

## การประยุกต์ใช้เครื่องกัดห้าแกนในกระบวนการผลิตใบพัดสำหรับอุตสาหกรรมกระดาษ

### Application of Five Axis Milling Machine for Turbine Blade in Paper Industry

#### คำนำ

ปัจจุบันเป็นที่ทราบทั่วกันว่าภาคอุตสาหกรรม ถือเป็นภาคการผลิตที่สร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่ระบบเศรษฐกิจของประเทศที่สำคัญ การเติบโตของภาคอุตสาหกรรมที่ขึ้นอยู่กับขีดความสามารถในการแข่งขันและการส่งออกจึงเป็นสิ่งที่จะต้องให้ความสนใจดูแลและจริงจังต่อปัจจัยที่จะกระทบ ไม่ว่าจะเป็นปัญหาด้านคุณภาพมาตรฐานของสินค้า ความก้าวหน้าด้านเทคโนโลยีการผลิต ขีดความสามารถทางด้านการตลาดและการจัดการ ตลอดจนวิสัยทัศน์ที่มีต่อแนวโน้มการแข่งขันในตลาด แม้ว่าในช่วง 2 ปี มาแล้ว มีการดำเนินการศึกษาและจัดทำแผนแม่บทในการพัฒนาอุตสาหกรรมและข้อมูลอุตสาหกรรมเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน ซึ่งเป็นการดำเนินการภายใต้แผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรม พ.ศ. 2541 - 2545 ซึ่งได้ข้อมูลและกรอบการพัฒนาที่ชัดเจนแล้วก็ตาม แต่สถานการณ์เศรษฐกิจที่แปรเปลี่ยนอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะปัญหาเศรษฐกิจของประเทศที่เป็นตลาดสำคัญของการส่งออกของไทย อย่างเช่น สหรัฐอเมริกาและญี่ปุ่น

การเข้ามามีบทบาทที่มากขึ้นในตลาดเอเชียของกลุ่มประเทศยุโรปแล้วแต่ส่งผลกระทบต่อตลาดและขีดความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมในประเทศไทยทั้งสิ้น ปัจจุบันการใช้ใบพัด (Turbine Blade) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่ใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายอาทิเช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ อุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้า เนื่องด้วยอุปกรณ์ชิ้นนี้มีความซับซ้อนมากทั้งในด้านของการออกแบบและการผลิต ทำให้ราคาของใบพัดสูงมาก (มากกว่า 200,000 บาท) และต้องรอนานในการสั่งแต่ละครั้ง ทำให้มีแนวคิดริเริ่มนำเอาหลักการของการประยุกต์ใช้เครื่องกัดห้าแกนในกระบวนการผลิตใบพัดสำหรับอุตสาหกรรมต่างๆ โดยจะเริ่มทำการวิจัยจากใบพัดที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ งานวิจัยนี้จะช่วยสร้างความสามารถในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตใบพัดสำหรับอุตสาหกรรมกระดาษผ่านกระบวนการสร้างแบบจำลองโดยใช้วิศวกรรมย้อนรอย และการขึ้นรูปใบพัดด้วยเครื่องกัดห้าแกนโดยมีการคำนวณทางเดินของมีดตัดเนื่องจากการใช้วิศวกรรมช่วยในการผลิต (Computer Aided Manufacturing : CAM )

### วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนากระบวนการสร้างผลิตภัณฑ์ใบพัดสำหรับงานอุตสาหกรรมกระดาษโดยการประยุกต์ใช้วิศวกรรมย้อนรอยในการตรวจสอบวัตถุดิบ เพื่อช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการออกแบบ พัฒนา ปรับปรุง การผลิตใบพัดสำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ อุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้า

### ขอบเขตการวิจัย

1. แบบจำลอง Solid Modeling ที่ดัดแปลงมาจาก ญัฐพล และคณะ (2548)
2. โปรแกรม CAM ใช้ในการคำนวณทางเดินมีดตัดเนื้อด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต
3. ทดสอบโปรแกรม Power Mill ด้วยการ Simulation

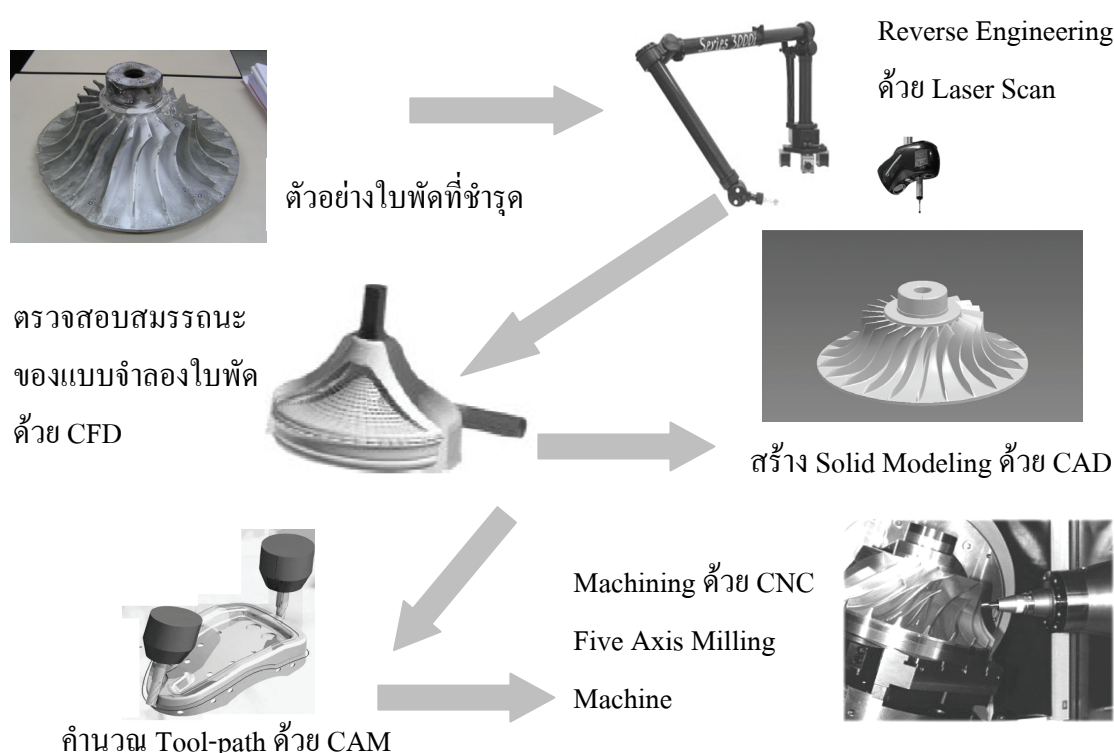
### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นข้อมูลและแนวทางสำหรับการประยุกต์ใช้วิศวกรรมย้อนรอยในกระบวนการออกแบบและผลิตใบพัดสำหรับอุตสาหกรรมกระดาษ
2. เพื่อลดการนำเข้าผลิตภัณฑ์ใบพัดจากต่างประเทศ สำหรับใช้งานในอุตสาหกรรมกระดาษและอุตสาหกรรมอื่นๆในอนาคต
3. สร้างฐานความรู้ในกระบวนการตรวจสอบสำหรับใช้ในการพัฒนากระบวนการผลิต

## การตรวจเอกสาร

ในงานวิจัยเรื่อง การประยุกต์ใช้เครื่องกัดห้าแกนในกระบวนการผลิตใบพัดสำหรับ  
อุตสาหกรรมกระดาน นั้นจากเอกสารได้พบการวิจัยและการศึกษาที่เกี่ยวข้องโดยตรง

ชนะ (2548) ได้ทำข้อเสนอโครงการวิจัยเรื่องการใช้วิศวกรรมย้อนรอยใน  
กระบวนการออกแบบและผลิตใบพัดสำหรับอุตสาหกรรมกระดาน การขึ้นรูปชิ้นงานโดยเครื่องกัด  
ห้าแกนซึ่งมีความแม่นยำมาก อาทิเช่น ใบพัดที่ใช้ในเครื่องยนต์ไอพ่น, พื้นผิวของชิ้นส่วน  
อุตสาหกรรมยานยนต์, อากาศยาน ซึ่งพื้นผิวเหล่านี้ บางครั้งไม่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยเครื่องกัด 3  
แกนปกติ หรือถ้าสามารถทำได้ก็ต้องมีการขึ้นรูปหลายขั้นตอน ซึ่งทำให้ผู้ผลิตไม่สามารถทำการ  
ผลิตได้อย่างเต็มประสิทธิภาพทั้งทางด้านคุณภาพของชิ้นงานและระยะเวลาการส่งมอบ จากปัญหา  
เหล่านี้ สามารถแก้ปัญหาได้โดยการนำเอาเทคโนโลยีการผลิตด้วยเครื่องกัด 5 แกนมาใช้ใน  
กระบวนการผลิต เครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนจะมีลักษณะเหมือนเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกนทั่วไปแต่จะมี  
การเพิ่มจำนวนแกนที่ทำการหมุนเข้าอีก 2 แกน การที่มีการเพิ่มจำนวนแกนเพื่อที่จะทำให้มี  
ความสามารถในการขึ้นรูปพื้นผิวที่ซับซ้อนขึ้น



ภาพที่ 1 แสดงลำดับขั้นตอนการทำงานวิจัย

ยุทธชัย (2547) ได้ทำการศึกษาและพัฒนากังหันลมสำหรับการสูบน้ำในประเทศไทย จากการทำวิจัยดังกล่าว ได้ศึกษาความสามารถของการสูบน้ำโดยใช้ใบพัดที่เหมาะสมกับการใช้เครื่องสูบน้ำและประสิทธิภาพของกังหันลม จากการทดลองดังกล่าวได้ศึกษาถึงการ Balancing ของกังหันลมและพัฒนากังหันลมให้เหมาะสมกับการใช้งานในประเทศไทย

ณัฐพล และคณะ (2548) ได้ทำการศึกษาวิจัยทางด้านวิศวกรรมย้อนรอยในงานสร้างแบบกังหันต้นกำลังสามมิติ เป็นกระบวนการย้อนกลับทางวิศวกรรมที่สร้างแบบของชิ้นงาน ให้มีรูปร่างและคุณสมบัติเหมือนกับวัตถุต้นแบบที่มีอยู่จริงซึ่งอาศัยหลักการตรวจสอบข้อมูลทางเทคนิคและข้อมูลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์ โดยลักษณะงานที่ใช้วิศวกรรมย้อนรอยจะเป็นงานประเภทที่ผลิตภัณฑ์นั้นมีข้อมูลอ้างอิงต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์เพียงพอที่จะใช้พัฒนาต่อไปได้ นอกจากนี้วิศวกรรมย้อนรอยจึงใช้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ เพื่อที่จะให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

## 1. วิศวกรรมย้อนรอย

เป็นกระบวนการย้อนกลับทางวิศวกรรมที่สร้างแบบของชิ้นงาน ให้มีรูปร่างและคุณสมบัติเหมือนกับวัตถุต้นแบบที่มีอยู่จริงซึ่งอาศัยหลักการตรวจสอบข้อมูลทางเทคนิคและข้อมูลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์ โดยลักษณะงานที่จะใช้วิศวกรรมย้อนรอยจะเป็นงานประเภทที่ผลิตภัณฑ์นั้นมีข้อมูลอ้างอิงต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์เพียงพอที่จะใช้พัฒนาต่อไปได้ จึงจำเป็นต้องมีการนำมาย้อนรอยกระบวนการเพื่อให้ได้ข้อมูลเหล่านั้นมาใช้งาน นอกจากนี้วิศวกรรมย้อนรอยยังใช้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อที่จะให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การใช้วิศวกรรมย้อนรอยในการสร้างแบบสามมิติ (3D Modeling) ของรถแข่งเพื่อนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์ของการยก (Coefficient of Lift,  $C_L$ ) และค่าสัมประสิทธิ์ของต้าน (Coefficient of Drag,  $C_D$ ) โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณและวิเคราะห์ทางหลักอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics) เพื่อนำมาปรับปรุงประสิทธิภาพของรถแข่งต่อไป นอกจากนี้วิศวกรรมย้อนรอยยังสามารถประยุกต์ได้หลายลักษณะงานเช่น

1. การสร้างชิ้นงานเลียนแบบวัตถุโบราณเพื่อใช้แสดงหรือนำไปศึกษา เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับวัตถุโบราณเหล่านั้น

2. การเก็บข้อมูลรูปร่างของวัตถุที่ได้รับการปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงขนาดแต่ไม่ได้มีการจดบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงเอาไว้

3. การออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ขึ้นรูปต้นแบบในลักษณะสามมิติด้วยการปั้น โดยทำการเก็บข้อมูลรูปร่างและทำการสร้างแบบสามมิติด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อนำแบบนั้นมาใช้ในขั้นตอนการผลิตอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

4. การเก็บข้อมูลรายละเอียดต่าง ๆ ของวัตถุหรือผลิตภัณฑ์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ เช่น ข้อมูลของขนาด ความกว้าง ความยาว เป็นต้น

5. การเปรียบเทียบวัตถุหรือผลิตภัณฑ์โดยวัดจากรูปร่าง ขนาด หรือแม้กระทั่งความสวยงามของสินค้าของบริษัทที่ดีกว่า เพื่อให้เพิ่มความพึงพอใจของลูกค้าหรือเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต

6. การตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ภายหลังการผลิตเพื่อเปรียบเทียบกับแบบที่ได้ออกแบบไว้

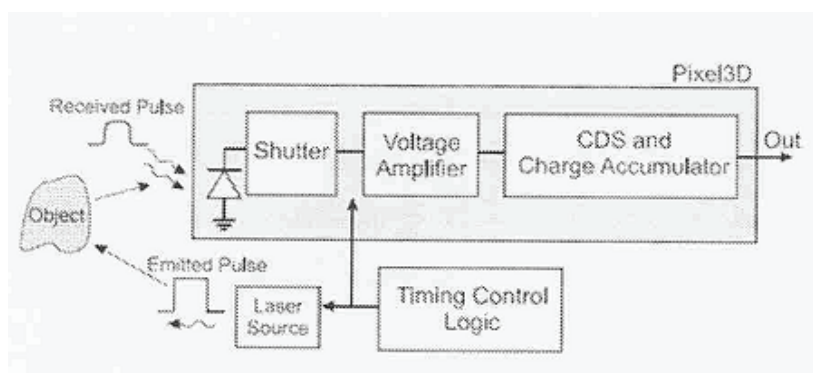
7. การสร้างชิ้นส่วนของมนุษย์ที่มีรูปร่างลักษณะยากต่อการวัดขนาดได้ละเอียดในทุกจุด เช่น ใบหู กระโหลก ไขข้อ กระดูกสันหลัง เป็นต้น ทั้งนี้วิศวกรรมย้อนรอยสามารถสแกนชิ้นส่วนจริงแล้วมาสร้างเป็นของเทียมขึ้นโดยมีรายละเอียดต่างๆ ที่สมบูรณ์

ทั้งหมดที่กล่าวมานี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของความสามารถที่วิศวกรรมย้อนรอยสามารถทำได้ จิตจำกัดของงานในลักษณะที่กล่าวมานี้ขึ้นอยู่กับขนาด และรูปร่างของวัตถุที่จะนำมาเก็บค่าพิกัด เพราะถ้าวัตถุมีรายละเอียดมาก การทำวิศวกรรมย้อนรายนั้นจะต้องใช้เวลานานในการดำเนินการ จนกระทั่งสำเร็จออกมาเป็นรูปทรงที่ต้องการ

## 2. อุปกรณ์เก็บค่าพิกัดสามมิติในระบบเลเซอร์

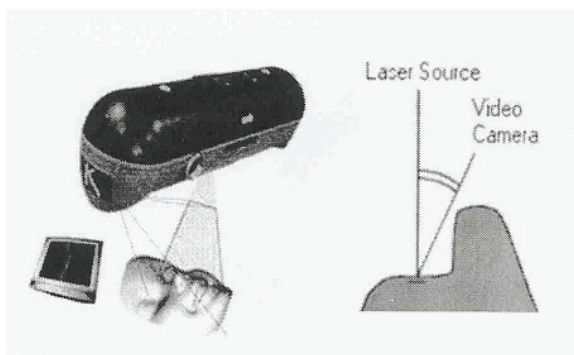
การทำงานพื้นฐานของเครื่องเก็บพิกัดสามมิติระบบเลเซอร์ จะใช้หลักการฉายแสงเป็นแนวทแยงสามเหลี่ยม (Triangulation Principle) ลงบนวัตถุและภาพที่ได้จะมีลักษณะเหมือนจริงทั้ง

ขนาดและรูปทรง โดยหลักการดังกล่าว คือ การทราบค่าระยะและค่ามุมตกกระทบก็จะสามารถหาตำแหน่งของจุดได้ แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ (Laser Source) ส่งแสงเลเซอร์ไปกระทบวัตถุ และจะสะท้อนกลับมากกระทบกับส่วนรับลำแสงซึ่งจะมีเลนส์และกล้อง CCD (Charge Coupled Device) ภายในประกอบด้วยหน่วยรับสัญญาณ (Pixel) ซึ่งภายในประกอบด้วยไดโอด (Diode) หน่วยแปลงสัญญาณภาพ (Shutter) หน่วยขยายสัญญาณ (Voltage Amplifier) หน่วยลดสัญญาณรบกวน (CDS) และหน่วยสะสมประจุ (Charge Accumulators) จากนั้นสัญญาณจะแปลงตำแหน่งในแนว  $u$  และ  $v$  ในรูปของเมตริก เพื่อให้จุดต่าง ๆ ปรากฏในคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 2



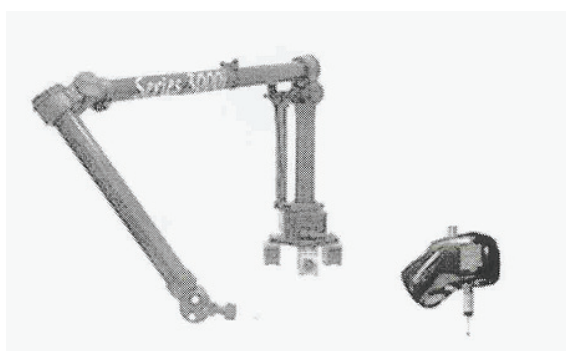
ภาพที่ 2 แสดงอุปกรณ์จับลำแสงของเลเซอร์ภายในกล้องวิดีโอในหัวสแกนเลเซอร์

นอกจากนี้ ขนาดของมุมที่เกิดจากการฉายแสงเลเซอร์ก็มีผลต่อการจัดเก็บข้อมูลโดยอัตโนมัติลงในโปรแกรมเช่นกัน โดยที่ขนาดมุม 0 องศา กล้องจะไม่สามารถเก็บข้อมูลของวัตถุที่ถูกสแกนได้เลย ที่ขนาดมุม 90 องศา เป็นมุมที่เหมาะสมที่สุดในการฉายแสงลงบนวัตถุ แต่ทั้งนี้ การฉายแสงเคลื่อนที่ไปมากเกินไป กล้องจะไม่สามารถจับทิศทางของเส้นแสงเลเซอร์ที่ฉายแนวลงบนวัตถุได้ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ลักษณะการจับลำแสงของเลเซอร์ด้วยกล้องวิดีโอในหัวสแกนเลเซอร์

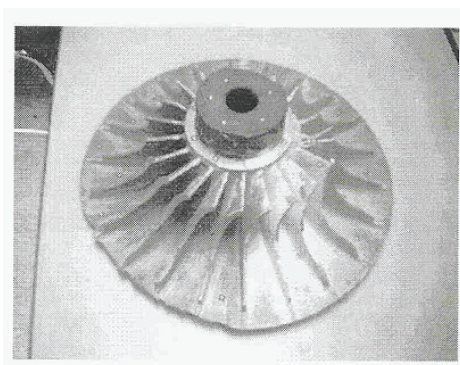
อุปกรณ์เสริมที่จำเป็นอย่างหนึ่งสำหรับวัตถุที่มีสีทึบหรือมีผิวมันวาว คือ “สเปรย์แป้ง” ซึ่งจะใช้สำหรับพ่นเคลือบผิวของวัตถุเพื่อให้สามารถสะท้อนลำแสงได้ สำหรับค่าที่ได้จากการสแกนวัตถุนั้นย่อมมีความผิดพลาด ส่วนมากจะเกิดจากการเคลื่อนที่ขณะทำการสแกนวัตถุของแขนกลที่ใช้คู่กับอุปกรณ์เก็บค่าพิกัดสามมิติในระบบเลเซอร์ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งความผิดพลาดดังกล่าวจะสามารถแก้ไขโดยวิธีการวัดขนาดของชิ้นงานมาตรฐานซึ่งทราบค่าจริงแล้วนำไปทำการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป



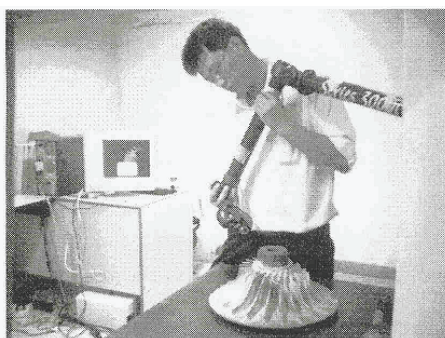
ภาพที่ 4 แขนจับยึดชุดตรวจวัดพิกัดและหัวสแกนเลเซอร์

### 3. ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองสามมิติของกังหันต้นกำเนิดโดยใช้วิศวกรรมย้อนรอย

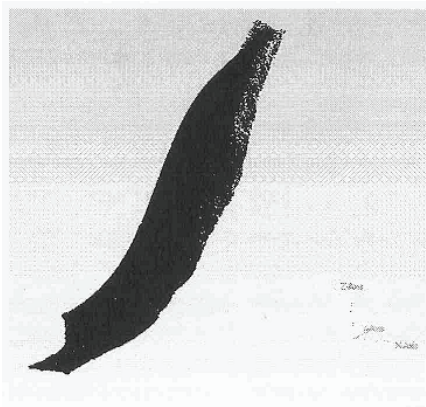
1. นำกังหันต้นกำเนิดที่ชำรุดมาทำการเก็บค่าพิกัดพื้นผิวโดยเลือกใบพัดของกังหันต้นกำเนิดที่สมบูรณ์ที่สุดมาทำการเก็บกลุ่มพิกัดพื้นผิวด้วยอุปกรณ์เก็บค่าพิกัดสามมิติระบบแสงเลเซอร์ (3D Laser Scanner) และบันทึกด้วยโปรแกรมเก็บค่าพิกัด (Polygonia) ซึ่งจะแสดงผลในรูปแบบของกลุ่มพิกัดจุด (Clouds of Points) ดังแสดงในภาพที่ 5, 6 และ 7



ภาพที่ 5 แสดงลักษณะของกังหันต้นกำเนิดที่เสียหายเพื่อนำมาเก็บค่าพิกัดจุด (Clouds of Points)

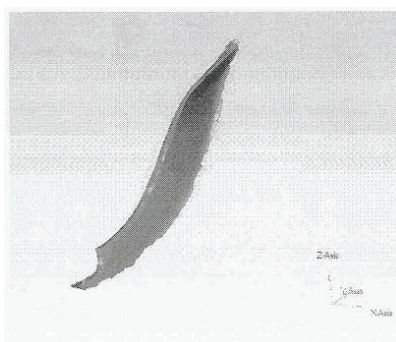


ภาพที่ 6 แสดงการใช้อุปกรณ์เก็บค่าพิกัดสามมิติระบบแสงเลเซอร์ (3D laser Scanner) กลุ่มพิกัดจุด (Clouds of Points) ของต้นแบบกังหันต้นกำเนิด



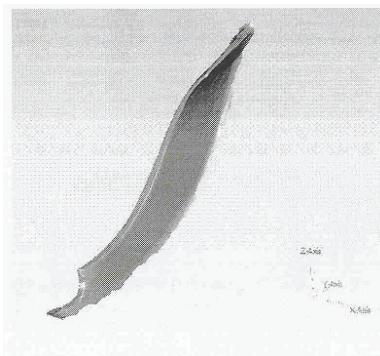
ภาพที่ 7 ตัวอย่างกลุ่มพิกัดจุด (Clouds of Points) ของต้นแบบกังหันต้นกำลัง

2. นำกลุ่มพิกัดจุดที่ได้มาคัดแยก โดยเลือกเฉพาะกลุ่มพิกัดที่เป็นองค์ประกอบของชิ้นงานจริง (Final Clean Clouds) ดังตัวอย่างชิ้นงานที่แสดงในภาพที่ 8



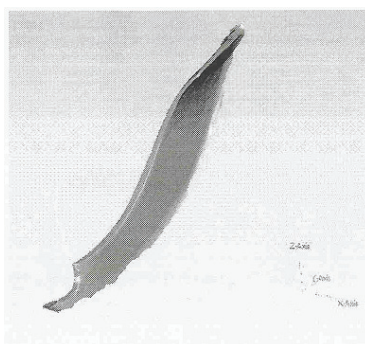
ภาพที่ 8 ตัวอย่างองค์ประกอบชิ้นงานจริง (Final Clean Clouds)

3. นำกลุ่มพิกัดที่ได้มาสร้างพื้นผิว (surface Reconstruction) โดยใช้หลักการเชื่อมจุดต่อจุดเข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้โครงร่างพื้นผิวใบพัดของกังหันต้นกำลังด้วยโปรแกรมปรับแต่งพื้นผิว (Geomagics Studio 6) ดังแสดงในภาพที่ 9



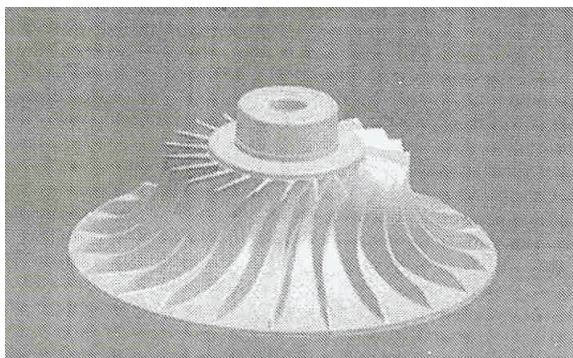
ภาพที่ 9 ตัวอย่างโครงสร้างพื้นผิวของใบพัดของกังหันต้นกำลัง

4. นำโครงสร้างพื้นผิวของใบพัดของกังหันต้นกำลังที่ได้มาทำการปรับแต่งให้อยู่ในรูปแบบจำลองสามมิติ (3D Modeling) ดังตัวอย่างชิ้นงานที่แสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ตัวอย่างแบบจำลองสามมิติใบพัดของกังหันต้นกำลัง

5. นำแบบจำลองสามมิติที่ได้มาทำการปรับแต่งพื้นผิวอีกให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น รวมทั้งทำการสร้างใบพัดของกังหันต้นกำลังจนครบรวมทั้งรายละเอียดของส่วนประกอบอื่น ๆ ของใบพัดต้นกำลังให้สมบูรณ์ โดยใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design : CAD) Unigraphics NX2 เพื่อพร้อมสำหรับการนำไปวิเคราะห์ผลทางวิศวกรรม เช่น การไหลทางอากาศพลศาสตร์ เพื่อหาประสิทธิภาพการไหลของใบพัดต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ตัวอย่างแบบจำลองสามมิติที่สมบูรณ์ของกังหันต้นกำลัง

Erik (1979) แนะนำวิธีการเกี่ยวกับการสร้างแบบและการผลิตชิ้นงานสำหรับเครื่อง 4 แกน ซึ่งทั้งนี้วิธีการจะเป็นในลักษณะของการพัฒนาการผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะรูปทรงเรขาคณิต โดยใช้เครื่องกัด CNC 4 แกน เนื่องจากเครื่องประเภทนี้จำเป็นอย่างมากในการผลิต ทั้งนี้เพราะ แกนหมุน 1 แกน และแกนเคลื่อนที่เชิงเส้น 3 แกนนั้นจะสามารถผลิตชิ้นงานออกมาได้อย่าง สมบูรณ์ นักวิจัยได้ทำการกล่าวถึงข้อเท็จจริงและกระบวนการที่เกี่ยวข้องทั้งในด้านของ องค์ประกอบต่าง ๆ ที่จะส่งผลต่อการผลิต และการป้อนข้อมูลให้กับเครื่องจักรไม่ว่าจะเป็นรูปทรง ที่ได้ถูกออกแบบมาแล้วหรือแม้กระทั่งกระบวนการแต่ละขั้นตอนที่ได้วางไว้ในโปรแกรมการ ออกแบบจะต้องมีความสมบูรณ์และเข้าใจง่าย ซึ่งทั้งนี้การออกแบบหรือกระบวนการที่เหมาะสม จะต้องได้รับการยอมรับและปรับปรุงตามแบบแผนของทางหน่วยงานเกี่ยวข้อง โดยมากแล้วจะเป็น ในส่วนของภาคอุตสาหกรรม

Cardew-Hall, Cosmas and Ristic (1988) ในผลงานทางวิชาการของพวกเขาได้มีการ ถกเถียงกันในเรื่องของการตรวจสอบใบพัด โดยมีชื่อเรื่องว่า “Automated Proof Inspection of Turbine Blades” ในปี 1988 ซึ่งในเนื้อหารายงานจะเป็นเกี่ยวกับวิธีการตรวจสอบชิ้นงานด้วยเครื่อง CMM ซึ่งจะเป็นการสัมผัสกับชิ้นงานโดยตรงและเครื่องแบบไม่มีการสัมผัสชิ้นงาน (Non contact) เพื่อเป็นการลดระยะเวลาในการปฏิบัติงาน ทั้งนี้การตรวจสอบด้วยวิธีดังกล่าวจะมีค่าความ คลาดเคลื่อนและผิดพลาดได้ ซึ่งค่าพิกัดที่ได้จากการตรวจสอบชิ้นงานที่มีมากมายหลายจุดด้วยกัน จะเป็นสาเหตุหลักที่ค่าความผิดพลาดดังกล่าวจะเกิดขึ้น การวิเคราะห์ผลที่ได้จึงจำเป็นต้องมีการ พิจารณาอย่างรอบคอบ

Sheng (1990) ได้ทำการพิจารณาถึงจำนวนการทำงานบนเครื่องจักรแบบ 5 แกน ซึ่งได้อธิบายไว้ในเอกสารของเขา เมื่อปี 1990 ในชื่อ “Five Axis Milling” กลุ่มนักพัฒนาของเขาได้ทำการพัฒนาระบบซอฟต์แวร์ไว้ 2 ตัว ตัวแรกคือ การทำงานร่วมกันของการประมวลผลภายหลังสำหรับเครื่องกัด 5 แกน อีกตัวก็คือระบบจำลองที่จะตรวจสอบโปรแกรม NC ผลิตภัณฑ์ท้ายสุดจากการศึกษานี้มีความสำคัญมาก การทำงานร่วมกันของการประมวลผลภายหลังสามารถถูกใช้กับเครื่องจักร 5 แกนทุกๆ เครื่อง เพื่อที่จะได้มาซึ่งการประมวลผลภายหลังที่จำเพาะซึ่งในที่สุดใช้เพื่อเปลี่ยนข้อมูลตำแหน่งมิดในข้อมูลของเครื่อง ปัญหาที่มีการถกเถียงกันก็คือปัญหาด้านเชิงเส้นซึ่งจำเป็นต้องได้รับการแก้ปัญหาเพื่อให้ได้มาซึ่งเส้นทางการเดินของมิดตัดเฉือนที่ถูกต้องบนเครื่องจักร 5 แกน

Ajohns (1987) ได้ทำการสร้างกระบวนการตรวจสอบใบพัดของกังหันต้นกำลัง ในงานวิจัยเรื่อง “The Application of computer techniques to the inspection of turbine blades” โดยงานวิจัยนี้ให้ความสนใจกับ 3 เรื่อง คือ การวัดแบบหลายจุด การตรวจสอบ การตรวจสอบส่วนโค้งที่เป็นรูปร่างของกังหันต้นกำลัง และการตรวจสอบโดยรวม การวัดโดยใช้บุคคลจะถูกเปรียบเทียบกับคอมพิวเตอร์ โดยงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้พูดถึงเรื่องการประหยัดเวลา การลดขั้นตอนในกระบวนการเพิ่มความแม่นยำ และการนำไปประยุกต์สู่งาน CAD/CAM

Krysztow (1987) ในงานวิจัยเรื่อง “Influence of Surface Shape on Admissible Tool Position in Five Axis Machining” กล่าวไว้เกี่ยวกับการใช้เส้นทางการเดินของตัวหัวกัดให้พอดีกับส่วนของพื้นผิว และการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิตต้องถูกนำมาประยุกต์ใช้และการกัดพื้นผิวต้องราบเรียบและไม่ควรจะเปลี่ยนทางเดินของหัวกัดรวดเร็วเกินไป ในงานวิจัยนี้ได้กล่าวเกี่ยวกับความกว้างของตัว Machine strip บนพื้นผิวที่สามารถทำการเคลื่อนที่บนพื้นผิวโดยทางเดินต้องการเดินโดยให้มีส่วนโค้งน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามสิ่งที่สำคัญที่สุดคือ การควบคุมหัวกัดที่ผู้ใช้สามารถใช้ได้มากขึ้นส่งผลให้คุณภาพของพื้นผิวหลังจากกระบวนการกัดดีขึ้น

Boyd (1987) ได้กล่าวถึงหลักการพื้นฐานเกี่ยวกับการใช้เครื่องกัด 5 แกน ในงานวิจัยเรื่อง “Five Axis Machining” โดยการกัดในชิ้นงานที่ซับซ้อนจะไม่มี ความยากอีกต่อไป โดยงานวิจัยนี้ให้ความสำคัญในเรื่องของเวลาในกระบวนการ เช่น การกัดในคราวเดียวอาจจะใช้เวลาน้อยกว่า การแยกชิ้นงานหลักเป็นชิ้นงานย่อยๆ และนำมาทำการกัดทีละชิ้น จากนั้นนำมาประกอบกันโดยการเชื่อมและอาจจะทำให้เสียเงินค่ากระบวนการเพิ่มเติมอีกด้วย

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 1. เทคโนโลยีเอ็นซีและซีเอ็นซี

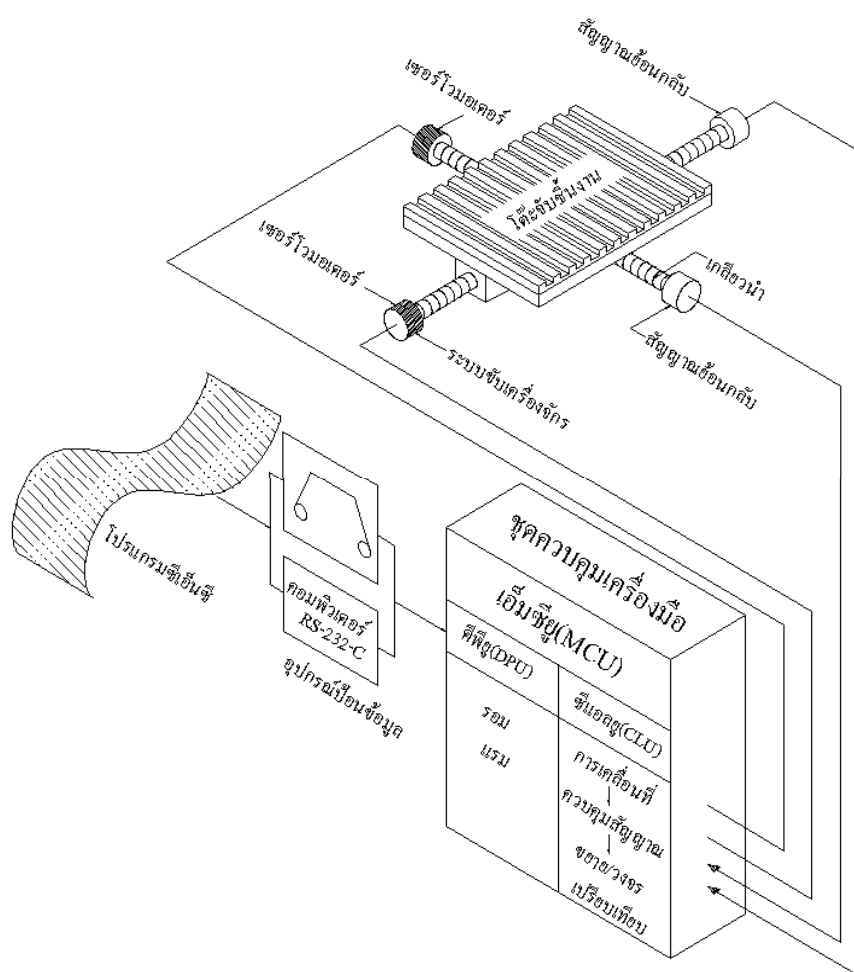
สมาคม Electronic Industries Association ให้คำนิยาม การควบคุมเชิงตัวเลข (Numerical Control, NC) ไว้ว่า เป็นระบบที่ควบคุมด้วยข้อมูลที่เป็นเชิงตัวเลขโดยตรงขณะทำงานอยู่ โดยระบบจะทำการแปลข้อมูลเชิงตัวเลขที่ได้รับมาเป็นสัญญาณควบคุม ซึ่งสัญญาณควบคุมที่ทำการแปลงได้นั้นจะมีอยู่ 2 ส่วนด้วยกัน คือ สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ขาออกแบบพัลส์ (Pulses of Electrics output signal) กับสัญญาณควบคุมแบบเปิดปิด (On/Off Control signal) โดยสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ขาออกแบบพัลส์จะเป็นสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งแกนหมุน (Spindle) ของเครื่อง สัญญาณควบคุมแบบเปิดปิดจะเป็นสัญญาณที่ใช้ควบคุมความเร็วและทิศทางของการหมุนของแกนหมุน ควบคุมระบบหล่อเย็น และควบคุมการเลือกใช้หัวกัด (End mill)

ส่วนประกอบพื้นฐานหลักของระบบเอ็นซีและซีเอ็นซี ประกอบด้วย 6 ส่วนคือ

1. ส่วนการเขียนโปรแกรม (Part program)
2. เครื่องมือนำเข้าโปรแกรม (Program input device)
3. หน่วยควบคุมเครื่องจักร (Machine control unit, MCU)
4. ระบบขับเคลื่อน (Drive system)
5. เครื่องมือกล (Machine tool)
6. ระบบป้อนกลับ (Feedback system)

ในส่วนการเขียนโปรแกรมก็คือการเขียนรหัสที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกล เมื่อทำการป้อนโปรแกรมหรือรหัสเข้าสู่เครื่องเอ็นซีหรือซีเอ็นซี หน่วยควบคุมเครื่องจักรจะทำการแปลงรหัสที่ได้รับให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อไปควบคุมส่วนต่าง ๆ ของเครื่องให้เป็นไป

ตามที่รหัสที่ป้อนเข้าไป โดยที่หน่วยควบคุมเครื่องจักร จะอ่านและแปลรหัสที่ป้อนเข้าไปที่ละบรรทัด สัญญาณที่ได้จากการแปลรหัสจะถูกจ่ายเข้าสู่เครื่องขยายเซอร์โว (Servo amplifiers) เพื่อที่จะขยายสัญญาณไปควบคุมกลไกเซอร์โว ( Servo Mechanism) กลไกเซอร์โวอาจจะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าหรือระบบไฮดรอลิก (Hydraulic) ก็ได้ โดยมอเตอร์จะส่งถ่ายกำลังผ่านทางอุปกรณ์ที่มีชื่อว่า เกลิวนาแบบบอล (Ball lead screws) เพื่อที่จะควบคุมตำแหน่งของ Machine table หรือจานหมุน และที่ปลายอีกด้านหนึ่งของเกลิวนาแบบบอล จะติดตั้งอุปกรณ์ส่งสัญญาณกลับ อุปกรณ์ส่งสัญญาณกลับนี้จะทำการตรวจวัดทิศทาง ตำแหน่ง และความเร็ว เป็นต้น แล้วส่งสัญญาณทางไฟฟ้าที่เป็นข้อมูลที่วัดได้กลับไปยังหน่วยควบคุมเครื่องจักร หน่วยควบคุมเครื่องจักร จะทำการเปรียบเทียบสัญญาณส่งกลับกับสัญญาณที่ได้จากการแปลรหัส ถ้าเกิดผลต่างทางสัญญาณขึ้น หน่วยควบคุมเครื่องจักร ก็จะส่งสัญญาณควบคุมต่อไปจนกระทั่งไม่เกิดผลต่างทางสัญญาณเกิดขึ้น ดังได้แสดงพื้นฐานหลักในการทำงานอยู่ในภาพที่ 12

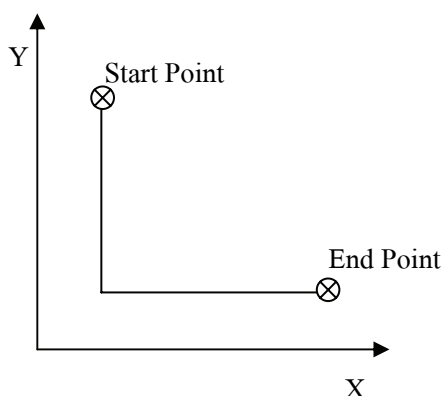


ภาพที่ 12 ส่วนประกอบหลักของเครื่องเอ็นซีและซีเอ็นซี

## 1.1 ระบบควบคุมเครื่องเอ็นซีและซีเอ็นซี

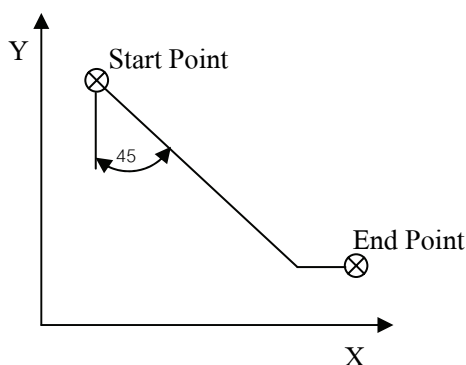
ระบบควบคุมแบบจากจุดถึงจุด (Point to Point, PTP) ระบบควบคุมแบบจากจุดถึงจุด เป็นการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกล จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งโดยไม่ถูกขึ้นงาน ซึ่งระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบนี้จะใช้ในงานเจาะ คว้าน เป็นต้น สามารถแบ่งตามลักษณะการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกล ได้อีก 3 ประเภท คือ

ก) ระบบควบคุมแบบเดินในแนวแกน (Axial Path) เครื่องมือกลจะเคลื่อนที่ที่ละแกน และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด ตามภาพที่ 13 จะเห็นว่าเครื่องมือกลจะเคลื่อนที่ในแนวแกน Y ก่อนด้วยความเร็วสูงของเครื่องจักร เมื่อเครื่องมือกลเคลื่อนที่ถึงพิกัด Y ที่กำหนด เครื่องมือกลจะไม่เคลื่อนที่ในแนวแกน Y แต่จะเคลื่อนที่ในแนวแกน X แทนและจะเคลื่อนที่จนถึงค่าพิกัด X ที่กำหนด โดยใช้ความเร็วสูงสุดของเครื่อง ซึ่งข้อดีของระบบควบคุมแบบนี้ก็คือเป็นวิธีที่ควบคุมง่าย ไม่ต้องมีการคำนวณหาความเร็วในแต่ละแกน



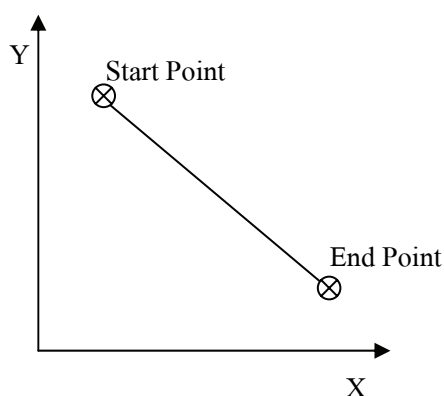
ภาพที่ 13 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่แบบเดินในแนวแกน

ข) ระบบควบคุมแบบเดินเป็นเส้นตรงทำมุม  $45^\circ$  ( $45^\circ$  Line Part) ซึ่งแสดงตัวอย่างไว้ที่ภาพที่ 14 โดยเครื่องมือกลจะเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นเป็นมุม  $45^\circ$  ซึ่งหน่วยควบคุมเครื่องจักรจะคำนวณหาความเร็วในแต่ละแกนที่ทำให้เครื่องมือกลสามารถวิ่งทำมุม  $45^\circ$  ได้ เครื่องมือกลจะเคลื่อนที่จนถึงค่าพิกัด Y ก่อน ต่อจากนั้นก็วิ่งเป็นเส้นตรงขนานกับแกน X และจะเคลื่อนที่ไปจนถึงค่าพิกัด X ที่กำหนด



ภาพที่ 14 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่แบบเดินเป็นเส้นตรงทำมุม  $45^\circ$

ค) ระบบควบคุมแบบเดินเชิงเส้น (Linear Path) ในการเคลื่อนที่ด้วยวิธีนี้ หน่วยควบคุมเครื่องจักรจะต้องมีความสามารถในการคำนวณหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในการเคลื่อนที่ระหว่างจุด 2 จุด และจะต้องคำนวณหาความเร็วที่ควบคุมในแต่ละแกนที่ทำให้เครื่องมือกลไปถึงจุดปลายพร้อมๆ กันทุกแกน ตามภาพที่ 15 เป็นตัวอย่างระบบควบคุมแบบเดินเชิงเส้น



ภาพที่ 15 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่แบบเดินเชิงเส้น

## 1.2 ระบบควบคุมแบบเดินต่อเนื่อง (Continuous Path)

การควบคุมแบบเดินต่อเนื่องสามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ระบบคอนทัวร์ (Contouring System) เป็นการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกลให้เคลื่อนที่พร้อม ๆ กันได้หลายแกน ตามทางเดิน (Path) ที่ถูกกำหนดขึ้น และสามารถควบคุมความเร็วในแต่ละแกนให้มีความเร็วที่แตกต่างกันได้ในขณะเวลาที่ควบคุมเดียวกันได้อย่างอิสระ การควบคุมชนิดนี้สามารถัดชิ้นงานได้หลายรูปแบบ อาทิเช่น การกัดแบบ 3 แกน การกัดแบบ 4 แกน และการกัดแบบ 5 แกน เป็นต้น ซึ่งแสดง

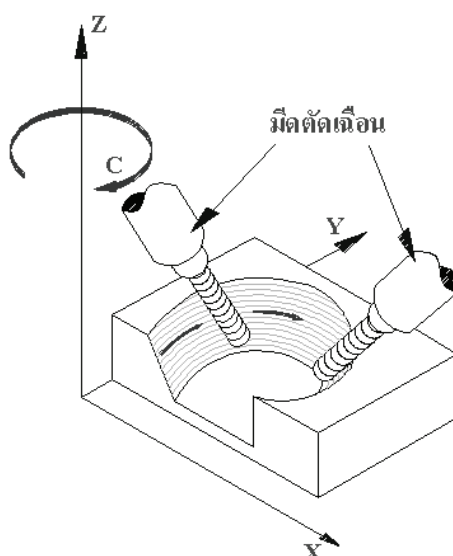
ลักษณะการกัดที่ได้กล่าวมาไว้ที่ภาพที่ 16 โดยการกัดแบบ 2 แกนครึ่งหัวกัดจะเคลื่อนที่กัดชิ้นงานเฉพาะแกน X และ Y เท่านั้น และแกน Z จะเคลื่อนที่ได้เมื่อหัวกัดไม่ได้กัดชิ้นงาน ซึ่งแสดงไว้ที่ภาพ 16 เป็นการกัดแบบ 3 แกนมีลักษณะการกัดชิ้นงานที่หัวกัดสามารถเคลื่อนที่กัดได้พร้อม ๆ กันทั้ง 3 แกน และการกัดแบบ 5 แกน ซึ่งมีรูปแบบการกัดเหมือนแบบ 3 แกน แต่เพิ่มการวางทิศทาง (Orientation) รอบแกน A, B หรือ C ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการกัด

### 1.3 การประมาณค่าของเอ็นซีและซีเอ็นซี (NC and CNC interpolation)

การประมาณค่า (Interpolation) สำหรับเครื่องเอ็นซีจะกระทำโดยใช้วงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ และสำหรับเครื่องซีเอ็นซีจะเป็นตัวโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ โดยตัวประมาณค่านี้นี้จะมีหน้าที่อยู่ 2 อย่างด้วยกันคือ

ก) ช่วยในการคำนวณหาความเร็วที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกลในแต่ละแกนให้เป็นไปตามที่โปรแกรมหรือรหัสที่ป้อนเข้ามาในเครื่อง

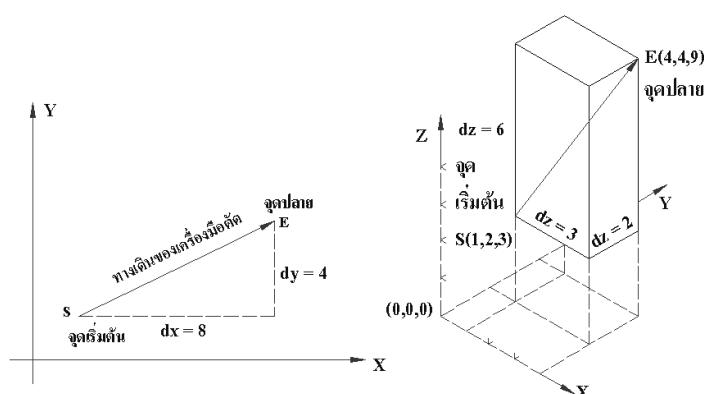
ข) ช่วยในการคำนวณหาตำแหน่งของการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกล



ภาพที่ 16 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่แบบระบบต่อเนื่อง

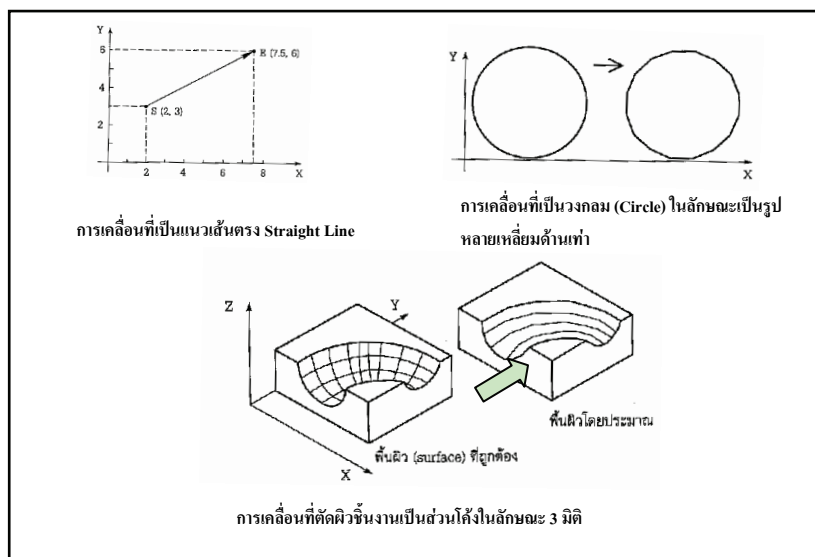
#### 1.4 เทคนิคการประมาณค่าของเครื่องเอ็นซีและซีเอ็นซีสามารถจำแนกได้เป็น 5 วิธี

1) การประมาณค่าแบบเชิงเส้น (Linear Interpolation) เทคนิคนี้เครื่องมือกลจะเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งเป็นเส้นตรง ในการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกลที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงต่อกันหลาย ๆ เส้น ตัวประมาณค่า (Interpolation) จะคำนวณหาเฉพาะจุดปลายของแต่ละเส้นเท่านั้น ก็เนื่องจากจุดปลายของเส้นที่ผ่านมาก็จะเป็นจุดเริ่มต้นของเส้นถัดไป ในการประมาณค่าแบบเชิงเส้นจะต้องการตัวพารามิเตอร์อยู่ 3 ตัวคือ 1) จุดเริ่มต้น 2) จุดปลาย 3) ความเร็วในแต่ละแกน โดยที่ตัวประมาณค่าจะคำนวณหาความเร็วในแต่ละแกนที่เหมาะสมให้เอง ในภาพที่ 17 เป็นตัวอย่างการประมาณค่าแบบเชิงเส้นแบบ 4 แกน เมื่อตัวประมาณค่ารับค่าพิกัดจุดเริ่มต้นและจุดปลายแล้ว ตัวประมาณค่าก็จะหาค่าผลต่างในแนวแกน X และ Y และ แกน Z จากนั้นก็นำผลต่างทั้ง 2 ไปเทียบกับเวลาก็จะได้ความเร็วที่ใช้ในการกัดงาน



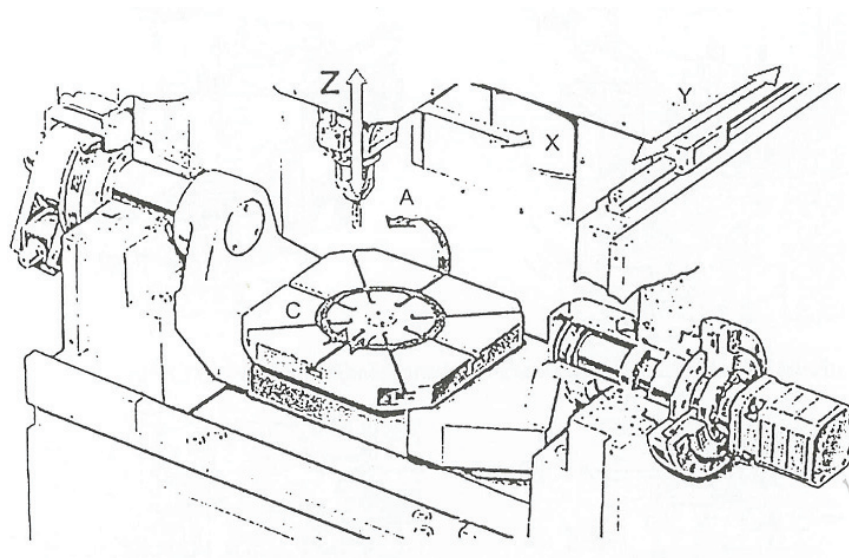
ภาพที่ 17 แสดงลักษณะการประมาณค่าแบบเชิงเส้น

การเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงนี้จำเป็นต้องกำหนดค่าตัวแปรที่สำคัญ 3 ค่าโคออร์ดิเนตของจุดเริ่มต้น โคออร์ดิเนตของจุดปลาย และความเร็วของแต่ละแนวแกน หลักการควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงนี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ตัดเฉือนผิวชิ้นงานของเครื่องมือตัดหลายลักษณะ ซึ่งประกอบไปด้วยการเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรง วงกลม ส่วนโค้ง และแบบเชิงเกลียว

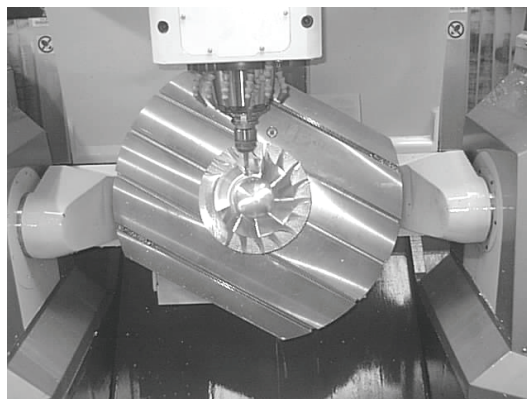


ภาพที่ 18 การเคลื่อนที่ในแนวเส้นต่าง ๆ

ส่วนภาพที่ 19 เป็นตัวอย่างการประมาณค่าแบบเชิงเส้น แบบ 5 แกน (5 Axis) ที่มีการเคลื่อนที่เชิงมุม (Linear Motion) 3 แกน (X, Y, Z) และการเคลื่อนที่เชิงมุม (Angular Motion) หรือการหมุน 2 แกน เครื่อง 5 แกน สามารถเคลื่อนที่ได้พร้อมๆ กัน ทั้ง 5 แกน



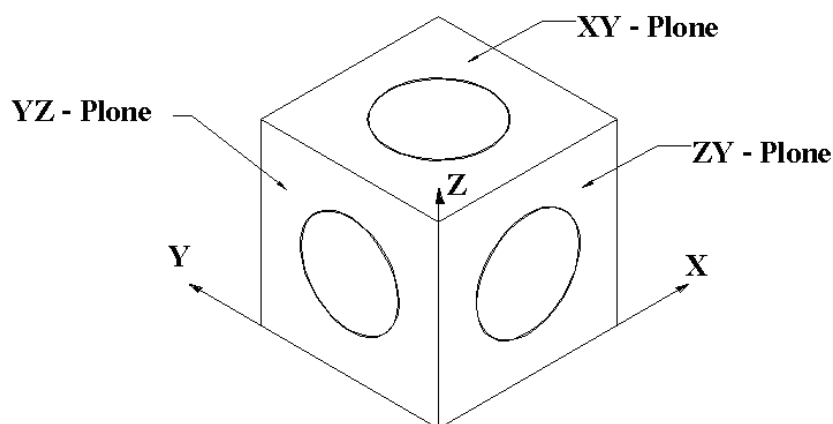
ภาพที่ 19 เครื่องกัด 5 แกนที่มีการเคลื่อนที่ในแกน (X, Y, Z) และการหมุนในแกน A และ B  
ที่มา : สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตอุตสาหกรรม หน้า 28



ภาพที่ 20 ตัวอย่างชิ้นงานที่แมชชีนโดยใช้เครื่องกัด 5 แกน

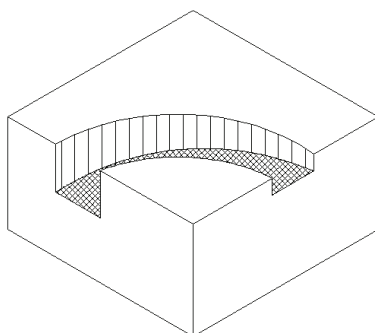
2) การประมาณค่าแบบเชิงวงกลม (Circular Interpolations) ในการประมาณค่า เทคนิคนี้วงกลมจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนเล็ก ๆ ที่เป็นเส้นตรงโดยมีขนาดประมาณ 0.0025-0.005 มม. และมีการคำนวณหาความเร็วในการควบคุมเครื่องมือกลตามแกน X และ Y การประมาณค่าแบบเชิงวงกลมจะใช้ในการคำนวณได้เฉพาะงาน 2 แกน หรือระนาบ (Plane) เท่านั้น เช่น ระนาบ XY ระนาบ XZ และระนาบ YZ โดยแสดงรูปตัวอย่างการประมาณค่าแบบเชิงวงกลมในแต่ละระนาบไว้ใน ภาพที่ 21

การคำนวณด้วยเทคนิคนี้จะต้องมีพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ 1) จุดเริ่มต้น 2) จุดปลาย 3) รัศมีหรือจุดศูนย์กลาง 4) ทิศทางการเคลื่อนที่



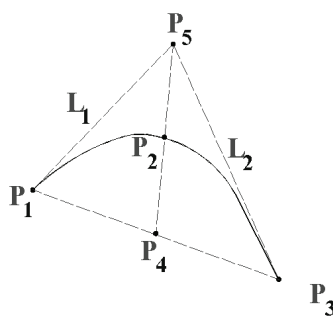
ภาพที่ 21 การประมาณค่าแบบเชิงวงกลมในระนาบต่าง ๆ

3) การประมาณค่าแบบเชิงเกลียว (Helical Interpolation) ส่วนมากการประมาณค่าแบบเชิงเกลียวจะมีอยู่เฉพาะในเครื่องซีเอ็นซีรุ่นใหม่ๆ ซึ่งการประมาณค่าเทคนิคนี้จะเป็นการรวบรวมเอาการประมาณค่าแบบเชิงเส้นกับการประมาณค่าแบบเชิงวงกลมมารวมเข้าไว้ด้วยกัน โดยความสามารถการประมาณค่าแบบนี้สามารถคำนวณหาเส้นทางเดินของหัวกัด (Tool Path) ที่เป็นลักษณะ 3 แกนได้ โดยแสดงรูปตัวอย่างไว้ในภาพที่ 22 ซึ่งในรูปตัวอย่างนี้จะคำนวณค่าพิกัด X และ Y ด้วยการประมาณค่าแบบเชิงวงกลม แต่ค่าพิกัด Z จะใช้การประมาณค่าแบบเชิงเส้น



ภาพที่ 22 แสดงลักษณะการประมาณค่าแบบเชิงเกลียว

4) การประมาณค่าแบบเชิงพาราโบลา (Parabolic Interpolation) จะเริ่มต้นการคำนวณหาเส้นทางเดินของหัวกัดจากจุด 3 จุด ที่ไม่ได้อยู่บนเส้นตรงเดียวกัน เพื่อที่จะนำมาคำนวณหาเส้น โดยแสดงตามภาพที่ 23 จุด P1 จุด P2 และจุด P3 เป็นจุดที่กำหนดให้เส้นโค้งผ่านทั้ง 3 จุด และจุด P2 อยู่กึ่งกลางระหว่างจุด P4 และจุด P5 จุด P4 อยู่กึ่งกลางระหว่างจุด P1 และจุด P3 จากนั้นก็จะได้เส้นตรง L1 และ L2 มาช่วยในการสร้างเส้นโค้ง ซึ่งเส้นโค้งจะต้อง สัมผัส (Tangent) กับเส้นตรง L1 และ L2 ตรงจุด P1 และ P3 ตามลำดับ



ภาพที่ 23 แสดงลักษณะการประมาณค่าแบบเชิงพาราโบลา

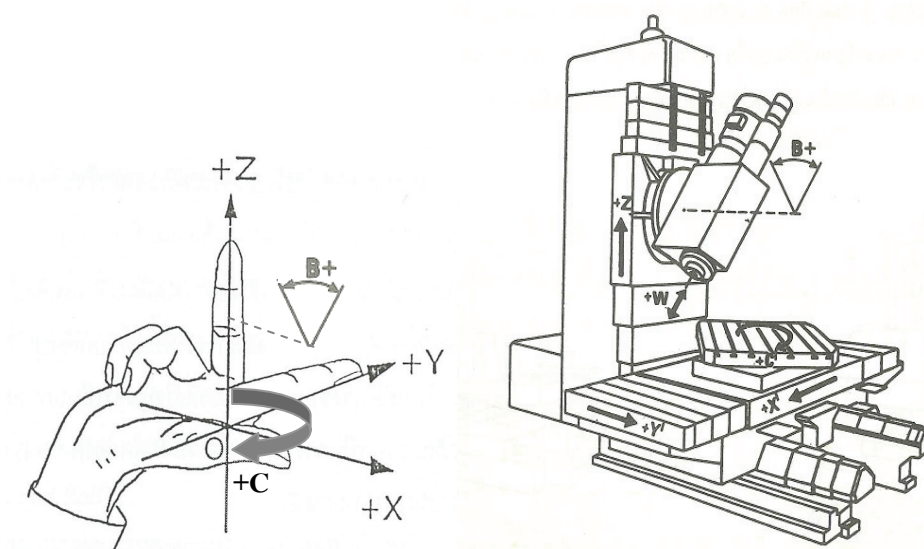
5) การประเมินค่าแบบยกกำลัง 3 (Cubic Interpolation) ใช้ในงานคำนวณหาเส้นทางเดินของหัวกดของชิ้นงานที่รูปแบบยากๆ เช่น งาน Automobile sheet metal dies เป็นต้น ซึ่งเทคนิคนี้ยังสามารถไม่เพียงแต่คำนวณหาเส้นทางเดินของหัวกดที่เป็นเส้นโค้ง แต่ยังสามารถคำนวณหาเส้นทางเดินของหัวกดของเส้นโค้งหลายๆ เส้นที่ต่อเชื่อมกันได้อย่างราบเรียบกัน

#### 1.4 ระบบพิกัด (Coordinate System)

ในการเขียนรหัสควบคุมเครื่องเอ็นซีและซีเอ็นซีให้กดชิ้นงานตามที่ต้องการนั้น จำเป็นจะต้องมีการวางแผนก่อนว่า จะต้องใช้คำสั่งใดในการควบคุม การเลือกใช้เครื่องมือกล ชนิดไหนจึงจะเหมาะสมกับงาน เครื่องเอ็นซีหรือซีเอ็นซีแบบใดที่จะใช้งาน สิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งที่ต้องรู้ และต้องมีการวางแผนก่อน ในการแปลงสิ่งเหล่านี้ให้เป็นรูปแบบคำสั่งที่ใช้ในการควบคุม จำเป็นที่จะต้องใช้ระบบพิกัดเพื่อที่จะใช้ในการบอกตำแหน่งที่ต้องการระบบพิกัดที่ใช้งานในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

ก) ระบบพิกัดฉาก (Cartesian Coordinate System หรือ Rectangular coordinate System) การเคลื่อนที่ของเครื่องมือกลของเครื่องเอ็นซีและซีเอ็นซีจะเป็นแบบระบบพิกัดฉาก เนื่องจากโครงสร้างของเครื่องเอ็นซีและซีเอ็นซีส่วนใหญ่จะสร้างบนพื้นฐานที่เป็นแกนพิกัดฉาก 5 แกน สำหรับเครื่องกัดที่มีการเคลื่อนที่ทั้งทางด้านการเคลื่อนที่เชิงเส้น (X, Y, Z) และการเคลื่อนที่เชิงมุม (A, B, C) โดยทิศทางการเคลื่อนที่เชิงมุมจะใช้แกน X, Y และ Z โดยแกน A จะหมุนรอบแกน X แกน B จะหมุนรอบแกน Y และแกน C จะหมุนรอบแกน Z โดยทิศบวกของแกน A, B และ C มีทิศทางตามกฎมือขวา ดังภาพที่ 24 แสดงถึงเครื่องกัดซีเอ็นซีแบบตั้งในระบบพิกัดฉากซึ่งมีทิศทางของหัวกดใน 5 ทิศทางตั้งฉากกัน โดยสามารถแสดงทิศทางด้วยกฎมือขวา

แต่ในระบบ 5 แกนที่เป็นระบบพิกัดฉาก อาทิ ระนาบ XY จะประกอบไปด้วย 2 แกนที่ตัดตั้งฉากกัน ดังแสดงไว้ในภาพที่ 24 ซึ่งแสดงระบบพิกัดฉากแบบ 5 แกน ซึ่งจุดกำเนิดอยู่ที่จุดตัดระหว่างแกน X และแกน Y และในระบบ 3 แกน ก็จะเป็นการตัดกันและตั้งฉากทั้ง 3 แกน คือ แกน X แกน Y และแกน Z และเรียกจุดตัดเป็นจุดกำเนิดเช่นกัน ในการพิจารณาทิศทางใดในแต่ละแกนมีค่าเป็นบวกหรือลบนั้น จะใช้วิธีกฎมือขวา



ภาพที่ 24 เครื่องกัดซีเอ็นซีแบบตั้งในระบบพิกัดฉาก

เครื่องกัดที่มี 3 แกน (แกนเดินตรง X, Y, Z) ขึ้นรูปพื้นผิวเรียบใด ๆ ก็ได้ในปริภูมิ 3 มิติโดยปกติพื้นผิวจะเป็นผิวโค้ง ดังนั้นการเพิ่มแกนหมุน 2 แกนลงบนเส้นตรง 3 แกนทำให้สามารถขึ้นรูปพื้นผิวใดก็ได้ในปริภูมิ 3 มิติ อาจมีคำถามสงสัยว่าผิวโค้งก็สามารถขึ้นรูปได้ด้วยเครื่องกัด 3 แกนก็ได้แต่ทำไมต้องใช้เครื่องกัด 5 แกนเหตุผลก็เพราะว่า ในการทำผิวโค้งเครื่องกัด 3 แกน เป็นการขึ้นรูป โดยอาศัยการเดินแบบจุดต่อจุด (point to point) ไปตามพื้นที่ผิวนั้นทำให้คุณภาพของพื้นผิวที่ได้มีคุณภาพไม่ดี ซึ่งจะเห็นได้จากการขึ้นรูปทรงกระบอกโดยการกลึง และการกัด 3 แกนดังนั้น ในการขึ้นรูปของพื้นผิวโค้งด้วยเครื่องกัด 5 แกนจะไม่ใช้การเดินจุดต่อจุดแต่จะใช้การเคลื่อนที่ของแกนหมุนทั้ง 2 แกน

การเคลื่อนที่ของเครื่องซีเอ็นซีในแนวเส้นตรง เครื่องจักรจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงและจะขนานกับแนวแกนอ้างอิง ส่วนการเคลื่อนที่หมุนนั้น เครื่องจักรจะเคลื่อนที่หมุนรอบแนวอ้างอิง ในการกำหนดแนวแกนการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรในระบบซีเอ็นซีนั้นจะอาศัยระบบการวัดโคออร์ดิเนตแบบ Cartesian Coordinate System ซึ่งประกอบไปด้วย แนวแกน 3 แนวแกน โดยที่แต่ละแนวแกนจะทำมุมฉากซึ่งกันและกัน เครื่องจักรที่มีแนวการป้อนและแนวการหมุนรวมกันอยู่หลายแนวแกน ซึ่งในการกำหนดแนวแกนของเครื่องจักรซีเอ็นซีตามมาตรฐาน EIA - 267 - B (Electronic Industries) ได้กำหนดการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง 9 แนวแกน และแนวหมุนอีก 5 แนวแกน ดังนี้

1) แนวแกนแรกที่เคลื่อนที่ในแนวเส้น ( Primary linear axis) เป็น 3 แนวแกนแรกที่มีการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง ซึ่งประกอบไปด้วยแนวแกน X, Y และแนวแกน Z โดยการกำหนดแนวแกนการเคลื่อนที่บนเครื่องจักรซีเอ็นซี จะใช้กฎมือขวา คือนิ้วแม่มือชี้แทนแนวแกน X นิ้วชี้ชี้แทนแนวแกน Y และนิ้วกลางชี้แทนแนวแกน Z โดยบอกความหมายของแนวแกนต่างๆ ไว้ดังนี้

แนวแกน X สำหรับกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของโต๊ะชิ้นงานไปตามความยาว

แนวแกน Y สำหรับกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของโต๊ะชิ้นงานในแนวนอนที่มีระยะทางสั้นๆ โดยจะทำมุมตั้งฉากกับแนวแกน X และแนวแกน Z

แนวแกน Z สำหรับกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ขึ้น / ลงของโต๊ะชิ้นงาน และขนานกับแนวแกนของชิ้นงานส่วนหลัก (main machine) ของเครื่องซีเอ็นซี

การเคลื่อนที่ของแนวแกน X จะถูกกำหนดให้เป็นบวก (+X) โดยอาศัยทิศทางการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน ส่วนการกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของแนวแกน Y ให้เป็นบวกนั้น ก็ให้เป็นไปตามกฎมือขวาเช่นเดียวกัน

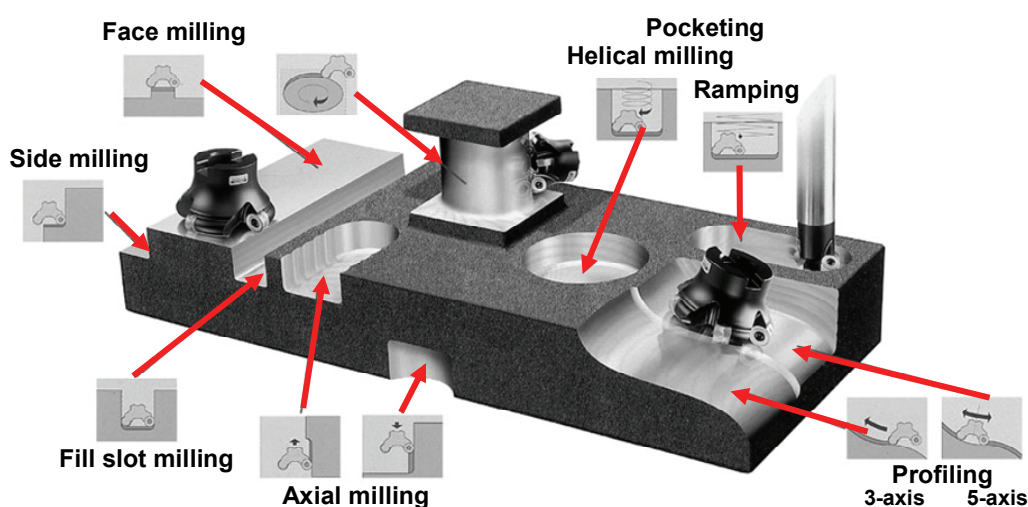
2) แนวแกนแรกที่เคลื่อนที่หมุนรอบแกน ( Primary rotary axis) แนวแกนแรกที่เคลื่อนที่หมุนรอบแกนจะใช้ระบุโดยใช้อักษร A, B และ C โดยที่ A แทนการหมุนรอบแกน X, B แทนการหมุนรอบแกน Y และ C แทนการหมุนรอบแกน Z ส่วนการกำหนดทิศทางจะเป็นบวกเมื่อหมุนทวนเข็มนาฬิกา

3) แนวแกนที่สองที่เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง ( Secondary linear axis ) เครื่องจักรกลในระบบซีเอ็นซีที่มีการกำหนดแนวแกนที่เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงเพิ่มเติมจาก 3 แนวแกนแรก ( X, Y, Z) โดยแนวแกนที่สองนี้จะกำหนดตัวอักษร U, V และ W ซึ่งมีทิศทางการเคลื่อนที่ขนานกับแนวแกนแรก คือแนวแกน U จะเคลื่อนที่ขนานกับแนวแกน X แนวแกน V จะเคลื่อนที่ขนานกับแนวแกน Y และแนวแกน W จะเคลื่อนที่ขนานกับแนวแกน Z

4) แนวแกนที่ 2 ที่เคลื่อนที่หมุนรอบแกน (Secondary rotary axis) การกำหนดแนวแกนที่ 2 จะเคลื่อนที่หมุนรอบแกนนี้จะกำหนดโดยใช้อักษร D และ E โดยที่แนวแกน D และ E นี้จะขนานกับแนวแกนแรกคือ A, B หรือแนวแกน C

5) แนวแกนที่ 3 ที่เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง (Tertiary linear axis) เครื่องจักรซีเอ็นซีที่มีความซับซ้อนจะถูกออกแบบให้มีแนวแกนที่ 3 ที่เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงเพิ่มขึ้นอีกโดยที่แนวแกนที่ 3 จะกำหนดด้วยอักษร P, Q และ R และการเคลื่อนที่จะขนานกับแนวแกนแรกคือแนวแกน X, Y และ Z

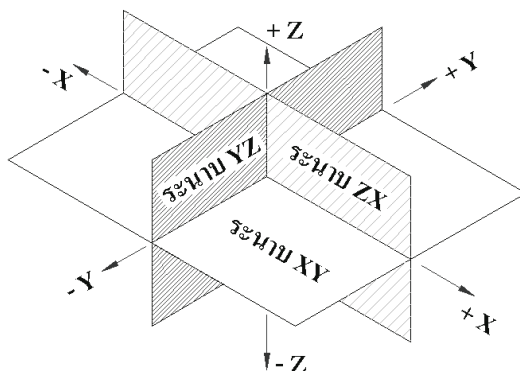
การขึ้นรูปโดยใช้เครื่องกัด 5 แกน การขึ้นรูป ในชิ้นงานบางลักษณะอาทิเช่น เสื้อสูบ เครื่องยนต์ เสื้อปั้มน้ำ โดยต้องมีกระบวนการขึ้นรูปหลายกระบวนการ เช่น การคว้านรู การเจาะ การปาดผิว โดยมีการเอียงผิวชิ้นงานด้านต่าง ๆ เทียบกับแกนอ้างอิงของชิ้นงาน การขึ้นรูปประเภทนี้จะอาศัยแกนหมุนทั้ง 2 แกนของเครื่องกัด 5 แกน ชิ้นงานจะถูกยึดจับบนโต๊ะของเครื่องกัด 5 แกน มีดตัดเฉือน (Cutting Tool) ให้เอียงทำมุมสัมผัสพัธตามแบบที่ต้องการ



ภาพที่ 25 การขึ้นรูปชิ้นงานในลักษณะต่าง ๆ

ที่มา :Sandvik coromant., 1990

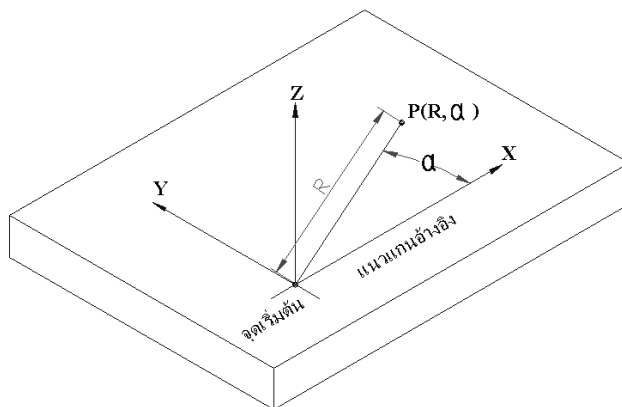
จากนั้นจะคงตำแหน่งนั้นไว้และเริ่มทำกระบวนการต่าง ๆ เช่น ปาดผิว เจาะรู คว้านรู โดยอาศัยเฉพาะการเคลื่อนที่ของแกนเชิงเส้นทั้ง 3 แกนเท่านั้น



ภาพที่ 26 ระบบพิกัดฉาก แบบ 3 แกน

### 1.5 ระบบโคออร์ดิเนตแบบ Polar (Polar coordinate system)

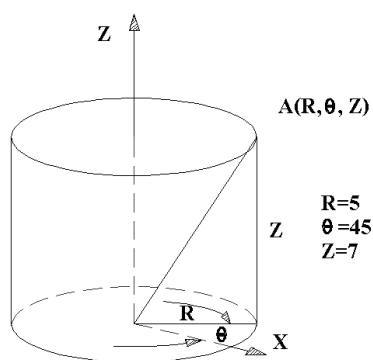
เป็นการกำหนดตำแหน่งในระบบโคออร์ดิเนตแบบ Polar ซึ่งจะมีการกำหนดตำแหน่งของจุดด้วยการระบุระยะทางหรือการระบุรัศมีและมุมเอียงที่ได้จากการวัดแนวแกนของจุดอ้างอิง



ภาพที่ 27 ตำแหน่งของระบบโคออร์ดิเนตแบบ Polar

จากจุดเริ่มต้น (Origin) จะเห็นว่าจุดตัดของแนวแกนและแนวแกนอ้างอิง คือแนวแกน X การกำหนดทิศทางของการวัดมุมจะกำหนดให้เป็นบวกเมื่อวัดทวนเข็มนาฬิกาและเป็นลบเมื่อทิศทางตามเข็มนาฬิกา

ถ้าเพิ่มแกนเข้าไปในระบบอีกหนึ่งแกน นั่นก็คือ แกน  $Z$  ระบบพิกัดเชิงขั้วก็จะถูกเปลี่ยนเป็นระบบพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical Coordinate System) ซึ่งประกอบไปด้วยรัศมี ( $R$ ) มุม ( $\theta$ ) และแกน  $Z$  ซึ่งแสดงตามภาพที่ 28

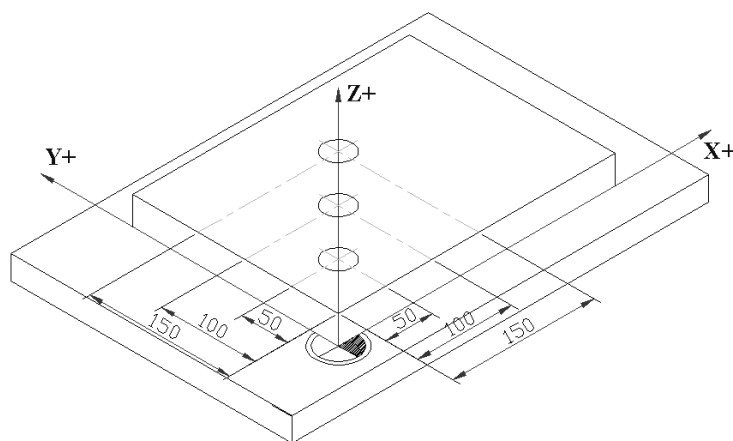


ภาพที่ 28 ระบบพิกัดเชิงขั้วแบบ 3 แกน หรือระบบพิกัดทรงกระบอก

#### 1.6 ระบบตำแหน่ง (Positioning System)

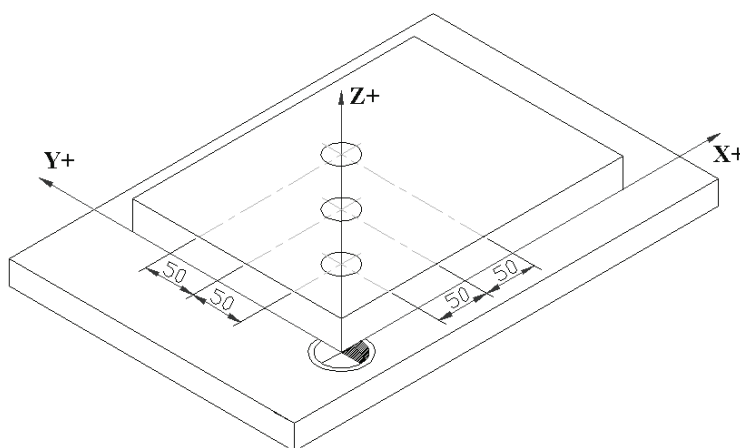
ในส่วนของการโปรแกรมรหัสที่ใช้ในการควบคุมเครื่องเอ็นซีและซีเอ็นซีให้เครื่องมือกลเคลื่อนที่มีลักษณะการป้อนค่าตัวเลขที่ควบคุมการเคลื่อนที่อยู่ที่ 2 ประเภท คือ

ก) ระบบตำแหน่งแบบสัมบูรณ์ (Absolute Positioning System) ตำแหน่งในระบบตำแหน่งแบบสัมบูรณ์ทุกตำแหน่งจะถูกวัดจากจุดกำเนิดเดียวของรูปชิ้นงานโดยจุดกำเนิดนี้จะถูกกำหนดตามตำแหน่งที่ผู้โปรแกรมพอใจหรือคิดว่าเป็นจุดที่ดีที่สุด



ภาพที่ 29 การกำหนดตำแหน่งแบบสัมบูรณ์

ข) ระบบตำแหน่งแบบต่อเนื่อง (Incremental Positioning System) ระบบนี้จุดกำเนิดจะไม่ถูกกำหนดตายตัว แต่จะเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ระยะที่เครื่องมือกลเคลื่อนที่จะคำนวณจากระยะทางระหว่างตำแหน่งของเครื่องมือกลในปัจจุบันกับตำแหน่งของเครื่องมือกลในตำแหน่งต่อไป โดยเครื่องหมายบวกและลบจะแสดงถึงทิศทางในการเคลื่อนที่ของเครื่องมือ



ภาพที่ 30 การกำหนดตำแหน่งแบบต่อเนื่อง

### 1.7 คำสั่งที่ใช้สำหรับเครื่องกัด เอ็นซี และ ซีเอ็นซี

ในการกัดชิ้นงานด้วยการควบคุมด้วยตัวเลขสามารถใช้เครื่องกัดเอ็นซี และ ซีเอ็นซี หรือเครื่องแมชชีนนิ่ง เซนเตอร์ (Machining Center) ก็ได้ การควบคุมเครื่องเหล่านี้จำเป็นต้องเขียนโปรแกรมหรือรหัสที่มีลักษณะเพื่อควบคุมสั่งงาน โดยรูปแบบรหัสจะต้องใช้ให้เหมาะสมกับเครื่องแต่ละชนิดและแต่ละผู้ผลิต ซึ่งจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันเล็กน้อย การเขียนโปรแกรมหรือรหัสอาจจะกระทำได้หลายวิธี เช่น การเขียนด้วยคนโดยตรงการใช้โปรแกรมช่วยในการเขียน เป็นต้น โปรแกรมหรือรหัสที่ใช้ควบคุมจะประกอบไปด้วยตัวอักษรหรือรหัส กับค่าตัวเลข โดยกลุ่มของตัวอักษรหรือรหัสจะแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงความหมายของกลุ่มรหัส

| ฟังก์ชัน            | รหัส | ความหมาย                                  |
|---------------------|------|-------------------------------------------|
| หมายเลขลำดับที่     | N    | หมายเลขลำดับที่ของโปรแกรม                 |
| หมายเลขการเตรียมตัว | G    | กำหนดโหมดการทำงานเส้นตรง เส้นโค้ง เป็นต้น |
| ค่าพิกัด            | XYZ  | ค่าตำแหน่งหรือระยะทางในแกนพิกัดฉาก        |
|                     | IJK  | ค่าพิกัดของศูนย์กลางส่วนโค้ง              |
| ความเร็วป้อน        | F    | กำหนดค่าความเร็วป้อน                      |
| ฟังก์ชันแกนหลัก     | S    | กำหนดค่าจำนวนการหมุนของแกนหลัก            |
| ฟังก์ชันหัวกัด      | T    | กำหนดหมายเลขของหัวกัด                     |
| ฟังก์ชันย่อย        | M    | กำหนดการควบคุมแบบเปิดปิด                  |

รหัสที่ใช้ในการสั่งงานของโปรแกรมสามารถแบ่งกลุ่มรหัสได้ 5 กลุ่ม คือ

#### 1. รหัสคำสั่งพื้นฐาน

- รหัสควบคุมการเคลื่อนที่ (G00, G01, G02 และ G03)
- รหัสการเลือกกระนาบ (G17, G18 และ G19)
- รหัสการเลือกกระบวนตำแหน่ง (G90 และ G91)
- รหัสการเลือกหน่วย (G70 หรือ G20, G71 หรือ G21)
- รหัสกำหนดพิกัดงาน (G92)
- รหัสเลือกหัวกัด และเปลี่ยนหัวกัด (Tool และ G06)
- รหัสกำหนดอัตราป้อน (Feed, G94 และ G95)
- รหัสกำหนดอัตราหมุนของแกนหมุนและควบคุม (Speed, M03, M04)
- รหัสฟังก์ชันเปิดเตล็ด (M00-M02, M07-M09 และ M30)

#### 2. รหัสคำสั่งการชดเชย (Compensation) และออฟเซต (Offset)

- รหัสชดเชยพิกัดงาน (G54-G59)
- รหัสชดเชยเส้นผ่าศูนย์กลางหัวกัด (G40-G42)
- รหัสออฟเซตความยาวหัวกัด (G43, G44 และ G49)

### 3. รหัสคำสั่งวัฏจักรคงที่ Fixed Cycle

- รหัสกำหนดวัฏจักรคงที่แบบมาตรฐาน (G80-G89)
- รหัสกำหนดวัฏจักรคงที่แบบพิเศษ (G73, G74 และ G76)
- รหัสกำหนดวัฏจักรที่ผู้ใช้กำหนด

### 4. มาโครและโปรแกรมแบบซับรูทีน (Macro and Subroutine Programming)

ฟังก์ชันนี้จะมีอยู่ในเฉพาะเครื่องซีเอ็นซีรุ่นใหม่ๆ จะมีคุณสมบัติในการกำหนดตัวแปรเพื่อที่จะใช้ในการคำนวณและตัดสินใจที่แบบตรรกศาสตร์ (Logic) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะทำให้เครื่องซีเอ็นซีมีความสามารถในการกระทำซ้ำๆ ได้

### 5. รูปแบบการโปรแกรมแบบขั้นสูง (Advanced Programming Features)

ในส่วนนี้จะเป็นรูปแบบในการเขียนโปรแกรมหรือรหัสควบคุมเครื่องซีเอ็นซีและซีเอ็นซีที่สามารถช่วยลดเวลาในการเขียนโปรแกรมและช่วยลดขนาดของโปรแกรมด้วยโคออร์ดิเนตอ้างอิง

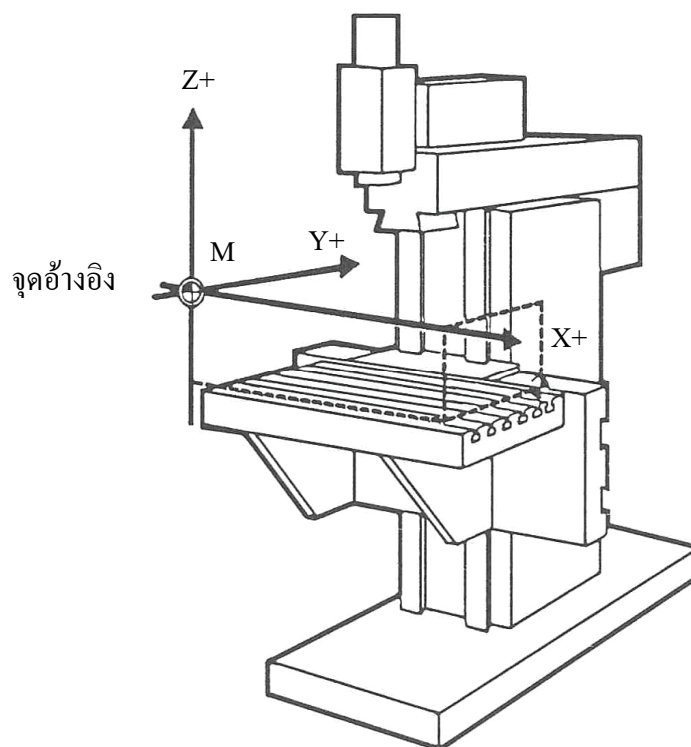
#### 1.8 โคออร์ดิเนตอ้างอิง (Reference coordinate)

ในการเขียนโปรแกรมรหัสควบคุมจำเป็นต้องมีจุดอ้างอิง (Reference Points) อย่างน้อยหนึ่งจุด ที่ใช้ในการคำนวณหาจุดต่าง ๆ บนชิ้นที่ต้องการ ซึ่งจะประกอบด้วยจุดอ้างอิงหรือจุดศูนย์ของเครื่อง จุดอ้างอิงของการเลื่อนกลับ จุดอ้างอิงของโปรแกรม และจุดอ้างอิงของชิ้นงาน ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังต่อไปนี้

##### ก) จุดอ้างอิงของเครื่องจักร (Machine Reference Point)

จุดกำเนิดของเครื่องหรือเรียกว่า Machine home reference จุดนี้จะเป็นตำแหน่งเริ่มต้นของระบบโคออร์ดิเนตของเครื่องจักรซีเอ็นซี เราใช้จุดอ้างอิงของเครื่องนี้สำหรับการยึดจับชิ้นงานบนเครื่อง กล่าวคือการจับยึดชิ้นงานบนเครื่องนั้น จะต้องให้สัมพันธ์กันระหว่าง

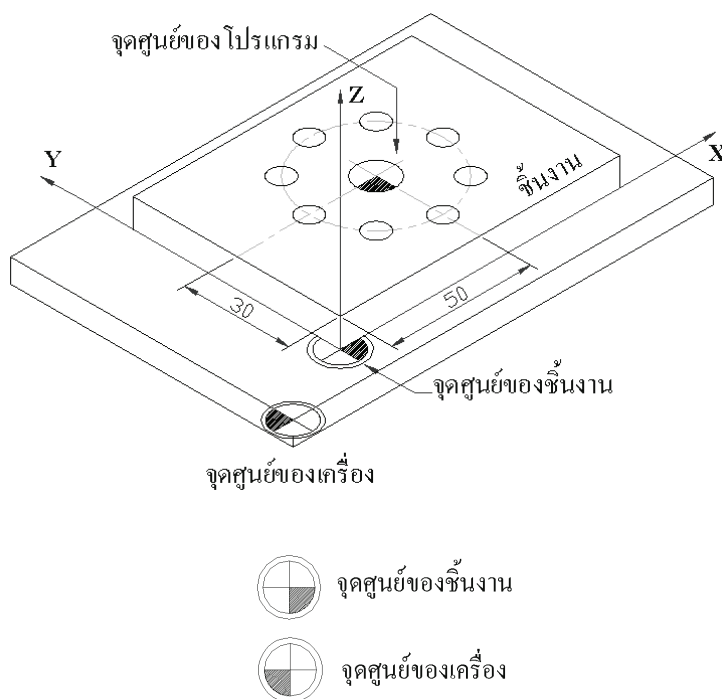
โคออร์ดิเนตของชิ้นงานกับโคออร์ดิเนตของเครื่อง จุดอ้างอิงของเครื่องนี้จะเป็ตำแหน่งที่ถูกกำหนดโดยบริษัทที่ผลิตเครื่องเอ็นซีหรือซีเอ็นซี และไม่สามารถเปลี่ยนแปลงตำแหน่งนี้ได้



ภาพที่ 31 แสดงตำแหน่งจุดศูนย์หรือจุดอ้างอิงของเครื่อง

ข) จุดอ้างอิงของโปรแกรม (Program reference point : p)

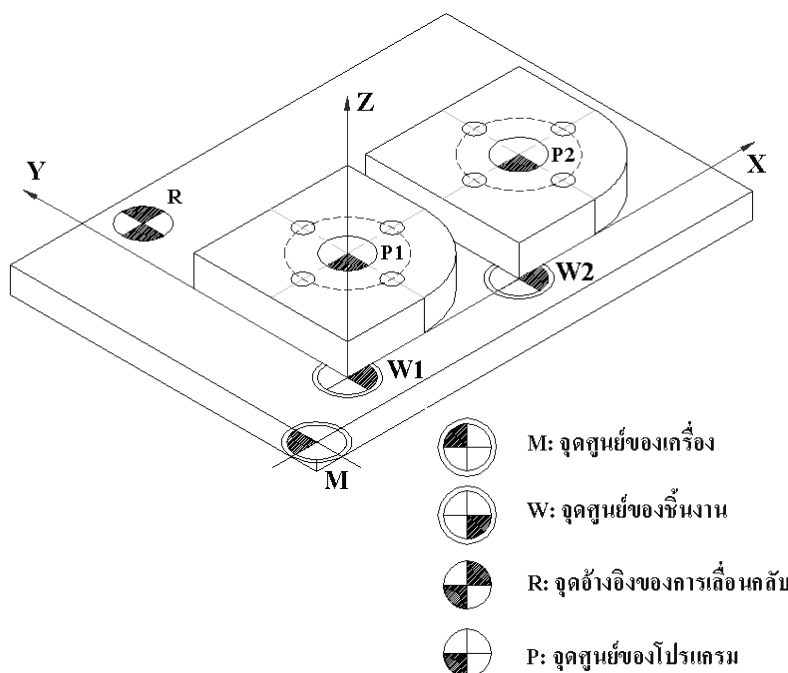
จุดนี้จะถูกกำหนดโดยผู้เขียนแบบรูปที่ต้องการหรือจากผู้เขียนโปรแกรมรหัสควบคุม โดยจุดนี้จะเป็นจุดกำเนิดของแบบหรือภาพต้นแบบที่ต้องการ โดยจุดนี้จะใช้เป็นจุดอ้างอิงในการคำนวณจุดต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกล โดยปกติค่าโคออร์ดิเนตในระบบโคออร์ดิเนตของเครื่องจะไม่สามารถนำไปใช้งานสำหรับการเขียนโปรแกรมได้ ทั้งนี้เนื่องจากจะมีความแตกต่างกันกับระบบโคออร์ดิเนตของชิ้นงาน ในกรณีนี้ผู้วิจัยจำเป็นต้องเลือกจุดที่มีความสะดวกสำหรับให้เป็นจุดอ้างอิงหรือจุดศูนย์ของโปรแกรม ซึ่งถ้าเป็นชิ้นงานที่ง่าย ๆ การกำหนดจุดอ้างอิงของโปรแกรมมักจะเป็นจุดเดียวกันกับจุดอ้างอิงของชิ้นงาน แต่ถ้าชิ้นงานมีความสลับซับซ้อน ในบางครั้งอาจจำเป็นต้องใช้จุดอ้างอิงของโปรแกรมและจุดศูนย์ของชิ้นงานให้มีความแตกต่างกัน ตัวอย่างการกำหนดจุดอ้างอิงของโปรแกรมแสดงดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 การกำหนดจุดอ้างอิงของโปรแกรม

#### ค) จุดอ้างอิงของงาน (Work Reference Point)

จุดอ้างอิงหรือจุดศูนย์กลางของชิ้นงาน (Work zero point) เราจะใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการกำหนดระบบโคออร์ดิเนตของชิ้นงาน โดยที่เราสามารถเลือกตำแหน่งตรงไหนก็ได้บนโต๊ะชิ้นงาน โดยการป้อนค่าเข้าไปในขั้นตอนการปรับตั้ง เช่น ในการกัดชิ้นงาน 1 แบบบนเครื่องซีเอ็นซี สามารถกัดหรือเจาะชิ้นงานได้หลายชิ้น โดยที่ติดตั้งชิ้นงานเพียงครั้งเดียว โดยแต่ละชิ้นงานจะต้องมีจุดอ้างอิงของแต่ละชิ้นและจะต้องสัมพันธ์กับจุดอ้างอิงของโปรแกรมด้วย ซึ่งจุดอ้างอิงนี้ก็คือจุดอ้างอิงของงาน ตัวอย่างการกำหนดจุดอ้างอิงของชิ้นงานแสดงดังภาพที่ 33



ภาพที่ 33 ตัวอย่างการกำหนดจุดอ้างอิงสำหรับงานกัด

### 1.9 รหัสของเอ็นซี (NC codes)

จะใช้กำหนดหน้าที่การทำงานของเครื่องจักร โดยอาศัยชุดควบคุมเครื่อง ในโปรแกรมเอ็นซีจะใช้รหัสอยู่ 3 ชนิดคือ หมายเลข (Numbers), ตัวอักษร (Character) และใช้สัญลักษณ์ (symbols) โดยในแต่ละรหัสนี้จะมีขนาดเท่ากับ 8 บิต ซึ่งได้อธิบายผ่านมาแล้ว สำหรับในหัวข้อนี้จะได้อธิบายเกี่ยวกับรหัสของโปรแกรมเอ็นซี ซึ่งประกอบไปด้วย

1. ตัวอักษร (Character) ในโปรแกรมเอ็นซีนี้จะใช้ตัวอักษรเพื่อกำหนดลักษณะการทำงานหรือกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ โดยตำแหน่งของตัวอักษรนี้จะกำหนดไว้ที่ด้านหน้าของแต่ละคำ (word) ตัวอักษรที่กำหนดโดยมาตรฐาน EIA RS-274 B แสดงดังตารางที่ 2

2. คำ (Word) หมายถึงกลุ่มของตัวอักษรหรือสัญลักษณ์ที่ประกอบกันขึ้นเพื่อใช้กำหนดเงื่อนไขในการทำงานของเครื่องจักรซีเอ็นซี เช่น

N10 หมายถึงหมายเลขบรรทัดของโปรแกรม

G01 หมายถึงการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงตามอัตราป้อน

X1.0 หมายถึงระยะทางที่เคลื่อนที่ไปตามแนวแกน X เท่ากับ 1.0 หน่วย

3. บล็อก (Block) หมายถึงการนำจำนวนคำ (Word) หลาย ๆ คำมาประกอบกันเป็นคำสั่งควบคุมการทำงานของเครื่องจักรซีเอ็นซี ยกตัวอย่าง เช่น

N01 G90 G80 G17                      บล็อกที่ประกอบด้วยจำนวนคำ 4 คำ

N10 T01 M06                              บล็อกที่ประกอบด้วยจำนวนคำ 3 คำ

N15 G01 X2.0 Y1.5 F7.5              บล็อกที่ประกอบด้วยจำนวนคำ 5 คำ

4. โปรแกรม (program) หมายถึง การรวมกันของบล็อกหลาย ๆ บล็อกที่เขียนขึ้นตามลำดับขั้นตอนในการตัดเฉือนชิ้นงานตามที่เรากำหนดไว้ในโปรแกรมนั้น จะประกอบด้วยคำสั่งเกี่ยวกับการทำงานและคำสั่งช่วยในการทำงาน ตัวอย่างคำสั่งในการทำงาน เช่น คำสั่งเคลื่อนที่เร็ว (G00) คำสั่งเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง (G01) เป็นต้น ส่วนคำสั่งช่วยในการทำงานนั้นจะประกอบไปด้วยตำแหน่งที่เคลื่อนที่ของเครื่องมือตัด (Coordinate) ความเร็วรอบของเพลาจับยึดเครื่องมือตัด (Spindle speed) อัตราป้อน (feed rate) การชดเชยรัศมีของเครื่องมือตัด (Cutter radius compensation) เป็นต้น

#### 1.10 จุดอ้างอิงของการเคลื่อนกลับ (Reference return point: R)

ตำแหน่งจุดอ้างอิงของการเคลื่อนกลับนี้จะถูกกำหนดไว้ก่อนล่วงหน้า ซึ่งจะมีความเที่ยงตรงในการเคลื่อนที่ของแนวแกนเนื่องจากใช้ลิ้มิตสวิตช์ (Limit switches) เป็นตัวควบคุมระยะการเคลื่อนที่ เราใช้จุดอ้างอิงของการเคลื่อนกลับนี้ช่วยในการปรับค่าและควบคุมการเคลื่อนที่ของโต๊ะงานหรือการหมุนของเพลาเครื่องจักร โดยที่ค่าโคออร์ดิเนตของจุดอ้างอิงนี้จะมีขนาดคงเดิม และเราจะทราบค่าตัวเลขที่แน่นอน ซึ่งปกติจะมีค่าที่สัมพันธ์กับจุดศูนย์ของเครื่องจักร ตัวอย่างตำแหน่งของจุดอ้างอิงแสดงดังภาพที่ 31 และภาพที่ 32

ตารางที่ 2 การกำหนดลักษณะการใช้งานของตัวอักษรตามมาตรฐานของ EIA RS-274 B

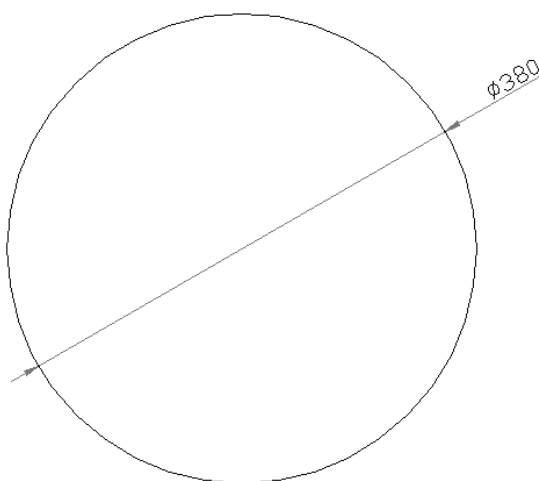
| ตัวอักษร | ความหมาย                                                                          |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| A        | การหมุนรอบแกน X                                                                   |
| B        | การหมุนรอบแกน Y                                                                   |
| C        | การหมุนรอบแกน Z                                                                   |
| D        | (1) การหมุนรอบแนวแกนพิเศษ, (2) อัตราป้อนที่สาม                                    |
| E        | (1) หมุนรอบแกนพิเศษ, (2) อัตราป้อนที่สอง                                          |
| F        | อัตราป้อน                                                                         |
| G        | การจัดเตรียมการทำงาน                                                              |
| I        | (1) ขนาดรอบแนวแกน X ของจุดศูนย์กลางวงกลม<br>(2) ระยะพิตช์ของเกลียวที่ขนานแนวแกน X |
| J        | (1) ขนาดรอบแนวแกน Y ของจุดศูนย์กลางวงกลม<br>(2) ระยะพิตช์ของเกลียวที่ขนานแนวแกน Y |
| K        | (1) ขนาดรอบแนวแกน Z ของจุดศูนย์กลางวงกลม<br>(2) ระยะพิตช์ของเกลียวที่ขนานแนวแกน Z |
| M        | คำสั่งช่วยทำงาน                                                                   |
| N        | หมายเลขบรรทัดในโปรแกรม                                                            |
| P        | การเคลื่อนที่ของแนวแกนที่ 3 ที่ขนานกับแนวแกน X                                    |
| Q        | การเคลื่อนที่ของแนวแกนที่ 3 ที่ขนานกับแนวแกน Y                                    |
| R        | การเคลื่อนที่ของแนวแกนที่ 3 ที่ขนานกับแนวแกน Z                                    |
| S        | ความเร็วของของเพลajibเครื่องมือตัด                                                |
| T        | เรียกเครื่องมือตัด                                                                |
| U        | การเคลื่อนที่ของแนวแกนที่ 2 ที่ขนานกับแนวแกน X                                    |
| V        | การเคลื่อนที่ของแนวแกนที่ 2 ที่ขนานกับแนวแกน Y                                    |
| W        | การเคลื่อนที่ของแนวแกนที่ 2 ที่ขนานกับแนวแกน Z                                    |
| X        | การเคลื่อนที่ของแนวแกน X                                                          |
| Y        | การเคลื่อนที่ของแนวแกน Y                                                          |
| Z        | การเคลื่อนที่ของแนวแกน Z                                                          |

## 2. พื้นฐานของคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและช่วยในการผลิต

ในกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ได้มีการเปลี่ยนแปลงและพัฒนาเป็นอย่างมากโดยมีเทคโนโลยีที่มีชื่อว่า คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design, CAD) และ คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (Computer Aided Manufacturing, CAM) เกิดขึ้นได้มาปฏิวัติวิธีการและดำเนินการเกี่ยวกับการออกแบบชิ้นส่วนทางด้านเครื่องกลไฟฟ้าและวิธีการในการผลิต โดยเทคโนโลยีนี้ได้นำเอาระบบคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการออกแบบตลอดจนกระบวนการผลิต ในส่วนของ CAD เป็นเทคนิคของการสร้างโปรแกรมควบคู่กับเทคโนโลยีของฮาร์ดแวร์ประกอบกัน เพื่อที่จะสร้างภาพทั้งในลักษณะ 2 มิติ 3 มิติ และการนำเสนอภาพออกแบบที่เลียนแบบของจริง CAD สามารถจำแนกตามวิธีการขึ้นรูปแบบจำลอง (Model) ได้ดังนี้

### 2.1 แบบจำลองโครงลวด (Wire Frame Model)

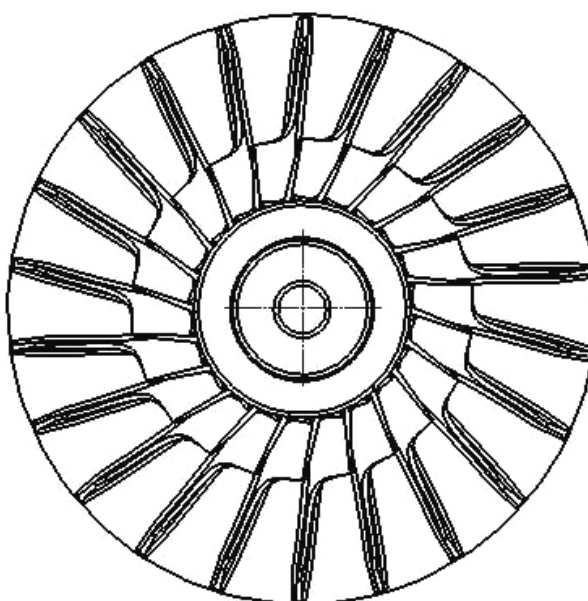
แบบจำลองโครงลวดเป็นแบบจำลองที่ถูกนำเสนอด้วยเส้นตรง เส้นโค้งวงกลม หรือเส้น (Spline) เป็นต้น นำมาวาดเป็นเส้นโครงลวดตามแบบที่ต้องการ โดยแบบจำลองโครงลวด จะไม่มีผิวหน้าของแบบที่วาดขึ้น มีแต่เพียงเส้นขอบของแบบ ซึ่งสามารถวาดได้ทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ การสร้างแบบจำลองโครงลวดจะค่อนข้างง่ายและไม่ซับซ้อน ประโยชน์ของแบบจำลองโครงลวดก็ค่อนข้างจำกัด แต่ไม่สามารถนำมาช่วยในการผลิตได้ เช่น งานไวร์ อีดีเอ็ม (Wire EDM) เป็นต้น



ภาพที่ 34 ตัวอย่างภาพที่วาดขึ้นจากแบบจำลองโครงลวด

## 2.2 แบบจำลองรูปผิว ( Surface Model)

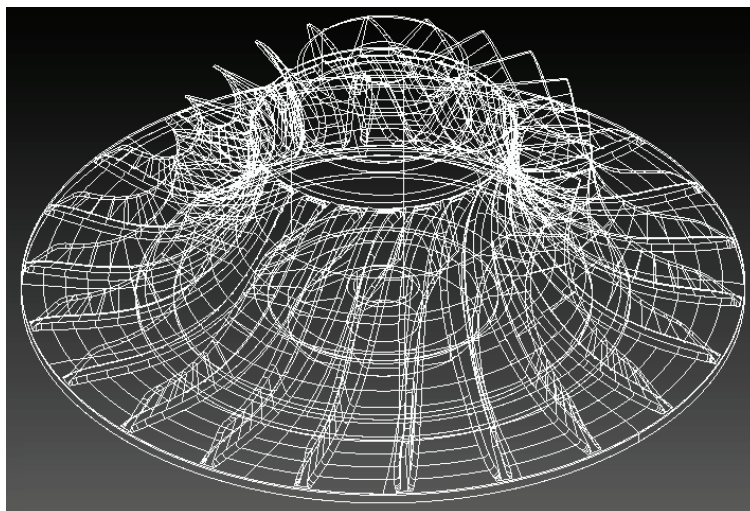
แบบจำลองรูปผิวจะมีรายละเอียดที่สมบูรณ์เหมือนวัตถุจริงมากกว่าแบบจำลองโครงกลวงและมีความซับซ้อนมากขึ้น เนื่องจากการสร้างเส้นขอบและผิวของวัตถุที่วาดขึ้น เนื่องจากการสร้างเส้นขอบและผิวของวัตถุที่วาดขึ้น เมื่อแบบจำลองแบบนี้มีผิวก็จะสามารถทำการลงสีและให้แสงเงาได้ (Shading) เพื่อตรวจสอบดูชิ้นงานได้ง่ายขึ้น ดังแสดงแบบชิ้นที่วาดแบบจำลองรูปผิวดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 ตัวอย่างแบบจำลองรูปผิวจะมีรายละเอียดที่สมบูรณ์

## 2.3 แบบจำลองโซลิด (Solid Model)

แบบจำลองโซลิดจะมีรายละเอียดเพิ่มขึ้นจากแบบจำลองรูปผิว โดยแบบจำลองโซลิดไม่เพียงจะมีเส้นขอบและผิววัตถุแล้ว แต่ยังมีเนื้อในวัตถุอีกด้วย ดังนั้นแบบจำลองโซลิดจะเป็นแบบจำลองที่มีคุณสมบัติที่บึกและตัน ซึ่งคุณสมบัตินี้สามารถนำมาช่วยในการคำนวณค่าทางวิศวกรรมได้โดยตรง เช่น มวล (Mass) ค่าความหนาแน่น (Density) ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) เป็นต้น ภาพที่ 36 ภาพแสดงตัวอย่างแบบจำลองโซลิด



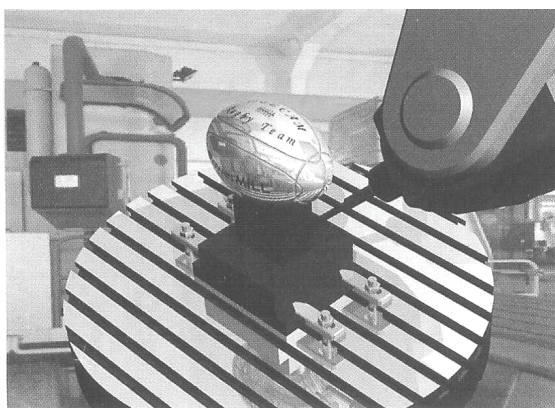
ภาพที่ 36 ภาพแสดงรูปภาพที่วาดขึ้นจากแบบจำลองโซลิด

ในส่วนของ CAM เป็นซอฟต์แวร์ที่เกิดจากการพัฒนาเครื่องจักร เครื่องมือ จากการใช้แรงงานคนมาควบคุมให้เครื่องจักรทำงานกันอย่างอัตโนมัติ ดังนั้นในการควบคุมเครื่องจักรจำเป็นต้องใช้รหัสในการควบคุม CAM จะเข้ามาช่วยในการแปลงข้อมูลจาก CAD มาเป็นรหัสที่ใช้ในการควบคุมเครื่องจักร เครื่องจักรที่ถูกควบคุมจะเป็นจำพวกเครื่องเอ็นซี (NC Machine) และเครื่องซีเอ็นซี (CNC Machine) CAM สามารถแบ่งตามการประยุกต์ใช้งานหรือตามประเภทของเครื่องจักรที่ใช้งาน ได้แก่ งานกลึง (Turning) งานกัด (Milling) งานไวร์คัท (Wire Cut) เป็นต้น CAM ผู้ผลิตบางรายไม่ได้มีการพัฒนา CAD มาด้วยกัน ดังนั้นจะต้องรับข้อมูลจาก CAD ของผู้ผลิตอื่น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดปัญหาในการแลกเปลี่ยนข้อมูลกันระหว่าง CAD กับ CAM ดังนั้นจึงได้มีการสร้างมาตรฐานการแลกเปลี่ยนข้อมูลขึ้น โดยมีมาตรฐานดังต่อไปนี้ IGES (Initial Graphics Exchange Specification) PDDI (Product Definition Data Interface) SET (Standard d'E Change dt de Transfrt) DXF (Drawing Exchange Format) เป็นต้น แต่ก็มี CAD/CAM ที่สร้างจากผู้ผลิตเดียวกันก็จะไม่เกิดปัญหาในการแลกเปลี่ยนข้อมูล

### 3. โปรแกรม Power Mill

ในปัจจุบันมีบริษัทผู้ผลิตซอฟต์แวร์หลายบริษัทที่ได้พัฒนา CAD บนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล และหนึ่งในบริษัทเหล่านั้นก็คือ บริษัท เดลแคม (Delcam Thailand Co., Ltd) ซึ่งเป็นผู้ผลิตซอฟต์แวร์ โปรแกรม Power Mill ซึ่งโปรแกรม Power Mill เป็นซอฟต์แวร์ CAD และ CAM ดังนั้น โปรแกรม Power Mill ออกแบบให้ใช้งานง่ายขึ้นกว่าเดิม แม้ว่าจะมีวิธีการกัดงานมากขึ้นกว่าเดิมก็ตาม โดยได้พัฒนาเพิ่มวิธีการกัดงาน 5 แกนให้หลากหลาย ทดสอบด้วยการจำลองกัดงานรุ่นใหม่ที่เพิ่มเข้ามา ทั้งยังมีจุดเด่นของวิธีการสั่งงานด้วยโปรแกรมแนวอัตโนมัติ ที่ปรับปรุงการกัดหายแบบ (Rest Roughing) การตั้งค่าความหนาเพื่อเนื้อในบริเวณผิวงานต่างๆ ที่เท่ากันได้และการตรวจสอบป้องกันการชนที่สมบูรณ์แบบมากยิ่งขึ้น

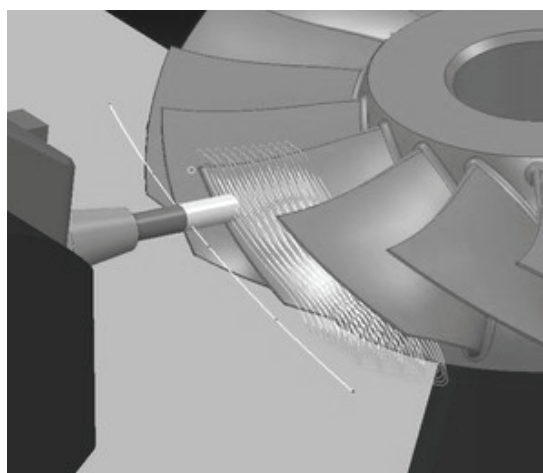
การกัดงาน 5 แกนแบบต่อเนื่อง (Continuous 5 Axis Machine) ซึ่งได้เพิ่มการป้องกันการเคลื่อนที่เกินพิกัดเครื่องในชั้นที่สองเพื่อความปลอดภัยโดยการวิเคราะห์จุดสัมผัสของมิดกัต ต่องานเพื่อความแน่นอนที่มีดกัตจะสัมผัสกับงานเท่านั้น และป้องกันไม่ให้หัวจับมิดกัตถูกับชิ้นงาน โดยการควบคุมความเร็วเดินป้องกันกัดตามแนวที่มีดสัมผัส แทนการใช้ความเร็วในการหมุนตัวของปลายมิดซึ่งเป็นเรื่องที่สำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะการกัดวัสดุที่กัดยาก ๆ ซึ่งมักพบในอุตสาหกรรมอากาศยาน โดยมีการพัฒนาเจาะจงในเรื่องของการกัดงานแบบใช้ Drive Surface เป็นเทคนิคพิเศษในการกัดงาน 5 แกนของ Power Mill ให้ใช้ได้อย่างคล่องตัวและสามารถควบคุมสถานะการกัดงานดีขึ้น และที่สำคัญช่วยบังคับไม่ให้หัวกัดงานเคลื่อนที่ในวงกว้างเกินไปแต่เคลื่อนที่ตามมุมคงที่กับผิวงานเสมอ ดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 การกัดงาน 5 แกนแบบต่อเนื่อง

ที่มา : Delcam (Thailand) Co., Ltd., 2548

การตรวจสอบและการจำลองการกัดงาน (Verification and Simulation) การตรวจสอบป้องกันการชน (Collision Checking) มีการพัฒนาการกำหนดลักษณะมิดและวิธีการตรวจสอบป้องกันการชนใหม่ใน โปรแกรม Power Mill โดยมีทางเลือกในการจำลองทางเดินของหัวจับมิดกัดได้ และระบุลักษณะข้อแตกต่างของมิดและด้ามจับ Power Mill ขอมให้ผู้สร้างขอบเขต เพื่อป้องกันการชนครอบคลุมพื้นที่เฉพาะของโมเดลงาน เช่น ผิวเอียงชันๆ หรือโดยรอบ Clamp ยึดงาน ก่อนที่จะมีการคำนวณทางเดินมิด ซึ่งจะดีกว่าการคำนวณทั้งหมดแล้วมาเลือกตัดบริเวณที่คาดว่าจะชนทิ้งไป ส่วนการจำลองการกัดงาน (Simulation) โปรแกรม Power Mill นำเอาโมเดลของเครื่องจักรมาร่วมจำลองการกัดงานภายในโปรแกรมด้วย ซึ่งสามารถเลือกที่จะสร้างโมเดลของเครื่องรุ่นที่ตนเองใช้เก็บไว้เพิ่มเติมได้ การจำลองการกัดงานในลักษณะนี้จะทำให้เห็นเหตุการณ์จริงทั้งหมดที่จะเกิดขึ้นเมื่อทำการกัดงานจริงและสามารถเปรียบเทียบวิธีการกัดงานแบบต่างๆ เพื่อเลือกก่อนการกัดงานจริง สิ่งนี้จะเป็นประโยชน์ที่สำคัญสำหรับผู้ใช้เครื่อง 5 แกนในภาพจำลองจะชี้ให้เห็นหากจะเกิดการกัดงานเกินพิสัยของเครื่อง หรือหากจะมีการชนเกิดขึ้น การจำลองการกัดงานจะช่วยทำให้แน่ใจว่า ได้ผลสูงสุดจากเครื่องจักร



ภาพที่ 38 ตัวอย่างภาพจำลองการกัดงานไบพัตด้วยเครื่อง 5 แกน

แบบชุดคำสั่งซ้ำๆ (Templates) ในแบบรับคำสั่งแนวใหม่มีการทำ (Templates) ไว้ให้ใช้เพื่อสนับสนุนกรณีที่ทำงานที่มีลักษณะเดิมๆ ช่วยสร้างทางเดินมิดให้เสร็จเร็วขึ้น รวมไปถึงการกัดงานใหม่ๆ (New Machine Options) การกัดงานกับเครื่อง 3 แกนแบบใหม่ๆ ให้เลือกใช้เพิ่มขึ้นมาก และที่สำคัญที่สุด คือ การปรับปรุงการกัดหยาบแบบ Rest Roughing ซึ่งเป็นการกัดเฉพาะเนื้อส่วนที่เหลือทิ้งไว้จากการกัดครั้งก่อน โดยได้นำเอาเรื่องของ Stock Model เข้ามาใช้เพื่อคำนวณได้เร็ว

และเที่ยงตรงมากขึ้นทำให้ได้แน่ใจได้ว่าจะกัดเนื้องานออกได้มากที่สุดสำหรับมีดกัดแต่ละขนาด  
 เรื่องนี้จะมีประโยชน์อย่างยิ่ง เมื่อมีการกัดงานที่ต้องใช้มีดกัดขนาดเล็กๆ หลายอันกัดต่อเนื่องกัน  
 และสามารถตั้งค่าความหนาเผื่อเนื้อได้ต่างกันในแต่ละกลุ่มผิวหรือกลุ่มผิวงานแบบเดียวกับที่ตั้งค่า  
 ได้ต่างกันบนแกนและบนแนวรัศมีได้

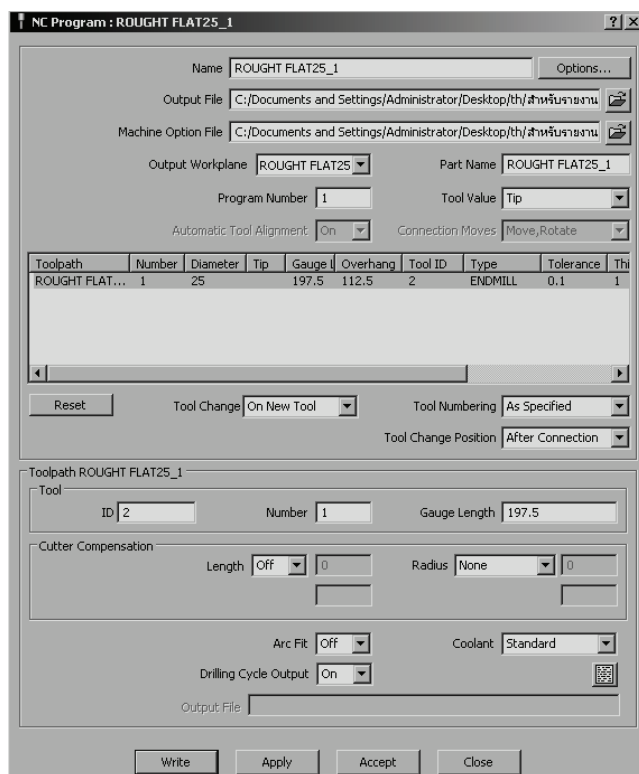
#### 4. การคำนวณหาทางเดินของมีดตัดเนื้องาน

โปรแกรมที่ผู้วิจัยได้พัฒนาเป็นโปรแกรมช่วยในการผลิต CAM (Computer Aided Manufacturing) โดยโปรแกรม Power mill ซึ่งใช้สำหรับงานกัด (Milling) ในลักษณะ 5 แกนที่เป็น  
 รูปผิว (Surface) ด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีห้าแกน CNC five Axis Milling Machine ของ FANUC  
 Model

การเขียนโปรแกรมเอ็นซีนี้จะเริ่มต้นจากการสร้างรูปทรงเรขาคณิตของชิ้นงานด้วย  
 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบหรือแคด (CAD : Computer Aided Design) หลังจากนั้นก็จะ  
 เป็นการเลือกใช้เครื่องมือตัดและข้อมูลของการตัดเนื้องานที่เหมาะสมกับเครื่องมือตัดแต่ละชนิด ซึ่ง  
 ในโปรแกรมแคด/แคมนั้นเราสามารถที่จะกำหนดข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้ได้ เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนของ  
 การกำหนดรูปทรงเรขาคณิตของชิ้นงานและการเลือกใช้เครื่องมือตัดแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการ  
 กำหนดทางเดินของเครื่องมือตัด (Tool path) เพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน โดยในขั้นตอนนี้โปรแกรมแคด/  
 แคมจะมีวิธีการจำลองการขึ้นรูปชิ้นงาน (Simulation) เพื่อให้เราสามารถมองเห็นภาพพจน์ได้  
 ชัดเจนมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นการช่วยตรวจสอบหาข้อผิดพลาดที่เกิดจากการขึ้นรูปชิ้นงานอีกด้วย

ขั้นตอนสุดท้ายของการเขียนโปรแกรมเอ็นซีด้วยแคด/แคมคือ การแปลงทางเดินของ  
 เครื่องมือตัดไปเป็นรหัสเอ็นซี (NC code) โดยในขั้นตอนนี้เรียกว่า “Postprocessor” ทั้งนี้  
 เนื่องจากรูปทรงของชิ้นงานที่สร้างจากโปรแกรมแคด/แคมนี้นี้ถูกเขียนขึ้นจากภาษาคอมพิวเตอร์  
 เช่น ภาษา APT ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแปลงให้เป็นรหัสคำสั่งที่ใช้สำหรับควบคุมเครื่องจักร  
 ซีเอ็นซี ยกตัวอย่างรหัสคำสั่งสำหรับควบคุมเครื่องจักรซีเอ็นซี เช่น G, M, S เป็นต้น ซึ่งแสดงวิธี  
 ให้เห็นจากการ Post ด้วยโปรแกรม Power Mill ดังตัวอย่างต่อไปนี้

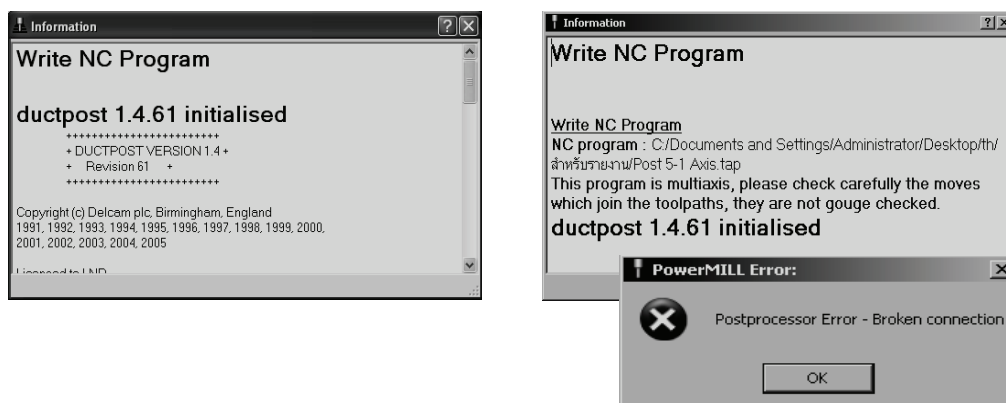
การแปลงทางเดินของเครื่องมือตัดไปเป็นรหัสเอ็นซี (NC code) โดยในขั้นตอนนี้เรียกว่า  
 “Postprocessor” ดังตัวอย่าง



ภาพที่ 39 การ Postprocessor ด้วยโปรแกรม Power Mill

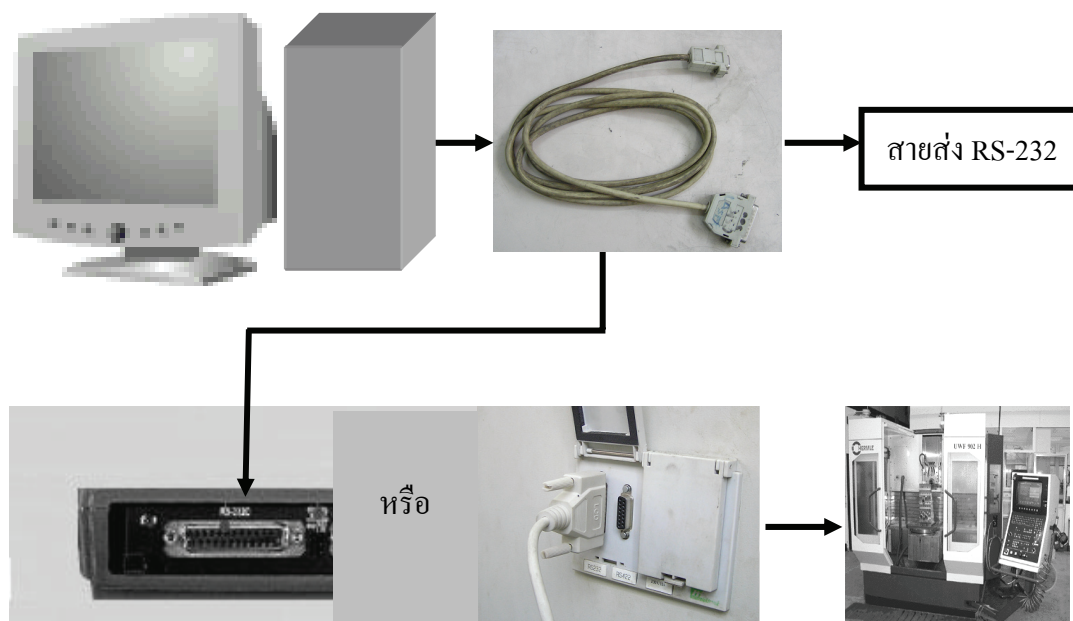
การแปลงทางเดินของเครื่องมือตัด จะมีปัญหาในการ Postprocessor ไม่สำเร็จ มีอยู่ 2 กรณี คือ

1. การคำนวณทางเดินมีดเกิดการผิดพลาด อย่างเช่น หัวจับมีดตัดเฉือนโดนชิ้นงาน
2. การเอียงมุมของมีดตัดเฉือน มีมุมเอียงมากกว่าที่เครื่องจะยอมรับได้ เป็นต้น



ภาพที่ 40 การเขียน NC Program

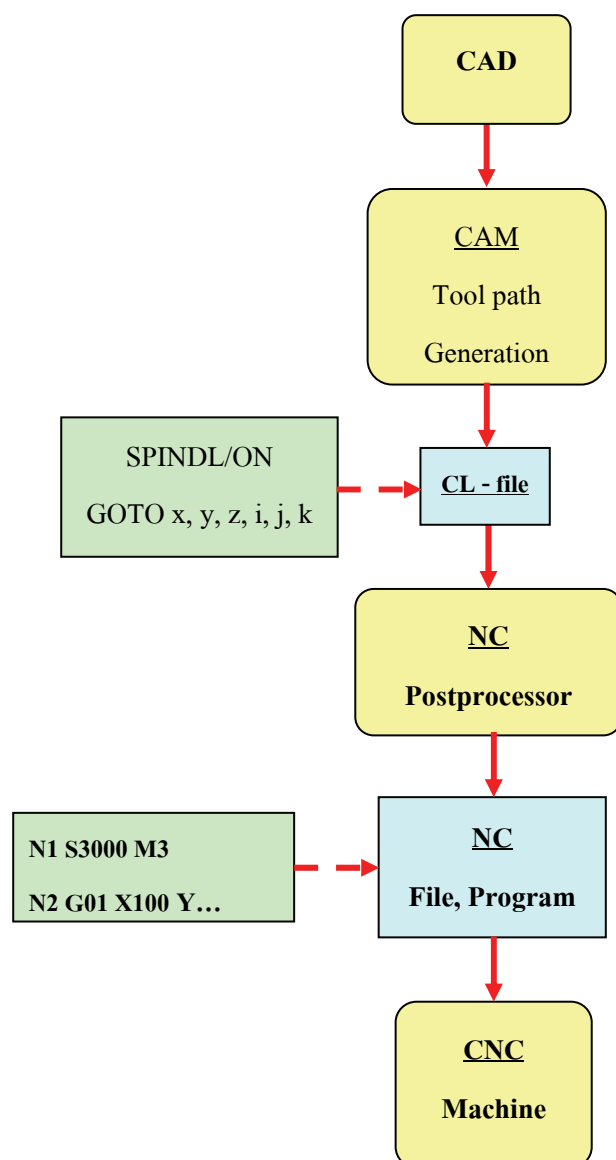
เมื่อได้โปรแกรมเอ็นซีที่ถูกต้องสมบูรณ์แล้ว โปรแกรมเอ็นซีนี้ก็จะถูกส่งโดยผ่านสายส่งข้อมูล เช่น RS-232 ไปยังเครื่องจักรซีเอ็นซีเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานต่อไป โดยในขั้นตอนนี้เราเรียกว่า คอมพิวเตอร์ช่วยผลิต (Computer - Aided Manufacturing : CAM)



ภาพที่ 41 สายส่ง RS-232

ทางเดินของมิดตัดเนื้อจะถูกเก็บในรูปแบบของ CL data-file ซึ่งจะประกอบด้วยตำแหน่งของปลายมิดตัดเนื้อ ( $X, Y, Z$ ) ใดๆ และเวกเตอร์บอกทิศทางของแกนมิดตัดเนื้อ ( $i, j, k$ ) โดยทั้ง ( $X, Y, Z$ ) และ ( $i, j, k$ ) เทียบกับจุดศูนย์กลางของชิ้นงานโดยปกติทางเดินของมิดตัดเนื้อของเครื่องกัด 3 แกน จะมีแค่ตำแหน่งของปลายมิดตัดเนื้อ ( $X, Y, Z$ ) ส่วน ( $i, j, k$ ) จะมีค่าเท่ากันตลอดโดยมีค่าเท่ากับ  $(0, 0, 1)$  เพราะแกนของมิดตัดเนื้อจะขนานกับแกน  $Z$  ตลอดเวลา

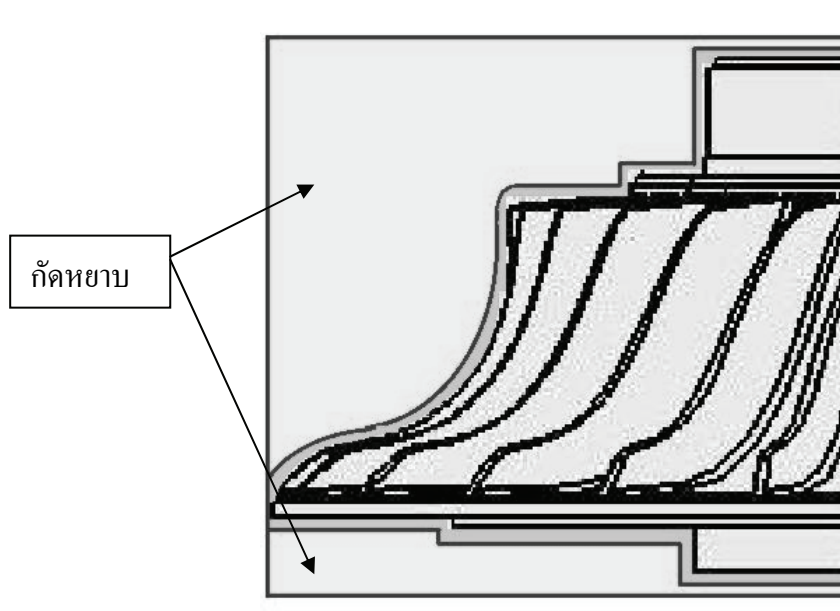
ในการใส่ค่าความยาวของมิดตัดเนื้อและตำแหน่งจุดอ้างอิงของชิ้นงานเทียบกับจุดอ้างอิงของเครื่องจักรลงใน NC – postprocessor หน้าทีของ NC – postprocessor ก็ จะทำการเปลี่ยน CL data-file ( $X, Y, Z, i, j, k$ ) ซึ่งเทียบกับจุดอ้างอิงของชิ้นงานไปเป็น ( $X, Y, Z, A, B$ ) หรือ ( $X, Y, Z, A, C$ ) หรือ ( $X, Y, Z, B, C$ ) ขึ้นอยู่กับชนิดของรูปแบบเครื่องกัด 5 แกน โดยพิกัดเหล่านี้จะเทียบกับจุดอ้างอิงของเครื่อง



ภาพที่ 42 แผนภูมิขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

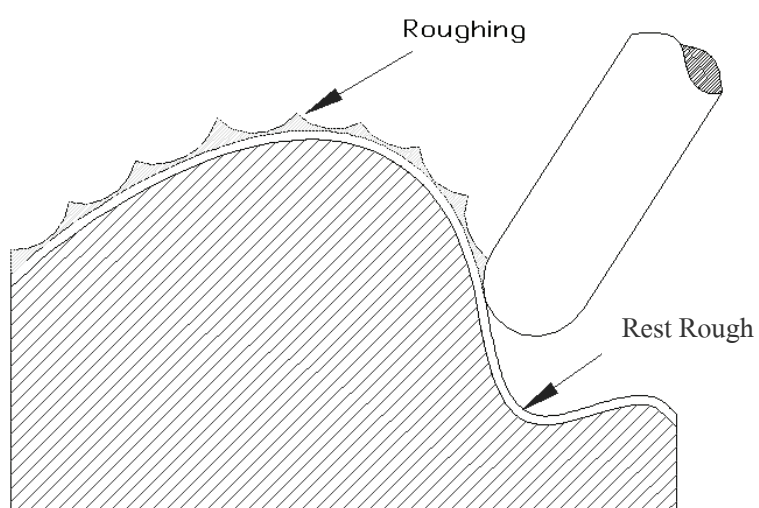
การคำนวณทางเดิมมีจะแบ่งออกเป็น 9 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่หนึ่ง จะทำการกัดผิวให้ได้ขนาดตามที่ต้องการก่อนโดยคำนวณ Tool – path แบบ Rough Milling เมื่อกัดขั้นแรกแล้วทำการกัดลดขนาด ด้วยวิธี Rest Rough Milling และขั้นสุดท้ายทำการกัดละเอียด Finishing Milling โดยการคำนวณทางเดินของมีดตัดเนื้อสรุปขั้นตอนการทำงานได้ดังนี้

1. การกัดหยาบ ( Rough Milling) โดยใช้มีดตัดเฉือน ขนาด 25 มม.



ภาพที่ 43 ลักษณะการกัดหยาบ( Rough Milling)

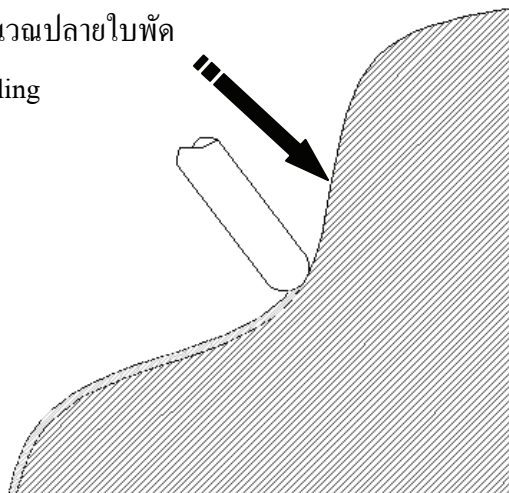
2. การกัดลดขนาด (Rest Rough Milling) โดยใช้มีดตัดเฉือน ขนาด 12 มม.



ภาพที่ 44 ลักษณะการกัดลดขนาด (Rest Rough Milling)

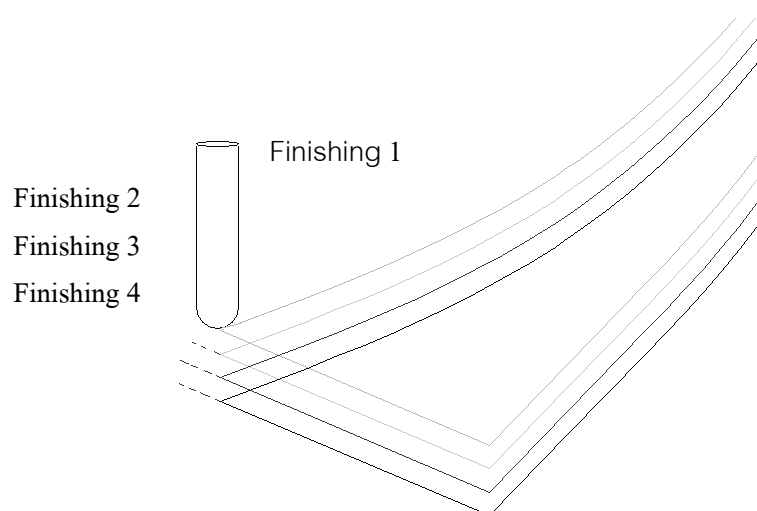
3. การกัดละเอียด (Finishing Milling) ใช้มีดตัดเฉือน ขนาด 6 มม.เพื่อกัดบริเวณปลายใบ

กัดละเอียดบริเวณปลายใบพัด  
Finishing Milling



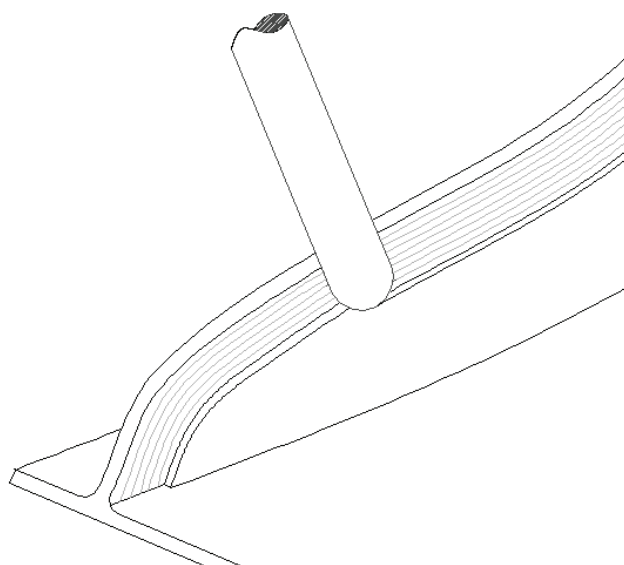
ภาพที่ 45 ลักษณะการกัดละเอียด (Finishing Milling) โดยกัดปลายใบพัด

- ที่ 1 4. การกัดละเอียด (Finishing Milling) ใช้มีดตัดเฉือน ขนาด 6 มม. เพื่อเซาะร่องใบพัดครั้ง
- ที่ 2 5. การกัดละเอียด (Finishing Milling) ใช้มีดตัดเฉือน ขนาด 6 มม. เพื่อเซาะร่องใบพัดครั้ง
- ที่ 3 6. การกัดละเอียด (Finishing Milling) ใช้มีดตัดเฉือน ขนาด 6 มม. เพื่อเซาะร่องใบพัดครั้ง
- ที่ 4 7. การกัดละเอียด (Finishing Milling) ใช้มีดตัดเฉือน ขนาด 6 มม. เพื่อเซาะร่องใบพัดครั้ง



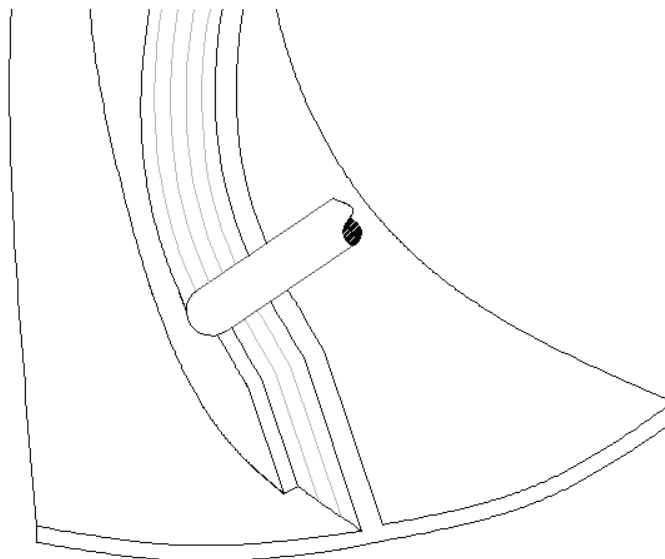
ภาพที่ 46 ลักษณะการกัดละเอียด (Finishing Milling) เพื่อเซาะร่องใบพัด 4 ครั้ง

8. การกัดละเอียด (Finishing Milling) ใช้มีดตัดเฉือน ขนาด 6 มม. เพื่อกัดใบพัดด้านขวา



ภาพที่ 47 ลักษณะการกัดละเอียด (Finishing Milling) เพื่อกัดใบพัดด้านขวา

9. การกัดละเอียด (Finishing Milling) ใช้มีดตัดเฉือน ขนาด 6 มม. เพื่อกัดใบพัดด้านซ้าย



ภาพที่ 48 ลักษณะการกัดละเอียด (Finishing Milling) เพื่อกัดใบพัดด้านซ้าย

## อุปกรณ์และวิธีการ

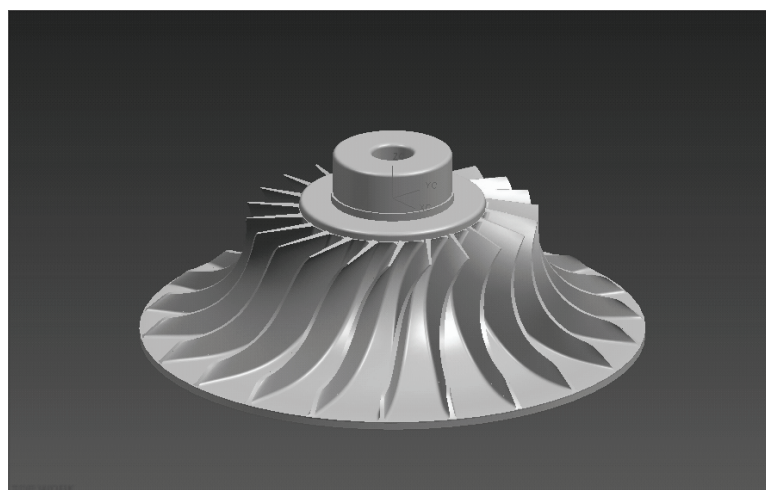
### อุปกรณ์

1. โปรแกรม Power mill ช่วยในการคำนวณทางเดินของมีดตัดเฉือนสำหรับเครื่องกัดหัวแกน
2. Demo เครื่องหัวแกน รุ่น Hermle C600U SRT450 สำหรับการ Verify Tool Path โดยใช้โปรแกรม Power mill ในการ Simulation

### วิธีการ

ขั้นตอนที่ 1. แบบจำลอง Solid Modeling ดัดแปลงมาจาก ญัฐพล และคณะ (2548)

เป็นแบบจำลองสามมิติที่ได้ทำการปรับแต่งพื้นผิวให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น รวมทั้งการสร้างใบพัดจนครบ รวมทั้งรายละเอียดของส่วนประกอบอื่นๆ ของใบพัดให้สมบูรณ์ โดยใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design, CAD) Unigraphics NX2 ดังภาพที่ 49



ภาพที่ 49 แบบจำลอง Solid Modeling ในรูปของ CAD File  
ที่มา : ญัฐพล และคณะ (2548)

## ขั้นตอนที่ 2. การคำนวณหาทางเดินของมิดตัดเนื้อด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต

เป็นการกำหนดทางเดินของเครื่องมือตัด (Tool path) เพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน โดยในขั้นตอนนี้ โปรแกรม Power mill จะมีวิธีการจำลองการขึ้นรูปชิ้นงาน (Simulation) เพื่อให้เราสามารถมองเห็น ภาพพจน์ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นการช่วยตรวจสอบหาข้อผิดพลาดที่เกิดจากการขึ้นรูปชิ้นงาน ขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้นำเอาเครื่องตัวอย่าง (Demo) มาทดสอบในการทดสอบการเดินของมิดตัดเนื้อหรือการ Verify Tool path เพื่อทดสอบความถูกต้องของการเดินในลักษณะต่างๆ หลังจากนั้นจะทำการแปลงทางเดินของเครื่องมือตัดไปเป็นรหัสเอ็นซี (NC code) โดยในขั้นตอนนี้เรียกว่า “Postprocessor” เมื่อได้โปรแกรมเอ็นซีที่ถูกต้องสมบูรณ์แล้ว โปรแกรมเอ็นซีนี้ก็จะถูกส่งโดยผ่านสายส่งข้อมูล เช่น RS-232 ไปยังเครื่องจักรซีเอ็นซีเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานต่อไป โดยในขั้นตอนนี้เราเรียกว่า คอมพิวเตอร์ช่วยผลิต (Computer Aided Manufacturing : CAM)

ขั้นตอนที่ 3. ทดสอบโปรแกรมโดยการ Simulation ด้วยโปรแกรม Power Mill ในการ Verify Tool Path ด้วยเครื่องกัดหัวแกน Demo รุ่น Hermle C600U SRT450

- นำไฟล์ที่ได้จากการคำนวณทางเดินมิดด้วยโปรแกรม Power mill ไป Post ลงในเครื่องกัด Demo ที่ต้องการ
- RUN โปรแกรม โดยใช้มิดตัดเนื้อตามขนาดต่างๆ ที่ได้คำนวณทางเดินของมิดเพื่อดูทิศทางของหัวกัดในหน้าเครื่องกัด

## ขั้นตอนที่ 4. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัยหลังจากที่โปรแกรม Power mill คำนวณหาเส้นทางของมิดตัดเนื้อแล้ว เปรียบเทียบการกัดงานจริง โดยการตรวจสอบวัดค่าพิกัดต่าง ๆ โดยใช้เครื่องมือวัดพิกัด (Coordinate Measuring Machine, CMM) รวมทั้งข้อเสนอแนะจากผลการวิจัยในการจำลองทางเดินของมิดตัดเนื้อโดยการ Simulation ด้วยโปรแกรม Power Mill

## ผลการทดลองและวิจารณ์

### 1. ขั้นตอนการ Simulation

ขั้นตอนที่ผู้วิจัยได้นำเอาเครื่องตัวอย่าง (Demo) มาทดสอบในการทดสอบการเดินของมิดตัดเนื้อหรือการ Verify Tool path เพื่อทดสอบความถูกต้องของการเดินในลักษณะต่างๆ ซึ่งเป็นเครื่องที่มีการเคลื่อนที่เชิงเส้น (Linear Motion) 3 แกน (X, Y, Z) และการเคลื่อนที่เชิงมุม (Angular Motion) เป็นเครื่องที่ใช้ในการทดสอบรหัส (G Code) ที่ได้จากการคำนวณทางเดินมิดตัดเนื้อด้วยโปรแกรม Power Mill

การกัดใบพัดด้วยเครื่องกัดห้าแกน ที่มีพื้นผิวที่ซับซ้อนและต้องการความแม่นยำมากขึ้น อาทิเช่น ใบพัดที่ใช้ในเครื่องยนต์ไอพ่น, พื้นผิวของชิ้นส่วนอุตสาหกรรมยานยนต์, อากาศยาน พื้นผิวเหล่านี้ บางครั้งไม่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยเครื่องกัด 3 แกนปกติ หรือถ้าสามารถทำได้ก็ต้องมีการขึ้นรูปหลายขั้นตอน ซึ่งทำให้ไม่สามารถกัดขึ้นรูปได้อย่างเต็มประสิทธิภาพทั้งทางด้านคุณภาพของชิ้นงาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำเอาเทคโนโลยีการผลิตด้วยเครื่องกัด 5 แกนมาใช้ในกระบวนการผลิตเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกนจะมีลักษณะเหมือนเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกนทั่วไปแต่จะมีการเพิ่มจำนวนแกนที่ทำการหมุนเข้าอีก 2 แกน การที่มีการเพิ่มจำนวนแกนเพื่อที่จะทำให้มีความสามารถในการขึ้นรูปพื้นผิวที่ยากขึ้น

การขึ้นรูปด้วยเครื่องกัด 5 แกนเราสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ

#### 1.1. การขึ้นรูปโดยตำแหน่ง (Positioning with five axis)

ในชิ้นงานบางลักษณะ อาทิเช่น เสือสูบเครื่องยนต์ เสือปั้มน้ำ โดยต้องมีกระบวนการขึ้นรูปหลายกระบวนการ เช่น การคว้านรู, การเจาะ, การปาดผิว ฯลฯ โดยมีการเอียงผิวชิ้นงานด้านต่างๆ เทียบกับแกนอ้างอิงของชิ้นงาน การขึ้นรูปประเภทนี้จะอาศัยแกนหมุนทั้ง 2 แกนของเครื่องกัด 5 แกน ชิ้นงานจะถูกยึดบนโต๊ะของเครื่องแล้วทำการหมุนชิ้นงานหรือมิดตัดเนื้อ

(Cutting Tool) ให้เอียงทำมุมสัมผัสตามแบบที่ต้องการ จากนั้นจะคงตำแหน่งนั้นไว้ แล้วเริ่มทำกระบวนการต่างๆ เช่น ปาดผิว, เจาะรู, คว้านรู ฯลฯ โดยอาศัยเฉพาะการเคลื่อนที่ของ แกนเชิงเส้นทั้ง 3 แกนเท่านั้น

ด้วยเหตุนี้ทำให้เราสามารถทำการขึ้นรูปชิ้นงานได้โดยการจับยึดชิ้นงานเพียงครั้งเดียว ทำให้ลดเวลาในการผลิต รวมทั้งยังทำให้ค่าความผิดพลาดในการผลิตลดน้อยลงด้วย จะเห็นได้ว่าการ ขึ้นรูปประเภทนี้ไม่จำเป็นจะต้องให้แกนทั้ง 5 เคลื่อนที่สัมผัสพร้อมกันตลอดเวลา ด้วยเหตุนี้ความ ซับซ้อนของการทำโปรแกรมและราคาของชุดควบคุมจะน้อยกว่าการขึ้นรูปอีกแบบหนึ่ง ดังจะได้ กล่าวในหัวข้อต่อไป

## 1.2 การขึ้นรูปบนพื้นผิวโค้ง (Profiling with five axis)

ลักษณะของงานที่ใช้การขึ้นรูปบนพื้นผิวโค้งด้วยเครื่องกัด 5 แกน เช่น ใบพัดสำหรับ เครื่องยนต์ไอพ่น หรือ โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า, พื้นผิวของชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์, อากาศยาน โดยพื้นผิวเหล่านี้จะมีความซับซ้อนทางสมการคณิตศาสตร์มาก หรือเป็นพื้นผิวที่ Undercut คือไม่สามารถขึ้นรูปได้โดยเครื่องกัด 3 แกน การขึ้นรูปแบบนี้ทั้งชิ้นงานและมีดตัดเฉือน จะทำการเคลื่อนที่สัมผัสกันโดยอาศัยแกนทั้ง 5 เคลื่อนที่พร้อม ๆ กัน ตามตำแหน่งของจุดและมุม เอียงของชิ้นงานและมีดตัดเฉือนบนพื้นผิวที่จะทำการขึ้นรูป จะเห็นได้ว่าการคำนวณหา ตำแหน่งเหล่านี้จำเป็นต้องใช้ Software ช่วยในการคำนวณ รวมถึงชุดควบคุมการเคลื่อนที่ของแกน จะต้องมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นเช่นกัน

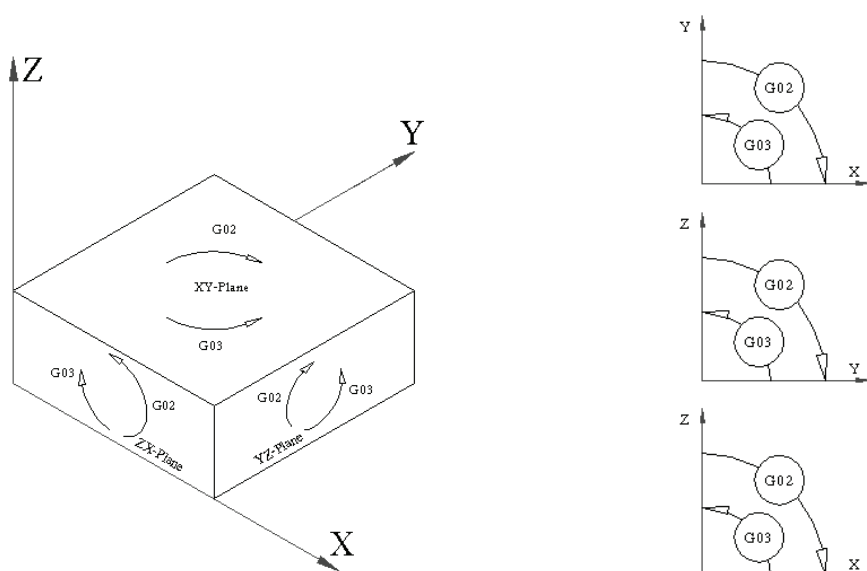
### ตารางที่ 3 คำสั่งการเคลื่อนที่ในแนวเส้นโค้ง

| รายการข้อมูล                              | คำสั่ง  | หมายเหตุ                                 |
|-------------------------------------------|---------|------------------------------------------|
| การเลือกระนาบของการตัด                    | G17     | ส่วนโค้งขนานกับระนาบ X-Y                 |
|                                           | G18     | ส่วนโค้งขนานกับระนาบ Z-X                 |
|                                           | G19     | ส่วนโค้งขนานกับระนาบ Y-Z                 |
| โคออร์ดิเนตของตำแหน่ง เริ่มต้นของส่วนโค้ง | X, Y, Z | โคออร์ดิเนตของตำแหน่งเริ่มต้นของส่วนโค้ง |

ตารางที่ 3 ต่อ

|                                                            |         |                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| โคออร์ดิเนตของตำแหน่งจุดปลายของส่วนโค้งวัดแบบสมบูรณ์ (G90) | X, Y, Z | โคออร์ดิเนตของตำแหน่งจุดปลายของส่วนโค้งบนชิ้นงานในระบบการวัดโคออร์ดิเนตแบบสัมบูรณ์ตามแนวแกน X, Y, Z      |
| การวัดแบบต่อเนื่อง (G91)                                   | X, Y, Z | โคออร์ดิเนตของตำแหน่งจุดปลายของส่วนโค้งบนชิ้นงานในระบบโคออร์ดิเนตของตำแหน่งแบบต่อเนื่องตามแนวแกน X, Y, Z |
| ทิศทางของการหมุน                                           | G02     | ทิศทางตามเข็มนาฬิกา                                                                                      |
|                                                            | G03     | ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา                                                                                      |
| จุดศูนย์กลางของส่วนโค้งหรือรัศมีส่วนโค้งวิธี IJK           | I, J, K | ระยะทางจากตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งจุดศูนย์กลางของส่วนโค้งตามแนวแกน X, Y, Z                              |
| วิธี R (รัศมีส่วนโค้ง)                                     | R       | ค่าของรัศมีส่วนโค้ง                                                                                      |

สำหรับการกำหนดทิศทางของการเคลื่อนที่ในแนวเส้นโค้งนี้ ในการพิจารณาว่าเครื่องมือตัดมีทิศทางการเคลื่อนที่ตามหรือทวนเข็มนาฬิกานั้นจะขึ้นอยู่กับแนวแกนที่ 3 บนระนาบของการกัด ซึ่งเป็นไปตามระบบของกฎมือขวาดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในภาพที่ 50



ภาพที่ 50 ทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวเส้นโค้งบนระนาบต่างๆ

### 1.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของการขึ้นรูปทางกล

ค่าตัวแปรที่ถูกนำมาพิจารณาในกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องจักรซีเอ็นซีมากที่สุดคือ ความเที่ยงตรง (Accuracy) และสมรรถภาพ (Efficiency) ของเครื่องจักร โดยที่ความเที่ยงตรงนี้จะหมายถึงความเที่ยงตรงของขนาดชิ้นงาน ซึ่งจะต้องอาศัยค่าตัวแปรที่สำคัญ 2 ประการคือ ความเที่ยงตรงแม่นยำของโปรแกรมและความเที่ยงตรงของเครื่องจักรที่เกิดจากระบบการวัดหรือระบบควบคุมการขับเคลื่อน ส่วนสมรรถภาพของเครื่องจักรนั้นจะสัมพันธ์กับอัตราของการผลิตชิ้นงาน ซึ่งหมายถึงเวลาที่ใช้ในการผลิตนั่นเอง

ในการเขียนโปรแกรมเอ็นซีจำเป็นจะต้องอาศัยค่าพารามิเตอร์หรือข้อมูลในการตัดเฉือนที่สำคัญ 3 ค่าตัวแปรคือ ความเร็วตัด (Cutting speed) อัตราป้อน (Feed rate) และความลึกของการตัดเฉือน (Depth of cut) โดยที่ค่าตัวแปรทั้ง 3 นี้จะเป็นตัวชี้วัดสมรรถภาพของกระบวนการตัดเฉือนชิ้นงาน ดังนั้นในการพิจารณาเลือกค่าตัวแปรทั้งสามนี้ควรคำนึงถึงความสามารถในการตัดเฉือนของเครื่องมือ กำลังม้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องตัด ความแข็งแรง (Rigidity) ของชิ้นงานและอุปกรณ์จับยึดด้วย

1.3.1. การคำนวณหาความเร็วตัด (Cutting speed) ความเร็วตัดในกระบวนการขึ้นรูปทางกลด้วยเครื่องจักรซีเอ็นซีหมายถึง ความเร็วรอบ ณ จุดที่เกิดการตัดเฉือนของเครื่องมือตัด ในขณะที่เครื่องมือตัดนั้นเคลื่อนตัดเฉือนบนผิวชิ้นงาน ในการเลือกค่าความเร็วตัดนั้นควรพิจารณาถึงองค์ประกอบดังต่อไปนี้คือ

- ก) ความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุชิ้นงาน
- ข) วัสดุและรูปทรงเรขาคณิตของเครื่องมือตัด
- ค) การหล่อเย็น
- ง) อัตราป้อนและความลึกของการตัดเฉือน
- จ) กำลังม้าในการขับเคลื่อนเครื่องตัด

ในการคำนวณหาความเร็วตัดนั้น เราสามารถที่จะคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้คือ

ระบบนิ้ว

$$CS = \frac{\pi DN}{12}$$

สมการ 1

เมื่อ CS = ความเร็วตัด (ฟุต/นาที : FPM)

N = ความเร็วรอบของชิ้นงานหรือความเร็วของเครื่องมือตัด (รอบ/นาที : RPM)

D = ขนาด Ø ของชิ้นงานที่หมุนหรือขนาด Ø ของเครื่องมือตัด (นิ้ว)

ระบบเมตริก

$$CS = \frac{\pi DN}{1000}$$

เมื่อ CS = ความเร็วตัด (เมตร/นาที : MPM)

N = ความเร็วรอบของชิ้นงานหรือความเร็วของเครื่องมือตัด (รอบ/นาที : RPM)

D = ขนาด Ø ของชิ้นงานหรือขนาด Ø ของเครื่องมือตัด (มิลลิเมตร)

โดยทั่วไปแล้วค่าความเร็วตัดของวัสดุแต่ละชนิดนั้นเราจะทราบได้จากตารางหรือคู่มือในการตัดเฉือนของวัสดุนั้น ๆ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงมักจะนำค่าความเร็วตัดจากตารางไปคำนวณหาความเร็วรอบของชิ้นงานหรือความเร็วรอบของเครื่องมือตัด โดยใช้สมการต่อไปนี้

ระบบนิ้ว

$$N = \frac{12CS}{\pi D}$$

สมการ 2

## ระบบเมตริก

$$N = \frac{1000CS}{\pi D}$$

สมการ 3

1.3.2. การคำนวณหาอัตราป้อน (feed rate) อัตราป้อนหมายถึงอัตราการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดที่เคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงาน โดยทั่วไปแล้วเราสามารถที่จะกำหนดหน่วยของอัตราป้อนได้ 3 ลักษณะคือ

ก) อัตราป้อนเป็นระยะทางการเคลื่อนที่ต่อฟันของเครื่องมือตัด เช่น นิ้ว/ฟัน (inches per tooth : IPT) หรือมิลลิเมตร/ฟัน (millimeters per tooth : MPT)

ข) อัตราป้อนเป็นระยะทางการเคลื่อนที่ต่อรอบ เช่น นิ้ว/รอบ (inches per revolution : IPR) หรือมิลลิเมตร/รอบ (millimeters per revolution : MMPR)

ค) อัตราป้อนเป็นระยะทางการเคลื่อนที่ต่อนาที เช่น นิ้ว/นาที (inches per revolution : IPM) หรือมิลลิเมตร/นาที (millimeters per minute : MPPM)

ในทางปฏิบัติเราจะใช้อัตราป้อนจากตารางคู่มือมาตรฐานสำหรับเครื่องมือตัดแต่ละชนิดซึ่งโดยปกติแล้วจะมีหน่วยเป็นนิ้ว/ฟัน (IPT) แต่ในกรณีที่เรต้องการหน่วยของอัตราป้อนเป็นนิ้ว/รอบ (IPR) หรือนิ้ว/นาที (IPM) เราก็สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้คือ

ตารางที่ 4 ค่าความเร็วของวัสดุชนิดต่างๆ

| ชนิดของวัสดุ            | ความเร็วตัด (SFPN)     |                 |
|-------------------------|------------------------|-----------------|
|                         | มีดกลึงเหล็กกล้ารอบสูง | มีดกลึงคาร์ไบด์ |
| เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ     | 90-120                 | 270-450         |
| เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง | 70-100                 | 225-375         |
| เหล็กกล้าคาร์บอนสูง     | 30-70                  | 145-300         |
| เหล็กหล่อ (ชนิดอ่อน)    | 100-150                | 325-500         |
| เหล็กหล่อ (ชนิดปานกลาง) | 70-120                 | 225-400         |
| เหล็กหล่อ (ชนิดแข็ง)    | 30-100                 | 145-375         |
| เหล็กกล้าผสม            | 30-90                  | 145-350         |
| อลูมิเนียม              | 200-300                | 500-950         |
| เหล็กกล้าไร้สนิม        | 65-90                  | 200-300         |

$$f_r = f_r T$$

$$f_m = f_r T N$$

สมการ 3

เมื่อ  $f_r$  = อัตราป้อน (นิ้ว/รอบหรือมิลลิเมตร/รอบ)

$f_m$  = อัตราป้อน (นิ้ว/นาทีหรือมิลลิเมตร/นาที)

$f_r$  = อัตราป้อน (นิ้ว/ฟันหรือมิลลิเมตร/ฟัน)

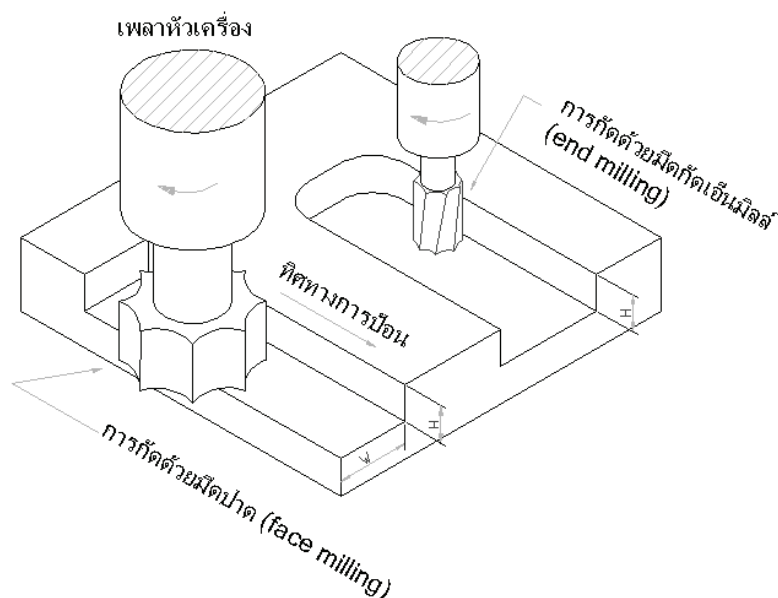
$T$  = จำนวนฟันของเครื่องมือตัด

$N$  = ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)

### 1.3.3. ความลึกของการตัด (Depth of cut) ความลึกหรือความกว้างของการตัด

หมายถึง ระยะทางที่คมของเครื่องมือตัดยังลึกเข้าไปในชิ้นงานในทิศทางที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ ซึ่งโดยปกติแล้วความลึกของการตัดหยาบจะมีขนาดมากกว่าความลึกของการตัดละเอียด การกำหนดความลึกของการตัดนี้จะต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ประการคือ แรงม้าในการ

ขับเพลาลูกเบี้ยวหรือขึ้นงาน กับความแข็งแรงของเครื่องมือตัดหรือความแข็งแรงของเครื่องจักรซีเอ็นซี



ภาพที่ 51 ความลึกและความกว้างของมิดตัดเฉือน

1.3.4. การคำนวณหาหน่วยกำลังแรงม้า (Unit horsepower : UHP) การตัดเฉือนผิวชิ้นงานด้วยเครื่องจักรซีเอ็นซี ส่วนมากแล้วกำลังแรงม้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนนั้นจะได้อาจมาจากมอเตอร์ ดังนั้น ก่อนที่เราจะทำการตัดเฉือนผิวชิ้นงานนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนวณกำลังที่จะเป็นต้องใช้สำหรับการตัดเฉือนในแต่ละครั้ง จำนวนของกำลังที่จะต้องใช้ในการตัดเฉือนผิวชิ้นงานจำนวน 1 ลูกบาศก์นิ้ว/นาที นั้นเราเรียกว่า “หน่วยกำลังแรงม้า (Unit horsepower)” ในการคำนวณหากำลังแรงม้าที่ใช้ในการตัดเฉือน ณ ตำแหน่งปลายของเครื่องมือตัดสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้คือ

$$HP_C = UHP \cdot MRR \cdot C$$

เมื่อ  $HP_C$  = กำลังแรงม้าที่ปลายของเครื่องมือตัด

$UHP$  = หน่วยกำลังแรงม้า (กำลังที่ต้องใช้ในการตัดเฉือนผิวชิ้นงาน 1 ลูกบาศก์นิ้ว/นาที) ซึ่งได้จากรายมาตรฐาน

C = ค่าแฟกเตอร์ของการป้อน

ตารางที่ 5 ค่า UHP สำหรับวัสดุชนิดต่างๆ โดยเปรียบเทียบค่ากับงานกัด

| (ก) โลหะและโลหะผสม |                     |         |         |         |         |         |
|--------------------|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| วัสดุ              | ความแข็ง (BHN)      |         |         |         |         |         |
|                    | 150-175             | 176-200 | 201-250 | 251-300 | 301-350 | 351-400 |
|                    | หน่วยกำลังม้า (UHP) |         |         |         |         |         |
| AISI               |                     |         |         |         |         |         |
| 1010-1025          | 0.58                | 0.67    |         |         |         |         |
| 1030-1055          | 0.58                | 0.67    | 0.80    | 0.95    |         |         |
| 1060-              |                     |         | 0.75    | 0.88    | 1.00    |         |
| 1112-              | 0.50                |         |         |         |         |         |
| 1314-              | 0.42                | 0.46    | 0.50    |         |         |         |
| 1330-              |                     | 0.67    | 0.67    | 0.92    | 1.10    |         |
| 2015-              | 0.67                |         |         |         |         |         |
| 2315-2335          | 0.54                | 0.58    | 0.75    | 0.75    | 0.92    | 1.00    |
| 2340-2350          |                     | 0.50    | 0.62    | 0.70    | 0.83    |         |
| 2512-              | 0.50                | 0.58    | 0.58    | 0.80    | 0.92    |         |
| 3115-3130          | 0.50                | 0.58    | 0.67    | 0.83    | 1.00    | 1.00    |
| 3160-3450          |                     | 0.50    | 0.70    | 0.75    | 0.87    | 1.00    |
| 4130-4345          |                     | 0.46    | 0.62    | 0.70    | 0.83    | 0.87    |
| 4615-4820          | 0.46                | 0.50    | 0.58    | 0.70    | 0.83    | 1.00    |
| 5120-5150          | 0.46                | 0.50    | 0.58    | 0.75    | 0.87    |         |
| 52100              |                     | 0.58    | 0.62    | 0.83    | 1.00    |         |
| 6115-6140          | 0.46                | 0.54    | 0.67    | 0.83    | 1.00    | 1.30    |
| 6145-6195          |                     | 0.70    | 0.67    | 1.00    | 1.20    |         |
| Plain cash iron    | 0.30                | 0.33    | 0.83    | 0.50    |         |         |
| Alloy cash iron    | 0.30                | 0.42    | 0.42    |         |         |         |

ตารางที่ 5 (ต่อ) ค่า UHP สำหรับวัสดุชนิดต่างๆ โดยเปรียบเทียบค่ากับงานกัด

| (ข) โลหะผสมทนความร้อนที่อุณหภูมิสูง |      |      |             |      |      |                 |      |      |
|-------------------------------------|------|------|-------------|------|------|-----------------|------|------|
| วัสดุ                               | BNH  | UHP  | วัสดุ       | BNH  | UHP  | วัสดุ           | BNH  | UHP  |
| A286                                | 165  | 0.82 | Hastelloy B | 230  | 1.10 | Ti-150A         | 340  | 0.65 |
| A286                                | 285  | 0.93 | Inco 700    | 300  | 1.12 | U-500           | 375  | 1.10 |
| Chromoloy                           | 200  | 0.78 | Inco 702    | 230  | 1.10 | 4340            | 200  | 0.78 |
| Chromoloy                           | 310  | 1.18 | M-252       | 230  | 1.10 | 4340            | 340  | 0.93 |
|                                     |      |      | M-252       | 310  | 1.20 |                 |      |      |
| (ค) อโลหะและอโลหะผสม                |      |      |             |      |      |                 |      |      |
| วัสดุ                               | UHP  |      | วัสดุ       | UHP  |      | วัสดุ           | UHP  |      |
| Brass                               |      |      | Bronze      |      |      | Aluminim        |      |      |
| Hard                                | 0.83 |      | Hard        | 0.83 |      | Cash            | 0.25 |      |
| Medium                              | 0.50 |      | Med         | 0.50 |      | Hard            | 0.33 |      |
| Soft                                | 0.33 |      | Soft        | 0.33 |      | Monel           | 1.00 |      |
| Free-maching                        | 0.25 |      | Copper      | 0.90 |      | Zinc (die cash) | 0.25 |      |

ตารางที่ 6 อัตราการป้อนของวัสดุ

| ชนิดของวัสดุ            | ขนาดของมีดกัดชนิด Ead mills (นิ้ว) |       |              |
|-------------------------|------------------------------------|-------|--------------|
|                         | 1/2                                | 3/4   | 1 นิ้วขึ้นไป |
| เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ     | 0.001                              | 0.003 | 0.003        |
| เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง | 0.001                              | 0.002 | 0.003        |
| เหล็กกล้าคาร์บอนสูง     | 0.001                              | 0.002 | 0.002        |
| เหล็กหล่อ (ชนิดอ่อน)    | 0.001                              | 0.003 | 0.003        |
| เหล็กหล่อ (ชนิดปานกลาง) | 0.001                              | 0.002 | 0.003        |
| เหล็กหล่อ (ชนิดแข็ง)    | 0.001                              | 0.002 | 0.002        |
| เหล็กกล้าผสม            | 0.001                              | 0.002 | 0.002        |
| อลูมิเนียม              | 0.003                              | 0.004 | 0.005        |
| เหล็กกล้าไร้สนิม        | 0.001                              | 0.002 | 0.003        |

การคำนวณหากำลังม้าในงานกัด ในการคำนวณหากำลังม้าสำหรับการตัดเฉือนในงานกัด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$MRR = W H f_m$$

สมการ 1

เมื่อ  $W$  = ความกว้างของการตัดเฉือน (นิ้ว)

$H$  = ความลึกของการตัดเฉือน (นิ้ว)

$f_m$  = อัตราป้อน (นิ้ว/นาที)

จากสมการที่ 1 สามารถคำนวณหากำลังม้าที่ปลายคมตัดได้ดังนี้

$$HP_c = MRR UHP$$

สมการ 2

ตารางที่ 7 ค่า UHP สำหรับวัสดุชนิดต่างๆ

| ชนิดของวัสดุ                          | UHP  |
|---------------------------------------|------|
| เหล็กกล้าที่มีความแข็งต่ำกว่า 150 BHN | 1.4  |
| เหล็กกล้าที่มีความแข็งประมาณ 300 BHN  | 1.7  |
| เหล็กกล้าที่มีความแข็งประมาณ 400 BHN  | 2.0  |
| เหล็กกล้าที่มีความแข็งประมาณ 500 BHN  | 2.5  |
| แมกนีเซียม                            | 0.25 |
| อะลูมิเนียม                           | 0.25 |
| เหล็กหล่อ                             | 0.7  |
| ทองแดง                                | 0.5  |
| ทองเหลือง                             | 0.4  |
| บรอนซ์                                | 0.5  |
| เหล็กหล่อเหนียว                       | 1.0  |
| เหล็กกล้าทั่วไป                       | 1.0  |
| เหล็กกล้าไร้สนิม                      | 1.7  |

การคำนวณความเร็วตัดและอัตราป้อน ดูจากตารางที่ 4 และตารางที่ 5

$$CS_m = 70 \text{ ฟุต/นาที}$$

$$F_t = 0.002 \text{ นิ้ว/ฟัน}$$

คำนวณหากำลังม้า (UHP) ดูจากตารางที่ 6

$$UHP = 1.7 \text{ hp}$$

คำนวณหาความเร็วรอบ

$$N = \frac{12CS_m}{\pi D}$$

$$N = \frac{12 \times 70}{\pi \times 0.75}$$

$$= 356.68 \text{ รอบ/นาที}$$

คำนวณหาอัตราป้อน (นิ้ว/นาที)

$$f_m = f_t \cdot T \cdot N \text{ (จำนวนฟัน 4 ฟัน)}$$

$$= 0.002 \times 4 \times 356.68$$

$$= 2.85 \text{ นิ้ว/นาที}$$

คำนวณหาอัตราการตัดเนื้อวัสดุ

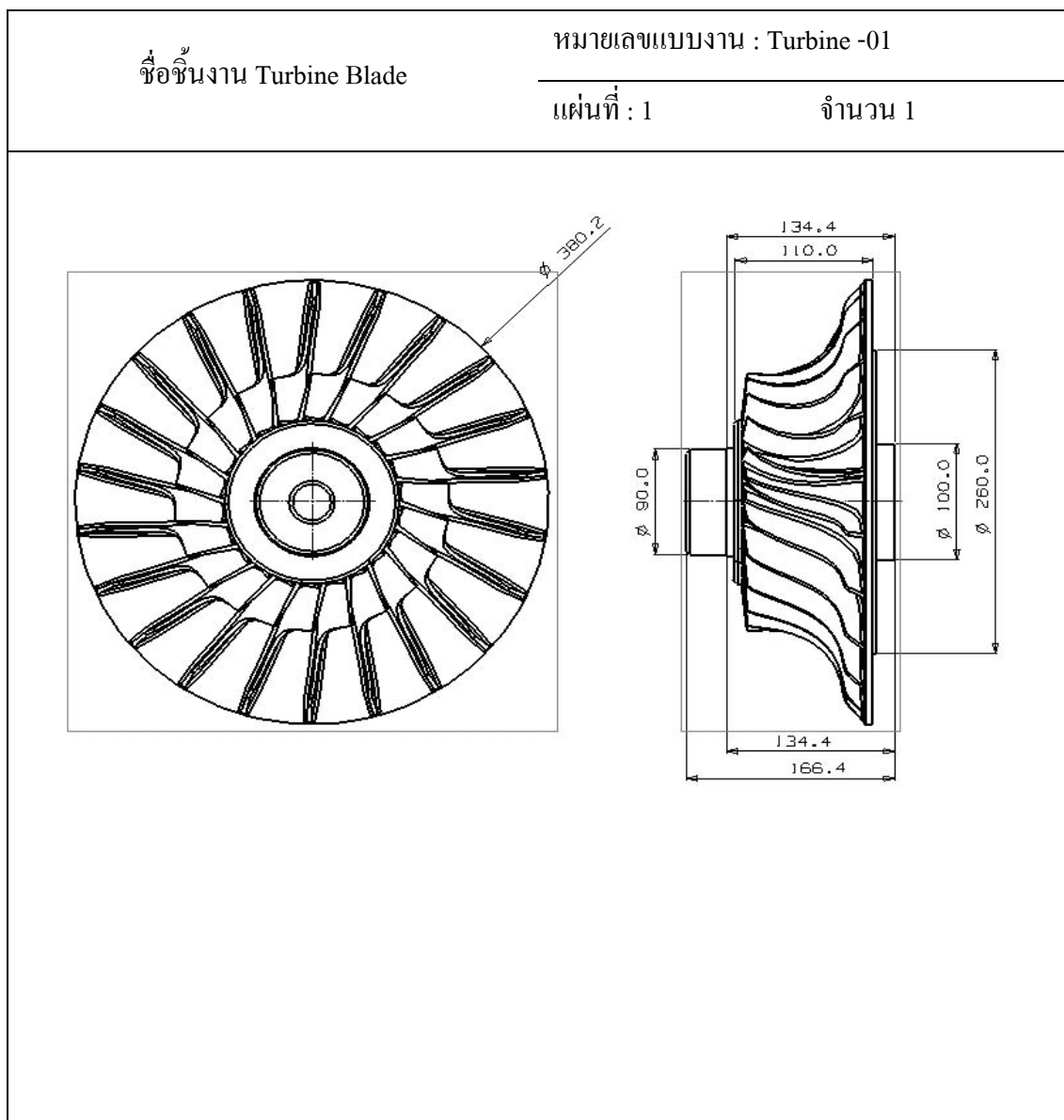
$$MRR = W \cdot H \cdot f_m$$

$$= 0.035 \times 0.5 \times 2.85$$

$$= 0.05 \text{ ลูกบาศก์นิ้ว/นาที}$$

#### 1.4 แบบชิ้นงานใบพัด

แบบชิ้นงานใบพัดนี้ประกอบไปด้วย ส่วนของเส้นโค้ง ( Arc ) ด้านในโดยแบบชิ้นงานนี้จะถูกสร้างขึ้นจาก CAD File ซึ่งส่วนแรกนี้จะเป็นแบบชิ้นงานที่ต้องนำไปกัด



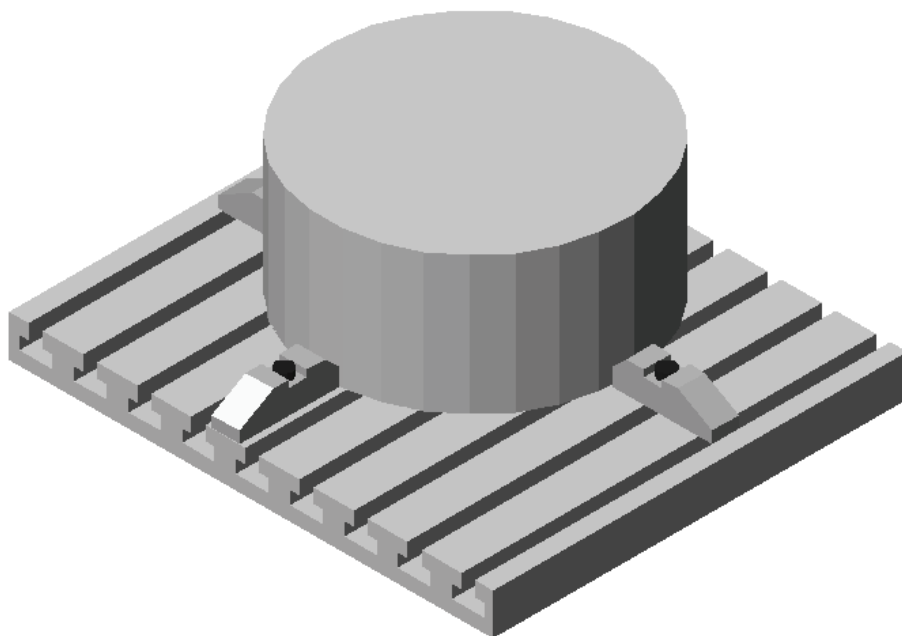
ภาพที่ 52 ภาพแสดงแบบชิ้นงาน

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                            |         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------|
| ชื่อชิ้นงาน Turbine Blade                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | หมายเลขแบบ :PC Milling -01 |         |
| หมายเลขโปรแกรม : 00001                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | แผ่นที่ : 1                | จำนวน 2 |
| <pre> 1 BEGIN PGM 1 MM 2 BLK FORM 0.1 Z X-190.117 Y-190.118 Z-170.427 3 BLK FORM 0.2 X190.119 Y190.118 Z-4. 4 L M129 5 CYCL DEF 19.0 WORKING PLANE 6 CYCL DEF 19.1 A+0.0 C+0.0 7 CYCL DEF 19.0 WORKING PLANE 8 CYCL DEF 19.1 9 CYCL DEF 7.0 DATUM SHIFT 10 CYCL DEF 7.1 X0.0 11 CYCL DEF 7.2 Y0.0 12 CYCL DEF 7.3 Z0.0 13 ; 14 LBL 170 15 LBL 0 16 ; TOOL DIA. 6. LENGTH 30. 17 TOOL CALL 1 Z S1000 DL+0.0 DR+0.0 18 Q1= 100      ; PLUNGE FEEDRATE 19 Q2= 500      ; CUTTING FEEDRATE 20 Q3= 3000     ; SKIM FEEDRATE 21 L Z-1 FMAX M91 22 CYCL DEF 32.0 TOLERANCE 23 CYCL DEF 32.1 T0.025 24 ; 25 ; TOOLPATH : finish4 </pre> |                            |         |

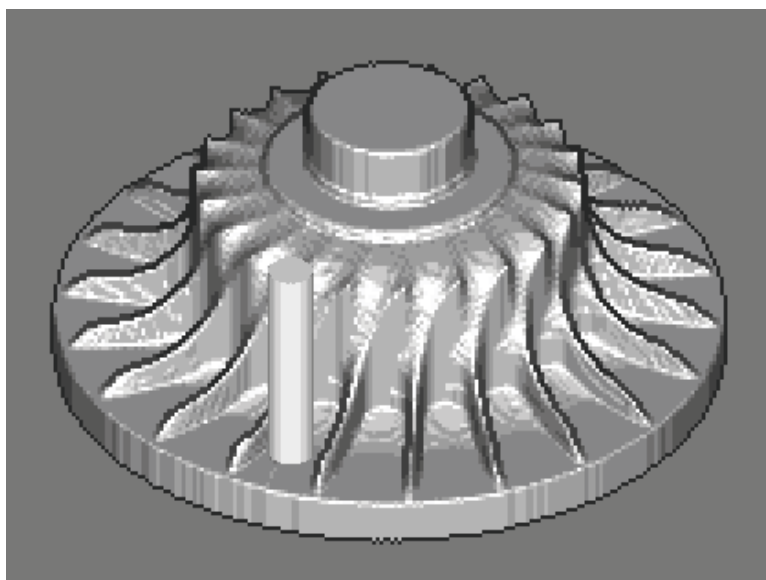
ภาพที่ 53 ตัวอย่าง ใบแสดงรายละเอียดของโปรแกรม

|                                                         |             |                            |  |
|---------------------------------------------------------|-------------|----------------------------|--|
| ชื่อชิ้นงาน Turbine Blade                               |             | หมายเลขแบบ :PC Milling -01 |  |
| หมายเลขโปรแกรม : 00001                                  | แผ่นที่ : 2 | จำนวน 2                    |  |
| 102943 L X124.566 Y-116.839 Z-146.231 A-0.538 C-317.744 |             |                            |  |
| 102944 L X126.655 Y-119. Z-146.211 A-0.229 C-313.118    |             |                            |  |
| 102945 L X128.684 Y-120.994 Z-146.215 A0.382 C-323.446  |             |                            |  |
| 102946 L X130.614 Y-122.78 Z-146.247 A1.22 C-320.319    |             |                            |  |
| 102947 L X132.276 Y-124.214 Z-146.313 A2.118 C-320.065  |             |                            |  |
| 102948 L X134.258 Y-125.792 Z-146.425 A3.268 C-320.189  |             |                            |  |
| 102949 L X136.542 Y-127.493 Z-146.611 A4.676 C-319.979  |             |                            |  |
| 102950 L X137.214 Y-127.976 Z-146.683 A5.046 C-319.939  |             |                            |  |
| 102951 L X137.999 Y-128.455 Z-146.765 A5.442 C-319.883  |             |                            |  |
| 102952 L X138.606 Y-129.176 Z-136.874 FQ3               |             |                            |  |
| 102953 L X138.609 Y-129.18 Z-136.803                    |             |                            |  |
| 102954 L X138.611 Y-129.181 Z-136.732                   |             |                            |  |
| 102955 L Z0.0                                           |             |                            |  |
| 102956 L M9                                             |             |                            |  |
| 102957 L M129                                           |             |                            |  |
| 102958M94                                               |             |                            |  |
| 102959 L M140 MBMAX                                     |             |                            |  |
| 102960 CYCL DEF 32.0 TOLERANCE                          |             |                            |  |
| 102961 CYCL DEF 32.1                                    |             |                            |  |
| 102962 L M30                                            |             |                            |  |
| 102963 END PGM 1 MM                                     |             |                            |  |

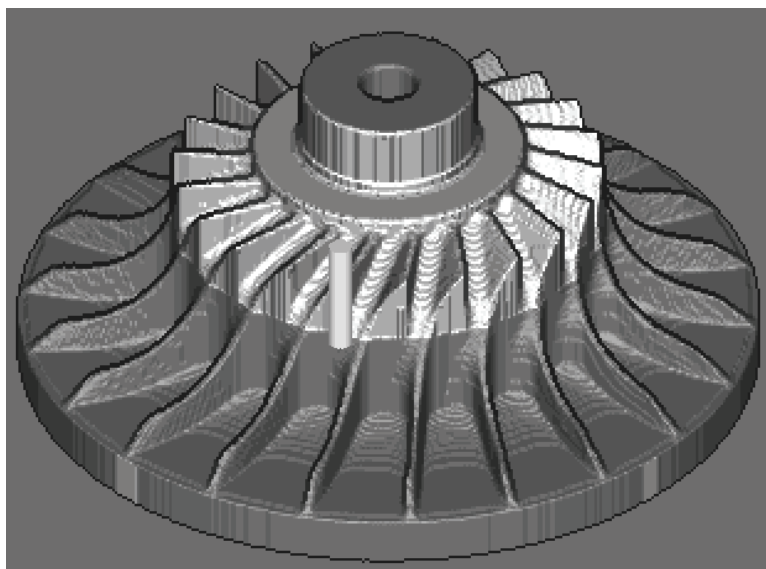
ภาพที่ 53 (ต่อ) ตัวอย่าง ใบแสดงรายละเอียดของโปรแกรม



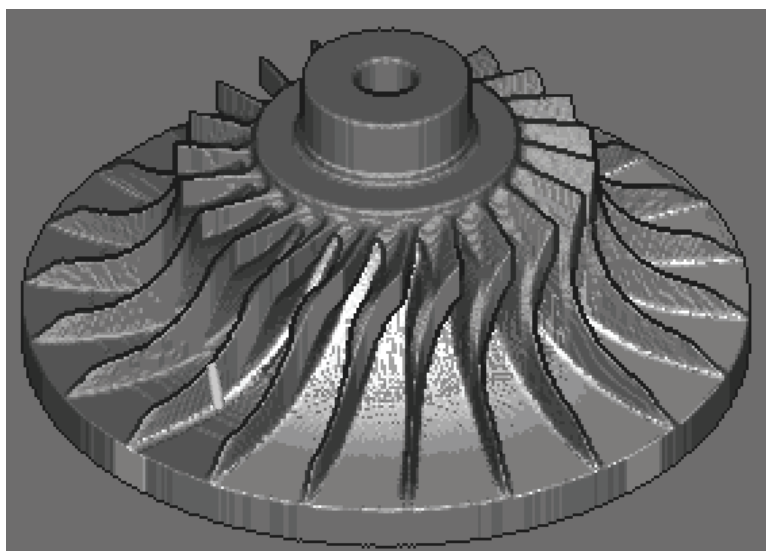
ภาพที่ 54 แสดงภาพการจับยึดชิ้นงานกัด พร้อมที่จะทำการกัด



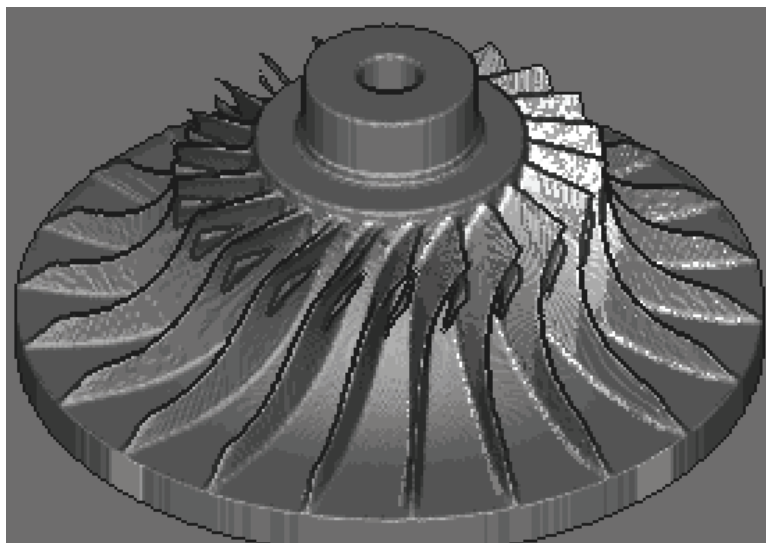
ภาพที่ 55 แสดงภาพการกัดหยาบผิวชิ้นงาน (Rough Milling)



ภาพที่ 56 แสดงภาพการกัดลดขนาด (Rest Rough Milling)



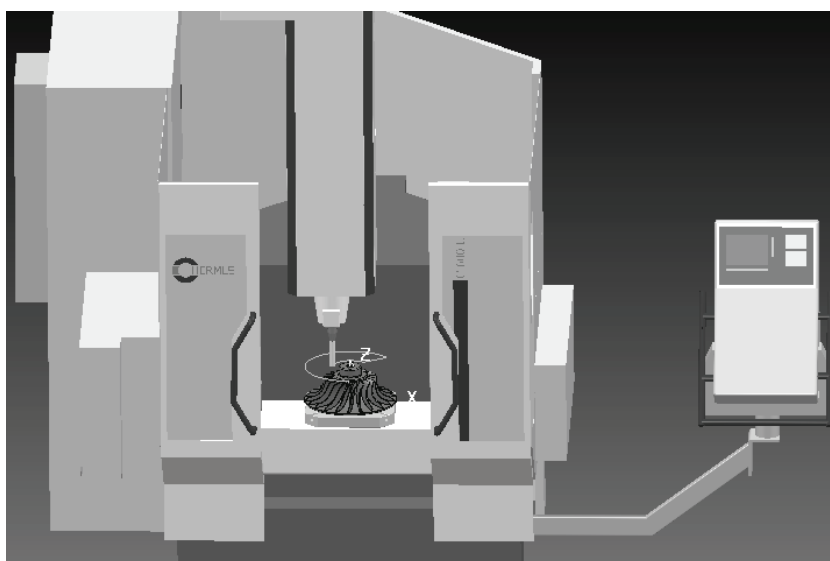
ภาพที่ 57 แสดงภาพการกัดละเอียดในร่อง (Finishing Milling)



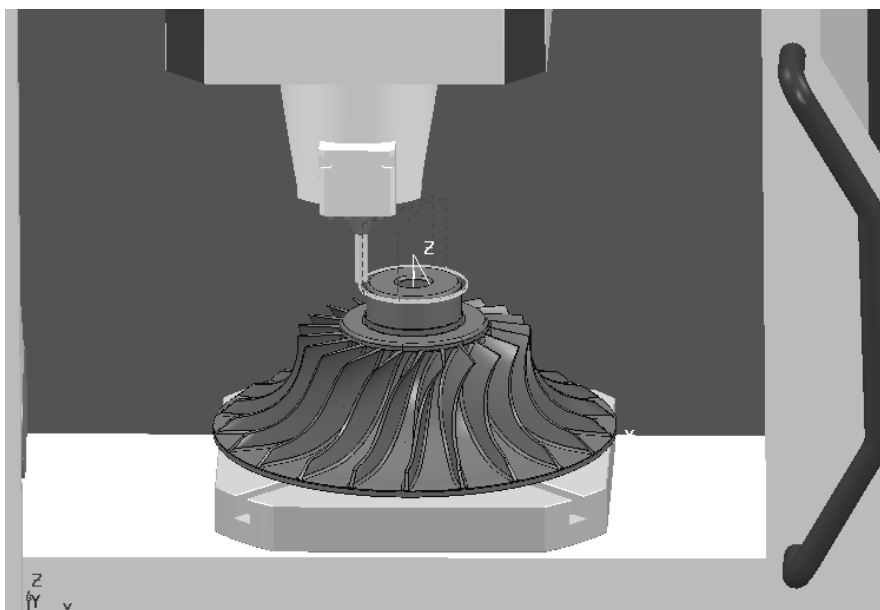
ภาพที่ 58 แสดงภาพการกัดละเอียดใบ 2 ด้าน (Finishing Milling)

ผลจากการ Verify Tool path เพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน โดยในขั้นตอนนี้ใช้โปรแกรม Power Mill ในการ Simulation เพื่อให้เราสามารถมองเห็นภาพพจน์ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นการช่วยตรวจสอบหาข้อผิดพลาดที่เกิดจากการขึ้นรูปชิ้นงานอีกด้วย ดังภาพต่อไปนี้

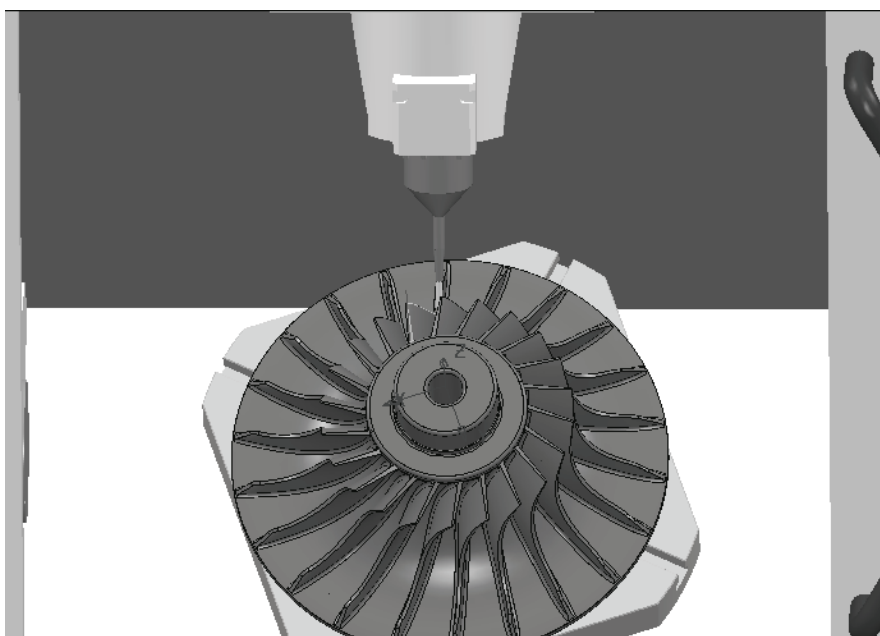
ลักษณะการ Verify Tool path บนเครื่องกัด 5 แกน Demo รุ่น Hermle C600U SRT450



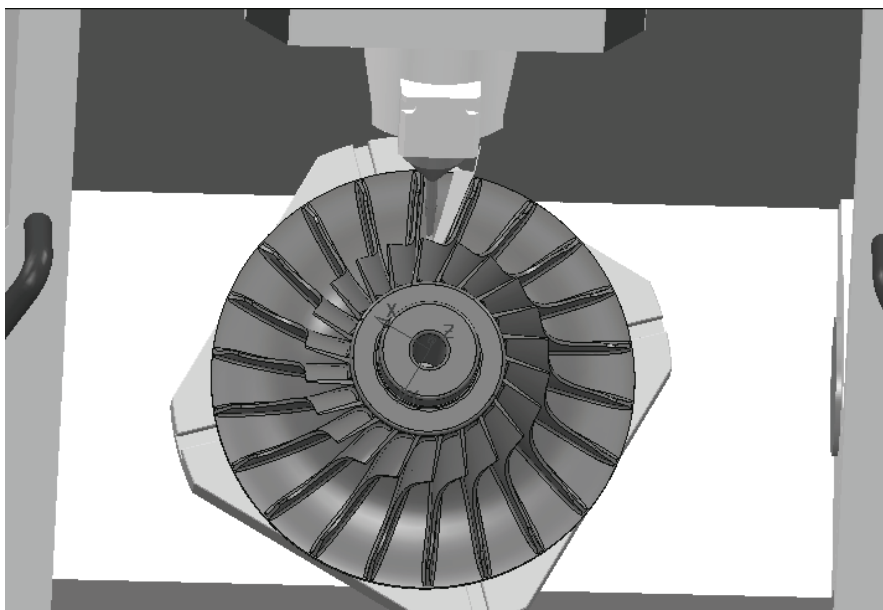
ภาพที่ 59 การกัดหยาบ (Rough Milling )



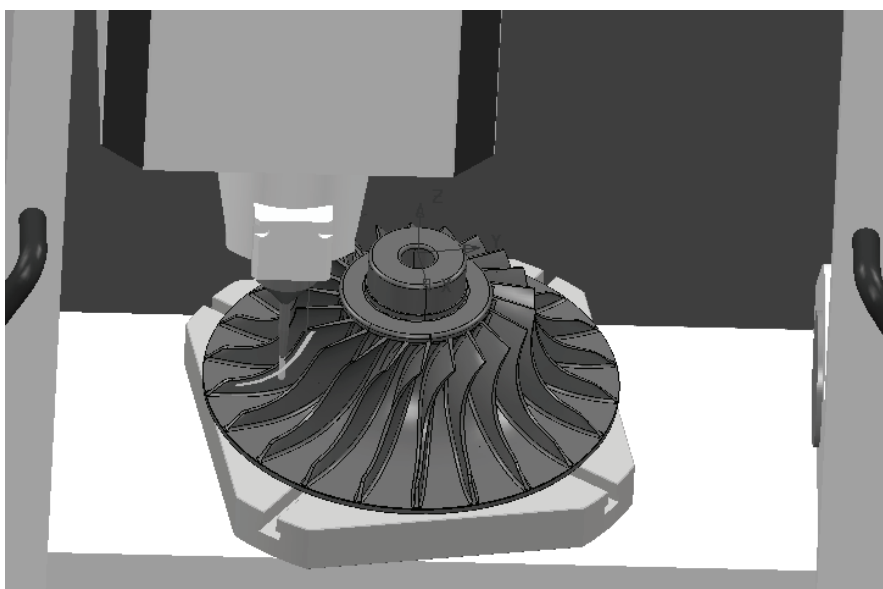
ภาพที่ 60 การกัดลดขนาด (Rest Rough Milling)



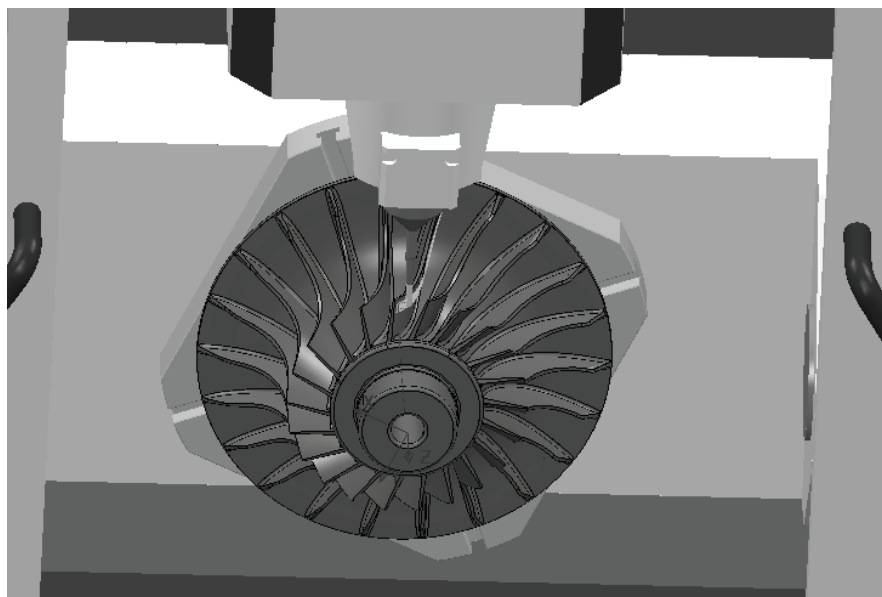
ภาพที่ 61 การกัดละเอียดปลายใบ (Finishing Milling)



ภาพที่ 62 การกัดละเอียดในร่อง 4 ครั้ง (Finishing Milling)



ภาพที่ 63 การกัดละเอียดใบ 2 ด้าน (Finishing Milling)



ภาพที่ 64 การกัดละเอียดใบ 2 ด้าน (Finishing Milling)

ตารางที่ 8 การเดินมีดตัดเฉือน

| ลำดับ | ขนาด Tool (mm) | ลักษณะการเดิน          | ความหมายของวิธีการ                                                                                                                                                                                                 |
|-------|----------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | 25 mm          | Offset AreaClear Model | การกัดโดยวิธีนี้เป็นการกัดด้วยวิธีหยาบๆ เนื่องจากชิ้นงานที่มีความโตกว่าขนาดจริง ซึ่งไม่สามารถกัดละเอียดได้ เนื่องจากการกัดแต่ละครั้งต้องใช้เวลาในการกัด ดังนั้นวิธีนี้เป็นส่วนหนึ่งในการลดเวลาในการกัดงานให้น้อยลง |
| 2     | 12 mm          | Offset AreaClear Model | การกัดโดยวิธีนี้เป็นการกัดด้วยวิธีหยาบๆ โดยอ้างอิงจากการกัด Offset AreaClear Model ที่ใช้มีดตัดเฉือน 25 mm แต่วิธีการนี้ใช้มีดตัดเฉือน 12 mm เป็นการกัดลดขนาดจากการกัดครั้งแรกที่ Tool เข้าไม่ถึง                  |

ตารางที่ 8 (ต่อ)

| ลำดับ | ขนาด Tool (mm) | ลักษณะการเดิน               | ความหมายของวิธีการ                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------|----------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3     | 6 mm           | Projection Surface Finiting | การกัดวิธีนี้เป็นการกัดละเอียด หลังจากกัด Rest Rough แล้ว ขั้นตอนนี้จะกัดบริเวณปลายใบของ ใบพัด ในขณะที่มีความหนาของ บริเวณใบเยอะอยู่ เนื่องจากการกัด ขั้นนี้มีความเสี่ยงของการกัดเป็น อย่างมาก เช่น ถ้าบริเวณใบบาง การ กัดของมีดทำให้ใบบิดหรือหักได้ |
| 4     | 6 mm           | Projection Surface Finiting | การกัดวิธีนี้เป็นการกัดละเอียด หลังจากกัด Finishing บริเวณ ปลายใบของใบพัดแล้ว ขั้นตอนนี้ จะกัดเป็นขั้นแรกเพื่อหลีกเลี่ยงการ ชนของหัวจับมีดตัดเนื้อ (Holder)                                                                                          |
| 5     | 6 mm           | Projection Surface Finiting | การกัดวิธีนี้เป็นการกัดละเอียด หลังจากกัด Finishing ขั้นแรกแล้ว ขั้นตอนนี้จะกัดเป็นขั้นที่สองเพื่อ หลีกเลี่ยงการชนของหัวจับมีดตัด เนื้อ (Holder)                                                                                                     |
| 6     | 6 mm           | Projection Surface Finiting | การกัดวิธีนี้เป็นการกัดละเอียด หลังจากกัด Finishing ขั้นที่สอง ขั้นตอนนี้จะกัดเป็นขั้นที่สาม                                                                                                                                                         |
| 7     | 6 mm           | Projection Surface Finiting | การกัดวิธีนี้เป็นการกัดละเอียด หลังจากกัด Finishing ขั้นที่สาม แล้ว ขั้นตอนนี้จะกัดเป็นขั้นที่สี่หรือ ครั้งสุดท้ายของการกัดบริเวณร่อง ของใบพัด                                                                                                       |

ตารางที่ 8 (ต่อ)

| ลำดับ | ขนาด Tool (mm) | ลักษณะการเดิน  | ความหมายของวิธีการ                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------|----------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 8     | 6 mm           | Swarf Finiting | การกัดวิธีนี้เป็นการกัดละเอียด หลังจากทีกัด Finishing บริเวณร่องของใบพัดแล้ว ดังนั้นขั้นตอนนี้จะทำการกัดบริเวณด้านของใบ โดยเริ่มต้นการกัดจากด้านขวาซึ่งจะใช้ลักษณะการเดินมีดตัดเนื้อแบบ Swarf Finiting คือการกัดขึ้นงาน โดยเอาปลายด้านข้างของ Tool เป็นตัวในการตัดเนื้อ |
| 9     | 6 mm           | Swarf Finiting | การกัดวิธีนี้เป็นการกัดละเอียด หลังจากทีกัดจากด้านขวาแล้วซึ่งลักษณะการเดินมีดตัดเนื้อแบบ Swarf finiting คือการกัดขึ้นงาน โดยเอาปลายด้านข้างของ Tool เป็นตัวในการตัดเนื้อ                                                                                                |

## วิจารณ์

ผลจากการทำวิจัยโดยคำนวณการกัดใบพัดด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต ซึ่งใช้โปรแกรม Power Mill ในการคำนวณทางเดินของมีดตัดเฉือน ซึ่งทางเดินของมีดตัดเฉือนจะถูกเก็บในรูปแบบของ CL data-file แล้วนำไฟล์ที่ได้จากการคำนวณทางเดินของมีดตัดเฉือนไป Post ลงในเครื่องกัด CNC Five Axis Milling Machine ที่เราต้องการจะกัด ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการทดสอบส่วนใหญ่จะใช้ไม้เป็นหลัก สำหรับการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้นำเอาไม้เทียมหรือไม้สังเคราะห์ในการทดสอบ เนื่องจากสามารถนำมาทดแทนไม้ธรรมชาติ และมีรูปร่างที่ใกล้เคียงกับไม้ธรรมชาติมาก แต่มีคุณสมบัติพิเศษที่เหนือกว่าอย่างเช่น มีความแข็งแรง ทนทาน เหมาะสำหรับการกัดงานตัวอย่าง แต่เกิดปัญหาทางด้านเครื่องจักร เนื่องจากเครื่องจักรขัดข้องไม่พร้อมที่จะใช้ในการกัดงาน ผู้วิจัยจึงเปลี่ยนจากการกัดงานจริงและวัสดุจากไม้สังเคราะห์เป็นการ Simulation โดยนำเอาเครื่องกัดตัวอย่างหรือ Demo มาแสดงภาพการกัดจริงด้วยโปรแกรม Power Mill ขั้นตอนนี้เรียกว่าการ Verify Tool path

ผลจากการ Verify Tool path เพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน สามารถมองเห็นภาพพจน์ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นเนื่องจากการจำลองการกัดนี้ซึ่งเลียนแบบจากการใช้เครื่องจักรกัดงานจริง โดยมองเห็นทิศทางการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร รวมไปถึงการแสดงผลข้อผิดพลาดที่เกิดจากการขึ้นรูปชิ้นงานอีกด้วย ดังนั้นจากการทำวิจัยโดยการคำนวณเส้นทางเดินของมีดตัดเฉือนนั้นสามารถทำงานบนเครื่องจักรได้จริง

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 1. สรุปผลการวิจัย

ในการนำระบบแคด/แคม (CAD/CAM) มาใช้ในการเขียนโปรแกรมเอ็นซีจะเริ่มต้นจากการสร้างรูปทรงเรขาคณิตของชิ้นงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบหรือแคด (Computer Aided Design : CAD) หลังจากนั้นก็จะเป็นการเลือกใช้เครื่องมือตัดและข้อมูลของการตัดเฉือนที่เหมาะสมกับเครื่องมือตัดแต่ละชนิด ซึ่งในโปรแกรมแคด/แคมนั้นเราสามารถที่จะกำหนดข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้ได้ เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนของการกำหนดรูปทรงเรขาคณิตของชิ้นงานและการเลือกใช้เครื่องมือตัดแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการกำหนดทางเดินของเครื่องมือตัด (Tool path) เพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน โดยในขั้นตอนนี้โปรแกรมแคด/แคมจะมีวิธีการจำลองการขึ้นรูปชิ้นงาน (simulation) เพื่อให้เราสามารถมองเห็นภาพพจน์ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นการช่วยตรวจสอบหาข้อผิดพลาดที่เกิดจากการขึ้นรูปชิ้นงานอีกด้วย

ขั้นตอนสุดท้ายของการเขียนโปรแกรมเอ็นซีด้วยแคด/แคมคือ การแปลงทางเดินของเครื่องมือตัดไปเป็นรหัสเอ็นซี (NC code) โดยในขั้นตอนนี้เรียกว่า “Postprocessor” ทั้งนี้เนื่องจากรูปทรงของชิ้นงานที่สร้างจากโปรแกรมแคด/แคมนี้ถูกเขียนขึ้นจากภาษาคอมพิวเตอร์ เช่น ภาษา APT ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแปลงให้เป็นรหัสคำสั่งที่ใช้สำหรับควบคุมเครื่องจักรซีเอ็นซี ยกตัวอย่างรหัสคำสั่งสำหรับควบคุมเครื่องจักรซีเอ็นซี เช่น G, M, S เป็นต้น เมื่อได้โปรแกรมเอ็นซีที่ถูกต้องสมบูรณ์แล้ว โปรแกรมเอ็นซีนี้ก็จะถูกส่งโดยผ่านสายส่งข้อมูล เช่น RS-232 ไปยังเครื่องจักรซีเอ็นซีเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานต่อไป โดยในขั้นตอนนี้เราเรียกว่า คอมพิวเตอร์ช่วยผลิต (Computer Aided Manufacturing : CAM) โดยขั้นสุดท้ายได้ทำการ Verify Tool Path ด้วยโปรแกรม Power Mill เพื่อให้สามารถมองเห็นขั้นตอนการกัดงานตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 จนถึงขั้นตอนสุดท้าย โดยสังเกตจากการกัดงานว่ามีปัญหาข้อผิดพลาดต่างๆ ที่เกิดจากการคำนวณทางเดินของมีดตัดเฉือน เพื่อสำหรับเป็นข้อมูลพื้นฐานในการกัดงานจริงต่อไป

#### 1.1 โปรแกรม Simulation สำหรับงานกัดหยาบแบบ 5 แกน

หลังจากใช้โปรแกรมหาเส้นทางเดินของหัวกัดได้ผลทดสอบการกัดโดยวิธีนี้เป็นการกัดด้วยวิธีหยาบๆ เนื่องจากชิ้นงานที่มีความโตกว่าขนาดจริง ซึ่งไม่สามารถกัดละเอียดได้ เนื่องจาก

การกัดแต่ละครั้งต้องใช้เวลาในการกัด ดังนั้นวิธีนี้เป็นเป็นส่วนหนึ่งในการลดเวลาในการกัดงานให้น้อยลง ก็คือ ชิ้นงานที่ได้มีลักษณะรูปร่างคล้ายกับแบบชิ้นงานตามที่ต้องการ โดยชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะเป็นชั้นๆ คล้ายขั้นบันไดและเนื่องจากโปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมสำหรับกัดหยาบจึงไม่ได้ทำการตรวจวัดขนาดจากโปรแกรม แต่ใช้สายตาสังเกตดูลักษณะชิ้นงานเท่านั้น

### 1.2 โปรแกรม Simulation สำหรับงานกัดลดขนาดแบบ 5 แกน

หลังจากการกัดงานแบบหยาบไปแล้วการกัดโดยวิธีนี้เป็นการกัดด้วยวิธีหยาบๆ โดยอ้างอิงจากการกัด Offset AreaClear Model ที่ใช้มีดตัดเฉือน 25 mm แต่วิธีการนี้ใช้มีดตัดเฉือน 12 mm เป็นการกัดลดขนาดจากการกัดครั้งแรกที่ Tool เข้าไปไม่ถึงและจะเห็นเป็นลักษณะขั้นบันไดซึ่งจะมีขนาดความโตที่ไม่เหมาะสำหรับการกัดละเอียด เนื่องจากอาจจะทำให้มีดตัดเฉือนเกิดความเสียหายและทำให้การกัดต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นจึงต้องทำการกัดลดขนาดของชิ้นงานเพื่อให้เหมาะสำหรับการกัดละเอียดต่อไป

### 1.3 โปรแกรม Simulation สำหรับงานกัดละเอียดแบบ 5 แกน บริเวณปลายใบ

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าการกัดวิธีนี้เป็นการกัดละเอียดหลังจากที่กัด Rest Rough แล้ว ขั้นตอนนี้จะกัดบริเวณปลายใบของใบพัด ในขณะที่มีความหนาของบริเวณใบเยอะอยู่ เนื่องจากการกัดขั้นนี้มีความเสี่ยงของการกัดเป็นอย่างมาก เช่น ถ้าบริเวณใบบาง การกัดของมีดทำให้ใบบิดหรือหักได้ ชิ้นงานที่ simulation ได้จะมีลักษณะรูปร่างที่คล้ายกับแบบชิ้นงานตามที่ต้องการ โดยชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะเรียบ เนื่องจากโปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมกัดละเอียด

### 1.4 โปรแกรม Simulation สำหรับงานกัดละเอียดแบบ 5 แกน บริเวณร่องของใบพัด 4 ชั้น

1) การกัดวิธีนี้เป็นการกัดละเอียดหลังจากที่กัด Finishing บริเวณปลายใบของใบพัดแล้ว ขั้นตอนนี้จะกัดเป็นชั้นแรกเพื่อหลีกเลี่ยงการชนของหัวจับมีดตัดเฉือน (Holder)

2) การกัดวิธีนี้เป็นการกัดละเอียดหลังจากที่กัด Finishing ชั้นแรกแล้ว ขั้นตอนนี้จะกัดเป็นชั้นที่สองเพื่อหลีกเลี่ยงการชนของหัวจับมีดตัดเฉือน (Holder)

3) การกัดวิธีนี้เป็นการกัดละเอียดหลังจากที่กัด Finishing ขั้นที่สองแล้ว ขั้นตอนนี้จะกัดเป็นขั้นที่สาม

4) การกัดวิธีนี้เป็นการกัดละเอียดหลังจากที่กัด Finishing ขั้นที่สามแล้ว ขั้นตอนนี้จะกัดเป็นขั้นที่สี่หรือครั้งสุดท้ายของการกัดบริเวณร่องของใบพัด

#### 1.5 โปรแกรม Simulation สำหรับงานกัดละเอียดแบบ 5 แกน บริเวณของใบพัดด้านขวา

การกัดวิธีนี้เป็นการกัดละเอียดหลังจากที่กัด Finishing บริเวณร่องของใบพัดแล้ว ดังนั้นขั้นตอนนี้จะทำการกัดบริเวณด้านของใบ โดยเริ่มต้นการกัดจากด้านขวาซึ่งจะใช้ลักษณะการเดินมีดตัดเฉือนแบบ Swarf Finiting คือการกัดชิ้นงานโดยเอาปลายด้านข้างของ Tool เป็นตัวในการตัดเฉือน

#### 1.6 โปรแกรม Simulation สำหรับงานกัดละเอียดแบบ 5 แกน บริเวณของใบพัดด้านซ้าย

การกัดวิธีนี้เป็นการกัดละเอียดหลังจากที่กัดจากด้านขวาแล้วซึ่งจะใช้ลักษณะการเดินมีดตัดเฉือนแบบ Swarf Finiting คือการกัดชิ้นงานโดยเอาปลายด้านข้างของ Tool เป็นตัวในการตัดเฉือน

## 2. ข้อเสนอแนะ

จากผลของการวิจัยซึ่งเป็นการจำลองทางเดินของมีดตัดเฉือนโดยการ Simulation ด้วยโปรแกรม Power Mill จะเห็นได้ว่า การกัดใบพัดในแต่ละขั้นตอนต้องใช้เวลาในการกัดมาก ดังนั้นจึงทำการศึกษาว่าช่วงนั้นขั้นตอนใดที่จะลดเวลาในการกัดงานลงได้ และจากข้อเสนอแนะดังกล่าว ในช่วงขั้นตอนของการกัด Rough Milling ช่วงแรกคือ การกัดหยาบ สามารถลดเวลาในการกัดงานลงได้ โดยการนำไปกลึงให้เนื้อของชิ้นงานออกให้ใกล้เคียงสำหรับการกัด Rest Rough Milling ต่อไป

จากการจำลองทางเดินของมีดตัดเฉือนโดยการ Simulation และต้องกัดงานตามลำดับขั้นตอนต่างๆ เนื่องจาก Verify Tool Path จะเห็นได้ว่าการกัดแต่ละขั้นตอนไม่เหมือนกัน ซึ่งต้อง

คำนึงถึงการป้องกันอันตรายต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นได้กับ Tool หรือชิ้นงาน โดยสังเกตจากขั้นตอนที่ 3 เนื่องจากขั้นตอนนี้ การกัดงาน Tool ต้องกัดบริเวณปลายใบของใบพัด ถ้านำการกัดขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายอาจจะทำให้ใบพัดหรือเกิดการบิดงอได้ ดังนั้นจึงนำขั้นตอนนี้มาไว้เป็นขั้นตอนที่ 3 เนื่องจากขั้นตอนนี้ยังมีเนื้อบริเวณขอบด้านข้างหนาอยู่ ทำให้การกัดปลายใบในขั้นตอนนี้ไม่ส่งผลให้ใบพัดหักหรือบิดงอได้

จากขั้นตอนการคำนวณทางเดินของมิดตัดเดือนได้อธิบายถึงวิธีการกัดในแต่ละขั้นตอนไว้ โดยระบุลำดับการกัดงาน รวมไปถึงลักษณะของการกัด และลักษณะการเดินของมิดตัดเดือน

การนำเอา โปรแกรม Power Mill ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการกัดงานขั้นหน้าที่แพร่หลายอยู่ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น แม่พิมพ์ ยานยนต์ และอากาศยานซึ่งให้ความสำคัญต่อการพัฒนาการกัดหยาบการกัดละเอียดด้วยความเร็วสูง และการกัดแบบ 5 แกน มาอย่างต่อเนื่องโดยคำนึงถึงการประหยัดเวลาและต้นทุน ด้วยความเชื่อมั่นต่อการทำงานของเครื่องอย่างมีประสิทธิภาพ เพิ่มความปลอดภัยด้วยระบบป้องกันการเคลื่อนที่เกินพิกัด วิเคราะห์จุดสัมผัสของมิดกัดกับงาน เพื่อความเที่ยงตรงที่มิดกัดจะสัมผัสกับงาน และป้องกันไม่ให้หัวจับมิดกัดชนกับชิ้นงานรวมถึงความสามารถในการจำลองการเดินของหัวจับมิดกัดและระบุลักษณะแตกต่างของมิดและด้ามจับ ทำให้เห็นเหตุการณ์จริงทั้งหมดที่จะเกิดขึ้นเมื่อทำการกัดงานและสามารถเปรียบเทียบวิธีกัดงานแบบต่าง ๆ เพื่อเลือกก่อนการกัดงานจริง อีกทั้งสามารถสร้างแบบชุดคำสั่งซ้ำ (Template) เพื่อใช้กับการทำงานที่มีลักษณะเดิม ๆ

จุดเด่นของ Power Mill เป็นระบบ CAM หนึ่งเดียวที่ให้การเดินเส้น NC จากข้อมูลจากแบบ CAD ได้อย่างรวดเร็ว โปรแกรม Power Mill รับข้อมูลได้จากระบบ CAD ใดก็ได้ ผ่าน IGES, VDA, STL หรือคำสั่งหลายแบบจากเครื่องเป็นสิ่งที่มีประสิทธิภาพสูง ใช้งานง่าย และสร้างเส้นเดินการกัดงานเบื้องต้น ซึ่งทำให้เครื่อง CNC ได้ใช้งานเต็มประสิทธิภาพ

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

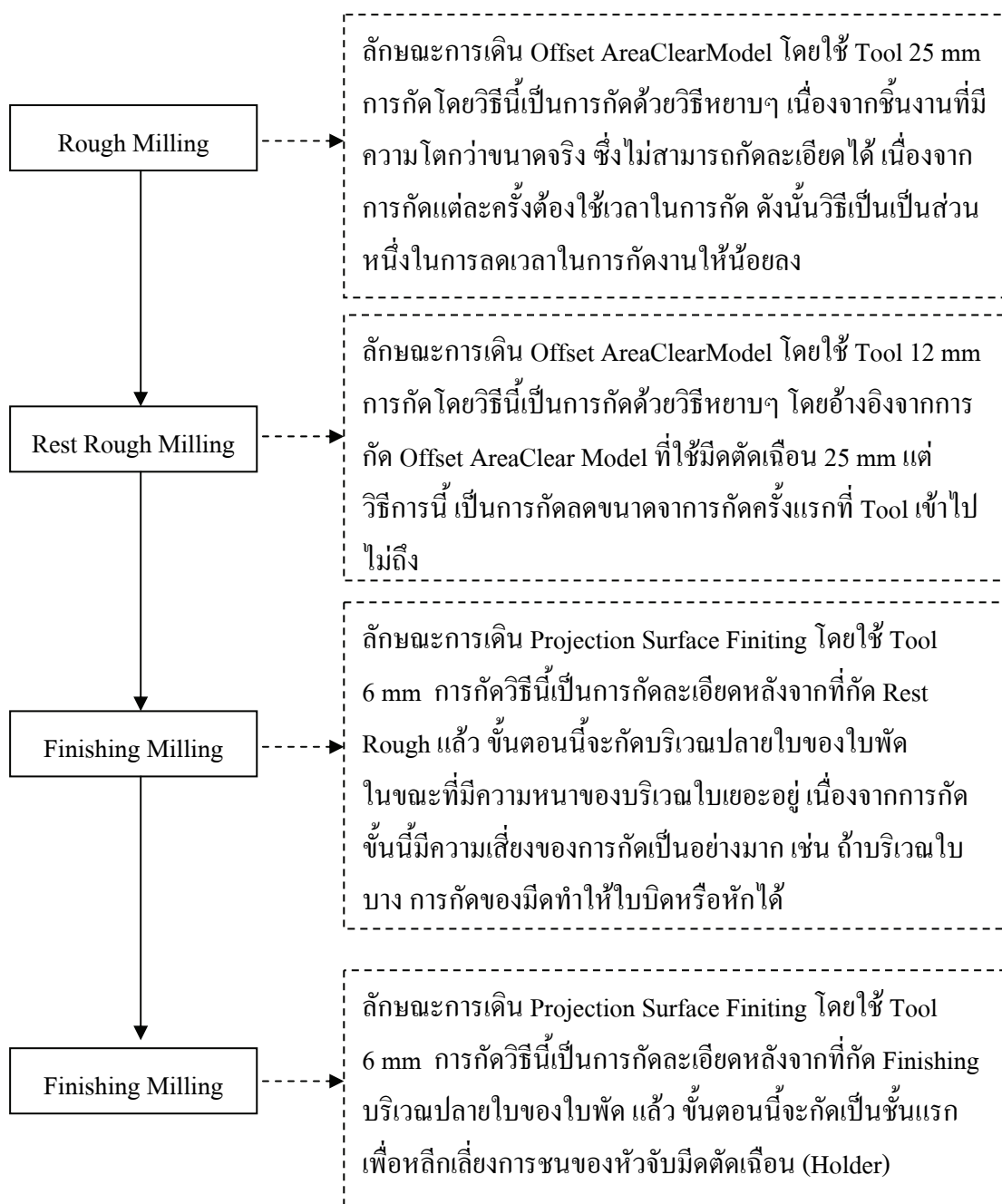
- ชาติ ตระการกุล. 2545. เทคโนโลยีซีเอ็นซี : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.
- ณัฐพล จันทน์พาณิชย์ ชนะ รัชศิริ ศรีสิทธิ์ เจียรบุตร และ ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ. 2548. วิศวกรรม  
ย้อนรอยในงานสร้างแบบกึ่งอัตโนมัติกำลังสามมิติ : สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยี  
การผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- มนูศักดิ์ จานทอง. 2542. การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิตร่วมกับอโตแคดโดยใช้  
ARX : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- ยุทธชัย เกียวสันเทียะ. 2547. การศึกษาและพัฒนากึ่งอัตโนมัติสำหรับการสูบน้ำในประเทศไทย :  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม. 2535. เครื่องจักรกล ซีเอ็นซีและ  
การโปรแกรมสำหรับเครื่องกลึงและเครื่องกัด : สำนักพัฒนาอุตสาหกรรม กรมส่งเสริม  
อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
- อำนาจ ทองแสน. 2544. ทฤษฎีและการเขียนโปรแกรม ซีเอ็นซี สำหรับการควบคุมเครื่องจักรด้วย  
คอมพิวเตอร์ . กรุงเทพฯ ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- Bilar E.L.S., 1992. "Development of a Post Processor for Five Axis CNC Milling Machine"**M.  
Eng. Thesis**, AIT, Bangkok.
- Bohez E.L.J., 1979. "Computer Aided Geometric Design and Computer Aided manufacturing of  
Rotors for Centrifugal Compressor", **Personnel findings**.
- Boyed K.B., 1974. "Five Axis Machining", **Machine Design, Vol. 46(12):** 134-138.

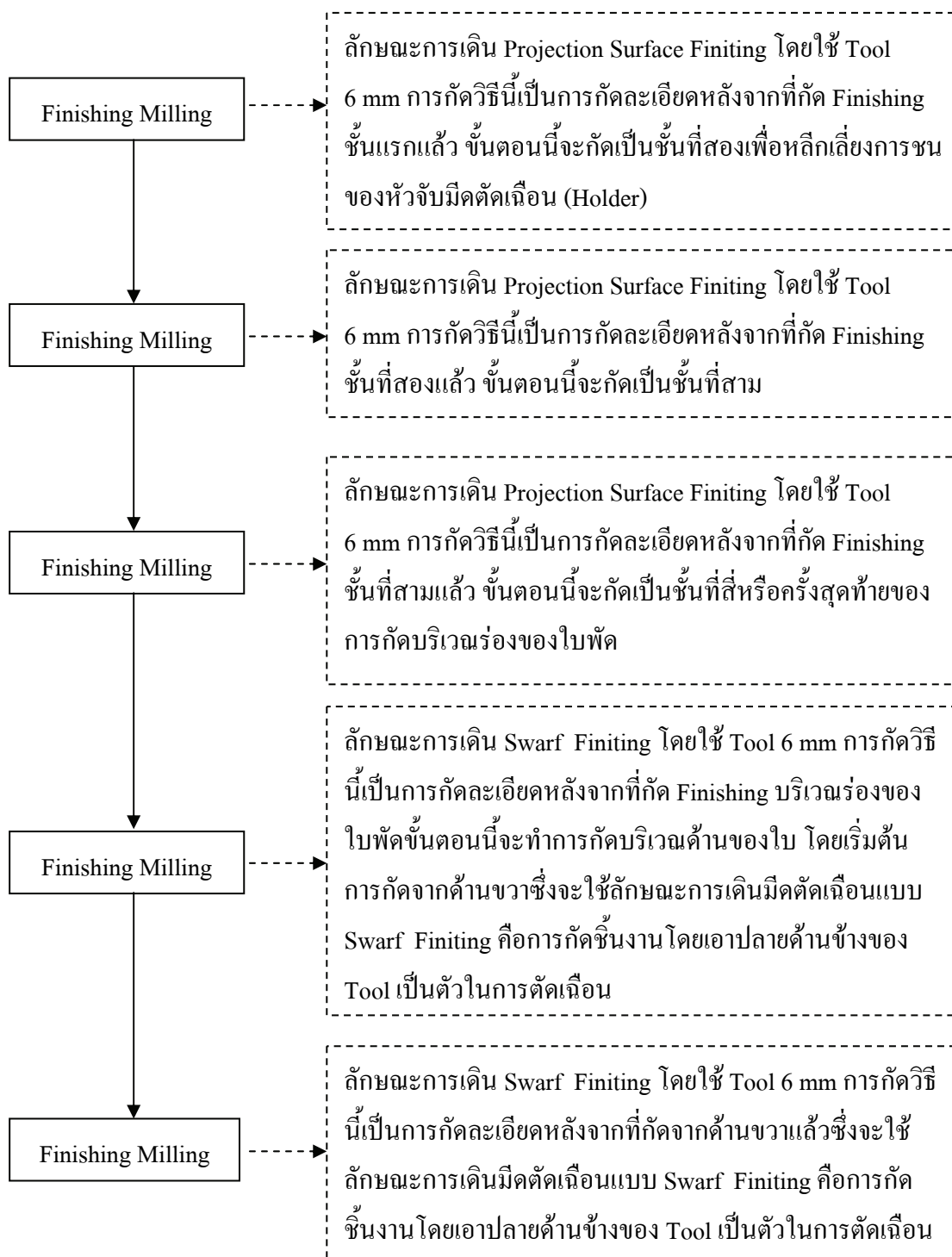
- Cardew-Hallm., 1988. "Automated Proof Inspection of Turbine Blades", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 3(2), IFS Publication, pp. 67-88.
- Johns A., 1987. "Application of Computer Techniques to the Inspection of Turbine Blades", **Quality Assurance**, Vol. 13, No.1, 1987, pp. 28-33.
- Marcinak K., 1987. "Influence of Surface Shape on Admissible Tool Positions in Five Axis Face Milling", **Computer Aided Design**, Vol.19, No.5, pp. 233-236.
- Rouaud, O., and Havet, M. 2002. "Computation of the Airflow in a Pilot Scale Clean Room using Turbulence Models," **International Journal of Refrigeration**, Vol. 25, pp. 351-361.
- Sheng X ., "5-Axis Milling", Extended Report of M 8.3.
- Werter , R. Fanucci J.B. 1979. "Vertical Axis Wind Turbine Development" U.S. Development of Energy . 178-180, **Development of Aerospace of Engineering, West Virginia**.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก.

Flow Chat การคำนวณทางเดินมีดตัดเนื้อ (Tool Path)





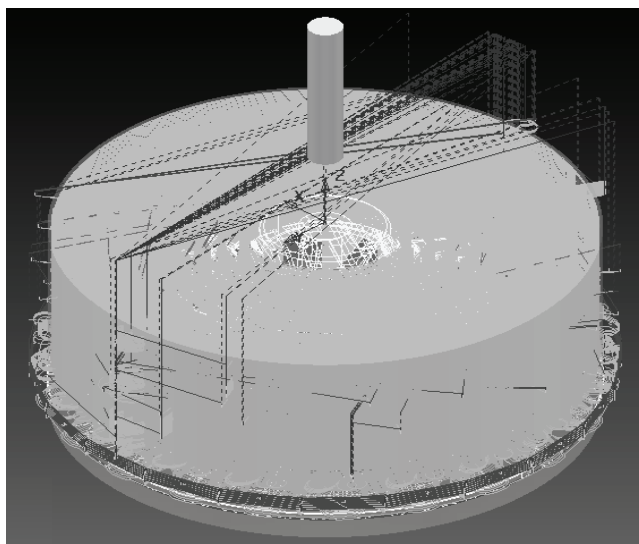
## ภาคผนวก ข.

### การจำลองเส้นทางการเดินมิดตัดเฉือน

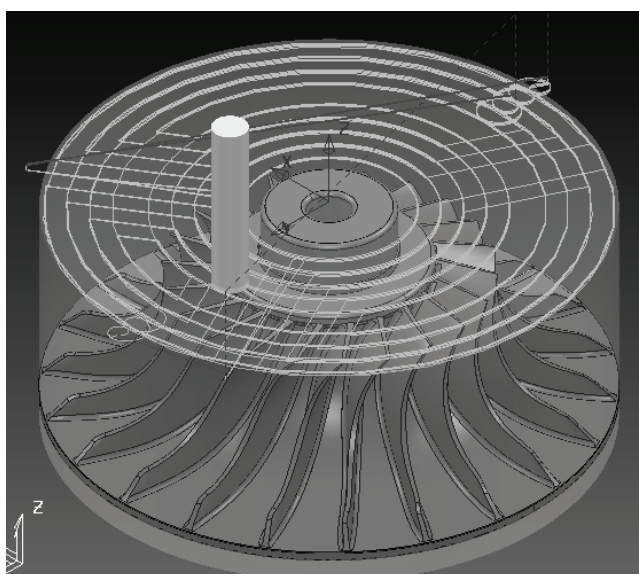
การจำลองเส้นทางของหัวกัดจะมีอยู่ส่วนท้ายของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ซึ่งใช้หลักการทำงานก็คือการอ่านไฟล์รหัสจีโค้ดที่ได้จากการคำนวณทางเดินมิดด้วยโปรแกรม Power Mill แล้วนำไป Post ลงในเครื่องกัดที่ต้องการ ซึ่งมีทั้งเส้นตรง G01 และเส้นโค้ง G02 หรือ G03 จากหลักการดังกล่าวคือเป็นการไฟล์รหัสจีโค้ดโดยตรง ดังนั้นถ้าหากไฟล์รหัสจีโค้ดมีขนาดใหญ่ก็จะทำให้การจำลองเส้นทางการเดินของหัวกัดใช้เวลานาน และในภาคผนวกนี้จะแสดงภาพการจำลองของเส้นทางการเดินของมิดตัดเฉือนของโปรแกรม Power Mill โดยภาพแรกที่จะแสดงไว้ที่ ภาพผนวกที่ ข1 ภาพการจำลองเส้นทางการเดินของมิดตัดเฉือนของโปรแกรม สำหรับงานกัดขณะเริ่มต้น ภาพผนวกที่ ข2 ภาพการจำลองเส้นทางการเดินของมิดตัดเฉือนของโปรแกรม สำหรับงานกัดในขณะกำลังกัดงาน ภาพผนวกที่ ข3 ภาพการจำลองเส้นทางการเดินของมิดตัดเฉือนของโปรแกรม สำหรับงานกัดลดขนาด ภาพผนวกที่ ข4 ภาพการจำลองเส้นทางการเดินของมิดตัดเฉือนของโปรแกรม สำหรับงานกัดลดขนาดในขณะกำลังกัดงาน ภาพผนวกที่ ข5 ภาพการจำลองเส้นทางการเดินของมิดตัดเฉือนของโปรแกรม สำหรับงานกัดละเอียดแบบ 5 แกนบริเวณปลายใบ ภาพผนวกที่ ข6 ภาพการจำลองเส้นทางการเดินของมิดตัดเฉือนของโปรแกรม สำหรับงานกัดละเอียดแบบ 5 แกนบริเวณปลายใบในขณะกำลังกัดงาน ภาพผนวกที่ ข7 ภาพการจำลองเส้นทางการเดินของมิดตัดเฉือนของโปรแกรม สำหรับงานกัดบริเวณร่องใบขณะเริ่มต้น ภาพผนวกที่ ข8 ภาพการจำลองเส้นทางการเดินของมิดตัดเฉือนของโปรแกรม สำหรับงานกัดบริเวณร่องใบโดยมีความลึก 0.5 มม ขณะกำลังกัดงานครั้งที่ 1 ภาพผนวกที่ ข9 ภาพการจำลองเส้นทางการเดินของมิดตัดเฉือนของโปรแกรม สำหรับงานกัดบริเวณร่องใบโดยมีความลึก 0.5 มม ขณะกำลังกัดงานครั้งที่ 2 ภาพผนวกที่ ข10 ภาพการจำลองเส้นทางการเดินของมิดตัดเฉือนของโปรแกรม สำหรับงานกัดบริเวณร่องใบโดยมีความลึก 0.5 มม ขณะกำลังกัดงานครั้งที่ 3 ภาพผนวกที่ ข11 ภาพการจำลองเส้นทางการเดินของมิดตัดเฉือนของโปรแกรม

สำหรับงานกัดบริเวณร่องใบโดยมีความลึก 0.5 มม ขณะกำลังกัดงานครั้งที่ 4 ภาพผนวกที่ ข12 ภาพการจำลองเส้นทางการเดินของมิดตัดเฉือนของโปรแกรม สำหรับงานกัดบริเวณขอบใบด้านขวาในขณะเริ่มต้นกัดงาน ภาพผนวกที่ ข13 ภาพการจำลองเส้นทางการเดินของมิดตัดเฉือนของโปรแกรม สำหรับงานกัดบริเวณขอบใบด้านขวาในขณะกำลังกัดงาน ภาพผนวกที่ ข14 ภาพการจำลองเส้นทางการเดินของมิดตัดเฉือนของโปรแกรม สำหรับงานกัดบริเวณขอบใบด้านซ้ายในขณะ

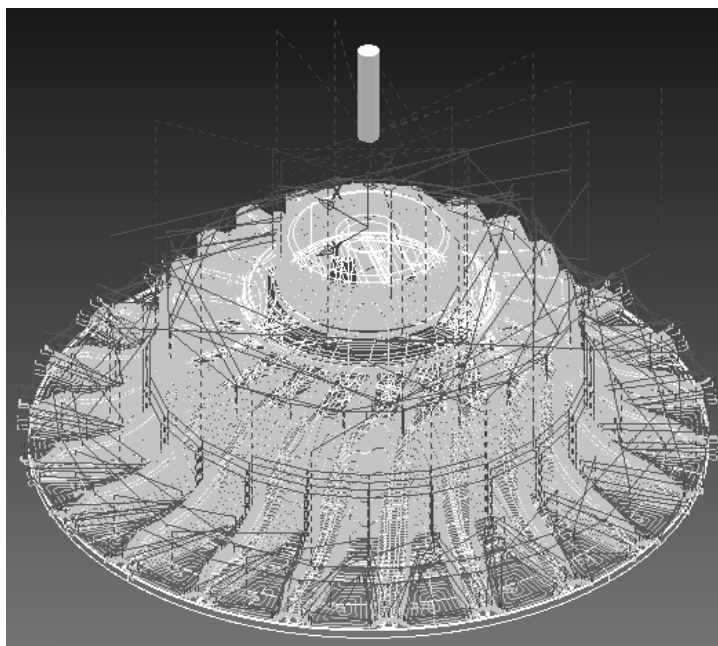
เริ่มต้นกักงาน ภาพผนวกที่ ข15 ภาพการจำลองเส้นทางเดินของมีดตัดเนื้อของโปรแกรม  
สำหรับงานกักบริเวณขอบใบด้านซ้ายในขณะกำลังกักงาน



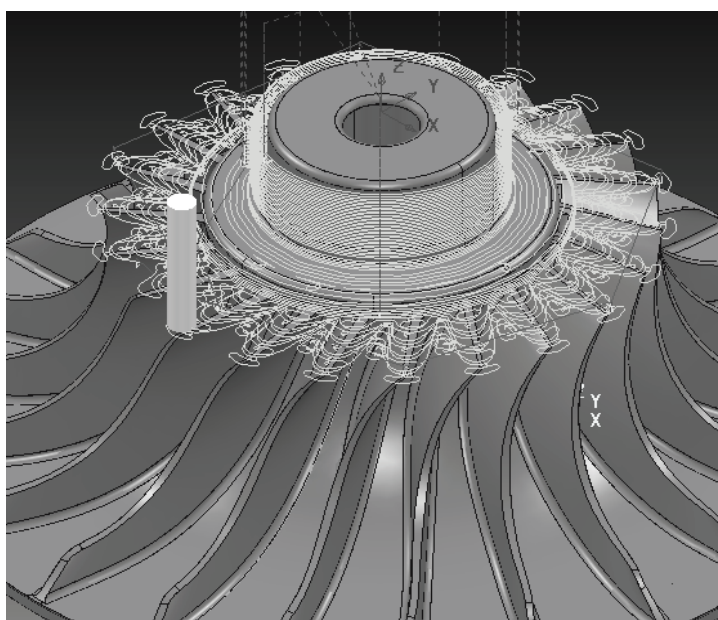
ภาพผนวกที่ ข1 ภาพการจำลองเส้นทางเดินของมีดตัดเนื้อของโปรแกรม  
สำหรับงานกักขณะเริ่มต้น



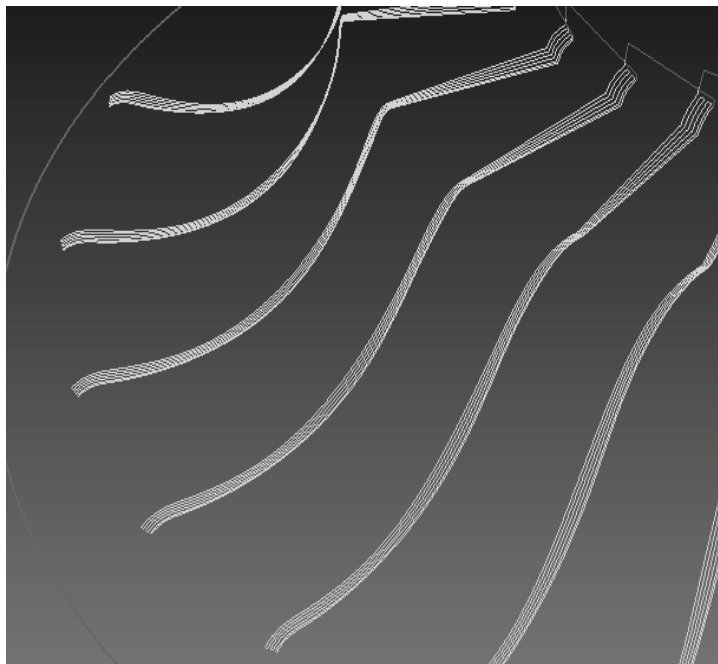
ภาพผนวกที่ ข2 ภาพการจำลองเส้นทางเดินของมีดตัดเนื้อของโปรแกรม  
สำหรับงานกักในขณะกำลังกักงาน



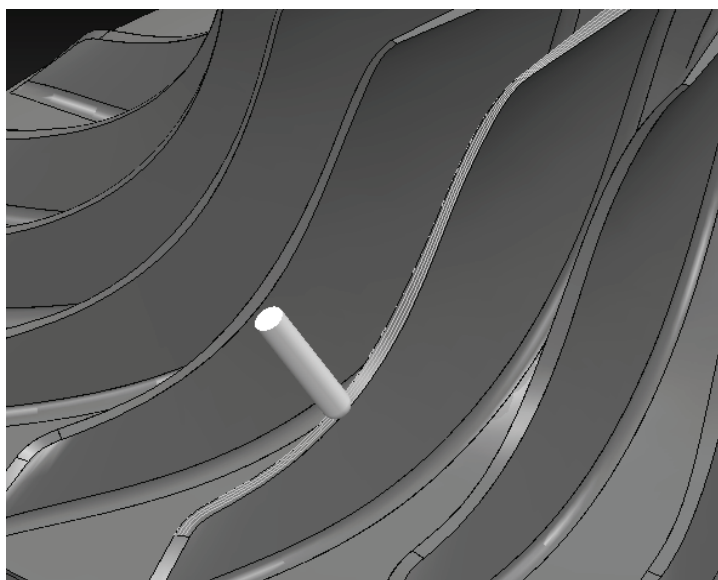
ภาพผนวกที่ ข3 ภาพการจำลองเส้นทางเดินของมีดตัดเฉือนของโปรแกรม  
สำหรับงานกัดลดขนาด



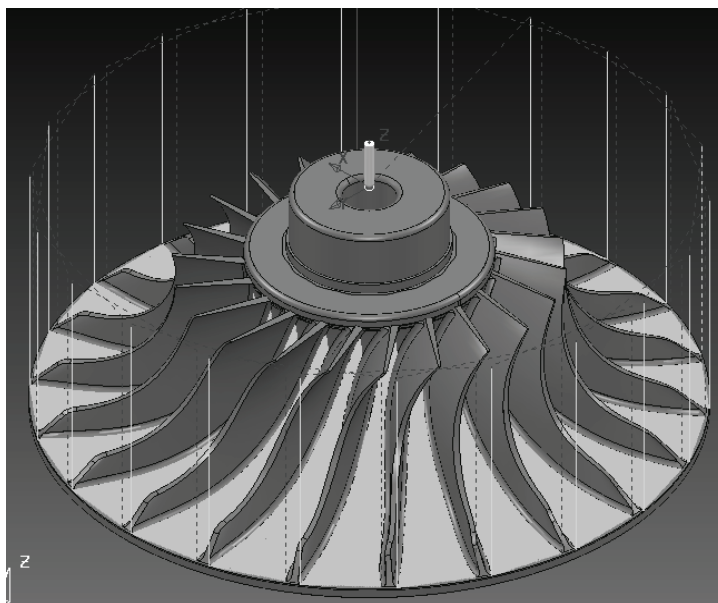
ภาพผนวกที่ ข4 ภาพการจำลองเส้นทางเดินของมีดตัดเฉือนของโปรแกรม  
สำหรับงานกัดลดขนาดในขณะกำลังกัดงาน



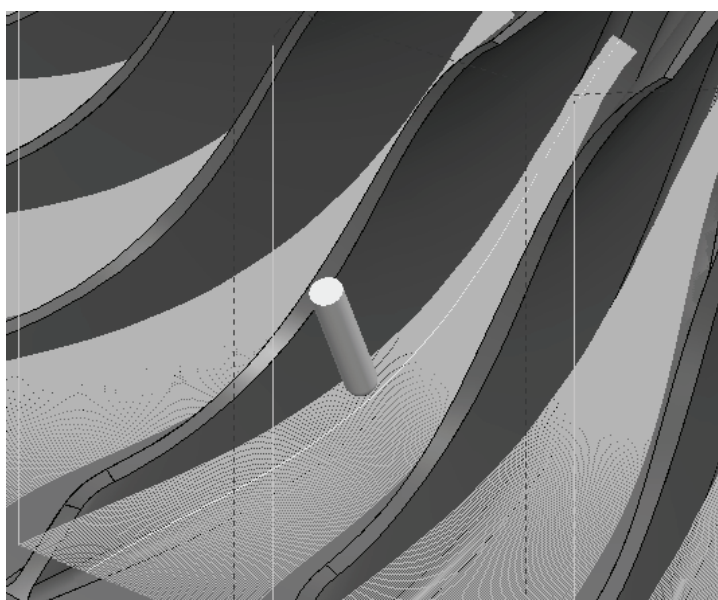
ภาพผนวกที่ ข5 ภาพการจำลองเส้นทางเดินของมีดตัดเฉือนของโปรแกรม  
สำหรับงานกัดละเอียดแบบ 5 แกนบริเวณปลายใบ



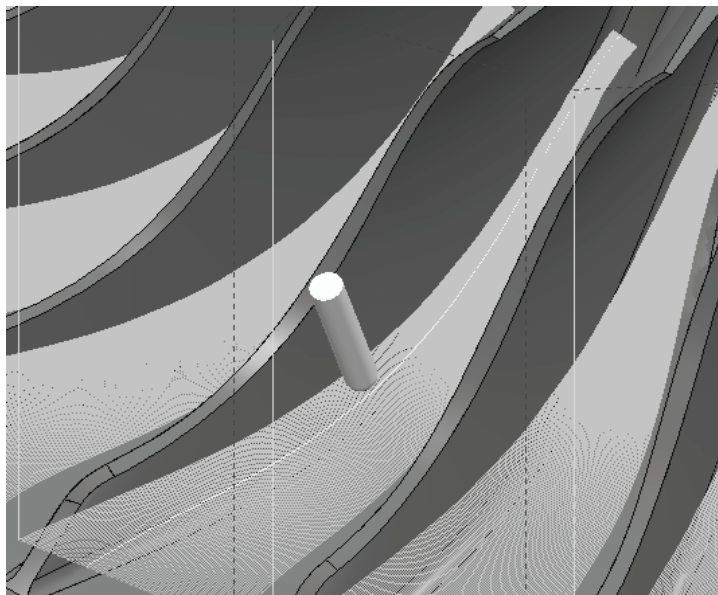
ภาพผนวกที่ ข6 ภาพการจำลองเส้นทางเดินของมีดตัดเฉือนของโปรแกรมสำหรับ  
งานกัดละเอียดแบบ 5 แกนบริเวณปลายใบในขณะกำลังทำงาน



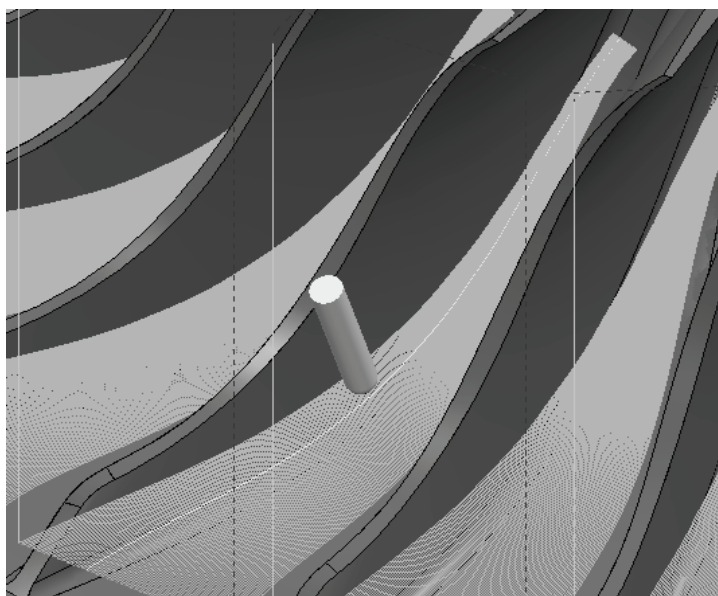
ภาพผนวกที่ ข7 ภาพการจำลองเส้นทางเดินของมีดตัดเฉือนของโปรแกรม  
สำหรับงานกัดบริเวณร่องใบขณะเริ่มต้น



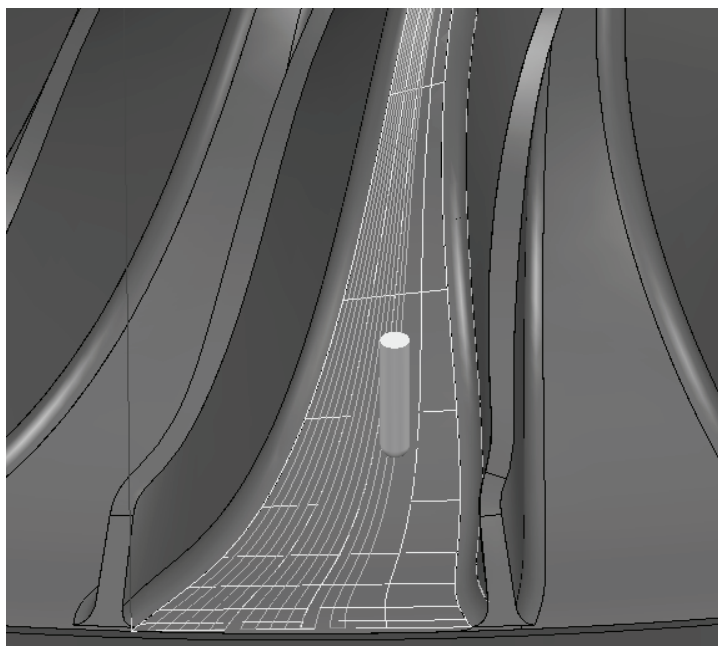
ภาพผนวกที่ ข8 ภาพการจำลองเส้นทางเดินของมีดตัดเฉือนของโปรแกรมสำหรับงานกัด  
บริเวณร่องใบโดยมีความลึก 0.5 มม ขณะกำลังกัดงานครั้งที่ 1



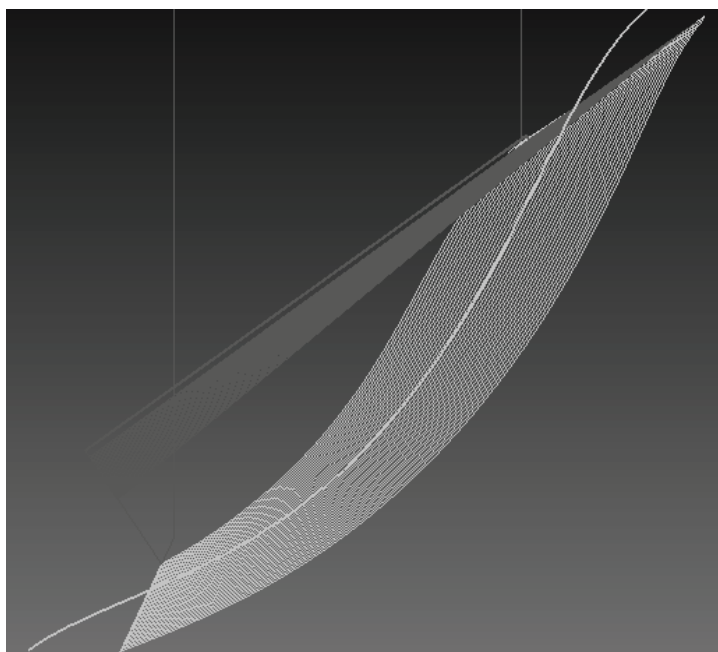
ภาพผนวกที่ ข9 ภาพการจำลองเส้นทางเดินของมีดตัดเนื้อของโปรแกรมสำหรับงานกัด  
บริเวณร่องใบ โดยมีความลึก 0.5 มม ขณะกำลังกัดงานครั้งที่ 2



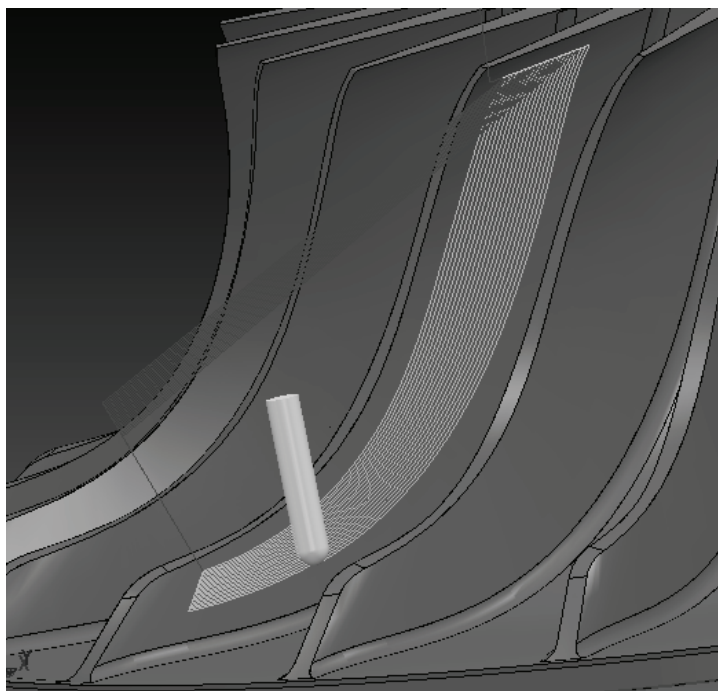
ภาพผนวกที่ ข10 ภาพการจำลองเส้นทางเดินของมีดตัดเนื้อของโปรแกรมสำหรับงานกัด  
บริเวณร่องใบ โดยมีความลึก 0.5 มม ขณะกำลังกัดงานครั้งที่ 3



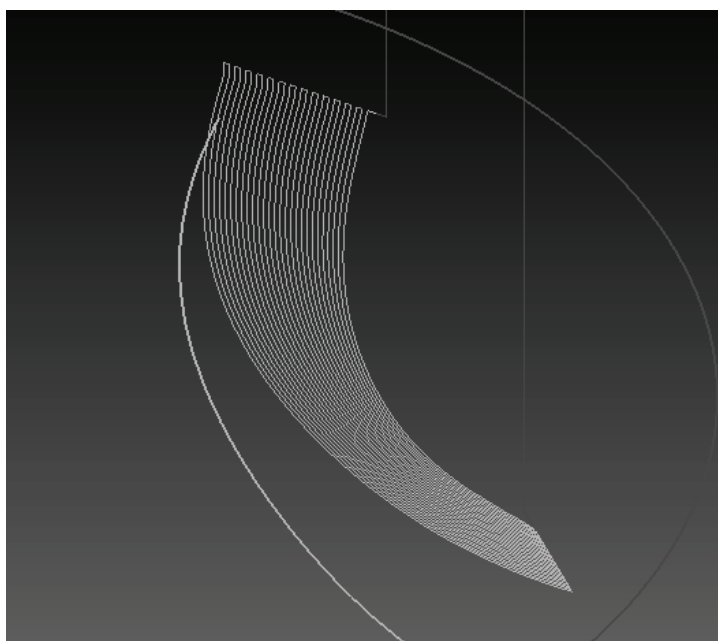
ภาพผนวกที่ ข11 ภาพการจำลองเส้นทางเดินของมีดตัดเฉือนของโปรแกรมสำหรับงานกัดบริเวณร่องใบโดยมีความลึก 0.5 มม ขณะกำลังกัดงานครั้งที่ 4



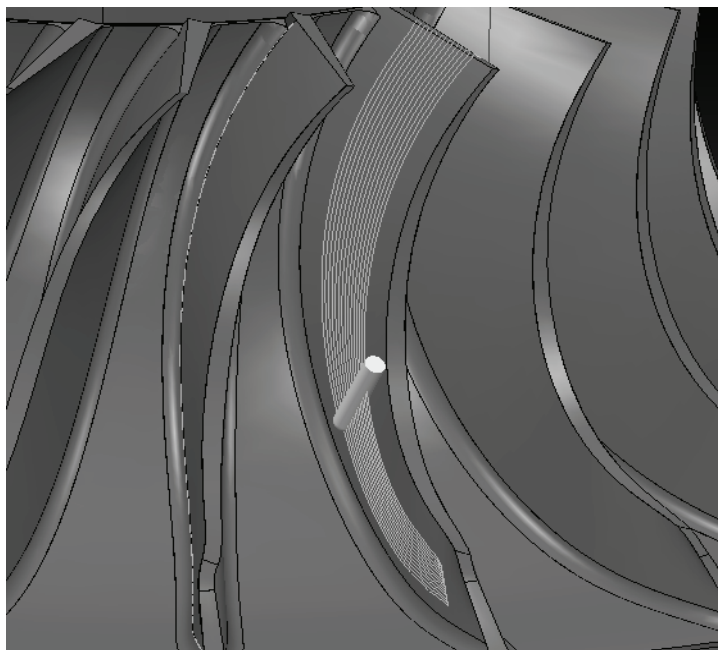
ภาพผนวกที่ ข12 ภาพการจำลองเส้นทางเดินของมีดตัดเฉือนของโปรแกรม สำหรับงานกัดบริเวณขอบใบด้านขวาในขณะเริ่มต้นกัดงาน



ภาพผนวกที่ ข13 ภาพการจำลองเส้นทางเดินของมีดตัดเฉือนของโปรแกรม สำหรับงาน  
กัดบริเวณขอบใบด้านขวาในขณะกำลังกัดงาน



ภาพผนวกที่ ข14 ภาพการจำลองเส้นทางเดินของมีดตัดเฉือนของโปรแกรม สำหรับงาน  
กัดบริเวณขอบใบด้านซ้ายในขณะเริ่มต้นกัดงาน

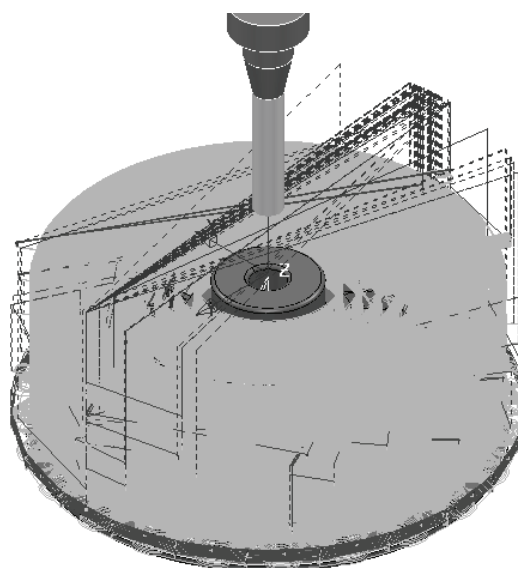
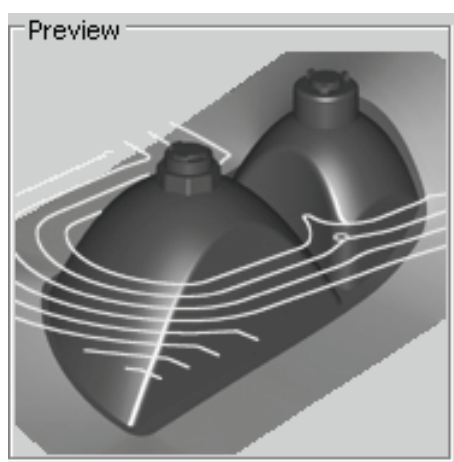


ภาพผนวกที่ ข15 ภาพการจำลองเส้นทางเดินของมีดตัดเนื้อของโปรแกรม สำหรับงาน  
กัดบริเวณขอบใบด้านซ้ายในขณะกำลังกัดงาน

ภาพผนวก ค.

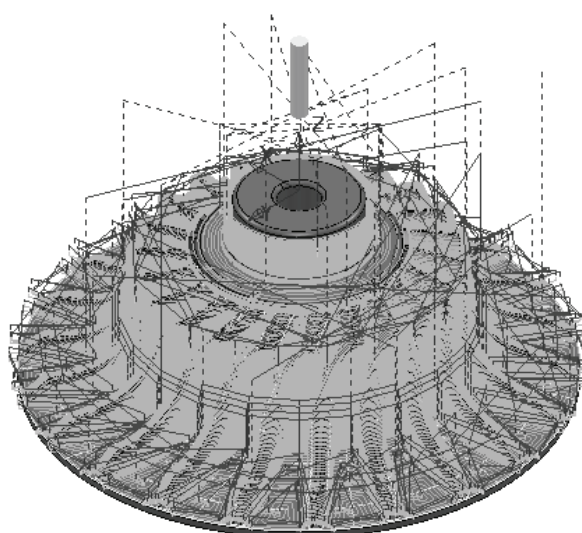
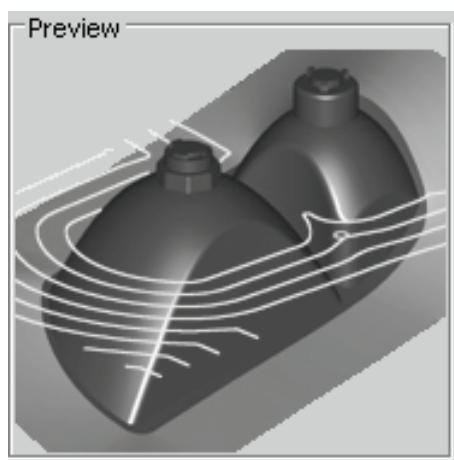
ลักษณะการเดินมีดตัดเฉือน

Offset AreaClear Model



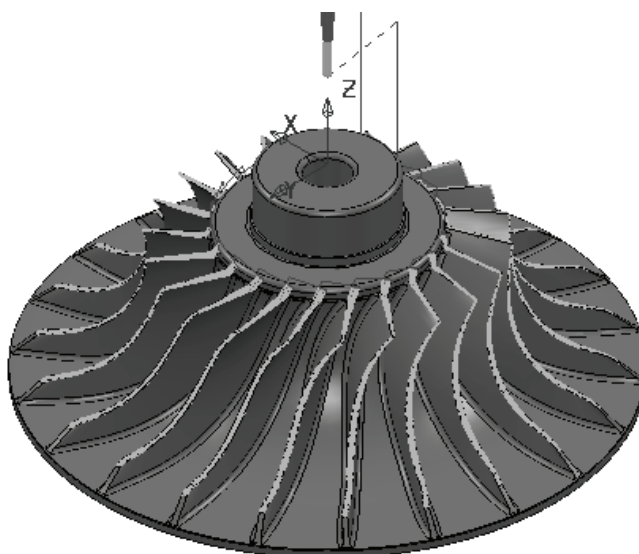
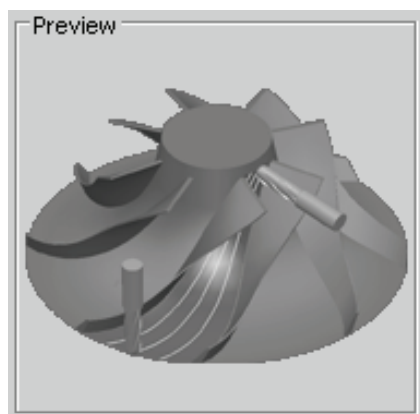
ภาพผนวกที่ ค1 ลักษณะการเดินมีดตัดเฉือนแบบ Offset AreaClear Model

Offset AreaClear Model



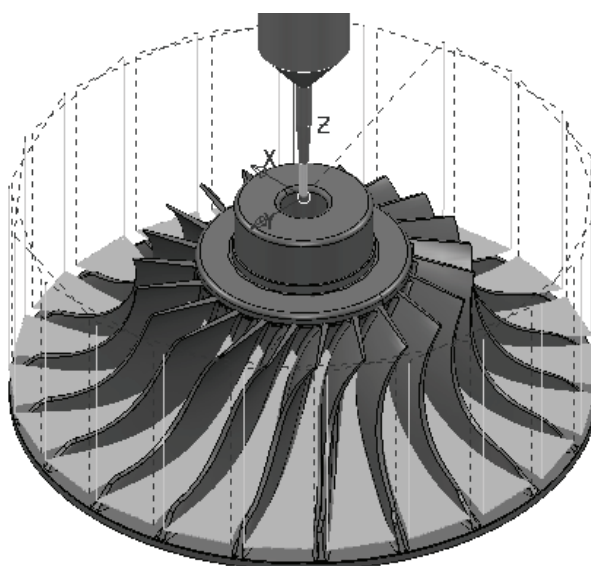
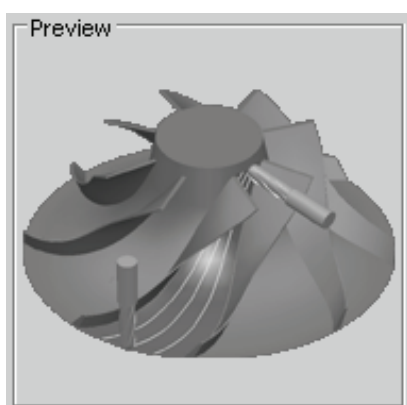
ภาพผนวกที่ ค2 ลักษณะการเดินมีดตัดเฉือนแบบ Offset AreaClear Model

♂ Projection Surface Finishing



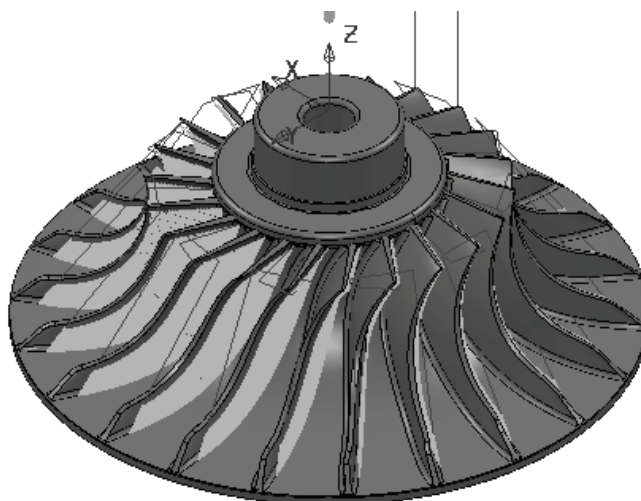
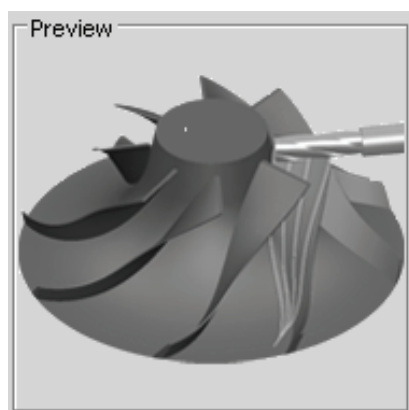
ภาพผนวกที่ ค3 ลักษณะการเดินมีดตัดเงื่อนไขแบบ Projection Surface Finiting

♂ Projection Surface Finishing



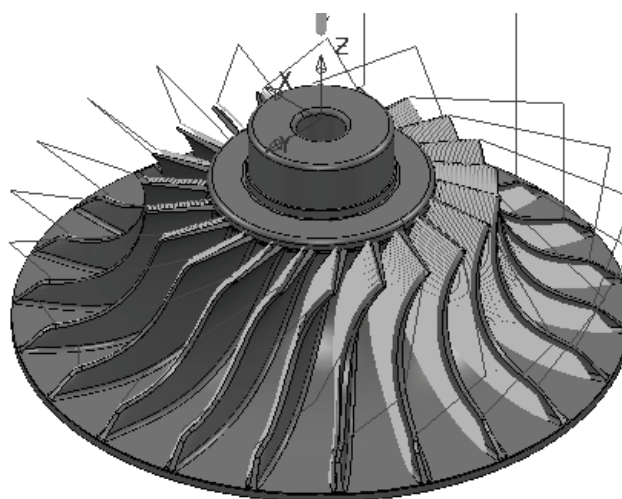
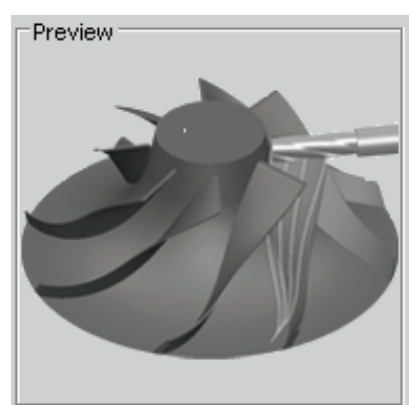
ภาพผนวกที่ ค4 ลักษณะการเดินมีดตัดเงื่อนไขแบบ Projection Surface Finiting

### Swarf Finishing

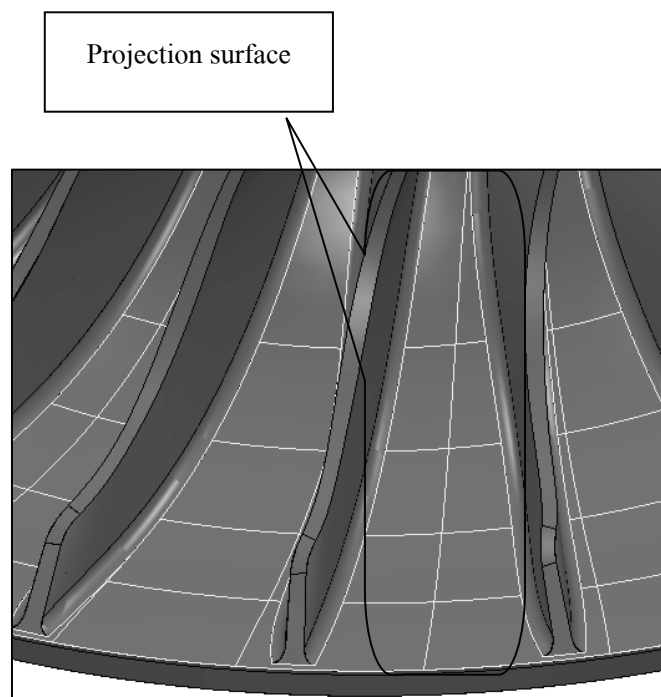


ภาพผนวกที่ ค5 ลักษณะการเดินมีดตัดเนื้อแบบ Swarf Finiting

### Swarf Finishing



ภาพผนวกที่ ค6 ลักษณะการเดินมีดตัดเนื้อแบบ Swarf Finiting



ภาพผนวกที่ ค7 ภาพลักษณะผิวของใบพัด Projection surface

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

|                              |                                                                                                            |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ –นามสกุล                | นายสวิต ฉิมเรือง                                                                                           |
| วัน เดือน ปี ที่เกิด         | 20 เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2518                                                                               |
| สถานที่เกิด                  | อำเภอปะเหลียน จ. ตรัง                                                                                      |
| ประวัติการศึกษา              | คอ.บ. (วิศวกรรมอุตสาหการ-เครื่องมือกล) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติ<br>ราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ (พ.ศ.2545) |
| ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน | อาจารย์ผู้ช่วยสอน                                                                                          |
| สถานที่ทำงานปัจจุบัน         | ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต                                                       |
| ทุนการศึกษาที่ได้รับ         | ทุนพัฒนานุเคราะห์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต (พ.ศ.2547)                                                     |