost)

ต้นทุน หมายถึง ทรัพยากรที่ต้องเสียไปเพื่อให้ได้มาซึ่งประโยชน์ในรูปแบบของสินทรัพย์หรือบริการ และจะใช้ประโยชน์ในอนาคต เช่น ต้นทุนของอาคารที่ยังเหลืออยู่หลังจากหักค่าเสื่อมราคาในงวดนั้น ๆ แล้ว ค่าเบี้ยประกันจ่ายล่วงหน้าที่เหลืออยู่หลังจากตัดเป็นค่าใช้จ่าย ในส่วนที่บริการคุ้มครองแล้วในงวดปัจจุบัน สินค้าคงเหลือที่ยังไม่ได้จำหน่ายออกไป เป็นต้น ต้นทุนที่ยังไม่ได้ใช้ประโยชน์เหล่านี้ จะแสดงเป็นสินทรัพย์อยู่ในงบดุล ณ วันสิ้นงวด

ค่าใช้จ่าย (Expenses) หมายถึง ส่วนของต้นทุนที่ถูกใช้ประโยชน์หมดไปแล้วในขณะนั้นหรือรอบระยะเวลาการดำเนินงานตามปกติ เช่น ค่าเสื่อมราคา ค่าเบี้ยประกัน ต้นทุนสินค้าที่ขาย ค่าโฆษณา เป็นต้น ส่วนของต้นทุนที่ถูกใช้ประโยชน์ไปแล้วหรือค่าใช้จ่ายจะแสดงอยู่ในงบกำไรขาดทุนสำหรับงวดระยะเวลาหนึ่ง ๆ ของธุรกิจ ดังแสดงในภาพที่ 2-18



ภาพที่ 2-18 แผนผังรายละเอียดของต้นทุน

การจำแนกประเภทต้นทุนจำแนกได้หลายรูปแบบในแต่ละความหมายขึ้นอยู่กับลักษณะของกิจการ ความต้องการของผู้บริหารและวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ซึ่งในที่นี้จะแบ่งต้นทุนตามส่วนประกอบการผลิตของผลิตภัณฑ์ ซึ่งปัจจัยที่เป็นส่วนประกอบสำคัญ ได้แก่ วัสดุทางตรง ค่าแรงงานทางตรง และค่าใช้จ่ายการผลิต จึงสามารถแบ่งต้นทุนตามลักษณะนี้ได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

1. วัสดุคิบทางตรง (Direct materials) คือ วัสดุคิบที่เป็นปัจจัยสำคัญในการผลิต ในการแปรสภาพเป็นสินค้าสำเร็จรูป สามารถคำนวณปริมาณได้ว่าในหนึ่งหน่วยผลิตภัณฑ์ใช้เท่าไร ในการผลิตสินค้าแต่ละชนิด วัสดุทางตรงอาจเป็นชนิดเดียวหรือหลายชนิดก็ได้ ขึ้นอยู่กับสัดส่วนการใช้ที่ถือเป็นปัจจัยสำคัญ เช่น ไม้ในการผลิตเฟอร์นิเจอร์ถือเป็นวัสดุทางตรง สามารถวัดปริมาณได้ว่าใน 1 หน่วยใช้เท่าไร หนังสือใช้ทำรองเท้าถือเป็นวัสดุทางตรงใน 1 คู่ สามารถวัดประมาณได้ว่าใช้เท่าไร ส่วนวัสดุอื่น ๆ ที่ใช้ในการผลิตรองเท้า เช่น ตะปู ค้าย กาว เป็นต้น ถือเป็นวัสดุคิบทางอ้อม ที่ช่วยให้การผลิตรองเท้าสำเร็จ ไม่ได้เป็นวัสดุที่เป็นปัจจัยสำคัญแต่ขาดไม่ได้ จะจัดอยู่ในส่วนประกอบของการผลิตคือค่าใช้จ่ายการผลิต

2. ค่าแรงงานทางตรง (Direct labor) คือ จำนวนเงินค่าจ้างที่กิจการจ่ายให้แก่พนักงาน ลูกจ้าง ที่ช่วยแปรสภาพวัสดุคิบเป็นสินค้าสำเร็จรูป เป็นค่าแรงงานที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์โดยตรง สามารถวัดจำนวนการทำงานได้แน่นอนในรูปของชั่วโมงการทำงาน นำมาคิดเข้าเป็นต้นทุนต่อหน่วยของผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น ในการผลิตโต๊ะ ค่าแรงคนงานที่จ่ายให้กับคนงานแผนกตัดไม้ แผนกประกอบ และแผนกขัดเงา เป็นค่าแรงงานทางตรง สามารถวัดได้ว่าในการผลิตโต๊ะ 1 ตัว แผนกตัดไม้ใช้กี่ชั่วโมง แผนกประกอบใช้กี่ชั่วโมง และแผนกขัดเงาใช้กี่ชั่วโมง นำมาคำนวณต้นทุนต่อหน่วยของ โต๊ะออกมาได้ ส่วนค่าแรงงานที่ไม่เกี่ยวกับผลิตโดยตรง แต่เป็นองค์ประกอบที่

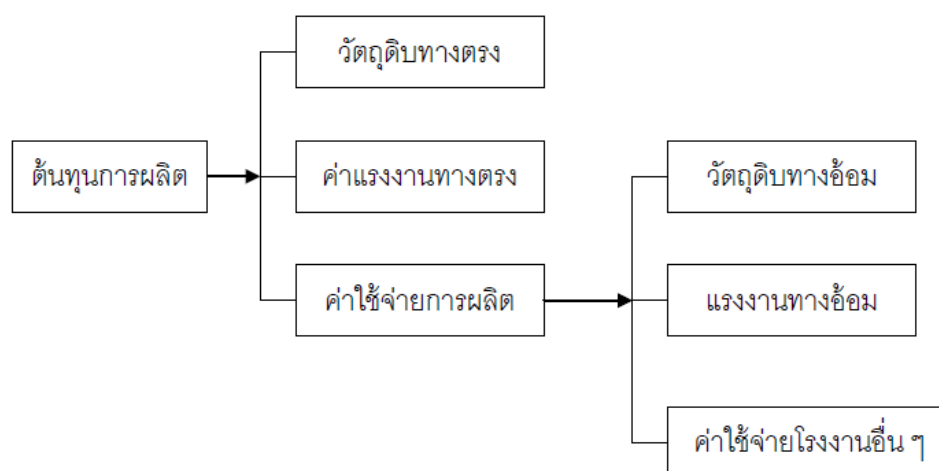
ทำให้การผลิตสำเร็จลงได้ เช่น ค่าแรงงานหัวหน้าคนงาน ค่าแรงคนงานประจำเครื่องจักร ค่าแรงงานในการยกขนวัสดุ ภารโรง และยามเฝ้าโรงงาน เป็นต้น ค่าแรงงานเหล่านี้ เรียกว่า ค่าแรงงานทางอ้อม ซึ่งจะจัดอยู่ในส่วนประกอบของการผลิตคือค่าใช้จ่ายการผลิต

3. ค่าใช้จ่ายการผลิต (Manufacturing overhead) คือ ต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับการผลิตทั้งหมด นอกเหนือวัสดุทางตรงและแรงงานทางตรงที่ทำให้การผลิตสำเร็จลงได้เป็นสินค้าสำเร็จรูปหรือผลิตภัณฑ์ ได้แก่ วัสดุทางอ้อม แรงงานทางอ้อม และค่าใช้จ่ายการผลิตอื่น ๆ ค่าใช้จ่ายการผลิตสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้

3.1 ค่าใช้จ่ายการผลิตผันแปรคือ ค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับการผลิตที่มีพฤติกรรมต้นทุนเปลี่ยนแปลงไปตามกิจกรรมที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น วัสดุทางอ้อม แรงงานทางอ้อม ค่าไฟฟ้า เป็นต้น

3.2 ค่าใช้จ่ายการผลิตคงที่คือ ค่าใช้จ่ายการผลิตที่เกี่ยวข้องกับการผลิตที่มีต้นทุนรวมคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามกิจกรรม เช่น ค่าเช่าโรงงาน ค่าประกันภัยโรงงาน ค่าเสื่อมราคาโรงงาน ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักร เป็นต้น

ค่าใช้จ่ายการผลิตจะเป็นส่วนหนึ่งในการผลิตสินค้า ซึ่งไม่สามารถระบุจำนวนการใช้ได้แน่นอนใน 1 หน่วย จะทราบได้ต้องใช้วิธีถ่วงเฉลี่ย จัดเป็นต้นทุนทางอ้อม สามารถแสดงการแบ่งต้นทุนตามส่วนประกอบการผลิตของผลิตภัณฑ์ได้ดังแสดงในภาพที่ 2-19



ภาพที่ 2-19 การแบ่งต้นทุนตามส่วนประกอบของการผลิต

### การออกแบบการทดลอง (Design of experiment)

สิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งขององค์กร คือ การจัดการด้านคุณภาพและผลิตภาพ ซึ่งใน 2 ด้านนี้ คุณภาพเป็นตัวแปรต้นที่ส่งผลโดยตรงต่อผลิตภาพ คุณภาพจึงเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการแข่งขันขององค์กรทั้งระยะสั้นกลาง และยาว โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อระดับคุณภาพ คือ ความผันแปร (Variation) ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่แน่นอน แต่อาจคาดเดาควบคุมหรือแม้กระทั่งกำจัดได้ด้วยวิธีการทางสถิติ ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ ไม่ว่าจะดำเนินการด้วยเทคนิคใดก็ตาม จำเป็นต้องมีเครื่องมือทางสถิติที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ เช่น การปรับปรุงคุณภาพด้วยหลักการของซิกซ์ซิกม่า (Six sigma) ซึ่งเชื่อว่าปัญหาของคุณภาพมีสาเหตุมาจากความผันแปรของปัจจัยต่าง ๆ ตามสมการที่ (2-4)

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2-4)$$

เมื่อ Y แทนคุณลักษณะทางคุณภาพ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าของตัวแปรสุ่ม X ต่าง ๆ โดย  $X_i$  แทนค่าของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการได้มา ซึ่งหากต้องการควบคุมค่า Y ให้อยู่ในช่วงที่กำหนดช่วงใด ๆ โดยทั่วไปจะหมายถึง ข้อกำหนด (Specification) ของกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ จะต้องมี การกำหนดระดับของ  $X_i$  ให้เหมาะสม การออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือที่ใช้เพื่อวัตถุประสงค์นี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อผู้ใช้มีความรู้ความเข้าใจอย่างเพียงพอ ตั้งแต่การออกแบบการทดลอง การทำการทดลอง การวิเคราะห์ การแปรผล และการนำไปประยุกต์ใช้ ทั้งนี้เพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ ผลิตง่าย มีความน่าเชื่อถือได้สูง สามารถใช้งานภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การซ่อมและการดูแลรักษาทำได้ง่าย องค์กรควรมีการวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพทุกขั้นตอน และกำจัดหรือควบคุมให้อยู่ในระดับที่จะไม่ส่งผลต่อผลลัพธ์ของการดำเนินการในแต่ละขั้นตอน ด้วยหลักการของการออกแบบการทดลอง หรือกล่าวได้ว่าการออกแบบการทดลองสามารถใช้ตั้งแต่การออกแบบเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ การปรับปรุงผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่แล้ว และการออกแบบกระบวนการผลิตอย่างเหมาะสม

การออกแบบการทดลอง (DOE) ทำเพื่อศึกษาผลของปัจจัยนำเข้า (Input) ต่อผลลัพธ์ที่สนใจคุณลักษณะทางคุณภาพ (Quality Characteristics) โดยการเปลี่ยนระดับของปัจจัยนำเข้าอย่างตั้งใจตามแผนการทดลองที่ออกแบบไว้

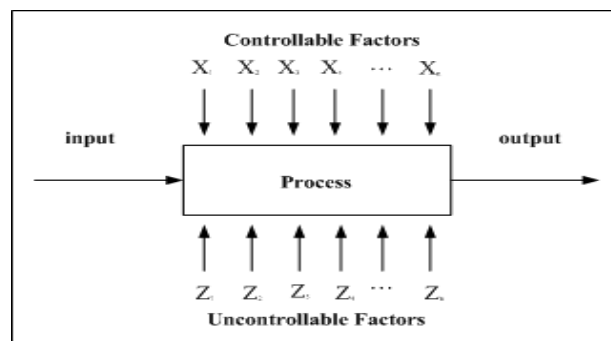
#### 1. วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

##### 1.1 บ่งชี้ปัจจัย x's ที่อิทธิพลต่อ Response

1.2 กำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัย  $x$ 's ที่อิทธิพลต่อ Response  $Y$  เพื่อให้  $Y$  มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับเป้าหมายมากที่สุด

1.3 กำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัย  $x$ 's ที่อิทธิพลต่อ Response  $Y$  เพื่อให้มีความผันแปรของค่า  $Y$  ต่ำ

1.4 กำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัย  $x$ 's ที่อิทธิพลต่อ Response  $Y$  เพื่อให้อิทธิพลของ Uncontrollable factor มีน้อยที่สุด



ภาพที่ 2-20 ตัวแบบทั่วไปของกระบวนการทดลอง

การออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างหนึ่งของการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ เช่น หากผลของการติดตามกระบวนการด้วยแผนภูมิควบคุมบ่งชี้ว่า กระบวนการอยู่นอกเหนือจากค่าควบคุม ซึ่งอาจมีปัจจัยจำนวนมากที่เป็นไปได้ที่จะเป็นสาเหตุของความผิดปกติ การที่จะปรับปรุงแก้ไขเพื่อนำกระบวนการกลับสู่ภาวะภายใต้การควบคุมจะเป็นไปได้อย่างไร หากไม่ทราบว่าปัจจัยตัวไหนที่ส่งผลต่อ Response อย่างมีนัยสำคัญ การออกแบบการทดลองจึงเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้เพื่อบ่งชี้ปัจจัยเหล่านี้ ทั้งนี้หากมีการประยุกต์หลักการของ DOE ตั้งแต่เริ่มต้นพัฒนาผลิตภัณฑ์จะนำไปสู่ผลการดำเนินการที่ดีขึ้นทั้งในด้านของ ผลผลิต คุณภาพ เวลา และ ต้นทุนการผลิต ซึ่งกล่าวได้ว่าการประยุกต์ใช้ DOE อย่างมีประสิทธิภาพ จะส่งผลต่อการปรับปรุงด้านความสามารถในการผลิต (Manufacturability) สมรรถนะ (Performance) ความน่าเชื่อถือ (Reliability) ต้นทุน (Cost) และ ระยะเวลาในการพัฒนา (Development time) ของผลิตภัณฑ์ที่ดีขึ้น

## 2. ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

เพื่อให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DOE มีความน่าเชื่อถือ นำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นที่ผู้วิเคราะห์ต้องมีเป้าหมายการศึกษา Response ที่สนใจ ปัจจัยที่คาดว่าจะ

ส่งผลต่อ Response วิธีการเก็บข้อมูล ตลอดจนแนวทางการวิเคราะห์อย่างชัดเจน ซึ่งได้สรุปแนวทางการศึกษาด้วย DOE ไว้ดังนี้

2.1 การศึกษาปัญหา ในขั้นตอนนี้ ผู้วิเคราะห์ต้องตระหนักว่าปัญหาคืออะไร ต้องการข้อมูลจากแหล่งใดบ้าง เพื่อกำหนดเป้าหมายของการศึกษาให้ชัดเจน การศึกษาในขั้นตอนนี้บ่อยครั้งที่พบว่ามีส่วนทำให้ผู้วิเคราะห์เข้าใจกระบวนการได้ดียิ่งขึ้น และนำไปสู่แนวทางการแก้ปัญหาในที่สุด

2.2 การกำหนด Response ที่ต้องการศึกษา เป็นขั้นตอนที่ผู้ทำการทดลองต้องกำหนดคุณลักษณะทางคุณภาพที่มั่นใจได้ว่าเป็นสิ่งที่ต้องการปรับปรุงของกระบวนการที่ทำการศึกษาอยู่ อาจเป็นผลมาจากการทำ SPC ทั้งนี้ต้องมั่นใจได้ว่าระบบการวัดมีความสามารถเพียงพอ เนื่องจากระบบการวัดที่ไม่มีความสามารถจะทำให้การบ่งชี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อ Response ไม่ชัดเจน เพราะผลการทดลองจะบ่งชี้ความแตกต่างของผลของปัจจัยได้เฉพาะปัจจัยที่ส่งผลสูง ๆ เท่านั้น ในขณะที่ปัจจัยที่ส่งผลระดับต่ำถึงปานกลางจะไม่สามารถแบ่งแยกได้

2.3 การกำหนดปัจจัยที่ต้องการควบคุมและระดับของปัจจัย เป็นขั้นตอนที่ผู้ทำการทดลองต้องเลือกปัจจัยที่สงสัยว่าจะส่งผลต่อ Response พร้อมทั้งระดับของแต่ละปัจจัยที่ปรับเปลี่ยนได้ โดยต้องพิจารณาให้สอดคล้องกับสถานการณ์การดำเนินการจริง ซึ่งจะต้องอาศัยข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญและประสบการณ์ทำงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ หากกำหนดจำนวนปัจจัยและระดับของปัจจัยไม่ครอบคลุม จะทำให้ไม่ได้ผลการทดลองที่นำไปสู่การแก้ปัญหาได้อย่างแท้จริง ในขณะที่การกำหนดมากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนและเวลาในการทดลอง อย่างไรก็ตามกรณีที่มีจำนวนปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก ผู้ทำการทดลองสามารถคัดกรองปัจจัยที่ต้องการทดลองเบื้องต้นก่อนที่จะทำการทดลองโดยละเอียดกับปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อ Response อย่างแท้จริงต่อไป

2.4 การกำหนดรูปแบบการทดลอง เมื่อ 3 ขั้นตอนแรกทำอย่างถูกต้อง ขั้นตอนนี้จะไม่ยุ่งยากนัก ผู้ทำการทดลองต้องเลือกรูปแบบของการทดลอง ซึ่งรวมถึงขนาดตัวอย่าง จำนวนครั้งในการทำการทดลองซ้ำ การกำหนดลำดับการทดลองอย่างสุ่ม เป็นต้น

2.5 การทดลองและการเก็บข้อมูล ผู้ทดลองต้องควบคุมการทดลองให้เป็นไปตามแผนที่วางไว้ ความผิดพลาดทั้งจากการทดลองและการเก็บข้อมูล จะส่งผลให้การทดลองไม่น่าเชื่อถือ และไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ห่ออะไรได้ เช่นการไม่ทำการทดลองตามหลักการของการสุ่ม จะส่งผลให้อิทธิพลของ Noise Factors ไม่กระจายเฉลี่ย ทำให้ผลของการทดลองแต่ละครั้งขึ้นอยู่กับผลการทดลองครั้งก่อนหน้า หรือครั้งอื่น ๆ หรือมี Autocorrelation ระหว่างข้อมูลจากการทดลอง เป็นต้น

2.6 การวิเคราะห์ข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูลทำตามหลักการของการวิเคราะห์



ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) การวิเคราะห์ด้วยกราฟ การวิเคราะห์สมการเส้นถดถอย ทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ในการวิเคราะห์จริงผู้วิเคราะห์มีซอฟต์แวร์ทางสถิติช่วยในการวิเคราะห์หลากหลายชนิด แต่อย่างไรก็ตามผู้วิเคราะห์ควรเข้าใจหลักการทางสถิติเพื่อการแปลความหมายที่ถูกต้องด้วย

### 2.7 การสรุปและนำเสนอแนวทางการปรับปรุง เมื่อทราบผลการวิเคราะห์

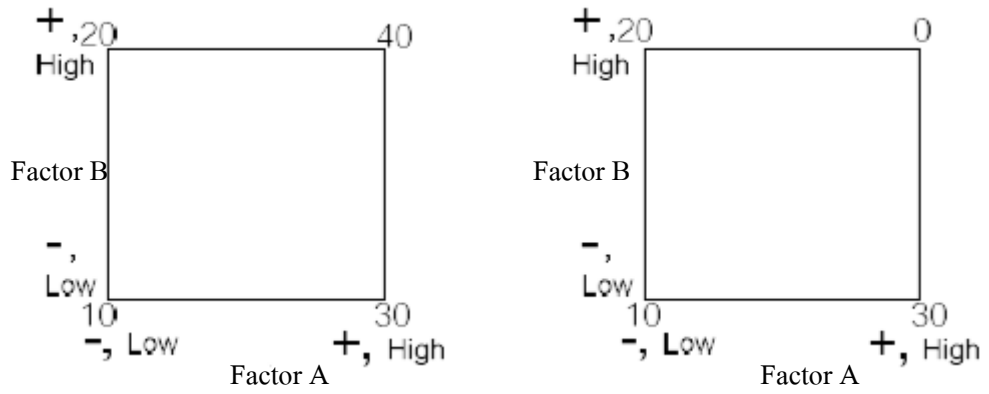
การสรุปผลและแนะนำการดำเนินการเพื่อปรับปรุงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง ผู้วิเคราะห์อาจใช้เครื่องมือ เช่น กราฟ เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ต่าง ๆ และผลที่คาดว่าจะได้รับจากการปรับปรุงแก่ผู้ที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ควรมีการทดลองเพื่อยืนยันข้อแนะนำการปรับปรุงอีกครั้งก่อนการประยุกต์ใช้จริง นอกจากนี้ควรมีการตรวจติดตามผลการปรับปรุงด้วยเครื่องมือของ SPC ที่เหมาะสมต่อไปด้วย

จากขั้นตอนทั้งหมด ขั้นตอนที่ 1-3 เป็นขั้นตอนการเตรียมการทดลอง ซึ่งต้องดำเนินการอย่างระมัดระวังเพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดขึ้นและได้ผลการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือ นำไปสู่การปรับปรุงได้อย่างแท้จริง โดยการดำเนินการตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1-7 สามารถทำเป็นรอบ ๆ ได้จากการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัย (Screening experiment) การทดลองโดยละเอียดเพื่อบ่งชี้ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ Response อย่างแท้จริง (Refining experiment) และการทดลองเพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่มีผลอย่างเหมาะสม (Optimizing experiment) ความผิดพลาดที่พบบ่อยในการนำ DOE ไปใช้กับงานจริงคือผู้ทดลองพยายามที่จะทำการทดลองขนาดใหญ่เพียงครั้งเดียว และสรุปผลให้ได้ ซึ่งจะเป็นสาเหตุของความผิดพลาดต่างๆ ที่ตามมาเช่น ข้อมูลที่ได้ไม่เป็นอิสระต่อกัน ความผันแปรของข้อมูลไม่คงที่ตลอดการทดลอง เป็นต้น

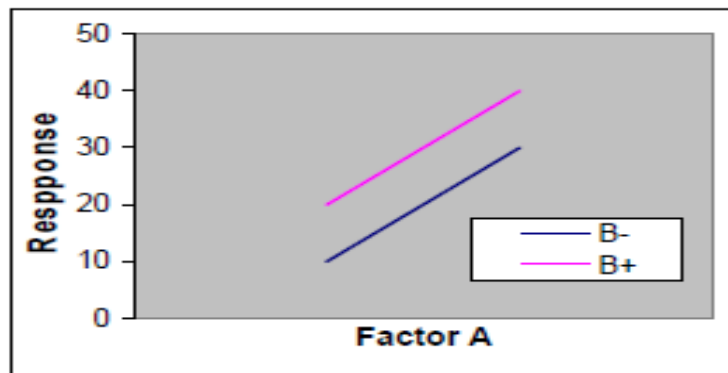
### 3. อิทธิพลของปัจจัย (Factor effects)

อิทธิพลของปัจจัยจะประเมินจากการเปลี่ยนแปลงของ Response เมื่อระดับของปัจจัยที่ศึกษาเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ อิทธิพลหลัก หรือ Main effect และ อิทธิพลร่วม หรือ Interaction effect

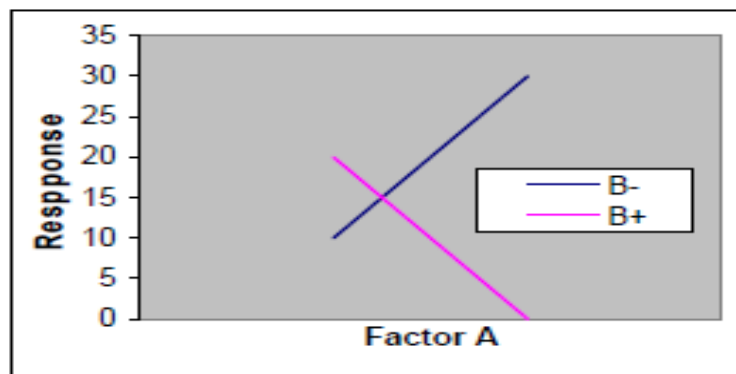
Main effect เป็นผลของการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยเฉพาะปัจจัยหนึ่ง โดยตรงต่อ Response โดยมีได้เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยอื่น ๆ เพื่อประกอบการอธิบาย ให้พิจารณาภาพที่ 2-21 ซึ่งสมมติว่ามีปัจจัย A และ B ที่คาดว่าส่งผลกระทบต่อ Response y แต่ละปัจจัยสามารถปรับได้ 2 ระดับ เรียกว่าระดับสูง (High level) แทนด้วยเครื่องหมาย + และระดับต่ำ (Low level) แทนด้วยเครื่องหมาย - กล่าวคือ ระดับสูงและระดับต่ำของปัจจัย A จะแทนได้ด้วย A+ และ A- ตามลำดับ และระดับสูงและระดับต่ำของปัจจัย B จะแทนได้ด้วย B+ และ B- ตามลำดับ (ซึ่งเป็นสัญลักษณ์ ที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบ  $2^b$ )



ภาพที่ 2-21 Response จากการทดลอง 2 ปัจจัย ๆ ละ 2 ระดับ



ภาพที่ 2-22 กราฟแสดงผลปัจจัยแบบไม่มีอิทธิพลร่วม



ภาพที่ 2-23 กราฟแสดงผลปัจจัยแบบมีอิทธิพลร่วม

Main effect คำนวณจากค่าเฉลี่ยของ Response ของแต่ละปัจจัยที่ระดับสูงและต่ำ เช่น จากภาพที่ 2-22 และภาพที่ 2-23 Main effect ของปัจจัย A และ Main effect ของปัจจัย B คำนวณได้ดังนี้

$$\text{Main effect A} = \frac{30+40}{2} - \frac{10+20}{2} = 20 \quad (2-5)$$

$$\text{Main effect B} = \frac{20+40}{2} - \frac{10+30}{2} = 10 \quad (2-6)$$

อธิบายได้ว่าการเปลี่ยนระดับของปัจจัย A จากต่ำไปสูงหรือจากสูงไปต่ำ จะส่งผลให้ Response เปลี่ยนแปลงโดยเฉลี่ย 20 หน่วย เช่น การเปลี่ยนจากระดับต่ำไปสูงจะทำให้ Response เพิ่มขึ้น 20 หน่วย (ที่ปัจจัย B ระดับต่ำ Response เพิ่มจาก 10 เป็น 30 และที่ปัจจัย B ระดับสูง Response เพิ่มจาก 20 เป็น 40) การเปลี่ยนระดับจากสูงไปต่ำจะส่งผลตรงกันข้ามแต่ขนาดการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยจะคงที่ ในขณะที่การเปลี่ยนระดับของปัจจัย B จากต่ำไปสูงหรือจากสูงไปต่ำ จะส่งผลให้ Response เปลี่ยนแปลงโดยเฉลี่ย 10 หน่วย เช่น การเปลี่ยนจากระดับต่ำไปสูงจะทำให้ Response เพิ่มขึ้น 10 หน่วย (ที่ปัจจัย A ระดับต่ำ Response เพิ่มจาก 10 เป็น 20 และที่ปัจจัย A ระดับสูง Response เพิ่มจาก 30 เป็น 40) การเปลี่ยนระดับจากสูงไปต่ำจะส่งผลตรงกันข้ามแต่ขนาดการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยจะคงที่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเปลี่ยนระดับของปัจจัยตัวใดตัวหนึ่งจะทำนายได้ทันทีว่า Response เฉลี่ยจะเปลี่ยนแปลงกี่หน่วยโดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาอีกปัจจัยหนึ่ง เนื่องจากปัจจัยแต่ละตัวส่งผลต่อ Response อย่างอิสระต่อกัน คือมีเฉพาะ Main effect เท่านั้น (ไม่มี Interaction)

กรณีที่ปัจจัย A และ B มี Interaction กันการเปลี่ยนระดับของปัจจัยหนึ่งจะส่งผลกับ Response อย่างไร จะต้องพิจารณาระดับของอีกปัจจัยหนึ่งด้วย เพราะที่ระดับแตกต่างกัน การเปลี่ยนแปลงของ Response จะแตกต่างกันด้วย Main effect ของปัจจัย A และ Main effect ของปัจจัย B คำนวณได้ดังนี้

$$\text{Main effect A} = \frac{30+0}{2} - \frac{10+20}{2} = 0 \quad (2-7)$$

$$\text{Main effect A} = \frac{20+0}{2} - \frac{10+30}{2} = -10 \quad (2-8)$$

จากผลการคำนวณอาจนำไปสู่การสรุปที่ผิดพลาดได้ เนื่องจาก Main effect A = 0 ในที่นี้มิได้หมายความว่าไม่มีอิทธิพลของปัจจัย A เพราะเมื่อกำหนด เฉพาะ Main effect ของปัจจัย A ที่แต่ละระดับของปัจจัย B จะได้ผลแตกต่างกัน ดังนี้

Main effect ของปัจจัย A ที่ปัจจัย B ระดับต่ำ จะได้ Main effect A =  $30 - 10 = 10$

Main effect ของปัจจัย A ที่ปัจจัย B ระดับสูง จะได้ Main effect A =  $0 - 20 = -20$

ดังนั้นการทำนายทิศทางการเปลี่ยนแปลงของ Response จะต้องพิจารณาทั้งสองปัจจัยพร้อมกัน ในกรณีภาพที่ 2-21 อิทธิพลของปัจจัย A ขึ้นกับระดับของปัจจัย B คือ ถ้าที่ปัจจัย B ระดับต่ำ การเปลี่ยนระดับของปัจจัย A จากต่ำไปสูงจะทำให้ Response เพิ่มจาก 10 เป็น 30 ในขณะที่ Response จะลดลงจากจาก 20 เป็น 0 ที่ปัจจัย B ระดับสูง การตรวจสอบเบื้องต้นว่ามีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่กำลังพิจารณาหรือไม่ทำได้โดยการพล็อตกราฟ ดังภาพที่ 2-22 และภาพที่ 2-23 ซึ่งหากพบว่าเส้นกราฟขนานกัน (ภาพที่ 2-22) แสดงว่าไม่มีอิทธิพลระหว่างปัจจัย และความชันของเส้นบ่งชี้ระดับของ Main effect ซึ่งหากมีความชันมาก Main effect ของปัจจัยนั้นมีค่าสูง ในทางตรงกันข้ามหากเส้นกราฟไม่ขนานกัน (ภาพที่ 2-23) เป็นการบ่งชี้ว่ามี Interaction ระหว่างปัจจัย

#### 4. ประเภทของการทดลอง

การออกแบบการทดลองมีหลากหลายประเภท ซึ่งผู้ทำการทดลองต้องเลือกให้เหมาะสมกับลักษณะของปัญหา ซึ่งประกอบด้วย จำนวนปัจจัย เงื่อนไขการพิจารณา โครงสร้างการทดลอง โดยเฉพาะด้านการสุ่ม ความยากง่ายในการทำการทดลอง ระยะเวลาที่มี ต้นทุนที่ยอมรับได้ เป้าหมายของการทำการทดลอง เป็นต้น ประเภทของการทดลองมีตั้งแต่แบบที่ไม่ซับซ้อนไปจนถึงแบบที่มีความซับซ้อนมาก เช่น การทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single factor design) การทดลองแบบครั้งละปัจจัย (One factor at a time design) การทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design) การทดลองแบบละตินสแควร์ (Latin squares design) การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial design) การทดลองแบบแฟกทอเรียลไม่เต็มรูปแบบ (Fractional factorial design) และการทดลองด้วยเทคนิคของ Taguchi เป็นต้น

##### 4.1 การทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single factor design)

เป็นการออกแบบการทดลองเมื่อสงสัยว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อ Response มีเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น การทดลองจึงมุ่งไปที่การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและ Response ซึ่งเป็นการทดลองที่ออกแบบง่าย แต่อาจนำไปสู่ผลการวิเคราะห์ที่มีได้ให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเสมอไป (เนื่องจากพิจารณาเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น ในขณะที่อาจมีปัจจัยอื่น ๆ เกี่ยวข้องและมีอิทธิพลแบบ Interaction ได้)

#### 4.2 การทดลองแบบครั้งละปัจจัย (One factor at a time design)

เมื่อมีปัจจัยที่สนใจมากกว่า 1 ปัจจัย การออกแบบการทดลองที่ง่ายที่สุด คือ การทดลองโดยปรับเปลี่ยนทีละปัจจัย และกำหนดระดับของปัจจัยอื่น ๆ คงที่ อย่างไรก็ตาม การออกแบบการทดลองลักษณะนี้เป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด เพราะจะไม่ได้ข้อมูลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยเลย

#### 4.3 การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial design)

เป็นการออกแบบที่กำหนดให้มีการทดสอบทุก ๆ ทางเลือก (Combinations) ที่เป็นไปได้ของปัจจัยทั้งหมด ซึ่งทำให้สามารถประมาณอิทธิพลของปัจจัยต่อ Response ได้ทั้งแบบ Main effect และ Interaction แต่การออกแบบการทดลองแบบนี้ต้องการเวลาและทรัพยากรในการทดลองมาก โดยเฉพาะเมื่อจำนวนปัจจัยมีมากขึ้น การออกแบบการทดลองอาจแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะตามจำนวนระดับของแต่ละปัจจัย คือ เมื่อจำนวนระดับของแต่ละปัจจัยมากกว่า 2 ระดับขึ้นไป และเมื่อจำนวนระดับของแต่ละปัจจัยเท่ากับ 2 ระดับ ในกรณีนี้ 2 จะใช้สัญลักษณ์  $2^k$  Design โดยเลข 2 แทนจำนวนระดับของแต่ละปัจจัย และ k แทนจำนวนปัจจัยที่พิจารณาในการทดลอง ในการทดลองจะมีสัญลักษณ์ที่เกี่ยวข้อง คือ

ระดับของปัจจัย A สามารถปรับเปลี่ยนได้จากระดับ 1, 2, ..., a แทนด้วย i

ระดับของปัจจัย B สามารถปรับเปลี่ยนได้จากระดับ 1, 2, ..., b แทนด้วย j

ระดับของปัจจัย C สามารถปรับเปลี่ยนได้จากระดับ 1, 2, ..., c แทนด้วย k

จำนวนครั้งในการทำการทดลองซ้ำหรือ Replication แทนด้วย n

ผลการทดลองจากการทดลองที่ปัจจัย A, B และ C ระดับ i, j และ k ตามลำดับครั้งที่ n

แทนด้วย  $Y_{ijkn}$

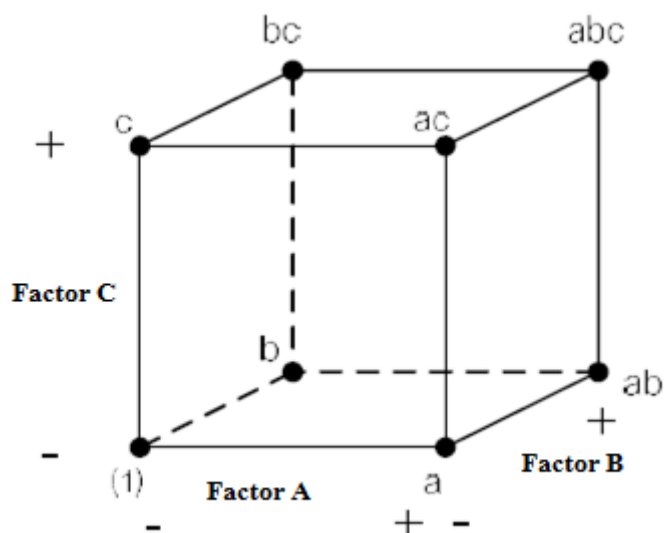
ตารางที่ 2-2 ข้อมูลของการทดลอง 2 ปัจจัย

|          |   | ปัจจัย B                           |                                    |      |                                    |
|----------|---|------------------------------------|------------------------------------|------|------------------------------------|
|          |   | 1                                  | 2                                  | ...  | b                                  |
| ปัจจัย A | 1 | $Y_{111}, Y_{112}, \dots, Y_{11n}$ | $Y_{121}, Y_{122}, \dots, Y_{12n}$ | ...  | $Y_{1b1}, Y_{1b2}, \dots, Y_{1bn}$ |
|          | 2 | $Y_{211}, Y_{212}, \dots, Y_{21n}$ | $Y_{221}, Y_{222}, \dots, Y_{22n}$ | ...  | $Y_{2b1}, Y_{2b2}, \dots, Y_{2bn}$ |
|          | . | .                                  | .                                  | .    | .                                  |
|          | a | $Y_{a11}, Y_{a12}, \dots, Y_{a1n}$ | $Y_{a21}, Y_{a22}, \dots, Y_{a2n}$ | .... | $Y_{ab1}, Y_{ab2}, \dots, Y_{abn}$ |
|          |   |                                    |                                    |      |                                    |

สิ่งสำคัญในการทำการทดลองตามทีออกแบบไว้ จะต้องไม่ลืมว่าการทดลองแต่ละครั้ง ต้องทำตามลำดับการสุ่ม จากกระบวนการสุ่มที่เหมาะสม มิฉะนั้นอาจส่งผลให้ผลการทดลองที่ได้ ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ และนำไปใช้ได้ที่น่าเชื่อถือ เนื่องจากสมมติฐานของเทคนิคการ วิเคราะห์ทางสถิติไม่เป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติผู้ทำการทดลองสามารถสร้างลำดับการทดลองแบบ สุ่มโดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ เช่น Minitab เป็นต้น

กรณีที่มีปัจจัยมากกว่า 2 ปัจจัยขึ้นไปหรือ  $k \geq 3$  การทดลองและการวิเคราะห์จะมีความซับซ้อนมากขึ้น โดยในกรณีของแฟคทอเรียลซึ่งพิจารณาเพียง 2 ระดับของแต่ละปัจจัย เช่น  $k = 3$  รูปแบบการทดลองจะแทนได้ด้วยรูปทรงลูกบาศก์ดังแสดงในภาพที่ 2-24 ประกอบด้วย การทดลอง 8 combinations (หรือ 8 runs) ดังนี้

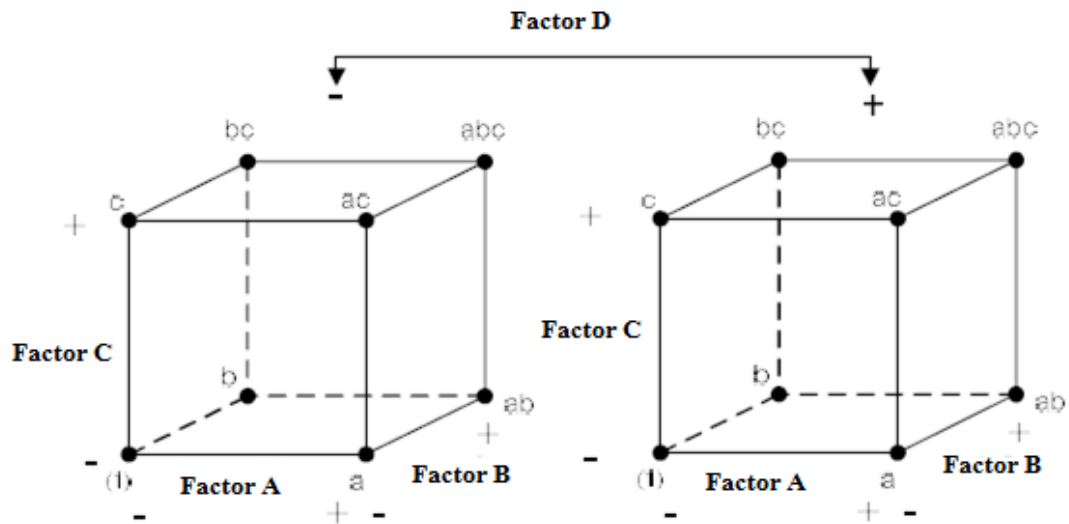
- A Low, B Low, C Low หรือ A-, B-, C- แทนด้วย (1)
- A High, B Low, C Low หรือ A+, B-, C- แทนด้วย a
- A Low, B High, C Low หรือ A-, B+, C- แทนด้วย b
- A High, B High, C Low หรือ A+, B+, C- แทนด้วย ab
- A Low, B Low, C High หรือ A-, B-, C+ แทนด้วย c
- A High, B Low, C High หรือ A+, B-, C+ แทนด้วย ac
- A Low, B High, C High หรือ A-, B+, C+ แทนด้วย bc
- A High, B High, C High หรือ A+, B+, C+ แทนด้วย abc



ภาพที่ 2-24 รูปแบบการทดลองแบบ  $2^3$  Factorial Design

ในการทดลองแบบ  $2^3$  Factorial Design เป็นการทดสอบอิทธิพลหลัก (Main effects) คือ A, B และ C อิทธิพลรวม 2 ปัจจัย (2 ways interaction) คือ AB, AC และ BC และอิทธิพลรวม 3 ปัจจัย (3 ways interaction) คือ ABC ซึ่งเป็นผลการทดลองที่แต่ละมุมของรูปทรงลูกบาศก์ ดังแสดงในภาพที่ 2-24

ในกรณีที่จำนวนปัจจัยเพิ่มขึ้น เช่น 4 ปัจจัย รูปแบบของการทดลองอาจแสดงได้ด้วย รูปลูกบาศก์ 2 ลูก ดังแสดงในภาพที่ 2-25 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าจำนวน Runs จะเพิ่มขึ้นจาก 8 เป็น 16 Runs เมื่อจำนวนปัจจัยเพิ่มจาก 3 เป็น 4 ปัจจัย ดังนั้นถ้าจำนวน Replicates มาก ก็จะส่งผลให้ต้นทุน และเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เพื่อแก้ปัญหานี้ ผู้วิเคราะห์อาจใช้การทดลองที่มีเพียง replicate เดียว หรือออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลไม่เต็มรูป



ภาพที่ 2-25 รูปแบบการทดลองแบบ  $2^4$  Factorial Design

#### 4.4 การทดลองแบบแฟกทอเรียลไม่เต็มรูป (Fractional factorial design)

จากการที่จำนวน Runs ของการออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  Factorial จะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนปัจจัยเพิ่มขึ้น เช่น  $2^5$  จะมี 32 Runs ถ้ามี 3 Replicates จะต้องทำการทดลองทั้งหมด 96 ครั้ง ในการทดลองนี้จะมี อิทธิพลหลัก (Main effects) 5 ตัว อิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย (2 Ways interactions) 10 ตัว เป็นต้น อย่างไรก็ตามหากทราบหรือมีแนวโน้มว่าอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยหลายปัจจัย (High order interactions) จะไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการทดลองเพียงบางส่วนหรือการทดลองแบบไม่เต็มรูปจะยังคงให้ข้อมูลที่มีนัยสำคัญเพียงพอ โดยการทดลองแบบไม่เต็มรูปจะเป็นแบบ  $2^{k-p}$  Factorial design เช่น เมื่อ  $p=1$  จะเป็นการทดลองแบบ Half factorial design ซึ่งจะลดจำนวนการทดลองได้ครึ่งหนึ่ง เมื่อ  $p=2$  จะลดจำนวนการทดลองเหลือเพียง 1/4

#### วิธีการทดลองของทาคุชิ (Taguchi's method)

##### 1. แนวคิดและแบบแผนของวิธีการทาคุชิ (Taguchi methodology)

Dr. Gennichi Taguchi เป็นผู้ค้นพบและวางรากฐานแนวทางทฤษฎี ซึ่งเป็นที่ประจักษ์และทราบกันโดยทั่วไปในเรื่อง quality engineering , robust design และ robust engineering ซึ่งทฤษฎีเหล่านี้ ดร.ทาคุชิ ได้ประกาศให้สังคมทั่วไปได้รับทราบในปี ค.ศ. 1950 ในขณะนั้น ดร.ทาคุชิ ยังทำงานให้กับหน่วยงานของรัฐบาลประเทศญี่ปุ่น รับผิดชอบในการปรับปรุงและพัฒนาระบบโทรศัพท์ ซึ่งในขณะนั้นประสิทธิภาพในการสื่อสารที่ย่ำแย่และไม่เหมาะสม ซึ่ง



ทิศทางที่ ดร. ทากูชิ เริ่มพัฒนาปรับปรุงนั้น จะมุ่งเน้นไปที่การลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง และการทดสอบ ซึ่งในขณะนั้น ผลตอบแทนที่ได้จากการทดลองมีระดับต่ำ ซึ่ง ดร.ทากูชิ มีแนวความคิดจะใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้น้อยที่สุดและเกิดประโยชน์สูงสุด จากแนวคิดดังกล่าวนี้ช่วยกระตุ้นให้ ดร.ทากูชิ ได้ตระหนักถึงแนวทางแบบใหม่ โดยมุ่งเน้นที่ประสิทธิภาพและการควบคุมคุณภาพ ซึ่งกล่าวโดยสรุปได้ว่า แนวคิดพื้นฐานของหลักทฤษฎีทากูชิ นั้นสามารถสรุปได้ดังนี้

1.1 คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีนั้นต้องมาจากการรวมกันของชิ้นส่วนหลาย ๆ ชิ้น ที่มีคุณภาพดี โดยให้นำแนวคิดนี้มาทดแทนแนวคิดแบบเก่าที่ว่า การตรวจสอบสามารถบรรลุได้ถึงระดับคุณภาพที่ดีของผลิตภัณฑ์

1.2 การที่จะบรรลุถึงคุณภาพที่ดีนั้น ทำได้โดยการทำให้เกิดความเบี่ยงเบนจากเป้าหมายให้น้อยที่สุด ซึ่งจากการนี้จะทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่มีความอ่อนไหวต่อปัจจัยหรือสภาวะแวดล้อมภายนอกที่ควบคุมไม่ได้

1.3 ความเบี่ยงเบนที่เกิดจากการออกแบบตัวแปร จะต้องสามารถวัดได้ในหน่วยของต้นทุนหรือราคาของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ

## 2. แนวทางปฏิบัติของทฤษฎีทากูชิ

ในปัจจุบันทฤษฎีหรือแนวทางปฏิบัติของทากูชิ ได้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นลักษณะงานหรือลักษณะปัญหาเชิงเดี่ยวหรือไม่ซับซ้อน จนถึงการนำไปประยุกต์ใช้กับงานหรือลักษณะปัญหาที่มีความยุ่งยากซับซ้อน และรวมไปถึงการนำไปประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับงานด้านบริหารจัดการ รวมถึงหลักเศรษฐศาสตร์และการบริหารธุรกิจ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อจะค้นหาวิธีการหรือคำตอบที่ดีที่สุด แต่ในขณะเดียวกันก็ไม่ลืมที่จะพิจารณาวิธีการหรือทางออกอื่น ๆ หรือทางเลือกอื่น ๆ ซึ่งมีความได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ทฤษฎีอื่น ๆ ในการแก้ปัญหา ซึ่งหลักการหรือแนวทางของทากูชินั้น สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนหลัก ๆ ได้ 4 ขั้นตอนดังนี้

2.1 การระดมความคิด คือการที่บุคลากรในหน่วยงานซึ่งมีความรับผิดชอบในแต่ละด้าน รวมไปถึงผู้ที่ดูแลและรับผิดชอบในด้านการตลาด มานั่งปรึกษาและออกความคิดเพื่อที่จะค้นหาลักษณะทางด้านคุณภาพที่สำคัญของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ส่งผลกระทบต่อลูกค้า รวมถึงการช่วยกันออกแบบปัจจัยหรือตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อผลิตภัณฑ์และกระบวนการ

2.2 ทำการออกแบบการทดลองและทำการทดลองจริง

2.3 ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองรวมถึงการกำหนดค่าที่ดีที่สุดของตัวแปร

2.4 ทำการผลิตจริงหรือปฏิบัติจริงเพื่อพิสูจน์ว่าตัวแปรที่เรากำหนดค่าที่ดีที่สุดนั้นสามารถนำมาซึ่งการแก้ไขปัญหาที่แท้จริงได้หรือไม่

### 3. วัตถุประสงค์ของวิธีการทาภูชิ

ในต้นปี 1980 ดร.ทาภูชิ ได้นำเสนอวิธีการแก้ไขปัญหาแบบต่าง ๆ ซึ่งได้รวบรวมและอ้างถึงในมุมมองเฉพาะที่เรียกว่า ปัญหาการออกแบบพารามิเตอร์ที่คงทน (Robust parameter design problem, RPD problem) โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

3.1 การออกแบบระบบ ที่ไม่ตอบสนองต่อปัจจัยแวดล้อมที่เปลี่ยนไป แต่สามารถส่งผลกระทบต่อสมรรถภาพของระบบ ตัวอย่างเช่น การผสมสูตรของสีทาพื้นผิวภายนอกนั้นควรมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ไม่ว่าจะสภาพอากาศจะมีลักษณะเช่นใด แต่เนื่องจากสภาวะอากาศนั้นไม่สามารถคาดเดาได้ล่วงหน้า ทั้งแปรปรวนและไม่คงที่ ดังนั้นผู้ผลิตสูตรของสีทาพื้นผิวภายนอกนั้นจึงต้องการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ทนทานต่ออุณหภูมิในช่วงความแตกต่างของอุณหภูมิก่อนข้างกว้าง ทนต่อความชื้นและปัจจัยในเรื่องการตกตะกอน ซึ่งที่กล่าวมาส่งผลต่อความสึกหรอและผิวสัมผัสของสี

3.2 การออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของระบบ ตัวอย่างเช่น การออกแบบเครื่องขยายสัญญาณไฟฟ้า เพื่อให้ขนาดของความต่างศักย์ที่ได้ (Output voltage) ใกล้เคียงค่าที่ต้องการมากที่สุด โดยไม่รับผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของลวดต้านทาน (Resistors) ทรานซิสเตอร์ (Transistors) และตัวจ่ายไฟฟ้า (Power supplies) ที่เป็นองค์ประกอบของอุปกรณ์ขยายสัญญาณไฟฟ้า

3.3 ออกแบบกระบวนการ เพื่อให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ตามเป้าหมายที่ต้องการให้ได้มากที่สุด ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการหรือลักษณะประจำตัวของวัตถุดิบต่าง ๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้

3.4 การกำหนดเงื่อนไขในการปฏิบัติการสำหรับกระบวนการ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะที่มีค่าใกล้เคียงกับเป้าหมายที่ตั้งไว้ และความผันแปรของสิ่งแวดล้อมมีผลกระทบต่อค่าเป้าหมายที่ต้องการน้อยที่สุด ตัวอย่าง การลดความถี่ของปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อย ๆ ให้น้อยลง เช่น การผลิตเซมิคอนดักเตอร์ ต้องทำให้ค่าความหนาของออกไซด์ที่อยู่บนเวเฟอร์ (Wafer) มีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาเป้าหมายมากที่สุด หรือต้องการให้มีความผันแปรของความหนาน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

### 4. การออกแบบการทดลองแบบทาภูชิ

Orthogonal Arrays (OA's) เป็นเทคนิคหลักที่มีความสำคัญและมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นแนวทางปฏิบัติของทาภูชิ OA's คือ ตารางมาตรฐานของการออกแบบการทดลองตามแนวทางของทาภูชิ ซึ่งมีจำนวนครั้งในการทดลองที่น้อยครั้ง และมีความเหมาะสมสำหรับการทดลองนั้น ๆ ตัวอย่างเช่น การออกแบบการทดลองที่มีตัวแปรหรือปัจจัยที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ 5 ตัวแปร ตัวแปร

หรือปัจจัยแต่ละตัวสามารถกำหนดค่าระดับความแตกต่างได้ถึง 3 ระดับ เมื่อนำเอาข้อกำหนดในข้างต้นมาพิจารณาแล้ว เราสามารถทำการทดลองได้ทั้งหมด  $3^5 = 243$  การทดลอง โดยที่ไม่ซ้ำกันซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้ เราเรียกว่า การออกแบบการทดลองแบบสมบูรณ์ (Full factorial) แต่ในขณะเดียวกันหากใช้วิธีการออกแบบการทดลองตามวิธีการของทากูชิโดยใช้หลักการ OA's ในการออกแบบการทดลองซึ่งผลที่ได้ คือ L27 (35) ซึ่งหมายถึง จำนวนครั้งในการทดลองจะมีเพียง 27 การทดลองเท่านั้น โดยตารางที่ 2-3 จะแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นระหว่างการออกแบบการทดลองแบบสมบูรณ์ (Full factorial) กับการออกแบบการทดลองตามแนวทฤษฎีทากูชิ และตารางที่ 2-4 ถึง 2-6 แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างตารางการออกแบบการทดลองแบบ L4, L9 และ L27 ตามลำดับ

ตารางที่ 2-3 การเปรียบเทียบจำนวนการทดลองระหว่างการออกแบบการทดลองแบบสมบูรณ์และการออกแบบการทดลองตามแนวทางทากูชิ

| OA              | Factor | Level | Full factorial       |
|-----------------|--------|-------|----------------------|
| L <sub>4</sub>  | 3      | 2     | 8                    |
| L <sub>8</sub>  | 7      | 2     | 128                  |
| L <sub>9</sub>  | 4      | 3     | 81                   |
| L <sub>12</sub> | 11     | 2     | 2,048                |
| L <sub>17</sub> | 13     | 3     | 1,594,323            |
| L <sub>64</sub> | 21     | 4     | $4.4 \times 10^{12}$ |
| L <sub>81</sub> | 40     | 4     | $4.4 \times 10^{15}$ |

ตารางที่ 2-4 การออกแบบการทดลองชนิด L4 (2<sup>3</sup>)

| Run | Factor |   |   |
|-----|--------|---|---|
|     | A      | B | C |
| 1   | 1      | 1 | 1 |
| 2   | 1      | 2 | 2 |
| 3   | 2      | 1 | 2 |
| 4   | 2      | 2 | 1 |

ตารางที่ 2-5 ตารางการออกแบบการทดลองชนิด L9 (3<sup>4</sup>)

| Run | Factor |   |   |   |
|-----|--------|---|---|---|
|     | A      | B | C | D |
| 1   | 1      | 1 | 1 | 1 |
| 2   | 1      | 2 | 2 | 2 |
| 3   | 1      | 3 | 3 | 3 |
| 4   | 2      | 1 | 2 | 3 |
| 5   | 2      | 2 | 3 | 1 |
| 6   | 2      | 3 | 1 | 2 |
| 7   | 3      | 1 | 3 | 2 |
| 8   | 3      | 2 | 1 | 3 |
| 9   | 3      | 3 | 2 | 1 |

ตารางที่ 2-6 การออกแบบการทดลองชนิด L16 (4<sup>5</sup>)

| Run | Factor |   |   |   |   |
|-----|--------|---|---|---|---|
|     | A      | B | C | D | E |
| 1   | 1      | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2   | 1      | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3   | 1      | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4   | 1      | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 5   | 2      | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 6   | 2      | 2 | 1 | 4 | 3 |
| 7   | 2      | 3 | 4 | 1 | 2 |
| 8   | 2      | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 9   | 3      | 1 | 3 | 4 | 2 |
| 10  | 3      | 2 | 4 | 3 | 1 |
| 11  | 3      | 3 | 1 | 2 | 4 |

ตารางที่ 2-6 (ต่อ)

| Run | Factor |   |   |   |   |
|-----|--------|---|---|---|---|
|     | A      | B | C | D | E |
| 12  | 3      | 4 | 1 | 2 | 3 |
| 13  | 4      | 1 | 4 | 2 | 3 |
| 14  | 4      | 2 | 3 | 1 | 4 |
| 15  | 4      | 3 | 2 | 1 | 4 |
| 16  | 4      | 4 | 1 | 3 | 2 |

#### 5. Signal-to-noise ratio (S/N) และการวิเคราะห์

โดยทั่วไปผลของการทดลองจากการออกแบบการทดลองใด ๆ มักจะแทนด้วยสัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์ คือ  $Y_{ij}$  ซึ่งก็คือค่าของตัวแปรตาม (Response variable) ที่เราสนใจนั่นเอง ซึ่งในแง่ของการออกแบบการทดลองโดยทั่วไปมักจะให้ความสนใจกับ  $Y_{ij}$  หรือค่าเฉลี่ยของตัวแปรตาม ( $Y_{ij}$ ) ก่อนข้างสูงว่าสอดคล้องกับความต้องการหรือไม่ โดยบางครั้งก็พิจารณาถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลองนั้น ๆ ว่ามีมากน้อยเพียงใด

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำของตัวแปรตามใด ๆ หรือของขบวนการใด ๆ เป็นสิ่งบ่งบอกถึงควมมีคุณภาพสูงและการออกแบบที่ดีมีประสิทธิภาพ เพื่อให้ได้มาซึ่งคุณภาพที่ดี และการออกแบบที่มีประสิทธิภาพ ดร.ทาคุชิ ได้พัฒนาวิธีการคำนวณค่า Signal-to-Noise ratio ของผลการทดลองใด ๆ เพื่อบ่งชี้ว่าการทดลองนั้นให้ผลตามเป้าหมายที่เราต้องการหรือไม่ โดยพิจารณาทั้งค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง โดยคำนวณค่า Signal-to Noise (S/N) ซึ่งคือ อัตราส่วนหรือผลหารของค่าเฉลี่ย (Signal) กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Noise) ดังแสดงในสมการที่ 2-11

MSD (Mean square deviation) เป็นตัวแปรค่าหนึ่งที่ได้มาจากการคำนวณตามแนวทางของ ทาคุชิ ซึ่งวิธีการคำนวณจะแสดงอยู่ในสมการที่ 2-12 ถึงสมการที่ 2-14 ซึ่งการเลือกคำนวณค่า MSD ในแนวทางของทาคุชิ นั้นมีได้ 3 แบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับกฎเกณฑ์หรือบรรทัดฐานของตัวแปรตาม หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าขึ้นอยู่กับบรรทัดฐานทางด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้นที่เราจะทำการออกแบบการทดลอง และทำการทดลองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของข้อกำหนด หรือมาตรฐานทางด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ค่า Signal-to-noise ratios (S/N) ที่มีค่าสูง ๆ นั้น โดยส่วนใหญ่แล้วจะ

บ่งบอกถึงผลที่ดีที่สุดของสมการที่จะได้มาซึ่งค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามที่เราต้องการ (Optimum) และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำ

สมการ: Mean Value

$$\mu_i = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{j=1}^n y_{i,j} \quad (2-9)$$

สมการ: Standard Deviation

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_{i,j} - \mu_i)^2} \quad (2-10)$$

สมการ: Signal to Noise Ratio

$$(S/N)_i = -10 \log_{10}(MSD_i) \quad (2-11)$$

สมการ: MSD Smaller is better

$$MSD_i = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{j=1}^n y_{i,j}^2 \quad (2-12)$$

สมการ: MSD Nominal is best

$$MSD_i = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{j=1}^n (y_{i,j} - m)^2 \quad \text{เมื่อ } m = \text{Target value} \quad (2-13)$$

สมการ: MSD Greater is better

$$MSD_i = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{j=1}^n \frac{1}{y_{i,j}} \quad (2-14)$$

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เฉลิมพล คล้ายนิล (2555) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการกลึงเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นเกรด JIS SKD11 และเกรด JIS SKS3 ที่มีผลต่อการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงซีเมนต์คาร์ไบด์เคลือบด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) มีการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลทางเชิงสถิติ รวมทั้งการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดจากผลการทดลองกับการทำนายผล โดยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม โดยใช้ตัวแปรที่ต้องการออกแบบเป็นตัวป้อนเข้าหรืออินพุต ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัด ส่วนเอาต์พุตหรือค่าตอบที่ต้องการ ได้แก่ การสึกหรอของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์ ผลการทดลองพบว่าความเร็วตัดจะส่งผลต่อการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงแบบ Flank wear มากที่สุด รองลงมาคือ อัตราป้อน ในขณะที่การเพิ่มอัตราการกำจัดเนื้อ

โลหะส่งผลต่อการสึกหรอเช่นกัน ผลการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายผลการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงแบบ Flank wear จากการตัดเฉือนเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด JIS SKS3 และเกรด JIS SKD11 พบว่าสามารถทำนายค่าได้อย่างแม่นยำ คือ มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 1.68% และ 2.84% ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้สามารถวางแผนในการผลิตได้อย่างเหมาะสม ช่วยลดระยะเวลาในการทดลองลง และสามารถทำนายค่าที่ยังไม่ได้มีการทดลองได้อย่างถูกต้อง

อิสรา ชีระวัฒน์สกุล และสมพร ตี๋ขันธ์ (2552) การวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาสภาวะการดำเนินงานของเครื่องกลึงซีเอ็นซี ในการสร้างต้นแบบที่ทำจากพลาสติก โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยและค่าที่เหมาะสม ที่ส่งผลต่อค่าความหยาบของผิวชิ้นงาน โดยใช้เม็ดมีดกลึงสำหรับกลึงอลูมิเนียม (Cutting inserts for aluminum-CCGT 32.50.5 FL) ปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ ความเร็วตัดอัตราป้อน และความลึกในการกลึง นอกจากนี้ ยังได้วิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์เพื่อหาความคุ้มค่าในการนำเอาเครื่องกลึงซีเอ็นซีมาใช้ในกระบวนการสำหรับขึ้นรูปพลาสติก เพื่อสร้างต้นแบบเซรามิกทดแทนปูนปลาสเตอร์ แบบเดิม ผลจากการวิจัยนี้พบว่า มีปัจจัยหลักที่สำคัญเกี่ยวข้องด้วยกันสองปัจจัย คือ อัตราป้อน และความลึกในการกลึงตัดในแต่ละเที่ยว ผลการวิเคราะห์ ควรตั้งค่าอัตราป้อนที่ 0.1 มม./รอบ และค่าความลึกในการกลึงตัดในแต่ละเที่ยวอยู่ที่ 0.5 มม. จึงจะเหมาะสมสำหรับความหยาบผิวที่ดีที่สุด นอกจากนี้ ยังสามารถประมาณค่าความหยาบผิวของชิ้นงานจากสมการถดถอย คือ  $Ra = -2.65 + 3.07a + 22.2f + 0.0163v$  โดยที่ Ra คือ ค่าความหยาบผิว (ไมครอน) a คือ ความลึกในการกลึง (มม.) f คือ อัตราการป้อน (มม./รอบ) และ v คือ ความเร็วตัด (มม./นาท) จากการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์เพื่อหาความคุ้มค่าในการนำเอาเครื่องกลึงซีเอ็นซีมาใช้ในกระบวนการสำหรับขึ้นรูปพลาสติกเพื่อสร้างต้นแบบเซรามิก ให้อัตราผลตอบแทน (Rate of return) อยู่ที่ 29.84% ต่อปี และระยะเวลาที่คุ้มทุนมากที่สุด คือ 3.4 ปี

คุณยุต เอี่ยมสอาด, ณัฐรินทร์ ชัยภักดี, ณัฐพร บุญเลิศเจริญศักดิ์, ชนะ รัชศิริ และศุภสิทธิ์ รอดขวัญ (2550) แนวคิดของวิธีทากูชิเป็นแนวคิดที่ใช้ในปรับปรุงคุณภาพคุณภาพของชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ เป็นวิธีการออกแบบการทดลอง (DOE) ซึ่งในการทดลองที่มีตัวแปรหลายตัว ทำให้มีการทดลองมากเพื่อที่จะหาค่าที่เหมาะสมได้ซึ่งถ้าทำการทดลองแบบสุ่ม (Trial and error) จะต้องทำการทดลองมากถึงจะได้ค่าที่ดีที่สุดมา วิธีของทากูชิ (Taguchi method) ได้รับการยอมรับโดยทั่วไปว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการสร้างคุณภาพให้กับผลิตภัณฑ์ ซึ่งวิธีนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมญี่ปุ่น โดยทั่วไปแล้วคุณภาพจะลดลงโดยการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนของสิ่งแวดล้อม ดังนั้นวิธีการของทากูชิ (Taguchi method) พยายามทำให้ขบวนการทำงานได้ตามที่ถูกต้องแบบโดยมีภูมิคุ้มกันต่อสิ่งรบกวนหรือการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการทำการทดลอง

ประสาน แสงเขียว (2550) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาตัวแปรในการตัดเฉือน เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยการนำเม็ดมีดคาร์ไบด์ที่ต่างกัน 3 ชนิด คือ A, B และ C มาทำการตัดเฉือนเหล็กกล้าไร้สนิม เพื่อเลือกใช้เม็ดมีดคาร์ไบด์ที่มีประสิทธิภาพและใช้ต้นทุนต่ำ โดยกำหนดตัวแปรในการศึกษา คือ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกป้อน การทดลองจะทำการตัดเฉือนชิ้นงานเพื่อหาเวลาที่ผลิตทั้งหมดใน 1 คมตัด ส่วนการวัดค่าความหยาบผิวจะทำการวัดค่าทุก ๆ ช่วงความหยาบผิวที่ 243-270 มิลลิเมตร เวลาที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ผลโดยใช้หลักการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม MINITAB เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ต่อการผลิตชิ้นงาน จากผลการศึกษาพบว่า ตัวแปรที่ส่งผลต่อการผลิตชิ้นงานมากที่สุด คือ ความเร็วตัด รองลงมาคือ อัตราป้อน และความลึกป้อนมีผลเพียงเล็กน้อย ส่วนค่าใช้จ่ายจากชิ้นส่วนที่ผลิตได้นั้น เม็ดมีดที่มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด คือ ชนิด B ที่ค่าใช้จ่าย 43.23 บาท/ชิ้น รองลงมาคือ ชนิด A ที่ 34.40 บาท/ชิ้น และชนิด C ที่ 35.30 บาท/ชิ้น หากพิจารณาทั้งเวลาที่ผลิตและจำนวนชิ้นส่วนที่ผลิตได้พบว่า เม็ดมีดชนิด B เป็นตัวเลือกแรกๆ ที่ควรพิจารณาเลือกใช้ เพราะเมื่อพิจารณาภาพรวมจะเห็นว่า มีค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นงานต่ำที่สุด

บรรจบ ประสารแสง, อภิวัฒน์ มุตตามระ และบุษบา พุกษาพันธุ์รัตน์ (2556) งานวิจัยนี้ นำเสนอผลการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของผิวสำเร็จของชิ้นงาน วัสดุผลิตแม่พิมพ์ ในกระบวนการแปรรูปทางกล (Machining) เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด STAVAX ESR ด้วยเครื่องกัดสปาร์คไฟฟ้า (EDM) โดยประยุกต์ใช้วิธีทากูชิ ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมภายใต้สถานการณ์ต่าง ๆ โดยปัจจัยที่นำมาพิจารณาประกอบไปด้วย 5 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟฟ้า ค่าแรงดันเปิดวงจร เวลาเปิด ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ และค่าความจุไฟฟ้า วัดผลการตอบสนองของกระบวนการจากความหยาบผิว (Surface roughness, Ra) ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม คือ กระแส 1 แอมแปร์ แรงดันเปิดวงจร 80 โวลต์ เวลาเปิด 2 ไมโครวินาที ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 50% และค่าความจุไฟฟ้าเป็นศูนย์ซึ่งค่าระดับปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการ โดยพื้นผิวของชิ้นงานมีความเรียบผิวกว่ากระบวนการที่ใช้ค่าระดับของปัจจัยแบบดั้งเดิม 77.77%

วีรพัฒน์ นามปัญญา, เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป และสุดสาคร อินธิเดช. (2556) จุดประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อตรวจสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับดำเนินการกลึงเร็ว โดยการกลึงผ่านรอบเดียวฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ เกณฑ์เวลาการผลิตต่อชิ้นต่ำสุดและเกณฑ์ต้นทุนการผลิตต่อชิ้นต่ำสุด โดยอยู่ภายใต้ข้อจำกัดของการตัดเฉือนต่าง ๆ เช่น ความเร็วในการตัด อัตราการป้อน ความลึกในการตัด องศาการตัดเฉือนเร็ว และความสามารถในการตัดเฉือน (ความเรียบผิว แรงในการตัดเฉือน กำลังงานในการตัดเฉือน) ผลการศึกษาพบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดของเกณฑ์เวลาในการ



ผลิตต่อชิ้นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.05 นาทีต่อชิ้น ความเร็วตัดเท่ากับ 213.45 เมตรต่อนาที แรงในการตัดเท่ากับ 3.20 KN กำลังงานในการตัดเท่ากับ 6.27 KW และความเรียบผิวเท่ากับ 1.04  $\mu\text{m}$  ส่วนเกณฑ์ต้นทุนผลิตต่อชิ้นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 36.60 บาทต่อชิ้น ความเร็วตัดเท่ากับ 74.13 เมตรต่อนาที แรงในการตัดเท่ากับ 4.40 KN กำลังงานในการตัดเท่ากับ 2.29 KW และความเรียบผิวเท่ากับ 2.43  $\mu\text{m}$  หลังจากนั้นทดสอบตัดเนื้อชิ้นงานเรียวยโดยใช้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดกับเครื่องกลึงอัตโนมัติควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถตัดเนื้อชิ้นงานได้ตามที่ต้องการ

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงการทดลอง เพื่อศึกษาเงื่อนไขในการตัดเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนของเพลาส่งกำลังด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ต้นทุนการผลิตต่อชิ้นต่ำ ในขณะที่ยังคงอัตราการผลิตชิ้นงานที่สูงเอาไว้ได้ โดยการทำการวิจัยในครั้งนี้จะทำการวิจัยเพียงหนึ่งกระบวนการผลิตเท่านั้น เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มอัตราการผลิตชิ้นงาน เพื่อตอบสนองระบบกลไกทางการตลาดของอุตสาหกรรมยานยนต์ ที่ราคาขายชิ้นส่วนให้กับบริษัทผู้ประกอบรถยนต์จะต้องมีการลดลงอย่างต่อเนื่องในทุก ๆ ปี แต่ในขณะเดียวกันต้นทุนในการผลิตรวมถึงค่าจ้างแรงงานกลับมีแนวโน้มที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์จะต้องมีการคิดหาวิธีการที่จะลดต้นทุนการผลิตลง เพื่อที่จะทำให้บริษัทมีผลกำไรที่ไม่ลดลง โดยจะมีการลดต้นทุนในส่วนของการออกแบบที่เกินความจำเป็น และการลดต้นทุนในส่วนของการผลิตที่เกินความจำเป็น ซึ่งจะเรียกว่า Value analysis and value engineering (VA/VE) จะเห็นได้ว่าการลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มอัตราการผลิตชิ้นงาน จะเป็นแนวทางที่จะช่วยให้บริษัทสามารถแข่งขันในตลาดอุตสาหกรรมยานยนต์ได้ดียิ่งขึ้น และช่วยเพิ่มโอกาสที่จะได้รับความไว้วางใจจากลูกค้า ในการผลิตชิ้นส่วนอื่น ๆ ต่อไปในอนาคตอีกด้วย

การวิจัยครั้งนี้มีขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตจริง จึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่การทดลองควรเป็นไปตามสภาพการผลิตจริง ดังนั้นการทดลองและการเก็บข้อมูลในการวิจัยนี้จะกระทำภายในกระบวนการผลิตจริง ใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์การผลิตจริง และใช้เงื่อนไขอื่น ๆ นอกเหนือจากปัจจัยที่ทำการทดลองตามที่กำหนดไว้ในกระบวนการผลิต

#### กระบวนการผลิต

ในกระบวนการผลิตชิ้นงานตั้งแต่กระบวนการแรกไปจนถึงกระบวนการสุดท้าย เพื่อให้ได้ชิ้นงานสำเร็จ จะเป็นการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continue production) โดยแบ่งกระบวนการผลิตออกเป็น 12 กระบวนการ และในการผลิตจะเรียงลำดับจากลำดับที่ 1 ไปจนถึงลำดับที่ 12 ดังที่แสดงในตารางที่ 3-1 ซึ่งกระบวนการผลิตต่าง ๆ จะมีทั้ง การกลึงขึ้นรูป การกัดขึ้นรูป การชุบแข็งชิ้นงาน การเจียรผิวชิ้นงาน การล้างชิ้นงาน และการอัดประกอบชิ้นงาน เป็นต้น

ตารางที่ 3-1 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงาน

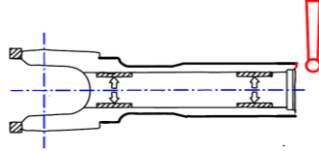
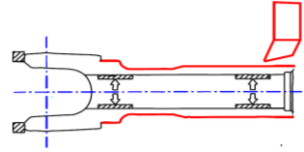
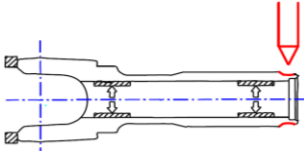
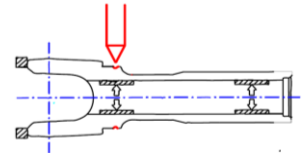
| Process No. | Process Name                | Machine No        | Cycle time (Sec) |
|-------------|-----------------------------|-------------------|------------------|
| 1           | กลึงหยาบผิวด้านใน           | LA-9046, LA-9047  | 48.2             |
| 2           | กลึงละเอียดผิวด้านนอก       | LA-9048, LA-9028  | 57.4             |
| 3           | กลึงละเอียดผิวด้านใน        | LA-9049, LA-9050  | 42.8             |
| 4           | กัดขึ้นรูปพื้นด้านนอก       | GC-9003, GC-9004  | 48.2             |
| 5           | ชุบแข็งผิวงานด้านนอก        | HT-9004           | 49.7             |
| 6           | เจียรผิวงานด้านนอก          | GR-9018           | 48.0             |
| 7           | ตรวจสอบรอบแตกร้าวชิ้นงาน    | ME-9027           | 33.3             |
| 8           | ล้างชิ้นงาน                 | WM-9029           | 46.3             |
| 9           | อัด Plug และทดสอบการรั่วซึม | AM-9013           | 36.4             |
| 10          | เจาะรูและกัดร่องบ่าชิ้นงาน  | MC-9025 , MC-9034 | 40.7             |
| 11          | ล้างชิ้นงาน                 | WM-9030           | 49.2             |
| 12          | สวมอัดประกอบ                | AM-9016           | 26.6             |

จากตารางที่ 3-1 พิจารณาเวลาการผลิตของแต่ละกระบวนการจะพบว่า ในกระบวนการผลิตที่ 2 จะเป็นกระบวนการผลิตที่ใช้เวลาในการผลิตมากที่สุด (Bottleneck process) โดยใช้เวลามากถึง 60.3 วินาที ดังนั้นในการทำการทดลองนี้จึงเลือกที่จะทำการทดลองปรับลดเวลาในกระบวนการผลิตที่ 2 เพื่อให้เวลาการผลิตชิ้นงานต่อชิ้นมีค่าลดลง และในการทำการทดลองนี้ ทางผู้จัดทำเลือกที่จะทำการทดลองในขั้นตอนการผลิตภายในเครื่องจักรเพียง 1 เครื่องจากทั้งหมด 2 เครื่องของกระบวนการผลิตที่ 2 คือ เครื่องจักรหมายเลข LA-9048 เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุง และเพื่อให้เหมาะสมกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำวิจัย

### ลำดับขั้นตอนการทำงานของเครื่องจักร

ขั้นตอนการทำงานของเครื่องจักรหมายเลข LA-9048 ที่ทำการทดลอง สามารถแบ่งออกเป็นลำดับขั้นตอนได้ 6 ขั้นตอน ซึ่งรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนได้แสดงไว้ในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการตัดเดือน

| ลำดับที่ | ลำดับการทำงานของเครื่องจักร | Too<br>1<br>No. | รูปภาพ   | เวลาการทำงาน<br>(Sec) |
|----------|-----------------------------|-----------------|--|-----------------------|
| 1        | ปิดประตูและ Clamp งาน       | -               | -  | 11.80                 |
| 2        | ใช้กระยะความยาวรวม          | T1              |  | 3.90                  |
| 3        | กลิ้งผิวด้านนอก             | T3              |  | 78.60                 |
| 4        | กลิ้งเซาะร่องด้านล่าง       | T5              |  | 5.80                  |
| 5        | กลิ้งเซาะร่องด้านบน         | T7              |  | 7.20                  |
| 6        | Unclamp และเปิดประตู        | -               | -  | 7.50                  |

จากลำดับขั้นตอนการทำงานของเครื่องจักรที่แสดงในตารางที่ 3-2 จะเห็นได้ว่า ในลำดับการทำงานที่ 3 ซึ่งเป็นการกลึงผิวด้านนอกด้วยมีดกลึงหมายเลข 3 (Tool No.3) จะใช้เวลาในการทำงานมากที่สุดถึง 78.60 วินาที ดังนั้นจึงเลือกที่จะทำการทดลองหาเงื่อนไขการตัดเฉือนที่เหมาะสมของลำดับการทำงานของเครื่องจักรลำดับที่ 3 การกลึงผิวด้านนอก ซึ่งจะส่งผลทำให้เวลาการผลิตรวมของเครื่องจักรลดลงได้มากที่สุดและอัตราการผลิตเพิ่มขึ้นได้มากที่สุด

### คุณลักษณะของชิ้นงาน

ชิ้นงานเป็นเหล็กเหนียว SCr40L2 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบฟอร์จิง (Forging) ซึ่งเป็นกรรมวิธีการผลิตโดยจะนำเหล็กมาเผาให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสม แล้วนำชิ้นงานไปกดอัดให้เป็นรูปร่างตามที่ต้องการ โดยที่วิธีการนี้จะทำให้เหล็กมีเนื้อแน่นละเอียดและช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกล เช่น ความแข็งแรงทนทานและความเหนียว เนื่องจากเกรนของเนื้อเหล็กถูกบีบอัดตัวกันจนแน่น ซึ่งทำให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนของเพลากลางรถยนต์ที่ต้องรับแรงบิดสูง ซึ่งค่าความแข็งของวัสดุอยู่ในช่วงระหว่าง 260-320 HV ขนาดความยาวรวม 235.75 mm และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 78 mm ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

### เครื่องกลึง (Lathe machine)

เครื่องกลึงอัตโนมัติที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องกลึงหมายเลข LA-9048 ในกระบวนการผลิตที่ 2 เป็นเครื่องจักรที่ผลิตโดยบริษัท Fuji machinery ประเทศญี่ปุ่น เครื่องจักรรุ่น TN300 ใช้ Chuck spindle รุ่น SE-35A6 ความเร็วสูงสุดของ Spindle 4,000 รอบต่อนาที ควบคุมการทำงานของเครื่องจักรด้วย Control Fanuc รุ่น Oi-TD น้ำหนักเครื่องจักรโดยประมาณ 1.2 ตัน

## น้ำหล่อเย็น (Coolant)

น้ำหล่อเย็นที่ใช้ในการทดลองจะใช้เป็นแบบชนิดผสมน้ำประเภทสังเคราะห์ ชื่อทางการค้า คือ Megacool 100 มีคุณสมบัติในการระบายความร้อนและลดแรงเสียดสีในการตัดเฉือน สามารถแยกตัวกับเศษโลหะได้ดี เหมาะสำหรับใช้ในงานตัดกลึงงานประเภทเหล็กเหนียวและเหล็กกล้า โดยจะมีลักษณะเป็นสีเหลืองน้ำตาล แต่เมื่อผสมกับน้ำแล้วจะเป็นลักษณะใส และมีความเข้มข้นในการใช้งานอยู่ที่ 3-5%

## การกำหนดปัจจัยการทดลอง

การเลือกปัจจัยการทดลองจะพิจารณาจากทฤษฎีการตัดเฉือนเป็นสำคัญ ขณะเดียวกันก็ต้องพิจารณาข้อกำหนดทางการผลิตต่าง ๆ ของทางบริษัทกรณีศึกษาควบคู่กันไปด้วย เนื่องจากเป้าหมายของการวิจัยในครั้งนี้ คือ การหาเงื่อนไขในการตัดเฉือนที่เหมาะสม ซึ่งในงานกลึงเงื่อนไขในการตัดเฉือนที่สำคัญประกอบไปด้วย ความเร็วตัด (Cutting speed) อัตราป้อนต่อรอบ (Feed/ rev) ความลึกตัด (Depth of cut) รูปร่างของมีดกลึง (Cutting tool geometry) วัสดุของมีดกลึง (Cutting tool material) และน้ำหล่อเย็น (Coolant)

เนื่องด้วยการทดลองนี้กระทำในกระบวนการผลิตจริง ซึ่งแน่นอนว่าจะส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานที่ออกจากกระบวนการผลิตนี้ อีกทั้งการปรับแก้ขนาดใหญ่บนโปรแกรม G-Code ที่ใช้ควบคุมเครื่องจักรเป็นเรื่องที่ยากและจำเป็นที่จะต้องขออนุมัติจากบริษัทแม่จากประเทศญี่ปุ่น ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้จึงพิจารณาตัดความลึกตัด และรูปร่างของมีดกลึงออกจากปัจจัยที่จะทำการศึกษา ถึงแม้ว่าความลึกตัดจะเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเวลาในการตัดเฉือนอย่างมีนัยสำคัญก็ตาม

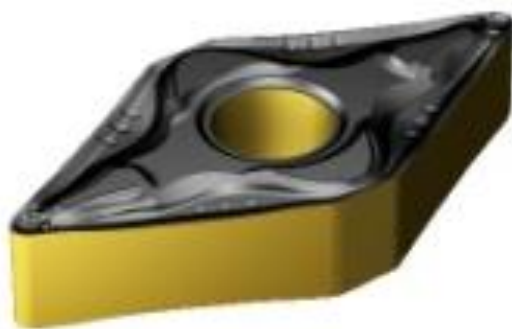
การใช้น้ำหล่อเย็นในปัจจุบันเป็นการใช้น้ำหล่อเย็นชนิดเดียวกันในทุกเครื่องจักรของทางบริษัทเพื่อความสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่าย ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้จึงจะไม่นำชนิดของน้ำหล่อเย็นเข้ามาพิจารณา ยังคงใช้ตามมาตรฐานของบริษัทต่อไป

ด้วยเหตุนี้ สรุปได้ว่าการวิจัยเพื่อพิจารณาเงื่อนไขในการตัดเฉือนในครั้งนี้ 3 ปัจจัยจะถูกเลือกมาทำการพิจารณา ได้แก่ วัสดุของมีดกลึง ความเร็วตัด และอัตราป้อนต่อรอบ

## การเลือกวัสดุของมีดกลึง

ปัจจุบันมีดกลึงที่ 3 (Tool No.3) ของเครื่องจักรหมายเลข LA-9048 เป็นมีดกลึงชนิด Coated Cemented Carbide: DMNG-15-04-08-PM ที่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวโดยวิธีการ Coating แบบ MTCVD (Medium Temperature Chemical Vapor Deposition) เพื่อให้ได้ผิวของมีดกลึงที่มี

ความแข็งแรงทนทานต่อการสึกหรอ และมีรัศมีคมตัด 0.8 mm. ซึ่งในการทดลองนี้ได้เลือกมีดกลึงจากผู้ผลิตเดิม เป็นมีดกลึงที่มีรูปร่างเท่ากันแต่มีวัสดุต่างกัน โดยแบ่งออกเป็น 3 เกรด คือ 4315 4325 และ 4235 โดยมีดกลึงทั้งสามเกรดนี้มีค่า Toughness ต่างกันคือ ต่ำ ปานกลาง และสูง ตามลำดับ ซึ่งมีความเหมาะสมในการกลึงเหล็กเหนียวคาร์บอนชนิด SCr40L2 มีดกลึงเป็นแบบ Insert มีคมตัดทั้งสิ้น 4 คมตัด รูปร่างลักษณะของมีดกลึงแสดงดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 มีดกลึงชนิด DMNG-15-04-08-PM

### การเลือกค่าอัตราป้อนต่อรอบ

การเลือกค่าอัตราป้อนที่ใช้ในการทดลองจะทำการเลือกในตำแหน่งที่มีกรกกลึงยาวมากกว่า 30 mm ขึ้นไป เนื่องจากการปรับอัตราป้อนในตำแหน่งที่มีช่วงการกลึงยาว ๆ จะส่งผลให้เวลาในการกลึงชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด และส่งผลต่อการสึกหรอของมีดกลึงมากที่สุดตามไปด้วย ซึ่งพิจารณาจากโปรแกรมการตัดเฉือนแล้ว มีทั้งหมด 5 ตำแหน่ง คือตำแหน่ง F1, F2, F3, F4 และ F5 ซึ่งแสดงอยู่ใน NC Program ในตารางภาคผนวกที่ ก-1

อัตราป้อนส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานดังนั้นควรเลือกให้มีค่าสูงหากต้องการให้งานผลิตได้เร็ว อย่างไรก็ตามอัตราป้อนมีผลต่อความหยาบผิวดังนั้นจึงไม่ควรให้มีค่าสูงจนทำให้ความหยาบของผิวชิ้นงานมีค่าเกินกำหนด ในเบื้องต้นความหยาบของผิวชิ้นงานสามารถพยากรณ์ได้จากอัตราป้อนต่อรอบและรัศมีคมตัดโดยวิธีการคำนวณตามสมการที่ 3-1 เพื่อให้ได้ค่าสูงสุดของอัตราป้อน จึงใช้ค่าความหยาบผิวสูงสุดที่ยอมรับได้ตามที่ระบุในแบบของชิ้นงาน คือ  $R_a$  6.63  $\mu\text{m}$  ซึ่งแสดงในภาพภาคผนวกที่ ข-1 โดยรัศมีคมตัดของมีดกลึงที่เลือกมาทำการทดลองมีค่า 0.8 mm

$$R_a \approx \frac{f_z^2}{32R} \times 1000 \quad (3-1)$$

$$f_z^2 = \frac{(6.63 \times 32 \times 0.8)}{1000} \quad (3-2)$$

$$f_z = 0.4 \text{ mm/rev} \quad (3-3)$$

จากผลการคำนวณในสมการที่ 3-3 อัตราป้อนต่อรอบสูงสุดที่จะใช้ในการทดลองในส่วนของการกลึงละเอียด คือ 0.4 mm/ rev และกำหนดอัตราป้อนที่น้อยที่สุดเท่ากับอัตราป้อนต่อรอบที่ใช้งานอยู่จริงในปัจจุบันคือ 0.28 mm/ rev ดังนั้นค่ากลางของอัตราป้อนต่อรอบคือ 0.34 mm/ rev

ในส่วนของการกลึงหยาบซึ่งคุณภาพผิวไม่มีความสำคัญจะใช้วิธีการเทียบสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าน้อยที่สุด ค่ากลางและค่ามากที่สุดจากการกลึงละเอียด เพื่อให้สัดส่วนการเพิ่มขึ้นของอัตราป้อนในการกลึงละเอียดและการกลึงหยาบเป็นไปในสัดส่วนที่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 อัตราป้อนที่ใช้ในการทดลอง

| ขั้นตอนการ<br>กลึงที่ | ลักษณะการ<br>กลึง | ระยะการกลึง<br>(mm) | อัตราป้อนต่อรอบ ( $f_z$ ), mm/rev |        |      |
|-----------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------------|--------|------|
|                       |                   |                     | Min                               | Center | Max  |
| F1                    | กลึงหยาบ          | 98.5                | 0.43                              | 0.52   | 0.61 |
| F2                    | กลึงละเอียด       | 98.5                | 0.28                              | 0.34   | 0.40 |
| F3                    | กลึงหยาบ          | 38.0                | 0.35                              | 0.43   | 0.50 |
| F4                    | กลึงหยาบ          | 37.978              | 0.35                              | 0.43   | 0.50 |
| F5                    | กลึงหยาบ          | 33.847              | 0.35                              | 0.43   | 0.50 |

### การเลือกค่าความเร็วตัด

การเลือกค่าความเร็วตัดที่ใช้ในการทดลอง จะทำการเลือกปรับค่าความเร็วตัดในตำแหน่งที่มีการกลึงยาวมากกว่า 30 mm ขึ้นไป เช่นเดียวกันกับอัตราป้อน ซึ่งมีทั้งหมด 5 ตำแหน่งใน NC Program และในแต่ละตำแหน่งมีค่าความเร็วตัดเท่ากัน คือ S ซึ่งแสดงอยู่ใน NC Program ในตารางภาคผนวกที่ ก-1 โดยที่ NC Program กำหนด G-Code เป็น G96 ซึ่งเป็นการกำหนดให้ค่าความเร็วตัดคงที่ โดยจะทำการกำหนดระดับของความเร็วตัดอ้างอิงจากความเร็วตัดที่บริษัทผู้ผลิตมีดกลึงแนะนำคือช่วงระหว่าง 205- 265 rev/ min และเพื่อให้ง่ายต่อการทำการทดลองจึงเลือกค่าที่เป็นจำนวนเต็มที่ใกล้เคียงกับค่าแนะนำ คือ 200, 230 และ 260 เป็นระดับปัจจัยต่ำ ปานกลาง และสูงตามลำดับเพื่อแทนค่า S ใน NC Program ที่ได้แสดงอยู่ในภาคผนวก ก-1



### การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองจะใช้วิธีการทดลองของทากูชิ โดยเลือกใช้ตาราง Orthogonal arrays แบบ L9 ( $3^3$ ) ซึ่งเป็นแบบการทดลองที่มีความเหมาะสมกับ 3 ปัจจัยการทดลอง และแต่ละปัจจัยมีระดับความแตกต่างอยู่ 3 ระดับ คือ ต่ำ ปานกลาง และสูง เพื่อลดจำนวนการทดลองลงและให้มีความเหมาะสมกับเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง โดยการทดลองนี้อาจจะทำให้เข้าใจหากคิดว่าผลการทดลองมีความผิดปกติ โดยปัจจัยและระดับของปัจจัยแสดงดังตารางที่ 3-4 ซึ่งตารางการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ L9 แสดงดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-4 ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลอง

| ปัจจัย                    | ระดับของปัจจัย |           |           |
|---------------------------|----------------|-----------|-----------|
|                           | Min            | Center    | Max       |
| วัสดุของมีดกลึง           | เกรด 4315      | เกรด 4325 | เกรด 4335 |
| อัตราป้อนต่อรอบ (mm/ rev) |                |           |           |
| ● ชั้นตอนที่ F1           | 0.43           | 0.52      | 0.61      |
| ● ชั้นตอนที่ F2           | 0.28           | 0.34      | 0.40      |
| ● ชั้นตอนที่ F3           | 0.35           | 0.43      | 0.50      |
| ● ชั้นตอนที่ F4           | 0.35           | 0.43      | 0.50      |
| ● ชั้นตอนที่ F5           | 0.35           | 0.43      | 0.50      |
| ความเร็วตัด (rev/ min)    | 200            | 230       | 260       |

ตารางที่ 3-5 การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ L9

| Run | วัสดุของมีดกลึง<br>(Tool) | อัตราป้อนต่อรอบ<br>(Feed) | ความเร็วตัด<br>(Speed) |
|-----|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| 1   | Min                       | Min                       | Min                    |
| 2   | Min                       | Center                    | Center                 |
| 3   | Min                       | Max                       | Max                    |
| 4   | Center                    | Min                       | Center                 |

## ตารางที่ 3-5 (ต่อ)

| Run | วัสดุของมีดกลึง<br>(Tool) | อัตราป้อนต่อรอบ<br>(Feed) | ความเร็วตัด<br>(Speed) |
|-----|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| 5   | Center                    | Center                    | Max                    |
| 6   | Center                    | Max                       | Min                    |
| 7   | Max                       | Min                       | Max                    |
| 8   | Max                       | Center                    | Min                    |
| 9   | Max                       | Max                       | Center                 |

## ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการดำเนินการทดลองเป็นดังนี้

1. ตรวจสอบมีดกลึงโดยนำมีดกลึงไปตรวจสอบความสมบูรณ์ของลักษณะเม็ดมีด โดยใช้กล้องไมโครสโคป (Microscope) ส่องดูที่ผิวของเม็ดมีดกลึง โดยผิวเม็ดมีดกลึงจะต้องไม่มีรอยบิ่นหรือรอยแตกร้าว

2. ติดตั้งมีดกลึงโดยทำการติดตั้งมีดกลึงหมายเลข 3 (Tool No.3) เข้ากับตัวป้อนมีดที่อยู่ภายในเครื่องจักร โดยก่อนติดตั้งให้ใช้ลมเป่าทำความสะอาดชุดป้อนมีดให้สะอาด เพื่อป้องกันเศษเหล็กติดอยู่ที่ชุดป้อนมีด ซึ่งอาจจะทำให้เม็ดมีดกลึงไม่แนบสนิทกับชุดป้อนมีด และเม็ดมีดกลึงอาจจะแตกเมื่อใช้ทำการทดลอง

3. ตรวจสอบทิศทางของน้ำ Coolant โดยทำการตรวจสอบทิศทางของน้ำ Coolant ให้ฉีดไปตรงตำแหน่งปลายคมตัดของมีดกลึงเหมือนกันทุกการทดลอง

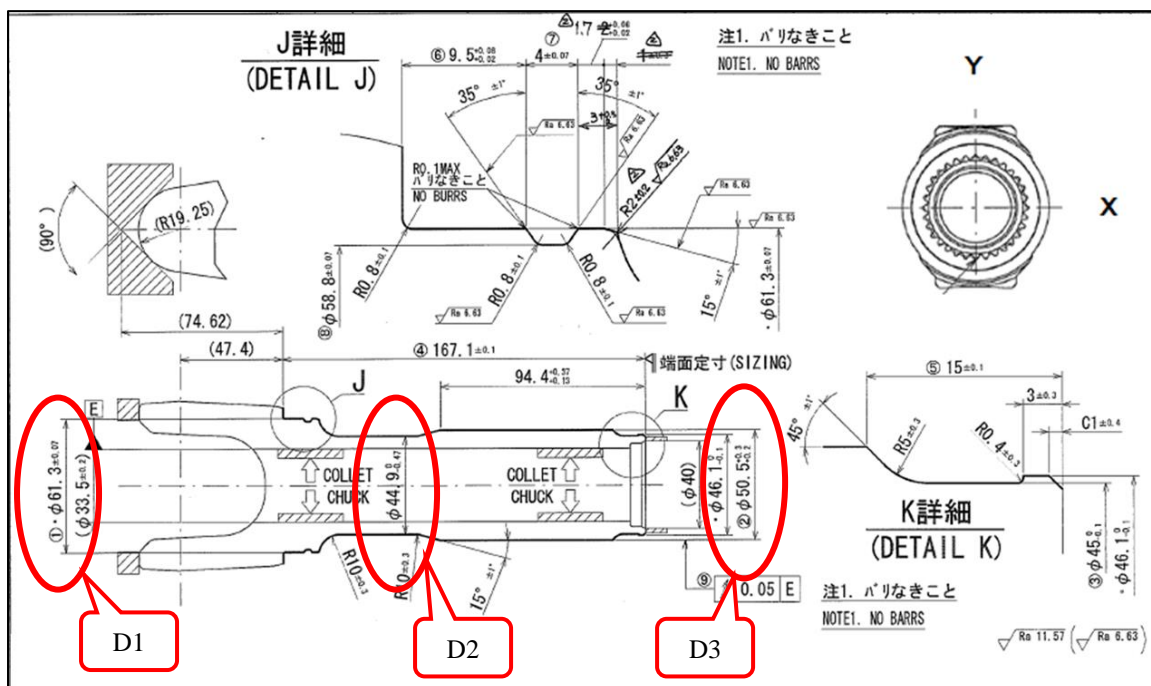
4. ปรับแก้โปรแกรมโดยทำการปรับอัตราป้อนต่อรอบและความเร็วตัดของ NC Program ในตำแหน่งที่ F1, F2, F3, F4, F5 และ S ตามที่ได้มีการออกแบบการทดลองไว้ ซึ่ง NC Program แสดงในตารางภาคผนวกที่ ก-1 และมีการทวนสอบความถูกต้องของการปรับแก้โปรแกรมอีกครั้งเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ผิดตำแหน่งของเครื่องจักร

5. ทำการทดลองกลึงชิ้นงาน 30 ชิ้นต่อเนื่อง ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดตามตารางที่ 3-5

6. ทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้ง 30 ชั้น และวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงานตัวที่ 1, 15, และ 30 บันทึกข้อมูลลงในใบบันทึกข้อมูลการทดลอง ซึ่งแสดงอยู่ในตารางภาคผนวกที่ ค-1 ถึง ค-9

### การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการหาค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน

ในการวิจัยนี้การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานจะถูกนำมาใช้แทนการวัดความลึกหรือของมีดกลึง เนื่องจากไม่สามารถหยุดการผลิตเพื่อทำการวัดค่าความลึกหรือของมีดกลึงได้ การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแต่ละชิ้นจะกระทำ 3 จุด คือ ที่ตำแหน่งที่ D1 (Ø61.3), D2 (Ø44.9) และ D3 (Ø 50.5) แสดงดังภาพที่ 3-3 โดยจะทำการวัด ทั้ง 2 แนวแกน คือ แนวแกนที่ตรงกับด้านที่เป็นหูของชิ้นงานกำหนดให้เป็นแกน X และหมุนชิ้นงาน 90 องศา กำหนดให้แนวแกนนี้เป็นแนวแกน Y หลังจากนั้นนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยกันเพื่อเป็นตัวแทนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตำแหน่งนั้น ๆ สุดท้ายค่าความแตกต่างของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานตัวที่ 1 และตัวที่ 30 จะถูกกำหนดให้เป็นค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (E) ซึ่งเป็นผลการทดลองที่จะนำไปใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป



ภาพที่ 3-3 ตำแหน่งและทิศทางในการวัดชิ้นงาน

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ได้แก่ ไมโครมิเตอร์ (Micrometer) โดยได้เลือกใช้ไมโครมิเตอร์ยี่ห้อ Mitutoyo ที่อ่านค่าแบบดิจิทัลและมีความละเอียด 0.001 mm เพื่อให้การวัดขนาดชิ้นงานมีความถูกต้องและแม่นยำที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 ไมโครมิเตอร์ (Micrometer)

### การวัดความหยาบผิว

การวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงานกระทำเพื่อตรวจสอบความหยาบของผิวว่าความหยาบผิวที่ได้จากเงื่อนไขในการตัดเฉือนที่ทดลอง เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดหรือไม่ โดยจะทำการวัดความหยาบผิวของชิ้นงานตัวที่ 1, 15, และ 30 รวมทั้งหมด 3 ชิ้น ด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface roughness tester) ยี่ห้อ Mitutoyo ที่มีความละเอียด 0.000001 mm ที่ตำแหน่ง D3 ( $\varnothing 50.5$ ), D2 ( $\varnothing 44.9$ ) และ D3 ( $\varnothing 50.5$ ) ดังแสดงในภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-5 เครื่องวัดความหยาบผิวชิ้นงาน (Surface roughness tester)

### การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองจะเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการผลิต และในการวิเคราะห์จะใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Analysis of main effect) และการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและผลการทดลองในรูปของสมการ Regression และนำผลการวิเคราะห์มาใช้ในการคำนวณปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการผลิต

#### 1. การวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Analysis of main effect)

การวิเคราะห์อิทธิพลหลักเป็นการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลการทดลอง โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3-4 แล้วบันทึกข้อมูลจากการคำนวณลงในตาราง Main effect เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

$$\text{อิทธิพลหลักของปัจจัย } x \text{ ที่ระดับ } i = \frac{\text{ผลรวมของ Respond Y ที่ระดับปัจจัย } x \text{ เท่ากับ } i}{3} \quad (3-4)$$

จากตารางบันทึกข้อมูล Main effect จะแยกการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของอิทธิพลหลักของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (E) ซึ่งพิจารณาปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย และส่วนของอิทธิพลหลักของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อเวลาการทำงานของเครื่องจักร ซึ่งจะพิจารณาเพียง 2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเวลาได้แก่อัตราป้อนต่อรอบและความเร็วตัด โดยที่จะไม่พิจารณาชนิดของมิดคิลิ่ง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงมิดคิลิ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อเวลาการทำงานของเครื่องจักร จากนั้นจะทำการสร้างกราฟของอิทธิพลหลัก Main

effect plots และทำการพิจารณาอิทธิพลหลักของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อผลการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ระดับของตัวแปรที่ดีที่สุดจากการทดลอง

## 2. การสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์

การสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและผลการทดลอง เพื่อใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ระดับค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดของการทดลอง โดยที่ในการวิเคราะห์การทดลองนี้ได้กำหนดลำดับขั้นตอนไว้ดังนี้

2.1 แปลงค่าชุดข้อมูลของระดับตัวแปรให้อยู่ในรูปตัวเลข -1, 0 และ 1 โดยเรียงลำดับจาก ต่ำ ปานกลาง และสูง ตามลำดับ เพื่อให้เกิดความสะดวกในการวิเคราะห์และการคำนวณผลการทดลอง

2.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เพื่อหาสมการ Regression โดยการป้อนข้อมูลลงในโปรแกรม Minitab ตามตารางการทดลองขงทากูชิ L9 และทำการวิเคราะห์เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (E) และปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย โดยที่ค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานที่ได้จากการคำนวณจากสมการ Regression ได้กำหนดให้ใช้สัญลักษณ์  $E_r$

## การคำนวณจำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อคอมตัด

เพื่อความสะดวกในการประยุกต์ใช้งานในสายการผลิต การกำหนดอายุการใช้งานของมิดคิลิ่งจะกำหนดเป็นจำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ก่อนที่จะต้องทำการเปลี่ยนคมตัดของมิดคิลิ่ง โดยเงื่อนไขที่สำคัญคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานจะต้องไม่เกินพิคัดความเผื่อ (Tolerance) ที่ทางลูกค้ากำหนด ด้วยเหตุนี้จึงกำหนดค่าเผื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน โดยคำนวณจากค่าพิคัดความเผื่อและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่กำหนดในโปรแกรมให้เป็นค่าเริ่มต้นของการกลึง

การหาจำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อคมตัดก่อนที่คมตัดจะหมดอายุการใช้งาน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3-5 ซึ่งใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบกับค่าเป้าหมายที่กำหนด ซึ่งทำการเก็บข้อมูลมาจากการทดลองตัดเลื่อยชิ้นงานจำนวน 30 ชิ้นต่อเนื่อง โดยสมมุติให้อัตราการเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ (เชิงเส้นตรง) และค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานจากการคำนวณจากสมการ Regression (E<sub>r</sub>) จะได้จากการคำนวณของผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากหัวข้อ 2.2

$$TL = \left(\frac{A}{2}\right) \times \left(\frac{30}{E_r}\right) \quad (3-5)$$

เมื่อ  $TL$  = จำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อคอมตัด (ชิ้น)

$A$  = ค่าเผื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (mm)

$E_r$  = ค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานจากการคำนวณ จากสมการ Regression (mm)

ตารางที่ 3-6 พิกัดความเผื่อเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นและค่าเผื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานในแต่ละตำแหน่ง

| ตำแหน่งที่ | Basic $\varnothing$<br>(mm) | Tolerance<br>(mm) | Max. $\varnothing$<br>(mm) | Min. $\varnothing$<br>(mm) | $\varnothing$ เริ่มต้น<br>(mm) | ค่าเผื่อ A<br>(mm) |
|------------|-----------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------|
| D1         | 61.3                        | $\pm 0.07$        | 61.37                      | 61.23                      | 61.3                           | 0.07               |
| D2         | 44.9                        | - 0.47            | 44.9                       | 44.43                      | 44.665                         | 0.235              |
| D3         | 50.5                        | +0.3<br>+0.2      | 50.8                       | 50.7                       | 50.75                          | 0.05               |

### การคำนวณเวลาในการผลิต

การคำนวณเวลาในการผลิตแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ เวลาการผลิตรวม จะใช้วิธีการจับเวลาด้วยนาฬิกาจับเวลา และเวลาการตัดเฉือนเฉพาะส่วนที่มีการแปรผันตามการปรับอัตราป้อนและความเร็วตัด จะใช้วิธีการคำนวณเฉพาะตำแหน่งที่มีการปรับอัตราป้อนและความเร็วตัดเท่านั้น

ในการหาเวลาการผลิตรวมจะใช้วิธีการจับเวลาด้วยนาฬิกาจับเวลา โดยเริ่มต้นตั้งแต่เครื่องจักรเริ่มทำงานไปจนถึงเครื่องจักรเปิดประตูออกจนสุดและหยุดทำงาน โดยจะทำการจับเวลาทั้งหมด 10 รอบ ดังแสดงอยู่ในตารางภาคผนวกที่ ง-1 และใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ย ซึ่งการทำงานของเครื่องจักรที่ทำการทดลองจะได้ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 114.8 วินาที

เวลาการตัดเฉือนเฉพาะส่วนที่มีการแปรผันตามการปรับอัตราป้อนและความเร็วตัด โดยจะคำนวณตามสมการที่ 3-6 เพื่อคำนวณหาเวลาที่ต้องใช้ในการตัดเฉือนของขั้นตอนการกลึงทั้ง 5 ตำแหน่งการทดลอง (ขั้นตอนที่ F1, F2, F3, F4 และ F5) ซึ่งจากการคำนวณโดยใช้อัตราป้อนและความเร็วตัดที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน จะได้ผลรวมเวลาของทั้ง 5 ตำแหน่งอยู่ที่ 42.1 วินาที ซึ่งรายละเอียดการคำนวณได้แสดงอยู่ในตารางที่ 3-7 และคำนวณหาเวลาการตัดเฉือนในส่วนที่ไม่ได้ทำการ

ทดลองและไม่ได้รับผลกระทบจากการปรับเงื่อนไขในการตัดเฉือน ตามสมการที่ 3-7 ซึ่งผลการคำนวณพบว่ามีค่า 72.7 วินาที ดังแสดงในสมการที่ 3-9 เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณเวลาการผลิตในแต่ละเงื่อนไขการทดลองต่อไป

$$t = \frac{L}{f_z N} \quad (3-6)$$

เมื่อ  $N$  = ความเร็วรอบ (rev/min)

$f_z$  = อัตราป้อนต่อรอบ (mm/rev)

$L$  = ความยาวในการตัดเฉือน (mm)

$t$  = เวลาในการตัดเฉือน (sec)

$$t_T = t_n + t_a \quad (3-7)$$

$$114.8 = t_n + 42.1 \quad (3-8)$$

$$t_n = 72.7 \quad (3-9)$$

เมื่อ  $t_T$  = เวลาการผลิตต่อชิ้น (sec)

$t_n$  = เวลาการตัดเฉือนในส่วนที่ไม่ได้ทำการทดลอง (sec)

$t_a$  = เวลาการตัดเฉือนในส่วนที่ทำการทดลอง (sec)

ตารางที่ 3-7 การคำนวณเวลาการทำงานของเครื่องจักรในปัจจุบัน

| ขั้นตอนที่                         | L (mm) | Fz (mm/Rev) | N (rpm)   | t (Sec) |
|------------------------------------|--------|-------------|-----------|---------|
| F1                                 | 98.50  | 0.43        | 1216.70   | 11.30   |
| F2                                 | 98.50  | 0.28        | 1255.06   | 16.82   |
| F3                                 | 38.00  | 0.35        | 1255.06   | 5.19    |
| F4                                 | 37.98  | 0.35        | 1364.93   | 4.77    |
| F5                                 | 33.85  | 0.35        | 1426.04   | 4.07    |
| เวลารวมส่วนที่ทำการทดลอง ( $t_a$ ) |        |             |           | 42.1    |
| เวลาการผลิตต่อชิ้น ( $t_T$ )       |        |             | 42.1+72.7 | 114.8   |



### อัตราการผลิต

ในการผลิตชิ้นงานของเครื่องจักรหมายเลข LA-9048 ของกระบวนการผลิตที่ 2 ใช้เวลาในการผลิตชิ้นงานต่อชิ้นอยู่ที่ 114.8 วินาที และเวลาในการทำการผลิตได้แบ่งออกเป็น 2 กะการทำงาน โดยที่กะเช้าทำงาน 07.30-16.30 น. และกะกลางคืนทำงาน 19.30-04.30 น. เมื่อหลังจากหักเวลาพักของพนักงานออกไปแล้วจะเหลือเวลาการทำงานสุทธิเป็น 435 นาทีต่อกะ หรือคิดเป็น 870 นาทีต่อวัน หรือ 52,200 วินาทีต่อวัน ซึ่งสามารถคำนวณอัตราการผลิตโดยใช้สมการ 3-10 ได้เป็นอัตราการผลิตชิ้นงาน 454 ชิ้นต่อวัน

$$\text{อัตราการผลิต} = \frac{52200}{t_T} \text{ (ชิ้นต่อวัน)} \quad (3-10)$$

เมื่อ  $t_T$  = เวลาการผลิตต่อชิ้น (sec)

### ต้นทุนการผลิต

ในการคำนวณต้นทุนการผลิตของชิ้นงานในส่วนของการทดลองนี้ จะพิจารณาเฉพาะในส่วนของต้นทุนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัย ซึ่งจะไม่รวมต้นทุนวัตถุดิบและต้นทุนรวมอื่น ๆ ซึ่งไม่ได้รับผลกระทบโดยตรงจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัย โดยที่ต้นทุนที่จะทำการพิจารณาประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

#### 1. ต้นทุนที่ผันแปรตามจำนวนการผลิต

ต้นทุนในส่วนนี้ได้แก่ค่ามีดกลึง โดยมีดกลึงชนิด DMNG-15-04-08-PM มีราคาอยู่ที่เม็ดละ 267.45 บาท สามารถใช้ได้ 4 มุม และอายุการใช้งานของมีดกลึงในปัจจุบันอยู่ที่ 100 ชิ้นต่อมุม ดังนั้นต้นทุนส่วนของมีดกลึงในปัจจุบันอยู่ที่ 0.67 บาทต่อชิ้น ซึ่งการคำนวณต้นทุนของมีดกลึงต่อหน่วยการผลิตได้จากสมการที่ 3-11

$$\text{ค่ามีดกลึง} = \frac{267.45}{4 \times TL} \text{ (บาทต่อชิ้น)} \quad (3-11)$$

เมื่อ  $TL$  = จำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อคมตัด (ชิ้น)

#### 2. ต้นทุนที่ผันแปรตามอัตราการผลิต

ต้นทุนในส่วนนี้ประกอบไปด้วย ค่าแรง ค่าเดินเครื่องจักร และค่าเสื่อมราคาเครื่องจักร โดยในส่วนของค่าแรง ได้พิจารณาคำนวณจากค่าแรงขั้นต่ำ 300 บาทต่อวัน และการทำงาน 2 กะ

คิดเป็นเงิน 600 บาทต่อวัน ในปัจจุบันอัตราการผลิตต่อวันอยู่ที่ 454 ชิ้นต่อวัน จะได้ต้นทุนด้านค่าแรงในปัจจุบันอยู่ที่ 1.32 บาทต่อชิ้น ซึ่งการคำนวณต้นทุนด้านค่าแรงต่อหน่วยการผลิตได้จากสมการที่ 3-12

$$\text{ค่าแรง} = \frac{600}{\text{อัตราการผลิต}} \quad (\text{บาทต่อชิ้น}) \quad (3-12)$$

ต้นทุนค่าเดินเครื่องจักรจะพิจารณาจากกำลังไฟฟ้าของเครื่องจักร 11kW ทำงาน 8 ชั่วโมงต่อกะ หรือ 16 ชั่วโมงต่อวัน ด้วยอัตราค่าไฟ 2.6506 บาทต่อหน่วย จะได้ค่าไฟฟ้าในปัจจุบันอยู่ที่ 1.02 บาทต่อชิ้น ซึ่งสามารถคำนวณต้นทุนด้านค่าไฟฟ้าต่อหน่วยการผลิตได้จากสมการที่ 3-13

$$\text{ค่าเดินเครื่องจักร} = \frac{11 \times 16 \times 2.6506}{\text{อัตราการผลิตต่อวัน}} \quad (\text{บาทต่อชิ้น}) \quad (3-13)$$

ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักรจะพิจารณาจากราคาของเครื่องจักรที่ซื้อเข้ามาในราคา 4 ล้านบาท ซึ่งมีอายุในทางบัญชี 10 ปี หรือ 86,400 ชั่วโมง ไม่มีมูลค่าซาก เครื่องจักรทำงานโดยเฉลี่ย 16 ชั่วโมงต่อวัน ดังนั้นหากอัตราค่าเสื่อมราคาแบบเส้นตรง จะได้ค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักรอยู่ที่ 740.74 บาทต่อวัน ซึ่งปัจจุบันต้นทุนค่าเสื่อมราคาเครื่องจักรอยู่ที่ 1.63 บาทต่อชิ้น การคำนวณค่าเสื่อมราคาเครื่องจักรต่อหน่วยการผลิต สามารถทำได้ดังสมการที่ 3-14

$$\text{ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักร} = \frac{740.74}{\text{อัตราการผลิต}} \quad (\text{บาทต่อชิ้น}) \quad (3-14)$$

## บทที่ 4

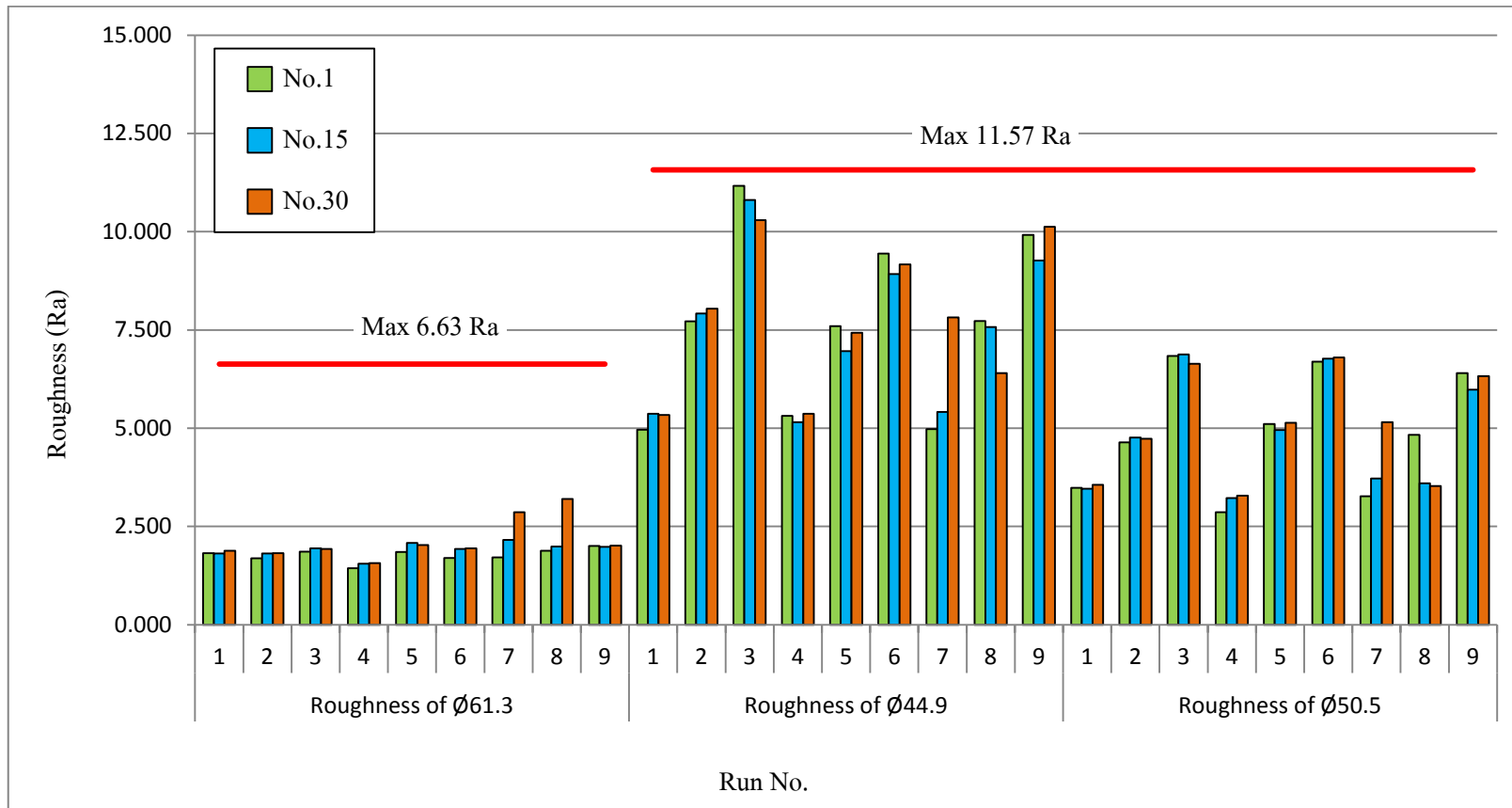
### ผลการดำเนินงาน

จากการดำเนินงานวิจัยตามวิธีการและขั้นตอนที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 ได้มีการบันทึกการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนต่าง ๆ ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดและผลลัพธ์ได้ดังนี้

#### ผลการทดลอง

จากการทดลองตามวิธีการทดลองที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 และเก็บข้อมูลผลการทดลองโดยการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน 30 ชิ้นต่อเนื่องด้วยไมโครมิเตอร์ ซึ่งผลการทดลองทั้ง 9 การทดลองตามตารางการทดลองของทากูชิได้แสดงอยู่ในตารางภาคผนวกที่ ค-1 ถึง ค-9 ตามลำดับการทดลอง และจากผลการทดลองจะพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องมาจากการสึกหรอบริเวณปลายคมตัดของมีดกลึง ซึ่งทำให้เกิดค่าความแตกต่างของชิ้นงานตัวที่ 1 และตัวที่ 30 โดยกำหนดให้เป็นค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (E) และเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองพบว่าค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานของตำแหน่ง D1, D2 และ D3 พบว่ามีค่าที่ไม่เท่ากัน เนื่องมาจากการกลึงลึก (Depth of cut) ในแต่ละตำแหน่งที่ไม่เท่ากันหรืออาจเกิดจากปัจจัยอื่น ๆ ที่ไม่ได้มีการควบคุมในการทดลอง และในการทดลองยังได้มีการคำนวณเวลาในการผลิตต่อชิ้น โดยใช้วิธีการคำนวณเวลาที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 และสรุปผลการทดลองค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (E) และเวลาการผลิตต่อชิ้น ( $t_p$ ) ลงในตารางที่ 4-1

จากผลการทดลองในส่วน of ค่าความหยาบผิวที่ได้จากการวัดผลจากเครื่องวัดความหยาบผิว โดยการวัดชิ้นงานตัวที่ 1, 15 และ 30 ตามวิธีการที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 พบว่าค่าความหยาบผิวของชิ้นงานจากการทดลองอยู่ภายใต้มาตรฐานที่กำหนดของแบบชิ้นงานคือไม่เกิน  $6.63 R_a$  ในตำแหน่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 66.3 mm และไม่เกิน  $11.57 R_a$  ในตำแหน่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 44.9 mm และ 50.5 mm ดังที่แสดงในภาพ 4-1 ซึ่งสรุปได้ว่าการทดลองไม่ส่งผลกระทบต่อให้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานเกินมาตรฐานกำหนดตามแบบของชิ้นงาน ซึ่งในการวิเคราะห์ในลำดับต่อไปจะไม่กล่าวถึงค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน



ภาพที่ 4-1 ค่าความหยาบผิวชิ้นงานจากการทดลอง

ตารางที่ 4-1 ผลการทดลองตามแบบการทดลองของทากูชิ L9

| ตารางการทดลองทากูชิ L9 |                    |                   |                             | ผลการทดลอง               |            |                         |            |                         |            |                          |
|------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------|------------|-------------------------|------------|-------------------------|------------|--------------------------|
| Run                    | Tool toughness (T) | Feed (F) (mm/Rev) | Cutting speed (S) (Rev/min) | D1 (ค่าเริ่มต้น 61.3000) |            | D2 (ค่าเริ่มต้น 44.665) |            | D3 (ค่าเริ่มต้น 50.750) |            | เวลาการผลิตต่อชิ้น (Sec) |
|                        |                    |                   |                             | Ø ชั้นสุดท้าย (mm)       | ค่า E (mm) | Ø ชั้นสุดท้าย (mm)      | ค่า E (mm) | Ø ชั้นสุดท้าย (mm)      | ค่า E (mm) |                          |
| 1                      | Min                | Min               | Min                         | 61.310                   | 0.010      | 44.677                  | 0.012      | 50.756                  | 0.005      | 114.8                    |
| 2                      | Min                | Center            | Center                      | 61.309                   | 0.009      | 44.675                  | 0.009      | 50.765                  | 0.015      | 102.8                    |
| 3                      | Min                | Max               | Max                         | 61.339                   | 0.039      | 44.730                  | 0.064      | 50.809                  | 0.058      | 95.4                     |
| 4                      | Center             | Min               | Center                      | 61.306                   | 0.006      | 44.681                  | 0.016      | 50.766                  | 0.016      | 109.3                    |
| 5                      | Center             | Center            | Max                         | 61.359                   | 0.059      | 44.741                  | 0.075      | 50.830                  | 0.080      | 99.3                     |
| 6                      | Center             | Max               | Min                         | 61.333                   | 0.032      | 44.712                  | 0.047      | 50.790                  | 0.039      | 102.3                    |
| 7                      | Max                | Min               | Max                         | 61.377                   | 0.077      | 44.786                  | 0.121      | 50.820                  | 0.070      | 105.1                    |
| 8                      | Max                | Center            | Min                         | 61.320                   | 0.020      | 44.694                  | 0.029      | 50.789                  | 0.038      | 107.3                    |
| 9                      | Max                | Max               | Center                      | 61.343                   | 0.043      | 44.736                  | 0.071      | 50.834                  | 0.084      | 98.4                     |

## การวิเคราะห์หัตถิทธิพลหลัก

การวิเคราะห์หัตถิทธิพลหลักเป็นการวิเคราะห์หัตถิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลการทดลอง ซึ่งได้แสดงวิธีการวิเคราะห์หัตถิทธิพลหลักไว้ในบทที่ 3 โดยที่การวิเคราะห์จะแยกออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของหัตถิทธิพลหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (E) ซึ่งพิจารณาปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย และส่วนของหัตถิทธิพลหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเวลาการผลิต ซึ่งจะพิจารณาเพียง 2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเวลาการผลิต ซึ่งได้แก่ อัตราป้อนต่อรอบและความเร็วตัด โดยที่จะไม่พิจารณาชนิดของมีดกลึง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงมีดกลึงจะไม่ส่งผลกระทบต่อเวลาการทำงานของเครื่องจักร

1. ในการวิเคราะห์หัตถิทธิพลหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (E) ได้ทำการสร้างตารางแสดงหัตถิทธิพลหลักของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 4-2, 4-3 และ 4-4 และสร้างเป็นกราฟแสดงหัตถิทธิพลหลักของปัจจัยต่อค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน ซึ่งได้แสดงในภาพที่ 4-2 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าระดับของปัจจัยที่ดีที่สุดจากการทดลอง

จากการวิเคราะห์หัตถิทธิพลชนิดของมีดกลึงที่ส่งผลกระทบต่อค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (E) จากกราฟในภาพที่ 4-2 พบว่าการเปลี่ยนแปลง toughness ของมีดกลึง ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญกับค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (E) ของทั้ง 3 ตำแหน่งที่ทำการวัดค่า โดยมีดกลึงที่มี toughness ต่ำ (T\_Min) จะส่งผลให้ค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานมีค่าต่ำ (มีดกลึงมีการสึกหรอต่ำ) เนื่องจากมีดกลึงที่มี toughness ต่ำจะมีความแข็งสูง ซึ่งทำให้มีดกลึงสามารถทนต่อการสึกหรอได้ดีกว่ามีดกลึงที่มี toughness สูง (T\_Max) ดังแสดงในภาพที่ 4-2 จึงสามารถสรุปได้ว่า มีดกลึงเกรด 4315 ซึ่งเป็นชนิดที่มี toughness ต่ำเป็นมีดกลึงชนิดที่เหมาะสมที่สุดจากมีดกลึงทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ในการทดลองนี้

การวิเคราะห์หัตถิทธิพลของอัตราป้อนที่ส่งผลกระทบต่อค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (E) จากกราฟในภาพที่ 4-2 พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราป้อนไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญกับค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (E) เนื่องจากกราฟไม่มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างชัดเจน โดยที่ค่าระดับของอัตราป้อนที่ส่งผลให้ค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานมีค่าต่ำที่สุดคือค่ากลาง (F\_Center) และค่าระดับของอัตราป้อนที่ส่งผลให้ค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานมีค่าสูงกว่าคือ ค่าอัตราป้อนในระดับที่ต่ำ (F\_Min) เนื่องจากมีระยะทางในการกลึงชิ้นงานที่

มากขึ้นจึงทำให้มีดกถึงเกิดการสึกหรอมากกว่า และค่าอัตราป้อนในระดับที่สูง (F\_Max) เนื่องจากการกลึงเนื้อเหล็กออกในปริมาณที่มากทำให้เกิดความร้อนสูงบริเวณคมตัด ส่งผลให้มีดกถึงมีการสึกหรอและเสียรูปเร็วขึ้น จึงทำให้ค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น

การวิเคราะห์อิทธิพลของความเร็วตัดที่ส่งผลกระทบกับค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (E) จากกราฟในภาพที่ 4-2 พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วตัดส่งผลอย่างมีนัยสำคัญกับค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (E) โดยที่ความเร็วตัดต่ำ (S\_Min) จะส่งผลให้ค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานมีค่าต่ำ (มีดกถึงมีการสึกหรอต่ำ) เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณคมตัดมีอุณหภูมิต่ำ จึงทำให้มีดกถึงทนการสึกหรอและคงสภาพรูปร่างได้ดี และที่ความเร็วตัดสูง (S\_Max) จะส่งผลให้ค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานมีค่าสูง (มีดกถึงมีการสึกหรอสูง) เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณคมตัดมีอุณหภูมิสูง จึงทำอัตราการสึกหรอของมีดกถึงเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4-2 อิทธิพลหลักของประเภทมีดกถึง (T) ต่อค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (E)

| ค่า E              | ระดับปัจจัยของประเภทมีดกถึง (T) |        |       |
|--------------------|---------------------------------|--------|-------|
|                    | Min                             | Center | Max   |
| ที่ตำแหน่ง D1 (mm) | 0.019                           | 0.033  | 0.046 |
| ที่ตำแหน่ง D2 (mm) | 0.029                           | 0.046  | 0.073 |
| ที่ตำแหน่ง D3 (mm) | 0.026                           | 0.045  | 0.064 |

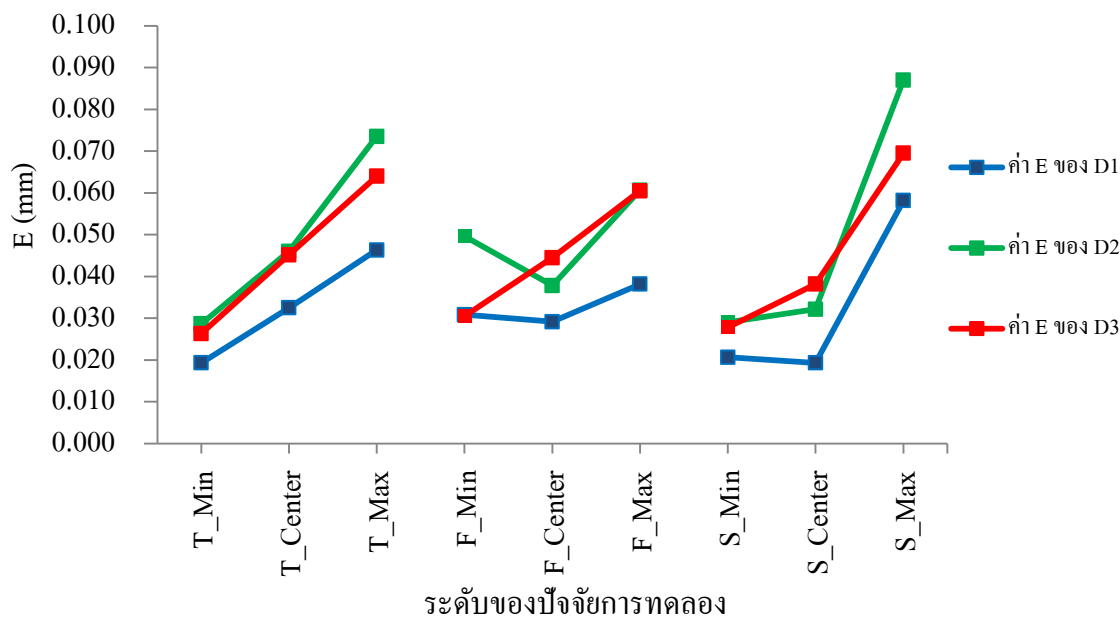
ตารางที่ 4-3 อิทธิพลหลักของอัตราป้อนต่อรอบ (F) ต่อค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  
เริ่มต้นของชิ้นงาน (E)

| ค่า E              | ระดับปัจจัยของอัตราป้อนต่อรอบ (F) |        |       |
|--------------------|-----------------------------------|--------|-------|
|                    | Min                               | Center | Max   |
| ที่ตำแหน่ง D1 (mm) | 0.031                             | 0.029  | 0.038 |
| ที่ตำแหน่ง D2 (mm) | 0.050                             | 0.038  | 0.061 |
| ที่ตำแหน่ง D3 (mm) | 0.031                             | 0.044  | 0.060 |

ตารางที่ 4-4 อิทธิพลหลักของความเร็วตัด (S) ต่อค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  
เริ่มต้นของชิ้นงาน (E)

| ค่า E              | ระดับปัจจัยของความเร็วตัด (S) |        |       |
|--------------------|-------------------------------|--------|-------|
|                    | Min                           | Center | Max   |
| ที่ตำแหน่ง D1 (mm) | 0.021                         | 0.019  | 0.058 |
| ที่ตำแหน่ง D2 (mm) | 0.029                         | 0.032  | 0.087 |
| ที่ตำแหน่ง D3 (mm) | 0.028                         | 0.038  | 0.070 |





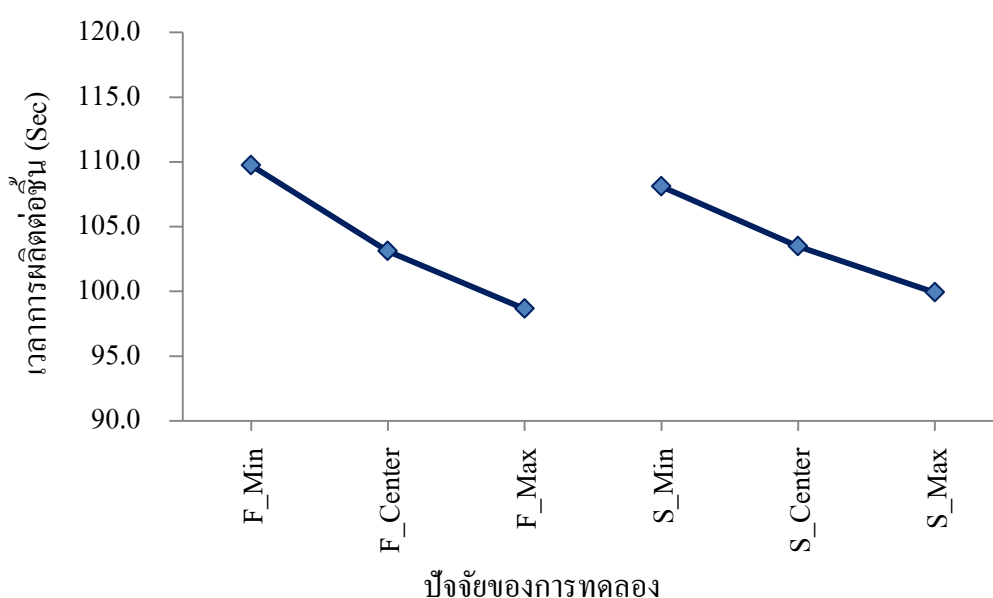
ภาพที่ 4-2 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของปัจจัยต่อค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน ที่ตำแหน่ง D1, D2 และ D3

2. อิทธิพลหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเวลาการผลิต ได้ทำการสร้างตารางแสดงอิทธิพลหลักของปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อัตราป้อนและความเร็วตัด ดังแสดงในตารางที่ 4-5 และสร้างเป็นกราฟแสดงอิทธิพลหลักของปัจจัยต่อเวลาการผลิตต่อชิ้น ซึ่งได้แสดงในภาพที่ 4-3 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าระดับของปัจจัยที่ดีที่สุดจากการทดลอง

การวิเคราะห์อิทธิพลของอัตราป้อนและความเร็วตัดที่ส่งผลกระทบต่อเวลาการผลิต จากกราฟในภาพที่ 4-3 พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วตัดและอัตราป้อนส่งผลอย่างมีนัยสำคัญกับเวลาการผลิต โดยที่ค่าระดับของอัตราป้อนและความเร็วตัดที่มีค่าต่ำจะส่งผลให้เวลาการผลิตมีค่าสูง (ใช้เวลาในการผลิตต่อชิ้นนานขึ้น) เนื่องจากรอบในการหมุนกลึงชิ้นงานช้าลงและจำนวนรอบในการหมุนกลึงมากขึ้น และที่ระดับอัตราป้อนและความเร็วตัดสูงขึ้นจะส่งผลให้เวลาการผลิตสั้นลง (ใช้เวลาในการผลิตต่อชิ้นเร็วขึ้น) เนื่องจากรอบในการหมุนกลึงชิ้นงานเร็วขึ้นและจำนวนรอบในการหมุนน้อยลง

ตารางที่ 4-5 อิทธิพลหลักของปัจจัยต่อเวลาการผลิตต่อชิ้น (Sec)

| ปัจจัย            | ระดับปัจจัยของ Feed และ Cutting speed |        |      |
|-------------------|---------------------------------------|--------|------|
|                   | Min                                   | Center | Max  |
| Feed (F)          | 109.7                                 | 103.1  | 98.7 |
| Cutting speed (S) | 108.1                                 | 103.5  | 99.9 |



ภาพที่ 4-3 ข้อมูลอิทธิพลหลักของปัจจัยต่อเวลาการผลิตต่อชิ้น

สรุปผลจากการวิเคราะห์อิทธิพลหลักของปัจจัยจากกราฟในภาพที่ 4-2 และ 4-3 พบว่ามีดกลึงชนิดที่มีค่า toughness ต่ำ เป็นมีดกลึงชนิดที่ดีที่สุดจากทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ทำการทดลอง เนื่องจากส่งผลให้ค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (E) มีค่าต่ำที่สุด โดยที่การเปลี่ยนแปลงมีดกลึงไม่ส่งผลกระทบต่อเวลาในการผลิตชิ้นงาน ส่วนอัตราป้อนยังไม่สามารถสรุประดับปัจจัยที่ดีที่สุดได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอัตราป้อนไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญกับค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (E) และในส่วนของการพิจารณา ค่าความเร็วตัดเพื่อหาระดับของปัจจัยที่ดีที่สุดพบว่า ค่าปัจจัยที่ส่งผลให้วัตถุประสงค์เป้าหมาย 2 วัตถุประสงค์เกิดความขัดแย้งกัน เนื่องจากค่าระดับปัจจัยที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ส่งผลกระทบกับ

ค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (E) คือค่าความเร็วตัดที่ระดับต่ำ (S\_Min) แต่ค่าระดับปัจจัยที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ส่งผลกระทบต่อเวลาการผลิต คือ ค่าความเร็วตัดที่ระดับสูง (S\_Max) ซึ่งจะพิจารณาโดยการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ระดับปัจจัยที่ดีที่สุดสำหรับการผลิตต่อไป

### การสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์

การสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์เป็นการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการทดลองและผลการทดลอง เพื่อใช้สมการความสัมพันธ์ในการคำนวณและวิเคราะห์หาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต ซึ่งลำดับขั้นตอนในการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในบทที่ 3

#### 1. แปลงค่าชุดข้อมูลของระดับปัจจัยให้อยู่ในรูปตัวเลข

เพื่อให้สามารถสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ได้ระดับของปัจจัยควรถูกกำหนดอยู่ในรูปแบบของตัวเลข ดังนั้นจึงได้ทำการแปลงระดับของปัจจัยการทดลองให้อยู่ในรูปตัวเลข -1, 0 และ 1 ตามค่าระดับของปัจจัย Min , Center และ Max ตามลำดับ ดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 การแปลงค่าระดับปัจจัยให้อยู่ในรูปตัวเลข

| Variables | Coded parameter |        |     |
|-----------|-----------------|--------|-----|
|           | Min             | Center | Max |
| Tool      | -1              | 0      | 1   |
| Feed      | -1              | 0      | 1   |
| Speed     | -1              | 0      | 1   |

#### 2. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เพื่อสร้างตัวแบบ

ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยและผลการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab และสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ที่แสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยและผลการทดลอง โดยที่ในส่วนของปัจจัยในการทดลองจะใช้ตารางการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ L9 และในส่วนของผลการทดลองจะพิจารณาจากผลการทดลองค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (E) ของตำแหน่งที่ 3 (D3) ตามตารางที่ 4-1 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แบบของชิ้นงานกำหนดค่าพิสัยความเผื่อ (Tolerance) แคบที่สุด (A=0.05 mm) ตามที่ระบุในตารางที่ 3-6 ซึ่งเงื่อนไขและผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 ข้อมูลที่ใส่ลงในโปรแกรม Minitab

| Run | Condition |    |    | Response |
|-----|-----------|----|----|----------|
|     | T         | F  | S  | E (D3)   |
| 1   | -1        | -1 | -1 | 0.005    |
| 2   | -1        | 0  | 0  | 0.015    |
| 3   | -1        | 1  | 1  | 0.058    |
| 4   | 0         | -1 | 0  | 0.016    |
| 5   | 0         | 0  | 1  | 0.080    |
| 6   | 0         | 1  | -1 | 0.039    |
| 7   | 1         | -1 | 1  | 0.070    |
| 8   | 1         | 0  | -1 | 0.038    |
| 9   | 1         | 1  | 0  | 0.084    |

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยการทดลองและผลการทดลองค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (E) จากโปรแกรม Minitab ทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ตามที่แสดงอยู่ในสมการที่ 4-1 ซึ่งข้อมูลผลการทดลองทั้งหมดได้แสดงไว้ในภาคผนวก จ-1 และจากการพิจารณาผลการทดลองพบว่าค่า R-squared มีค่าเท่ากับ 99.98% และค่า Adjusted R-square มีค่าเท่ากับ 99.91% ซึ่งสรุปได้ว่าสมการที่ 4-1 ที่ได้มานั้นสามารถอธิบายความผันแปรของผลตอบสนองได้เป็นอย่างดีและมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการคำนวณต่อไป

$$E_r = 0.033250 + 0.019000T + 0.016750F + 0.028625S + 0.017625S * S + 0.015250T * F + 0.003500T * S \quad (4-1)$$

### ผลการคำนวณจำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อคอมตัด

การคำนวณจำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อคอมตัดจะคำนวณจากวิธีการที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งจะต้องมีการคำนวณค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (E<sub>r</sub>) โดยคำนวณจากสมการที่ 4-1 และหลังจากนั้นจึงจะสามารถคำนวณค่าจำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อคอมตัดตามสมการที่ 3-5 ซึ่งในการคำนวณจะกำหนดเลือกใช้มีดกลึงเป็นชนิดที่มี toughness ต่ำ (-1) ซึ่งได้ถูกวิเคราะห์ main effect แล้วพบว่าเป็นมีดกลึงที่มีอัตราการสึกหรอต่ำที่สุด ส่วนปัจจัยอีก 2 ปัจจัย

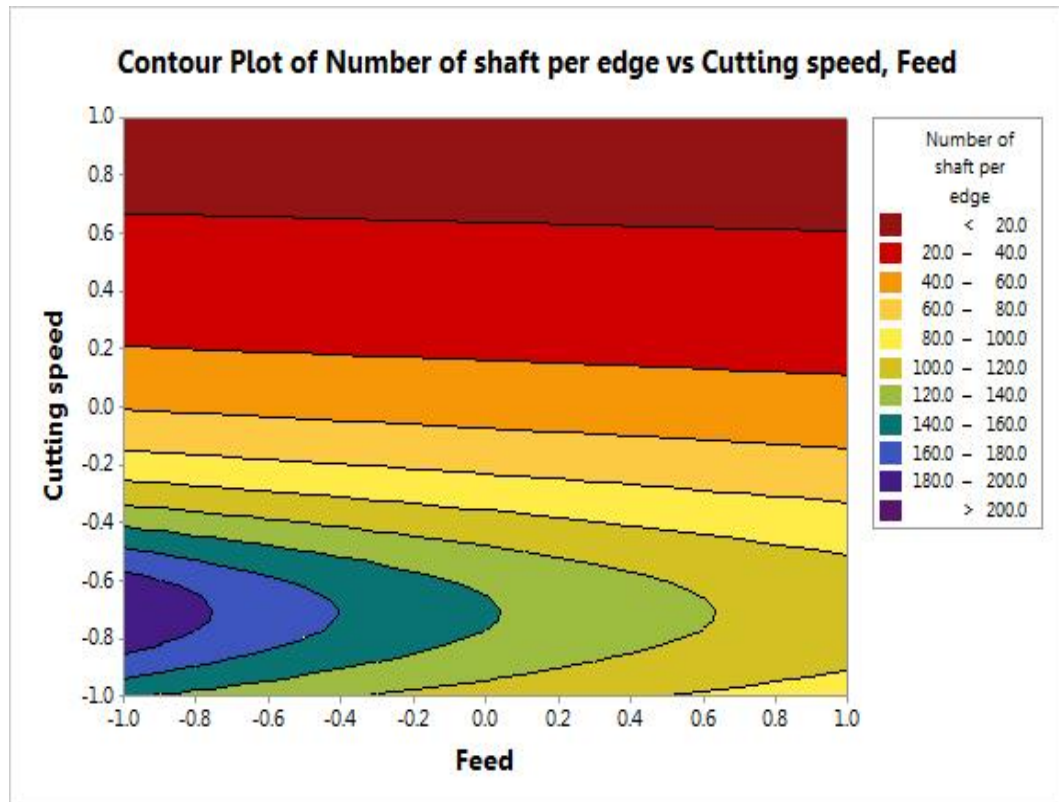
ซึ่งได้แก่ อัตราป้อนต่อรอบและความเร็วตัดจะพิจารณาทุกกรณีที่เป็นไปได้ คือ Min (-1) , Center (0) และ Max (1) ซึ่งจะได้ผลการคำนวณทั้งหมด 9 ข้อมูล ดังที่แสดงในตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 ผลการคำนวณจำนวนชิ้นที่ผลิตได้ต่อคมตัดจากสมการ Regression

| No | Tool (T) | Feed (F) | Speed (S) | ค่าคลาดเคลื่อนจากขนาด<br>เส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น<br>ของชิ้นงาน ( $E_r$ ) | จำนวนชิ้นงานที่<br>ผลิตได้ต่อคมตัด<br>(TL) |
|----|----------|----------|-----------|--|--|
| 1  | -1       | -1       | -1        | 0.005  | 142.857                                    |
| 2  | -1       | -1       | 0         | 0.013  | 58.824                                     |
| 3  | -1       | -1       | 1         | 0.056  | 13.514                                     |
| 4  | -1       | 0        | -1        | 0.007  | 111.111                                    |
| 5  | -1       | 0        | 0         | 0.014  | 52.632                                     |
| 6  | -1       | 0        | 1         | 0.057  | 13.158                                     |
| 7  | -1       | 1        | -1        | 0.008  | 90.909                                     |
| 8  | -1       | 1        | 0         | 0.016  | 47.619                                     |
| 9  | -1       | 1        | 1         | 0.059  | 12.821                                     |

จากผลการคำนวณจำนวนชิ้นที่ผลิตได้ต่อคมตัดตามตารางที่ 4-8 และนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราป้อน ความเร็วตัด และผลการคำนวณจำนวนชิ้นที่ผลิตได้ต่อคมตัด ดังที่แสดงในภาพที่ 4-4 พบว่าเมื่ออัตราป้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้แนวโน้มของจำนวนชิ้นที่ผลิตได้ต่อคมตัดมีแนวโน้มลดต่ำลง เนื่องจากความกว้างของการกลึงเนื้อเหล็กออกในหนึ่งรอบจะกว้างขึ้น (กลึงเนื้อเหล็กออกมากขึ้น) ทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นบริเวณคมตัด และส่งผลให้มีคดกึ่งมีการสึกหรอและเสียรูปเร็วขึ้น จึงทำให้มีคดกึ่งใช้กลึงชิ้นงานได้น้อยลง

ในส่วนของการความเร็วตัดพบว่าเมื่อความเร็วตัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้แนวโน้มของจำนวนชิ้นที่ผลิตได้ต่อคมตัดมีแนวโน้มลดต่ำลง เนื่องจากมีการความเร็วในการหมุนตัดชิ้นงานเร็วขึ้น ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณคมตัดมีอุณหภูมิสูงขึ้น มีคดกึ่งจึงเสียรูปเร็วขึ้นและใช้งานได้น้อยลง



ภาพที่ 4-4 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราป้อน ความเร็วตัดและจำนวนชิ้นที่ผลิตได้ต่อคมตัด  
(Number of shaft per edge)

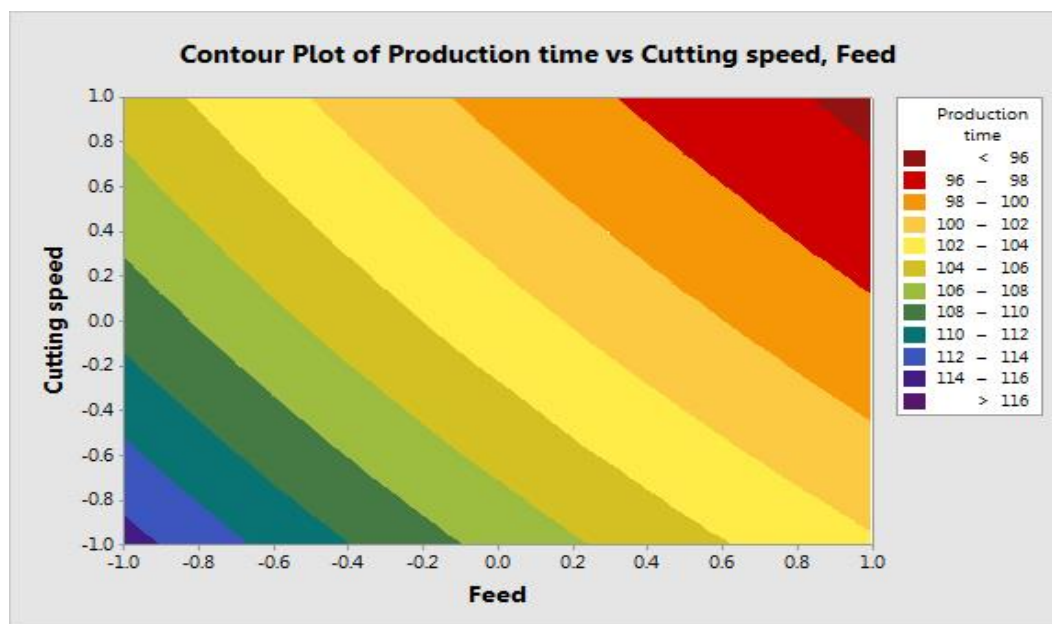
### ผลการคำนวณเวลาในการผลิต

การคำนวณเวลาการผลิตต่อชิ้นจะคำนวณจากวิธีการที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งจะคำนวณเฉพาะตำแหน่งที่มีการปรับเปลี่ยนปัจจัยในการตัดเฉือนเท่านั้น และเมื่อนำไปรวมกับเวลาการผลิตที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของปัจจัย ซึ่งก็คือ 72.7 วินาที จะได้เป็นเวลาการผลิตต่อชิ้น ( $t_p$ ) ดังที่แสดงผลการคำนวณเวลาการผลิตชิ้นงานต่อชิ้นในตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 ผลการคำนวณเวลาการผลิตชิ้นงานต่อชิ้น

| No | Tool (T) | Feed (F) | Speed (S) | เวลาการผลิตต่อชิ้น ( $t_p$ ) |
|----|----------|----------|-----------|------------------------------|
| 1  | -1       | -1       | -1        | 114.8                        |
| 2  | -1       | -1       | 0         | 109.3                        |
| 3  | -1       | -1       | 1         | 105.1                        |
| 4  | -1       | 0        | -1        | 107.4                        |
| 5  | -1       | 0        | 0         | 102.9                        |
| 6  | -1       | 0        | 1         | 99.4                         |
| 7  | -1       | 1        | -1        | 102.3                        |
| 8  | -1       | 1        | 0         | 98.4                         |
| 9  | -1       | 1        | 1         | 95.4                         |

จากผลการคำนวณเวลาการผลิตต่อชิ้นตามที่แสดงในตารางที่ 4-9 และนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราป้อน ความเร็วตัดและผลการคำนวณเวลาการผลิตต่อชิ้น ดังแสดงในภาพที่ 4-5 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราป้อนและความเร็วตัดระยะเวลาที่ต้องใช้ในการผลิตจะมีค่าน้อยลง แต่อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อจำกัดทางการผลิตต่าง ๆ เช่น ความหนาผิว อายุการใช้งานของเครื่องมือตัด และต้นทุนการผลิต ทำให้การเพิ่มอัตราป้อนและความเร็วตัดจำเป็นจะต้องพิจารณาให้ไม่เกินค่าที่เหมาะสม



ภาพที่ 4-5 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราป้อน ความเร็วตัดและเวลาการผลิตต่อชิ้น

#### ผลการคำนวณอัตราการผลิต

การคำนวณอัตราการผลิตจะคำนวณจากวิธีการที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งเป็นการคำนวณอัตราการผลิตชิ้นงานต่อวัน โดยที่ 1 วันจะใช้เวลาในการทำงานทั้ง 2 กระบวนการคิดเป็น 870 นาทีต่อวัน หรือ 52,200 วินาทีต่อวัน และเวลาในการผลิตต่อชิ้นจะใช้เวลาจากการคำนวณตามตารางที่ 4-9 โดยที่ผลการคำนวณอัตราการผลิตได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 ผลการคำนวณอัตราการผลิต

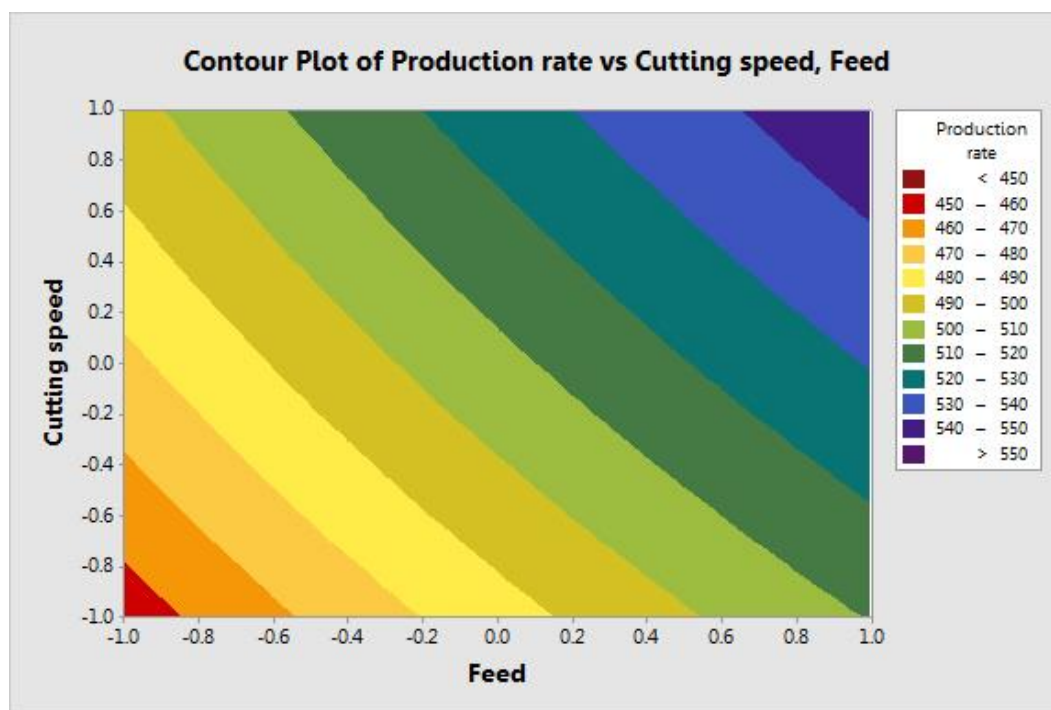
| No | เวลาการผลิตต่อชิ้น ( $t_p$ ) | อัตราการผลิต (ชิ้นต่อวัน) |
|----|------------------------------|---------------------------|
| 1  | 114.8                        | 454.70                    |
| 2  | 109.3                        | 477.58                    |
| 3  | 105.1                        | 496.67                    |
| 4  | 107.4                        | 486.03                    |
| 5  | 102.9                        | 507.29                    |
| 6  | 99.4                         | 525.15                    |



ตารางที่ 4-10 (ต่อ)

| No | เวลาการผลิตต่อชิ้น ( $t_T$ ) | อัตราการผลิต (ชิ้นต่อวัน) |
|----|------------------------------|---------------------------|
| 7  | 102.3                        | 510.26                    |
| 8  | 98.4                         | 530.49                    |
| 9  | 95.4                         | 547.17                    |

จากผลการคำนวณอัตราการผลิตตามที่แสดงในตารางที่ 4-10 และนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราป้อน ความเร็วตัดและอัตราการผลิต ดังที่แสดงในภาพที่ 4-6 พบว่าการเพิ่มอัตราป้อนและความเร็วตัด ส่งผลให้อัตราการผลิตเพิ่มขึ้น เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานลดลง



ภาพที่ 4-6 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราป้อน ความเร็วตัดและอัตราการผลิต

### ผลการคำนวณต้นทุนในการผลิตชิ้นงาน

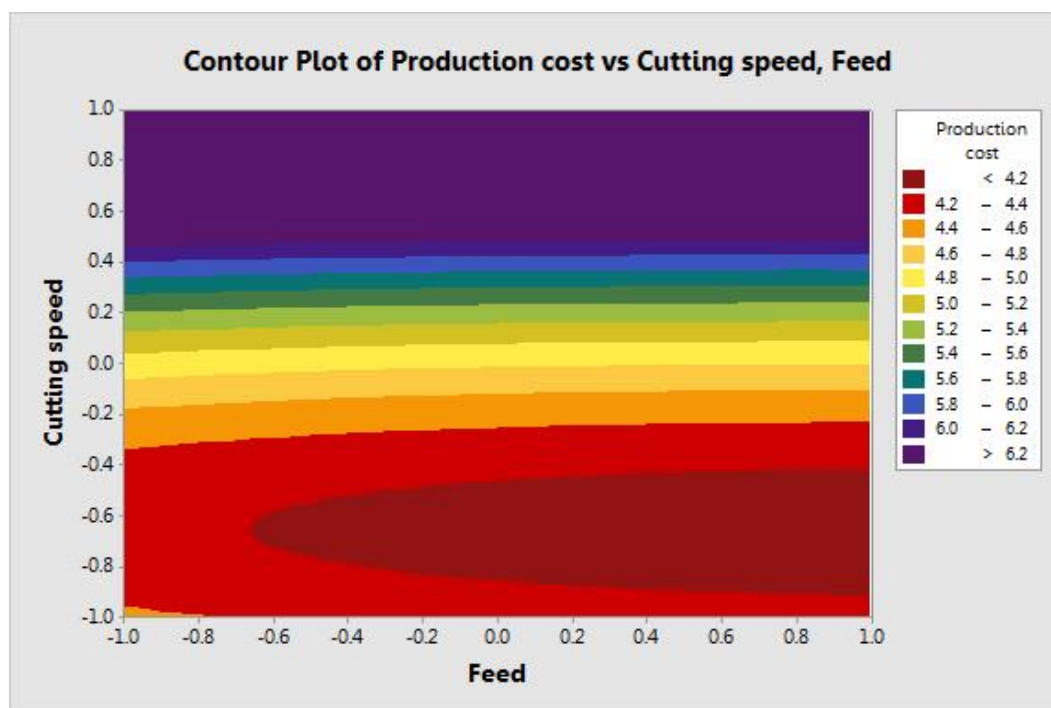
การคำนวณต้นทุนการผลิตชิ้นงานต่อชิ้นในการทำการทดลองนี้ จะพิจารณาเฉพาะต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยการทดลอง โดยที่จะไม่พิจารณาต้นทุนส่วนของวัตถุดิบและต้นทุนส่วนอื่น ๆ เนื่องจากการทดลองเป็นการทดลองเพียงหนึ่งกระบวนการผลิตเท่านั้น โดยที่จะพิจารณาในส่วนของ ต้นทุนด้านค่ามีดกลึง ต้นทุนด้านค่าแรง ต้นทุนด้านค่าเดินเครื่องจักร และต้นทุนด้านค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักร ซึ่งวิธีการคำนวณได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 และผลการคำนวณต้นทุนการผลิตได้แสดงในตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 ผลการคำนวณต้นทุนการผลิต

| No | ต้นทุนการผลิต (บาทต่อชิ้น) |        |                        |                              | ต้นทุนการผลิต<br>รวม |
|----|----------------------------|--------|------------------------|------------------------------|----------------------|
|    | ค่ามีดกลึง                 | ค่าแรง | ค่าเดิน<br>เครื่องจักร | ค่าเสื่อมราคา<br>เครื่องจักร |                      |
| 1  | 0.468                      | 1.32   | 1.03                   | 1.63                         | 4.443                |
| 2  | 1.137                      | 1.26   | 0.98                   | 1.55                         | 4.921                |
| 3  | 4.948                      | 1.21   | 0.94                   | 1.49                         | 8.587                |
| 4  | 0.602                      | 1.23   | 0.96                   | 1.52                         | 4.320                |
| 5  | 1.270                      | 1.18   | 0.92                   | 1.46                         | 4.833                |
| 6  | 5.082                      | 1.14   | 0.89                   | 1.41                         | 8.523                |
| 7  | 0.735                      | 1.18   | 0.91                   | 1.45                         | 4.277                |
| 8  | 1.404                      | 1.13   | 0.88                   | 1.40                         | 4.811                |
| 9  | 5.215                      | 1.10   | 0.85                   | 1.35                         | 8.518                |

จากผลการคำนวณต้นทุนการผลิตตามที่แสดงในตารางที่ 4-11 และนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราป้อน ความเร็วตัดและต้นทุนการผลิต ดังที่แสดงในภาพที่ 4-7 พบว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วตัด จะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากต้นทุนค่ามีดกลึง

มีการเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก ซึ่งเป็นผลมาจากการลดต่ำลงอย่างมากของจำนวนชิ้นที่ผลิตได้ต่อคมตัด (อายุการใช้งานของมีดกลึงสั้นลง) ตามที่แสดงในตารางที่ 4-8 ในขณะที่ต้นทุนด้านค่าแรง ค่าเดินเครื่องจักร และค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักร ที่ผันแปรตามอัตราการผลิตมีการลดลงน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนด้านค่ามีดกลึง และในส่วนของผลกระทบจากอัตราป้อนพบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราป้อน จะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตมีแนวโน้มลดต่ำลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราป้อนมีผลทำให้จำนวนชิ้นที่ผลิตได้ต่อคมตัดมีค่าลดต่ำลง ตามที่แสดงในตารางที่ 4-8 ซึ่งมีผลทำให้ต้นทุนด้านค่ามีดกลึงมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ต้นทุนด้านค่าแรง ค่าเดินเครื่องจักร และค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักร ที่ผันแปรกับอัตราการผลิตมีการลดต่ำลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนด้านค่ามีดกลึง



ภาพที่ 4-7 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราป้อน ความเร็วตัดและต้นทุนในการผลิต

### การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นทุนการผลิตและอัตราการผลิต

จากผลการคำนวณที่ได้แสดงในข้างต้น ได้สรุปเป็นตารางแสดงปัจจัยการทดลองและผลการทดลองจากการคำนวณ ซึ่งปัจจัยการทดลองในส่วนชนิดของมีดกลึงได้เลือกชนิดที่มี toughness ต่ำ (-1) และในส่วนของอัตราป้อนและความเร็วตัดจะกำหนดให้มีทุกระดับของปัจจัยที่เป็นไปได้

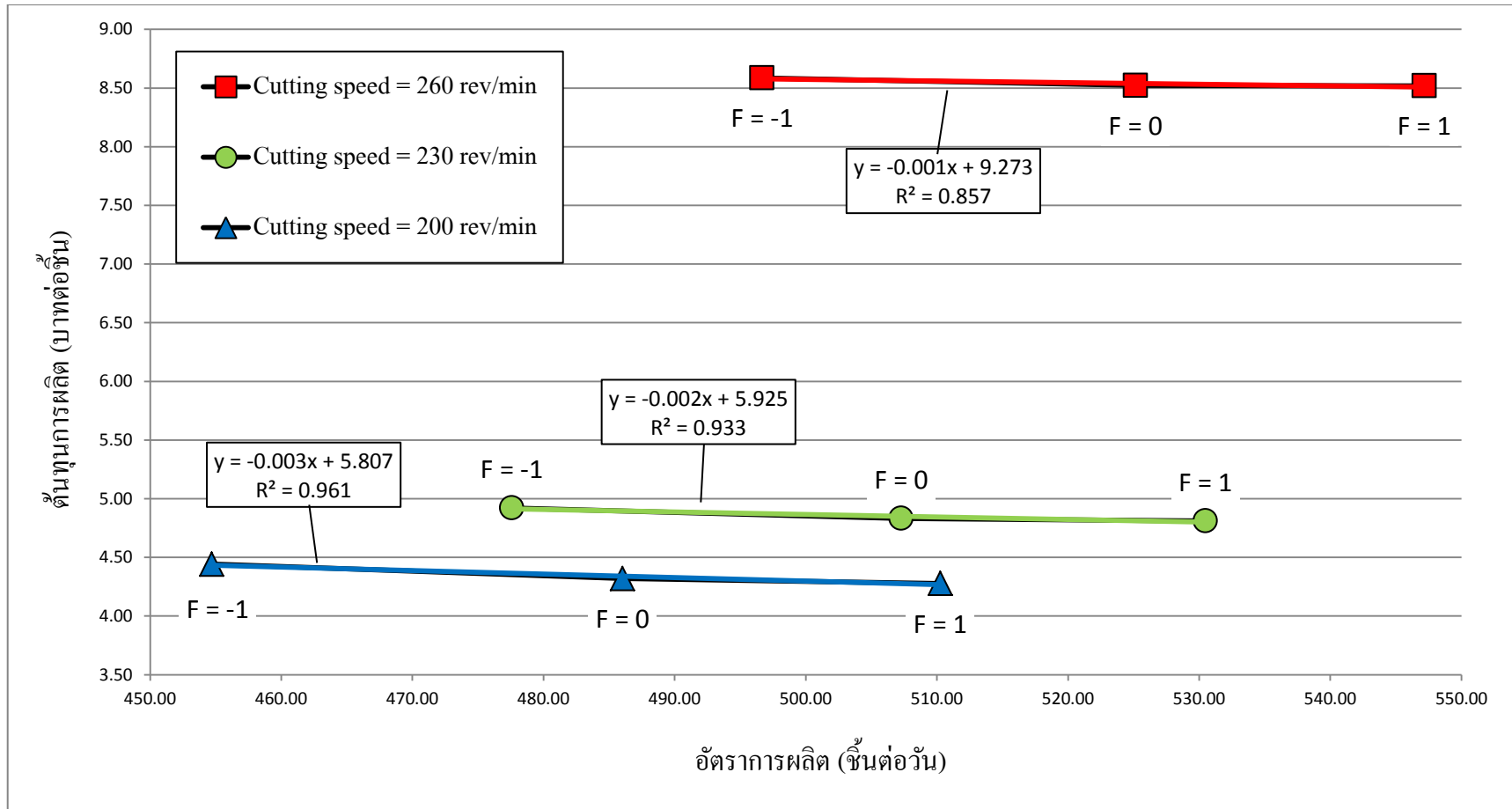
(-1, 0, 1) ซึ่งจะได้เงื่อนไขการทดลองทั้งหมด 9 เงื่อนไข ดังที่แสดงในตารางที่ 4-12 และจากผลการคำนวณได้สร้างเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการผลิตและต้นทุนการผลิต โดยที่กราฟความสัมพันธ์ของอัตราป้อน (F) ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการผลิตและต้นทุนการผลิต ได้แสดงในภาพที่ 4-8 และกราฟความสัมพันธ์ของความเร็วตัด (S) ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการผลิตและต้นทุนการผลิตได้แสดงในภาพที่ 4-9

จากกราฟความสัมพันธ์ของอัตราป้อน (F) ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการผลิตและต้นทุนการผลิต โดยกราฟความสัมพันธ์จะแยกตามระดับปัจจัยของความเร็วตัดได้ 3 กราฟความสัมพันธ์ ดังที่ได้แสดงในภาพที่ 4-8 และเมื่อพิจารณาค่า R-squared ของทั้ง 3 กราฟความสัมพันธ์มีค่า 96.1%, 93.3% และ 85.7% ตามลำดับ ซึ่งสรุปได้ว่ากราฟความสัมพันธ์นั้นสามารถอธิบายความผันแปรของปัจจัยตอบสนองได้เป็นอย่างดีและมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในวิเคราะห์ผลการทดลอง เมื่อทำการวิเคราะห์โดยพิจารณาในระดับปัจจัยของความเร็วตัดเดียวกันจะพบว่า แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอัตราป้อนจากค่าอัตราป้อนต่ำ ( $F = -1$ ) ไปจนถึงค่าอัตราป้อนสูง ( $F = 1$ ) จะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตมีค่าลดต่ำลงและอัตราการผลิตมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราป้อน จะส่งผลให้เวลาในการผลิตชิ้นงานต่อชิ้นลดลง และทำให้อัตราการผลิตเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตต่อชิ้นที่แปรผันตามเวลาการผลิตซึ่งได้แก่ ต้นทุนด้านค่าแรง ต้นทุนด้านค่าเดินเครื่องจักร และต้นทุนค่าเสื่อมราคา จะมีค่าลดต่ำลงด้วย และในส่วนของต้นทุนด้านค่ามีดกลึงจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราป้อนส่งผลกระทบต่อทำให้จำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อคมตัดลดลงในอัตราที่ต่ำ

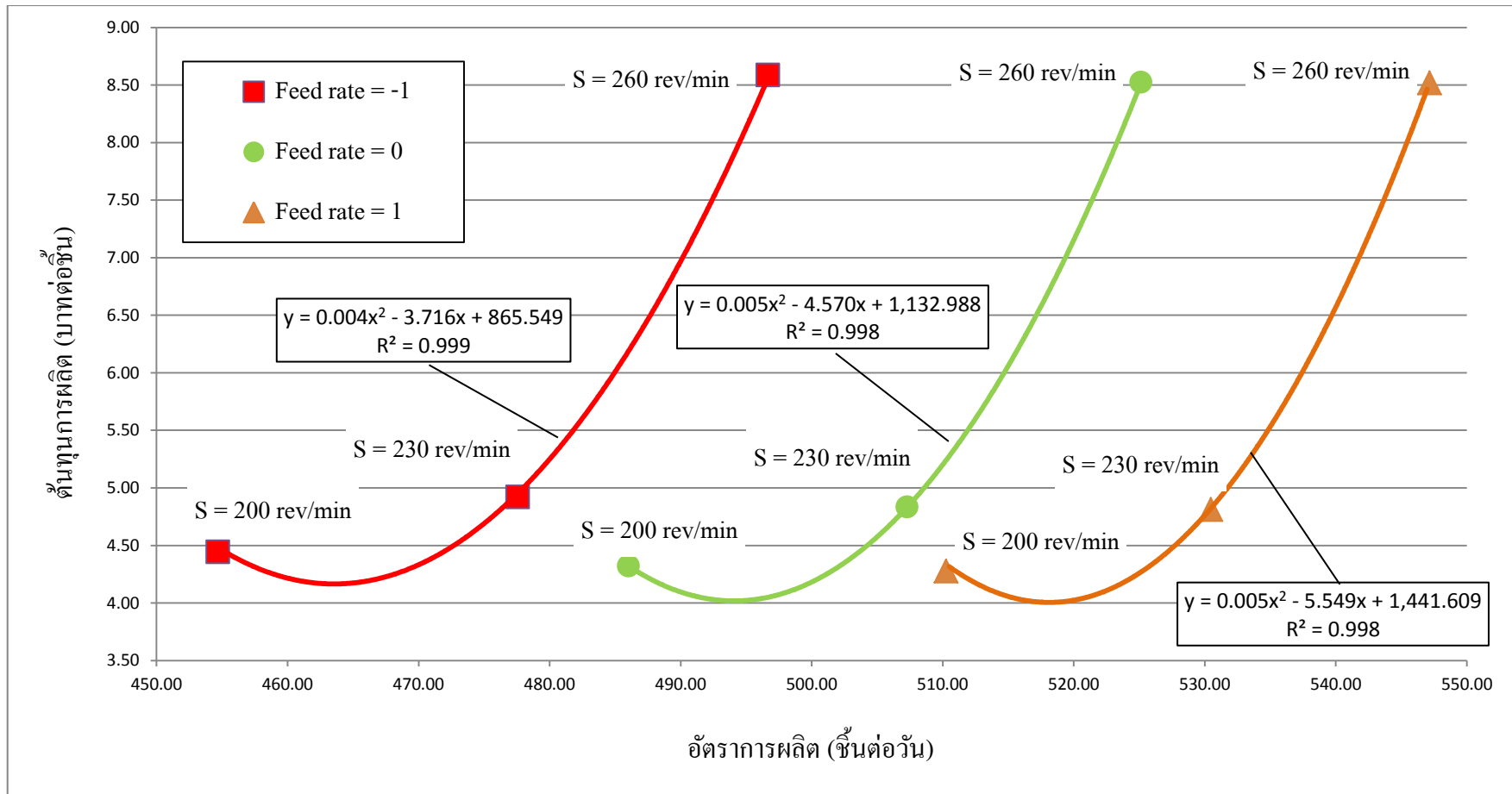
จากกราฟความสัมพันธ์ของความเร็วตัด (S) ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการผลิตและต้นทุนการผลิต โดยกราฟความสัมพันธ์จะแยกตามระดับปัจจัยของอัตราป้อนได้ 3 กราฟความสัมพันธ์ ดังที่ได้แสดงในภาพที่ 4-9 และเมื่อพิจารณาค่า R-squared ของทั้ง 3 กราฟความสัมพันธ์มีค่า 99.9%, 99.8% และ 99.8% ตามลำดับ ซึ่งสรุปได้ว่ากราฟความสัมพันธ์นั้นสามารถอธิบายความผันแปรของปัจจัยตอบสนองได้เป็นอย่างดีและมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในวิเคราะห์ผลการทดลอง เมื่อทำการวิเคราะห์เกี่ยวกับต้นทุนการผลิตโดยพิจารณาในระดับปัจจัยของอัตราป้อนเดียวกันจะพบว่า เมื่อความเร็วตัดที่มีค่าต่ำ (-1) จะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตมีค่าต่ำตามไปด้วย เนื่องจากค่าความเร็วตัดที่มีค่าต่ำจะส่งผลให้อายุการใช้งานของมีดกลึงมีค่ามากขึ้น จึงทำให้ต้นทุนด้านค่ามีดกลึงซึ่งเป็นต้นทุนหลักมีค่าต่ำ และทำให้ต้นทุนโดยรวมมีค่าต่ำตามไปด้วย แต่ในกรณีที่ความเร็วตัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ต้นทุนการผลิตก็จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นไปด้วย เนื่องจากอายุการใช้งานของมีดกลึงมีค่าต่ำลง ทำให้ต้นทุนในส่วนของค่ามีดกลึงมีค่าสูงขึ้น ส่งผลทำให้ต้นทุนโดยรวมมีค่าสูงขึ้น

ตารางที่ 4-12 ข้อมูลสรุปปัจจัยการทดลองและผลการทดลองจากการคำนวณ

| No | ปัจจัยการทดลอง |          |                   |                | ผลการทดลอง                          |                              |                           |                            |
|----|----------------|----------|-------------------|----------------|-------------------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------------------|
|    | Tool (T)       | Feed (F) | Cutting speed (S) | ค่า $E_r$ (mm) | จำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อคมตัด (TL) | เวลาการผลิตต่อชิ้น ( $t_T$ ) | อัตราการผลิต (ชิ้นต่อวัน) | ต้นทุนการผลิต (บาทต่อชิ้น) |
| 1  | -1             | -1       | -1                | 0.005          | 142.857                             | 114.8                        | 454.70                    | 4.443                      |
| 2  | -1             | -1       | 0                 | 0.013          | 58.824                              | 109.3                        | 477.58                    | 4.921                      |
| 3  | -1             | -1       | 1                 | 0.056          | 13.514                              | 105.1                        | 496.67                    | 8.587                      |
| 4  | -1             | 0        | -1                | 0.007          | 111.111                             | 107.4                        | 486.03                    | 4.320                      |
| 5  | -1             | 0        | 0                 | 0.014          | 52.632                              | 102.9                        | 507.29                    | 4.833                      |
| 6  | -1             | 0        | 1                 | 0.057          | 13.158                              | 99.4                         | 525.15                    | 8.523                      |
| 7  | -1             | 1        | -1                | 0.008          | 90.909                              | 102.3                        | 510.26                    | 4.277                      |
| 8  | -1             | 1        | 0                 | 0.016          | 47.619                              | 98.4                         | 530.49                    | 4.811                      |
| 9  | -1             | 1        | 1                 | 0.059          | 12.821                              | 95.4                         | 547.17                    | 8.518                      |



ภาพที่ 4-8 ความสัมพันธ์ของอัตราป้อน (F) ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการผลิตและต้นทุนการผลิต



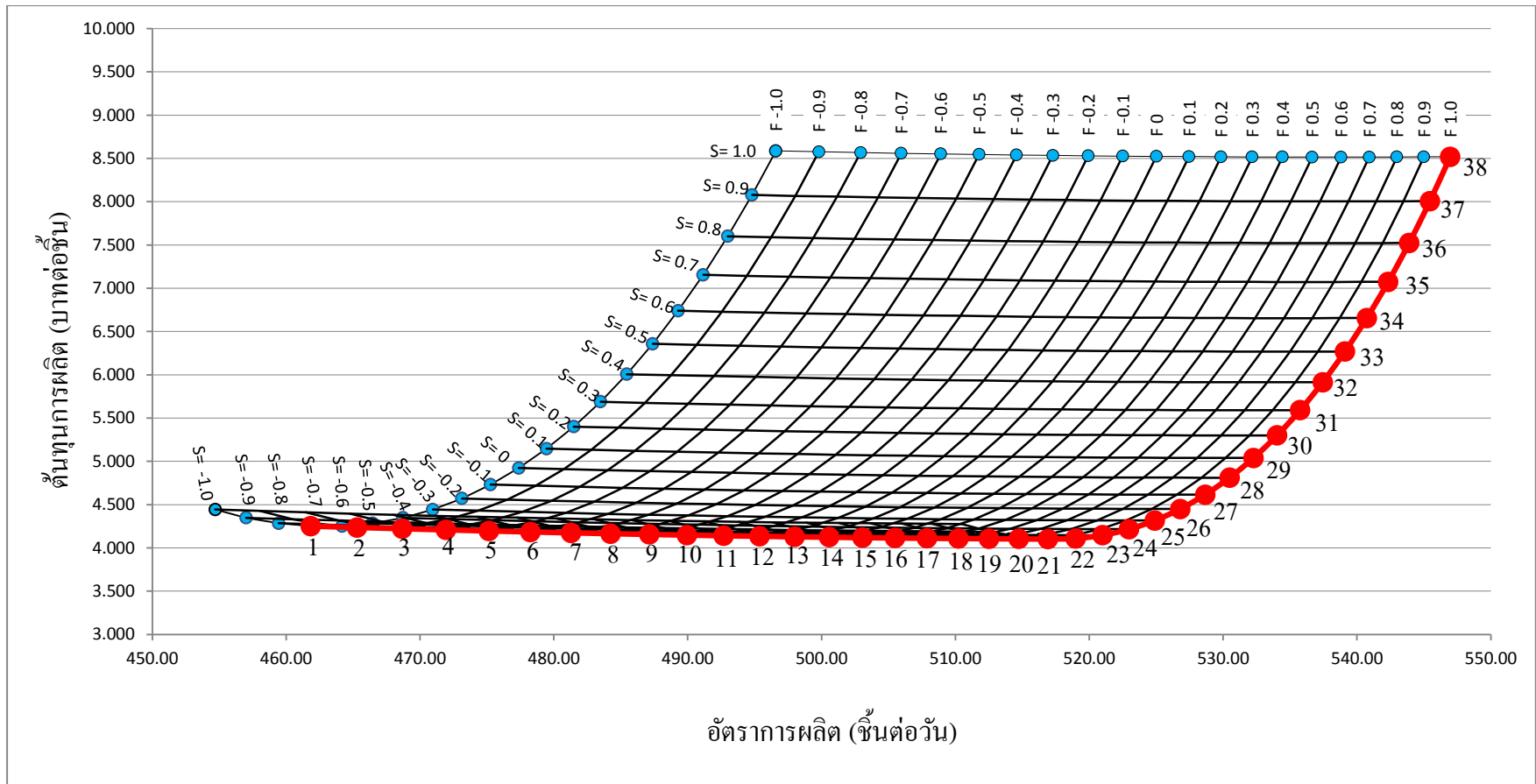
ภาพที่ 4-9 ความสัมพันธ์ของความเร็วตัด (S) ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการผลิตและต้นทุนการผลิต

จากกราฟความสัมพันธ์ของปัจจัยการทดลองและผลการทดลองตามที่แสดงในภาพที่ 4-8 และ 4-9 ได้สร้างเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์รวมของอัตราป้อน (F) และความเร็วตัด (S) ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการผลิตและต้นทุนการผลิต โดยที่เพิ่มความละเอียดระดับของปัจจัยการทดลองให้มีความละเอียดมากขึ้น ซึ่งกำหนดให้ความถี่ของระดับปัจจัยเท่ากับ 0.1 เพื่อให้สามารถอ่านค่าผลการทดลองจากกราฟได้ค่าที่ละเอียดมากขึ้นและสามารถนำไปใช้งานจริงได้ดีที่สุด ดังที่แสดงในภาพที่ 4-10 และได้สร้างตารางเทียบค่าระดับของปัจจัยการทดลองและค่าจริงที่ระดับปัจจัยการทดลองต่าง ๆ แบบละเอียด ซึ่งได้แสดงในตารางที่ 4-13 เพื่อใช้ในการเทียบค่าระดับของปัจจัยที่อ่านได้จากภาพที่ 4-10 กับค่าจริงที่จะนำไปเขียนใน NC Program

จากการพิจารณากราฟความสัมพันธ์ตามภาพที่ 4-10 พบว่าเส้นกราฟที่ต้นทุนต่ำที่สุดจากการทดลองคือเส้นกราฟที่ระดับปัจจัยของความเร็วตัด -0.7 (S= -0.7) และเส้นกราฟที่ระดับปัจจัยของอัตราป้อน 1.0 (F= 1.0) ซึ่งจะเป็นเส้นกราฟที่ใช้ในการพิจารณากำหนดค่าความเร็วตัด (S) อัตราป้อน (F) และผลรวมของต้นทุนการผลิต ที่อัตราการผลิตต่าง ๆ ซึ่งได้ทำการสรุปต้นทุนและอัตราการผลิตบนเงื่อนไขการตัดเฉือนที่ดีที่สุดไว้ในตารางที่ 4-14

เมื่อพิจารณาด้านทุนที่ต่ำที่สุดจากผลการทดลองพบว่า จุดตัดระหว่างเส้นกราฟที่ระดับปัจจัยของความเร็วตัด -0.7 (S= -0.7) และเส้นกราฟที่ระดับปัจจัยของอัตราป้อน 1.0 (F= 1.0) ดังที่แสดงในภาพที่ 4-10 คือจุดที่การผลิตมีต้นทุนต่ำที่สุด ซึ่งต้นทุนการผลิตจะมีค่าเท่ากับ 4.102 บาทต่อชิ้น ที่อัตราการผลิต 516 ชิ้นต่อวัน โดยที่ค่าอัตราป้อนและความเร็วตัดที่ใช้ในการผลิตสามารถเทียบค่าได้จากตารางที่ 4-13 และจำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อคมตัด (TL) จะใช้วิธีการคำนวณค่าที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 110 ชิ้นต่อคมตัด





ภาพที่ 4-10 ความสัมพันธ์ของอัตราป้อน (F) และความเร็วดัด (S) ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการผลิตและต้นทุนการผลิต

ตารางที่ 4-13 การเทียบค่าระดับของปัจจัยการทดลองและค่าจริงที่ระดับปัจจัยการทดลองต่าง ๆ แบบละเอียด

| ปัจจัยการทดลอง            | ระดับของปัจจัยการทดลอง |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                           | -1.0                   | -0.9  | -0.8  | -0.7  | -0.6  | -0.5  | -0.4  | -0.3  | -0.2  | -0.1  | 0     | 0.1   | 0.2   | 0.3   | 0.4   | 0.5   | 0.6   | 0.7   | 0.8   | 0.9   | 1.0   |
| อัตราป้อนต่อรอบ (mm/ rev) |                        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| ● ชั้นตอนที่ F1           | 0.430                  | 0.439 | 0.448 | 0.457 | 0.466 | 0.475 | 0.484 | 0.493 | 0.502 | 0.511 | 0.520 | 0.529 | 0.538 | 0.547 | 0.556 | 0.565 | 0.574 | 0.583 | 0.592 | 0.601 | 0.610 |
| ● ชั้นตอนที่ F2           | 0.280                  | 0.286 | 0.292 | 0.298 | 0.304 | 0.310 | 0.316 | 0.322 | 0.328 | 0.334 | 0.340 | 0.346 | 0.352 | 0.358 | 0.364 | 0.370 | 0.376 | 0.382 | 0.388 | 0.394 | 0.400 |
| ● ชั้นตอนที่ F3           | 0.350                  | 0.358 | 0.366 | 0.374 | 0.382 | 0.390 | 0.398 | 0.406 | 0.414 | 0.422 | 0.430 | 0.437 | 0.444 | 0.451 | 0.458 | 0.465 | 0.472 | 0.479 | 0.486 | 0.493 | 0.500 |
| ● ชั้นตอนที่ F4           | 0.350                  | 0.358 | 0.366 | 0.374 | 0.382 | 0.390 | 0.398 | 0.406 | 0.414 | 0.422 | 0.430 | 0.437 | 0.444 | 0.451 | 0.458 | 0.465 | 0.472 | 0.479 | 0.486 | 0.493 | 0.500 |
| ● ชั้นตอนที่ F5           | 0.350                  | 0.358 | 0.366 | 0.374 | 0.382 | 0.390 | 0.398 | 0.406 | 0.414 | 0.422 | 0.430 | 0.437 | 0.444 | 0.451 | 0.458 | 0.465 | 0.472 | 0.479 | 0.486 | 0.493 | 0.500 |
| ความเร็วตัด S (rev/ min)  | 200                    | 203   | 206   | 209   | 212   | 215   | 218   | 221   | 224   | 227   | 230   | 233   | 236   | 239   | 242   | 245   | 248   | 251   | 254   | 257   | 260   |

ตารางที่ 4-14 ต้นทุนและอัตราการผลิตบนเงื่อนไขการตัดเฉือนที่ดีที่สุด

| จุดที่ | Feed (Coded) | Speed (rev/ min) | ต้นทุนการผลิต (บาทต่อชิ้น) | อัตราการผลิต (ชิ้นต่อวัน) |
|--------|--------------|------------------|----------------------------|---------------------------|
| 1      | -1           | 209              | 4.252                      | 461.83                    |
| 2      | -0.9         | 209              | 4.236                      | 465.29                    |
| 3      | -0.8         | 209              | 4.222                      | 468.66                    |
| 4      | -0.7         | 209              | 4.208                      | 471.94                    |
| 5      | -0.6         | 209              | 4.196                      | 475.14                    |
| 6      | -0.5         | 209              | 4.184                      | 478.25                    |
| 7      | -0.4         | 209              | 4.174                      | 481.29                    |
| 8      | -0.3         | 209              | 4.164                      | 484.25                    |
| 9      | -0.2         | 209              | 4.156                      | 487.13                    |
| 10     | -0.1         | 209              | 4.148                      | 489.95                    |
| 11     | 0            | 209              | 4.140                      | 492.69                    |
| 12     | 0.1          | 209              | 4.134                      | 495.38                    |
| 13     | 0.2          | 209              | 4.128                      | 497.99                    |
| 14     | 0.3          | 209              | 4.123                      | 500.55                    |
| 15     | 0.4          | 209              | 4.118                      | 503.05                    |
| 16     | 0.5          | 209              | 4.114                      | 505.49                    |
| 17     | 0.6          | 209              | 4.111                      | 507.88                    |
| 18     | 0.7          | 209              | 4.108                      | 510.22                    |
| 19     | 0.8          | 209              | 4.106                      | 512.50                    |
| 20     | 0.9          | 209              | 4.104                      | 514.73                    |
| 21     | 1            | 209              | 4.102                      | 516.92                    |
| 22     | 1            | 212              | 4.108                      | 518.98                    |
| 23     | 1            | 215              | 4.146                      | 520.99                    |
| 24     | 1            | 218              | 4.215                      | 522.97                    |

ตารางที่ 4-14 (ต่อ)

| จุดที่ | Feed (Coded) | Speed (rev/min) | ต้นทุนการผลิต (บาทต่อชิ้น) | อัตราการผลิต (ชิ้นต่อวัน) |
|--------|--------------|-----------------|----------------------------|---------------------------|
| 25     | 1            | 221             | 4.317                      | 524.90                    |
| 26     | 1            | 224             | 4.450                      | 526.80                    |
| 27     | 1            | 227             | 4.614                      | 528.66                    |
| 28     | 1            | 230             | 4.811                      | 530.48                    |
| 29     | 1            | 233             | 5.039                      | 532.27                    |
| 30     | 1            | 236             | 5.299                      | 534.03                    |
| 31     | 1            | 239             | 5.591                      | 535.75                    |
| 32     | 1            | 242             | 5.914                      | 537.45                    |
| 33     | 1            | 245             | 6.269                      | 539.11                    |
| 34     | 1            | 248             | 6.656                      | 540.74                    |
| 35     | 1            | 251             | 7.074                      | 542.34                    |
| 36     | 1            | 254             | 7.524                      | 543.91                    |
| 37     | 1            | 257             | 8.006                      | 545.45                    |
| 38     | 1            | 260             | 8.519                      | 546.97                    |

### สรุปผลการทดลองและเปรียบเทียบกรณีตัวอย่าง

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราป้อน (F) และความเร็วตัด (S) ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการผลิตและต้นทุนการผลิต สามารถสร้างตารางแสดงข้อมูลสรุปและเปรียบเทียบกรณีตัวอย่าง ดังที่แสดงในตารางที่ 4-15 โดยที่อัตราการผลิต ต้นทุนการผลิต และจำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อคมตัด จะใช้วิธีการคำนวณที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 และในส่วนของระดับปัจจัยของอัตราป้อนและความเร็วตัดจะพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ตามภาพที่ 4-10 และพิจารณาข้อมูลต้นทุนและอัตราการผลิตบนเงื่อนไขการตัดเฉือนที่ดีที่สุดจากตารางที่ 4-14 โดยเปรียบเทียบค่าจริงของระดับปัจจัยการทดลองจากตารางที่ 4-13

เงื่อนไขการผลิตในปัจจุบันจะเป็นการผลิตโดยใช้อัตราป้อนและความเร็วตัดในระดับปัจจัยที่ต่ำที่สุด คือ -1 ซึ่งอัตราการผลิตเท่ากับ 454 ชิ้นต่อวัน ที่ต้นทุนการผลิตเท่ากับ 4.443 บาทต่อชิ้น และจำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อคอมตัด (TL) จะมีค่าเท่ากับ 142 ชิ้นต่อคอมตัด

เงื่อนไขการผลิตที่ต้นทุนต่ำที่สุด ซึ่งพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ตามที่แสดงในภาพที่ 4-9 พบว่าอัตราการผลิตจะมีค่าเท่ากับ 516 ชิ้นต่อวัน ที่ต้นทุนการผลิตเท่ากับ 4.102 บาทต่อชิ้น และจำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อคอมตัด (TL) จะมีค่าเท่ากับ 110 ชิ้นต่อคอมตัด

เงื่อนไขการผลิตกรณีตัวอย่าง พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ที่แสดงในภาพที่ 4-9 เมื่อความต้องการของลูกค้า 540 ชิ้นต่อวัน ระดับปัจจัยของอัตราป้อนจะมีค่าเท่ากับ 1.0 และระดับปัจจัยของความเร็วตัดจะมีค่าเท่ากับ 0.6 ซึ่งต้นทุนการผลิตจะมีค่าเท่ากับ 6.656 บาทต่อชิ้น และจำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อคอมตัด (TL) จะมีค่าเท่ากับ 20 ชิ้นต่อคอมตัด

ตารางที่ 4-15 ข้อมูลสรุปและเปรียบเทียบกรณีตัวอย่างของแต่ละเงื่อนไขการผลิต

| ผลการทดลอง                             | เงื่อนไขการผลิต |                 |                      |
|--|-----------------|-----------------|----------------------|
|  | ปัจจุบัน        | ต้นทุนต่ำที่สุด | Order 540 ชิ้นต่อวัน |
| ระดับของอัตราป้อน (mm/ rev)            |                 |                 |                      |
| ● ชั้นตอนที่ F1                        | 0.43            | 0.61            | 0.61                 |
| ● ชั้นตอนที่ F2                        | 0.28            | 0.40            | 0.40                 |
| ● ชั้นตอนที่ F3                        | 0.35            | 0.50            | 0.50                 |
| ● ชั้นตอนที่ F4                        | 0.35            | 0.50            | 0.50                 |
| ● ชั้นตอนที่ F5                        | 0.35            | 0.50            | 0.50                 |
| ระดับของความเร็วตัด (rev/ min)         | 200             | 209             | 248                  |
| อัตราการผลิต (ชิ้นต่อวัน)              | 454             | 516             | 540                  |
| ต้นทุนการผลิต (บาทต่อชิ้น)             | 4.443           | 4.102           | 6.656                |
| จำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อคอมตัด (ชิ้น) | 142             | 110             | 20                   |
| เวลาการผลิตชิ้นงานต่อชิ้น (วินาที)     | 114.80          | 100.98          | 96.54                |

### สรุปเวลาของกระบวนการผลิตก่อนและหลังการทดลอง

จากการทดลองในกระบวนการผลิตที่ 2 ซึ่งเป็น Bottleneck process โดยทดลองที่เครื่องจักรหมายเลข LA-9048 พบว่าเวลาในการผลิตชิ้นงานต่อชิ้นจากเดิม 114.80 วินาที ลดลงเหลือ 100.98 วินาที ซึ่งส่งผลให้เวลาเฉลี่ยของกระบวนการผลิตที่ 2 จากเดิม 57.4 วินาที ลดลงเหลือ 50.5 วินาที โดยนิยามให้เครื่องจักรทั้ง 2 เครื่องใช้เวลาการผลิตต่อชิ้นเท่ากัน ดังที่แสดงในตารางที่ 4-16

ตารางที่ 4-16 ข้อมูลสรุปเวลาของกระบวนการผลิตก่อนและหลังการทดลอง

| Process No. | Process Name                | Machine No        | Cycle time (Sec) |       |
|-------------|-----------------------------|-------------------|------------------|-------|
|             |                             |                   | Before           | After |
| 1           | กลึงหยาบผิวด้านใน           | LA-9046 , LA-9047 | 48.2             | 48.2  |
| 2           | กลึงละเอียดผิวด้านนอก       | LA-9048 , LA-9028 | 57.4             | 50.5  |
| 3           | กลึงละเอียดผิวด้านใน        | LA-9049 , LA-9050 | 42.8             | 42.8  |
| 4           | กัดขึ้นรูปพื้นด้านนอก       | GC-9003 , GC-9004 | 48.2             | 48.2  |
| 5           | ชุบแข็งผิวงานด้านนอก        | HT-9004           | 49.7             | 49.7  |
| 6           | เจียรผิวงานด้านนอก          | GR-9018           | 48.0             | 48.0  |
| 7           | ตรวจสอบรอบแตกร้าวชิ้นงาน    | ME-9027           | 33.3             | 33.3  |
| 8           | ล้างชิ้นงาน                 | WM-9029           | 46.3             | 46.3  |
| 9           | อัด Plug และทดสอบการรั่วซึม | AM-9013           | 36.4             | 36.4  |
| 10          | เจาะรูและกัดร่องบ่าชิ้นงาน  | MC-9025 , MC-9034 | 40.7             | 40.7  |
| 11          | ล้างชิ้นงาน                 | WM-9030           | 49.2             | 49.2  |
| 12          | สวมอัดประกอบ                | AM-9016           | 26.6             | 26.6  |

## บทที่ 5

### สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

#### สรุปผลการวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัยการลดต้นทุนการผลิตในกระบวนการกลึงอัตโนมัติโดยการใช้เงื่อนไขการตัดเฉือนที่เหมาะสม โดยใช้ทฤษฎีการออกแบบการทดลองของทาคุชิ (Tagushi) และเลือกใช้แบบการทดลองชนิด L9 ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับปัจจัยในการทดลอง 3 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดของมีดกลึงที่มีคุณสมบัติ Toughness ต่างกัน อัตราป้อนต่อรอบ และความเร็วตัด ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 จะมีระดับปัจจัย 3 ระดับ ได้แก่ ต่ำ ปานกลาง และสูง ซึ่งในตอนท้ายได้มีการนิยามระดับปัจจัยให้เป็นตัวเลข -1.0, 0 และ 1.0 ตามลำดับ เพื่อให้เกิดความสะดวกในการคำนวณค่า และในการสร้างกราฟความสัมพันธ์ได้มีการเพิ่มความละเอียดของระดับปัจจัยในระดับความถี่ 0.1 ซึ่งจะช่วยให้ได้ผลการทดลองที่มีความละเอียดมากขึ้น

ในการทดลองได้ทำการทดลองกับการผลิตชิ้นงานจริง 30 ชิ้นต่อเนื่อง ตามแบบการทดลองของ Tagushi L9 และเก็บข้อมูลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานและค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง โดยทดลองที่เครื่องจักรหมายเลข LA-9048 พบว่า ชนิดของมีดกลึงที่ดีที่สุดจากการทดลองคือชนิดที่มี toughness ต่ำ ซึ่งจะทำให้ค่าคลาดเคลื่อนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงาน (E) ต่ำที่สุด และระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิต ซึ่งเป็นระดับปัจจัยที่ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตมีค่าต่ำที่สุดคือ ระดับปัจจัยของอัตราป้อนเท่ากับ 1.0 ( $F = 1.0$ ) และระดับปัจจัยของความเร็วตัดเท่ากับ -0.7 ( $S = -0.7$ ) โดยที่ค่าจริงที่จะนำไปใช้เขียนใน NC Program จะต้องเปิดตารางเทียบค่าจากตารางที่ 4-13 ซึ่งสามารถสรุปค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตจากผลการทดลองได้ดังนี้

1. มีดกลึงที่มีคุณสมบัติ Toughness ต่ำ แบบชนิด DNMG 15-04-08-PM 4315
2. ระดับปัจจัยของอัตราป้อนเท่ากับ 1.0 ( $F = 1.0$ ) ซึ่งค่าที่ใช้เขียนลงใน NC Program จะเป็นดังนี้  $F1: 0.61, F2: 0.40, F3: 0.50, F4: 0.50$  และ  $F5: 0.50$  (mm/ rev)
3. ระดับปัจจัยของความเร็วตัดเท่ากับ -0.7 ( $S = -0.7$ ) ซึ่งค่าที่ใช้เขียนลงใน NC Program จะเป็น  $S: 209$  (rev/ min)

จากผลการวิจัยการลดต้นทุนการผลิตในกระบวนการกลึงอัตโนมัติโดยการใช้เงื่อนไขการตัดเฉือนที่เหมาะสม ตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง โดยพิจารณาเปรียบเทียบเงื่อนไข

การผลิตในปัจจุบันและเงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องจักรหมายเลข LA-9048 ที่ทำการทดลอง พบว่าอัตราการผลิตในปัจจุบัน 454 ชิ้นต่อวัน เพิ่มขึ้นเป็น 516 ชิ้นต่อวัน อัตราการผลิตเพิ่มขึ้น 62 ชิ้นต่อวัน คิดเป็น 13.65% และต้นทุนการผลิตในปัจจุบัน 4.443 บาทต่อชิ้น ลดลงเหลือ 4.102 บาทต่อชิ้น ต้นทุนการผลิตลดลง 0.341 บาทต่อชิ้น คิดเป็น 7.67% ซึ่งเมื่อพิจารณาวันทำงานเฉลี่ย 23 วันต่อเดือน บริษัทจะสามารถประหยัดต้นทุนการผลิตด้านมีดกลึงได้เท่ากับ 4046.988 บาทต่อเดือน หรือคิดเป็น 48563.86 บาทต่อปี

### อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการวิจัยพบว่าการผลิตในปัจจุบันมีความสูญเปล่าเกิดขึ้น เนื่องจากอัตราการผลิตต่ำและต้นทุนการผลิตที่สูง ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าสามารถผลิตในอัตราที่สูงขึ้น ได้โดยที่ต้นทุนการผลิตต่ำกว่าปัจจุบัน และผลการวิจัยสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมต้นทุนการผลิตให้ต่ำที่สุดได้ เมื่อความต้องการของลูกค้ามีการเปลี่ยนแปลงไป โดยการพิจารณาจากเงื่อนไขในการตัดเฉือนที่มีความเหมาะสมกับการผลิตนั้น ๆ

### ข้อเสนอแนะ

1. การประยุกต์ใช้เทคนิคทางวิศวกรรมเพื่อลดต้นทุนในการผลิตและเพิ่มอัตราการผลิต ควรที่จะต้องได้รับการสนับสนุนจากผู้บริหาร เนื่องจากในการทำการวิจัยจะต้องมีการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อเก็บข้อมูลและรวมถึงอาจจะต้องได้รับการสนับสนุนในส่วนของด้านเงินลงทุน
2. การทำการวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการทดลองและปรับปรุงกระบวนการผลิตเพียง 1 กระบวนการผลิตเท่านั้น เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุง ซึ่งควรจะมีการทดลองและปรับปรุงในกระบวนการผลิตหรือผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ต่อไป เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มอัตราการผลิตให้บริษัทมีผลกำไรที่มากขึ้น
3. ผลของการวิจัยเป็นผลที่ได้จากการทดลองในช่วงเวลาที่ทำการทดลองเท่านั้น ซึ่งผลการทดลองอาจจะมีผลคลาดเคลื่อนไปจากเดิม เมื่อสภาวะเครื่องจักรหรืออุปกรณ์อื่น ๆ เสื่อมสภาพลงตามระยะเวลาการใช้งาน
4. จากการใช้เทคโนโลยีการผลิตมีดกลึงมีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงควรจะมีการทดลองโดยใช้มีดกลึงชนิดใหม่ๆ ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อให้การผลิตมีต้นทุนที่ต่ำลงและมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นไปอีก
5. จากกราฟความสัมพันธ์ของผลการทดลองพบว่า แนวโน้มของต้นทุนการผลิตมีค่าต่ำลงเมื่ออัตราป้อนเพิ่มสูงขึ้น จึงควรจะมีการทดลองโดยการเพิ่มอัตราป้อนให้มีค่าสูงขึ้น



## บรรณานุกรม

- คุณยุต เอี่ยมสะอาด. (2550). วิธีการทากุชิเพื่อการขึ้นรูปชิ้นงานโลหะด้วยเลเซอร์. การประชุม  
วิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21. ชลบุรี
- เฉลิมพล คล้ายนิล. (2555). การประมาณการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงด้วยโครงข่ายประสาทเทียม.  
การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี 2555. เพชรบุรี
- เดชา อินเด. (2545). การบัญชีต้นทุน. กรุงเทพฯ: ธนาเพรส แอนด์ กราฟฟิค.
- บรรจบ ประสารแสง, อภิวัฒน์ มุตตามระ และบุษบา พุกษาพันธุ์รัตน์. (2556). การหาค่าตัวแปร  
ที่เหมาะสมเพื่อทำผิวสำเร็จชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด STAVAX ESR ด้วยเครื่อง  
กัดสปาร์คไฟฟ้าโดยวิธีทากุชิ. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี  
2556. พัทยา ชลบุรี.
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบุรณ์. (2552). การวิเคราะห์และออกแบบการ  
ทดลอง, กรุงเทพฯ: ท็อป.
- ประสาน แสงเขียว. (2553). ศึกษาอิทธิพลของเครื่องมือตัดในกระบวนการตัดเฉือนเหล็กกล้าไร้  
สนิม AISI 30. วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- วีรพัฒน์ นามปัญญา, เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป และสุดสาคร อินธิเดช. (2556). พารามิเตอร์ที่  
เหมาะสมในการตัดเฉือนสำหรับการกลึงเร็ว. วารสารวิชาการ, มหาวิทยาลัย  
มหาสารคาม.
- สมบัติ ชิวหา. (2549). พื้นฐานเทคโนโลยีซีเอ็นซี. กรุงเทพฯ: สกายบุ๊ก
- สมศักดิ์ อิทธิโสภณกุล. (2555). อุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก. กรุงเทพฯ: ศ.ส.ท.
- อิสรา ธีระวัฒน์สกุล และสมพร ตี๋บั้ง. (2552). การหาสภาวะการทำงานของเครื่องกลึงซีเอ็นซี  
ในการสร้างต้นแบบที่ทำจากพลาสติก. วารสารวิศวกรรม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

โปรแกรมที่ใช้ในการตัดเนื้อ (NC Program)

ตารางภาคผนวกที่ ก-1 NC Program

| ลำดับ | คำสั่ง NC Program          |
|-------|----------------------------|
| 1     | %                          |
| 2     | O0001(TB063-000060-A,OP20) |
| 3     | G99G97G40G0T00M66          |
| 4     | G28U0.W0.                  |
| 5     | G50X0.Z0.S2000             |
| 6     | #523=241.72(74.62+167.1)   |
| 7     | G50W-#523                  |
| 8     | #500=0                     |
| 9     | M11                        |
| 10    | M68                        |
| 11    | M81                        |
| 12    | M10                        |
| 13    | G4U0.1                     |
| 14    | M11                        |
| 15    | G4U0.1                     |
| 16    | M10                        |
| 17    | G4U0.1                     |
| 18    | M82                        |
| 19    | G4U0.1                     |
| 20    | M81                        |
| 21    | M11                        |
| 22    | G4U0.1                     |
| 23    | M10                        |
| 24    | IF[#1004EQ1]GOTO77         |

## ตารางภาคผนวกที่ ก-1 (ต่อ)

| ลำดับ | คำสั่ง NC Program           |
|-------|-----------------------------|
| 25    | M1                          |
| 27    | N1T100(P7/TOUCH-PROBE)      |
| 28    | M19M67                      |
| 29    | G300X44.Z0.W5.H0.5(TO-9015) |
| 30    | G0X200.                     |
| 31    | N77                         |
| 32    | G50W-#500                   |
| 33    | M1                          |
| 34    | N3T300(P3,R0.8)             |
| 35    | G96G0Z0.5T303 <b>S</b> M3   |
| 36    | X56.5M8                     |
| 37    | G1X52.35 <b>F1</b>          |
| 38    | Z-98.                       |
| 39    | G0U1.Z0.5                   |
| 40    | G1X50.75F0.4                |
| 41    | Z-98. <b>F2</b>             |
| 42    | Z-136. <b>F3</b>            |
| 43    | G0X58.75Z-135.              |
| 44    | G1Z-150.                    |
| 45    | G0U1.Z-135.                 |
| 46    | X54.75                      |
| 47    | G1Z-149.3                   |
| 48    | G0U1.Z-135.                 |
| 49    | X51.25                      |

## ตารางภาคผนวกที่ ก-1 (ต่อ)

| ลำดับ | คำสั่ง NC Program                      |
|-------|--|
| 50    | G1X50.75                               |
| 51    | Z-148.                                 |
| 52    | G0X51.75(Z-97.42)Z-96.82               |
| 53    | G1X47.291(Z-105.741)Z-105.141          |
| 54    | G2X46.665(Z-108.122)Z-107.522R9.2F0.25 |
| 55    | G1Z-145.5 <b>F4</b>                    |
| 56    | G0X62.3Z-144.5                         |
| 57    | Z-149.                                 |
| 58    | G1Z-163.                               |
| 59    | X65.3                                  |
| 60    | Z-166.6                                |
| 61    | G0U1.Z-162.5                           |
| 62    | G1X62.3                                |
| 63    | Z-166.6                                |
| 64    | G0U1.Z-149.                            |
| 65    | X61.3                                  |
| 66    | G1Z-166.6F0.2                          |
| 67    | G96G0X72.W1.                           |
| 68    | G1Z-167.1F0.5                          |
| 69    | X61.3F0.2                              |
| 70    | G4U0.2                                 |
| 71    | G1Z-166.4                              |
| 72    | G96G0X63.3(Z-93.688)Z-93.088           |
| 73    | X51.75                                 |

## ตารางภาคผนวกที่ ก-1 (ต่อ)

| ลำดับ | คำสั่ง NC Program                                  |
|-------|--|
| 74    | G1X45.291(Z-105.741)Z-105.141F0.35                 |
| 75    | G2X44.665(Z-108.122)Z-107.522R9.2F0.3(F0.15)       |
| 76    | G1Z-141.369(Z-141.414) <b>F5</b>                   |
| 77    | G0X62.3W0.5  |
| 78    | Z-154.361  |
| 79    | G1X61.064(X61.089)Z-152.056(Z-152.101)F0.25(F0.15) |
| 80    | G2X57.499(Z-150.225)Z-150.18R2.7F0.25(F0.15)       |
| 81    | G3X44.665Z-141.369(Z-141.414)R9.2                  |
| 82    | G0X55.   |
| 83    | Z0.5   |
| 84    | X44.112  |
| 85    | G1X48.05Z-1.469F0.35                               |
| 86    | Z-13.1   |
| 87    | G0X49.05Z0.4                                       |
| 88    | G1X42.312F0.5                                      |
| 89    | X46.05Z-1.469F0.35                                 |
| 90    | X48.05Z-3.201                                      |
| 91    | Z-4.6  |
| 92    | X46.05Z-5.6  |
| 93    | Z-10.829   |
| 94    | G2X48.51Z-13.799R4.2                               |
| 95    | G1X51.Z-15.044                                     |
| 96    | G97G0X200.M9                                       |
| 97    | M1   |

## ตารางภาคผนวกที่ ก-1 (ต่อ)

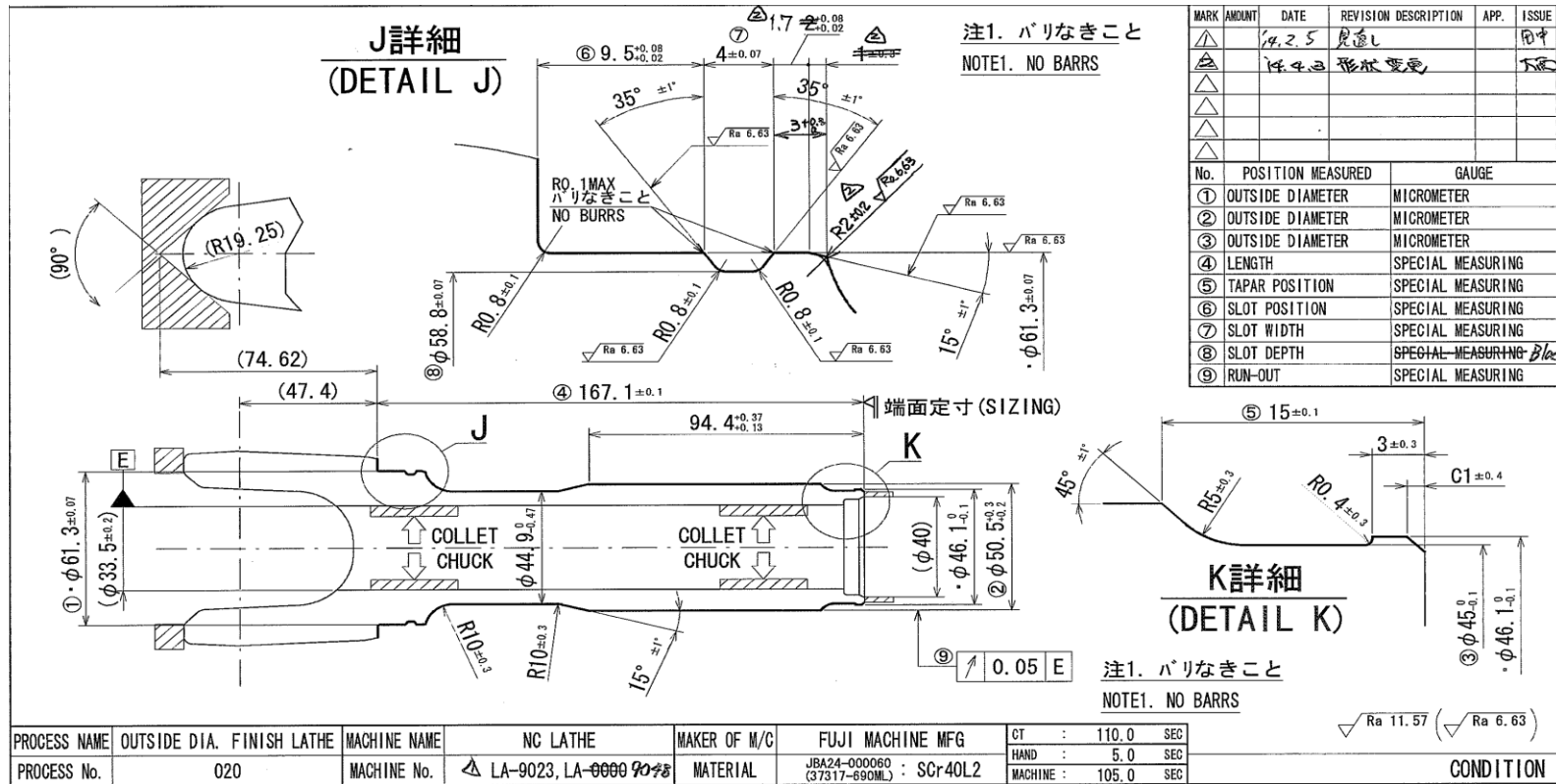
| ลำดับ | คำสั่ง NC Program           |
|-------|-----------------------------|
| 98    | N5T500(P4,R0.4)             |
| 99    | G97G0Z-15.435T505S1275M3    |
| 100   | X52.75M8                    |
| 101   | G1X47.645Z-12.882F0.2       |
| 102   | G3X44.95Z-9.629R4.6F0.15    |
| 103   | G1Z-3.3F0.2                 |
| 104   | G0X46.5W-0.5                |
| 105   | G1X46.05                    |
| 106   | Z0.F0.25                    |
| 107   | G0X47.05Z-3.                |
| 108   | G1X44.95F0.2                |
| 109   | G4U0.                       |
| 110   | G1Z-3.5                     |
| 111   | G97G0X200.M9                |
| 112   | M1                          |
| 113   | N7T700(P8,R0.8)             |
| 114   | G97G0Z-153.616T707S975M3    |
| 115   | X63.3M8                     |
| 116   | G1X59.8Z-154.841F0.2        |
| 117   | Z-156.259                   |
| 118   | X61.5Z-156.854              |
| 119   | G0X62.3Z-153.008            |
| 120   | G1X61.3Z-153.508            |
| 121   | G3X60.549Z-154.229R0.88F0.1 |



## ตารางภาคผนวกที่ ก-1 (ต่อ)

| ลำดับ | คำสั่ง NC Program         |
|-------|---------------------------|
| 122   | G1X58.8Z-154.841F0.18     |
| 123   | G4U0.2                    |
| 124   | G1Z-156.259               |
| 125   | G4U0.2                    |
| 126   | G1X60.549Z-156.871        |
| 127   | G3X61.3Z-157.592R0.88F0.1 |
| 128   | G1X62.3Z-158.092F0.2      |
| 129   | G97G0X250.Z50.            |
| 130   | G50W#500                  |
| 131   | T700M5M9                  |
| 132   | M1                        |
| 133   | G97G28U0.W0.              |
| 134   | G50W#523                  |
| 135   | T100M19                   |
| 136   | G50X0.Z0.M11              |
| 137   | M82                       |
| 138   | M69M65                    |
| 139   | M35                       |
| 140   | M36                       |
| 141   | M30                       |

ภาคผนวก ข  
แบบชิ้นงาน



ภาพภาคผนวกที่ ข-1 แบบของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

**ภาคผนวก ค**

ผลการทดลองจากการทดลองตามตารางการทดลองของทาภูชิ

ตารางภาคผนวกที่ ค-1 ผลการทดลองจากการทดลองตามตารางการทดลองของทฤษฎี Run1

| No.    | Position1               |        |        | Position2                       |        |        | Position3                         |        |        | 4                           | 5                           | 6                           |
|--------|-------------------------|--------|--------|---------------------------------|--------|--------|-----------------------------------|--------|--------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Inspe. | OD1 (mm)                |        |        | OD2 (mm)                        |        |        | OD3 (mm)                          |        |        | Ra OD1<br>( $\mu\text{m}$ ) | Ra OD2<br>( $\mu\text{m}$ ) | Ra OD3<br>( $\mu\text{m}$ ) |
| Spec   | $\text{Ø}61.3 \pm 0.07$ |        |        | $\text{Ø}44.9 \text{ } 0/-0.47$ |        |        | $\text{Ø}50.5 \text{ } +0.3/+0.2$ |        |        | 6.63 Ra                     | 11.57 Ra                    | 11.57 Ra                    |
| Max.   | 61.370                  | 61.370 | 61.370 | 44.900                          | 44.900 | 44.900 | 50.800                            | 50.800 | 50.800 | 6.630                       | 11.570                      | 11.570                      |
| Min.   | 61.230                  | 61.230 | 61.230 | 44.430                          | 44.430 | 44.430 | 50.700                            | 50.700 | 50.700 | -                           | -                           | -                           |
| Tool   | Micrometer              |        |        | Micrometer                      |        |        | Micrometer                        |        |        | Roughness tester            |                             |                             |
| Axis   | X                       | Y      | Ave    | X                               | Y      | Ave    | X                                 | Y      | Ave    | -                           | -                           | -                           |
| 1      | 61.300                  | 61.299 | 61.300 | 44.665                          | 44.665 | 44.665 | 50.750                            | 50.749 | 50.750 | 1.820                       | 4.960                       | 3.480                       |
| 2      | 61.302                  | 61.302 | 61.302 | 44.665                          | 44.663 | 44.664 | 50.750                            | 50.750 | 50.750 | -                           | -                           | -                           |
| 3      | 61.303                  | 61.302 | 61.303 | 44.666                          | 44.665 | 44.666 | 50.749                            | 50.750 | 50.750 | -                           | -                           | -                           |
| 4      | 61.303                  | 61.304 | 61.304 | 44.666                          | 44.666 | 44.666 | 50.753                            | 50.754 | 50.754 | -                           | -                           | -                           |
| 5      | 61.302                  | 61.303 | 61.303 | 44.665                          | 44.665 | 44.665 | 50.749                            | 50.750 | 50.750 | -                           | -                           | -                           |
| 6      | 61.302                  | 61.303 | 61.303 | 44.667                          | 44.666 | 44.667 | 50.751                            | 50.751 | 50.751 | -                           | -                           | -                           |
| 7      | 61.303                  | 61.302 | 61.303 | 44.669                          | 44.670 | 44.670 | 50.748                            | 50.749 | 50.749 | -                           | -                           | -                           |
| 8      | 61.304                  | 61.305 | 61.305 | 44.667                          | 44.667 | 44.667 | 50.748                            | 50.749 | 50.749 | -                           | -                           | -                           |
| 9      | 61.302                  | 61.302 | 61.302 | 44.667                          | 44.669 | 44.668 | 50.751                            | 50.749 | 50.750 | -                           | -                           | -                           |
| 10     | 61.304                  | 61.302 | 61.303 | 44.667                          | 44.667 | 44.667 | 50.751                            | 50.750 | 50.751 | -                           | -                           | -                           |
| 11     | 61.303                  | 61.303 | 61.303 | 44.667                          | 44.668 | 44.668 | 50.749                            | 50.750 | 50.750 | -                           | -                           | -                           |
| 12     | 61.302                  | 61.302 | 61.302 | 44.666                          | 44.668 | 44.667 | 50.752                            | 50.753 | 50.753 | -                           | -                           | -                           |
| 13     | 61.304                  | 61.304 | 61.304 | 44.669                          | 44.670 | 44.670 | 50.751                            | 50.748 | 50.750 | -                           | -                           | -                           |
| 14     | 61.305                  | 61.304 | 61.305 | 44.670                          | 44.670 | 44.670 | 50.755                            | 50.753 | 50.754 | -                           | -                           | -                           |
| 15     | 61.305                  | 61.305 | 61.305 | 44.673                          | 44.673 | 44.673 | 50.753                            | 50.754 | 50.754 | 1.810                       | 5.370                       | 3.460                       |
| 16     | 61.304                  | 61.304 | 61.304 | 44.673                          | 44.671 | 44.672 | 50.754                            | 50.754 | 50.754 | -                           | -                           | -                           |
| 17     | 61.305                  | 61.306 | 61.306 | 44.672                          | 44.672 | 44.672 | 50.753                            | 50.752 | 50.753 | -                           | -                           | -                           |
| 18     | 61.307                  | 61.305 | 61.306 | 44.672                          | 44.674 | 44.673 | 50.752                            | 50.754 | 50.753 | -                           | -                           | -                           |
| 19     | 61.306                  | 61.307 | 61.307 | 44.671                          | 44.672 | 44.672 | 50.751                            | 50.752 | 50.752 | -                           | -                           | -                           |
| 20     | 61.305                  | 61.306 | 61.306 | 44.675                          | 44.675 | 44.675 | 50.752                            | 50.753 | 50.753 | -                           | -                           | -                           |
| 21     | 61.307                  | 61.309 | 61.308 | 44.676                          | 44.674 | 44.675 | 50.753                            | 50.753 | 50.753 | -                           | -                           | -                           |
| 22     | 61.315                  | 61.306 | 61.311 | 44.676                          | 44.674 | 44.675 | 50.751                            | 50.751 | 50.751 | -                           | -                           | -                           |
| 23     | 61.308                  | 61.307 | 61.308 | 44.675                          | 44.677 | 44.676 | 50.753                            | 50.751 | 50.752 | -                           | -                           | -                           |
| 24     | 61.308                  | 61.308 | 61.308 | 44.676                          | 44.676 | 44.676 | 50.753                            | 50.754 | 50.754 | -                           | -                           | -                           |
| 25     | 61.306                  | 61.307 | 61.307 | 44.677                          | 44.676 | 44.677 | 50.754                            | 50.754 | 50.754 | -                           | -                           | -                           |
| 26     | 61.309                  | 61.309 | 61.309 | 44.679                          | 44.680 | 44.680 | 50.755                            | 50.753 | 50.754 | -                           | -                           | -                           |
| 27     | 61.309                  | 61.308 | 61.309 | 44.678                          | 44.676 | 44.677 | 50.753                            | 50.754 | 50.754 | -                           | -                           | -                           |
| 28     | 61.310                  | 61.308 | 61.309 | 44.678                          | 44.678 | 44.678 | 50.755                            | 50.756 | 50.754 | -                           | -                           | -                           |
| 29     | 61.309                  | 61.309 | 61.309 | 44.679                          | 44.677 | 44.678 | 50.755                            | 50.755 | 50.755 | -                           | -                           | -                           |
| 30     | 61.309                  | 61.311 | 61.310 | 44.677                          | 44.677 | 44.677 | 50.755                            | 50.756 | 50.755 | 1.880                       | 5.340                       | 3.560                       |

ตารางภาคผนวกที่ ค-2 ผลการทดลองจากการทดลองตามตารางการทดลองของทากูชิ Run2

| No.    | Position1   |        |        | Position2     |        |        | Position3       |        |        | 4                           | 5                           | 6                           |
|--------|-------------|--------|--------|---------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Inspe. | OD1 (mm)    |        |        | OD2 (mm)      |        |        | OD3 (mm)        |        |        | Ra OD1<br>( $\mu\text{m}$ ) | Ra OD2<br>( $\mu\text{m}$ ) | Ra OD3<br>( $\mu\text{m}$ ) |
| Spec   | Ø61.3 ±0.07 |        |        | Ø44.9 0/-0.47 |        |        | Ø50.5 +0.3/+0.2 |        |        | 6.63 Ra                     | 11.57 Ra                    | 11.57 Ra                    |
| Max.   | 61.370      | 61.370 | 61.370 | 44.900        | 44.900 | 44.900 | Max.            | 61.370 | 61.370 | 61.370                      | 44.900                      | 44.900                      |
| Min.   | 61.230      | 61.230 | 61.230 | 44.430        | 44.430 | 44.430 | Min.            | 61.230 | 61.230 | 61.230                      | 44.430                      | 44.430                      |
| Tool   | Micrometer  |        |        | Micrometer    |        |        | Micrometer      |        |        | Roughness tester            |                             |                             |
| Axis   | X           | Y      | Ave    | X             | Y      | Ave    | X               | Y      | Ave    | -                           | -                           | -                           |
| 1      | 61.299      | 61.300 | 61.300 | 44.665        | 44.664 | 44.665 | 50.749          | 50.750 | 50.750 | 1.690                       | 7.720                       | 4.640                       |
| 2      | 61.299      | 61.298 | 61.299 | 44.664        | 44.664 | 44.664 | 50.749          | 50.749 | 50.749 | -                           | -                           | -                           |
| 3      | 61.299      | 61.299 | 61.299 | 44.665        | 44.665 | 44.665 | 50.750          | 50.750 | 50.750 | -                           | -                           | -                           |
| 4      | 61.298      | 61.299 | 61.299 | 44.663        | 44.665 | 44.664 | 50.749          | 50.750 | 50.750 | -                           | -                           | -                           |
| 5      | 61.299      | 61.298 | 61.299 | 44.664        | 44.664 | 44.664 | 50.751          | 50.749 | 50.750 | -                           | -                           | -                           |
| 6      | 61.301      | 61.300 | 61.301 | 44.665        | 44.666 | 44.666 | 50.749          | 50.751 | 50.750 | -                           | -                           | -                           |
| 7      | 61.301      | 61.301 | 61.301 | 44.665        | 44.665 | 44.665 | 50.751          | 50.751 | 50.751 | -                           | -                           | -                           |
| 8      | 61.300      | 61.302 | 61.301 | 44.665        | 44.665 | 44.665 | 50.752          | 50.751 | 50.752 | -                           | -                           | -                           |
| 9      | 61.302      | 61.301 | 61.302 | 44.665        | 44.666 | 44.666 | 50.752          | 50.752 | 50.752 | -                           | -                           | -                           |
| 10     | 61.301      | 61.302 | 61.302 | 44.666        | 44.655 | 44.660 | 50.751          | 50.752 | 50.752 | -                           | -                           | -                           |
| 11     | 61.302      | 61.302 | 61.302 | 44.669        | 44.667 | 44.668 | 50.752          | 50.753 | 50.753 | -                           | -                           | -                           |
| 12     | 61.301      | 61.301 | 61.301 | 44.667        | 44.668 | 44.668 | 50.751          | 50.753 | 50.752 | -                           | -                           | -                           |
| 13     | 61.302      | 61.303 | 61.303 | 44.668        | 44.667 | 44.668 | 50.753          | 50.753 | 50.753 | -                           | -                           | -                           |
| 14     | 61.301      | 61.302 | 61.302 | 44.670        | 44.667 | 44.669 | 50.753          | 50.755 | 50.754 | -                           | -                           | -                           |
| 15     | 61.302      | 61.301 | 61.302 | 44.672        | 44.669 | 44.671 | 50.754          | 50.754 | 50.754 | 1.810                       | 7.920                       | 4.760                       |
| 16     | 61.302      | 61.301 | 61.302 | 44.669        | 44.669 | 44.669 | 50.753          | 50.754 | 50.754 | -                           | -                           | -                           |
| 17     | 61.303      | 61.303 | 61.303 | 44.668        | 44.668 | 44.668 | 50.754          | 50.756 | 50.755 | -                           | -                           | -                           |
| 18     | 61.303      | 61.304 | 61.304 | 44.670        | 44.673 | 44.672 | 50.754          | 50.755 | 50.755 | -                           | -                           | -                           |
| 19     | 61.302      | 61.304 | 61.303 | 44.672        | 44.672 | 44.672 | 50.755          | 50.758 | 50.757 | -                           | -                           | -                           |
| 20     | 61.304      | 61.303 | 61.304 | 44.672        | 44.671 | 44.672 | 50.756          | 50.756 | 50.756 | -                           | -                           | -                           |
| 21     | 61.303      | 61.303 | 61.303 | 44.671        | 44.671 | 44.671 | 50.758          | 50.759 | 50.759 | -                           | -                           | -                           |
| 22     | 61.304      | 61.305 | 61.305 | 44.672        | 44.672 | 44.672 | 50.758          | 50.759 | 50.759 | -                           | -                           | -                           |
| 23     | 61.307      | 61.304 | 61.306 | 44.672        | 44.673 | 44.673 | 50.759          | 50.760 | 50.760 | -                           | -                           | -                           |
| 24     | 61.305      | 61.305 | 61.305 | 44.672        | 44.674 | 44.673 | 50.760          | 50.760 | 50.760 | -                           | -                           | -                           |
| 25     | 61.304      | 61.307 | 61.306 | 44.673        | 44.673 | 44.673 | 50.763          | 50.761 | 50.762 | -                           | -                           | -                           |
| 26     | 61.308      | 61.306 | 61.307 | 44.675        | 44.673 | 44.674 | 50.761          | 50.762 | 50.762 | -                           | -                           | -                           |
| 27     | 61.306      | 61.308 | 61.307 | 44.674        | 44.675 | 44.675 | 50.764          | 50.763 | 50.764 | -                           | -                           | -                           |
| 28     | 61.310      | 61.307 | 61.309 | 44.673        | 44.673 | 44.673 | 50.763          | 50.764 | 50.764 | -                           | -                           | -                           |
| 29     | 61.306      | 61.308 | 61.307 | 44.675        | 44.675 | 44.675 | 50.766          | 50.764 | 50.765 | -                           | -                           | -                           |
| 30     | 61.310      | 61.308 | 61.309 | 44.675        | 44.674 | 44.675 | 50.765          | 50.765 | 50.765 | 1.820                       | 8.040                       | 4.730                       |

ตารางภาคผนวกที่ ค-3 ผลการทดลองจากการทดลองตามตารางการทดลองของทากูชิ Run3

| No.    | Position1   |        |        | Position2     |        |        | Position3       |        |        | 4                           | 5                           | 6                           |
|--------|-------------|--------|--------|---------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Inspe. | OD1 (mm)    |        |        | OD2 (mm)      |        |        | OD3 (mm)        |        |        | Ra OD1<br>( $\mu\text{m}$ ) | Ra OD2<br>( $\mu\text{m}$ ) | Ra OD3<br>( $\mu\text{m}$ ) |
| Spec   | Ø61.3 ±0.07 |        |        | Ø44.9 0/-0.47 |        |        | Ø50.5 +0.3/+0.2 |        |        | 6.63 Ra                     | 11.57 Ra                    | 11.57 Ra                    |
| Max.   | 61.370      | 61.370 | 61.370 | 44.900        | 44.900 | 44.900 | Max.            | 61.370 | 61.370 | 61.370                      | 44.900                      | 44.900                      |
| Min.   | 61.230      | 61.230 | 61.230 | 44.430        | 44.430 | 44.430 | Min.            | 61.230 | 61.230 | 61.230                      | 44.430                      | 44.430                      |
| Tool   | Micrometer  |        |        | Micrometer    |        |        | Micrometer      |        |        | Roughness tester            |                             |                             |
| Axis   | X           | Y      | Ave    | X             | Y      | Ave    | X               | Y      | Ave    | -                           | -                           | -                           |
| 1      | 61.300      | 61.300 | 61.300 | 44.666        | 44.663 | 44.665 | 50.746          | 50.754 | 50.750 | 1.860                       | 11.170                      | 6.840                       |
| 2      | 61.300      | 61.301 | 61.301 | 44.669        | 44.665 | 44.667 | 50.753          | 50.752 | 50.753 | -                           | -                           | -                           |
| 3      | 61.300      | 61.300 | 61.300 | 44.668        | 44.665 | 44.667 | 50.753          | 50.761 | 50.757 | -                           | -                           | -                           |
| 4      | 61.300      | 61.300 | 61.300 | 44.666        | 44.664 | 44.665 | 50.758          | 50.757 | 50.758 | -                           | -                           | -                           |
| 5      | 61.303      | 61.302 | 61.303 | 44.666        | 44.664 | 44.665 | 50.758          | 50.758 | 50.758 | -                           | -                           | -                           |
| 6      | 61.303      | 61.305 | 61.304 | 44.663        | 44.663 | 44.663 | 50.759          | 50.762 | 50.761 | -                           | -                           | -                           |
| 7      | 61.302      | 61.307 | 61.305 | 44.683        | 44.673 | 44.678 | 50.757          | 50.758 | 50.758 | -                           | -                           | -                           |
| 8      | 61.307      | 61.307 | 61.307 | 44.685        | 44.680 | 44.683 | 50.771          | 50.770 | 50.771 | -                           | -                           | -                           |
| 9      | 61.307      | 61.305 | 61.306 | 44.671        | 44.671 | 44.671 | 50.756          | 50.755 | 50.756 | -                           | -                           | -                           |
| 10     | 61.313      | 61.314 | 61.314 | 44.669        | 44.671 | 44.670 | 50.764          | 50.765 | 50.765 | -                           | -                           | -                           |
| 11     | 61.308      | 61.308 | 61.308 | 44.673        | 44.670 | 44.672 | 50.754          | 50.763 | 50.759 | -                           | -                           | -                           |
| 12     | 61.311      | 61.312 | 61.312 | 44.672        | 44.672 | 44.672 | 50.769          | 50.764 | 50.767 | -                           | -                           | -                           |
| 13     | 61.309      | 61.310 | 61.310 | 44.671        | 44.670 | 44.671 | 50.768          | 50.763 | 50.766 | -                           | -                           | -                           |
| 14     | 61.317      | 61.316 | 61.317 | 44.686        | 44.680 | 44.683 | 50.769          | 50.769 | 50.769 | -                           | -                           | -                           |
| 15     | 61.315      | 61.313 | 61.314 | 44.686        | 44.681 | 44.684 | 50.774          | 50.776 | 50.775 | 1.940                       | 10.810                      | 6.880                       |
| 16     | 61.320      | 61.321 | 61.321 | 44.720        | 44.719 | 44.720 | 50.772          | 50.769 | 50.771 | -                           | -                           | -                           |
| 17     | 61.322      | 61.322 | 61.322 | 44.708        | 44.705 | 44.707 | 50.764          | 50.758 | 50.761 | -                           | -                           | -                           |
| 18     | 61.319      | 61.320 | 61.320 | 44.692        | 44.687 | 44.690 | 50.759          | 50.761 | 50.760 | -                           | -                           | -                           |
| 19     | 61.321      | 61.321 | 61.321 | 44.693        | 44.699 | 44.696 | 50.768          | 50.773 | 50.771 | -                           | -                           | -                           |
| 20     | 61.325      | 61.324 | 61.325 | 44.685        | 44.685 | 44.685 | 50.764          | 50.757 | 50.761 | -                           | -                           | -                           |
| 21     | 61.326      | 61.327 | 61.327 | 44.709        | 44.709 | 44.709 | 50.759          | 50.765 | 50.762 | -                           | -                           | -                           |
| 22     | 61.331      | 61.332 | 61.332 | 44.708        | 44.705 | 44.707 | 50.768          | 50.760 | 50.764 | -                           | -                           | -                           |
| 23     | 61.330      | 61.329 | 61.330 | 44.717        | 44.719 | 44.718 | 50.781          | 50.782 | 50.782 | -                           | -                           | -                           |
| 24     | 61.330      | 61.341 | 61.336 | 44.725        | 44.724 | 44.725 | 50.803          | 50.791 | 50.797 | -                           | -                           | -                           |
| 25     | 61.339      | 61.338 | 61.339 | 44.724        | 44.720 | 44.722 | 50.796          | 50.795 | 50.796 | -                           | -                           | -                           |
| 26     | 61.333      | 61.331 | 61.332 | 44.719        | 44.725 | 44.722 | 50.793          | 50.789 | 50.791 | -                           | -                           | -                           |
| 27     | 61.331      | 61.331 | 61.331 | 44.726        | 44.722 | 44.724 | 50.804          | 50.801 | 50.803 | -                           | -                           | -                           |
| 28     | 61.336      | 61.338 | 61.337 | 44.723        | 44.718 | 44.721 | 50.808          | 50.800 | 50.804 | -                           | -                           | -                           |
| 29     | 61.339      | 61.342 | 61.341 | 44.734        | 44.731 | 44.733 | 50.805          | 50.807 | 50.806 | -                           | -                           | -                           |
| 30     | 61.338      | 61.340 | 61.339 | 44.731        | 44.728 | 44.730 | 50.805          | 50.812 | 50.809 | 1.930                       | 10.290                      | 6.640                       |

ตารางภาคผนวกที่ ก-4 ผลการทดลองจากการทดลองตามตารางการทดลองของทากูชิ Run4

| No.    | Position1   |        |        | Position2     |        |        | Position3       |        |        | 4                           | 5                           | 6                           |
|--------|-------------|--------|--------|---------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Inspe. | OD1 (mm)    |        |        | OD2 (mm)      |        |        | OD3 (mm)        |        |        | Ra OD1<br>( $\mu\text{m}$ ) | Ra OD2<br>( $\mu\text{m}$ ) | Ra OD3<br>( $\mu\text{m}$ ) |
| Spec   | Ø61.3 ±0.07 |        |        | Ø44.9 0/-0.47 |        |        | Ø50.5 +0.3/+0.2 |        |        | 6.63 Ra                     | 11.57 Ra                    | 11.57 Ra                    |
| Max.   | 61.370      | 61.370 | 61.370 | 44.900        | 44.900 | 44.900 | Max.            | 61.370 | 61.370 | 61.370                      | 44.900                      | 44.900                      |
| Min.   | 61.230      | 61.230 | 61.230 | 44.430        | 44.430 | 44.430 | Min.            | 61.230 | 61.230 | 61.230                      | 44.430                      | 44.430                      |
| Tool   | Micrometer  |        |        | Micrometer    |        |        | Micrometer      |        |        | Roughness tester            |                             |                             |
| Axis   | X           | Y      | Ave    | X             | Y      | Ave    | X               | Y      | Ave    | -                           | -                           | -                           |
| 1      | 61.299      | 61.300 | 61.300 | 44.665        | 44.665 | 44.665 | 50.749          | 50.750 | 50.750 | 1.440                       | 5.310                       | 2.860                       |
| 2      | 61.302      | 61.301 | 61.302 | 44.665        | 44.664 | 44.665 | 50.752          | 50.751 | 50.752 | -                           | -                           | -                           |
| 3      | 61.300      | 61.301 | 61.301 | 44.664        | 44.664 | 44.664 | 50.751          | 50.752 | 50.752 | -                           | -                           | -                           |
| 4      | 61.303      | 61.302 | 61.303 | 44.668        | 44.669 | 44.669 | 50.754          | 50.751 | 50.753 | -                           | -                           | -                           |
| 5      | 61.302      | 61.302 | 61.302 | 44.667        | 44.668 | 44.668 | 50.755          | 50.756 | 50.756 | -                           | -                           | -                           |
| 6      | 61.300      | 61.300 | 61.300 | 44.668        | 44.669 | 44.669 | 50.755          | 50.757 | 50.756 | -                           | -                           | -                           |
| 7      | 61.303      | 61.302 | 61.303 | 44.671        | 44.671 | 44.671 | 50.755          | 50.758 | 50.757 | -                           | -                           | -                           |
| 8      | 61.298      | 61.300 | 61.299 | 44.670        | 44.672 | 44.671 | 50.756          | 50.756 | 50.756 | -                           | -                           | -                           |
| 9      | 61.301      | 61.300 | 61.301 | 44.675        | 44.677 | 44.676 | 50.757          | 50.761 | 50.759 | -                           | -                           | -                           |
| 10     | 61.302      | 61.300 | 61.301 | 44.673        | 44.673 | 44.673 | 50.758          | 50.760 | 50.759 | -                           | -                           | -                           |
| 11     | 61.303      | 61.302 | 61.303 | 44.672        | 44.671 | 44.672 | 50.756          | 50.759 | 50.758 | -                           | -                           | -                           |
| 12     | 61.302      | 61.302 | 61.302 | 44.674        | 44.672 | 44.673 | 50.760          | 50.758 | 50.759 | -                           | -                           | -                           |
| 13     | 61.302      | 61.300 | 61.301 | 44.672        | 44.673 | 44.673 | 50.760          | 50.759 | 50.760 | -                           | -                           | -                           |
| 14     | 61.303      | 61.301 | 61.302 | 44.674        | 44.674 | 44.674 | 50.761          | 50.757 | 50.759 | -                           | -                           | -                           |
| 15     | 61.305      | 61.305 | 61.305 | 44.672        | 44.672 | 44.672 | 50.764          | 50.762 | 50.763 | 1.550                       | 5.150                       | 3.220                       |
| 16     | 61.302      | 61.302 | 61.302 | 44.675        | 44.674 | 44.675 | 50.761          | 50.760 | 50.761 | -                           | -                           | -                           |
| 17     | 61.305      | 61.304 | 61.305 | 44.673        | 44.673 | 44.673 | 50.761          | 50.759 | 50.760 | -                           | -                           | -                           |
| 18     | 61.304      | 61.304 | 61.304 | 44.676        | 44.677 | 44.677 | 50.760          | 50.760 | 50.760 | -                           | -                           | -                           |
| 19     | 61.303      | 61.303 | 61.303 | 44.674        | 44.673 | 44.674 | 50.758          | 50.760 | 50.759 | -                           | -                           | -                           |
| 20     | 61.306      | 61.305 | 61.306 | 44.674        | 44.674 | 44.674 | 50.759          | 50.757 | 50.758 | -                           | -                           | -                           |
| 21     | 61.303      | 61.303 | 61.303 | 44.676        | 44.676 | 44.676 | 50.762          | 50.762 | 50.762 | -                           | -                           | -                           |
| 22     | 61.304      | 61.304 | 61.304 | 44.673        | 44.674 | 44.674 | 50.764          | 50.763 | 50.764 | -                           | -                           | -                           |
| 23     | 61.302      | 61.301 | 61.302 | 44.675        | 44.675 | 44.675 | 50.764          | 50.764 | 50.764 | -                           | -                           | -                           |
| 24     | 61.304      | 61.304 | 61.304 | 44.676        | 44.674 | 44.675 | 50.764          | 50.763 | 50.764 | -                           | -                           | -                           |
| 25     | 61.305      | 61.306 | 61.306 | 44.678        | 44.677 | 44.678 | 50.768          | 50.767 | 50.768 | -                           | -                           | -                           |
| 26     | 61.303      | 61.302 | 61.303 | 44.678        | 44.678 | 44.678 | 50.764          | 50.765 | 50.765 | -                           | -                           | -                           |
| 27     | 61.306      | 61.305 | 61.306 | 44.678        | 44.679 | 44.679 | 50.764          | 50.766 | 50.765 | -                           | -                           | -                           |
| 28     | 61.304      | 61.304 | 61.304 | 44.680        | 44.679 | 44.680 | 50.766          | 50.765 | 50.766 | -                           | -                           | -                           |
| 29     | 61.304      | 61.306 | 61.305 | 44.678        | 44.679 | 44.679 | 50.764          | 50.764 | 50.764 | -                           | -                           | -                           |
| 30     | 61.306      | 61.306 | 61.306 | 44.681        | 44.681 | 44.681 | 50.766          | 50.766 | 50.766 | 1.570                       | 5.370                       | 3.280                       |



ตารางภาคผนวกที่ ค-5 ผลการทดลองจากการทดลองตามตารางการทดลองของทากูชิ Run5

| No.    | Position1   |        |        | Position2     |        |        | Position3       |        |        | 4                           | 5                           | 6                           |
|--------|-------------|--------|--------|---------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Inspe. | OD1 (mm)    |        |        | OD2 (mm)      |        |        | OD3 (mm)        |        |        | Ra OD1<br>( $\mu\text{m}$ ) | Ra OD2<br>( $\mu\text{m}$ ) | Ra OD3<br>( $\mu\text{m}$ ) |
| Spec   | Ø61.3 ±0.07 |        |        | Ø44.9 0/-0.47 |        |        | Ø50.5 +0.3/+0.2 |        |        | 6.63 Ra                     | 11.57 Ra                    | 11.57 Ra                    |
| Max.   | 61.370      | 61.370 | 61.370 | 44.900        | 44.900 | 44.900 | Max.            | 61.370 | 61.370 | 61.370                      | 44.900                      | 44.900                      |
| Min.   | 61.230      | 61.230 | 61.230 | 44.430        | 44.430 | 44.430 | Min.            | 61.230 | 61.230 | 61.230                      | 44.430                      | 44.430                      |
| Tool   | Micrometer  |        |        | Micrometer    |        |        | Micrometer      |        |        | Roughness tester            |                             |                             |
| Axis   | X           | Y      | Ave    | X             | Y      | Ave    | X               | Y      | Ave    | -                           | -                           | -                           |
| 1      | 61.300      | 61.300 | 61.300 | 44.665        | 44.664 | 44.665 | 50.750          | 50.749 | 50.750 | 1.850                       | 7.600                       | 5.110                       |
| 2      | 61.302      | 61.302 | 61.302 | 44.667        | 44.666 | 44.667 | 50.752          | 50.752 | 50.752 | -                           | -                           | -                           |
| 3      | 61.305      | 61.304 | 61.305 | 44.674        | 44.675 | 44.675 | 50.752          | 50.753 | 50.753 | -                           | -                           | -                           |
| 4      | 61.306      | 61.307 | 61.307 | 44.674        | 44.673 | 44.674 | 50.754          | 50.755 | 50.755 | -                           | -                           | -                           |
| 5      | 61.311      | 61.309 | 61.310 | 44.677        | 44.676 | 44.677 | 50.757          | 50.760 | 50.759 | -                           | -                           | -                           |
| 6      | 61.313      | 61.313 | 61.313 | 44.679        | 44.677 | 44.678 | 50.760          | 50.758 | 50.759 | -                           | -                           | -                           |
| 7      | 61.314      | 61.314 | 61.314 | 44.683        | 44.685 | 44.684 | 50.766          | 50.766 | 50.766 | -                           | -                           | -                           |
| 8      | 61.318      | 61.317 | 61.318 | 44.687        | 44.686 | 44.687 | 50.761          | 50.760 | 50.761 | -                           | -                           | -                           |
| 9      | 61.316      | 61.317 | 61.317 | 44.687        | 44.687 | 44.687 | 50.768          | 50.768 | 50.768 | -                           | -                           | -                           |
| 10     | 61.319      | 61.321 | 61.320 | 44.695        | 44.694 | 44.695 | 50.776          | 50.772 | 50.774 | -                           | -                           | -                           |
| 11     | 61.321      | 61.321 | 61.321 | 44.692        | 44.691 | 44.692 | 50.774          | 50.770 | 50.772 | -                           | -                           | -                           |
| 12     | 61.322      | 61.322 | 61.322 | 44.695        | 44.694 | 44.695 | 50.775          | 50.776 | 50.776 | -                           | -                           | -                           |
| 13     | 61.326      | 61.327 | 61.327 | 44.696        | 44.696 | 44.696 | 50.776          | 50.777 | 50.777 | -                           | -                           | -                           |
| 14     | 61.329      | 61.329 | 61.329 | 44.695        | 44.697 | 44.696 | 50.781          | 50.779 | 50.780 | -                           | -                           | -                           |
| 15     | 61.327      | 61.328 | 61.328 | 44.703        | 44.699 | 44.701 | 50.787          | 50.789 | 50.788 | 2.080                       | 6.960                       | 4.950                       |
| 16     | 61.330      | 61.328 | 61.329 | 44.701        | 44.700 | 44.701 | 50.781          | 50.785 | 50.783 | -                           | -                           | -                           |
| 17     | 61.333      | 61.331 | 61.332 | 44.715        | 44.711 | 44.713 | 50.802          | 50.796 | 50.799 | -                           | -                           | -                           |
| 18     | 61.332      | 61.330 | 61.331 | 44.703        | 44.701 | 44.702 | 50.797          | 50.791 | 50.794 | -                           | -                           | -                           |
| 19     | 61.336      | 61.334 | 61.335 | 44.707        | 44.703 | 44.705 | 50.804          | 50.803 | 50.804 | -                           | -                           | -                           |
| 20     | 61.339      | 61.339 | 61.339 | 44.705        | 44.706 | 44.706 | 50.802          | 50.797 | 50.800 | -                           | -                           | -                           |
| 21     | 61.342      | 61.341 | 61.342 | 44.714        | 44.715 | 44.715 | 50.802          | 50.803 | 50.803 | -                           | -                           | -                           |
| 22     | 61.343      | 61.341 | 61.342 | 44.715        | 44.715 | 44.715 | 50.808          | 50.806 | 50.807 | -                           | -                           | -                           |
| 23     | 61.346      | 61.347 | 61.347 | 44.721        | 44.721 | 44.721 | 50.819          | 50.819 | 50.819 | -                           | -                           | -                           |
| 24     | 61.349      | 61.348 | 61.349 | 44.721        | 44.718 | 44.720 | 50.810          | 50.809 | 50.810 | -                           | -                           | -                           |
| 25     | 61.354      | 61.351 | 61.353 | 44.718        | 44.717 | 44.718 | 50.805          | 50.804 | 50.805 | -                           | -                           | -                           |
| 26     | 61.350      | 61.350 | 61.350 | 44.725        | 44.725 | 44.725 | 50.810          | 50.808 | 50.809 | -                           | -                           | -                           |
| 27     | 61.351      | 61.351 | 61.351 | 44.730        | 44.733 | 44.732 | 50.818          | 50.817 | 50.818 | -                           | -                           | -                           |
| 28     | 61.350      | 61.350 | 61.350 | 44.730        | 44.726 | 44.728 | 50.819          | 50.819 | 50.819 | -                           | -                           | -                           |
| 29     | 61.354      | 61.353 | 61.354 | 44.737        | 44.734 | 44.736 | 50.834          | 50.828 | 50.831 | -                           | -                           | -                           |
| 30     | 61.359      | 61.359 | 61.359 | 44.739        | 44.742 | 44.741 | 50.831          | 50.829 | 50.830 | 2.030                       | 7.430                       | 5.140                       |

ตารางภาคผนวกที่ ก-6 ผลการทดลองจากการทดลองตามตารางการทดลองของทฤษฎี Run6

| No.    | Position1               |        |        | Position2                       |        |        | Position3                         |        |        | 4                           | 5                           | 6                           |
|--------|-------------------------|--------|--------|---------------------------------|--------|--------|-----------------------------------|--------|--------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Inspe. | OD1 (mm)                |        |        | OD2 (mm)                        |        |        | OD3 (mm)                          |        |        | Ra OD1<br>( $\mu\text{m}$ ) | Ra OD2<br>( $\mu\text{m}$ ) | Ra OD3<br>( $\mu\text{m}$ ) |
| Spec   | $\text{Ø}61.3 \pm 0.07$ |        |        | $\text{Ø}44.9 \text{ } 0/-0.47$ |        |        | $\text{Ø}50.5 \text{ } +0.3/+0.2$ |        |        | 6.63 Ra                     | 11.57 Ra                    | 11.57 Ra                    |
| Max.   | 61.370                  | 61.370 | 61.370 | 44.900                          | 44.900 | 44.900 | Max.                              | 61.370 | 61.370 | 61.370                      | 44.900                      | 44.900                      |
| Min.   | 61.230                  | 61.230 | 61.230 | 44.430                          | 44.430 | 44.430 | Min.                              | 61.230 | 61.230 | 61.230                      | 44.430                      | 44.430                      |
| Tool   | Micrometer              |        |        | Micrometer                      |        |        | Micrometer                        |        |        | Roughness tester            |                             |                             |
| Axis   | X                       | Y      | Ave    | X                               | Y      | Ave    | X                                 | Y      | Ave    | -                           | -                           | -                           |
| 1      | 61.300                  | 61.300 | 61.300 | 44.664                          | 44.665 | 44.665 | 50.748                            | 50.751 | 50.750 | 1.700                       | 9.440                       | 6.690                       |
| 2      | 61.302                  | 61.302 | 61.302 | 44.670                          | 44.669 | 44.670 | 50.749                            | 50.750 | 50.750 | -                           | -                           | -                           |
| 3      | 61.303                  | 61.303 | 61.303 | 44.670                          | 44.669 | 44.670 | 50.749                            | 50.746 | 50.748 | -                           | -                           | -                           |
| 4      | 61.302                  | 61.303 | 61.303 | 44.669                          | 44.667 | 44.668 | 50.748                            | 50.752 | 50.750 | -                           | -                           | -                           |
| 5      | 61.305                  | 61.304 | 61.305 | 44.677                          | 44.674 | 44.676 | 50.753                            | 50.751 | 50.752 | -                           | -                           | -                           |
| 6      | 61.304                  | 61.304 | 61.304 | 44.675                          | 44.675 | 44.675 | 50.752                            | 50.755 | 50.754 | -                           | -                           | -                           |
| 7      | 61.304                  | 61.304 | 61.304 | 44.683                          | 44.680 | 44.682 | 50.754                            | 50.754 | 50.754 | -                           | -                           | -                           |
| 8      | 61.306                  | 61.306 | 61.306 | 44.683                          | 44.684 | 44.684 | 50.757                            | 50.755 | 50.756 | -                           | -                           | -                           |
| 9      | 61.308                  | 61.307 | 61.308 | 44.682                          | 44.685 | 44.684 | 50.758                            | 50.753 | 50.756 | -                           | -                           | -                           |
| 10     | 61.309                  | 61.309 | 61.309 | 44.682                          | 44.682 | 44.682 | 50.763                            | 50.762 | 50.763 | -                           | -                           | -                           |
| 11     | 61.311                  | 61.311 | 61.311 | 44.683                          | 44.686 | 44.685 | 50.759                            | 50.763 | 50.761 | -                           | -                           | -                           |
| 12     | 61.311                  | 61.311 | 61.311 | 44.688                          | 44.686 | 44.687 | 50.761                            | 50.765 | 50.763 | -                           | -                           | -                           |
| 13     | 61.312                  | 61.313 | 61.313 | 44.692                          | 44.691 | 44.692 | 50.764                            | 50.764 | 50.764 | -                           | -                           | -                           |
| 14     | 61.311                  | 61.311 | 61.311 | 44.687                          | 44.683 | 44.685 | 50.765                            | 50.760 | 50.763 | -                           | -                           | -                           |
| 15     | 61.310                  | 61.311 | 61.311 | 44.694                          | 44.693 | 44.694 | 50.760                            | 50.762 | 50.761 | 1.930                       | 8.920                       | 6.770                       |
| 16     | 61.310                  | 61.310 | 61.310 | 44.695                          | 44.696 | 44.696 | 50.766                            | 50.762 | 50.764 | -                           | -                           | -                           |
| 17     | 61.312                  | 61.312 | 61.312 | 44.700                          | 44.699 | 44.700 | 50.769                            | 50.768 | 50.769 | -                           | -                           | -                           |
| 18     | 61.315                  | 61.314 | 61.315 | 44.703                          | 44.698 | 44.701 | 50.775                            | 50.773 | 50.774 | -                           | -                           | -                           |
| 19     | 61.318                  | 61.318 | 61.318 | 44.697                          | 44.696 | 44.697 | 50.778                            | 50.775 | 50.777 | -                           | -                           | -                           |
| 20     | 61.320                  | 61.320 | 61.320 | 44.697                          | 44.694 | 44.696 | 50.770                            | 50.770 | 50.770 | -                           | -                           | -                           |
| 21     | 61.319                  | 61.319 | 61.319 | 44.694                          | 44.693 | 44.694 | 50.768                            | 50.767 | 50.768 | -                           | -                           | -                           |
| 22     | 61.321                  | 61.320 | 61.321 | 44.697                          | 44.696 | 44.697 | 50.774                            | 50.771 | 50.773 | -                           | -                           | -                           |
| 23     | 61.323                  | 61.323 | 61.323 | 44.698                          | 44.698 | 44.698 | 50.768                            | 50.771 | 50.770 | -                           | -                           | -                           |
| 24     | 61.325                  | 61.325 | 61.325 | 44.703                          | 44.703 | 44.703 | 50.774                            | 50.775 | 50.775 | -                           | -                           | -                           |
| 25     | 61.324                  | 61.324 | 61.324 | 44.696                          | 44.699 | 44.698 | 50.771                            | 50.772 | 50.772 | -                           | -                           | -                           |
| 26     | 61.325                  | 61.325 | 61.325 | 44.702                          | 44.703 | 44.703 | 50.777                            | 50.775 | 50.776 | -                           | -                           | -                           |
| 27     | 61.327                  | 61.327 | 61.327 | 44.705                          | 44.704 | 44.705 | 50.779                            | 50.779 | 50.779 | -                           | -                           | -                           |
| 28     | 61.330                  | 61.330 | 61.330 | 44.700                          | 44.699 | 44.700 | 50.778                            | 50.783 | 50.781 | -                           | -                           | -                           |
| 29     | 61.331                  | 61.332 | 61.332 | 44.708                          | 44.709 | 44.709 | 50.781                            | 50.784 | 50.783 | -                           | -                           | -                           |
| 30     | 61.333                  | 61.332 | 61.333 | 44.710                          | 44.713 | 44.712 | 50.787                            | 50.792 | 50.790 | 1.940                       | 9.170                       | 6.800                       |

ตารางภาคผนวกที่ ก-7 ผลการทดลองจากการทดลองตามตารางการทดลองของทากูชิ Run7

| No.    | Position1   |        |        | Position2     |        |        | Position3       |        |        | 4                           | 5                           | 6                           |
|--------|-------------|--------|--------|---------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Inspe. | OD1 (mm)    |        |        | OD2 (mm)      |        |        | OD3 (mm)        |        |        | Ra OD1<br>( $\mu\text{m}$ ) | Ra OD2<br>( $\mu\text{m}$ ) | Ra OD3<br>( $\mu\text{m}$ ) |
| Spec   | Ø61.3 ±0.07 |        |        | Ø44.9 0/-0.47 |        |        | Ø50.5 +0.3/+0.2 |        |        | 6.63 Ra                     | 11.57 Ra                    | 11.57 Ra                    |
| Max.   | 61.370      | 61.370 | 61.370 | 44.900        | 44.900 | 44.900 | Max.            | 61.370 | 61.370 | 61.370                      | 44.900                      | 44.900                      |
| Min.   | 61.230      | 61.230 | 61.230 | 44.430        | 44.430 | 44.430 | Min.            | 61.230 | 61.230 | 61.230                      | 44.430                      | 44.430                      |
| Tool   | Micrometer  |        |        | Micrometer    |        |        | Micrometer      |        |        | Roughness tester            |                             |                             |
| Axis   | X           | Y      | Ave    | X             | Y      | Ave    | X               | Y      | Ave    | -                           | -                           | -                           |
| 1      | 61.298      | 61.301 | 61.300 | 44.665        | 44.664 | 44.665 | 50.750          | 50.750 | 50.750 | 1.710                       | 4.980                       | 3.270                       |
| 2      | 61.300      | 61.300 | 61.300 | 44.667        | 44.667 | 44.667 | 50.753          | 50.752 | 50.753 | -                           | -                           | -                           |
| 3      | 61.303      | 61.302 | 61.303 | 44.666        | 44.665 | 44.666 | 50.756          | 50.753 | 50.755 | -                           | -                           | -                           |
| 4      | 61.307      | 61.306 | 61.307 | 44.655        | 44.656 | 44.656 | 50.755          | 50.758 | 50.757 | -                           | -                           | -                           |
| 5      | 61.310      | 61.310 | 61.310 | 44.676        | 44.670 | 44.673 | 50.763          | 50.763 | 50.763 | -                           | -                           | -                           |
| 6      | 61.314      | 61.314 | 61.314 | 44.667        | 44.669 | 44.668 | 50.759          | 50.760 | 50.760 | -                           | -                           | -                           |
| 7      | 61.315      | 61.315 | 61.315 | 44.681        | 44.677 | 44.679 | 50.758          | 50.760 | 50.759 | -                           | -                           | -                           |
| 8      | 61.317      | 61.316 | 61.317 | 44.674        | 44.674 | 44.674 | 50.758          | 50.761 | 50.760 | -                           | -                           | -                           |
| 9      | 61.320      | 61.320 | 61.320 | 44.691        | 44.688 | 44.690 | 50.772          | 50.768 | 50.770 | -                           | -                           | -                           |
| 10     | 61.323      | 61.322 | 61.323 | 44.691        | 44.687 | 44.689 | 50.772          | 50.773 | 50.773 | -                           | -                           | -                           |
| 11     | 61.326      | 61.327 | 61.327 | 44.700        | 44.696 | 44.698 | 50.777          | 50.779 | 50.778 | -                           | -                           | -                           |
| 12     | 61.331      | 61.328 | 61.330 | 44.691        | 44.688 | 44.690 | 50.771          | 50.774 | 50.773 | -                           | -                           | -                           |
| 13     | 61.331      | 61.331 | 61.331 | 44.692        | 44.695 | 44.694 | 50.785          | 50.783 | 50.784 | -                           | -                           | -                           |
| 14     | 61.332      | 61.332 | 61.332 | 44.698        | 44.700 | 44.699 | 50.780          | 50.784 | 50.782 | -                           | -                           | -                           |
| 15     | 61.334      | 61.334 | 61.334 | 44.701        | 44.702 | 44.702 | 50.784          | 50.782 | 50.783 | 2.160                       | 5.410                       | 3.720                       |
| 16     | 61.339      | 61.337 | 61.338 | 44.707        | 44.705 | 44.706 | 50.797          | 50.797 | 50.797 | -                           | -                           | -                           |
| 17     | 61.345      | 61.345 | 61.345 | 44.705        | 44.704 | 44.705 | 50.789          | 50.786 | 50.788 | -                           | -                           | -                           |
| 18     | 61.346      | 61.345 | 61.346 | 44.699        | 44.700 | 44.700 | 50.784          | 50.786 | 50.785 | -                           | -                           | -                           |
| 19     | 61.348      | 61.347 | 61.348 | 44.699        | 44.701 | 44.700 | 50.787          | 50.789 | 50.788 | -                           | -                           | -                           |
| 20     | 61.353      | 61.352 | 61.353 | 44.706        | 44.705 | 44.706 | 50.795          | 50.796 | 50.796 | -                           | -                           | -                           |
| 21     | 61.358      | 61.358 | 61.358 | 44.702        | 44.702 | 44.702 | 50.794          | 50.792 | 50.793 | -                           | -                           | -                           |
| 22     | 61.365      | 61.365 | 61.365 | 44.712        | 44.709 | 44.711 | 50.797          | 50.795 | 50.796 | -                           | -                           | -                           |
| 23     | 61.368      | 61.368 | 61.368 | 44.703        | 44.703 | 44.703 | 50.792          | 50.794 | 50.793 | -                           | -                           | -                           |
| 24     | 61.372      | 61.372 | 61.372 | 44.706        | 44.702 | 44.704 | 50.785          | 50.790 | 50.788 | -                           | -                           | -                           |
| 25     | 61.371      | 61.372 | 61.372 | 44.700        | 44.704 | 44.702 | 50.789          | 50.793 | 50.791 | -                           | -                           | -                           |
| 26     | 61.373      | 61.374 | 61.374 | 44.710        | 44.710 | 44.710 | 50.795          | 50.795 | 50.795 | -                           | -                           | -                           |
| 27     | 61.374      | 61.374 | 61.374 | 44.703        | 44.704 | 44.704 | 50.794          | 50.791 | 50.793 | -                           | -                           | -                           |
| 28     | 61.374      | 61.374 | 61.374 | 44.707        | 44.706 | 44.707 | 50.795          | 50.798 | 50.797 | -                           | -                           | -                           |
| 29     | 61.377      | 61.377 | 61.377 | 44.744        | 44.745 | 44.745 | 50.798          | 50.803 | 50.801 | -                           | -                           | -                           |
| 30     | 61.378      | 61.375 | 61.377 | 44.787        | 44.785 | 44.786 | 50.818          | 50.822 | 50.820 | 2.860                       | 7.820                       | 5.150                       |

ตารางภาคผนวกที่ ค-8 ผลการทดลองจากการทดลองตามตารางการทดลองของทากูชิ Run8

| No.    | Position1   |        |        | Position2     |        |        | Position3       |        |        | 4                           | 5                           | 6                           |
|--------|-------------|--------|--------|---------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Inspe. | OD1 (mm)    |        |        | OD2 (mm)      |        |        | OD3 (mm)        |        |        | Ra OD1<br>( $\mu\text{m}$ ) | Ra OD2<br>( $\mu\text{m}$ ) | Ra OD3<br>( $\mu\text{m}$ ) |
| Spec   | Ø61.3 ±0.07 |        |        | Ø44.9 0/-0.47 |        |        | Ø50.5 +0.3/+0.2 |        |        | 6.63 Ra                     | 11.57 Ra                    | 11.57 Ra                    |
| Max.   | 61.370      | 61.370 | 61.370 | 44.900        | 44.900 | 44.900 | Max.            | 61.370 | 61.370 | 61.370                      | 44.900                      | 44.900                      |
| Min.   | 61.230      | 61.230 | 61.230 | 44.430        | 44.430 | 44.430 | Min.            | 61.230 | 61.230 | 61.230                      | 44.430                      | 44.430                      |
| Tool   | Micrometer  |        |        | Micrometer    |        |        | Micrometer      |        |        | Roughness tester            |                             |                             |
| Axis   | X           | Y      | Ave    | X             | Y      | Ave    | X               | Y      | Ave    | -                           | -                           | -                           |
| 1      | 61.299      | 61.300 | 61.300 | 44.664        | 44.666 | 44.665 | 50.749          | 50.750 | 50.750 | 1.880                       | 7.730                       | 4.830                       |
| 2      | 61.301      | 61.301 | 61.301 | 44.664        | 44.664 | 44.664 | 50.749          | 50.747 | 50.748 | -                           | -                           | -                           |
| 3      | 61.301      | 61.301 | 61.301 | 44.667        | 44.664 | 44.666 | 50.751          | 50.752 | 50.752 | -                           | -                           | -                           |
| 4      | 61.299      | 61.300 | 61.300 | 44.667        | 44.665 | 44.666 | 50.751          | 50.752 | 50.752 | -                           | -                           | -                           |
| 5      | 61.300      | 61.300 | 61.300 | 44.673        | 44.671 | 44.672 | 50.754          | 50.752 | 50.753 | -                           | -                           | -                           |
| 6      | 61.301      | 61.301 | 61.301 | 44.671        | 44.672 | 44.672 | 50.753          | 50.757 | 50.755 | -                           | -                           | -                           |
| 7      | 61.300      | 61.300 | 61.300 | 44.670        | 44.673 | 44.672 | 50.755          | 50.761 | 50.758 | -                           | -                           | -                           |
| 8      | 61.301      | 61.301 | 61.301 | 44.681        | 44.678 | 44.680 | 50.763          | 50.765 | 50.764 | -                           | -                           | -                           |
| 9      | 61.302      | 61.301 | 61.302 | 44.677        | 44.677 | 44.677 | 50.761          | 50.761 | 50.761 | -                           | -                           | -                           |
| 10     | 61.301      | 61.301 | 61.301 | 44.679        | 44.679 | 44.679 | 50.761          | 50.762 | 50.762 | -                           | -                           | -                           |
| 11     | 61.302      | 61.302 | 61.302 | 44.689        | 44.688 | 44.689 | 50.771          | 50.772 | 50.772 | -                           | -                           | -                           |
| 12     | 61.301      | 61.301 | 61.301 | 44.689        | 44.687 | 44.688 | 50.775          | 50.776 | 50.776 | -                           | -                           | -                           |
| 13     | 61.302      | 61.302 | 61.302 | 44.683        | 44.682 | 44.683 | 50.771          | 50.772 | 50.772 | -                           | -                           | -                           |
| 14     | 61.303      | 61.304 | 61.304 | 44.690        | 44.688 | 44.689 | 50.771          | 50.774 | 50.773 | -                           | -                           | -                           |
| 15     | 61.303      | 61.301 | 61.302 | 44.690        | 44.686 | 44.688 | 50.778          | 50.776 | 50.777 | 1.990                       | 7.570                       | 3.600                       |
| 16     | 61.304      | 61.304 | 61.304 | 44.687        | 44.684 | 44.686 | 50.774          | 50.774 | 50.774 | -                           | -                           | -                           |
| 17     | 61.308      | 61.307 | 61.308 | 44.686        | 44.686 | 44.686 | 50.774          | 50.775 | 50.775 | -                           | -                           | -                           |
| 18     | 61.307      | 61.307 | 61.307 | 44.695        | 44.691 | 44.693 | 50.779          | 50.778 | 50.779 | -                           | -                           | -                           |
| 19     | 61.309      | 61.309 | 61.309 | 44.694        | 44.691 | 44.693 | 50.781          | 50.778 | 50.780 | -                           | -                           | -                           |
| 20     | 61.313      | 61.311 | 61.312 | 44.696        | 44.694 | 44.695 | 50.781          | 50.782 | 50.782 | -                           | -                           | -                           |
| 21     | 61.311      | 61.311 | 61.311 | 44.699        | 44.697 | 44.698 | 50.783          | 50.784 | 50.784 | -                           | -                           | -                           |
| 22     | 61.312      | 61.313 | 61.313 | 44.691        | 44.690 | 44.691 | 50.779          | 50.777 | 50.778 | -                           | -                           | -                           |
| 23     | 61.315      | 61.314 | 61.315 | 44.696        | 44.698 | 44.697 | 50.783          | 50.783 | 50.783 | -                           | -                           | -                           |
| 24     | 61.313      | 61.314 | 61.314 | 44.692        | 44.690 | 44.691 | 50.784          | 50.784 | 50.784 | -                           | -                           | -                           |
| 25     | 61.316      | 61.316 | 61.316 | 44.698        | 44.696 | 44.697 | 50.780          | 50.782 | 50.781 | -                           | -                           | -                           |
| 26     | 61.318      | 61.318 | 61.318 | 44.695        | 44.695 | 44.695 | 50.781          | 50.780 | 50.781 | -                           | -                           | -                           |
| 27     | 61.318      | 61.318 | 61.318 | 44.697        | 44.697 | 44.697 | 50.781          | 50.781 | 50.781 | -                           | -                           | -                           |
| 28     | 61.320      | 61.320 | 61.320 | 44.700        | 44.697 | 44.699 | 50.785          | 50.784 | 50.785 | -                           | -                           | -                           |
| 29     | 61.319      | 61.319 | 61.319 | 44.700        | 44.699 | 44.700 | 50.789          | 50.784 | 50.787 | -                           | -                           | -                           |
| 30     | 61.320      | 61.319 | 61.320 | 44.695        | 44.692 | 44.694 | 50.789          | 50.788 | 50.789 | 3.200                       | 6.400                       | 3.530                       |

ตารางภาคผนวกที่ ก-9 ผลการทดลองจากการทดลองตามตารางการทดลองของทากูชิ Run9

| No.    | Position1   |        |        | Position2     |        |        | Position3       |        |        | 4                           | 5                           | 6                           |
|--------|-------------|--------|--------|---------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Inspe. | OD1 (mm)    |        |        | OD2 (mm)      |        |        | OD3 (mm)        |        |        | Ra OD1<br>( $\mu\text{m}$ ) | Ra OD2<br>( $\mu\text{m}$ ) | Ra OD3<br>( $\mu\text{m}$ ) |
| Spec   | Ø61.3 ±0.07 |        |        | Ø44.9 0/-0.47 |        |        | Ø50.5 +0.3/+0.2 |        |        | 6.63 Ra                     | 11.57 Ra                    | 11.57 Ra                    |
| Max.   | 61.370      | 61.370 | 61.370 | 44.900        | 44.900 | 44.900 | Max.            | 61.370 | 61.370 | 61.370                      | 44.900                      | 44.900                      |
| Min.   | 61.230      | 61.230 | 61.230 | 44.430        | 44.430 | 44.430 | Min.            | 61.230 | 61.230 | 61.230                      | 44.430                      | 44.430                      |
| Tool   | Micrometer  |        |        | Micrometer    |        |        | Micrometer      |        |        | Roughness tester            |                             |                             |
| Axis   | X           | Y      | Ave    | X             | Y      | Ave    | X               | Y      | Ave    | -                           | -                           | -                           |
| 1      | 61.301      | 61.299 | 61.300 | 44.667        | 44.662 | 44.665 | 50.750          | 50.749 | 50.750 | 2.000                       | 9.920                       | 6.400                       |
| 2      | 61.301      | 61.301 | 61.301 | 44.664        | 44.663 | 44.664 | 50.753          | 50.752 | 50.753 | -                           | -                           | -                           |
| 3      | 61.302      | 61.303 | 61.303 | 44.668        | 44.672 | 44.670 | 50.765          | 50.768 | 50.767 | -                           | -                           | -                           |
| 4      | 61.303      | 61.305 | 61.304 | 44.676        | 44.675 | 44.676 | 50.759          | 50.760 | 50.760 | -                           | -                           | -                           |
| 5      | 61.303      | 61.307 | 61.305 | 44.676        | 44.674 | 44.675 | 50.771          | 50.768 | 50.770 | -                           | -                           | -                           |
| 6      | 61.304      | 61.308 | 61.306 | 44.680        | 44.681 | 44.681 | 50.766          | 50.768 | 50.767 | -                           | -                           | -                           |
| 7      | 61.303      | 61.304 | 61.304 | 44.686        | 44.684 | 44.685 | 50.767          | 50.772 | 50.770 | -                           | -                           | -                           |
| 8      | 61.303      | 61.303 | 61.303 | 44.685        | 44.685 | 44.685 | 50.777          | 50.780 | 50.779 | -                           | -                           | -                           |
| 9      | 61.304      | 61.304 | 61.304 | 44.680        | 44.682 | 44.681 | 50.779          | 50.778 | 50.779 | -                           | -                           | -                           |
| 10     | 61.308      | 61.310 | 61.309 | 44.695        | 44.689 | 44.692 | 50.792          | 50.792 | 50.792 | -                           | -                           | -                           |
| 11     | 61.310      | 61.310 | 61.310 | 44.696        | 44.688 | 44.692 | 50.794          | 50.790 | 50.792 | -                           | -                           | -                           |
| 12     | 61.312      | 61.312 | 61.312 | 44.694        | 44.696 | 44.695 | 50.795          | 50.790 | 50.793 | -                           | -                           | -                           |
| 13     | 61.316      | 61.313 | 61.315 | 44.693        | 44.687 | 44.690 | 50.792          | 50.790 | 50.791 | -                           | -                           | -                           |
| 14     | 61.323      | 61.319 | 61.321 | 44.693        | 44.688 | 44.691 | 50.790          | 50.789 | 50.790 | -                           | -                           | -                           |
| 15     | 61.326      | 61.324 | 61.325 | 44.692        | 44.687 | 44.690 | 50.782          | 50.783 | 50.783 | 1.980                       | 9.270                       | 5.980                       |
| 16     | 61.325      | 61.325 | 61.325 | 44.693        | 44.689 | 44.691 | 50.784          | 50.787 | 50.786 | -                           | -                           | -                           |
| 17     | 61.329      | 61.328 | 61.329 | 44.697        | 44.700 | 44.699 | 50.792          | 50.800 | 50.796 | -                           | -                           | -                           |
| 18     | 61.328      | 61.329 | 61.329 | 44.693        | 44.691 | 44.692 | 50.796          | 50.798 | 50.797 | -                           | -                           | -                           |
| 19     | 61.331      | 61.330 | 61.331 | 44.697        | 44.701 | 44.699 | 50.793          | 50.802 | 50.798 | -                           | -                           | -                           |
| 20     | 61.334      | 61.334 | 61.334 | 44.697        | 44.695 | 44.696 | 50.802          | 50.800 | 50.801 | -                           | -                           | -                           |
| 21     | 61.338      | 61.336 | 61.337 | 44.716        | 44.718 | 44.717 | 50.798          | 50.807 | 50.803 | -                           | -                           | -                           |
| 22     | 61.340      | 61.338 | 61.339 | 44.722        | 44.717 | 44.720 | 50.805          | 50.804 | 50.805 | -                           | -                           | -                           |
| 23     | 61.340      | 61.340 | 61.340 | 44.719        | 44.718 | 44.719 | 50.808          | 50.807 | 50.808 | -                           | -                           | -                           |
| 24     | 61.341      | 61.342 | 61.342 | 44.723        | 44.727 | 44.725 | 50.820          | 50.823 | 50.822 | -                           | -                           | -                           |
| 25     | 61.342      | 61.344 | 61.343 | 44.731        | 44.730 | 44.731 | 50.814          | 50.815 | 50.815 | -                           | -                           | -                           |
| 26     | 61.342      | 61.346 | 61.344 | 44.731        | 44.729 | 44.730 | 50.826          | 50.823 | 50.825 | -                           | -                           | -                           |
| 27     | 61.343      | 61.347 | 61.345 | 44.735        | 44.736 | 44.736 | 50.821          | 50.823 | 50.822 | -                           | -                           | -                           |
| 28     | 61.342      | 61.343 | 61.343 | 44.741        | 44.739 | 44.740 | 50.822          | 50.827 | 50.825 | -                           | -                           | -                           |
| 29     | 61.342      | 61.342 | 61.342 | 44.740        | 44.740 | 44.740 | 50.832          | 50.835 | 50.834 | -                           | -                           | -                           |
| 30     | 61.343      | 61.343 | 61.343 | 44.735        | 44.737 | 44.736 | 50.834          | 50.833 | 50.834 | 2.014                       | 10.125                      | 6.322                       |

**ภาคผนวก ง**

ตารางจับเวลาและตารางการคำนวณเวลาในการผลิต

| Sliding yoke Line |                      |               |        |        |        |        |        |        |        |        |        | 06 Nov 2014                 | เวลา 14.40 pm |       |        |  |
|-------------------|----------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------------------|---------------|-------|--------|--|
| PROCESS           |                      | เวลา (วินาที) |        |        |        |        |        |        |        |        |        | ลำดับคน -                   |               |       |        |  |
| All process       |                      |               |        |        |        |        |        |        |        |        |        | ผู้บันทึก Kongrit Nakomchai |               |       |        |  |
| No.               | รายละเอียดงาน        | 1             | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | MIN.                        | MAX.          | FLUCT | AVE    |  |
| 1                 | Machine time LA-9046 | 92.14         | 92.22  | 92.35  | 92.26  | 92.18  | 92.20  | 92.31  | 92.37  | 92.19  | 92.23  | 92.14                       | 92.37         | 0.23  | 92.25  |  |
| 2                 | Machine time LA-9047 | 90.68         | 90.54  | 90.52  | 90.57  | 90.44  | 90.51  | 90.47  | 90.45  | 90.42  | 90.49  | 90.42                       | 90.68         | 0.26  | 90.51  |  |
| 3                 | Machine time LA-9028 | 116.56        | 116.53 | 116.65 | 116.66 | 116.51 | 116.59 | 116.54 | 116.58 | 116.52 | 116.65 | 116.51                      | 116.66        | 0.15  | 116.58 |  |
| 4                 | Machine time LA-9048 | 114.64        | 114.83 | 114.81 | 114.88 | 114.85 | 114.85 | 114.77 | 114.82 | 114.80 | 114.74 | 114.64                      | 114.88        | 0.24  | 114.80 |  |
| 5                 | Machine time LA-9049 | 80.48         | 80.46  | 80.50  | 80.52  | 80.45  | 80.48  | 80.36  | 80.40  | 80.42  | 80.36  | 80.36                       | 80.52         | 0.16  | 80.44  |  |
| 6                 | Machine time LA-9050 | 80.74         | 80.79  | 80.83  | 80.80  | 80.85  | 80.81  | 80.78  | 80.80  | 80.85  | 80.84  | 80.74                       | 80.85         | 0.11  | 80.81  |  |
| 7                 | Machine time GC-9003 | 91.34         | 91.28  | 91.23  | 91.27  | 91.16  | 91.22  | 91.24  | 91.19  | 91.14  | 91.23  | 91.14                       | 91.34         | 0.20  | 91.23  |  |
| 8                 | Machine time GC-9004 | 91.75         | 91.84  | 91.82  | 91.75  | 91.72  | 91.89  | 91.82  | 91.80  | 91.85  | 91.88  | 91.72                       | 91.89         | 0.17  | 91.81  |  |
| 9                 | Machine time HT-9004 | 44.83         | 44.77  | 44.71  | 44.80  | 44.63  | 44.75  | 44.70  | 44.66  | 44.71  | 44.70  | 44.63                       | 44.83         | 0.20  | 44.73  |  |
| 10                | Machine time GR-9018 | 42.88         | 43.05  | 42.95  | 43.10  | 43.12  | 43.08  | 43.11  | 42.97  | 42.85  | 43.13  | 42.85                       | 43.13         | 0.28  | 43.02  |  |
| 11                | Machine time ME-9027 | 23.35         | 23.28  | 23.31  | 23.25  | 23.27  | 23.38  | 23.40  | 23.28  | 23.22  | 23.24  | 23.22                       | 23.40         | 0.18  | 23.30  |  |
| 12                | Machine time WM-9029 | 42.42         | 42.36  | 42.28  | 42.30  | 42.27  | 42.26  | 42.24  | 42.35  | 42.31  | 42.24  | 42.24                       | 42.42         | 0.18  | 42.30  |  |
| 13                | Machine time AM-9013 | 31.51         | 31.45  | 31.41  | 31.38  | 31.42  | 31.46  | 31.48  | 31.41  | 31.40  | 31.42  | 31.38                       | 31.51         | 0.13  | 31.43  |  |
| 14                | Machine time MC-9025 | 75.13         | 75.15  | 75.11  | 75.15  | 75.13  | 75.09  | 75.11  | 75.12  | 75.08  | 75.12  | 75.08                       | 75.15         | 0.07  | 75.12  |  |
| 15                | Machine time MC-9034 | 75.88         | 75.91  | 75.92  | 75.95  | 75.96  | 75.89  | 75.86  | 75.92  | 75.90  | 75.89  | 75.86                       | 75.96         | 0.09  | 75.91  |  |
| 16                | Machine time WM-9030 | 45.25         | 45.22  | 45.18  | 45.16  | 45.15  | 45.24  | 45.23  | 45.28  | 45.19  | 45.22  | 45.15                       | 45.28         | 0.13  | 45.21  |  |
| 17                | Machine time AM-9016 | 16.68         | 16.55  | 16.59  | 16.64  | 16.62  | 16.63  | 16.60  | 16.57  | 16.68  | 16.56  | 16.55                       | 16.68         | 0.13  | 16.61  |  |

ภาพภาคผนวกที่ ง-1 ตารางจับเวลาการผลิตปัจจุบัน

ตารางภาคผนวกที่ ง-1 การคำนวณเวลาการผลิตของการทดลอง Run1

| ขั้นตอนที่                            | L (mm) | F (mm/rev) | N (rpm) | t (sec) |
|---------------------------------------|--------|------------|---------|---------|
| F1                                    | 98.50  | 0.43       | 1216.70 | 11.30   |
| F2                                    | 98.50  | 0.28       | 1255.06 | 16.82   |
| F3                                    | 38.00  | 0.35       | 1255.06 | 5.19    |
| F4                                    | 37.98  | 0.35       | 1364.93 | 4.77    |
| F5                                    | 33.85  | 0.35       | 1426.04 | 4.07    |
| เวลารวมส่วนที่ทำการทดลอง ( $t_u$ )    |        |            |         | 42.1    |
| เวลาส่วนที่ไม่ได้ทำการทดลอง ( $t_n$ ) |        |            |         | 72.7    |
| เวลาการผลิตต่อชิ้น ( $t_T$ )          |        |            |         | 114.8   |

ตารางภาคผนวกที่ ง-2 การคำนวณเวลาการผลิตของการทดลอง Run2

| ขั้นตอนที่                            | L (mm) | F (mm/rev) | N (rpm) | t (sec) |
|---------------------------------------|--------|------------|---------|---------|
| F1                                    | 98.50  | 0.52       | 1399.21 | 8.1     |
| F2                                    | 98.50  | 0.34       | 1443.32 | 12.0    |
| F3                                    | 38.00  | 0.43       | 1443.32 | 3.7     |
| F4                                    | 37.98  | 0.43       | 1569.66 | 3.4     |
| F5                                    | 33.85  | 0.43       | 1639.95 | 2.9     |
| เวลารวมส่วนที่ทำการทดลอง ( $t_u$ )    |        |            |         | 30.1    |
| เวลาส่วนที่ไม่ได้ทำการทดลอง ( $t_n$ ) |        |            |         | 72.7    |
| เวลาการผลิตต่อชิ้น ( $t_T$ )          |        |            |         | 102.8   |



ตารางภาคผนวกที่ ง-3 การคำนวณเวลาการผลิตของการทดลอง Run3

| ขั้นตอนที่                            | L (mm) | F (mm/rev) | N (rpm) | t (sec) |
|---------------------------------------|--------|------------|---------|---------|
| F1                                    | 98.50  | 0.61       | 1581.71 | 6.1     |
| F2                                    | 98.50  | 0.4        | 1631.58 | 9.1     |
| F3                                    | 38.00  | 0.5        | 1631.58 | 2.8     |
| F4                                    | 37.98  | 0.5        | 1774.40 | 2.6     |
| F5                                    | 33.85  | 0.5        | 1853.86 | 2.2     |
| เวลารวมส่วนที่ทำการทดลอง ( $t_u$ )    |        |            |         | 22.7    |
| เวลาส่วนที่ไม่ได้ทำการทดลอง ( $t_n$ ) |        |            |         | 72.7    |
| เวลาการผลิตต่อชิ้น ( $t_T$ )          |        |            |         | 95.4    |

ตารางภาคผนวกที่ ง-4 การคำนวณเวลาการผลิตของการทดลอง Run4

| ขั้นตอนที่                            | L (mm) | F (mm/rev) | N (rpm) | t (sec) |
|---------------------------------------|--------|------------|---------|---------|
| F1                                    | 98.50  | 0.43       | 1399.21 | 9.8     |
| F2                                    | 98.50  | 0.28       | 1443.32 | 14.6    |
| F3                                    | 38.00  | 0.35       | 1443.32 | 4.5     |
| F4                                    | 37.98  | 0.35       | 1569.66 | 4.1     |
| F5                                    | 33.85  | 0.35       | 1639.95 | 3.5     |
| เวลารวมส่วนที่ทำการทดลอง ( $t_u$ )    |        |            |         | 36.6    |
| เวลาส่วนที่ไม่ได้ทำการทดลอง ( $t_n$ ) |        |            |         | 72.7    |
| เวลาการผลิตต่อชิ้น ( $t_T$ )          |        |            |         | 109.3   |

ตารางภาคผนวกที่ ง-5 การคำนวณเวลาการผลิตของการทดลอง Run5

| ขั้นตอนที่                            | L (mm) | F (mm/rev) | N (rpm) | t (sec) |
|---------------------------------------|--------|------------|---------|---------|
| F1                                    | 98.50  | 0.52       | 1581.71 | 7.2     |
| F2                                    | 98.50  | 0.34       | 1631.58 | 10.7    |
| F3                                    | 38.00  | 0.43       | 1631.58 | 3.2     |
| F4                                    | 37.98  | 0.43       | 1774.40 | 3.0     |
| F5                                    | 33.85  | 0.43       | 1853.86 | 2.5     |
| เวลารวมส่วนที่ทำการทดลอง ( $t_u$ )    |        |            |         | 26.6    |
| เวลาส่วนที่ไม่ได้ทำการทดลอง ( $t_n$ ) |        |            |         | 72.7    |
| เวลาการผลิตต่อชิ้น ( $t_T$ )          |        |            |         | 99.3    |

ตารางภาคผนวกที่ ง-6 การคำนวณเวลาการผลิตของการทดลอง Run6

| ขั้นตอนที่                            | L (mm) | F (mm/rev) | N (rpm) | t (sec) |
|---------------------------------------|--------|------------|---------|---------|
| F1                                    | 98.50  | 0.61       | 1216.70 | 8.0     |
| F2                                    | 98.50  | 0.4        | 1255.06 | 11.8    |
| F3                                    | 38.00  | 0.5        | 1255.06 | 3.6     |
| F4                                    | 37.98  | 0.5        | 1364.93 | 3.3     |
| F5                                    | 33.85  | 0.5        | 1426.04 | 2.8     |
| เวลารวมส่วนที่ทำการทดลอง ( $t_u$ )    |        |            |         | 29.6    |
| เวลาส่วนที่ไม่ได้ทำการทดลอง ( $t_n$ ) |        |            |         | 72.7    |
| เวลาการผลิตต่อชิ้น ( $t_T$ )          |        |            |         | 102.3   |

ตารางภาคผนวกที่ ง-7 การคำนวณเวลาการผลิตของการทดลอง Run7

| ขั้นตอนที่                            | L (mm) | F (mm/rev) | N (rpm) | t (sec) |
|---------------------------------------|--------|------------|---------|---------|
| F1                                    | 98.50  | 0.43       | 1581.71 | 8.7     |
| F2                                    | 98.50  | 0.28       | 1631.58 | 12.9    |
| F3                                    | 38.00  | 0.35       | 1631.58 | 4.0     |
| F4                                    | 37.98  | 0.35       | 1774.40 | 3.7     |
| F5                                    | 33.85  | 0.35       | 1853.86 | 3.1     |
| เวลารวมส่วนที่ทำการทดลอง ( $t_u$ )    |        |            |         | 32.4    |
| เวลาส่วนที่ไม่ได้ทำการทดลอง ( $t_n$ ) |        |            |         | 72.7    |
| เวลาการผลิตต่อชิ้น ( $t_T$ )          |        |            |         | 105.1   |

ตารางภาคผนวกที่ ง-8 การคำนวณเวลาการผลิตของการทดลอง Run8

| ขั้นตอนที่                            | L (mm) | F (mm/rev) | N (rpm) | t (sec) |
|---------------------------------------|--------|------------|---------|---------|
| F1                                    | 98.50  | 0.52       | 1216.70 | 9.3     |
| F2                                    | 98.50  | 0.34       | 1255.06 | 13.8    |
| F3                                    | 38.00  | 0.43       | 1255.06 | 4.2     |
| F4                                    | 37.98  | 0.43       | 1364.93 | 3.9     |
| F5                                    | 33.85  | 0.43       | 1426.04 | 3.3     |
| เวลารวมส่วนที่ทำการทดลอง ( $t_u$ )    |        |            |         | 34.6    |
| เวลาส่วนที่ไม่ได้ทำการทดลอง ( $t_n$ ) |        |            |         | 72.7    |
| เวลาการผลิตต่อชิ้น ( $t_T$ )          |        |            |         | 107.3   |

ตารางภาคผนวกที่ ง-9 การคำนวณเวลาการผลิตของการทดลอง Run9

| ขั้นตอนที่                            | L (mm) | F (mm/rev) | N (rpm) | t (sec) |
|---------------------------------------|--------|------------|---------|---------|
| F1                                    | 98.50  | 0.61       | 1399.21 | 6.9     |
| F2                                    | 98.50  | 0.4        | 1443.32 | 10.2    |
| F3                                    | 38.00  | 0.5        | 1443.32 | 3.2     |
| F4                                    | 37.98  | 0.5        | 1569.66 | 2.9     |
| F5                                    | 33.85  | 0.5        | 1639.95 | 2.5     |
| เวลารวมส่วนที่ทำการทดลอง ( $t_n$ )    |        |            |         | 25.7    |
| เวลาส่วนที่ไม่ได้ทำการทดลอง ( $t_n$ ) |        |            |         | 72.7    |
| เวลาการผลิตต่อชิ้น ( $t_T$ )          |        |            |         | 98.4    |

### ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยและผลการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab

## Response Surface Regression: E versus T, F, S

### Analysis of Variance

| Source            | DF | Adj SS   | Adj MS   | F-Value | P-Value |
|-------------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Model             | 6  | 0.006965 | 0.001161 | 1547.67 | 0.001   |
| Linear            | 3  | 0.006481 | 0.002160 | 2880.31 | 0.000   |
| T                 | 1  | 0.002166 | 0.002166 | 2888.00 | 0.000   |
| F                 | 1  | 0.000962 | 0.000962 | 1282.57 | 0.001   |
| S                 | 1  | 0.002537 | 0.002537 | 3383.29 | 0.000   |
| Square            | 1  | 0.000473 | 0.000473 | 631.14  | 0.002   |
| S*S               | 1  | 0.000473 | 0.000473 | 631.14  | 0.002   |
| 2-Way Interaction | 2  | 0.000603 | 0.000301 | 401.67  | 0.002   |
| T*F               | 1  | 0.000372 | 0.000372 | 496.13  | 0.002   |
| T*S               | 1  | 0.000024 | 0.000024 | 32.67   | 0.029   |
| Error             | 2  | 0.000001 | 0.000001 |         |         |
| Total             | 8  | 0.006966 |          |         |         |

### Model Summary

| S         | R-sq   | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|-----------|--------|-----------|------------|
| 0.0008660 | 99.98% | 99.91%    | 99.55%     |

### Coded Coefficients

| Term     | Effect   | Coef     | SE Coef  | T-Value | P-Value | VIF  |
|----------|----------|----------|----------|---------|---------|------|
| Constant |          | 0.033250 | 0.000550 | 60.50   | 0.000   |      |
| T        | 0.038000 | 0.019000 | 0.000354 | 53.74   | 0.000   | 1.00 |
| F        | 0.033500 | 0.016750 | 0.000468 | 35.81   | 0.001   | 1.75 |
| S        | 0.057250 | 0.028625 | 0.000492 | 58.17   | 0.000   | 1.94 |
| S*S      | 0.035250 | 0.017625 | 0.000702 | 25.12   | 0.002   | 1.31 |
| T*F      | 0.030500 | 0.015250 | 0.000685 | 22.27   | 0.002   | 2.50 |
| T*S      | 0.007000 | 0.003500 | 0.000612 | 5.72    | 0.029   | 2.00 |

### Regression Equation in Uncoded Units

$$E = 0.033250 + 0.019000 T + 0.016750 F + 0.028625 S + 0.017625 S*S + 0.015250 T*F + 0.003500 T*S$$

### Fits and Diagnostics for All Observations

| Obs | E        | Fit      | Resid     | Std Resid |
|-----|----------|----------|-----------|-----------|
| 1   | 0.005000 | 0.005250 | -0.000250 | -0.93     |
| 2   | 0.015000 | 0.014250 | 0.000750  | 1.32      |
| 3   | 0.058000 | 0.058500 | -0.000500 | -1.22     |
| 4   | 0.016000 | 0.016500 | -0.000500 | -0.93     |
| 5   | 0.080000 | 0.079500 | 0.000500  | 0.93      |
| 6   | 0.039000 | 0.039000 | 0.000000  | 0.00      |
| 7   | 0.070000 | 0.070000 | 0.000000  | 0.00      |
| 8   | 0.038000 | 0.037750 | 0.000250  | 0.93      |
| 9   | 0.084000 | 0.084250 | -0.000250 | -0.93     |

ภาพภาคผนวก จ-1 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยและผลการทดลองด้วยโปรแกรม

Minitab

**ภาคผนวก จ**

ผลการคำนวณจำนวนชิ้นที่ผลิตได้ต่อคอมตัด เวลาการผลิต อัตราการผลิต และต้นทุนการผลิต

ตารางภาคผนวกที่ ฉ-1 การคำนวณจำนวนชิ้นที่ผลิตได้ต่อคอมตัด เวลาการผลิต อัตราการผลิต และ  
ต้นทุนการผลิต

| No | Tool | Feed | Speed | E     | TL      | Time   | Production rate | Total cost |
|----|------|------|-------|-------|---------|--------|-----------------|------------|
| 1  | -1   | -1   | -1    | 0.005 | 142.857 | 114.80 | 454.70          | 4.443      |
| 2  | -1   | -1   | -0.9  | 0.004 | 169.924 | 114.22 | 457.01          | 4.348      |
| 3  | -1   | -1   | -0.8  | 0.004 | 190.840 | 113.62 | 459.44          | 4.284      |
| 4  | -1   | -1   | -0.7  | 0.004 | 197.433 | 113.03 | 461.83          | 4.252      |
| 5  | -1   | -1   | -0.6  | 0.004 | 186.567 | 112.46 | 464.17          | 4.252      |
| 6  | -1   | -1   | -0.5  | 0.005 | 163.265 | 111.90 | 466.48          | 4.284      |
| 7  | -1   | -1   | -0.4  | 0.006 | 135.870 | 111.36 | 468.74          | 4.348      |
| 8  | -1   | -1   | -0.3  | 0.007 | 110.314 | 110.84 | 470.96          | 4.443      |
| 9  | -1   | -1   | -0.2  | 0.008 | 88.968  | 110.33 | 473.14          | 4.571      |
| 10 | -1   | -1   | -0.1  | 0.010 | 72.020  | 109.83 | 475.28          | 4.731      |
| 11 | -1   | -1   | 0     | 0.013 | 58.824  | 109.35 | 477.38          | 4.922      |
| 12 | -1   | -1   | 0.1   | 0.015 | 48.579  | 108.87 | 479.45          | 5.146      |
| 13 | -1   | -1   | 0.2   | 0.018 | 40.584  | 108.41 | 481.49          | 5.401      |
| 14 | -1   | -1   | 0.3   | 0.022 | 34.288  | 107.97 | 483.48          | 5.688      |
| 15 | -1   | -1   | 0.4   | 0.026 | 29.274  | 107.53 | 485.45          | 6.007      |
| 16 | -1   | -1   | 0.5   | 0.030 | 25.237  | 107.10 | 487.38          | 6.357      |
| 17 | -1   | -1   | 0.6   | 0.034 | 21.949  | 106.69 | 489.28          | 6.740      |
| 18 | -1   | -1   | 0.7   | 0.039 | 19.244  | 106.28 | 491.15          | 7.154      |
| 19 | -1   | -1   | 0.8   | 0.044 | 16.995  | 105.88 | 492.99          | 7.600      |
| 20 | -1   | -1   | 0.9   | 0.050 | 15.109  | 105.50 | 494.80          | 8.078      |



## ตารางภาคผนวกที่ ๓-1 (ต่อ)

| No | Tool | Feed | Speed | E     | TL      | Time   | Production rate | Total cost |
|----|------|------|-------|-------|---------|--------|-----------------|------------|
| 21 | -1   | -1   | 1     | 0.056 | 13.514  | 105.12 | 496.59          | 8.587      |
| 22 | -1   | -0.9 | -1    | 0.005 | 138.889 | 113.96 | 458.04          | 4.427      |
| 23 | -1   | -0.9 | -0.9  | 0.005 | 164.339 | 113.35 | 460.50          | 4.331      |
| 24 | -1   | -0.9 | -0.8  | 0.004 | 183.824 | 112.76 | 462.92          | 4.268      |
| 25 | -1   | -0.9 | -0.7  | 0.004 | 189.934 | 112.19 | 465.29          | 4.236      |
| 26 | -1   | -0.9 | -0.6  | 0.004 | 179.856 | 111.63 | 467.62          | 4.237      |
| 27 | -1   | -0.9 | -0.5  | 0.005 | 158.103 | 111.09 | 469.91          | 4.269      |
| 28 | -1   | -0.9 | -0.4  | 0.006 | 132.275 | 110.56 | 472.15          | 4.333      |
| 29 | -1   | -0.9 | -0.3  | 0.007 | 107.933 | 110.04 | 474.36          | 4.429      |
| 30 | -1   | -0.9 | -0.2  | 0.009 | 87.413  | 109.54 | 476.52          | 4.557      |
| 31 | -1   | -0.9 | -0.1  | 0.011 | 70.998  | 109.06 | 478.65          | 4.717      |
| 32 | -1   | -0.9 | 0     | 0.013 | 58.140  | 108.58 | 480.74          | 4.909      |
| 33 | -1   | -0.9 | 0.1   | 0.016 | 48.112  | 108.12 | 482.80          | 5.133      |
| 34 | -1   | -0.9 | 0.2   | 0.019 | 40.258  | 107.67 | 484.82          | 5.389      |
| 35 | -1   | -0.9 | 0.3   | 0.022 | 34.054  | 107.23 | 486.80          | 5.676      |
| 36 | -1   | -0.9 | 0.4   | 0.026 | 29.104  | 106.80 | 488.75          | 5.995      |
| 37 | -1   | -0.9 | 0.5   | 0.030 | 25.110  | 106.39 | 490.67          | 6.346      |
| 38 | -1   | -0.9 | 0.6   | 0.034 | 21.853  | 105.98 | 492.56          | 6.729      |
| 39 | -1   | -0.9 | 0.7   | 0.039 | 19.170  | 105.58 | 494.41          | 7.143      |
| 40 | -1   | -0.9 | 0.8   | 0.044 | 16.938  | 105.19 | 496.24          | 7.589      |

## ตารางภาคผนวกที่ ๓-1 (ต่อ)

| No | Tool | Feed | Speed | E     | TL      | Time   | Production rate | Total cost |
|----|------|------|-------|-------|---------|--------|-----------------|------------|
| 41 | -1   | -0.9 | 0.9   | 0.050 | 15.064  | 104.81 | 498.03          | 8.067      |
| 42 | -1   | -0.9 | 1     | 0.056 | 13.477  | 104.44 | 499.80          | 8.577      |
| 43 | -1   | -0.8 | -1    | 0.006 | 135.135 | 113.12 | 461.45          | 4.411      |
| 44 | -1   | -0.8 | -0.9  | 0.005 | 159.109 | 112.52 | 463.90          | 4.316      |
| 45 | -1   | -0.8 | -0.8  | 0.004 | 177.305 | 111.94 | 466.30          | 4.253      |
| 46 | -1   | -0.8 | -0.7  | 0.004 | 182.983 | 111.38 | 468.66          | 4.222      |
| 47 | -1   | -0.8 | -0.6  | 0.004 | 173.611 | 110.83 | 470.98          | 4.222      |
| 48 | -1   | -0.8 | -0.5  | 0.005 | 153.257 | 110.30 | 473.25          | 4.255      |
| 49 | -1   | -0.8 | -0.4  | 0.006 | 128.866 | 109.78 | 475.48          | 4.320      |
| 50 | -1   | -0.8 | -0.3  | 0.007 | 105.652 | 109.28 | 477.67          | 4.416      |
| 51 | -1   | -0.8 | -0.2  | 0.009 | 85.911  | 108.79 | 479.82          | 4.545      |
| 52 | -1   | -0.8 | -0.1  | 0.011 | 70.004  | 108.31 | 481.93          | 4.705      |
| 53 | -1   | -0.8 | 0     | 0.013 | 57.471  | 107.85 | 484.01          | 4.897      |
| 54 | -1   | -0.8 | 0.1   | 0.016 | 47.653  | 107.40 | 486.05          | 5.121      |
| 55 | -1   | -0.8 | 0.2   | 0.019 | 39.936  | 106.96 | 488.05          | 5.377      |
| 56 | -1   | -0.8 | 0.3   | 0.022 | 33.824  | 106.53 | 490.02          | 5.665      |
| 57 | -1   | -0.8 | 0.4   | 0.026 | 28.935  | 106.11 | 491.96          | 5.984      |
| 58 | -1   | -0.8 | 0.5   | 0.030 | 24.984  | 105.70 | 493.86          | 6.336      |
| 59 | -1   | -0.8 | 0.6   | 0.034 | 21.758  | 105.30 | 495.74          | 6.719      |
| 60 | -1   | -0.8 | 0.7   | 0.039 | 19.097  | 104.91 | 497.58          | 7.133      |
| 61 | -1   | -0.8 | 0.8   | 0.044 | 16.880  | 104.53 | 499.39          | 7.580      |

ตารางภาคผนวกที่ ๓-1 (ต่อ)

| No | Tool | Feed | Speed | E     | TL      | Time   | Production rate | Total cost |
|----|------|------|-------|-------|---------|--------|-----------------|------------|
| 62 | -1   | -0.8 | 0.9   | 0.050 | 15.018  | 104.16 | 501.17          | 8.058      |
| 63 | -1   | -0.8 | 1     | 0.056 | 13.441  | 103.79 | 502.92          | 8.568      |
| 64 | -1   | -0.7 | -1    | 0.006 | 131.579 | 112.31 | 464.77          | 4.397      |
| 65 | -1   | -0.7 | -0.9  | 0.005 | 154.202 | 111.73 | 467.21          | 4.302      |
| 66 | -1   | -0.7 | -0.8  | 0.004 | 171.233 | 111.16 | 469.60          | 4.239      |
| 67 | -1   | -0.7 | -0.7  | 0.004 | 176.523 | 110.61 | 471.94          | 4.208      |
| 68 | -1   | -0.7 | -0.6  | 0.004 | 167.785 | 110.07 | 474.24          | 4.209      |
| 69 | -1   | -0.7 | -0.5  | 0.005 | 148.699 | 109.55 | 476.50          | 4.242      |
| 70 | -1   | -0.7 | -0.4  | 0.006 | 125.628 | 109.04 | 478.72          | 4.307      |
| 71 | -1   | -0.7 | -0.3  | 0.007 | 103.466 | 108.55 | 480.89          | 4.404      |
| 72 | -1   | -0.7 | -0.2  | 0.009 | 84.459  | 108.07 | 483.03          | 4.533      |
| 73 | -1   | -0.7 | -0.1  | 0.011 | 69.037  | 107.60 | 485.13          | 4.694      |
| 74 | -1   | -0.7 | 0     | 0.013 | 56.818  | 107.15 | 487.19          | 4.886      |
| 75 | -1   | -0.7 | 0.1   | 0.016 | 47.203  | 106.70 | 489.21          | 5.111      |
| 76 | -1   | -0.7 | 0.2   | 0.019 | 39.620  | 106.27 | 491.20          | 5.367      |
| 77 | -1   | -0.7 | 0.3   | 0.022 | 33.597  | 105.85 | 493.16          | 5.655      |
| 78 | -1   | -0.7 | 0.4   | 0.026 | 28.769  | 105.44 | 495.08          | 5.975      |
| 79 | -1   | -0.7 | 0.5   | 0.030 | 24.860  | 105.04 | 496.97          | 6.326      |
| 80 | -1   | -0.7 | 0.6   | 0.035 | 21.664  | 104.65 | 498.83          | 6.709      |
| 81 | -1   | -0.7 | 0.7   | 0.039 | 19.024  | 104.26 | 500.65          | 7.124      |
| 82 | -1   | -0.7 | 0.8   | 0.045 | 16.824  | 103.89 | 502.45          | 7.571      |

ตารางภาคผนวกที่ ๓-1 (ต่อ)

| No  | Tool | Feed | Speed | E     | TL      | Time   | Production rate | Total cost |
|-----|------|------|-------|-------|---------|--------|-----------------|------------|
| 83  | -1   | -0.7 | 0.9   | 0.050 | 14.973  | 103.53 | 504.22          | 8.050      |
| 84  | -1   | -0.7 | 1     | 0.056 | 13.405  | 103.17 | 505.96          | 8.560      |
| 85  | -1   | -0.6 | -1    | 0.006 | 128.205 | 111.54 | 468.01          | 4.383      |
| 86  | -1   | -0.6 | -0.9  | 0.005 | 149.589 | 110.96 | 470.43          | 4.289      |
| 87  | -1   | -0.6 | -0.8  | 0.005 | 165.563 | 110.40 | 472.81          | 4.226      |
| 88  | -1   | -0.6 | -0.7  | 0.004 | 170.503 | 109.86 | 475.14          | 4.196      |
| 89  | -1   | -0.6 | -0.6  | 0.005 | 162.338 | 109.34 | 477.42          | 4.197      |
| 90  | -1   | -0.6 | -0.5  | 0.005 | 144.404 | 108.83 | 479.67          | 4.231      |
| 91  | -1   | -0.6 | -0.4  | 0.006 | 122.549 | 108.33 | 481.87          | 4.296      |
| 92  | -1   | -0.6 | -0.3  | 0.007 | 101.368 | 107.84 | 484.03          | 4.393      |
| 93  | -1   | -0.6 | -0.2  | 0.009 | 83.056  | 107.37 | 486.15          | 4.522      |
| 94  | -1   | -0.6 | -0.1  | 0.011 | 68.097  | 106.92 | 488.23          | 4.683      |
| 95  | -1   | -0.6 | 0     | 0.013 | 56.180  | 106.47 | 490.28          | 4.876      |
| 96  | -1   | -0.6 | 0.1   | 0.016 | 46.762  | 106.03 | 492.29          | 5.101      |
| 97  | -1   | -0.6 | 0.2   | 0.019 | 39.308  | 105.61 | 494.27          | 5.357      |
| 98  | -1   | -0.6 | 0.3   | 0.022 | 33.372  | 105.20 | 496.21          | 5.646      |
| 99  | -1   | -0.6 | 0.4   | 0.026 | 28.604  | 104.80 | 498.11          | 5.966      |
| 100 | -1   | -0.6 | 0.5   | 0.030 | 24.737  | 104.40 | 499.99          | 6.317      |
| 101 | -1   | -0.6 | 0.6   | 0.035 | 21.570  | 104.02 | 501.83          | 6.701      |
| 102 | -1   | -0.6 | 0.7   | 0.040 | 18.952  | 103.64 | 503.65          | 7.116      |
| 103 | -1   | -0.6 | 0.8   | 0.045 | 16.767  | 103.28 | 505.43          | 7.563      |

## ตารางภาคผนวกที่ ๓-1 (ต่อ)

| No  | Tool | Feed | Speed | E     | TL      | Time   | Production rate | Total cost |
|-----|------|------|-------|-------|---------|--------|-----------------|------------|
| 104 | -1   | -0.6 | 0.9   | 0.050 | 14.929  | 102.92 | 507.18          | 8.042      |
| 105 | -1   | -0.6 | 1     | 0.056 | 13.369  | 102.57 | 508.91          | 8.553      |
| 106 | -1   | -0.5 | -1    | 0.006 | 125.000 | 110.79 | 471.17          | 4.371      |
| 107 | -1   | -0.5 | -0.9  | 0.005 | 145.243 | 110.22 | 473.58          | 4.276      |
| 108 | -1   | -0.5 | -0.8  | 0.005 | 160.256 | 109.68 | 475.94          | 4.214      |
| 109 | -1   | -0.5 | -0.7  | 0.005 | 164.880 | 109.15 | 478.25          | 4.184      |
| 110 | -1   | -0.5 | -0.6  | 0.005 | 157.233 | 108.63 | 480.52          | 4.186      |
| 111 | -1   | -0.5 | -0.5  | 0.005 | 140.351 | 108.13 | 482.75          | 4.220      |
| 112 | -1   | -0.5 | -0.4  | 0.006 | 119.617 | 107.64 | 484.94          | 4.286      |
| 113 | -1   | -0.5 | -0.3  | 0.008 | 99.354  | 107.17 | 487.08          | 4.383      |
| 114 | -1   | -0.5 | -0.2  | 0.009 | 81.699  | 106.71 | 489.19          | 4.513      |
| 115 | -1   | -0.5 | -0.1  | 0.011 | 67.182  | 106.26 | 491.26          | 4.674      |
| 116 | -1   | -0.5 | 0     | 0.014 | 55.556  | 105.82 | 493.29          | 4.867      |
| 117 | -1   | -0.5 | 0.1   | 0.016 | 46.328  | 105.39 | 495.29          | 5.092      |
| 118 | -1   | -0.5 | 0.2   | 0.019 | 39.002  | 104.98 | 497.25          | 5.349      |
| 119 | -1   | -0.5 | 0.3   | 0.023 | 33.151  | 104.57 | 499.17          | 5.637      |
| 120 | -1   | -0.5 | 0.4   | 0.026 | 28.441  | 104.18 | 501.07          | 5.958      |
| 121 | -1   | -0.5 | 0.5   | 0.030 | 24.615  | 103.79 | 502.93          | 6.310      |
| 122 | -1   | -0.5 | 0.6   | 0.035 | 21.478  | 103.42 | 504.76          | 6.694      |
| 123 | -1   | -0.5 | 0.7   | 0.040 | 18.880  | 103.05 | 506.56          | 7.109      |
| 124 | -1   | -0.5 | 0.8   | 0.045 | 16.711  | 102.69 | 508.32          | 7.556      |

ตารางภาคผนวกที่ ๓-1 (ต่อ)

| No  | Tool | Feed | Speed | E     | TL      | Time   | Production rate | Total cost |
|-----|------|------|-------|-------|---------|--------|-----------------|------------|
| 125 | -1   | -0.5 | 0.9   | 0.050 | 14.884  | 102.34 | 510.06          | 8.035      |
| 126 | -1   | -0.5 | 1     | 0.056 | 13.333  | 102.00 | 511.77          | 8.546      |
| 127 | -1   | -0.4 | -1    | 0.006 | 121.951 | 110.07 | 474.25          | 4.359      |
| 128 | -1   | -0.4 | -0.9  | 0.005 | 141.143 | 109.52 | 476.64          | 4.265      |
| 129 | -1   | -0.4 | -0.8  | 0.005 | 155.280 | 108.98 | 478.99          | 4.204      |
| 130 | -1   | -0.4 | -0.7  | 0.005 | 159.617 | 108.46 | 481.29          | 4.174      |
| 131 | -1   | -0.4 | -0.6  | 0.005 | 152.439 | 107.95 | 483.54          | 4.176      |
| 132 | -1   | -0.4 | -0.5  | 0.005 | 136.519 | 107.46 | 485.76          | 4.210      |
| 133 | -1   | -0.4 | -0.4  | 0.006 | 116.822 | 106.98 | 487.93          | 4.276      |
| 134 | -1   | -0.4 | -0.3  | 0.008 | 97.418  | 106.52 | 490.06          | 4.374      |
| 135 | -1   | -0.4 | -0.2  | 0.009 | 80.386  | 106.06 | 492.15          | 4.504      |
| 136 | -1   | -0.4 | -0.1  | 0.011 | 66.291  | 105.62 | 494.21          | 4.665      |
| 137 | -1   | -0.4 | 0     | 0.014 | 54.945  | 105.19 | 496.22          | 4.859      |
| 138 | -1   | -0.4 | 0.1   | 0.016 | 45.903  | 104.78 | 498.21          | 5.084      |
| 139 | -1   | -0.4 | 0.2   | 0.019 | 38.700  | 104.37 | 500.15          | 5.341      |
| 140 | -1   | -0.4 | 0.3   | 0.023 | 32.933  | 103.97 | 502.06          | 5.630      |
| 141 | -1   | -0.4 | 0.4   | 0.027 | 28.281  | 103.58 | 503.94          | 5.950      |
| 142 | -1   | -0.4 | 0.5   | 0.031 | 24.495  | 103.20 | 505.79          | 6.303      |
| 143 | -1   | -0.4 | 0.6   | 0.035 | 21.386  | 102.84 | 507.60          | 6.687      |
| 144 | -1   | -0.4 | 0.7   | 0.040 | 18.809  | 102.48 | 509.39          | 7.103      |
| 145 | -1   | -0.4 | 0.8   | 0.045 | 16.656  | 102.12 | 511.14          | 7.550      |

## ตารางภาคผนวกที่ ๓-1 (ต่อ)

| No  | Tool | Feed | Speed | E     | TL      | Time   | Production rate | Total cost |
|-----|------|------|-------|-------|---------|--------|-----------------|------------|
| 146 | -1   | -0.4 | 0.9   | 0.051 | 14.840  | 101.78 | 512.87          | 8.029      |
| 147 | -1   | -0.4 | 1     | 0.056 | 13.298  | 101.45 | 514.56          | 8.540      |
| 148 | -1   | -0.3 | -1    | 0.006 | 119.048 | 109.38 | 477.25          | 4.348      |
| 149 | -1   | -0.3 | -0.9  | 0.005 | 137.268 | 108.83 | 479.63          | 4.255      |
| 150 | -1   | -0.3 | -0.8  | 0.005 | 150.602 | 108.31 | 481.96          | 4.194      |
| 151 | -1   | -0.3 | -0.7  | 0.005 | 154.679 | 107.80 | 484.25          | 4.164      |
| 152 | -1   | -0.3 | -0.6  | 0.005 | 147.929 | 107.30 | 486.49          | 4.167      |
| 153 | -1   | -0.3 | -0.5  | 0.006 | 132.890 | 106.82 | 488.69          | 4.201      |
| 154 | -1   | -0.3 | -0.4  | 0.007 | 114.155 | 106.35 | 490.84          | 4.268      |
| 155 | -1   | -0.3 | -0.3  | 0.008 | 95.557  | 105.89 | 492.96          | 4.366      |
| 156 | -1   | -0.3 | -0.2  | 0.009 | 79.114  | 105.45 | 495.04          | 4.496      |
| 157 | -1   | -0.3 | -0.1  | 0.011 | 65.424  | 105.01 | 497.08          | 4.658      |
| 158 | -1   | -0.3 | 0     | 0.014 | 54.348  | 104.59 | 499.08          | 4.851      |
| 159 | -1   | -0.3 | 0.1   | 0.016 | 45.486  | 104.18 | 501.05          | 5.077      |
| 160 | -1   | -0.3 | 0.2   | 0.020 | 38.402  | 103.78 | 502.98          | 5.334      |
| 161 | -1   | -0.3 | 0.3   | 0.023 | 32.717  | 103.39 | 504.88          | 5.623      |
| 162 | -1   | -0.3 | 0.4   | 0.027 | 28.121  | 103.01 | 506.74          | 5.944      |
| 163 | -1   | -0.3 | 0.5   | 0.031 | 24.375  | 102.64 | 508.58          | 6.297      |
| 164 | -1   | -0.3 | 0.6   | 0.035 | 21.295  | 102.28 | 510.38          | 6.681      |
| 165 | -1   | -0.3 | 0.7   | 0.040 | 18.739  | 101.92 | 512.15          | 7.097      |
| 166 | -1   | -0.3 | 0.8   | 0.045 | 16.600  | 101.58 | 513.89          | 7.545      |

## ตารางภาคผนวกที่ ๓-1 (ต่อ)

| No  | Tool | Feed | Speed | E     | TL      | Time   | Production rate | Total cost |
|-----|------|------|-------|-------|---------|--------|-----------------|------------|
| 167 | -1   | -0.3 | 0.9   | 0.051 | 14.796  | 101.24 | 515.60          | 8.024      |
| 168 | -1   | -0.3 | 1     | 0.057 | 13.263  | 100.91 | 517.28          | 8.535      |
| 169 | -1   | -0.2 | -1    | 0.006 | 116.279 | 108.71 | 480.18          | 4.339      |
| 170 | -1   | -0.2 | -0.9  | 0.006 | 133.601 | 108.18 | 482.54          | 4.246      |
| 171 | -1   | -0.2 | -0.8  | 0.005 | 146.199 | 107.66 | 484.86          | 4.185      |
| 172 | -1   | -0.2 | -0.7  | 0.005 | 150.038 | 107.16 | 487.13          | 4.156      |
| 173 | -1   | -0.2 | -0.6  | 0.005 | 143.678 | 106.67 | 489.36          | 4.158      |
| 174 | -1   | -0.2 | -0.5  | 0.006 | 129.450 | 106.20 | 491.54          | 4.193      |
| 175 | -1   | -0.2 | -0.4  | 0.007 | 111.607 | 105.74 | 493.68          | 4.260      |
| 176 | -1   | -0.2 | -0.3  | 0.008 | 93.765  | 105.29 | 495.79          | 4.358      |
| 177 | -1   | -0.2 | -0.2  | 0.010 | 77.882  | 104.85 | 497.85          | 4.489      |
| 178 | -1   | -0.2 | -0.1  | 0.012 | 64.579  | 104.43 | 499.88          | 4.651      |
| 179 | -1   | -0.2 | 0     | 0.014 | 53.763  | 104.01 | 501.87          | 4.845      |
| 180 | -1   | -0.2 | 0.1   | 0.017 | 45.076  | 103.61 | 503.82          | 5.070      |
| 181 | -1   | -0.2 | 0.2   | 0.020 | 38.110  | 103.22 | 505.74          | 5.328      |
| 182 | -1   | -0.2 | 0.3   | 0.023 | 32.504  | 102.83 | 507.62          | 5.617      |
| 183 | -1   | -0.2 | 0.4   | 0.027 | 27.964  | 102.46 | 509.47          | 5.938      |
| 184 | -1   | -0.2 | 0.5   | 0.031 | 24.257  | 102.09 | 511.29          | 6.291      |
| 185 | -1   | -0.2 | 0.6   | 0.035 | 21.204  | 101.74 | 513.08          | 6.676      |
| 186 | -1   | -0.2 | 0.7   | 0.040 | 18.669  | 101.39 | 514.83          | 7.092      |
| 187 | -1   | -0.2 | 0.8   | 0.045 | 16.545  | 101.05 | 516.56          | 7.540      |



## ตารางภาคผนวกที่ ๓-1 (ต่อ)

| No  | Tool | Feed | Speed | E     | TL      | Time   | Production rate | Total cost |
|-----|------|------|-------|-------|---------|--------|-----------------|------------|
| 188 | -1   | -0.2 | 0.9   | 0.051 | 14.753  | 100.72 | 518.26          | 8.019      |
| 189 | -1   | -0.2 | 1     | 0.057 | 13.228  | 100.40 | 519.93          | 8.531      |
| 190 | -1   | -0.1 | -1    | 0.007 | 113.636 | 108.07 | 483.04          | 4.330      |
| 191 | -1   | -0.1 | -0.9  | 0.006 | 130.124 | 107.54 | 485.39          | 4.237      |
| 192 | -1   | -0.1 | -0.8  | 0.005 | 142.045 | 107.04 | 487.69          | 4.176      |
| 193 | -1   | -0.1 | -0.7  | 0.005 | 145.666 | 106.54 | 489.95          | 4.148      |
| 194 | -1   | -0.1 | -0.6  | 0.005 | 139.665 | 106.06 | 492.16          | 4.151      |
| 195 | -1   | -0.1 | -0.5  | 0.006 | 126.183 | 105.60 | 494.33          | 4.186      |
| 196 | -1   | -0.1 | -0.4  | 0.007 | 109.170 | 105.15 | 496.46          | 4.253      |
| 197 | -1   | -0.1 | -0.3  | 0.008 | 92.039  | 104.70 | 498.54          | 4.351      |
| 198 | -1   | -0.1 | -0.2  | 0.010 | 76.687  | 104.28 | 500.59          | 4.482      |
| 199 | -1   | -0.1 | -0.1  | 0.012 | 63.755  | 103.86 | 502.61          | 4.644      |
| 200 | -1   | -0.1 | 0     | 0.014 | 53.191  | 103.45 | 504.58          | 4.839      |
| 201 | -1   | -0.1 | 0.1   | 0.017 | 44.673  | 103.06 | 506.52          | 5.065      |
| 202 | -1   | -0.1 | 0.2   | 0.020 | 37.821  | 102.67 | 508.42          | 5.322      |
| 203 | -1   | -0.1 | 0.3   | 0.023 | 32.295  | 102.29 | 510.29          | 5.612      |
| 204 | -1   | -0.1 | 0.4   | 0.027 | 27.809  | 101.93 | 512.13          | 5.933      |
| 205 | -1   | -0.1 | 0.5   | 0.031 | 24.140  | 101.57 | 513.93          | 6.286      |
| 206 | -1   | -0.1 | 0.6   | 0.036 | 21.115  | 101.22 | 515.71          | 6.671      |
| 207 | -1   | -0.1 | 0.7   | 0.040 | 18.599  | 100.88 | 517.45          | 7.087      |
| 208 | -1   | -0.1 | 0.8   | 0.045 | 16.491  | 100.55 | 519.16          | 7.536      |

## ตารางภาคผนวกที่ ๓-1 (ต่อ)

| No  | Tool | Feed | Speed | E     | TL      | Time   | Production rate | Total cost |
|-----|------|------|-------|-------|---------|--------|-----------------|------------|
| 209 | -1   | -0.1 | 0.9   | 0.051 | 14.709  | 100.22 | 520.85          | 8.015      |
| 210 | -1   | -0.1 | 1     | 0.057 | 13.193  | 99.90  | 522.50          | 8.527      |
| 211 | -1   | 0    | -1    | 0.007 | 111.111 | 107.44 | 485.83          | 4.322      |
| 212 | -1   | 0    | -0.9  | 0.006 | 126.823 | 106.93 | 488.17          | 4.229      |
| 213 | -1   | 0    | -0.8  | 0.005 | 138.122 | 106.43 | 490.45          | 4.169      |
| 214 | -1   | 0    | -0.7  | 0.005 | 141.543 | 105.95 | 492.69          | 4.140      |
| 215 | -1   | 0    | -0.6  | 0.006 | 135.870 | 105.48 | 494.89          | 4.144      |
| 216 | -1   | 0    | -0.5  | 0.006 | 123.077 | 105.02 | 497.05          | 4.179      |
| 217 | -1   | 0    | -0.4  | 0.007 | 106.838 | 104.58 | 499.16          | 4.246      |
| 218 | -1   | 0    | -0.3  | 0.008 | 90.375  | 104.14 | 501.23          | 4.345      |
| 219 | -1   | 0    | -0.2  | 0.010 | 75.529  | 103.72 | 503.27          | 4.476      |
| 220 | -1   | 0    | -0.1  | 0.012 | 62.952  | 103.31 | 505.27          | 4.639      |
| 221 | -1   | 0    | 0     | 0.014 | 52.632  | 102.91 | 507.23          | 4.833      |
| 222 | -1   | 0    | 0.1   | 0.017 | 44.277  | 102.52 | 509.15          | 5.060      |
| 223 | -1   | 0    | 0.2   | 0.020 | 37.538  | 102.14 | 511.04          | 5.318      |
| 224 | -1   | 0    | 0.3   | 0.023 | 32.087  | 101.77 | 512.90          | 5.607      |
| 225 | -1   | 0    | 0.4   | 0.027 | 27.655  | 101.41 | 514.72          | 5.929      |
| 226 | -1   | 0    | 0.5   | 0.031 | 24.024  | 101.06 | 516.51          | 6.282      |
| 227 | -1   | 0    | 0.6   | 0.036 | 21.026  | 100.72 | 518.27          | 6.667      |
| 228 | -1   | 0    | 0.7   | 0.040 | 18.531  | 100.38 | 520.00          | 7.084      |
| 229 | -1   | 0    | 0.8   | 0.046 | 16.437  | 100.06 | 521.70          | 7.532      |

## ตารางภาคผนวกที่ ๓-1 (ต่อ)

| No  | Tool | Feed | Speed | E     | TL      | Time   | Production rate | Total cost |
|-----|------|------|-------|-------|---------|--------|-----------------|------------|
| 230 | -1   | 0    | 0.9   | 0.051 | 14.666  | 99.74  | 523.37          | 8.012      |
| 231 | -1   | 0    | 1     | 0.057 | 13.158  | 99.43  | 525.01          | 8.524      |
| 232 | -1   | 0.1  | -1    | 0.007 | 108.696 | 106.84 | 488.56          | 4.314      |
| 233 | -1   | 0.1  | -0.9  | 0.006 | 123.686 | 106.34 | 490.88          | 4.222      |
| 234 | -1   | 0.1  | -0.8  | 0.006 | 134.409 | 105.85 | 493.15          | 4.162      |
| 235 | -1   | 0.1  | -0.7  | 0.005 | 137.646 | 105.37 | 495.38          | 4.134      |
| 236 | -1   | 0.1  | -0.6  | 0.006 | 132.275 | 104.91 | 497.56          | 4.138      |
| 237 | -1   | 0.1  | -0.5  | 0.006 | 120.120 | 104.46 | 499.70          | 4.173      |
| 238 | -1   | 0.1  | -0.4  | 0.007 | 104.603 | 104.03 | 501.80          | 4.241      |
| 239 | -1   | 0.1  | -0.3  | 0.008 | 88.771  | 103.60 | 503.86          | 4.340      |
| 240 | -1   | 0.1  | -0.2  | 0.010 | 74.405  | 103.19 | 505.88          | 4.471      |
| 241 | -1   | 0.1  | -0.1  | 0.012 | 62.170  | 102.78 | 507.86          | 4.634      |
| 242 | -1   | 0.1  | 0     | 0.014 | 52.083  | 102.39 | 509.81          | 4.829      |
| 243 | -1   | 0.1  | 0.1   | 0.017 | 43.889  | 102.01 | 511.72          | 5.055      |
| 244 | -1   | 0.1  | 0.2   | 0.020 | 37.258  | 101.64 | 513.60          | 5.313      |
| 245 | -1   | 0.1  | 0.3   | 0.024 | 31.883  | 101.27 | 515.44          | 5.603      |
| 246 | -1   | 0.1  | 0.4   | 0.027 | 27.503  | 100.92 | 517.25          | 5.925      |
| 247 | -1   | 0.1  | 0.5   | 0.031 | 23.909  | 100.57 | 519.02          | 6.279      |
| 248 | -1   | 0.1  | 0.6   | 0.036 | 20.938  | 100.24 | 520.77          | 6.664      |
| 249 | -1   | 0.1  | 0.7   | 0.041 | 18.462  | 99.91  | 522.49          | 7.081      |
| 250 | -1   | 0.1  | 0.8   | 0.046 | 16.383  | 99.59  | 524.17          | 7.529      |

## ตารางภาคผนวกที่ ๓-1 (ต่อ)

| No  | Tool | Feed | Speed | E     | TL      | Time   | Production rate | Total cost |
|-----|------|------|-------|-------|---------|--------|-----------------|------------|
| 251 | -1   | 0.1  | 0.9   | 0.051 | 14.623  | 99.27  | 525.83          | 8.009      |
| 252 | -1   | 0.1  | 1     | 0.057 | 13.123  | 98.97  | 527.46          | 8.521      |
| 253 | -1   | 0.2  | -1    | 0.007 | 106.383 | 106.27 | 491.22          | 4.308      |
| 254 | -1   | 0.2  | -0.9  | 0.006 | 120.700 | 105.77 | 493.52          | 4.216      |
| 255 | -1   | 0.2  | -0.8  | 0.006 | 130.890 | 105.29 | 495.78          | 4.156      |
| 256 | -1   | 0.2  | -0.7  | 0.006 | 133.958 | 104.82 | 497.99          | 4.128      |
| 257 | -1   | 0.2  | -0.6  | 0.006 | 128.866 | 104.37 | 500.16          | 4.132      |
| 258 | -1   | 0.2  | -0.5  | 0.006 | 117.302 | 103.92 | 502.29          | 4.168      |
| 259 | -1   | 0.2  | -0.4  | 0.007 | 102.459 | 103.49 | 504.38          | 4.236      |
| 260 | -1   | 0.2  | -0.3  | 0.009 | 87.222  | 103.08 | 506.42          | 4.335      |
| 261 | -1   | 0.2  | -0.2  | 0.010 | 73.314  | 102.67 | 508.43          | 4.467      |
| 262 | -1   | 0.2  | -0.1  | 0.012 | 61.406  | 102.27 | 510.40          | 4.630      |
| 263 | -1   | 0.2  | 0     | 0.015 | 51.546  | 101.89 | 512.33          | 4.825      |
| 264 | -1   | 0.2  | 0.1   | 0.017 | 43.507  | 101.51 | 514.23          | 5.051      |
| 265 | -1   | 0.2  | 0.2   | 0.020 | 36.982  | 101.15 | 516.09          | 5.310      |
| 266 | -1   | 0.2  | 0.3   | 0.024 | 31.681  | 100.79 | 517.92          | 5.600      |
| 267 | -1   | 0.2  | 0.4   | 0.027 | 27.352  | 100.44 | 519.71          | 5.922      |
| 268 | -1   | 0.2  | 0.5   | 0.032 | 23.795  | 100.10 | 521.48          | 6.276      |
| 269 | -1   | 0.2  | 0.6   | 0.036 | 20.851  | 99.77  | 523.21          | 6.661      |
| 270 | -1   | 0.2  | 0.7   | 0.041 | 18.394  | 99.45  | 524.91          | 7.078      |

## ตารางภาคผนวกที่ ๓-1 (ต่อ)

| No  | Tool | Feed | Speed | E     | TL      | Time   | Production rate | Total cost |
|-----|------|------|-------|-------|---------|--------|-----------------|------------|
| 271 | -1   | 0.2  | 0.8   | 0.046 | 16.329  | 99.13  | 526.58          | 7.527      |
| 272 | -1   | 0.2  | 0.9   | 0.051 | 14.580  | 98.82  | 528.23          | 8.007      |
| 273 | -1   | 0.2  | 1     | 0.057 | 13.089  | 98.52  | 529.84          | 8.519      |
| 274 | -1   | 0.3  | -1    | 0.007 | 104.167 | 105.71 | 493.82          | 4.302      |
| 275 | -1   | 0.3  | -0.9  | 0.006 | 117.855 | 105.22 | 496.11          | 4.210      |
| 276 | -1   | 0.3  | -0.8  | 0.006 | 127.551 | 104.74 | 498.35          | 4.151      |
| 277 | -1   | 0.3  | -0.7  | 0.006 | 130.463 | 104.28 | 500.55          | 4.123      |
| 278 | -1   | 0.3  | -0.6  | 0.006 | 125.628 | 103.84 | 502.71          | 4.127      |
| 279 | -1   | 0.3  | -0.5  | 0.007 | 114.613 | 103.40 | 504.82          | 4.163      |
| 280 | -1   | 0.3  | -0.4  | 0.007 | 100.402 | 102.98 | 506.89          | 4.231      |
| 281 | -1   | 0.3  | -0.3  | 0.009 | 85.727  | 102.57 | 508.92          | 4.331      |
| 282 | -1   | 0.3  | -0.2  | 0.010 | 72.254  | 102.17 | 510.91          | 4.463      |
| 283 | -1   | 0.3  | -0.1  | 0.012 | 60.661  | 101.78 | 512.87          | 4.626      |
| 284 | -1   | 0.3  | 0     | 0.015 | 51.020  | 101.40 | 514.79          | 4.821      |
| 285 | -1   | 0.3  | 0.1   | 0.017 | 43.131  | 101.03 | 516.67          | 5.048      |
| 286 | -1   | 0.3  | 0.2   | 0.020 | 36.711  | 100.67 | 518.52          | 5.307      |
| 287 | -1   | 0.3  | 0.3   | 0.024 | 31.481  | 100.32 | 520.33          | 5.597      |
| 288 | -1   | 0.3  | 0.4   | 0.028 | 27.203  | 99.98  | 522.12          | 5.919      |
| 289 | -1   | 0.3  | 0.5   | 0.032 | 23.683  | 99.64  | 523.87          | 6.273      |
| 290 | -1   | 0.3  | 0.6   | 0.036 | 20.764  | 99.32  | 525.59          | 6.659      |
| 291 | -1   | 0.3  | 0.7   | 0.041 | 18.327  | 99.00  | 527.27          | 7.076      |

## ตารางภาคผนวกที่ น-1 (ต่อ)

| No  | Tool | Feed | Speed | E     | TL      | Time   | Production rate | Total cost |
|-----|------|------|-------|-------|---------|--------|-----------------|------------|
| 292 | -1   | 0.3  | 0.8   | 0.046 | 16.276  | 98.69  | 528.93          | 7.525      |
| 293 | -1   | 0.3  | 0.9   | 0.052 | 14.538  | 98.39  | 530.57          | 8.005      |
| 294 | -1   | 0.3  | 1     | 0.057 | 13.055  | 98.09  | 532.17          | 8.518      |
| 295 | -1   | 0.4  | -1    | 0.007 | 102.041 | 105.16 | 496.36          | 4.296      |
| 296 | -1   | 0.4  | -0.9  | 0.007 | 115.141 | 104.68 | 498.64          | 4.205      |
| 297 | -1   | 0.4  | -0.8  | 0.006 | 124.378 | 104.22 | 500.87          | 4.146      |
| 298 | -1   | 0.4  | -0.7  | 0.006 | 127.146 | 103.77 | 503.05          | 4.118      |
| 299 | -1   | 0.4  | -0.6  | 0.006 | 122.549 | 103.33 | 505.19          | 4.123      |
| 300 | -1   | 0.4  | -0.5  | 0.007 | 112.045 | 102.90 | 507.29          | 4.159      |
| 301 | -1   | 0.4  | -0.4  | 0.008 | 98.425  | 102.48 | 509.35          | 4.227      |
| 302 | -1   | 0.4  | -0.3  | 0.009 | 84.282  | 102.08 | 511.36          | 4.327      |
| 303 | -1   | 0.4  | -0.2  | 0.011 | 71.225  | 101.69 | 513.34          | 4.459      |
| 304 | -1   | 0.4  | -0.1  | 0.013 | 59.934  | 101.30 | 515.28          | 4.623      |
| 305 | -1   | 0.4  | 0     | 0.015 | 50.505  | 100.93 | 517.19          | 4.818      |
| 306 | -1   | 0.4  | 0.1   | 0.018 | 42.762  | 100.57 | 519.06          | 5.045      |
| 307 | -1   | 0.4  | 0.2   | 0.021 | 36.443  | 100.21 | 520.89          | 5.304      |
| 308 | -1   | 0.4  | 0.3   | 0.024 | 31.284  | 99.87  | 522.69          | 5.595      |
| 309 | -1   | 0.4  | 0.4   | 0.028 | 27.056  | 99.53  | 524.46          | 5.917      |
| 310 | -1   | 0.4  | 0.5   | 0.032 | 23.571  | 99.20  | 526.20          | 6.271      |
| 311 | -1   | 0.4  | 0.6   | 0.036 | 20.678  | 98.88  | 527.91          | 6.657      |
| 312 | -1   | 0.4  | 0.7   | 0.041 | 18.260  | 98.57  | 529.58          | 7.074      |

## ตารางภาคผนวกที่ ๓-1 (ต่อ)

| No  | Tool | Feed | Speed | E     | TL      | Time   | Production rate | Total cost |
|-----|------|------|-------|-------|---------|--------|-----------------|------------|
| 313 | -1   | 0.4  | 0.8   | 0.046 | 16.223  | 98.26  | 531.23          | 7.523      |
| 314 | -1   | 0.4  | 0.9   | 0.052 | 14.496  | 97.96  | 532.85          | 8.004      |
| 315 | -1   | 0.4  | 1     | 0.058 | 13.021  | 97.67  | 534.44          | 8.517      |
| 316 | -1   | 0.5  | -1    | 0.008 | 100.000 | 104.64 | 498.85          | 4.291      |
| 317 | -1   | 0.5  | -0.9  | 0.007 | 112.549 | 104.17 | 501.11          | 4.201      |
| 318 | -1   | 0.5  | -0.8  | 0.006 | 121.359 | 103.71 | 503.32          | 4.142      |
| 319 | -1   | 0.5  | -0.7  | 0.006 | 123.993 | 103.27 | 505.49          | 4.114      |
| 320 | -1   | 0.5  | -0.6  | 0.006 | 119.617 | 102.83 | 507.62          | 4.119      |
| 321 | -1   | 0.5  | -0.5  | 0.007 | 109.589 | 102.41 | 509.70          | 4.156      |
| 322 | -1   | 0.5  | -0.4  | 0.008 | 96.525  | 102.00 | 511.75          | 4.224      |
| 323 | -1   | 0.5  | -0.3  | 0.009 | 82.884  | 101.61 | 513.75          | 4.324      |
| 324 | -1   | 0.5  | -0.2  | 0.011 | 70.225  | 101.22 | 515.72          | 4.456      |
| 325 | -1   | 0.5  | -0.1  | 0.013 | 59.224  | 100.84 | 517.64          | 4.620      |
| 326 | -1   | 0.5  | 0     | 0.015 | 50.000  | 100.47 | 519.53          | 4.816      |
| 327 | -1   | 0.5  | 0.1   | 0.018 | 42.400  | 100.12 | 521.39          | 5.043      |
| 328 | -1   | 0.5  | 0.2   | 0.021 | 36.179  | 99.77  | 523.21          | 5.302      |
| 329 | -1   | 0.5  | 0.3   | 0.024 | 31.090  | 99.43  | 525.00          | 5.593      |
| 330 | -1   | 0.5  | 0.4   | 0.028 | 26.911  | 99.10  | 526.76          | 5.916      |
| 331 | -1   | 0.5  | 0.5   | 0.032 | 23.460  | 98.77  | 528.48          | 6.270      |
| 332 | -1   | 0.5  | 0.6   | 0.036 | 20.593  | 98.46  | 530.17          | 6.656      |
| 333 | -1   | 0.5  | 0.7   | 0.041 | 18.193  | 98.15  | 531.84          | 7.073      |

## ตารางภาคผนวกที่ ๓-1 (ต่อ)

| No  | Tool | Feed | Speed | E     | TL      | Time   | Production rate | Total cost |
|-----|------|------|-------|-------|---------|--------|-----------------|------------|
| 334 | -1   | 0.5  | 0.8   | 0.046 | 16.171  | 97.85  | 533.47          | 7.522      |
| 335 | -1   | 0.5  | 0.9   | 0.052 | 14.454  | 97.56  | 535.07          | 8.003      |
| 336 | -1   | 0.5  | 1     | 0.058 | 12.987  | 97.27  | 536.65          | 8.516      |
| 337 | -1   | 0.6  | -1    | 0.008 | 98.039  | 104.13 | 501.28          | 4.287      |
| 338 | -1   | 0.6  | -0.9  | 0.007 | 110.072 | 103.67 | 503.53          | 4.197      |
| 339 | -1   | 0.6  | -0.8  | 0.006 | 118.483 | 103.22 | 505.73          | 4.138      |
| 340 | -1   | 0.6  | -0.7  | 0.006 | 120.992 | 102.78 | 507.88          | 4.111      |
| 341 | -1   | 0.6  | -0.6  | 0.006 | 116.822 | 102.35 | 509.99          | 4.116      |
| 342 | -1   | 0.6  | -0.5  | 0.007 | 107.239 | 101.94 | 512.06          | 4.153      |
| 343 | -1   | 0.6  | -0.4  | 0.008 | 94.697  | 101.54 | 514.09          | 4.221      |
| 344 | -1   | 0.6  | -0.3  | 0.009 | 81.533  | 101.15 | 516.08          | 4.322      |
| 345 | -1   | 0.6  | -0.2  | 0.011 | 69.252  | 100.77 | 518.03          | 4.454      |
| 346 | -1   | 0.6  | -0.1  | 0.013 | 58.531  | 100.39 | 519.95          | 4.618      |
| 347 | -1   | 0.6  | 0     | 0.015 | 49.505  | 100.03 | 521.83          | 4.814      |
| 348 | -1   | 0.6  | 0.1   | 0.018 | 42.043  | 99.68  | 523.67          | 5.041      |
| 349 | -1   | 0.6  | 0.2   | 0.021 | 35.920  | 99.34  | 525.48          | 5.301      |
| 350 | -1   | 0.6  | 0.3   | 0.024 | 30.898  | 99.00  | 527.25          | 5.592      |
| 351 | -1   | 0.6  | 0.4   | 0.028 | 26.767  | 98.68  | 528.99          | 5.914      |
| 352 | -1   | 0.6  | 0.5   | 0.032 | 23.351  | 98.36  | 530.70          | 6.269      |
| 353 | -1   | 0.6  | 0.6   | 0.037 | 20.509  | 98.05  | 532.38          | 6.655      |
| 354 | -1   | 0.6  | 0.7   | 0.041 | 18.127  | 97.75  | 534.03          | 7.073      |



## ตารางภาคผนวกที่ ๓-1 (ต่อ)

| No  | Tool | Feed | Speed | E     | TL      | Time   | Production rate | Total cost |
|-----|------|------|-------|-------|---------|--------|-----------------|------------|
| 355 | -1   | 0.6  | 0.8   | 0.047 | 16.119  | 97.45  | 535.66          | 7.522      |
| 356 | -1   | 0.6  | 0.9   | 0.052 | 14.412  | 97.16  | 537.25          | 8.003      |
| 357 | -1   | 0.6  | 1     | 0.058 | 12.953  | 96.88  | 538.81          | 8.516      |
| 358 | -1   | 0.7  | -1    | 0.008 | 96.154  | 103.64 | 503.66          | 4.284      |
| 359 | -1   | 0.7  | -0.9  | 0.007 | 107.701 | 103.18 | 505.89          | 4.193      |
| 360 | -1   | 0.7  | -0.8  | 0.006 | 115.741 | 102.74 | 508.08          | 4.135      |
| 361 | -1   | 0.7  | -0.7  | 0.006 | 118.133 | 102.31 | 510.22          | 4.108      |
| 362 | -1   | 0.7  | -0.6  | 0.007 | 114.155 | 101.89 | 512.31          | 4.113      |
| 363 | -1   | 0.7  | -0.5  | 0.007 | 104.987 | 101.48 | 514.37          | 4.150      |
| 364 | -1   | 0.7  | -0.4  | 0.008 | 92.937  | 101.09 | 516.39          | 4.219      |
| 365 | -1   | 0.7  | -0.3  | 0.009 | 80.225  | 100.70 | 518.36          | 4.320      |
| 366 | -1   | 0.7  | -0.2  | 0.011 | 68.306  | 100.33 | 520.30          | 4.452      |
| 367 | -1   | 0.7  | -0.1  | 0.013 | 57.854  | 99.96  | 522.20          | 4.617      |
| 368 | -1   | 0.7  | 0     | 0.015 | 49.020  | 99.61  | 524.06          | 4.813      |
| 369 | -1   | 0.7  | 0.1   | 0.018 | 41.693  | 99.26  | 525.89          | 5.040      |
| 370 | -1   | 0.7  | 0.2   | 0.021 | 35.663  | 98.92  | 527.69          | 5.300      |
| 371 | -1   | 0.7  | 0.3   | 0.024 | 30.708  | 98.59  | 529.45          | 5.591      |
| 372 | -1   | 0.7  | 0.4   | 0.028 | 26.624  | 98.27  | 531.18          | 5.914      |
| 373 | -1   | 0.7  | 0.5   | 0.032 | 23.242  | 97.96  | 532.88          | 6.268      |
| 374 | -1   | 0.7  | 0.6   | 0.037 | 20.425  | 97.65  | 534.54          | 6.654      |
| 375 | -1   | 0.7  | 0.7   | 0.042 | 18.062  | 97.35  | 536.18          | 7.072      |

## ตารางภาคผนวกที่ ๓-1 (ต่อ)

| No  | Tool | Feed | Speed | E     | TL      | Time   | Production rate | Total cost |
|-----|------|------|-------|-------|---------|--------|-----------------|------------|
| 376 | -1   | 0.7  | 0.8   | 0.047 | 16.067  | 97.06  | 537.79          | 7.522      |
| 377 | -1   | 0.7  | 0.9   | 0.052 | 14.371  | 96.78  | 539.37          | 8.003      |
| 378 | -1   | 0.7  | 1     | 0.058 | 12.920  | 96.50  | 540.92          | 8.516      |
| 379 | -1   | 0.8  | -1    | 0.008 | 94.340  | 103.17 | 505.98          | 4.280      |
| 380 | -1   | 0.8  | -0.9  | 0.007 | 105.430 | 102.72 | 508.20          | 4.190      |
| 381 | -1   | 0.8  | -0.8  | 0.007 | 113.122 | 102.28 | 510.37          | 4.132      |
| 382 | -1   | 0.8  | -0.7  | 0.006 | 115.407 | 101.85 | 512.50          | 4.106      |
| 383 | -1   | 0.8  | -0.6  | 0.007 | 111.607 | 101.44 | 514.58          | 4.111      |
| 384 | -1   | 0.8  | -0.5  | 0.007 | 102.828 | 101.04 | 516.63          | 4.148      |
| 385 | -1   | 0.8  | -0.4  | 0.008 | 91.241  | 100.65 | 518.63          | 4.217      |
| 386 | -1   | 0.8  | -0.3  | 0.009 | 78.958  | 100.27 | 520.59          | 4.318      |
| 387 | -1   | 0.8  | -0.2  | 0.011 | 67.385  | 99.90  | 522.51          | 4.451      |
| 388 | -1   | 0.8  | -0.1  | 0.013 | 57.192  | 99.54  | 524.40          | 4.615      |
| 389 | -1   | 0.8  | 0     | 0.015 | 48.544  | 99.19  | 526.25          | 4.812      |
| 390 | -1   | 0.8  | 0.1   | 0.018 | 41.348  | 98.85  | 528.07          | 5.039      |
| 391 | -1   | 0.8  | 0.2   | 0.021 | 35.411  | 98.52  | 529.85          | 5.299      |
| 392 | -1   | 0.8  | 0.3   | 0.025 | 30.520  | 98.19  | 531.60          | 5.590      |
| 393 | -1   | 0.8  | 0.4   | 0.028 | 26.483  | 97.88  | 533.32          | 5.913      |
| 394 | -1   | 0.8  | 0.5   | 0.032 | 23.135  | 97.57  | 535.00          | 6.268      |
| 395 | -1   | 0.8  | 0.6   | 0.037 | 20.342  | 97.27  | 536.66          | 6.655      |
| 396 | -1   | 0.8  | 0.7   | 0.042 | 17.997  | 96.98  | 538.28          | 7.073      |

## ตารางภาคผนวกที่ ๓-1 (ต่อ)

| No  | Tool | Feed | Speed | E     | TL      | Time   | Production rate | Total cost |
|-----|------|------|-------|-------|---------|--------|-----------------|------------|
| 397 | -1   | 0.8  | 0.8   | 0.047 | 16.015  | 96.69  | 539.88          | 7.522      |
| 398 | -1   | 0.8  | 0.9   | 0.052 | 14.330  | 96.41  | 541.45          | 8.004      |
| 399 | -1   | 0.8  | 1     | 0.058 | 12.887  | 96.14  | 542.99          | 8.517      |
| 400 | -1   | 0.9  | -1    | 0.008 | 92.593  | 102.70 | 508.26          | 4.278      |
| 401 | -1   | 0.9  | -0.9  | 0.007 | 103.252 | 102.26 | 510.46          | 4.188      |
| 402 | -1   | 0.9  | -0.8  | 0.007 | 110.619 | 101.83 | 512.62          | 4.130      |
| 403 | -1   | 0.9  | -0.7  | 0.007 | 112.803 | 101.41 | 514.73          | 4.104      |
| 404 | -1   | 0.9  | -0.6  | 0.007 | 109.170 | 101.01 | 516.80          | 4.109      |
| 405 | -1   | 0.9  | -0.5  | 0.007 | 100.756 | 100.61 | 518.83          | 4.147      |
| 406 | -1   | 0.9  | -0.4  | 0.008 | 89.606  | 100.23 | 520.82          | 4.216      |
| 407 | -1   | 0.9  | -0.3  | 0.010 | 77.730  | 99.85  | 522.77          | 4.317      |
| 408 | -1   | 0.9  | -0.2  | 0.011 | 66.489  | 99.49  | 524.68          | 4.450      |
| 409 | -1   | 0.9  | -0.1  | 0.013 | 56.545  | 99.14  | 526.55          | 4.615      |
| 410 | -1   | 0.9  | 0     | 0.016 | 48.077  | 98.79  | 528.39          | 4.811      |
| 411 | -1   | 0.9  | 0.1   | 0.018 | 41.009  | 98.45  | 530.20          | 5.039      |
| 412 | -1   | 0.9  | 0.2   | 0.021 | 35.162  | 98.13  | 531.96          | 5.299      |
| 413 | -1   | 0.9  | 0.3   | 0.025 | 30.335  | 97.81  | 533.70          | 5.590      |
| 414 | -1   | 0.9  | 0.4   | 0.028 | 26.344  | 97.50  | 535.40          | 5.914      |
| 415 | -1   | 0.9  | 0.5   | 0.033 | 23.028  | 97.19  | 537.08          | 6.268      |
| 416 | -1   | 0.9  | 0.6   | 0.037 | 20.259  | 96.90  | 538.72          | 6.655      |
| 417 | -1   | 0.9  | 0.7   | 0.042 | 17.932  | 96.61  | 540.33          | 7.073      |

## ตารางภาคผนวกที่ ๓-1 (ต่อ)

| No  | Tool | Feed | Speed | E     | TL      | Time   | Production rate | Total cost |
|-----|------|------|-------|-------|---------|--------|-----------------|------------|
| 418 | -1   | 0.9  | 0.8   | 0.047 | 15.964  | 96.33  | 541.92          | 7.523      |
| 419 | -1   | 0.9  | 0.9   | 0.052 | 14.289  | 96.05  | 543.47          | 8.005      |
| 420 | -1   | 0.9  | 1     | 0.058 | 12.853  | 95.78  | 545.00          | 8.518      |
| 421 | -1   | 1    | -1    | 0.008 | 90.909  | 102.26 | 510.49          | 4.276      |
| 422 | -1   | 1    | -0.9  | 0.007 | 101.163 | 101.82 | 512.67          | 4.186      |
| 423 | -1   | 1    | -0.8  | 0.007 | 108.225 | 101.39 | 514.82          | 4.128      |
| 424 | -1   | 1    | -0.7  | 0.007 | 110.314 | 100.98 | 516.92          | 4.102      |
| 425 | -1   | 1    | -0.6  | 0.007 | 106.838 | 100.58 | 518.98          | 4.108      |
| 426 | -1   | 1    | -0.5  | 0.008 | 98.765  | 100.19 | 520.99          | 4.146      |
| 427 | -1   | 1    | -0.4  | 0.009 | 88.028  | 99.82  | 522.97          | 4.215      |
| 428 | -1   | 1    | -0.3  | 0.010 | 76.540  | 99.45  | 524.90          | 4.317      |
| 429 | -1   | 1    | -0.2  | 0.011 | 65.617  | 99.09  | 526.80          | 4.450      |
| 430 | -1   | 1    | -0.1  | 0.013 | 55.913  | 98.74  | 528.66          | 4.614      |
| 431 | -1   | 1    | 0     | 0.016 | 47.619  | 98.40  | 530.48          | 4.811      |
| 432 | -1   | 1    | 0.1   | 0.018 | 40.675  | 98.07  | 532.27          | 5.039      |
| 433 | -1   | 1    | 0.2   | 0.021 | 34.916  | 97.75  | 534.03          | 5.299      |
| 434 | -1   | 1    | 0.3   | 0.025 | 30.152  | 97.43  | 535.75          | 5.591      |
| 435 | -1   | 1    | 0.4   | 0.029 | 26.205  | 97.13  | 537.45          | 5.914      |
| 436 | -1   | 1    | 0.5   | 0.033 | 22.923  | 96.83  | 539.11          | 6.269      |
| 437 | -1   | 1    | 0.6   | 0.037 | 20.178  | 96.54  | 540.74          | 6.656      |
| 438 | -1   | 1    | 0.7   | 0.042 | 17.868  | 96.25  | 542.34          | 7.074      |

## ตารางภาคผนวกที่ ๓-1 (ต่อ)

| No  | Tool | Feed | Speed | E     | No     | Tool  | Feed   | Speed |
|-----|------|------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
| 439 | -1   | 1    | 0.8   | 0.047 | 15.913 | 95.97 | 543.91 | 7.524 |
| 440 | -1   | 1    | 0.9   | 0.053 | 14.248 | 95.70 | 545.45 | 8.006 |
| 441 | -1   | 1    | 1     | 0.059 | 12.821 | 95.44 | 546.97 | 8.519 |