

การพัฒนากระบวนการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการผลิตชิ้นงานสามมิติโดยใช้พาราโซลิดเคอร์เนล



นายสุกิจ วรรณโสภณกุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

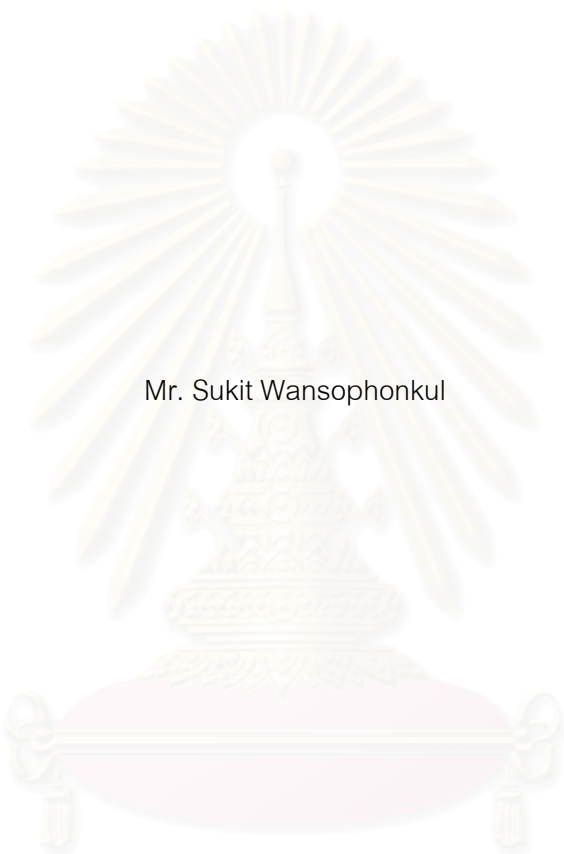
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1169-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A 3-D CAM SYSTEM BASED ON THE PARASOLID KERNEL



Mr. Sukit Wansophonkul

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1169-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนากระบวนการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการผลิตชิ้นงานสามมิติ
โดย	นายสุกิจ วรรณโสมณกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เสถียร วงศ์สารเสวีรัฐ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทร์เจริญ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุกิจ วรรณโสภณกุล : การพัฒนาระบบการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการผลิตชิ้นงานสามมิติ โดยใช้พาราโซลิดเคอร์เนล (DEVELOPMENT OF A 3-D CAM SYSTEM BASED ON THE PARASOLID KERNEL) อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 122 หน้า. ISBN 974-03-1169-5.

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ช่วยการผลิตโดยใช้พาราโซลิด เคอร์เนล ข้อมูลหลักของแบบจำลองโซลิดที่นำมาใช้งานจะอยู่ในรูปแบบพาราโซลิด เอ็กซ์ที ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานร่วมกับแบบจำลองโซลิดที่สร้างจากซอฟต์แวร์ซียูโซลิด หรือซอฟต์แวร์อื่นๆ ที่ใช้รูปแบบพาราโซลิด เอ็กซ์ที ในการเก็บข้อมูล สามารถคำนวณและสร้างเส้นทางเดินของหัวกัดจากแบบจำลองโซลิดที่เลือก แล้วสร้างรหัสจีจากเส้นทางเดินของหัวกัดสำหรับใช้ในการควบคุมเครื่องซีเอ็นซี สามารถทำงานกัดหยาบและกัดละเอียดได้โดยใช้วิธีการกัด 5 แบบ ได้แก่ งานเจาะ งานกัดหยาบ 2 แกน งานกัดคอนทัวร์ 2 แกน งานกัดหยาบ 3 แกน และงานกัดคอนทัวร์ 3 แกน สามารถแสดงภาพจำลองการกัดของวิธีการกัดทั้ง 5 แบบได้ในแบบภาพเคลื่อนไหว

จากการทดลองกัดชิ้นงานด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกนโดยใช้ระบบควบคุมของฟานัค เอ็ม 15 เอ ทดสอบหาค่าความผิดพลาดของชิ้นงานเทียบกับแบบจำลองโซลิดพบว่า งานเจาะมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง 25 ถึง 29 ไมครอน งานกัดคอนทัวร์ 2 แกนมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง 23 ถึง 66 ไมครอน และงานกัดคอนทัวร์ 3 แกนมีค่าความผิดพลาด 111 ไมครอน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....
ปีการศึกษา.....2544.....

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4170589021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: CAM / CNC / CUSOLID / PARASOLID / B-REP

SUKIT WANSOPHONKUL : DEVELOPMENT OF A 3-D CAM SYSTEM BASED ON THE PARASOLID KERNEL. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D., 122 pp. ISBN 974-03-1169-5.

This research is to develop the Computer Aided Manufacturing (CAM) software based on Parasolid graphic kernel. The Parasolid Transmission XT format is used as the main data format. This software works on solid models which are created by CU-Solid or any other CAD packages using the Parasolid Transmission XT format. This software will calculate and generate toolpaths from a given solid model. And the G-code, for controlling the CNC machine, can be obtained from the toolpaths. The rough cut and finish cut can be specified based on the 5 milling methods or procedures as drilling, 2D rough milling, 2D contour milling, 3D rough milling and 3D contour milling. The software can also display the cutting animation of the the milling procedures.

The experiments were done on the 3-axis CNC milling machine with FANUC M15A controller. The total errors of the drilling, 2D contour milling, and 3D contour milling are between 25 to 29 micron, 23 to 66 micron, and 111 micron, respectively.

Department.....Mechanical Engineering Student's signature.....

Field of study.....Mechanical Engineering Advisor's signature.....

Academic year.....2001..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ก็ด้วยความช่วยเหลือ และการเอาใจใส่อย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยด้วยดีมาตลอด และขอขอบคุณนายกฤษณะ อุตมั่ง ที่คอยให้คำปรึกษาและคอยช่วยเหลือในส่วนของงานพัฒนาโปรแกรม รวมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมา

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 วิธีต่างๆ ในการก่อกำเนิดงานทั่วไป.....	5
2.2 ระบบแกนพิกัด (Coordinate) ของเครื่องจักรกล.....	6
2.3 การโปรแกรมเอ็นซี (NC Programming).....	7
2.4 ภาษาสำหรับการโปรแกรมเอ็นซี (NC Programming Language).....	8
2.5 แบบจำลองพื้นผิว (Surface Modeler).....	9
2.6 การนำเสนอแบบจำลองโซลิด (Solid Modeler Representation).....	22
2.7 องค์ประกอบทางโทโปโลยี.....	24
2.8 องค์ประกอบทางเรขาคณิต.....	28
2.9 การกระทำบูลีนสำหรับแบบจำลองโซลิด.....	35
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
3 โครงสร้างและการออกแบบโปรแกรม.....	37
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบโปรแกรม.....	37
3.2 โครงสร้างระบบคอมพิวเตอร์ช่วยการผลิต.....	38

	หน้า
3.3 ลักษณะของโปรแกรมที่ต้องการ.....	39
3.4 การออกแบบโปรแกรม.....	40
3.5 ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้โปรแกรม.....	60
3.6 การสร้างรหัสสี และการจำลองเส้นทางเดินการกัด.....	70
4 การทดสอบโปรแกรมและผลการทดสอบ.....	73
4.1 ขั้นตอนการใช้โปรแกรมสำหรับสร้างเส้นทางเดินการกัดจากแบบจำลองซิลิคด..	73
4.2 ขั้นตอนการนำรหัสสีที่ได้ ไปทำการกัดทดสอบจริง.....	73
4.3 ขั้นตอนการทดสอบความถูกต้องของชิ้นงานที่กัดได้.....	74
4.4 การทดสอบโปรแกรม.....	74
5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	111
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	111
5.2 อภิปรายผลการวิจัย.....	114
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	119
รายการอ้างอิง.....	121
ประวัติผู้เขียน	122

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตาราง 2.1	ตัวอักษรและความหมายที่ใช้ในโปรแกรมเอ็นซี.....	9
ตาราง 4.1	ขนาดที่ตำแหน่ง 1 ของแบบชิ้นงานที่ 1.....	79
ตาราง 4.2	ขนาดที่ตำแหน่ง 2 ของแบบชิ้นงานที่ 1.....	80
ตาราง 4.3	ขนาดที่ตำแหน่ง 3 ของแบบชิ้นงานที่ 1.....	80
ตาราง 4.4	ขนาดที่ตำแหน่ง 4 ของแบบชิ้นงานที่ 1.....	80
ตาราง 4.5	ขนาดที่ตำแหน่ง 5 ของแบบชิ้นงานที่ 1.....	81
ตาราง 4.6	ขนาดที่ตำแหน่ง 6 ของแบบชิ้นงานที่ 1.....	81
ตาราง 4.7	ขนาดที่ตำแหน่ง 1 ของแบบชิ้นงานที่ 2.....	86
ตาราง 4.8	ขนาดที่ตำแหน่ง 2 ของแบบชิ้นงานที่ 2.....	87
ตาราง 4.9	ขนาดที่ตำแหน่ง 3 ของแบบชิ้นงานที่ 2.....	87
ตาราง 4.10	ขนาดที่ตำแหน่ง 4 ของแบบชิ้นงานที่ 2.....	87
ตาราง 4.11	ขนาดที่ตำแหน่ง 5 ของแบบชิ้นงานที่ 2.....	88
ตาราง 4.12	ขนาดที่ตำแหน่ง 1 ของแบบชิ้นงานที่ 3.....	91
ตาราง 4.13	ขนาดที่ตำแหน่ง 2 ของแบบชิ้นงานที่ 3.....	91
ตาราง 4.14	ขนาดที่ตำแหน่ง 1 ของแบบชิ้นงานที่ 4.....	95
ตาราง 4.15	ขนาดที่ตำแหน่ง 1 ของแบบชิ้นงานที่ 5.....	99
ตาราง 4.16	ขนาดที่ตำแหน่ง 1 ของแบบชิ้นงานที่ 6.....	103
ตาราง 4.17	ขนาดที่ตำแหน่ง 1 ของแบบชิ้นงานที่ 7.....	106
ตาราง 4.18	ขนาดที่ตำแหน่ง 1 ของแบบชิ้นงานที่ 8.....	110

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 การกัดแบบคอนทัวร์ 2 แกน.....	5
รูปที่ 2.2 การกัดแบบคอนทัวร์ 3 แกน.....	6
รูปที่ 2.3 เงื่อนไขความต่อเนื่องระดับซีศูนย์.....	10
รูปที่ 2.4 เงื่อนไขความต่อเนื่องระดับซีหนึ่ง.....	10
รูปที่ 2.5 เงื่อนไขความต่อเนื่องระดับซีสอง.....	11
รูปที่ 2.6 เส้นตรงในรูปแบบพาราเมตริก.....	12
รูปที่ 2.7 เส้นโค้งปีเซียร์.....	13
รูปที่ 2.8 เส้นโค้งปี-สไปลน์เชิงเส้น คอร์ดราติก ปี-สไปลน์ และคิวบิก ปี-สไปลน์.....	15
รูปที่ 2.9 เส้นโค้งยูนิฟอร์ม ปี-สไปลน์.....	16
รูปที่ 2.10 เส้นโค้งนอน ยูนิฟอร์ม ปี-สไปลน์.....	17
รูปที่ 2.11 ขอบเขตพาราเมตริกของพื้นผิวแผ่น.....	18
รูปที่ 2.12 พื้นผิวแผ่นที่ถูกแสดงโดยด้วยเมชขนาด10x10.....	18
รูปที่ 2.13 ทรงกระบอกทาบูล.....	19
รูปที่ 2.14 พื้นผิวจากการหมุน.....	20
รูปที่ 2.15 พื้นผิวรูล.....	20
รูปที่ 2.16 พื้นผิวรูลที่สร้างจากเส้นโค้งมากกว่า 2 เส้น.....	20
รูปที่ 2.17 พื้นผิวแผ่น.....	21
รูปที่ 2.18 พื้นผิวตาข่าย.....	21
รูปที่ 2.19 พื้นผิวยึดตามเส้นนำ.....	21
รูปที่ 2.20 พื้นผิวลอฟท์.....	22
รูปที่ 2.21 พื้นผิวออฟเซต.....	22
รูปที่ 2.22 โครงสร้างของการนำเสนอบแบบซีเอสจี.....	23
รูปที่ 2.23 โครงสร้างของการนำเสนอบแบบจำลองโซลิดชนิดบี-เรพ.....	24
รูปที่ 2.24 บริเวณในที่ว่าง 3 มิติ ของแบบจำลองโซลิด.....	25
รูปที่ 2.25 ทิศทางของหน้า.....	26
รูปที่ 2.26 ทิศทางนอร์มัลเวคเตอร์ของหน้าและพื้นผิว.....	27
รูปที่ 2.27 ทิศทางไปข้างหน้าของวง.....	27
รูปที่ 2.28 พื้นผิวระนาบ.....	29

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.29 พื้นผิวทรงกระบอก.....	30
รูปที่ 2.30 พื้นผิวทรงกรวย.....	30
รูปที่ 2.31 พื้นผิวทรงกลม.....	31
รูปที่ 2.32 พื้นผิวทอรัส.....	32
รูปที่ 2.33 เส้นตรง.....	33
รูปที่ 2.34 วงกลม.....	33
รูปที่ 2.35 วงรี.....	34
รูปที่ 2.36 การกระทำบูลีนแบบต่างๆ.....	35
รูปที่ 3.1 ผังแสดงลักษณะการทำงานของคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต.....	38
รูปที่ 3.2 รูปที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับงานเจาะ.....	41
รูปที่ 3.3 ขอบวงกลมที่เลือกจากแบบจำลองโซลิด.....	42
รูปที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์สำหรับงานกัดหยาบ 2 แกน.....	43
รูปที่ 3.5 การเลือกขอบแบบวงปิด 1 วง และ 2 วง.....	44
รูปที่ 3.6 การออฟเซตลำตัวเส้น 1 ลำตัว.....	44
รูปที่ 3.7 เส้นตรงที่เกิดจากการตัดระหว่างระนาบ Y-Z กับหน้า.....	45
รูปที่ 3.8 การออฟเซตลำตัวเส้น 2 ลำตัว.....	45
รูปที่ 3.9 การกระทำบูลีนแบบลบระหว่างลำตัวแผ่น 2 ลำตัว.....	46
รูปที่ 3.10 เส้นตรงที่เกิดจากการตัดกันระหว่างหน้าและระนาบ Y-Z.....	46
รูปที่ 3.11 แนวทางในการสร้างเส้นทางเดินการกัดแบบทิศทางเดียว และแบบไปกลับ.....	47
รูปที่ 3.12 ค่าพารามิเตอร์สำหรับงานกัดคอนทัวร์ 2 แกน.....	49
รูปที่ 3.13 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความละเอียดในการหาจุดบนเส้นโค้ง.....	49
รูปที่ 3.14 ขอบที่ถูกเลือก ซึ่งมีลักษณะเป็นขอบแบบปิด.....	49
รูปที่ 3.15 การออฟเซตลำตัวเส้นแบบการกัดด้านนอก.....	50
รูปที่ 3.16 ค่าพารามิเตอร์สำหรับงานกัดหยาบ 3 แกน.....	52
รูปที่ 3.17 ลำตัวที่ถูกเลือก.....	52
รูปที่ 3.18 ลำตัววัสดุที่ออกที่โปรแกรมอ่านค่าเข้ามา.....	53
รูปที่ 3.19 การออฟเซตผิวของลำตัว.....	53
รูปที่ 3.20 การกระทำบูลีนแบบลบระหว่างวัสดุที่ออกกับลำตัวออฟเซต.....	54

สารบัญญภาพ (ต่อ)

๗

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.21 การตัดลำตัวด้วยระนาบที่สร้างขึ้น.....	54
รูปที่ 3.22 เส้นตรงที่เกิดจากการตัดกันระหว่างหน้าและระนาบ Y-Z.....	55
รูปที่ 3.23 ค่าพารามิเตอร์สำหรับงานกัดคอนทัวร์ 3 แกน.....	56
รูปที่ 3.24 หน้าที่ถูกเลือก.....	57
รูปที่ 3.25 หน้าที่ถูกออฟเซต.....	57
รูปที่ 3.26 เส้นโค้งที่เกิดจากการตัดกันระหว่างหน้าออฟเซตและระนาบ Y-Z.....	58
รูปที่ 3.27 ทูลบาร์สำหรับการใช้งานในส่วนการผลิต.....	60
รูปที่ 3.28 แสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้โปรแกรมสำหรับงานเจาะ.....	61
รูปที่ 3.29 แสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้โปรแกรมสำหรับงานกัดหยาบ 2 แกน.....	63
รูปที่ 3.30 แสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้โปรแกรมสำหรับงานกัดคอนทัวร์ 2 แกน.....	65
รูปที่ 3.31 แสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้โปรแกรมสำหรับงานกัดหยาบ 3 แกน.....	66
รูปที่ 3.32 แสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้โปรแกรมสำหรับงานกัดคอนทัวร์ 3 แกน.....	68
รูปที่ 3.33 แสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้โปรแกรมสำหรับการเพิ่มวัสดุตัด.....	69
รูปที่ 3.34 แสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้โปรแกรมสำหรับการกำหนดจุดกำเนิดอ้างอิง.....	69
รูปที่ 3.35 แสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้โปรแกรมสำหรับการกำหนดคุณสมบัติของหัวกัด.....	70
รูปที่ 3.36 ปุ่มสำหรับการสร้างรหัสจี.....	70
รูปที่ 3.37 ไดอะล็อกสำหรับการบันทึกไฟล์ข้อมูลรหัสจี.....	71
รูปที่ 3.38 ปุ่มสำหรับการจำลองเส้นทางการกัด.....	71
รูปที่ 3.39 ภาพแสดงไดอะล็อกที่แสดงว่าขณะนั้นมีการจำลองเส้นทางการกัดอยู่.....	71
รูปที่ 3.40 ภาพแสดงการจำลองการกัดตามเส้นทางเดินที่คำนวณจากโปรแกรม.....	72
รูปที่ 4.1 เครื่องกัดซีเอ็นซี รุ่นฟานุก โมเดล เอ็มเอ สิบห้า (FANUC Model MA 15).....	73
รูปที่ 4.2 แบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 1.....	74
รูปที่ 4.3 การเพิ่มวัสดุตัดและกำหนดจุดกำเนิดแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 1.....	75
รูปที่ 4.4 การเลือกขอบรอบนอกจากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 1.....	75
รูปที่ 4.5 การเลือกขอบวงกลมขนาด 24 มิลลิเมตรจากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 1.....	76
รูปที่ 4.6 การเลือกขอบวงกลมขนาด 12 มิลลิเมตรจากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 1.....	76
รูปที่ 4.7 การเลือกขอบวงกลมขนาด 8 มิลลิเมตรจากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 1.....	77
รูปที่ 4.8 การเลือกขอบวงกลมขนาด 6 มิลลิเมตรจากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 1.....	77

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.9 การเลือกขอบวงกลมขนาด 6 มิลลิเมตรจากแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 1.....	78
รูปที่ 4.10 ชิ้นงานจริงจากแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 1	78
รูปที่ 4.11 ตำแหน่งต่างๆ ที่จะวัดขนาดของแบบชิ้นงานที่ 1.....	79
รูปที่ 4.12 แบบจำลองโซลิดชั้นที่ 2.....	82
รูปที่ 4.13 การเพิ่มวัสดุสต็อกและกำหนดจุดกำเนิดแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 2.....	82
รูปที่ 4.14 การเลือกขอบรอบด้านล่างจากแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 2.....	83
รูปที่ 4.15 การเลือกขอบรอบด้านบนจากแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 2.....	83
รูปที่ 4.16 การเลือกขอบวงกลมขนาด 12 มิลลิเมตร จากแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 2.....	84
รูปที่ 4.17 การเลือกขอบวงกลมขนาด 8 มิลลิเมตร จากแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 2.....	84
รูปที่ 4.18 ชิ้นงานจริงจากแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 2.....	85
รูปที่ 4.19 ตำแหน่งต่างๆ ที่จะวัดขนาดของแบบชิ้นงานที่ 2.....	86
รูปที่ 4.20 แบบจำลองโซลิดชั้นที่ 3.....	88
รูปที่ 4.21 การเพิ่มวัสดุสต็อกและกำหนดจุดกำเนิดแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 3.....	89
รูปที่ 4.22 การเลือกลำตัว จากแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 3.....	89
รูปที่ 4.23 การเลือกหน้า จากแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 3.....	90
รูปที่ 4.24 ชิ้นงานจริงจากแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 3.....	90
รูปที่ 4.25 ตำแหน่งต่างๆ ที่จะวัดขนาดของแบบชิ้นงานที่ 3.....	91
รูปที่ 4.26 แบบจำลองโซลิดชั้นที่ 4.....	92
รูปที่ 4.27 การเพิ่มวัสดุสต็อกและกำหนดจุดกำเนิดแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 4.....	92
รูปที่ 4.28 การเลือกขอบวงปิด 2 วง จากแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 4.....	93
รูปที่ 4.29 การเลือกขอบวงปิด 1 วงรูปสี่เหลี่ยม จากแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 4.....	93
รูปที่ 4.30 การเลือกหน้า จากแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 4.....	94
รูปที่ 4.31 ชิ้นงานจริงจากแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 4.....	94
รูปที่ 4.32 ตำแหน่งต่างๆ ที่จะวัดขนาดของแบบชิ้นงานที่ 4.....	95
รูปที่ 4.33 แบบจำลองโซลิดชั้นที่ 5.....	96
รูปที่ 4.34 การเพิ่มวัสดุสต็อกและกำหนดจุดกำเนิดแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 5.....	96
รูปที่ 4.35 การเลือกขอบวงปิด 1 วง จากแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 5.....	97
รูปที่ 4.36 การเลือกหน้าจากแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 5.....	97

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.37 ชิ้นงานจริงจากแบบจำลองโซลิตชั้นที่ 5.....	98
รูปที่ 4.38 ตำแหน่งต่างๆ ที่จะวัดขนาดของแบบชิ้นงานที่ 5.....	98
รูปที่ 4.39 แบบจำลองโซลิตชั้นที่ 6.....	99
รูปที่ 4.40 การเพิ่มวัสดุสต็อกและกำหนดจุดกำเนิดแบบจำลองโซลิตชั้นที่ 6.....	100
รูปที่ 4.41 การเลือกขอบวงปิด 2 วงด้านล่าง จากแบบจำลองโซลิตชั้นที่ 6.....	100
รูปที่ 4.42 การเลือกขอบวงปิด 1 วงด้านล่างจากแบบจำลองโซลิตชั้นที่ 6.....	101
รูปที่ 4.43 การเลือกหน้าจากแบบจำลองโซลิตชั้นที่ 6.....	101
รูปที่ 4.44 ชิ้นงานจริงจากแบบจำลองโซลิตชั้นที่ 6.....	102
รูปที่ 4.45 ตำแหน่งต่างๆ ที่จะวัดขนาดของแบบชิ้นงานที่ 6.....	102
รูปที่ 4.46 แบบจำลองโซลิตชั้นที่ 7.....	103
รูปที่ 4.47 การเพิ่มวัสดุสต็อกและกำหนดจุดกำเนิดแบบจำลองโซลิตชั้นที่ 7.....	104
รูปที่ 4.48 การเลือกขอบวงปิด 1 วงด้านตรงขอบล่างจากแบบจำลองโซลิตชั้นที่ 7.....	104
รูปที่ 4.49 การเลือกหน้าจากแบบจำลองโซลิตชั้นที่ 7.....	105
รูปที่ 4.50 ชิ้นงานจริงจากแบบจำลองโซลิตชั้นที่ 7.....	105
รูปที่ 4.51 ตำแหน่งต่างๆ ที่จะวัดขนาดของแบบชิ้นงานที่ 7.....	106
รูปที่ 4.52 แบบจำลองโซลิตชั้นที่ 8.....	107
รูปที่ 4.53 การเพิ่มวัสดุสต็อกและกำหนดจุดกำเนิดแบบจำลองโซลิตชั้นที่ 8.....	107
รูปที่ 4.54 การเลือกลำตัวจากแบบจำลองโซลิตชั้นที่ 8.....	108
รูปที่ 4.55 การเลือกหน้าจากแบบจำลองโซลิตชั้นที่ 8.....	108
รูปที่ 4.56 การเลือกขอบวงปิด 1 วงด้านตรงขอบล่างจากแบบจำลองโซลิตชั้นที่ 8.....	109
รูปที่ 4.57 ชิ้นงานจริงที่ได้จากการกัดหยาบ 3 แกน.....	109
รูปที่ 4.58 ชิ้นงานจริงจากแบบจำลองโซลิตชั้นที่ 8.....	109
รูปที่ 4.59 ตำแหน่งต่างๆ ที่จะวัดขนาดของแบบชิ้นงานที่ 8.....	110
รูปที่ 5.1 แบบจำลองชั้นที่ 1 กับชิ้นงานจริงที่กัดได้.....	114
รูปที่ 5.2 แบบจำลองชั้นที่ 2 กับชิ้นงานจริงที่กัดได้.....	115
รูปที่ 5.3 แบบจำลองชั้นที่ 3 กับชิ้นงานจริงที่กัดได้.....	116
รูปที่ 5.4 แบบชิ้นงานที่ 4 ถึง 8 เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่วาด.....	118
รูปที่ 5.5 การเกิดพื้นผิวออฟเซตตัดกันเอง.....	120

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แนวโน้มการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมและการแข่งขันทางด้านผลิตภัณฑ์ ทำให้ความต้องการทางด้านการผลิตขั้นสูง (Advance Manufacturing) เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะกระบวนการผลิตที่ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ การใช้เทคโนโลยีในการนำเอาคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ (CAD) หรือคอมพิวเตอร์ช่วยการผลิต (CAM) มีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรมสมัยใหม่ เนื่องจากช่วยเอื้อประโยชน์ในเรื่องความรวดเร็วในขั้นตอนออกแบบซึ่งสามารถแก้ไขเปลี่ยนแปลงหรือทำซ้ำได้อย่างง่ายดาย การแสดงผลทางด้านกราฟิกส์ที่มีความเหมือนจริงทำให้เห็นรูปร่างหรือจุดบกพร่องของชิ้นงาน การส่งถ่ายข้อมูลไปสู่กระบวนการอื่นๆ ความสามารถในการสร้างรหัสเชิงตัวเลขสำหรับนำไปควบคุมการทำงานของเครื่องจักรซีเอ็นซี (CNC) จากฐานข้อมูลที่ได้ออกแบบไว้ สามารถจำลองกระบวนการผลิตก่อนผลิตจริง มีความยืดหยุ่นในการผลิตชิ้นงานสูง

ในส่วนของคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต เป็นซอฟต์แวร์ที่พัฒนาวิธีการทำงานจากการใช้แรงงานคน เป็นการควบคุมเครื่องจักรให้ทำงานแบบอัตโนมัติ คอมพิวเตอร์ช่วยการผลิตจะทำการสร้างข้อมูลเชิงตัวเลขสำหรับใช้ในการควบคุมเครื่องจักรประเภทเครื่องจักรเอ็นซี (NC) และเครื่องจักรซีเอ็นซี คอมพิวเตอร์ช่วยการผลิตสามารถแบ่งตามการประยุกต์ใช้งาน หรือตามประเภทของเครื่องจักรที่ใช้ ได้แก่ งานกลึง (Turning) งานกัด (Milling) งานลวดความร้อนตัด (Wire Cut) เป็นต้น

ในปัจจุบันพบว่าซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ช่วยการผลิต และคอมพิวเตอร์ช่วยการผลิตที่มีขายในท้องตลาดนั้น เป็นซอฟต์แวร์ที่มีการพัฒนาในต่างประเทศซึ่งมีราคาที่สูงมาก ประกอบกับคอมพิวเตอร์ช่วยการผลิตในกลุ่มที่เป็นแบบจำลองโซลิด (Solid Modeler) ระดับกลาง (Mid-Range) (คอมพิวเตอร์ช่วยการผลิตระดับกลางจะมีลักษณะการทำงานและวิธีการน้อยกว่าระดับสูง (Hi-End)) ไม่ค่อยมีการพัฒนาซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ช่วยการผลิตสำหรับคอมพิวเตอร์ช่วยการผลิตนั้นๆ ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ช่วยการผลิตที่มาพร้อมกับคอมพิวเตอร์ช่วยการผลิตซึ่งพัฒนาด้วยบริษัทของตนเองมักจะมีในระดับสูง (คอมพิวเตอร์ช่วยการผลิตระดับสูงจะมีลักษณะรองรับการทำงานที่ซับซ้อนและครอบคลุมวิธีการจัดการระบบที่เกี่ยวข้องกับงานผลิตหลากหลายรูปแบบ) เช่นยูนิกราฟิกส์ โซลูชัน (Unigraphics Solution) หรือคาเทีย (CATIA) ซึ่งมีจำนวนน้อยในตลาดซอฟต์แวร์

งานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญสำหรับการเริ่มต้นพัฒนาซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ช่วยการผลิต และช่วยสนับสนุนอุตสาหกรรมการผลิตภายในประเทศให้มีประสิทธิภาพ โดยไม่จำเป็นต้องซื้อซอฟต์แวร์จากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง ประกอบกับปัจจุบันกฎหมายเกี่ยวกับลิขสิทธิ์ซอฟต์แวร์นั้นมีความเข้มงวดสูง จึงเป็นการดีที่จะส่งเสริมให้ภาคอุตสาหกรรมไทยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ช่วยการผลิตที่ถูกกฎหมายในราคาไม่แพงเหมือนต่างประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาระบบการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการผลิตชิ้นงานสามมิติ โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถคำนวณหาเส้นทางการกัดจากแบบจำลองโซลิดชนิดพาลาโซลิดเอ็กซ์ที (Parasolid XT) ซึ่งเป็นรูปแบบมาตรฐานในการจัดเก็บข้อมูลสำหรับซอฟต์แวร์ที่พัฒนาจากพาลาโซลิด เคอร์เนล แล้วนำไปสร้างรหัสจี (G Code) ซึ่งเป็นรหัสคำสั่งเชิงตัวเลขที่ควบคุมการทำงานของเครื่องกัดซีเอ็นซี (CNC Milling Machine)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 โปรแกรมที่จัดทำขึ้นสามารถคำนวณหาเส้นทางการกัดและสร้างรหัสจีจากแบบจำลองโซลิด สำหรับส่งเข้าระบบควบคุมของเครื่องกัดซีเอ็นซีแบบ 3 แกน

1.3.2 โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถกัดชิ้นงานด้วยวิธีต่างๆดังนี้

1.3.2.1 งานเจาะ (Drill)

1.3.2.2 งานกัดหยาบ 2 แกน (2D Rough)

1.3.2.3 งานกัดคอนทัวร์ 2 แกน (2D Contour)

1.3.2.4 งานกัดหยาบ 3 แกน (3D Rough)

1.3.2.5 งานกัดคอนทัวร์ 3 แกน (3D Contour)

1.3.3 ในส่วนต่อประสานกับผู้ใช้โปรแกรม (User Interface) ผู้ใช้โปรแกรมสามารถกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับการกัดได้เช่น

1.3.3.1 อัตราป้อน (Feed Rate) เป็นอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกัด

1.3.3.2 ความเร็วรอบ (Spindle Speed) เป็นความเร็วรอบของหัวกัด

1.3.3.3 ความลึกในการกัดวัสดุ

1.3.3.4 เส้นผ่านศูนย์กลางหัวกัด

1.3.3.5 ระยะห่างระหว่างเส้นทางการกัด

1.3.3.6 ทิศทางการหมุนของหัวกัด (แบบทิศทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกา)

1.3.3.7 ลักษณะเส้นทางการกัด (แบบทิศทางเดียวหรือแบบไปกลับ)

1.3.4 โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถจำลองการกัดชิ้นงาน 3 มิติ (3D Cutting Simulation) ในลักษณะภาพเคลื่อนไหว (Animation) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของเส้นทางการกัดก่อนนำไปผลิตจริง

1.3.5 ตัวอย่างชิ้นงานที่จะใช้ในการกัดทดสอบได้แก่ ชิ้นงานที่สร้างโดยวิธีทรงกระบอกทาบuled (Tabulated Surface) พื้นผิวลอฟท์ (Loft Surface) พื้นผิวจากการหมุน (Surface of Revolution) พื้นผิวเนิร์บส์ (NURBs Surface) เป็นต้น

1.3.6 การตรวจสอบความถูกต้องของชิ้นงานที่ผลิตได้ จะใช้วิธีวัดขนาดชิ้นงานด้วยเครื่องวัดซีเอ็มเอ็ม (Coordinate Measuring Machine หรือ CMM) แล้วนำไปหาค่าความผิดพลาดเทียบกับแบบจำลองโซลิดที่ออกแบบไว้

1.4 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

1.4.1 ศึกษาปัญหา

1.4.1.1 ศึกษาวิธีการจัดเก็บข้อมูลของแบบจำลองโซลิด สำหรับพาราโซลิด เคอร์เนล

1.4.1.2 ศึกษาฟังก์ชัน (Function) ต่างๆ ของพาราโซลิด เคอร์เนล

1.4.1.3 ศึกษากระบวนการเขียนส่วนต่อประสานของพาราโซลิด เคอร์เนล

1.4.1.4 ศึกษาการทำงานของเครื่องกัดซีเอ็นซี

1.4.1.5 ศึกษาความหมายและระเบียบวิธีการเขียนรหัสจี

1.4.1.6 ศึกษาถึงวิธีการดึงข้อมูลที่เป็นองค์ประกอบทางโทโปโลยี และองค์ประกอบทางเรขาคณิตจากแบบจำลองโซลิด

1.4.2 ออกแบบโปรแกรม

1.4.2.1 ออกแบบในส่วนของการวิธีการกัด

1.4.2.2 ออกแบบในส่วนของการต่อประสานกับผู้ใช้โปรแกรม

- 1.4.3 เขียนโปรแกรมตามที่ออกแบบไว้
- 1.4.4 ทดสอบโปรแกรมที่สร้างขึ้น
- 1.4.5 ศึกษาข้อบกพร่องของโปรแกรมที่เขียน
- 1.4.6 ประเมินและสรุปผลวิทยานิพนธ์
- 1.4.7 ทำรายงานวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถสร้างรหัสจีจากแบบจำลองโซลิดชนิดพลาโซลิด เอ็กซ์ที เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องกัดซีเอ็นซีแบบ 3 แกน
- 1.5.2 เข้าใจถึงลักษณะการเก็บข้อมูลของแบบจำลองโซลิดชนิดบี-เรพ (Boundary Representation, B-Rep) ซึ่งเป็นรากฐานที่สำคัญในการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับแบบจำลองโซลิดทั้งในด้านการออกแบบและการผลิต
- 1.5.3 เป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมขนาดเล็กและกลาง (SMEs) ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตชิ้นส่วน
- 1.5.4 ลดค่าใช้จ่ายในการซื้อซอฟต์แวร์ต่างประเทศ ซึ่งมีราคาสูง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

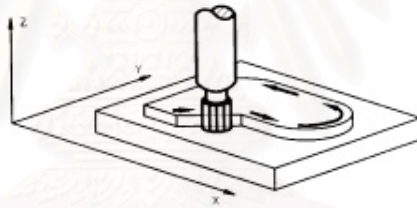
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วิธีต่างๆ ในการกัดชิ้นงานทั่วไป

2.1.1 การเจาะ (Drilling) เป็นการเจาะเนื้อวัสดุลงไปบนตำแหน่งที่ต้องการ ตามความลึกที่กำหนดไว้

2.1.2 งานกัดหยาบ 2 แกน (2D Rough) เป็นการกำจัดพื้นที่ของวัสดุภายในขอบเขตที่กำหนดขึ้น บนระนาบ X-Y (รองรับถึงลักษณะงานกัดแบบสองแกนครึ่ง โดยสามารถกัดเป็นลำดับชั้นในแนวแกน Z ได้)

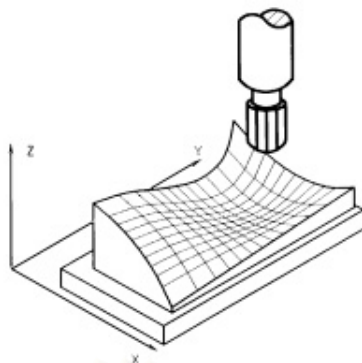
2.1.3 งานกัดคอนทัวร์ 2 แกน (2D Contour) เป็นการเดินหัวกัดตามโพรไฟล์ (Profile) ของวงปิดที่ถูกกำหนดขึ้น บนระนาบ X-Y (รองรับถึงลักษณะงานกัดแบบสองแกนครึ่ง โดยสามารถกัดเป็นลำดับชั้นในแนวแกน Z ได้) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การกัดแบบคอนทัวร์ 2 แกน

2.1.4 งานกัดหยาบ 3 แกน (3D Rough) เป็นการกำจัดปริมาตรของวัสดุภายในขอบเขตที่กำหนดขึ้น โดยทำการกัดเป็นชั้นๆ ในแต่ละระนาบ X-Y จากบนลงล่าง

2.1.5 การกัดคอนทัวร์ 3 แกน (3D Contour) เป็นการเดินหัวกัดตามโพรไฟล์ (Profile) ของพื้นผิวที่ถูกกำหนดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ขณะกัดชิ้นงานหัวกัดสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้ง 3 แกน โดยเป็นอิสระจากกัน



รูปที่ 2.2 การกัดแบบคอนทัวร์ 3 แกน

2.2 ระบบแกนพิกัด (Coordinate) ของเครื่องจักรกล

ระบบควบคุมของเครื่องจักรซีเอ็นซีจะเปลี่ยนค่าแกนพิกัดในโปรแกรมเอ็นซี (NC) ให้เป็นระยะเลื่อนของหัวกัด หรือระยะเลื่อนของชิ้นงาน ซึ่งทั้ง 2 กรณีจะให้ผลการทำงานที่เหมือนกัน โดยทั่วไปในการเขียนโปรแกรมเส้นทางเดินสำหรับการกัดนั้นจะกำหนดให้ชิ้นงานอยู่กับที่และให้หัวกัดเป็นตัวเคลื่อนที่ ซึ่งจะอยู่ในรูปการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของหัวกัดเทียบกับชิ้นงาน โดยเครื่องจักรซีเอ็นซีทั่วไปจะกำหนดแนวแกน Z ให้อยู่แนวแกนเดียวกับแกนของเพลลาหัวกัดของเครื่อง ส่วนแนวแกน X จะจัดให้อยู่ในระนาบเดียวกับผิวของตัวจับชิ้นงาน โดยปกติจะกำหนด X ในทิศทางขวามือเป็นบวก ส่วนแนวแกน Y นั้นเป็นไปตามตามกฎมือขวา

2.2.1 จุดศูนย์ (Zero Point) และจุดอ้างอิง (Reference Point) การเคลื่อนที่แบบต่างๆ ของเครื่องจักรซีเอ็นซีจะถูกควบคุมด้วยระบบแกนพิกัด ตำแหน่งที่ถูกต้องภายในพื้นที่ทำงานของเครื่องจักรจะวัดระยะจากจุดศูนย์ นอกจากจุดศูนย์แล้วยังมีจุดอ้างอิงอื่นๆ อีกเพื่อช่วยเสริมการทำงานของโปรแกรมสำหรับการอ้างอิงตำแหน่งต่างๆ บนชิ้นงาน

2.2.1.1 จุดศูนย์ของเครื่องจักร (Machine Zero Point) การจับยึดชิ้นงานเข้ากับเครื่องจักรซีเอ็นซีต้องสัมพันธ์กันทั้งในส่วนขนาดที่กำหนดในแบบจำลอง และระบบแกนของเครื่องจักรซีเอ็นซี เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบขนาดซึ่งกันและกันได้ เครื่องจักรซีเอ็นซีทุกเครื่องมีระบบแกนพิกัดประกอบอยู่ ระบบนี้จะกำหนดจากการเคลื่อนที่ของระบบวัดระยะการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรซีเอ็นซีโดยจำเป็นจะต้องมีจุดจุดหนึ่งที่ใช้เป็นจุดอ้างอิงว่าคือพิกัด X, Y และ Z เท่ากับศูนย์ ซึ่งจุดนี้คือจุดศูนย์ของเครื่องจักรซึ่งจะถูกกำหนดโดยผู้ผลิตเครื่องจักรซีเอ็นซีซึ่งเพื่อใช้เป็นจุดศูนย์ของระบบแกนพิกัดของเครื่องจักร ใช้เป็นจุดเริ่มต้นสำหรับระบบแกนพิกัดอื่นๆ และเป็นจุดอ้างอิงในเครื่องจักรด้วย

2.2.1.2 จุดอ้างอิง (Reference Point) เป็นจุดที่ใช้ในการปรับค่าและควบคุมระบบวัดขนาดระยะการเคลื่อนที่ของแท่นเลื่อนและเครื่องมือ ตำแหน่งของจุดอ้างอิงจะถูก

กำหนดไว้ก่อนล่วงหน้าอย่างเที่ยงตรงในทุกแนวแกนของการเคลื่อนที่ด้วยสวิตช์จำกัดระยะ (Limit Switch) หรือสวิตช์ขาแตะ (Trip Dogs) ดังนั้นค่าแกนพิกัดของจุดอ้างอิงจะมีค่าเท่าเดิมเสมอ และรู้ตัวเลขที่แน่นอนที่สัมพันธ์กับจุดศูนย์ของเครื่อง

2.2.1.3 จุดศูนย์ของชิ้นงาน (Work Piece Zero Point) เป็นจุดที่ช่วยในการกำหนดระบบแกนพิกัดของชิ้นงานที่สัมพันธ์กับจุดศูนย์ของเครื่อง จุดศูนย์ของชิ้นงานนั้นจะถูกเลือกใช้โดยผู้เขียนโปรแกรมโดยเลือกได้อย่างอิสระ แต่ต้องอยู่ภายในขอบเขตการทำงานของเครื่องจักร โดยปกติจะกำหนดไว้ที่ตำแหน่งที่เป็นจุดอ้างอิงต่างๆที่กำหนดไว้ในแบบของชิ้นงานอยู่แล้วเพื่อความสะดวกในการเปลี่ยนขนาดของชิ้นงานและหลีกเลี่ยงการคำนวณค่าแกนพิกัดเพิ่มเติม

2.2.1.4 จุดอ้างอิงหัวกัด (Tool Reference Point) ขนาดความยาวของเครื่องมือในโปรแกรมจะต้องตรงกับขนาดความยาวของเครื่องมือจริง ดังนั้นจึงต้องทำการวัดขนาดความยาวของเครื่องมือจริงก่อนที่เครื่องจักรจะเริ่มทำงานตามโปรแกรม และข้อมูลที่วัดได้จะถูกป้อนเข้าไปไว้ในระบบความจำของส่วนที่เก็บข้อมูลของเครื่องมือ (Tool Data Storage) ของเครื่องจักรซีเอ็นซี

2.3 การโปรแกรมเอ็นซี (NC Programming)

ในโปรแกรมเอ็นซี ขั้นตอนการกัดสำหรับผลิตชิ้นส่วนด้วยเครื่องจักรซีเอ็นซีจะถูกเขียนในรูปแบบที่ระบบควบคุมสามารถเข้าใจได้ พร้อมทั้งเงื่อนไขอื่นๆ เช่น อัตราป้อน ความเร็วรอบ การเปิดปิดสารหล่อเย็น เป็นต้น ในโปรแกรมเอ็นซีจะประกอบไปด้วยชุดคำสั่งต่างๆ มากมาย ซึ่งระบบควบคุมจะเปลี่ยนชุดคำสั่งเหล่านี้ให้เป็นสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมเครื่องจักร

คำสั่งในโปรแกรมเอ็นซีจะเขียนควบคู่ไปกับเงื่อนไขเสริม ทำให้เกิดเป็นบล็อก (Block) ของโปรแกรมขึ้น ดังนั้นโปรแกรมเอ็นซีจึงประกอบไปด้วยบล็อกของโปรแกรมหลายบล็อกที่เขียนขึ้นตามขั้นตอนการกัดที่กำหนดไว้รวมกัน เช่น

G00 (คำสั่ง)	X60 Y90 Z0 (เงื่อนไขเสริม)
G01	X53 Y76 Z0 F0.2
G01	X14 Y76 Z12
G02	X34 Y50 Z12 R20

โปรแกรมบล็อกสามารถแบ่งออกได้โดยการใช้หมายเลขบล็อกเช่น N10, N20 เป็นต้น ระบบควบคุมบางแบบจะต้องให้หมายเลขของโปรแกรมบล็อกทุกบล็อกและระบบควบคุมบางแบบจะให้หมายเลขบล็อกเฉพาะบางบล็อกเท่านั้น ตัวอย่างเช่น

N60 (หมายเลขบล็อก)	G01	X10 Z-76
N70	G27	
N80	T5	

เงื่อนไขเสริม อาจประกอบด้วย

- ก. ข้อมูลเรขาคณิต เช่นข้อมูลแกนพิกัด X20 Y40 Z30
- ข. ข้อมูลทางเทคนิค เช่นอัตราป้อน F100 หรือ ความเร็วรอบ S1000 เป็นต้น
- ค. ข้อมูลทางเทคนิคของโปรแกรม เป็นการให้ชื่อของโปรแกรมบล็อกที่มีการทำงานซ้ำๆ กัน ตัวอย่างเช่น

P50 = เริ่มการทำงานของ Block ในโปรแกรม Block ที่ 50

Q60 = สิ้นสุดการทำงานของ Block ในโปรแกรม Block ที่ 60 เป็นต้น

2.4 ภาษาสำหรับการโปรแกรมเอ็นซี (NC Programming Language)

ภาษาที่ใช้ในการโปรแกรมของระบบควบคุม จะมีการกำหนดเป็นมาตรฐาน โปรแกรมบล็อกจะประกอบด้วยจำนวนคำ (Word) หลายคำรวมกัน คำเหล่านี้จะประกอบขึ้นจากตัวอักษรหรือสัญลักษณ์กับตัวเลขรวมกัน

คำที่ใช้ในโปรแกรมบล็อกอาจทำหน้าที่เป็นคำสั่ง หรือเป็นเงื่อนไขเสริมสำหรับการทำงานก็ได้ ขึ้นอยู่กับตัวอักษรและตัวเลขที่กำกับอยู่ ตัวอักษรคำสั่งที่มีความสำคัญมาก คือจี (G) ซึ่งเป็นคำสั่งในการใช้ควบคุมเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของเครื่องมือ ส่วนตัวอักษรที่ใช้สำหรับเงื่อนไขเสริมที่สำคัญได้แก่

X, Y, Z	เป็นข้อมูลของแกนอ้างอิง
F	เป็นอัตราเร็วของการป้อน
S	เป็นความเร็วรอบของหัวกัด

ตารางที่ 2.1 จะแสดงถึงตัวอย่างของตัวอักษรและความหมายที่ใช้ในโปรแกรมเอ็นซี

ตารางที่ 2.1 ตัวอักษรและความหมายที่ใช้ในโปรแกรมเอ็นซี

ตัวอักษร	ลักษณะสำคัญ
N	หมายเลขบล็อกของโปรแกรม
G	คำสั่งเบื้องต้น
XYZ	ค่าตำแหน่งหรือระยะทางในแกนพิกัดฉาก
IJK	ค่า Coordinate ของศูนย์กลางส่วนโค้ง
F	กำหนดค่าอัตราป้อน
S	กำหนดความเร็วรอบของแกนหลัก
T	กำหนด Tool
M	คำสั่งการทำงานเสริม

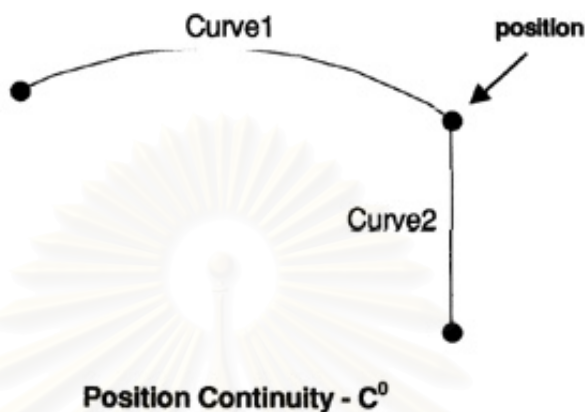
2.5 แบบจำลองพื้นผิว (Surface Modeler)

รูปทรงบางอย่างนั้นไม่สามารถสร้างได้ด้วยเทคนิคการสร้างแบบจำลองโซลิด (Solid Modeling Technique) เช่น การสร้างแบบจำลองรูปแบบอิสระ (Free-Formed Modeling) ซึ่งพบมากในการออกแบบที่เน้นความสวยงาม หรือมีการให้ความสำคัญกับรูปร่างพื้นผิวของวัตถุ เช่น ในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ เครื่องบินหรือแม้แต่ในเครื่องอุปโภคบริโภคทั่วไป

2.5.1 เงื่อนไขความต่อเนื่องในเส้นโค้งประกอบ (Composite Curve) บ่อยครั้งที่ต้องใช้เส้นโค้งประกอบในแบบจำลองที่ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ มีเงื่อนไขความต่อเนื่อง 3 ข้อ บนจุดเชื่อมของเซกเมนต์ที่ต้องนำมาพิจารณา

2.5.1.1 ความต่อเนื่องระดับซีศูนย์ (C^0 Continuity)

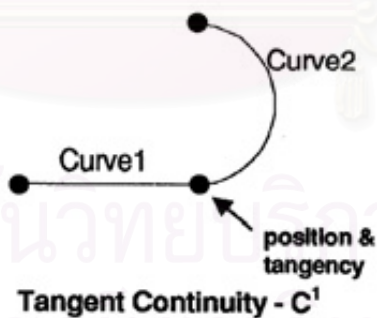
ความต่อเนื่องระดับซีศูนย์เป็นความต่อเนื่องของตำแหน่ง เมื่อเส้นโค้ง 2 เส้นเชื่อมต่อกันโดยมีจุดปลายเชื่อมกัน ไม่จำเป็นต้องมีความชันหรือเคอร์เวเจอร์ (Curvature) ที่จุดเชื่อมเท่ากัน เป็นความต่อเนื่องระดับศูนย์ รูปที่ 2.3 แสดงถึงเงื่อนไขความต่อเนื่องระดับซีศูนย์



รูปที่ 2.3 เงื่อนไขความต่อเนื่องระดับซีศูนย์

2.5.1.2 ความต่อเนื่องระดับซีหนึ่ง (C^1 Continuity)

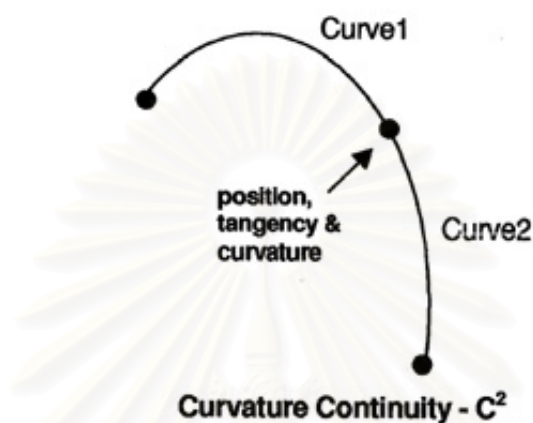
ความต่อเนื่องระดับซีหนึ่งเป็นความต่อเนื่องของความชัน เมื่อจุดที่เส้นโค้ง 2 เส้นมาบรรจบกันมีตำแหน่งของจุดปลายทั้งสองที่เดียวกันและค่าความชันที่จุดเชื่อมเป็นค่าเดียวกัน เป็นความต่อเนื่องระดับหนึ่ง เงื่อนไขนี้มีความจำเป็นเมื่อต้องการการเปลี่ยนแปลงที่ราบเรียบของเส้นโค้ง 2 เส้นหรือพื้นผิวที่ต่อกัน รูปที่ 2.4 แสดงถึงเงื่อนไขความต่อเนื่องระดับซีหนึ่ง



รูปที่ 2.4 เงื่อนไขความต่อเนื่องระดับซีหนึ่ง

2.5.1.3 ความต่อเนื่องระดับซีสอง (C^2 Continuity)

ความต่อเนื่องระดับซีสองเป็นค่าความต่อเนื่องของเคอร์เวเจอร์ โดยเพิ่มเติมขึ้นมาในส่วนของคุณที่เส้นโค้ง 2 เส้นมาบรรจบกันจะต้องมีรัศมีความโค้งหรือเคอร์เวเจอร์ค่าเดียวกัน เป็นความต่อเนื่องระดับสอง เงื่อนไขนี้จำเป็นสำหรับความต่อเนื่องของแนวเส้นโค้งทั้งสองหรือพื้นผิวทั้งสองที่ติดกัน รูปที่ 2.5 แสดงถึงเงื่อนไขความต่อเนื่องระดับซีสอง



รูปที่ 2.5 เงื่อนไขความต่อเนื่องระดับซีสอง

2.5.2 เส้นโค้ง (Curve) เส้นโค้งนับเป็นพื้นฐานสำคัญของการสร้างพื้นผิว (Surface) สมการที่ใช้นิยามเส้นโค้งนั้นมีอยู่ 2 รูปแบบคือ อนุไลติคอล (Analytical) หรือ นอนพาราเมตริก (Non Parametric) และ พาราเมตริก (Parametric)

2.5.2.1 สมการอนุไลติคอล (Analytical Equation) หรือ สมการนอนพาราเมตริก (Non Parametric Equation)

เส้นตรง $y = mx + c$

วงกลม $(x - a)^2 + (y + b)^2 = r^2$

พาราโบลา $y = bx^2 + c$

ไฮเพอร์โบลา $xy = k$

วงรี $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$

สมการเหล่านี้อยู่ในรูปอนุไลติคอล หรือนอนพาราเมตริก ซึ่งอาจแสดงในรูปแบบซอเนอเรน (Implicit) $f(x, y) = 0$ หรือ เป็ดเผย (Explicit) $y = f(x)$ อย่างไรก็ตามรูปแบบสมการเหล่านี้ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้แสดงถึงเรขาคณิตในระบบคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ เนื่องด้วยเหตุผลบางอย่าง

ก. สมการขึ้นกับระบบพิกัด X-Y

ข. สมการส่วนใหญ่จะไม่แสดงขอบเขต นอกเสียจากจะกำหนดข้อบังคับ

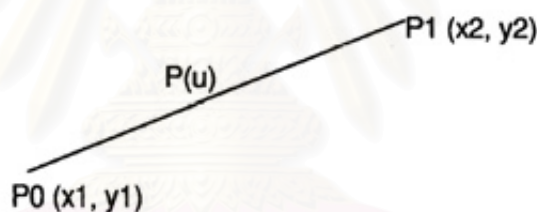
(Constraint) บางอย่างมาด้วย

ค. สมการในรูปแบบชอนเว้นั้นไม่เหมาะที่จะนำมาคำนวณหาจุดบนเส้นโค้ง เช่นแกน X อาจไม่ได้ผ่านเส้นโค้งและไม่สามารถหาค่า Y ออกมาได้

ในระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบนั้นการใช้สมการแบบพาราเมตริกจะช่วยแก้ไขปัญหาก็กล่าวมาข้างต้น

2.5.2.2 สมการพาราเมตริก (Parametric Equation) สมการในรูปแบบนี้ตัวแปรพารามิเตอร์นั้นจะไม่ขึ้นกับระบบพิกัด X-Y ตัวอย่างเช่นสมการพาราเมตริกของเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.6

$$P(u) = P_0 + u(P_1 - P_0)$$



รูปที่ 2.6 เส้นตรงในรูปแบบพาราเมตริก

จากสมการข้างต้นจะพบว่าจุดบนเส้นตรงที่พารามิเตอร์ u ใดๆนั้นสามารถคำนวณหาได้ สมการพาราเมตริกสำหรับคำนวณค่า x และ y ที่แสดงในรูปของพารามิเตอร์ u แสดงในรูปแบบดังนี้

$$Px(u) = P_0x + u(P_1x - P_0x) \quad \text{หรือในรูป} \quad x = f(u)$$

$$Py(u) = P_0y + u(P_1y - P_0y) \quad \text{หรือในรูป} \quad y = g(u)$$

ค่าพารามิเตอร์ u จะอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ปกติจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ถ้าแทนค่า $u=0$ และ $u=1$ จะได้จุดเริ่มต้นและจุดปลายของเส้นโค้ง ค่าของ u ในช่วง 0 ถึง 1 จะให้จุดพิกัดบนเส้นโค้ง ส่วนทิศทางของเส้นโค้งจะแสดงด้วยลำดับการเพิ่มขึ้นของค่าพารามิเตอร์ u เช่น จาก 0 ถึง 1 รูปแบบเวกเตอร์ของสมการข้างต้นจะแสดงในรูปแบบดังนี้

$$P(u) = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(u) \\ g(u) \end{bmatrix}$$

ส่วนสมการ พาราเมตริก ของเส้นโค้งอื่นๆ เช่นวงกลม พาราโบลา ไฮเพอร์โบลา หรือวงรีก็จะมีรูปคล้ายกันแต่จะเป็นสมการกำลัง 2 สมการพาราเมตริกของเส้นโค้ง ในที่ว่าง 3 มิติจะแสดงในรูป

$$P(u) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(u) \\ g(u) \\ h(u) \end{bmatrix}$$

เส้นโค้งที่ต้องใช้ระดับดีกรี (Degree Order) สูงๆ นั้นมีความจำเป็น สำหรับการแสดงรูปร่างที่มีความซับซ้อน โดยทั่วไประบบคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบส่วนใหญ่จะใช้ เส้นโค้งบีเซียร์ (Bezier Curve) แทนรูปร่างที่มีความซับซ้อน

2.5.2.2.1 เส้นโค้งบีเซียร์ (Bezier Curve) เส้นโค้งบีเซียร์นั้นนิยามด้วย จำนวนของจุด ซึ่งประกอบไปด้วยจุดแรกและจุดสุดท้ายที่ เส้นโค้งผ่าน และจุดช่วงกลางซึ่งมีผลต่อ รูปร่างของเส้นโค้ง เส้นตรงที่เกิดจากจุดแรกและจุดที่สองของเส้นโค้งจะนิยามสัมผัสเริ่มต้น (Starting Tangent) ส่วนเส้นตรงที่เกิดจากจุด 2 จุดสุดท้ายจะนิยามสัมผัสสิ้นสุด (End Tangent) รูป ที่ 2.7 แสดงถึงเส้นโค้งบีเซียร์



รูปที่ 2.7 เส้นโค้งบีเซียร์

จุดต่างๆ ที่นิยามขึ้นมาี้ เรียกว่าจุดควบคุม (Control Point) และเส้น ตรงที่เชื่อมต่อระหว่างจุดควบคุม เรียกว่าคาแรคเทอริสติก โพลีกอน (Characteristic Polygon) จำนวนระดับดีกรี (Degree) ของเส้นโค้งนั้นหาได้จากจำนวนจุดควบคุมลบด้วยหนึ่ง บทบาทที่

สำคัญของจุดควบคุม คือมีผลต่อรูปร่างของเส้นโค้งทั้งหมด เช่นหากมีการเคลื่อนย้ายจุดควบคุมจุดใดจุดหนึ่ง รูปร่างของเส้นโค้งทั้งหมดก็จะเปลี่ยนแปลงไป

ถ้าต้องการแก้ไขรูปร่างบางส่วนของเส้นโค้ง โดยให้ส่วนอื่นๆ คงที่นั่นมีความจำเป็นที่ต้องใช้ เส้นโค้งมากกว่า 1 เส้นขึ้นไป และเมื่อทำการแก้ไขเส้นโค้งใน 1 เซกเมนต์ (Segment) จะเกี่ยวข้องไปถึงเซกเมนต์อื่นๆ ด้วยขึ้นกับเงื่อนไขความต่อเนื่อง เช่นตำแหน่ง (Position) การสัมผัส (Tangency) และเคอร์เวเจอร์ (Curvature) ที่จุดเชื่อมของแต่ละเซกเมนต์

2.5.2.2.2 บี-สไปลน์ (B-Spline) บี-สไปลน์เป็นเส้นโค้งหลายเซกเมนต์ (Multi-Segmented Curve) โดยที่แต่ละเส้นโค้งเป็นบีเซียร์ ซึ่งใช้ในการสร้างเส้นโค้งที่มีรูปร่างซับซ้อนหรือไม่ปกติ จากที่ได้กล่าวมาแล้วจะพบว่าจำนวนจุดควบคุมที่จำเป็นในการนิยามเส้นโค้งแต่ละเซกเมนต์ ที่มีระดับดีกรีต่างๆ กันจะเป็นไปตามรูปแบบความสัมพันธ์ดังนี้

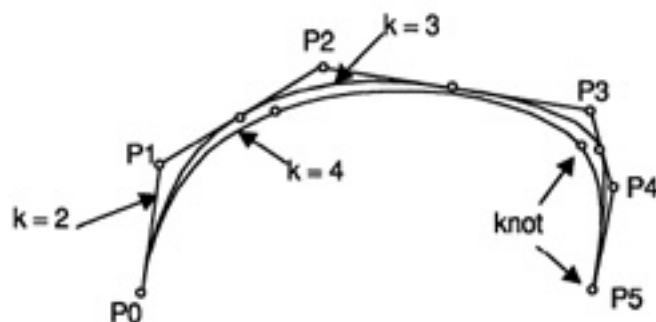
จำนวนจุดควบคุม k จุด จะใช้ในการแสดงเซกเมนต์ของเส้นโค้งบีเซียร์ที่มีระดับดีกรี $k-1$

รูปที่ 2.8 แสดงถึงบี-สไปลน์เชิงเส้น (Linear B-Spline) ควอดราติก บี-สไปลน์ (Quadratic B-Spline) และ คิวบิก บี-สไปลน์ (Cubic B-Spline)

บี-สไปลน์เชิงเส้น มีดีกรีเท่ากับ 1 ถูกสร้างขึ้นมาจากเซกเมนต์เส้นตรงหลายเส้น ใช้จุดควบคุม 2 จุดในการนิยามแต่ละเซกเมนต์เส้นตรง เช่น P0P1, P1P2, P2P3, P3P4 และ P4P5 การเลื่อนตำแหน่งจุดควบคุมช่วงกลางเช่น P1, P2, P3 หรือ P4 จะมีผลต่อรูปร่างของ 2 เซกเมนต์เส้นตรงที่ใช้จุดนั้นอยู่ เซกเมนต์ในส่วนอื่นๆ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง สิ่งนี้ถือเป็นจุดสำคัญของเส้นโค้งแบบหลายเซกเมนต์ (Multi Segment Curve)

ควอดราติก บี-สไปลน์ มีดีกรีอันดับสอง ใช้จุดควบคุม 3 จุดในการนิยามเส้นโค้งเซกเมนต์เช่น P0P1P2, P1P2P3, P2P3P4 และ P3P4P5 จะพบว่าเส้นโค้งจะสัมผัสกับจุดกึ่งกลางของ เซกเมนต์เส้นตรงหลายเหลี่ยม (Polygon Line Segment) ช่วงกลาง การเลื่อนตำแหน่งจุดควบคุมช่วงกลางจะมีผลต่อรูปร่างของ 3 เส้นโค้งเซกเมนต์

คิวบิก บี-สไปลน์ มีดีกรีอันดับ 3 ใช้จุดควบคุม 4 จุดในการนิยามเส้นโค้งเซกเมนต์เช่น P0P1P2P3 P1P2P3P4 และ P2P3P4P5 การเลื่อนตำแหน่งของจุดควบคุมช่วงกลางจะมีผลต่อรูปร่างของ 4 เส้นโค้งเซกเมนต์



รูปที่ 2.8 เส้นโค้งบี-สไปลน์เชิงเส้น ควบคุมราติก บี-สไปลน์ และคิวกิก บี-สไปลน์

โดยทั่วไปจะพบว่าสำหรับบี-สไปลน์ที่มีดีกรี k การเลื่อนตำแหน่งจุดควบคุมช่วงกลางจะมีผลต่อรูปร่างของเส้นโค้งเซกเมนต์ $k+1$ เส้น โดยที่ส่วนอื่นๆ นอกจากนี้ไม่เปลี่ยนแปลง ข้อดีตรงนี้สามารถทำให้ผู้ออกแบบแก้ไขรูปร่างในบางบริเวณ (Local Shape) ได้สำหรับเส้นโค้งเดียวกัน

2.5.2.2.3 ปม (Knot) ปมคือตำแหน่งบนเส้นโค้งประกอบที่แบ่งเซกเมนต์หรือเป็นตำแหน่งของจุดเชื่อมระหว่าง 2 เซกเมนต์ จำนวนของปมสำหรับบี-สไปลน์สามารถคำนวณหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$t = n - k + 1$$

โดยที่

t คือจำนวน ปม

n คือจำนวนของจุดควบคุมทั้งหมดในบี-สไปลน์

k คือระดับดีกรีของสมการบี-สไปลน์

เช่นสำหรับคิวกิก บี-สไปลน์ที่มี 6 จุดควบคุม จะมี 4 ปม ($6-3+1$) ปมแต่ละปมจะแยกเซกเมนต์แต่ละเซกเมนต์ออกจากกันอย่างชัดเจน

2.5.2.2.4 การจัดเรียงค่าพารามิเตอร์ของเส้นโค้ง

(Curve Parameterization)

ค่าพารามิเตอร์ u ของเส้นโค้งเซกเมนต์เดี่ยว เช่นเส้นตรงหรือเส้นโค้งบี-สไปลน์จะเปลี่ยนแปลงในช่วง 0 ถึง 1 โดย เส้นโค้งสามารถถูกมองเป็นทางเดินของจุดที่ได้จากค่าพารามิเตอร์ u โดยค่าพารามิเตอร์ $u = 1$ ค่าจะให้จุดที่แน่นอน 1 จุด การกระจายของพารามิเตอร์

u ก็จะทำให้เกิดการสะสมของจุดเหล่านี้ ซึ่งนิยามรูปร่างของเส้นโค้ง เราเรียกการสะสมของจุดเหล่านี้ว่าการจัดเรียงค่าพารามิเตอร์ของเส้นโค้ง

การจัดเรียงค่าพารามิเตอร์ของเส้นโค้งนั้นขึ้นกับสมการพาราเมตริกของเส้นโค้ง ในกรณีของสมการเส้นตรงสามารถทำนายตำแหน่งของจุดที่ค่าพารามิเตอร์ u ได้ เช่นที่ $u = 0.5$ เป็นตำแหน่งกึ่งกลางของเส้นตรง แต่สำหรับเส้นโค้งที่มีสมการซับซ้อนอย่างเส้นโค้งบีซีเยร์นั้นไม่สามารถทำนายได้

เมื่อพิจารณาการจัดเรียงค่าพารามิเตอร์ของเส้นโค้งกับบี-สไปไลน์ซึ่งเป็นเส้นโค้งประกอบ ค่าพารามิเตอร์ u ในแต่ละเซกเมนต์เปลี่ยนแปลงในช่วง 0 ถึง 1

2.5.2.2.5 ยูนิฟอร์ม บี-สไปไลน์ (Uniform B-Spline)

ยูนิฟอร์ม บี-สไปไลน์ สำหรับระดับดีกรีตั้งแต่ 2 ขึ้นไป จะมีลักษณะการกระจายช่วงพารามิเตอร์แบบคงตัวในแต่ละเซกเมนต์และมีเงื่อนไขความต่อเนื่องอย่างน้อยที่สุดคือซีหนึ่ง ที่ปม ในช่วงกลาง รูปที่ 2.9 แสดงถึงเส้นโค้งยูนิฟอร์ม บี-สไปไลน์

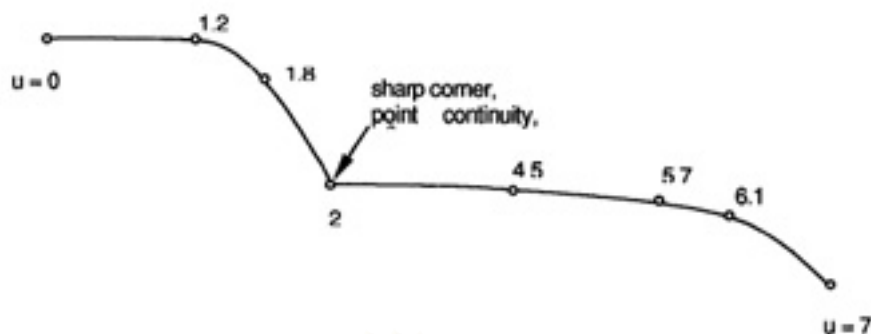


รูปที่ 2.9 เส้นโค้งยูนิฟอร์ม บี-สไปไลน์

ในบางกรณียูนิฟอร์ม บี-สไปไลน์นั้นไม่เหมาะสมในการควบคุมรูปร่างบางอย่าง เช่นในกรณีที่ปมในช่วงกลางต้องการเงื่อนไขความต่อเนื่องแบบซีศูนย์ ยูนิฟอร์ม บี-สไปไลน์ไม่สามารถแสดงเส้นโค้งลักษณะเช่นนี้ได้ แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียตรงจุดนี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ นอน ยูนิฟอร์ม บี-สไปไลน์ (Non Uniform B-Spline)

2.5.2.2.6 นอน ยูนิฟอร์ม บี-สไปไลน์ (Non Uniform B-Spline)

นอน ยูนิฟอร์ม บี-สไปไลน์ สำหรับระดับดีกรีตั้งแต่ 2 ขึ้นไป จะมีลักษณะการกระจายช่วงพารามิเตอร์แบบไม่คงตัวในแต่ละเซกเมนต์ และมีเงื่อนไขความต่อเนื่องในทุกๆ ระดับที่ปมในช่วงกลาง (ซีศูนย์ ซีหนึ่ง และซีสอง) พบว่า นอน ยูนิฟอร์ม บี-สไปไลน์มีความยืดหยุ่นสูงในการนิยามรูปร่างพื้นผิวแบบแบบอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เส้นโค้งนอน ยูนิฟอร์ม บี-สไปไลน์

ปกติแล้วในการสร้างพื้นผิวต่างๆ จะใช้เส้นโค้งหลายๆ แบบรวมถึงวงกลมหรือเส้นโค้งจากภาคตัดกรวย เช่นพาราโบลา ไฮเพอร์โบลา หรือวงรีด้วย ซึ่งบี-สไปไลน์นั้นมียกเว้นคือไม่สามารถแสดงวงกลมหรือเส้นโค้งจากภาคตัดกรวยได้

2.5.2.2.7 เส้นโค้งเรชันนอล (Rational Curve)

เส้นโค้งเรชันนอลจะถูกนิยามลงบนระบบพิกัดแบบหนึ่ง ซึ่งประกอบไปด้วยระบบพิกัดคาร์ทีเซียนสามมิติ (เช่น X , Y , Z) และพิกัดที่เพิ่มเข้ามา (W) ถ้าพิกัด $P(X, Y, Z)$ เป็นจุดในที่ว่าง จุดที่นิยามในพิกัดใหม่ (4 มิติ) จะถูกนิยามเป็น $Ph(hx, hy, hz, h)$ โดย h นั้นมีค่ามากกว่าศูนย์ ระบบพิกัด 4 มิติ จะสามารถเปลี่ยนไปเป็น 3 มิติได้โดยหาร 3 พิกัดแรกด้วยพิกัดที่ 4 (h) สำหรับ Curve ใดๆ ยกเว้นวงกลมหรือโคนิก (Conic) จะมีค่า h เท่ากับ 1 เสมอ

เมื่อใช้พิกัดแบบนี้กับนอน ยูนิฟอร์ม บี-สไปไลน์ จะมีชื่อเรียกว่า นอน ยูนิฟอร์ม เรชันนอล บี-สไปไลน์ หรือที่เรียกกันว่าเนิร์บ สไปไลน์ (NURB Spline)

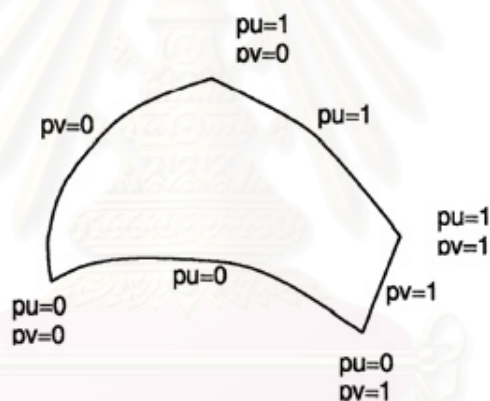
เนิร์บ สไปไลน์มีความยืดหยุ่นและสามารถสร้างรูปร่างที่ซับซ้อนได้เหมือนกับนอน ยูนิฟอร์ม บี-สไปไลน์ รวมถึงสามารถแสดงวงกลม และเส้นโค้งจากภาคตัดกรวยได้ด้วยลักษณะเช่นนี้ทำให้ส่วนที่ใช้การออกแบบพื้นผิวในระบบคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบเกือบทั้งหมด จะใช้พื้นผิวเนิร์บส์ (NURBs Surface)

2.5.3 พื้นผิว (Surface) การสร้างพื้นผิวสามารถมองได้ว่าเป็นการวางพื้นผิวที่มีความหนาเป็นศูนย์ลงบนบริเวณที่ล้อมรอบด้วยเส้นโค้ง โดยปกติในการสร้างพื้นผิวรูปแบบอิสระนั้นจะใช้ พื้นผิวแผ่น (Surface Patch) ตั้งแต่ 1 อันขึ้นไปประกอบกัน สมการพาราเมตริกของพื้นผิวแผ่นนั้นจะขึ้นกับตัวแปรพารามิเตอร์ 2 ตัว (u และ v) ซึ่งหลักการจะเหมือนกับเส้นโค้งสมการพาราเมตริกของพื้นผิวแผ่นจะแสดงดังนี้

$$P(u, v) = \begin{bmatrix} x(u, v) \\ y(u, v) \\ z(u, v) \end{bmatrix} \quad \text{for} \quad \begin{matrix} 0 \leq u \leq u' \\ 0 \leq v \leq v' \end{matrix}$$

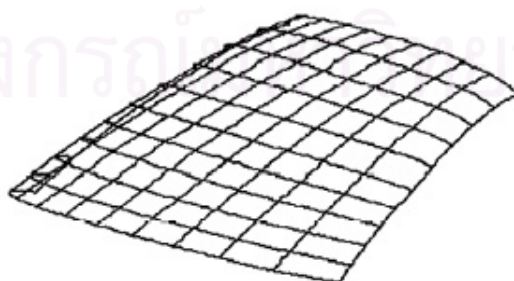
จากสมการข้างต้น ค่าพารามิเตอร์ u และ v จะมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง u' และ v' ตามลำดับ โดยค่า u' และ v' ที่เหมาะสมจะมีค่าเท่ากับ 1 (หรือเป็นจำนวนจริงบวกใดๆ)

รูปที่ 2.11 แสดงขอบเขตพารามิเตอร์ของพื้นผิวแผ่น ตำแหน่งที่มุมทั้ง 4 นั้นหาได้จากแทนค่าสูงสุดและต่ำสุดของพารามิเตอร์ u และ v สำหรับจุด P ใดๆ บน Surface สามารถหาได้จากการกำหนดค่าพิกัดพารามิเตอร์ u และ v พื้นผิวแผ่นนั้นสามารถแสดงให้เห็นเป็นพื้นผิวได้โดยใช้เมช (Mesh) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 หรือสร้างเซตดิงอิมเมจ (Shading Image) ลงบนพื้นผิว



รูปที่ 2.11 ขอบเขตพารามิเตอร์ของพื้นผิวแผ่น

เมชบนพื้นผิวถูกแสดงโดยการกำหนดช่วงพารามิเตอร์ $u \times v$ ในทิศทางของ u และ v ตามลำดับ การใช้เมชหรือเซตดิงอิมเมจนั้นจะช่วยให้เห็นความโค้งของพื้นผิวได้ชัดเจน



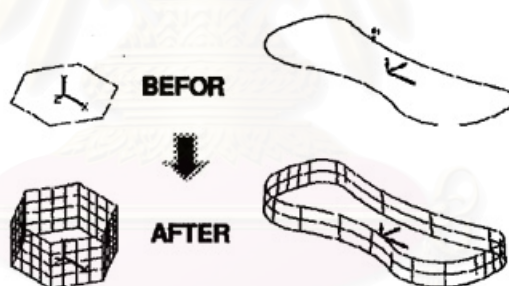
รูปที่ 2.12 พื้นผิวแผ่นที่ถูกแสดงโดยด้วยเมชขนาด 10x10

พื้นผิวแผ่นนั้นมีหลายชนิด ได้แก่ พื้นผิวบีเซียร์ พื้นผิวบี-สไปล์ พื้นผิวเนิร์บส์ พื้นผิวคิวกิก และพื้นผิวรูล (Ruled Surface) เป็นต้น เนื่องจากเส้นโค้งเป็นพื้นฐานในการสร้างพื้นผิว คุณสมบัติต่างๆของเส้นโค้งก็จะนำมาใช้บนพื้นผิวด้วย ตัวอย่างเช่นจุดควบคุมของพื้นผิวบีเซียร์อาจจะไม่สามารถถูกเคลื่อนย้ายได้ทั้งพื้นผิวแผ่น เพราะต้องคำนึงถึงเงื่อนไขความต่อเนื่อง ดังนั้นการปรับแต่งรูปร่างของพื้นผิวจึงถือเป็นงานที่ยากลำบากสำหรับผู้ออกแบบ

เส้นโค้งเนิร์บส์ มีความยืดหยุ่นสูงในการแสดงเส้นโค้งประกอบ และสามารถรักษาเงื่อนไขความต่อเนื่องได้ครบ ทำให้การสร้างพื้นผิวเนิร์บส์มีความยืดหยุ่นสูงด้วย ด้วยเหตุผลนี้พื้นผิวเนิร์บส์จึงเป็นพื้นผิวที่นิยมใช้กันมากที่สุดสำหรับการออกแบบพื้นผิวอิสระที่ต้องการความสวยงาม

2.5.4 การสร้างพื้นผิว วิธีในการสร้างพื้นผิวนั้นมีหลายรูปแบบ อาจแบ่งได้ดังนี้

2.5.4.1 ทรงกระบอกทาบูลเลท (Tabulated Cylinder) ทำได้โดยการยึดโพรไฟล์ของเส้นโค้งที่สร้างไว้ ตามเวคเตอร์ที่กำหนด เพื่อสร้างพื้นผิวขึ้นมา เรียกว่าทรงกระบอกทาบูลเลท ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งขนาดของเวคเตอร์จะควบคุมขนาดของพื้นผิว



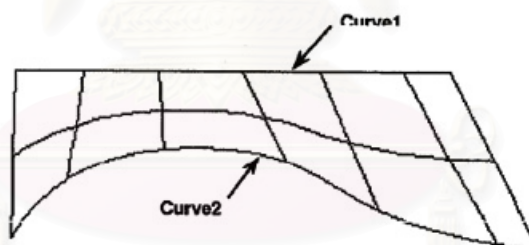
รูปที่ 2.13 ทรงกระบอกทาบูลเลท

2.5.4.2 พื้นผิวจากการหมุน (Surface of Revolution) ทำได้โดยการหมุนโปรไฟล์ของเส้นโค้งที่สร้างขึ้นรอบแกนอ้างอิงที่กำหนด เพื่อสร้างพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยมุมของการหมุนจะกำหนดขนาดของพื้นผิว



รูปที่ 2.14 พื้นผิวจากการหมุน

2.5.4.3 พื้นผิวรูล (Ruled Surface) สร้างขึ้นมาจากเส้นโค้ง 2 เส้น ซึ่งเป็นขอบเขตของพื้นผิวที่อยู่ตรงข้ามกัน โดยจะใช้เส้นตรงเป็นตัวเชื่อมจุดที่เกิดจากแบ่งค่าพารามิเตอร์ของเส้นโค้งทั้งสองเป็นสัดส่วนเท่าๆ กัน สร้างให้เกิดเป็นพื้นผิวขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 2.15 หรือสามารถสร้างจาก เส้นโค้งมากกว่า 2 เส้นก็ได้ แต่จะใช้เส้นโค้งเบลนด์ (Blending Curve) เป็นตัวเชื่อมแทนเพื่อให้เกิดพื้นผิวที่ราบเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.16

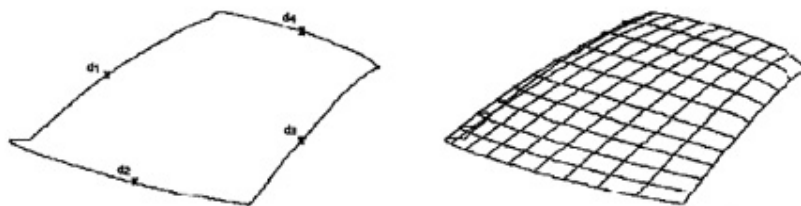


รูปที่ 2.15 พื้นผิวรูล



รูปที่ 2.16 พื้นผิวรูลที่สร้างจากเส้นโค้งมากกว่า 2 เส้น

2.5.4.4 พื้นผิวแผ่น (Surface Patch) สร้างขึ้นจาก เส้นโค้ง 4 เส้น ซึ่งจะล้อมเป็น ขอบเขตของพื้นผิว และใช้จุดปลายของแต่ละ เส้นโค้งร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.17



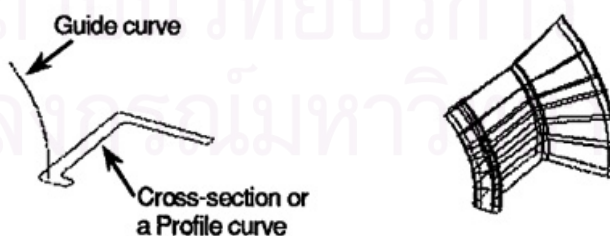
รูปที่ 2.17 พื้นผิวแผ่น

2.5.4.5 พื้นผิวดาข่าย (Net Surface) สร้างขึ้นจากการโครงข่ายของเส้น โค้งหลายๆ เส้นหรือสร้างขึ้นจากกลุ่มข้อมูลของจุดหลายๆ จุด ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งคล้ายกับ วิธีที่ใช้ในกระบวนการรีเวอร์ส เอนจิเนียริง (Reverse Engineering)



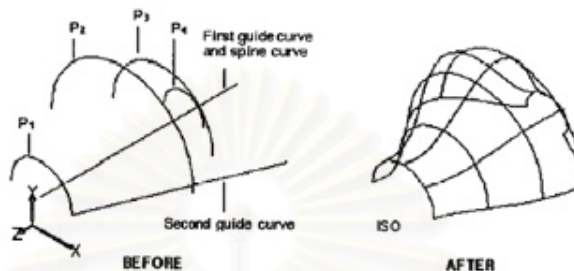
รูปที่ 2.18 พื้นผิวดาข่าย

2.5.4.6 พื้นผิวยืดตามเส้นนำ (Swept Surface) สร้างขึ้นจากการยืดเส้น โค้งโพรไฟล์หน้าตัด (Cross-section Profile Curve) ไปตามเส้นโค้งนำที่กำหนดขึ้น ดังแสดงในรูป ที่ 2.19



รูปที่ 2.19 พื้นผิวยืดตามเส้นนำ

2.5.4.7 พื้นผิวลอฟท์ (Lofted Surface) มีความคล้ายคลึงกับพื้นผิวยืดตามเส้นนำ แต่การควบคุมของโพรไฟล์หน้าตัดบนพื้นผิวจะทำได้ดีกว่า หลักการคือใช้ โพรไฟล์หน้าตัด เส้นโค้งสไปน์ (Spine Curve) และเส้นโค้งนำ (Guide Curve) โดย โพรไฟล์หน้าตัดจะตั้งฉากกับ เส้นโค้งสไปน์เสมอ และเส้นโค้งนำจะเป็นตัวกำหนดขอบเขตของพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 พื้นผิวลอฟท์

2.5.4.8 พื้นผิวออฟเซต (Offset Surface) เป็นพื้นผิวที่สร้างมาจากพื้นผิวที่มีอยู่แล้วโดยจะกำหนดระยะออฟเซต เพื่อสร้างพื้นผิวขึ้นมาใหม่ให้ขนานกับพื้นผิวเดิมด้วยระยะห่างเท่ากับที่กำหนดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.21

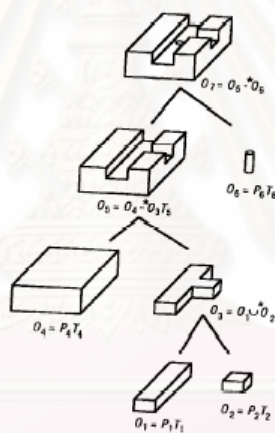


รูปที่ 2.21 พื้นผิวออฟเซต

2.6 การนำเสนอแบบจำลองโซลิด (Solid Modeler Representation)

การนำเสนอแบบจำลองโซลิดนั้นมีมากมายหลายวิธี แต่มีวิธีการหลักอยู่ 2 วิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่ การนำเสนอแบบซีเอสจี (Constructive Solid Geometry หรือ CSG) และการนำเสนอแบบบี-เรพ (Boundary representation หรือ B-rep)

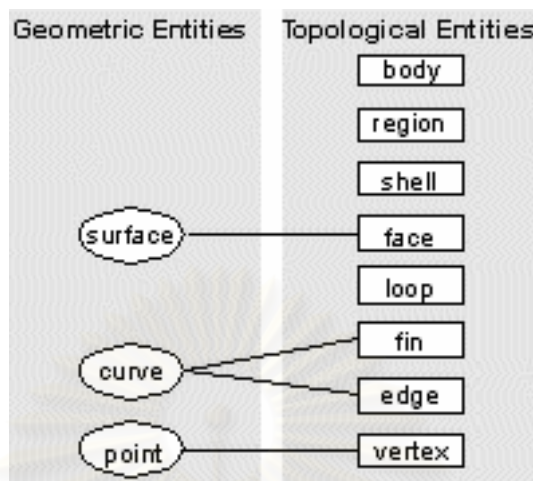
ซีเอสจี การนำเสนอแบบซีเอสจีจะใช้โครงสร้างแบบต้นไม้ (Tree Structure) ในการนิยามแบบจำลองโซลิด โดยภายในโครงสร้างจะประกอบไปด้วยการกระทำบูลีน (Boolean Operation) และแบบจำลองโซลิดพื้นฐาน (Primitive Object) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ชุดแบบจำลองพื้นฐานประกอบไปด้วย บล็อก ทรงกระบอก กววย ทรงกลม ทอรัส (Torus) ฯลฯ ตัวกระทำบูลีน ซึ่งได้แก่การรวม (Unite) การลบ (Subtract) และการอินเตอร์เซก (Intersect) จะถูกใช้ไปกับแบบจำลองพื้นฐานที่กล่าวมา โดยจะกระทำเป็นลำดับขั้นไปเรื่อยๆ ตามโครงสร้างแบบต้นไม้ ดังนั้นข้อมูลที่ถูเก็บไว้จะมีเพียงรูปทรงโซลิดพื้นฐานและตัวกระทำบูลีนเท่านั้น ซึ่งข้อดีคือข้อมูลมีขนาดเล็กและสามารถสร้างแบบจำลองที่ไม่ค่อยซับซ้อนได้รวดเร็ว แต่มีข้อเสียคือข้อมูลบางอย่างเช่นขอบหรือหน้าของแบบจำลองโซลิดที่เกิดจากการกระทำบูลีน ไม่ได้ถูกเก็บไว้ในโครงสร้าง เมื่อผู้ใช้ต้องการทราบข้อมูลเหล่านี้จะต้องมีการคำนวณใหม่ทุกครั้ง และในการสร้างรูปทรงที่ซับซ้อนมากๆ จะทำได้ค่อนข้างลำบาก



รูปที่ 2.22 โครงสร้างของการนำเสนอแบบซีเอสจี

บี-เรพ เป็นการนำเสนอแบบจำลองโซลิดโดยอ้างอิงถึงขอบเขตของแบบจำลองใช้หน้า (Face) เป็นตัวกำหนดขอบเขตของแบบจำลองโซลิด โดยสามารถรู้วาบริเวณใดของขอบเขตเป็นเนื้อโซลิด บริเวณใดเป็นที่ว่าง (Void) โดยที่หน้าแต่ละหน้าจะประกอบไปด้วยขอบ (Edge) และจุดยอด (Vertex) ซึ่งข้อมูลที่เชื่อมโยงระหว่างหน้า ขอบ และจุดยอดนั้น จะเรียกว่าองค์ประกอบทางโทโปโลยี (Topological Entity) ซึ่งเป็นสิ่งที่นิยามถึงโครงสร้างของแบบจำลองโซลิดโดยไม่คำนึงถึงเรขาคณิต แต่การมีเพียงองค์ประกอบทางโทโปโลยีเพียงอย่างเดียว ไม่อาจทำให้แบบจำลองโซลิดมีความสมบูรณ์ได้ จำเป็นจะต้องมีตัวกำหนดข้อมูลเชิงเรขาคณิตด้วยจึงจะเป็นแบบจำลองโซลิดที่สมบูรณ์ สิ่งที่เป็นตัวกำหนดข้อมูลเชิงเรขาคณิตของแบบจำลองโซลิดคือ

องค์ประกอบทางเรขาคณิต (Geometric Entity) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางโทโปโลยีโดยตรง โครงสร้างของการนำเสนอแบบจำลองโซลิดชนิดบี-เรพ แสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 โครงสร้างของการนำเสนอแบบจำลองโซลิดชนิดบี-เรพ

2.7 องค์ประกอบทางโทโปโลยี

องค์ประกอบทางโทโปโลยีเป็นลักษณะโครงสร้างของแบบจำลองซึ่งไม่สนใจสมการทางคณิตศาสตร์ใดๆ โดยในบางองค์ประกอบนั้นจะนิยามองค์ประกอบทางเรขาคณิตลงไปด้วย เพื่อให้แบบจำลองโซลิดมีข้อมูลครบถ้วน ทั้งรูปร่าง และขนาด สำหรับการนำเสนอแบบบี-เรพ จะแบ่งองค์ประกอบทางโทโปโลยีออกเป็น 8 องค์ประกอบ ในตอนต้นได้เกริ่นถึงองค์ประกอบทางโทโปโลยีไปแล้ว 3 อย่างคือหน้า ขอบและจุดยอด ต่อไปจะกล่าวถึงรายละเอียดขององค์ประกอบต่างๆ

2.7.1 ลำตัว (Body) จัดเป็นองค์ประกอบที่ใหญ่ที่สุดของแบบจำลองบีเรพ ซึ่งมีองค์ประกอบย่อยอื่นๆ ตั้งแต่หนึ่งองค์ประกอบขึ้นไป ลำตัวสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักได้แก่ลำตัวแมนิโฟลด์ (Manifold Body) และลำตัวเจเนอรัล (General Body) ในวิทยานิพนธ์นี้จะสนใจแต่ลำตัวแบบแมนิโฟลด์เท่านั้น

2.7.1.1 ลำตัวแมนิโฟลด์ (Manifold Body) เป็นลำตัวที่เป็นมาตรฐานแบ่งออกเป็นสี่ชนิดได้แก่

ลำตัวจุด (Acorn Body) ประกอบด้วยองค์ประกอบทางโทโปโลยีประเภทจุดยอด มีมิติเป็นศูนย์ (Zero Dimension)

ลำตัวเส้น (Wire Body) ประกอบไปด้วยกลุ่มของขอบที่เชื่อมต่อกัน (จุดยอด 1 จุดยอดของลำตัวเส้นต้องเป็นเจ้าของขอบไม่เกิน 2 ขอบเสมอ)

ลำตัวแผ่น (Sheet Body) ประกอบด้วยกลุ่มของหน้าที่เชื่อมต่อกัน (ขอบ 1 ขอบของลำตัวเส้นต้องเป็นเจ้าของหน้าไม่เกิน 2 หน้า) เป็นไปได้ทั้งลำตัวแผ่นแบบปิด และแบบเปิด

ลำตัวโซลิด (Solid Body) เป็นลำตัวที่สามารถกำหนดได้ว่า ส่วนใดเป็นโซลิด และส่วนใดเป็นที่ว่าง เป็นลำตัวที่มีปริมาตรของรูปทรงที่แน่นอนและมีความต่อเนื่องตลอดรูปทรง

2.7.1.2 ลำตัวเจเนอรัล (General Body) เป็นลำตัวที่ไม่เข้าพวกกับลำตัวเมนิโฟลด์ ประกอบด้วยองค์ประกอบทางโทโปโลยีเหล่านี้ บริเวณ หน้า ขอบ จุดยอด

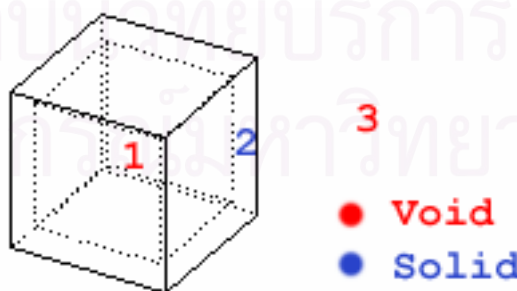
โครงสร้างของลำตัวจะมีลักษณะดังนี้

กลุ่ม (Set) ของบริเวณ (Region) โดยทั่วไปลำตัวต้องมีบริเวณมากกว่าหรือเท่ากับ 1 โดยจะต้องไม่มีการเหลื่อมล้ำกัน และจะมีบริเวณ 1 บริเวณซึ่งอยู่นอกสุดต้องเป็นอนันต์ (Infinite) ส่วนบริเวณที่เหลือจะเป็นแบบจำกัด (Finite) หมด

กลุ่มขององค์ประกอบทางเรขาคณิต ได้แก่พื้นผิว (Surface) เส้นโค้ง (Curve) และจุด (Point)

ชนิดของลำตัว เป็นลำตัวเมนิโฟลด์หรือลำตัวเจเนอรัล

2.7.2 บริเวณ (Region) เป็นองค์ประกอบที่ใช้ในการนิยามว่าบริเวณใดของขอบเขตเป็นโซลิด บริเวณใดเป็นที่ว่าง ประกอบไปด้วยกลุ่มขององค์ประกอบประเภท จุดยอด ขอบ และหน้าที่ถูกกำหนดทิศที่แน่นอน (Oriented Face) ซึ่ง 3 สิ่งนี้จะเป็นตัวนิยามขอบเขตของบริเวณในที่ว่าง 3 มิติ ในรูปที่ 2.24 พบว่าบริเวณหมายเลข 1 และ 3 เป็นที่ว่าง ส่วนบริเวณหมายเลข 2 เป็นโซลิด



รูปที่ 2.24 บริเวณในที่ว่าง 3 มิติ ของแบบจำลองโซลิด

โครงสร้างของบริเวณจะมีลักษณะดังนี้

ตรรกะ (Logical) ซึ่งกำหนดว่าบริเวณใดเป็นโซลิดหรือที่ว่าง

กลุ่ม (Set) ของเปลือก (Shell) ซึ่งกำหนดทิศทางหรือด้านของหน้า ถ้าบริเวณเป็นที่ว่างหมดจะไม่มีเปลือก

2.7.3 เปลือก (Shell) เป็นองค์ประกอบที่ใช้นิยามบริเวณ โดยเป็นตัวกำหนดว่ามี การใช้ทิศทางใดของหน้า ประกอบไปด้วยกลุ่มขององค์ประกอบประเภทหน้า (บางกรณีประกอบไปด้วยขอบ หรือจุดยอด ที่ถูกใช้ด้วย)

โครงสร้างของเปลือกจะมีลักษณะดังนี้

กลุ่มของคู่ (Pair) ซึ่งเก็บข้อมูลที่เป็นตรรกะที่แสดงถึงทิศทางของหน้า (กำหนดด้านตามทิศทางของหน้า มีความหมายทางกายภาพว่าบริเวณนั้นมีเปลือกวางอยู่บนด้านไหนของหน้า) รูปที่ 2.25 แสดงถึงทิศทางของหน้าซึ่งจะมีทิศพุ่งออกจากโพลิดรูที่ว่างเสมอ

กลุ่มของเส้นขอบ (Wire frame edge) เป็นขอบที่ไม่ล้อมรอบหน้า จะมีการใช้เมื่อ บริเวณประกอบไปด้วยเส้นขอบเท่านั้น

กลุ่มของจุดยอด จะมีการใช้ในกรณีที่มีบริเวณไม่มีขอบและหน้า เช่นมีแต่จุดยอด ซึ่งมีมิติเป็นศูนย์เท่านั้น



รูปที่ 2.25 ทิศทางของหน้า

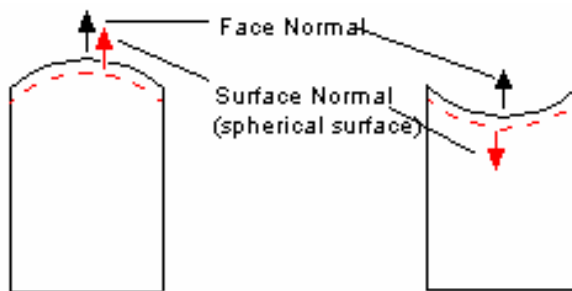
2.7.4 หน้า (Face) ประกอบไปด้วยองค์ประกอบทางเรขาคณิตประเภทพื้นผิว (Surface) และขอบเขตของพื้นผิวซึ่งจะนิยามด้วยวง (Loop) ซึ่งตั้งแต่ศูนย์กลางขึ้นไป (กรณีที่เป็น ศูนย์วงเช่นหน้าที่มีพื้นผิวเป็นทรงกลม)

โครงสร้างของหน้าจะมีลักษณะดังนี้

กลุ่มของวง เป็นตัวกำหนดขอบเขตของหน้า

พื้นผิว เป็นตัวกำหนดลักษณะทางเรขาคณิตที่จะนิยามติดไปกับหน้า

ทิศทาง (Sense) เป็นตรรกะซึ่งใช้กำหนดว่าทิศทางนอร์มัลเวกเตอร์ (Normal Vector) ของหน้ามีทิศตามหรือตรงข้ามกับนอร์มัลเวกเตอร์ของพื้นผิว รูปที่ 2.26 แสดงถึงทิศทางนอร์มัลเวกเตอร์ของหน้าและพื้นผิว

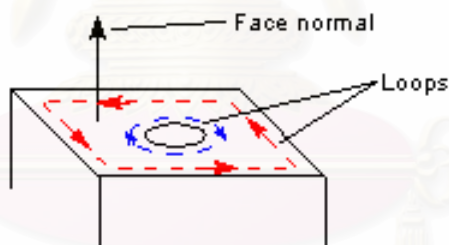


รูปที่ 2.26 ทิศทางนอร์มัลเวกเตอร์ของหน้าและพื้นผิว

2.7.5 วง (Loop) เป็นตัวกำหนดขอบเขตของหน้า ซึ่งจะนิยามโดยครีป (Fin) และจุดยอด ถ้าเรายืนอยู่ฝั่งเดียวกับนอร์มัลเวกเตอร์ของหน้า แล้วมองตามทิศทางไปข้างหน้า (Forward Direction) ของวงจะมีหน้าอยู่ทางด้านซ้ายมือเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.27

โครงสร้างของวงจะมีลักษณะดังนี้

ลำดับของครีป (Ordered Ring of Fin) จะแสดงการเรียงลำดับลำดับของขอบ โดยครีปและขอบจะใช้จุดยอดเดียวกันเป็นจุดเชื่อม ทิศทางของครีปจะสอดคล้องกับทิศทางของวง จุดยอด คือจุดที่เชื่อมระหว่างขอบแต่ละอัน



รูปที่ 2.27 ทิศทางไปข้างหน้าของวง

2.7.6 ครีป (Fin) เป็นองค์ประกอบที่นิยามว่าวงมีการใช้ทิศทางของขอบอย่างไร โดยทิศทางของครีปจะสอดคล้องกับทิศทางวงเสมอ

โครงสร้างข้อมูลของครีปจะมีลักษณะดังนี้

ทิศทาง เก็บเป็นค่าตรรกะโดยกำหนดทิศทางของครีปซึ่งมีวงเป็นเจ้าของว่าสอดคล้องหรือตรงข้ามกับทิศทางของขอบ

เส้นโค้ง เป็นตัวกำหนดลักษณะทางเรขาคณิต

2.7.7 ขอบ (Edge) ประกอบไปด้วยองค์ประกอบทางเรขาคณิตประเภทเส้นโค้ง ซึ่งขอบเขตของขอบ กำหนดด้วยจุดยอด โดยกลุ่มของจุดยอดมีได้ตั้งแต่ศูนย์ถึงสองจุดยอด พิจารณาขอบเป็นบริเวณที่มีมิติเป็น 1 ทิศทางของขอบจะมีทิศจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดปลาย

โครงสร้างข้อมูลของขอบจะมีลักษณะดังนี้

จุดยอดเริ่มต้น เป็นจุดเริ่มต้นของขอบ

จุดยอดปลาย เป็นจุดปลายของขอบ ถ้าไม่มีค่าแสดงว่าเป็นลักษณะขอบแบบวง (Ring Edge)

ลำดับของวงครีปจำเพาะ แสดงถึงการเรียงลำดับของขอบ ตามหน้าที่ขอบ ล้อมรอบอยู่ (สอดคล้องกับกฎมือขวา) หากไม่มีค่าหมายความว่าเป็นขอบที่ไม่ล้อมรอบหน้า

เส้นโค้ง เป็นตัวกำหนดลักษณะทางเรขาคณิตที่จะนิยามติดไปกับขอบ

ทิศทาง เป็นตรรกะที่กำหนดว่าทิศทางของขอบจากจุดยอดเริ่มต้นไปยังจุดยอด ปลายสอดคล้องหรือตรงข้ามกับเส้นโค้ง

2.7.8 จุดยอด (Vertex) แสดงจุดในสามมิติ มีมิติเป็นศูนย์

โครงสร้างข้อมูลของขอบจะมีลักษณะดังนี้

จุด (Point) เป็นเป็นกำหนดลักษณะทางเรขาคณิตที่จะนิยามติดไปกับจุดยอด

องค์ประกอบทางโทโปโลยีโดยปกติจะสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเรขาคณิต เพื่อให้แบบจำลองโซลิดชนิดบี-เรพมีข้อมูลที่ครบถ้วน

2.8 องค์ประกอบทางเรขาคณิต

เป็นองค์ประกอบพื้นฐานอันประกอบไปด้วยจุด ส่วนโค้ง และ พื้นผิว ซึ่งเป็นรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ ที่มีข้อมูลเกี่ยวกับขนาด พิกัด และรูปร่างของวัตถุ องค์ประกอบทางเรขาคณิตที่จะใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะแบ่งออกเป็นกลุ่มหลักๆ 3 กลุ่ม

2.8.1 พื้นผิว (Surface) เป็นองค์ประกอบทางเรขาคณิตที่นิยามติดไปกับองค์ประกอบทางโทโปโลยีที่เป็นหน้า พื้นผิวที่ใช้กันมากในคอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบคือ ระนาบ พื้นผิวทรงกระบอก พื้นผิวทรงกรวย พื้นผิวทอรัส (Torus) พื้นผิวทรงกลม พื้นผิวแบบบี (B-Surface) ฯลฯ ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างการนำเสนอองค์ประกอบทางเรขาคณิตที่เป็นพื้นผิวด้วยสมการพาราเมตริก

2.8.1.1 พื้นผิวระนาบ พื้นผิวระนาบนิยามด้วยสมการพาราเมตริกต่อไปนี้

$$R(u, v) = P + uX + vY$$

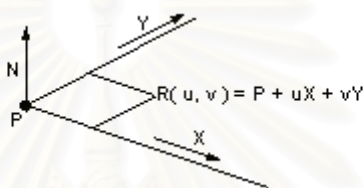
พารามิเตอร์ที่ใช้ได้แก่

P คือจุดซึ่งอยู่บน plane

X, Y คือเวกเตอร์ขนาด 1 หน่วย เพื่อแสดงทิศทางของแกน X และ Y

ตามลำดับ (อาจเป็นค่านอร์มัลเวกเตอร์ของระนาบกับเวกเตอร์ขนาด 1 หน่วย ของแกน X ก็ได้ ส่วนเวกเตอร์ที่เหลือสามารถหาได้จากครอสโปรดักของเวกเตอร์ทั้งสอง)

รูปที่ 2.28 แสดงภาพพื้นผิวระนาบ



รูปที่ 2.28 พื้นผิวระนาบ

2.8.1.2 พื้นผิวทรงกระบอก พื้นผิวทรงกระบอกนิยามด้วยสมการพาราเมตริกต่อไปนี้

$$R(u, v) = P + rX \cos(u) + rY \sin(u) + vA$$

$$(0 \leq u < 2\pi, r > 0)$$

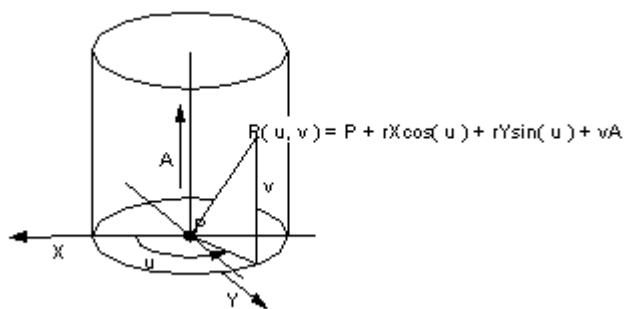
พารามิเตอร์ที่ใช้ได้แก่

P คือจุดซึ่งอยู่บนแกนของทรงกระบอก

r คือ รัศมีของทรงกระบอก

X, Y และ A คือเวกเตอร์ขนาด 1 หน่วยที่แสดงทิศทางของแกน X, Y และ แกนของทรงกระบอกตามลำดับ

รูปที่ 2.29 แสดงภาพพื้นผิวทรงกระบอก



รูปที่ 2.29 พื้นผิวทรงกระบอก

2.8.1.3 พื้นผิวทรงกรวย พื้นผิวทรงกรวยนิยามด้วยสมการพารามตริก

ดังต่อไปนี้

$$R(u, v) = P - vA + (X \cos(u) + Y \sin(u))(r + v \tan(a))$$

$$(0 \leq u < 2\pi, -r(\cot(a)) \leq v < \infty)$$

พารามิเตอร์ที่ใช้ได้แก่

P คือจุดซึ่งอยู่บนแกนของกรวย

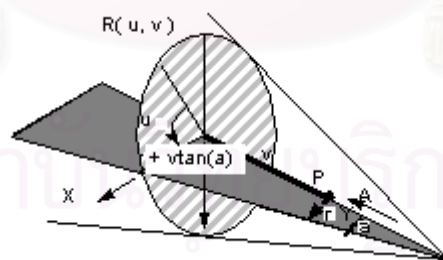
r คือ รัศมีของกรวย ณ จุด P

a คือ ครึ่งมุมกรวย (Cone Half Angle)

X, Y และ A คือเวกเตอร์ขนาด 1 หน่วยที่แสดงทิศทางของแกน X, Y และ

แกนของกรวยตามลำดับ

รูปที่ 2.30 แสดงภาพพื้นผิวทรงกรวย



รูปที่ 2.30 พื้นผิวทรงกรวย

ดังต่อไปนี้

2.8.1.5 พื้นผิวทรงกลม พื้นผิวทรงกลมนิยามด้วยสมการพาราเมตริก

$$R(u, v) = C + (X \cos(u) + Y \sin(u))r \cos(v) + rA \sin(v)$$

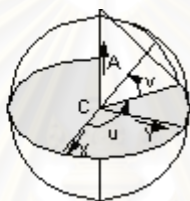
พารามิเตอร์ที่ใช้ได้แก่

C คือจุดศูนย์กลางของทรงกลม

r คือ รัศมีของทรงกลม

X, Y และ A คือเวกเตอร์ขนาด 1 หน่วยที่แสดงทิศทางของแกน X, Y และ แกนทรงกลมตามลำดับ (เวกเตอร์ขนาด 1 หน่วย X, Y และ A นั้นเป็นต้องตั้งฉากซึ่งกันและกัน)

รูปที่ 2.31 แสดงภาพพื้นผิวทรงกลม



รูปที่ 2.31 พื้นผิวทรงกลม

ดังต่อไปนี้

2.8.1.6 พื้นผิวทรงทอรัส พื้นผิวทอรัสนิยามด้วยสมการพาราเมตริก

$$R(u, v) = C + (X \cos(u) + Y \sin(u))(a + b \cos(v)) + bA \sin(v)$$

พารามิเตอร์ที่ใช้ได้แก่

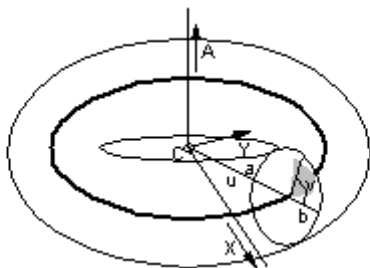
C คือจุดศูนย์กลางของทอรัส

a คือ รัศมีแกนเอกของทอรัส (Torus Major Radius)

b คือ รัศมีแกนโทของทอรัส (Torus Minor Radius)

X, Y และ A คือ เวกเตอร์ขนาด 1 หน่วยที่แสดงทิศทางของแกน X, Y และ แกนทอรัสตามลำดับ (เวกเตอร์ขนาด 1 หน่วย X, Y และ A นั้นเป็นต้องตั้งฉากซึ่งกันและกัน)

รูปที่ 2.32 แสดงภาพพื้นผิวทอรัส



รูปที่ 2.32 พื้นผิวทอรัส

ดังต่อไปนี้

2.8.1.7 พื้นผิวแบบบี พื้นผิวแบบบีนิยามด้วยสมการพาราเมตริก

$$P(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} b_i(u) b_j(v) w_{ij} V_{ij}}{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} b_i(u) b_j(v) w_{ij}}$$

พารามิเตอร์ที่ใช้ได้แก่

n คือจำนวนจุดยอดของแถวในแนวนอน

m คือจำนวนจุดยอดของแถวในแนวตั้ง

V_{ij} คือจุดยอด

w_{ij} คือค่าถ่วงน้ำหนัก

$b_i(u)$, $b_j(v)$ คือสัมประสิทธิ์ของบีสไปไลน์ (B-Spline Coefficients)

2.8.2 เส้นโค้ง (Curve) เป็นองค์ประกอบทางเรขาคณิตที่นิยามติดไปกับองค์ประกอบทางโทโปโลยีที่เป็นขอบ หรือครีป เส้นโค้งที่ใช้ในงานคอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบคือ เส้นตรง วงกลม ส่วนโค้งของวงกลม พาราโบลา ไฮเพอร์โบลา วงรี เส้นโค้งแบบบี (B-Curve) ฯลฯ และต่อไปนี้เป็นกรณำเสนอองค์ประกอบทางเรขาคณิตที่เป็นเส้นโค้งในรูปสมการพาราเมตริก

2.8.2.1 เส้นตรง เส้นตรงนิยามด้วยสมการพาราเมตริกดังต่อไปนี้

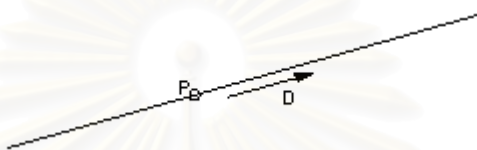
$$R(t) = P + tD$$

พารามิเตอร์ที่ใช้ได้แก่

P คือ จุดบนเส้นตรง

D คือ เวกเตอร์ขนาด 1 หน่วยแสดงทิศทางของเส้นตรง

รูปที่ 2.33 แสดงภาพเส้นตรง



รูปที่ 2.33 เส้นตรง

2.8.2.2 วงกลม วงกลมนิยามด้วยสมการพาราเมตริกดังต่อไปนี้

$$R(t) = C + rX \cos(t) + rY \sin(t)$$

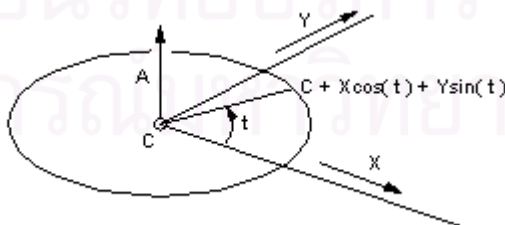
พารามิเตอร์ที่ใช้ได้แก่

C คือ จุดศูนย์กลางของวงกลม

r คือ รัศมีของวงกลม

X, Y คือ เวกเตอร์ขนาด 1 หน่วยเพื่อแสดงทิศทางของแกน X และ Y ตามลำดับ (ซึ่ง เราอาจเก็บค่าเป็นค่านอร์มัลเวกเตอร์ของระนาบที่วาดวงกลม กับเวกเตอร์ขนาด 1 หน่วยของแกน X ก็ได้ ส่วนที่เหลือสามารถหาจากครอสโปรดักของเวกเตอร์ทั้งสอง)

รูปที่ 2.34 แสดงภาพวงกลม



รูปที่ 2.34 วงกลม

2.8.2.3 วงรี วงรีนิยามด้วยสมการพาราเมตริกดังต่อไปนี้

$$R(t) = C + aX \cos(t) + bY \sin(t)$$

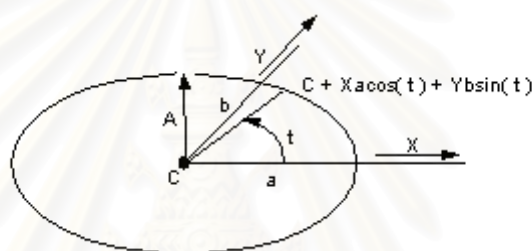
พารามิเตอร์ที่ใช้ได้แก่

C คือจุดศูนย์กลางของวงรี

a และ b คือขนาดแกนเอกและแกนโทตามลำดับ

X, Y คือเวกเตอร์ขนาด 1 หน่วยเพื่อแสดงทิศทางของแกน X และ Y ตามลำดับ (ซึ่งเราอาจเก็บค่าเป็นค่านอร์มัลเวกเตอร์ของระนาบที่วาดวงรี กับเวกเตอร์ขนาด 1 หน่วยของแกน X ก็ได้ ส่วนที่เหลือสามารถหาจากครอสโปรดักของเวกเตอร์ทั้งสอง)

รูปที่ 2.35 แสดงภาพวงรี



รูปที่ 2.35 วงรี

2.8.2.4 เส้นโค้งแบบบีซนิตเนิร์บส์ (NURBs) เส้นโค้งแบบบีซนิตเนิร์บส์นิยามด้วยสมการพาราเมตริกดังต่อไปนี้

$$R(t) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} b_i(t)w_iV_i}{\sum_{i=0}^{n-1} b_i(t)w_i}$$

พารามิเตอร์ที่ใช้ได้แก่

n คือ จำนวนของจุดยอด

V_i คือ ค่าพิกัดของจุดยอดของเส้นโค้งแบบบี

w_i คือ ค่าถ่วงน้ำหนัก

$b_i(t)$ คือ ฟังก์ชันมาตรฐานของเส้นโค้งแบบบี (B-Spline Curve Basis Function)

2.8.3 จุด (Point) เป็นองค์ประกอบทางเรขาคณิตที่นิยามติดไปกับองค์ประกอบทางโทโปโลยีที่เป็นจุดยอด โดยจุดทั้งหมดที่ใช้งานจะเป็นจุดที่ระบุด้วยพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian Point)

2.9 การกระทำบูลีนสำหรับแบบจำลองโซลิด

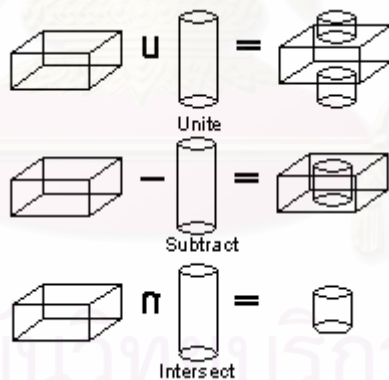
การกระทำบูลีนสำหรับแบบจำลองโซลิดแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ

2.9.1 รวม (Unite) เป็นการนำแบบจำลองโซลิด ตั้งแต่สองชิ้นขึ้นไปมารวมกัน กลายเป็นแบบจำลองชิ้นเดียว

2.9.2 ลบ (Subtract) เป็นการนำแบบจำลองโซลิดที่จะนำไปลบออก (Tool) ตั้งแต่สองชิ้นขึ้นไปมาลบออกจากแบบจำลองโซลิดที่เป็นเป้าในการลบ (Target)

2.9.3 อินเตอร์เซก (Intersect) เป็นการกระทำบูลีนของแบบจำลองโซลิดตั้งแต่สองชิ้น โดยผลที่ได้จะเป็นลำตัวในส่วนที่เกิดจากการซ้อนทับกันของแบบจำลองโซลิดทุกชิ้นที่นำมากระทำอินเตอร์เซก

รูปที่ 2.36 แสดงถึงการกระทำบูลีนแบบต่างๆ



รูปที่ 2.36 การกระทำบูลีนแบบต่างๆ

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล : การประยุกต์ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์กราฟิกส์กับการควบคุมการทำงานของเครื่อง CNC

อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมช่วยในการผลิต โดยโปรแกรมที่พัฒนาจะรับตีเอ็กเซคิวทีฟไฟล์ (DXF File) จากโปรแกรมออโตแคด (AutoCAD) แล้วนำมาเขียนโปรแกรมหาเส้นทางเดินของหัวกัด แล้วแปลงเส้นทางเดินของหัวกัดให้เป็นรหัสจี (G Code) ที่ใช้สำหรับควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซี โดยวิธีที่ใช้ในการกัดจะเป็นการกัดแบบ 2 แกนครึ่ง โดยจะใช้ชั้น (Layer) แทนระนาบต่างๆของวัตถุ

2.10.2 มนุศักดิ์ งานทอง : การพัฒนาโปรแกรมช่วยในการผลิตร่วมกับออโตแคดโดยใช้ ARX

อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมช่วยในการผลิต โดยโปรแกรมที่พัฒนาจะคำนวณหาเส้นทางเดินของหัวกัด (Tool path) แล้วแปลงเส้นทางเดินของหัวกัดให้รหัสจีที่ใช้สำหรับควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซี และทำงานร่วมกับโปรแกรมออโตแคด รีลีส 14 (AutoCAD Release 14) โดยใช้ชุดต่อประสาน เออาร์เอ็กซ์ (ARX Interface) ช่วยในการเข้าถึงข้อมูลภายในแบบขึ้นงานที่วาดจากโปรแกรมออโตแคด และใช้ในการคำนวณหาเส้นทางเดินของหัวกัด โปรแกรมที่พัฒนาแบ่งออกเป็น 5 โปรแกรมย่อยด้วยกันดังนี้

1. โปรแกรมสำหรับงานเจาะ
2. โปรแกรมสำหรับงานกัดหยาบแบบ 2 แกนครึ่ง
3. โปรแกรมสำหรับงานกัดละเอียดแบบ 2 แกนครึ่ง
4. โปรแกรมสำหรับงานกัดหยาบแบบ 3 แกน
5. โปรแกรมสำหรับงานกัดละเอียดแบบ 3 แกน

ในการทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาผู้วิจัยได้นำรหัสจีที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาไปกัดชิ้นงานจริงด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซี ของฟานัค โมเดล เอ็มเอ สิบห้า (FANUC Model MA 15) และใช้ไม้เป็นวัสดุในการทดสอบ โดยผลที่ได้จากการทดสอบก็คือ มีค่าความผิดพลาดจากการวัดขนาดอยู่ในช่วง 10 ถึง 20 ไมครอนสำหรับโปรแกรมสำหรับงานเจาะ 20 ถึง 70 ไมครอนสำหรับโปรแกรมสำหรับงานกัดละเอียดแบบ 2 แกนครึ่ง และ 100 ถึง 115 ไมครอน สำหรับโปรแกรมกัดละเอียดแบบ 3 แกน

บทที่ 3

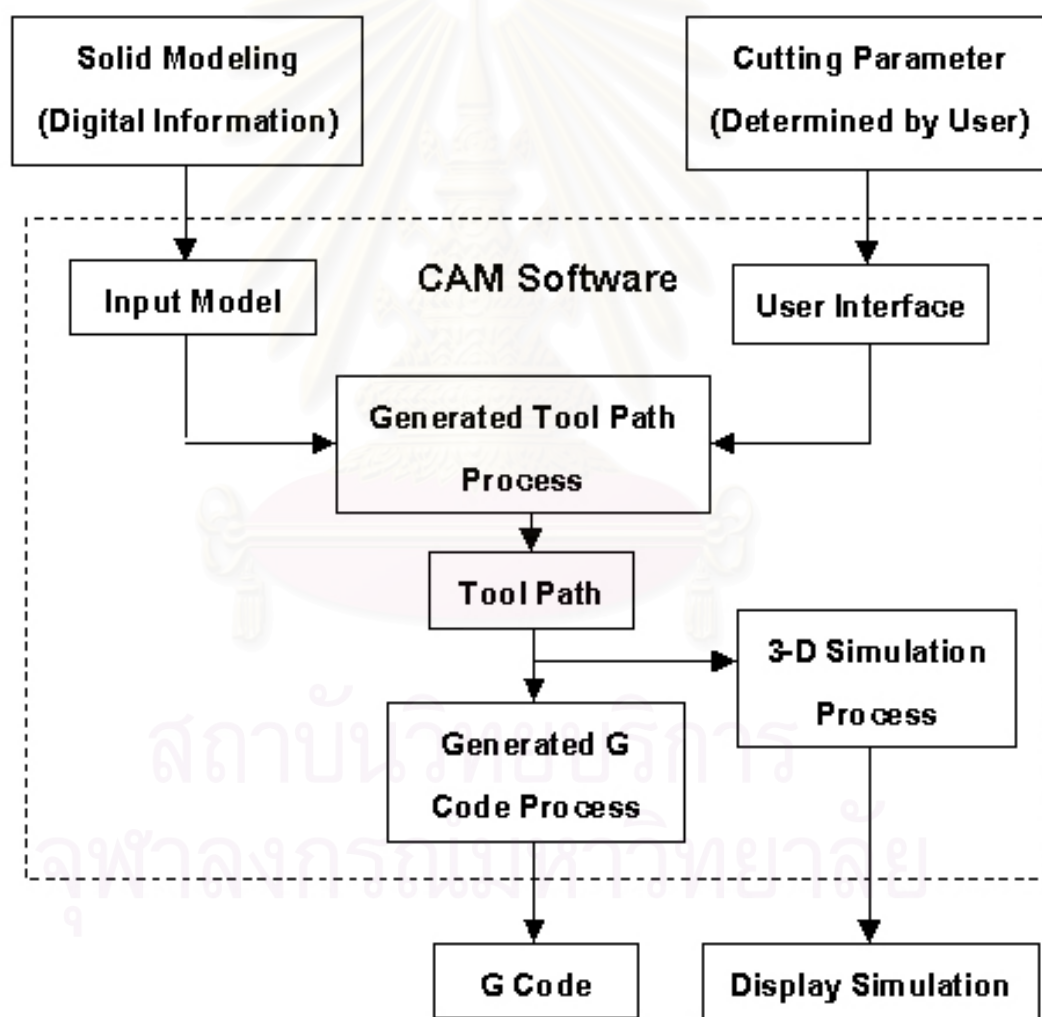
โครงสร้างและการออกแบบโปรแกรม

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบโปรแกรม

1. พาราโซลิด เวอร์ชัน 13.2 สำหรับวินโดวส์เอ็นที (Parasolid Version 13.2)
2. ไมโครซอฟท์ วิซวล ซี พลัสพลัส เวอร์ชัน 6 (Microsoft Visual C++ Version 6)
3. โอเพนจีแอล ไลบารีเวอร์ชัน 1.2 (OpenGL Library1.2)
4. ชุดอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล พร้อมวีดีโอการ์ดแสดงผลสามมิติด้วยโอเพนจีแอล ซึ่งวีดีโอการ์ดที่ใช้ในการวิจัยนี้คือเอ็นวีเดีย ควอดโด 2 (nVidia Quadro 2) ออกซีเจเน จีวีเอ็กซ์-1 (Oxygen GVX-1) และ แมททรอก มิลเลนเนียม จี400 (Matrox Millenium G400)
5. ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 2000 โพรเฟสชันเนล อีดิชัน พร้อมกับเซอร์วิส แพคสอง (Windows2000 Professional Edition with Service Pack 2)

3.2 โครงสร้างระบบคอมพิวเตอร์ช่วยการผลิต

ลักษณะการทำงานของคอมพิวเตอร์ช่วยการผลิต (CAM) คือรับข้อมูลแบบจำลองโซลิดจากคอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบ (CAD) และมีส่วนที่ผู้ใช้โปรแกรมสามารถกำหนดค่ารับเข้าของพารามิเตอร์ต่างๆ เกี่ยวกับการกัดได้เช่น อัตราป้อน (Feed Rate) อัตราเร็วรอบ (Spindle Speed) เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกัด เป็นต้น แล้วโปรแกรมจะทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดของชิ้นงาน ผู้ใช้โปรแกรมสามารถเลือกดูการจำลองการกัดชิ้นงานแบบภาพเคลื่อนไหวก่อนที่จะนำไปกัดจริง หากพบข้อผิดพลาดก็สามารถกลับไปแก้ไขค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ใหม่ ขั้นตอนสุดท้ายคือการสร้างรหัสจีจากเส้นทางเดินการกัดสำหรับนำไปควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีต่อไป รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะการทำงานของคอมพิวเตอร์ช่วยการผลิต



รูปที่ 3.1 ผังแสดงลักษณะการทำงานของคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต

3.3 ลักษณะของโปรแกรมที่ต้องการ

โปรแกรมสำหรับการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการผลิตชิ้นงานสามมิติ (CAM) ที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นนั้น รองรับการผลิตชิ้นงานที่มีรูปทรงแบบ 3 มิติ ด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีแบบ 3 แกน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องฟานัค โมเดล เอ็มเอ สิบห้า (FANUC Model MA 15) ในการทดลองกัดวิธีการกัดแบบต่างๆ ที่โปรแกรมรองรับนั้นจะแบ่งออกเป็น 5 วิธี ดังนี้

3.3.1 โปรแกรมสำหรับงานเจาะ (Drill) จะรับค่าองค์ประกอบทางโทโปโลยี ของแบบจำลองโซลิด (Solid Modeler) ที่เป็นขอบประเภทวงกลมเท่านั้น โปรแกรมจะทำการคำนวณหาจุดศูนย์กลางจากวงกลมที่ได้มาใช้ในการสร้างเส้นทางเดินการกัด สำหรับงานเจาะ

3.3.2 โปรแกรมสำหรับการกัดหยาบสองแกน (2D Rough) จะรับค่าองค์ประกอบทางโทโปโลยี ของแบบจำลองโซลิดที่เป็นขอบประเภทขอบวงปิดเท่านั้น ซึ่งขอบวงปิดเหล่านี้จะเป็นขอบเขตที่กำหนดพื้นที่ของการกัด ลักษณะของการกัดจะเป็นการกัดภายในพื้นที่ที่ล้อมรอบด้วยขอบวงปิด โดยจะได้รูปร่างที่คล้ายกับแบบจำลองโซลิดเท่านั้น ขอบเขตของการกัดสามารถเลือกได้ทั้งแบบขอบวงปิด 1 วง หรือ 2 วง ลักษณะของการกัดจะเป็นแบบ 2 แกน และรองรับงานแบบ 2 แกนครึ่งด้วย โดยจะกัดแต่ละชั้นบนระนาบ X-Y ที่ค่า Z คงที่ใดๆ

3.3.3 โปรแกรมสำหรับการกัดคอนทัวร์สองแกน (2D Contour) จะรับค่าองค์ประกอบทางโทโปโลยี ของแบบจำลองโซลิดที่เป็น ขอบประเภทขอบวงปิดเท่านั้น ลักษณะของการกัดแบบนี้จะเป็นการเดินหัวกัดตามโพรไฟล์ของเส้นโค้งปิดที่กำหนดขึ้นเพื่อให้ได้ชิ้นงานตามแบบจำลองที่ต้องการ ลักษณะของการกัดจะเป็นแบบ 2 แกน และรองรับงานแบบ 2 แกนครึ่งด้วย โดยจะกัดแต่ละชั้นบนระนาบ X-Y ที่ค่า Z คงที่ใดๆ

3.3.4 โปรแกรมสำหรับการกัดหยาบสามแกน (3D Rough) จะรับองค์ประกอบทางโทโปโลยี ของแบบจำลองโซลิดที่เป็นลำตัว 1 ลำตัวเท่านั้น การกัดด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องใช้ร่วมกับวัสดุตัดอกเสมอ เพื่อกำหนดขอบเขตในการกัด ลักษณะของการกัดจะเป็นการกัดภายในปริมาตรที่ล้อมรอบด้วยขอบเขตที่กำหนดขึ้น โดยจะได้รูปร่างที่คล้ายกับแบบจำลองโซลิดเท่านั้น โดยจะกัดบนระนาบ X-Y ที่ค่า Z คงที่เป็นระดับชั้นลงไปเรื่อยๆ จากค่า Z มากไปหาน้อย

3.3.5 โปรแกรมสำหรับการกัดคอนทัวร์สามแกน (3D Contour) จะรับองค์ประกอบทางโทโปโลยี ของแบบจำลองโซลิดที่เป็นหน้าเท่านั้น ลักษณะของการกัดแบบนี้จะ

เป็นการเดินหัวกัดตามโพรไฟล์ของหน้าที่กำหนดขึ้นเพื่อให้ได้ชิ้นงานตามแบบจำลองที่ต้องการ หัวกัดสามารถเคลื่อนที่แบบอิสระได้ 3 แกนพร้อมๆ กัน

นอกจากนี้ยังมีโปรแกรมที่ทำงานเสริมกับโปรแกรมหลักทั้ง 5 นี้ อีก เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ได้แก่

3.3.6 โปรแกรมสำหรับการเพิ่มเนื้อวัสดุ (Add Stock Material) จะรับองค์ประกอบทางโทโปโลยี ของแบบจำลองโซลิดที่เป็นลำตัวโดยสามารถเลือกระยะออฟเซตออกไปจากลำตัวที่กำหนดได้ โปรแกรมจะทำการสร้างลำตัวที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมเพิ่มขึ้นมา เพื่อใช้ในการอ้างอิงจุดกำเนิด หรือ ใช้ในการกำหนดขอบเขตของการกัด

3.3.7 โปรแกรมสำหรับการกำหนดจุดกำเนิด (Set Origin) จะรับองค์ประกอบทางโทโปโลยี ของแบบจำลองโซลิดที่เป็นจุด เพื่อทำการกำหนดจุดที่เลือกให้มีพิกัดเป็น $(x, y, z) = (0, 0, 0)$

3.3.8 โปรแกรมสำหรับการกำหนดคุณสมบัติของหัวกัด (Tool Property) จะรับองค์ประกอบทางโทโปโลยี ของแบบจำลองโซลิดที่เป็นลำตัวโดยสามารถเลือกระยะออฟเซตออกไปจากลำตัวที่กำหนดได้ โปรแกรมจะทำการสร้างลำตัวที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมเพิ่มขึ้นมา เพื่อใช้ในการอ้างอิงจุดกำเนิด หรือ ใช้ในการกำหนดขอบเขตของการกัด

3.4 การออกแบบโปรแกรม

3.4.1 โปรแกรมสำหรับงานเจาะ

3.4.1.1 ส่วนของค่ารับเข้า ผู้วิจัยได้ออกแบบโปรแกรมสำหรับงานเจาะ ให้สามารถรับองค์ประกอบทางโทโปโลยีประเภทขอบวงกลมเท่านั้น โดยสามารถเลือกได้มากกว่า 1 ขอบ ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ผู้ใช้สามารถกำหนดค่าได้ ได้แก่

อัตราป้อนของดอกสว่าน (Feed Rate) เป็นอัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของดอกสว่านมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อนาที (mm/min)

ความเร็วรอบของดอกสว่าน (Spindle Speed) เป็นอัตราเร็วเชิงมุมของดอกสว่านมีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (Rev/min)

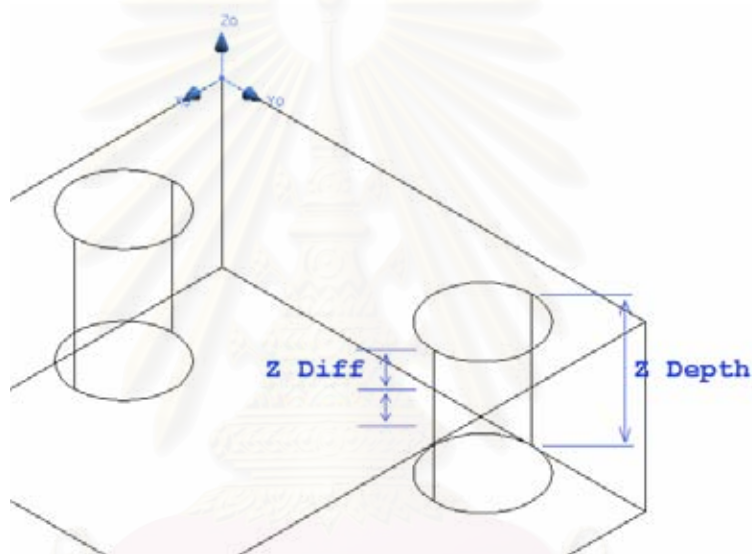
ตำแหน่งเริ่มต้นของดอกสว่าน ระบุเป็นพิกัด X, Y, Z (Start Point) เป็นจุดเริ่มต้นของการเจาะชิ้นงาน ซึ่งจะต้องเติมค่าทั้ง 3 แกน คือ X, Y และ Z โดยมีค่าปริยาย (Default) ที่ $X=0$, $Y=0$ และ $Z=10$ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

ความลึกทั้งหมดของการเจาะ (Z Depth) เป็นระยะความลึกทั้งหมดที่ต้องการเจาะวัสดุมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) ดังแสดงในรูปที่ 3.2

ความลึกในแต่ละระดับชั้นของการเจาะ (Z Diff) เป็นระยะความลึกในแต่ละระดับชั้นการเจาะวัสดุมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) ดังแสดงในรูปที่ 3.2

ระยะยกตัวของดอกสว่าน (Z Rebound) เป็นระยะยกตัวของดอกสว่านในแต่ละลำดับชั้นการเจาะมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

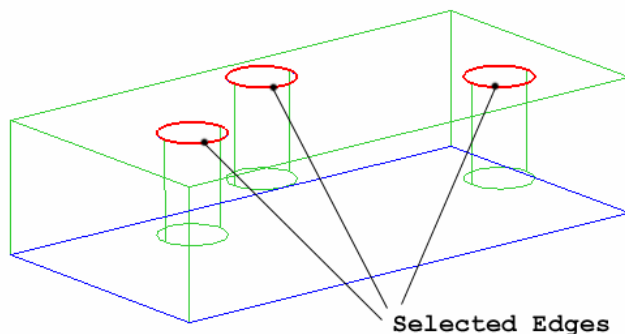
ระนาบที่ปลอดภัย (Clearance Plane) เป็นระนาบที่มีค่าของแกน Z คงที่ โดยที่ระนาบนี้ดอกสว่านสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุดของเครื่องโดยปลอดภัยจากการที่ดอกสว่านวิ่งเข้าชนกับชิ้นงาน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)



รูปที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับงานเจาะ

3.4.1.2 ส่วนของกระบวนการ

เมื่อรับค่าองค์ประกอบทางโทโปโลยีประเภทขอบวงกลมเข้ามาเก็บในหน่วยความจำดังแสดงในรูปที่ 3.3 โปรแกรมจะทำการตรวจสอบว่ามีองค์ประกอบทางเรขาคณิตประเภทเส้นโค้งวงกลมจริง ทำการตรวจสอบเสร็จจะคำนวณหาจุดศูนย์กลางของเส้นโค้งวงกลมทุกวงเก็บในหน่วยความจำ แล้วจะนำค่าพิกัดของจุดศูนย์กลางวงกลมเหล่านี้ กับค่าพารามิเตอร์ที่ผู้ใช้โปรแกรมกำหนดขึ้น ไปเรียงให้เกิดเป็นเส้นทางเดินการกัด



รูปที่ 3.3 ขอบวงกลมที่เลือกจากแบบจำลองโซลิด

3.4.1.3 ส่วนของผลลัพธ์ที่ได้

เมื่อโปรแกรมทำการคำนวณเสร็จสิ้น จะได้ไฟล์รหัสจีออกมา และสามารถนำไปใช้ควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซี สำหรับเจาะชิ้นงานได้

3.4.2 โปรแกรมสำหรับงานกัดหยาบสองแกน

3.4.2.1 ส่วนของคำรับเข้า

ผู้วิจัยได้ออกแบบโปรแกรมสำหรับงานกัดหยาบสองแกนให้สามารถรับองค์ประกอบทางโทโปโลยีประเภทขอบ โดยจำเป็นต้องเลือกขอบเหล่านี้ให้เป็นขอบวงปิดเท่านั้น ผู้ใช้สามารถเลือกขอบวงปิดได้ 1 หรือ 2 วงปิด (ถ้ามีการเลือกขอบวงปิด 2 วง วงปิดวงเล็กจะต้องอยู่ภายในบริเวณของรูปปิดวงใหญ่เสมอ) ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ผู้ใช้สามารถกำหนดค่าได้ ได้แก่

รูปแบบทางเดินหัวกัดแบบทิศทางเดียว (One-way)

รูปแบบทางเดินหัวกัดแบบทิศทางไปกลับ (Zig-Zag)

อัตราป้อนของหัวกัด (Feed Rate) เป็นอัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของดอกสว่านมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อนาที (mm/min)

ความเร็วรอบของหัวกัด (Spindle Speed) เป็นอัตราเร็วเชิงมุมของดอกสว่านมีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (Rev/min)

ตำแหน่งเริ่มต้นของหัวกัด ระบุเป็นพิกัด X, Y, Z (Start Point) เป็นจุดเริ่มต้นของการเจาะชิ้นงาน ซึ่งจะต้องเติมค่าทั้ง 3 แกน คือ X, Y และ Z โดยมีค่าปริยาย (Default) ที่ X=0, Y=0 และ Z=10 มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

Z เริ่มต้นของการกัด (Z Start) เป็นระนาบ X-Y ที่ใช้สำหรับอ้างอิงผิวของวัสดุด้านบนสุดที่จะทำการกัด โดยมีค่าปริยาย (Default) เป็นศูนย์ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) ดังแสดงในรูปที่ 3.4

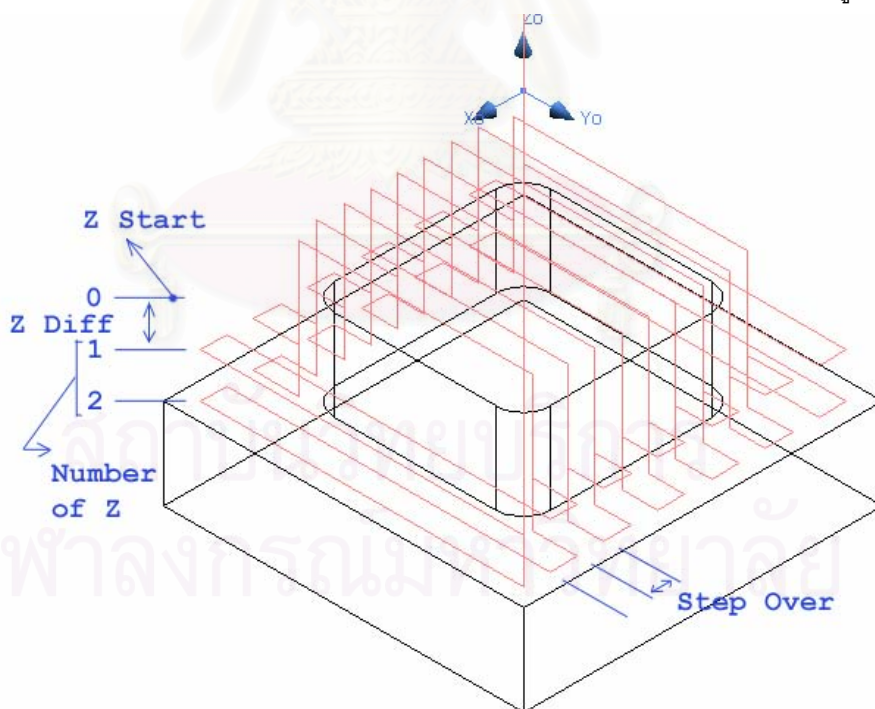
จำนวนระดับชั้นสำหรับการกัด (Number of Z) เป็นจำนวนระนาบที่ต้องการกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.4

ความลึกในแต่ละระดับชั้นของการกัด (Z Diff) เป็นระยะความลึกในแต่ละระดับชั้นการกัดวัสดุมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) ดังแสดงในรูปที่ 3.4

ระยะออฟเซตของชิ้นงาน (Offset) เป็นระยะเพื่อออกมาจากผิวของชิ้นงาน เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าหัวกัดจะไม่กัดเข้าไปในระยะเผื่อที่ตั้งไว้ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

ระนาบที่ปลอดภัย (Clearance Plane) เป็นระนาบที่มีค่าของแกน Z คงที่ โดยที่ระนาบนี้หัวกัดสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุดของเครื่องโดยปลอดภัยจากการที่หัวกัดวิ่งเข้าชนกับชิ้นงาน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

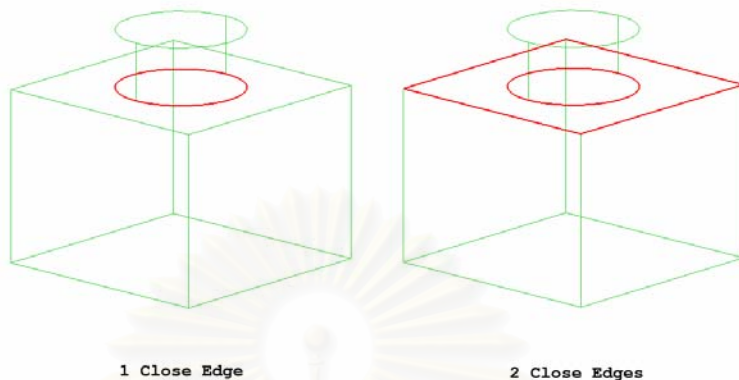
ระยะห่างระหว่างเส้นทางเดินการกัด (Step Over) เป็นระยะห่างระหว่างหัวกัดในแต่ละ เส้นทางเดินการกัดที่ติดกัน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm) ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์สำหรับงานกัดหยาบ 2 แกน

3.4.2.2 ส่วนของกระบวนการ

เมื่อรับค่าองค์ประกอบทางโทโปโลยีประเภทขอบวงปิดเข้ามาเก็บในหน่วยความจำ โปรแกรมจะทำการตรวจสอบว่ามีขอบวงปิด 1 หรือ 2 วง ดังแสดงในรูปที่ 3.5



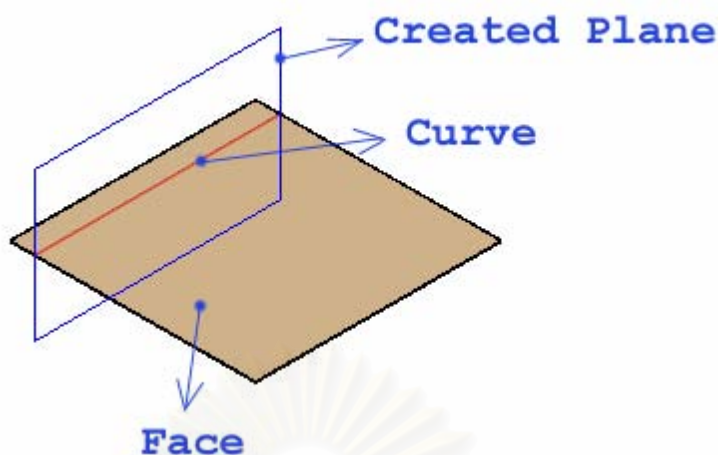
รูปที่ 3.5 การเลือกขอบแบบวงปิด 1 วง และ 2 วง

ถ้าตรวจสอบว่ามีขอบวงปิด 1 วง ความหมายคือผู้ใช้โปรแกรมต้องการกัดเอาเนื้อวัสดุบริเวณพื้นที่ซึ่งกำหนดขอบเขตด้วยวงปิดนี้ออกไป โปรแกรมจะทำการสร้างลำตัวเส้น (Wire Body) จากขอบวงปิด แล้วทำการออฟเซตลำตัวเส้นตามค่าพารามิเตอร์รับเข้า Offset Value โดยทำการออฟเซตให้มีขนาดเล็กลง ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การออฟเซตลำตัวเส้น 1 ลำตัว

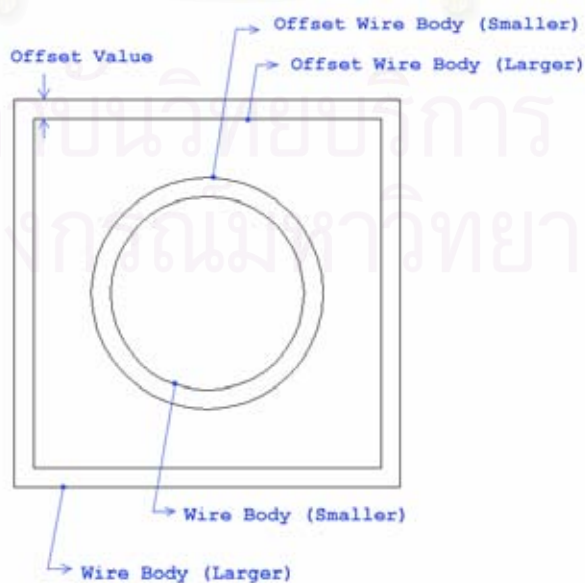
ต่อมาทำการคำนวณหาหน้า (Face) ของลำตัวเส้น โปรแกรมจะสร้างระนาบ Y-Z ขึ้นมา ตามค่าพารามิเตอร์รับเข้า Step Over แล้วคำนวณหาเส้นตรงที่เกิดจากการตัดกันระหว่างหน้าและระนาบ Y-Z ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เส้นตรงที่เกิดจากการตัดระหว่างระนาบ Y-Z กับหน้า

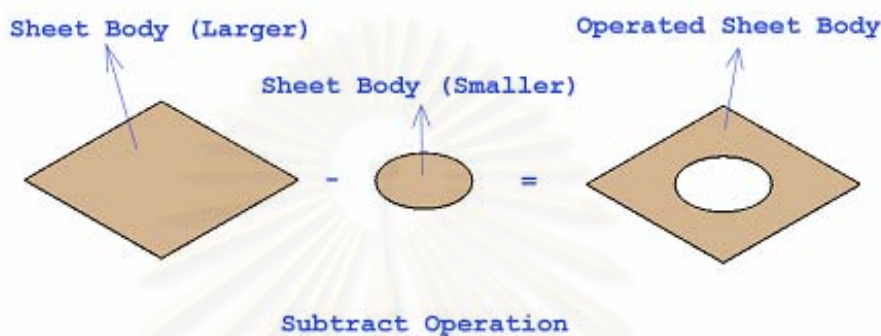
คำนวณหาจุดต้นและจุดปลายของเส้นตรงเหล่านี้เก็บไว้ในหน่วยความจำ สุดท้ายโปรแกรมจะนำจุดที่ได้กับค่าพารามิเตอร์ที่ผู้ใช้โปรแกรมกำหนดขึ้นไปทำการจัดเรียงให้เกิดเป็นเส้นทางเดินการกัด

ถ้าตรวจสอบว่ามีขอบวงปิด 2 วง ความหมายคือผู้ใช้โปรแกรมต้องการกัดเอาเนื้อวัสดุบริเวณพื้นที่ที่อยู่ภายในของขอบเขตวงปิดทั้ง 2 นี้ออกไป โปรแกรมจะทำการสร้างลำตัวเส้น (Wire Body) ขึ้นมา 2 ลำตัว จากขอบวงปิดแต่ละวง แล้วทำการตรวจสอบขนาดโทโปโลยีบ็อกซ์ (Topology Box) ของแต่ละลำตัวเส้นแล้วเปรียบเทียบขนาด ต่อมาทำการออฟเซตลำตัวเส้น ตามค่าพารามิเตอร์รับเข้า Offset Value โดยลำตัวเส้นที่มีขนาดใหญ่กว่าทำการออฟเซตให้เล็กลง ส่วนลำตัวเส้นที่มีขนาดเล็กกว่าทำการออฟเซตให้ใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.8



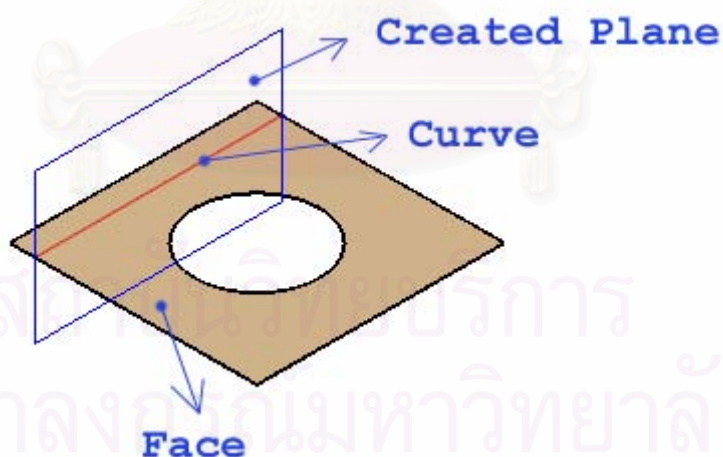
รูปที่ 3.8 การออฟเซตลำตัวเส้น 2 ลำตัว

ทำการคำนวณหาหน้า (Face) แต่ละหน้าของลำตัวเส้นทั้ง 2 ต่อมาจะสร้างลำตัวแผ่น (Sheet Body) จากหน้าที่คำนวณหามาได้ เมื่อได้ลำตัวแผ่นทั้ง 2 มาแล้วโปรแกรมจะทำการตรวจสอบว่าลำตัวแผ่นใดมีขนาดนอกสุดใหญ่กว่า เพื่อนำมาเป็นตัวตั้งในการทำบูลีนแบบลบดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การกระทำบูลีนแบบลบระหว่างลำตัวแผ่น 2 ลำตัว

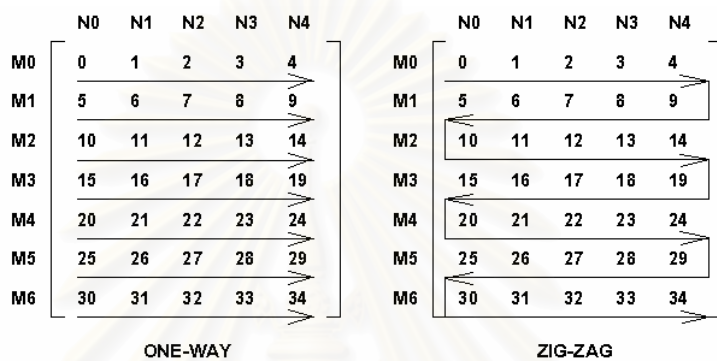
หลังกระบวนการบูลีนแบบลบจะได้ลำตัวแผ่นที่พร้อมนำมาใช้งาน โปรแกรมจะสร้างระนาบ Y-Z ขึ้นมาตามค่าพารามิเตอร์รับเข้า Step Over แล้วทำการคำนวณหาเส้นตรงที่เกิดจากการตัดกันระหว่างหน้าและระนาบ Y-Z ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เส้นตรงที่เกิดจากการตัดกันระหว่างหน้าและระนาบ Y-Z

คำนวณหาจุดต้นและจุดปลายของเส้นตรงเหล่านี้เก็บไว้ในหน่วยความจำ สุดท้ายโปรแกรมจะนำจุดที่ได้กับค่าพารามิเตอร์ที่ผู้ใช้โปรแกรมกำหนดขึ้นไปทำการจัดเรียงให้เกิดเป็นเส้นทางเดินการกัด โดยลักษณะการเก็บข้อมูลจะจัดเก็บในรูปแบบของไดนามิกอาร์เรย์ 2 มิติ พิจารณาจากรูปที่ 3.11 ถ้าผู้ใช้โปรแกรมเลือกการสร้างเส้นทางเดินการกัด

แบบทางเดียว ในแต่ละแถวของ M จะมีการเขียนจุดโดยเริ่มจากดรรชนีของ N จากค่าน้อยสุดไปหาค่ามากที่สุด (ในที่นี้คือ N0 ถึง N4) แต่ถ้าผู้ใช้โปรแกรมเลือกการสร้างเส้นทางเดินการกัดแบบไปกลับ จะแยกพิจารณาแถว M ออกเป็นแถวคู่ และแถวคี่ โดยแถวคู่ (M0 M2 M4 M6 ...) จะมีการเขียนจุดโดยเริ่มจากดรรชนีของ N จากค่าน้อยสุดไปหาค่ามากที่สุด (ในที่นี้คือ N0 ถึง N4) ส่วนแถวคี่ (M1 M3 M5 M7 ...) จะมีการเขียนจุดโดยเริ่มจากดรรชนีของ N จากค่ามากที่สุดไปหาค่าน้อยสุด (ในที่นี้คือ N4 ถึง N0)



รูปที่ 3.11 แนวทางในการสร้างเส้นทางเดินการกัดแบบทิศทางเดียว และแบบไปกลับ

3.4.2.3 ส่วนของผลลัพธ์ที่ได้

เมื่อโปรแกรมทำการคำนวณเสร็จสิ้น จะได้ไฟล์รหัสจีออกมา และสามารถนำไปใช้ควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซี สำหรับงานกัดหยาบ 2 แกนได้

3.4.3 โปรแกรมสำหรับงานกัดแบบคอนทัวร์สองแกน

3.4.3.1 ส่วนของค่ารับเข้า ผู้วิจัยได้ออกแบบโปรแกรมสำหรับงานกัดแบบคอนทัวร์สองแกนให้สามารถรับองค์ประกอบทางโทโปโลยีประเภทขอบ โดยจำเป็นต้องเลือกขอบเหล่านี้ให้เป็นขอบวงปิดเท่านั้น ผู้ใช้สามารถเลือกขอบวงปิดได้ 1 วงปิด ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ผู้ใช้สามารถกำหนดค่าได้ ได้แก่

การกัดเนื้อวัสดุด้านในเส้นวงปิด (Inner)

การกัดเนื้อวัสดุด้านนอกเส้นวงปิด (Outer)

อัตราป้อนของหัวกัด (Feed Rate) เป็นอัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของดอกสว่านมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อนาที (mm/min)

ความเร็วรอบของหัวกัด (Spindle Speed) เป็นอัตราเร็วเชิงมุมของดอกสว่านมีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (Rev/min)

ตำแหน่งเริ่มต้นของหัวกัด ระบุเป็นพิกัด X, Y, Z (Start Point) เป็นจุดเริ่มต้นของการเจาะชิ้นงาน ซึ่งจะต้องเติมค่าทั้ง 3 แกน คือ X, Y และ Z โดยมีค่าปริยาย (Default) ที่ $X=0$, $Y=0$ และ $Z=10$ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

Z เริ่มต้นของการกัด (Z Start) เป็นระนาบ X-Y ที่ใช้สำหรับอ้างอิงผิวของวัสดุด้านบนสุดที่จะทำการกัด โดยมีค่าปริยาย (Default) เป็นศูนย์ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) ดังแสดงในรูปที่ 3.12

จำนวนระดับขั้นสำหรับการกัด (Number of Z) เป็นจำนวนระนาบที่ต้องการกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.12

ความลึกในแต่ละระดับขั้นของการกัด (Z Diff) เป็นระยะความลึกในแต่ละระดับขั้นการกัดวัสดุ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) ดังแสดงในรูปที่ 3.12

ระยะออฟเซตของชิ้นงาน (Offset) เป็นระยะเพื่อออกมาจากของวงปิดของชิ้นงาน เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าหัวกัดจะไม่กัดเข้าไปในระยะเพื่อที่ตั้งไว้ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

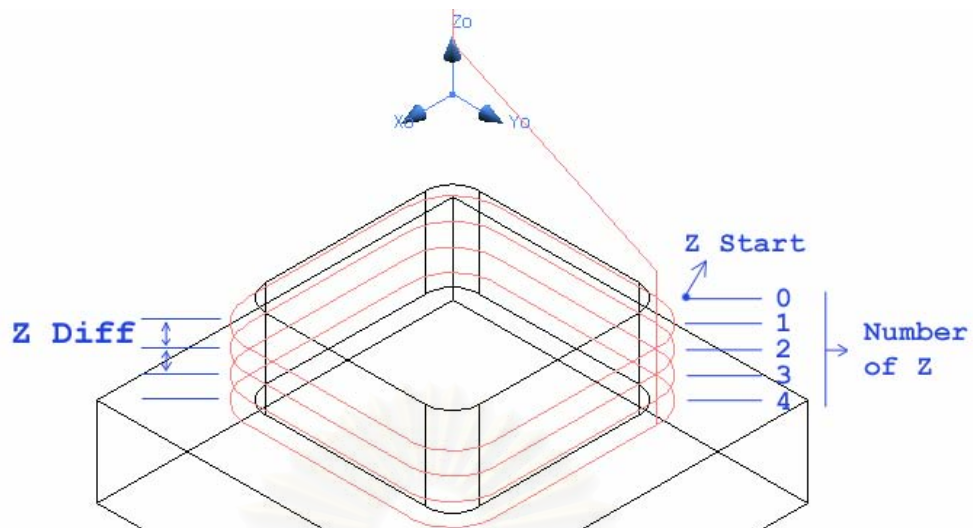
ระนาบที่ปลอดภัย (Clearance Plane) เป็นระนาบที่มีค่าของแกน Z คงที่ โดยที่ระนาบนี้หัวกัดสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุดของเครื่องโดยปลอดภัยจากการที่หัวกัดวิ่งเข้าชนกับชิ้นงาน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นทางเดินการกัด (Path Tolerance) เป็นระยะห่างที่มากที่สุดจากส่วนของเส้นตรงที่เกิดจากจุด 2 จุดบนเส้นโค้ง ถึงส่วนโค้งจริง มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm) ดังแสดงในรูปที่ 3.13

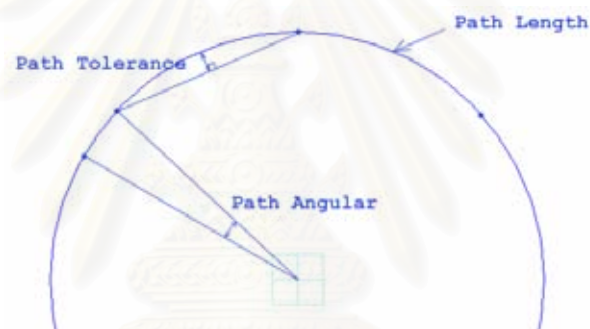
ระยะความยาวของส่วนโค้ง (Path Length) เป็นค่าความยาวของส่วนโค้งภายในจุด 2 จุดบนเส้นโค้ง มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm) ดังแสดงในรูปที่ 3.13

มุมของความยาวส่วนโค้ง (Path Angular) เป็นค่ามุมของส่วนโค้งภายในจุด 2 จุดบนเส้นโค้ง มีหน่วยเป็นองศา (Degree) ดังแสดงในรูปที่ 3.13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



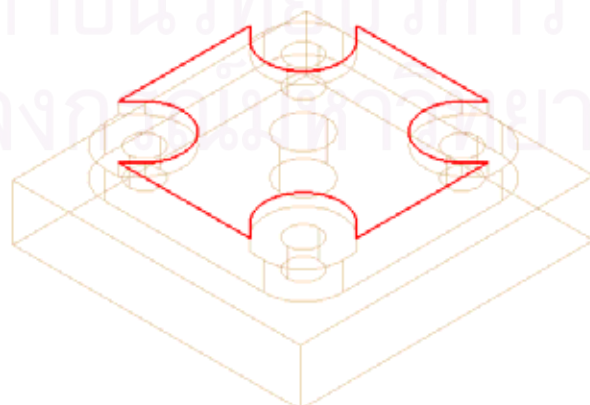
รูปที่ 3.12 ค่าพารามิเตอร์สำหรับงานกัดคอนทัวร์ 2 แกน



รูปที่ 3.13 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความละเอียดในการหาจุดบนเส้นโค้ง

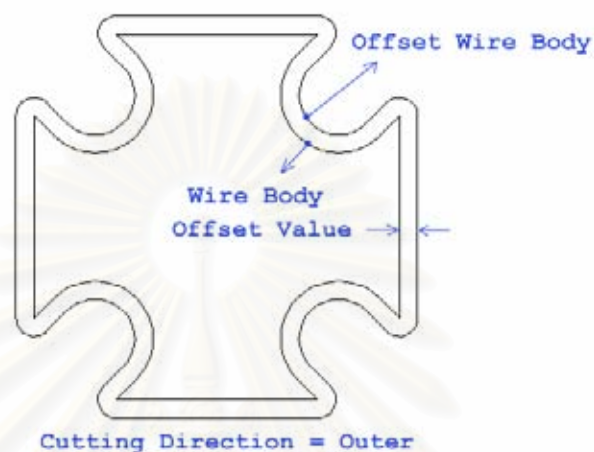
3.4.3.2 ส่วนของกระบวนการ

เมื่อรับค่าองค์ประกอบทางโทโปโลยีประเภทขอบวงปิดเข้ามาเก็บในหน่วยความจำดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ขอบที่ถูกเลือก ซึ่งมีลักษณะเป็นขอบแบบปิด

โปรแกรมจะทำการสร้างลำตัวเส้น (Wire Body) จากขอบวงปิด เมื่อได้ลำตัวเส้นมาโปรแกรมจะทำการออฟเซตลำตัวเส้น โดยพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์ว่าเป็นการกัดด้านในหรือด้านนอกวงปิด และ Offset Value เช่นถ้าเป็นด้านนอกก็จะได้ลำตัวเส้นที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การออฟเซตลำตัวเส้นแบบการกัดด้านนอก

เมื่อได้ลำตัวเส้นที่เฟื่อระยะตามค่าพารามิเตอร์แล้ว โปรแกรมจะทำการคำนวณหาขอบของลำตัวเส้น ต่อมาคำนวณหาเส้นโค้งจากขอบที่ได้ แล้วทำการคำนวณหาจุดบนเส้นโค้งเหล่านี้ตามค่าพารามิเตอร์ที่กำหนด เก็บจุดที่คำนวณได้ไว้ในหน่วยความจำ สุดท้ายโปรแกรมจะนำจุดที่ได้กับค่าพารามิเตอร์ที่ผู้ใช้โปรแกรมกำหนดขึ้นไปทำการจัดเรียงให้เกิดเป็นเส้นทางเดินการกัด

3.4.3.3 ส่วนของผลลัพธ์ที่ได้

เมื่อโปรแกรมทำการคำนวณเสร็จสิ้น จะได้ไฟล์รหัสจีออกมา และสามารถนำไปใช้ควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซี สำหรับงานกัดคอนทอร์ 2 แกนได้

3.4.4 โปรแกรมสำหรับงานกัดหยาบ 3 แกน

3.4.4.1 ส่วนของค่ารับเข้า

ผู้วิจัยได้ออกแบบโปรแกรมสำหรับงานกัดหยาบ 3 แกน ให้สามารถรับองค์ประกอบทางโทโปโลยีประเภทลำตัว โดยเลือกได้ 1 ลำตัวเท่านั้น ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ผู้ใช้สามารถกำหนดค่าได้ ได้แก่

รูปแบบทางเดินหัวกัดแบบทิศทางเดียว (One-Way)

รูปแบบทางเดินหัวกัดแบบทิศทางไปกลับ (Zig-Zag)

อัตราป้อนของหัวกัด (Feed Rate) เป็นอัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของดอกสว่านมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อนาที (mm/min)

ความเร็วรอบของหัวกัด (Spindle Speed) เป็นอัตราเร็วเชิงมุมของดอกสว่านมีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (Rev/min)

ตำแหน่งเริ่มต้นของหัวกัด ระบุเป็นพิกัด X, Y, Z (Start Point) เป็นจุดเริ่มต้นของการเจาะชิ้นงาน ซึ่งจะต้องเติมค่าทั้ง 3 แกน คือ X, Y และ Z โดยมีค่าปริยาย (Default) ที่ X=0, Y=0 และ Z=10 มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

Z เริ่มต้นของการกัด (Z Start) เป็นระนาบ X-Y ที่ใช้สำหรับอ้างอิงผิวของวัสดุด้านบนสุดที่จะทำการกัด โดยมีค่าปริยาย (Default) เป็นศูนย์ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) ดังแสดงในรูปที่ 3.16

จำนวนระดับชั้นสำหรับการกัด (Number of Z) เป็นจำนวนระนาบที่ต้องการกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.16

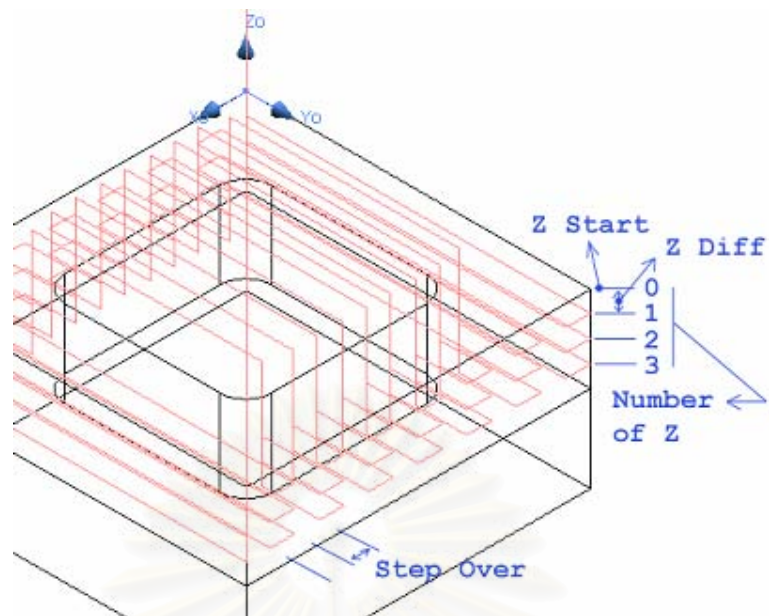
ความลึกในแต่ละระดับชั้นของการกัด (Z Diff) เป็นระยะความลึกในแต่ละระดับชั้นการกัดวัสดุมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) ดังแสดงในรูปที่ 3.16

ระยะเฟื่อของชิ้นงาน (Offset) เป็นระยะเฟื่อออกมาจากผิวของชิ้นงาน เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าหัวกัดจะไม่กัดเข้าไปในระยะเฟื่อที่ตั้งไว้ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

ระนาบที่ปลอดภัย (Clearance Plane) เป็นระนาบที่มีค่าของแกน Z คงที่ โดยที่ระนาบนี้หัวกัดสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุดของเครื่องโดยปลอดภัยจากการที่หัวกัดวิ่งเข้าชนกับชิ้นงาน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

ระยะห่างระหว่างเส้นทางเดินการกัด (Step Over) เป็นระยะห่างระหว่างหัวกัดในแต่ละ เส้นทางเดินการกัดที่ติดกัน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm) ดังแสดงในรูปที่ 3.16

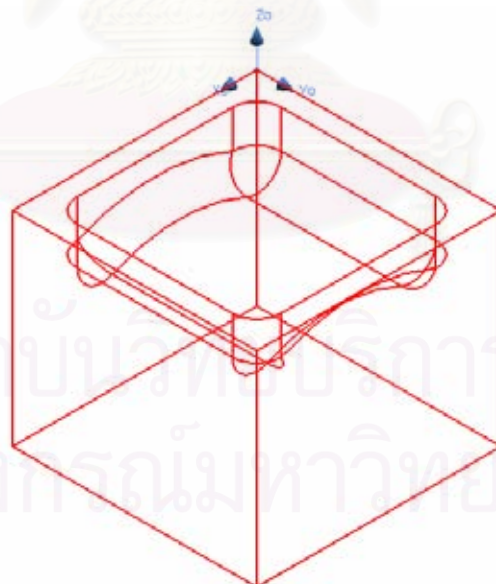
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



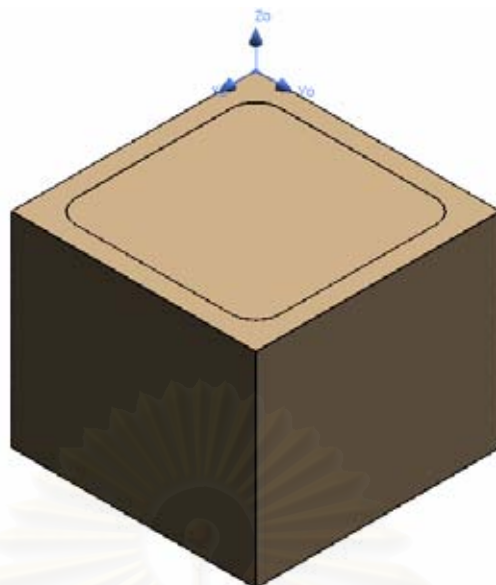
รูปที่ 3.16 ค่าพารามิเตอร์สำหรับงานกัดหยาบ 3 แกน

3.4.4.2 ส่วนของกระบวนการ

เมื่อรับค่าองค์ประกอบทางโทโปโลยีประเภทลำตัวเข้ามาเก็บในหน่วยความจำดังแสดงในรูปที่ 3.17 แล้วจะรับค่าลำตัวที่เป็นวัสดุสกัดเข้ามาเก็บในหน่วยความจำดังแสดงในรูปที่ 3.18

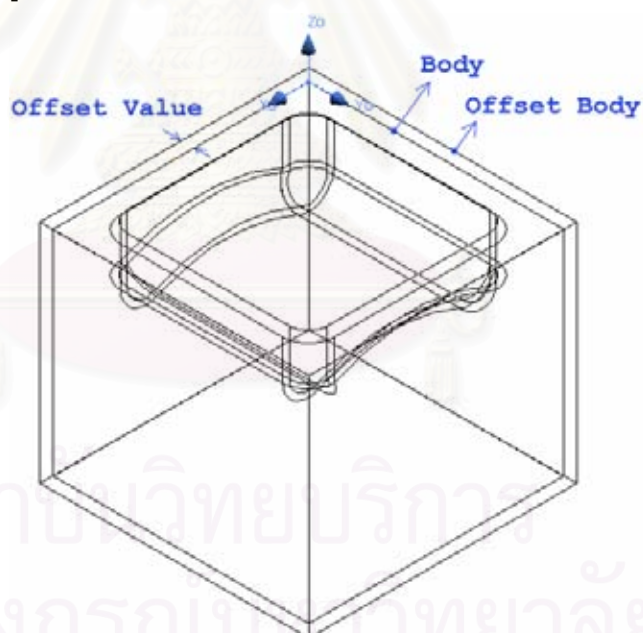


รูปที่ 3.17 ลำตัวที่ถูกเลือก



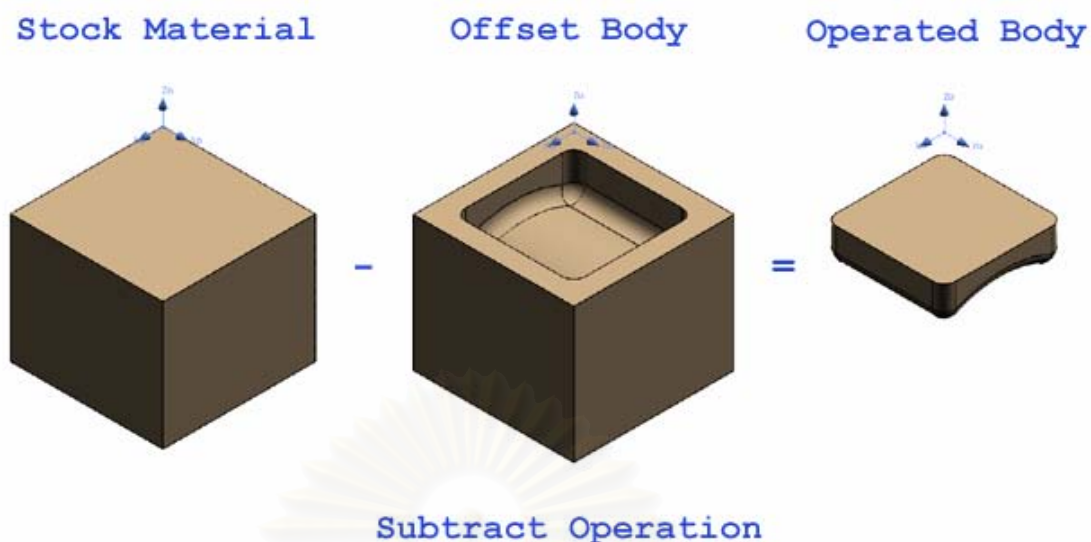
รูปที่ 3.18 ลำตัววัสดุตัดที่โปรแกรมอ่านค่าเข้ามา

โปรแกรมจะทำการออฟเซตผิวของลำตัวตามค่าพารามิเตอร์รับเข้า Offset Value ดังแสดงในรูปที่ 3.19



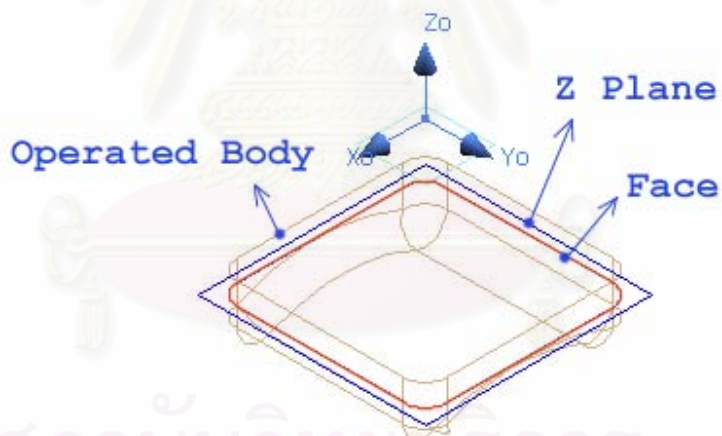
รูปที่ 3.19 การออฟเซตผิวของลำตัว

จากนั้นโปรแกรมจะทำนูนเส้นแบบลบโดยใช้วัสดุตัดอกเป็นตัวตั้ง ลบออกด้วยลำตัวที่ออฟเซตแล้ว ลำตัวที่ได้จากการกระทำนูนเส้นนี้จะเป็นปริมาตรที่ผู้ใช้โปรแกรมต้องการกำจัดทิ้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.20



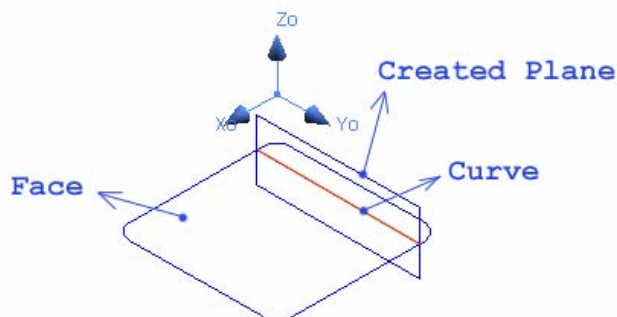
รูปที่ 3.20 การกระทำบูลีนแบบลบระหว่างวัสดุตัดกับลำตัวออฟเซต

ต่อมาโปรแกรมจะสร้างระนาบ X-Y ขึ้นมา จากค่าพารามิเตอร์รับเข้า Z Start, Number of Z และ Z Diff แล้วนำลำตัวที่ได้จากการกระทำบูลีนมาผ่านกระบวนการตัดลำตัว (Body Section) กับระนาบที่สร้างขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 การตัดลำตัวด้วยระนาบที่สร้างขึ้น

คำนวณหาหน้าตัดของลำตัว แล้วโปรแกรมจะทำการสร้างระนาบ Y-Z ที่ขึ้นจากค่าพารามิเตอร์รับเข้า Step Over แล้วทำการคำนวณหาเส้นตรงที่เกิดจากการตัดกันระหว่างหน้าและระนาบ Y-Z ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 เส้นตรงที่เกิดจากการตัดกันระหว่างหน้าและระนาบ Y-Z

คำนวณหาจุดต้นและจุดปลายของเส้นตรงเหล่านี้เก็บไว้ในหน่วยความจำ สุดท้ายโปรแกรมจะนำจุดที่ได้กับค่าพารามิเตอร์ที่ผู้ใช้โปรแกรมกำหนดขึ้นไปทำการจัดเรียงให้เกิดเป็นเส้นทางเดินการกัด

3.4.4.3 ส่วนของผลลัพธ์ที่ได้

เมื่อโปรแกรมทำการคำนวณเสร็จสิ้น จะได้ไฟล์รหัสจีออกมา และสามารถนำไปใช้ควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซี สำหรับงานกัดหยาบ 3 แกนได้

3.4.5 โปรแกรมสำหรับการกัดแบบคอนทัวร์สามแกน

3.4.5.1 ส่วนของค่ารับเข้า

ผู้วิจัยได้ออกแบบโปรแกรมสำหรับงานกัดแบบคอนทัวร์สามแกน ให้สามารถรับองค์ประกอบทางโทโปโลยีประเภทหน้า โดยสามารถเลือกได้มากกว่า 1 หน้า ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ผู้ใช้สามารถกำหนดค่าได้ ได้แก่

รูปแบบทางเดินหัวกัดแบบทิศทางเดียว (One-way)

รูปแบบทางเดินหัวกัดแบบทิศทางไปกลับ (Zig-Zag)

อัตราป้อนของหัวกัด (Feed Rate) เป็นอัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของดอกสว่านมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อนาที (mm/min)

ความเร็วรอบของหัวกัด (Spindle Speed) เป็นอัตราเร็วเชิงมุมของดอกสว่านมีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (Rev/min)

ตำแหน่งเริ่มต้นของหัวกัด ระบุเป็นพิกัด X, Y, Z (Start Point) เป็นจุดเริ่มต้นของการเจาะชิ้นงาน ซึ่งจะต้องเติมค่าทั้ง 3 แกน คือ X, Y และ Z โดยมีค่าปริยาย (Default) ที่ $X=0$, $Y=0$ และ $Z=10$ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

ระนาบที่ปลอดภัย (Clearance Plane) เป็นระนาบที่มีค่าของแกน Z คงที่ โดยที่ระนาบนี้หัวกัดสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุดของเครื่องโดยปลอดภัยจากการที่หัวกัดวิ่งเข้าชนกับชิ้นงาน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

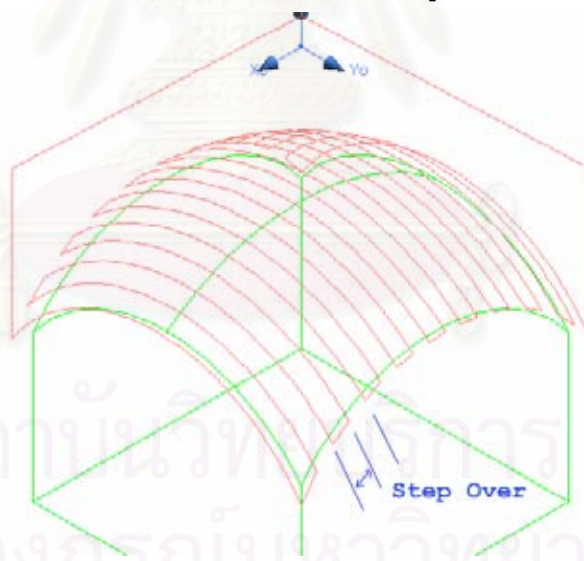
ระยะห่างระหว่างเส้นทางเดินการกัด (Step Over) เป็นระยะห่างระหว่างหัวกัดในแต่ละ เส้นทางเดินการกัดที่ติดกัน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm) ดังแสดงในรูปที่ 3.23

ระยะออฟเซตของชิ้นงาน (Offset) เป็นระยะเผื่อออกมาจากผิวของชิ้นงาน เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าหัวกัดจะไม่กัดเข้าไปในระยะเผื่อที่ตั้งไว้ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นทางเดินการกัด (Path Tolerance) เป็นระยะห่างที่มากที่สุดจากส่วนของเส้นตรงที่เกิดจากจุด 2 จุดบนเส้นโค้ง ถึงส่วนโค้งจริง มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm) ดังแสดงในรูปที่ 3.13

ระยะความยาวของส่วนโค้ง (Path Length) เป็นค่าความยาวของส่วนโค้งภายในจุด 2 จุดบนเส้นโค้ง มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm) ดังแสดงในรูปที่ 3.13

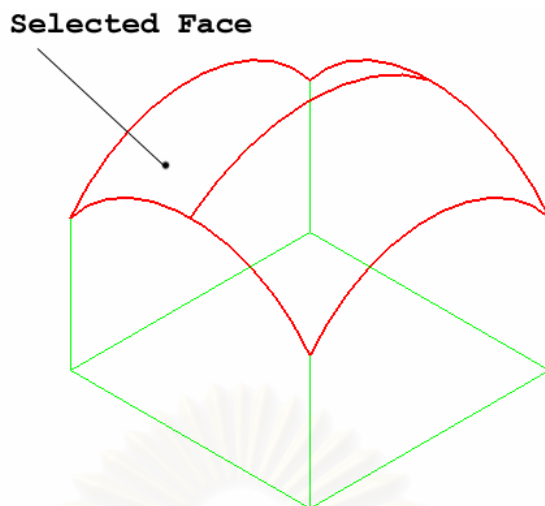
มุมของความยาวส่วนโค้ง (Path Angular) เป็นค่ามุมของส่วนโค้งภายในจุด 2 จุดบนเส้นโค้ง มีหน่วยเป็นองศา (Degree) ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.23 ค่าพารามิเตอร์สำหรับงานกัดคอนทัวร์ 3 แกน

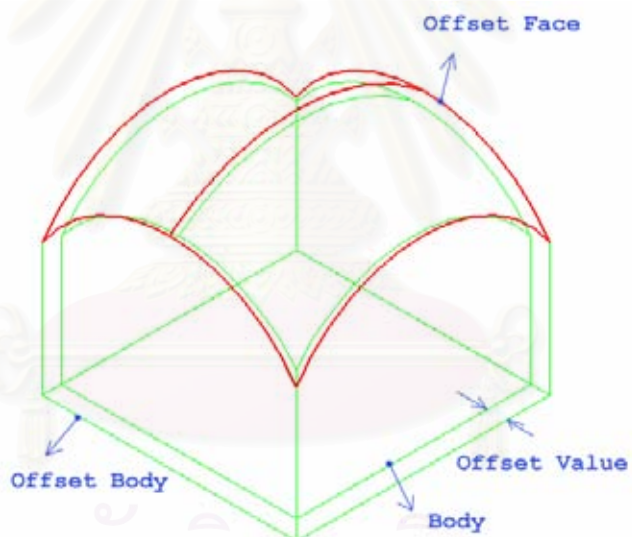
3.4.5.2 ส่วนของกระบวนการ

เมื่อรับค่าองค์ประกอบทางโทโปโลยีประเภทหน้าเข้ามาเก็บในหน่วยความจำ ดังแสดงในรูปที่ 3.24



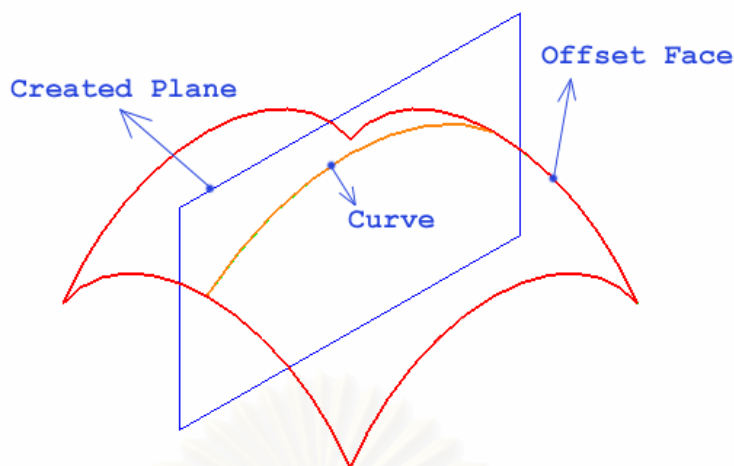
รูปที่ 3.24 หน้าที่ถูกเลือก

โปรแกรมทำการคำนวณหาลำตัวที่เป็นเจ้าของหน้า ต่อมาจะสร้างลำตัวออฟเซต ตามค่าพารามิเตอร์รับเข้า Offset Value แล้วหาหน้าที่ถูกออฟเซตจากลำตัวออฟเซต ดังแสดงในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 หน้าที่ถูกออฟเซต

แล้วทำการคำนวณหาเส้นโค้งที่เกิดจากการตัดกันระหว่างหน้าออฟเซตและระนาบ Y-Z ดังแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 เส้นโค้งที่เกิดจากการตัดกันระหว่างหน้าออฟเซตและระนาบ Y-Z

คำนวณหาจุดบนเส้นโค้ง ตามค่าพารามิเตอร์รับเข้า Path Tolerance, Path Length และ Path Angular เก็บจุดเหล่านี้ไว้ในหน่วยความจำ สุดท้ายโปรแกรมจะนำจุดที่ได้กับค่าพารามิเตอร์ที่ผู้ใช้โปรแกรมกำหนดขึ้นไปทำการจัดเรียงให้เกิดเป็นเส้นทางเดินการกัด

3.4.5.3 ส่วนของผลลัพธ์ที่ได้

เมื่อโปรแกรมทำการคำนวณเสร็จสิ้น จะได้ไฟล์รหัสจีออกมา และสามารถนำไปใช้ควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซี สำหรับงานกัดคอนทัวร์ 3 แกนได้

3.4.6 โปรแกรมสำหรับการเพิ่มเนื้อวัสดุ

3.4.6.1 ส่วนของค่ารับเข้า

ผู้วิจัยได้ออกแบบโปรแกรมสำหรับการเพิ่มเนื้อวัสดุ ให้สามารถรับองค์ประกอบทางโทโปโลยีประเภทลำตัว โดยสามารถเลือกได้มากกว่า 1 ลำตัว ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ผู้ใช้สามารถกำหนดค่าได้ ได้แก่

ระยะเผื่อทางแกน X มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

ระยะเผื่อทางแกน Y มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

ระยะเผื่อทางแกน Z มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

3.4.6.2 ส่วนของกระบวนการ

เมื่อรับค่าองค์ประกอบทางโทโปโลยีประเภทลำตัวเข้ามาเก็บในหน่วยความจำ โปรแกรมจะทำการสร้างวัสดุตัดกรูปร่างสี่เหลี่ยมเพิ่มขึ้น โดยอ้างอิงจากลำตัวที่ผู้ใช้โปรแกรมได้เลือกไว้ เพื่อระยะผิวของลำตัวโดยบวกเพิ่มไปตามแกน X ทั้งสองด้าน บวกเพิ่มไปตามแกน Y ทั้งสองด้าน และบวกเพิ่มไปตามแกน Z 1 ด้านคือด้านที่แกน Z เป็นบวก

3.4.6.3 ส่วนของผลลัพธ์ที่ได้

เมื่อโปรแกรมทำการคำนวณเสร็จสิ้น จะได้ลำดับที่มีชื่อว่าวัสดุตัดอกเพิ่มเข้ามา ซึ่งสามารถใช้ในการกำหนดตำแหน่งอ้างอิง จุดกำเนิด หรือขอบเขตของการกัดได้

3.4.7 โปรแกรมสำหรับกำหนดจุดกำเนิด

3.4.7.1 ส่วนของค่ารับเข้า

ผู้วิจัยได้ออกแบบโปรแกรมสำหรับกำหนดจุดกำเนิด ให้สามารถรับองค์ประกอบทางโทโปโลยีประเภทจุดยอด โดยสามารถเลือกได้ 1 จุดเท่านั้น

3.4.7.2 ส่วนของกระบวนการ

เมื่อรับค่าองค์ประกอบทางโทโปโลยีประเภทจุดยอดเข้ามาเก็บในหน่วยความจำ โปรแกรมจะทำการเลื่อนตำแหน่งจุดกำเนิดเดิมของแบบจำลองโซลิดไปยังจุดใหม่

3.4.7.3 ส่วนของผลลัพธ์ที่ได้

เมื่อโปรแกรมทำการเลื่อนตำแหน่งเสร็จสิ้น จะพบว่าจุดกำเนิดของแบบจำลองเปลี่ยนไป เป็นจุดที่ผู้ใช้โปรแกรมเลือกไว้

3.4.8 โปรแกรมสำหรับการกำหนดคุณสมบัติของหัวกัด

3.4.6.1 ส่วนของค่ารับเข้า

ผู้วิจัยได้ออกแบบโปรแกรมสำหรับการกำหนดคุณสมบัติของหัวกัด ให้สามารถรับองค์ประกอบทางโทโปโลยีประเภทขอบวงกลม โดยสามารถเลือกได้ 1 ขอบ ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ผู้ใช้สามารถกำหนดค่าได้ ได้แก่

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกัด (Tool Diameter) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

ความยาวของหัวกัด (Tool Length) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

ทิศทางการหมุนของหัวกัดแบบตามเข็มนาฬิกา (CW)

ทิศทางการหมุนของหัวกัดแบบทวนเข็มนาฬิกา (CCW)

3.4.6.2 ส่วนของกระบวนการ

เมื่อรับค่าองค์ประกอบทางโทโปโลยีประเภทขอบวงกลมเข้ามาเก็บในหน่วยความจำ โปรแกรมจะทำการคำนวณหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม แล้วเก็บค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไว้ในหน่วยความจำ หากไม่มีการรับค่าเข้าในส่วนนี้ โปรแกรมจะอ่านค่าจากพารามิเตอร์รับเข้าตัวอื่นแทน ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ โปรแกรมจะอ่านแล้วเก็บค่าลงในหน่วยความจำทั้งหมด เพื่อให้โปรแกรมหลักทั้ง 5 สามารถเรียกใช้ค่าเหล่านี้ได้

3.4.6.3 ส่วนของผลลัพธ์ที่ได้

เมื่อโปรแกรมทำการคำนวณเสร็จสิ้น จะเก็บค่าคุณสมบัติของหัวกัดไว้ รอให้โปรแกรมหลักทั้ง 5 เรียกใช้คุณสมบัติเหล่านี้

3.5 ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้โปรแกรม

ผู้ใช้โปรแกรมสามารถเรียกการใช้งานในส่วนของการผลิตได้จากทูลบาร์ที่มีชื่อว่า แมนูแฟคเจอร์ริงโหมด (Manufacturing Mode)

พิจารณาจากรูปที่ 3.27 จะเห็นรูปทั้งหมด 8 รูป นับจากทางซ้ายสุดได้แก่ ปุ่มในการเรียกใช้โปรแกรมสำหรับงานเจาะ ปุ่มในการเรียกใช้โปรแกรมสำหรับงานกัดหยาบ 2 แกน ปุ่มในการเรียกใช้โปรแกรมสำหรับงานกัดคอนทัวร์ 2 แกน ปุ่มในการเรียกใช้โปรแกรมสำหรับงานกัดหยาบ 3 แกน ปุ่มในการเรียกใช้โปรแกรมสำหรับงานกัดคอนทัวร์ 3 แกน ปุ่มในการเรียกใช้โปรแกรมสำหรับการเพิ่มวัสดุสต็อก ปุ่มในการเรียกใช้โปรแกรมสำหรับการกำหนดจุดกำเนิด และ ปุ่มในการเรียกใช้โปรแกรมสำหรับการกำหนดคุณสมบัติของหัวกัด



รูปที่ 3.27 ทูลบาร์สำหรับการใช้งานในส่วนการผลิต

เมื่อกดปุ่มซ้ายของเมาส์ที่ปุ่มไหนก็ตามจะเป็นการเรียกไดอะล็อกของโปรแกรมนั้นทันที

3.5.1 โปรแกรมสำหรับงานเจาะ

จากรูปที่ 3.28 ลักษณะของส่วนต่อประสานกับผู้ใช้สำหรับงานเจาะจะมีค่าพารามิเตอร์ส่งเข้าตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยจะมีพารามิเตอร์บางตัวถูกกำหนดค่าเริ่มต้นเอาไว้แล้ว ซึ่งจะกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ซ้ำอีกครั้ง ได้แก่

3.5.1.1 อัตราป้อนของดอกสว่าน (Feed Rate) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อนาที (mm/min)

3.5.1.2 ความเร็วรอบของดอกสว่าน (Spindle Speed) มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (Rev/min)

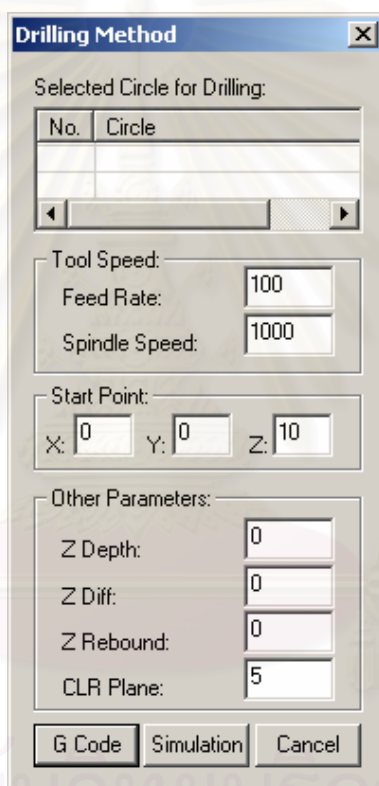
3.5.1.3 ตำแหน่งเริ่มต้นของหัวกัด (Start Point) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

3.5.1.4 ความลึกทั้งหมดของการเจาะ (Z Depth) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

3.5.1.5 ความลึกในแต่ละระดับชั้นของการเจาะ (Z Diff) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

3.5.1.6 ระยะยกตัวของดอกสว่าน (Z Rebound) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

3.5.1.7 ระนาบที่ปลอดภัย (CLR Plane) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)



รูปที่ 3.28 แสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้โปรแกรมสำหรับงานเจาะ

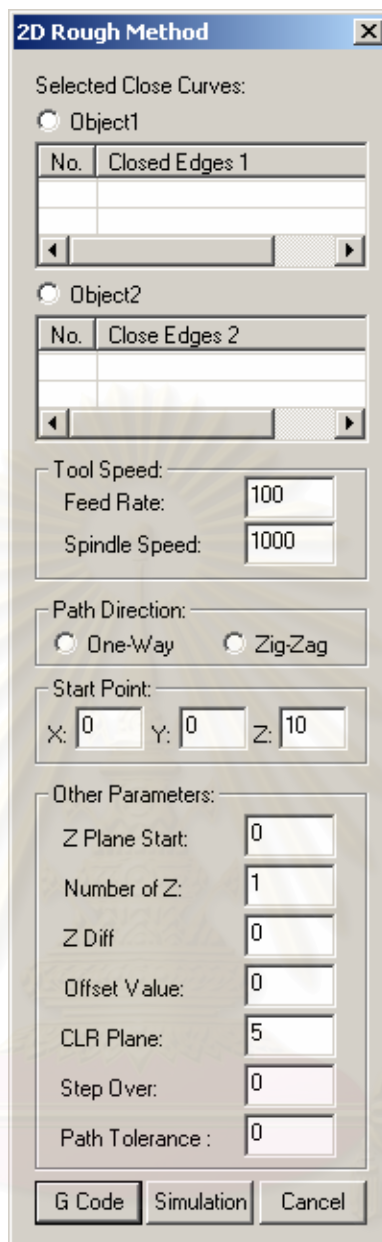
3.5.2 โปรแกรมสำหรับงานกัดหยาบ 2 แกน

จากรูปที่ 3.29 ลักษณะของส่วนต่อประสานกับผู้ใช้สำหรับงานกัดหยาบ 2 แกน จะมีค่าพารามิเตอร์ส่งเข้าตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยจะมีพารามิเตอร์บางตัวถูกกำหนดค่าเริ่มต้นเอาไว้แล้ว ซึ่งจะกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ซ้ำอีกครั้ง ได้แก่

3.5.2.1 รูปแบบทางเดินหัวกัดแบบทิศทางเดียว (One-way)

3.5.2.2 รูปแบบทางเดินหัวกัดแบบทิศทางไปกลับ (Zig-Zag)

- 3.5.2.3 อัตราป้อนของหัวกัด (Feed Rate) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อ
นาที่ (mm/min)
- 3.5.2.4 ความเร็วรอบของหัวกัด (Spindle Speed) มีหน่วยเป็นรอบต่อ
นาที่ (Rev/min)
- 3.5.2.5 ตำแหน่งเริ่มต้นของหัวกัด (Start Point) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร
(mm)
- 3.5.2.6 ระนาบ Z เริ่มต้นของการกัด (Z Plane Start) มีหน่วยเป็น
มิลลิเมตร (mm)
- 3.5.2.7 จำนวนระดับชั้นสำหรับการกัด (Number of Z)
- 3.5.2.8 ความลึกในแต่ละระดับชั้นของการกัด (Z Diff) มีหน่วยเป็น
มิลลิเมตร (mm)
- 3.5.2.9 ระยะออฟเซตของชิ้นงาน (Offset) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)
- 3.5.2.10 ระนาบที่ปลอดภัย (CLR Plane) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)
- 3.5.2.11 ระยะห่างระหว่างเส้นทางการกัด (Step Over) มีหน่วยเป็น
มิลลิเมตร (mm)



รูปที่ 3.29 แสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้โปรแกรมสำหรับงานกัดหยาบ 2 แกน

3.5.3 โปรแกรมสำหรับงานกัดคอนทัวร์ 2 แกน

จากรูปที่ 3.30 ลักษณะของส่วนต่อประสานกับผู้ใช้สำหรับงานกัดคอนทัวร์ 2 แกน จะมีค่าพารามิเตอร์ส่งเข้าตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยจะมีพารามิเตอร์บางตัวถูกกำหนดค่าเริ่มต้นเอาไว้แล้ว ซึ่งจะกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ซ้ำอีกครั้ง ได้แก่

3.5.3.1 การกัดเนื้อวัสดุด้านในเส้นวงปิด (Inner)

3.5.3.2 การกัดเนื้อวัสดุด้านนอกเส้นวงปิด (Outer)

3.5.3.3 อัตราป้อนของหัวกัด (Feed Rate) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อ นาที (mm/min)

3.5.3.4 ความเร็วรอบของหัวกัด (Spindle Speed) มีหน่วยเป็นรอบต่อ นาที (Rev/min)

3.5.3.5 ตำแหน่งเริ่มต้นของหัวกัด ระบุเป็นพิกัด X, Y, Z (Start Point) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

3.5.3.6 ระนาบ Z เริ่มต้นของการกัด (Z Plane Start) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

3.5.3.7 จำนวนระดับขั้นสำหรับการกัด (Number of Z)

3.5.3.8 ความลึกในแต่ละระดับขั้นของการกัด (Z Diff) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

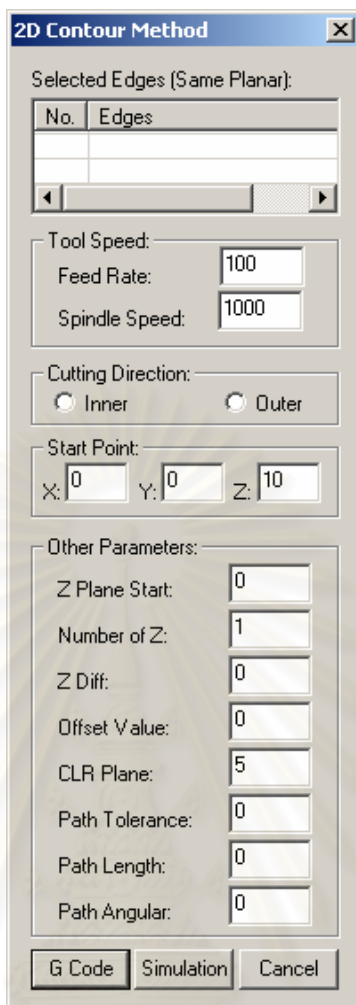
3.5.3.9 ระยะออฟเซตของชิ้นงาน (Offset) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

3.5.3.10 ระนาบที่ปลอดภัย (CLR Plane) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

3.5.3.11 ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นทางเดินการกัด (Path Tolerance) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

3.5.3.12 ระยะความยาวของส่วนโค้ง (Path Length) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

3.5.3.13 มุมของความยาวส่วนโค้ง (Path Angular) มีหน่วยเป็น องศา (Degree)



รูปที่ 3.30 แสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้โปรแกรมสำหรับงานกัดคอนทัวร์ 2 แกน

3.5.4 โปรแกรมสำหรับงานกัดหยาบ 3 แกน

จากรูปที่ 3.31 ลักษณะของส่วนต่อประสานกับผู้ใช้สำหรับงานกัดหยาบ 3 แกน จะมีค่าพารามิเตอร์ส่งเข้าตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยจะมีพารามิเตอร์บางตัวถูกกำหนดค่าเริ่มต้นเอาไว้แล้ว ซึ่งจะกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ซ้ำอีกครั้ง ได้แก่

3.5.4.1 รูปแบบทางเดินหัวกัดแบบทิศทางเดียว (One-way)

3.5.4.2 รูปแบบทางเดินหัวกัดแบบทิศทางไปกลับ (Zig-Zag)

3.5.4.4 อัตราป้อนของหัวกัด (Feed Rate) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อนาที (mm/min)

3.5.4.5 ความเร็วรอบของหัวกัด (Spindle Speed) มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (Rev/min)

3.5.4.6 ตำแหน่งเริ่มต้นของหัวกัด ระบุเป็นพิกัด X, Y, Z (Start Point) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

3.5.4.7 ระนาบ Z เริ่มต้นของการกัด (Z Plane Start) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

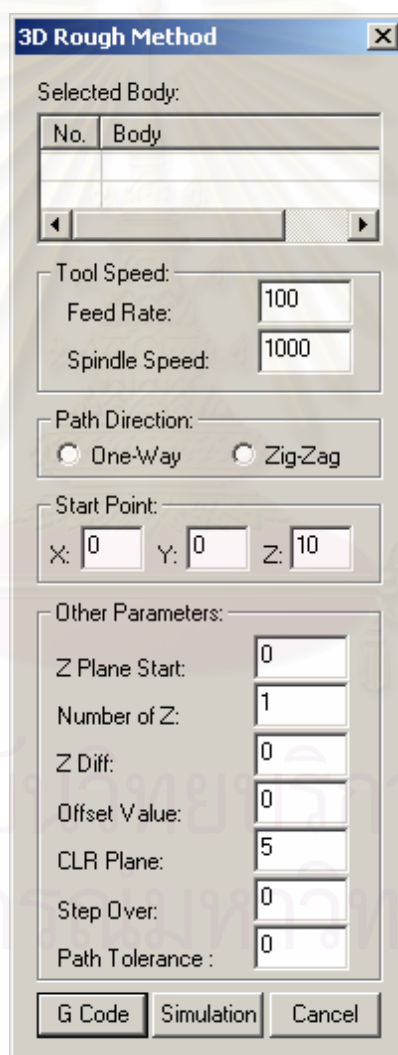
3.5.4.8 จำนวนระดับชั้นสำหรับการกัด (Number of Z)

3.5.4.9 ความลึกในแต่ละระดับชั้นของการกัด (Z Diff) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

3.5.4.10 ระยะออฟเซตของชิ้นงาน (Offset) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

3.5.4.11 ระนาบที่ปลอดภัย (CLR Plane) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

3.5.4.12 ระยะห่างระหว่างเส้นทางการกัด (Step Over) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

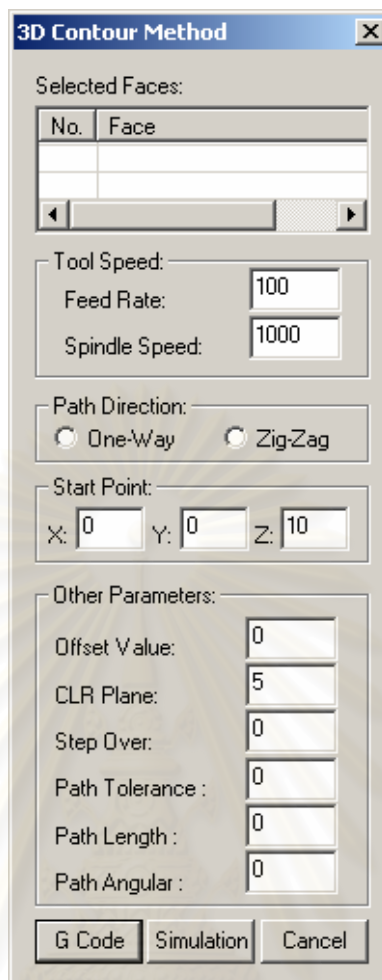


รูปที่ 3.31 แสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้โปรแกรมสำหรับงานกัดหยาบ 3 แกน

3.5.5 โปรแกรมสำหรับงานกัดคอนทัวร์ 3 แกน

จากรูปที่ 3.32 ลักษณะของส่วนต่อประสานกับผู้ใช้สำหรับงานกัดคอนทัวร์ 3 แกน จะมีค่าพารามิเตอร์ส่งเข้าตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยจะมีพารามิเตอร์บางตัวถูกกำหนดค่าเริ่มต้นเอาไว้แล้ว ซึ่งจะกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ซ้ำอีกครั้ง ได้แก่

- 3.5.5.1 รูปแบบทางเดินหัวกัดแบบทิศทางเดียว (One-way)
- 3.5.5.2 รูปแบบทางเดินหัวกัดแบบทิศทางไปกลับ (Zig-Zag)
- 3.5.5.3 อัตราป้อนของหัวกัด (Feed Rate) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อนาที (mm/min)
- 3.5.5.4 ความเร็วรอบของหัวกัด (Spindle Speed) มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (Rev/min)
- 3.5.5.5 ตำแหน่งเริ่มต้นของหัวกัด ระบุเป็นพิกัด X, Y, Z (Start Point) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)
- 3.5.5.6 ระนาบที่ปลอดภัย (CLR Plane) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)
- 3.5.5.7 ระยะห่างระหว่างเส้นทางเดินการกัด (Step Over) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)
- 3.5.5.8 ระยะออฟเซตของชิ้นงาน (Offset) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)
- 3.5.5.9 ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นทางเดินการกัด (Path Tolerance) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)
- 3.5.5.10 ระยะความยาวของส่วนโค้ง (Path Length) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)
- 3.5.5.11 มุมของความยาวส่วนโค้ง (Path Angular) มีหน่วยเป็นองศา (Degree)



รูปที่ 3.32 แสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้โปรแกรมสำหรับงานกัดคอนทัวร์ 3 แกน

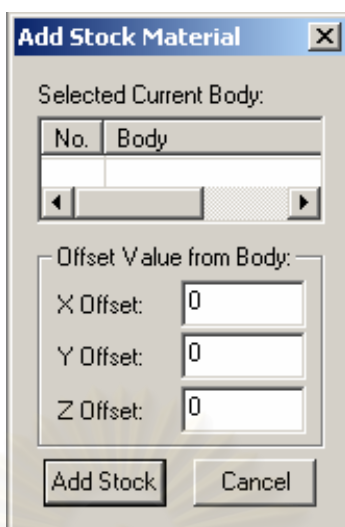
3.5.6 โปรแกรมสำหรับการเพิ่มวัสดุตัดอก

จากรูปที่ 3.33 ลักษณะของส่วนต่อประสานกับผู้ใช้สำหรับการเพิ่มวัสดุตัดอกจะมีค่าพารามิเตอร์ส่งเข้าตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยจะมีพารามิเตอร์บางตัวถูกกำหนดค่าเริ่มต้นเอาไว้แล้ว ซึ่งจะกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ซ้ำอีกครั้ง ได้แก่

3.5.6.1 ระยะเผื่อแกน X (X Offset Value) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

3.5.6.2 ระยะเผื่อแกน Y (Y Offset Value) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

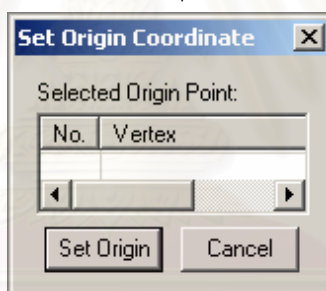
3.5.6.3 ระยะเผื่อแกน Z (Z Offset Value) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)



รูปที่ 3.33 แสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้โปรแกรมสำหรับการเพิ่มวัสดุสต็อก

3.5.7 โปรแกรมสำหรับการกำหนดจุดกำเนิดอ้างอิง

จากรูปที่ 3.34 ลักษณะของส่วนต่อประสานกับผู้ใช้สำหรับการกำหนดจุดกำเนิดอ้างอิงซึ่งจะรับแต่ค่าองค์ประกอบประเภทจุดยอดเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 3.34 แสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้โปรแกรมสำหรับการกำหนดจุดกำเนิดอ้างอิง

3.5.8 โปรแกรมสำหรับการกำหนดคุณสมบัติของหัวกัด

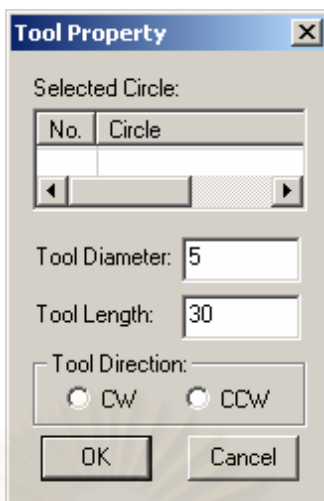
จากรูปที่ 3.35 ลักษณะของส่วนต่อประสานกับผู้ใช้สำหรับการกำหนดคุณสมบัติของหัวกัดจะมีค่าพารามิเตอร์ส่งเข้าตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยจะมีพารามิเตอร์บางตัวถูกกำหนดค่าเริ่มต้นเอาไว้แล้ว ซึ่งจะกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ซ้ำอีกครั้ง ได้แก่

3.5.8.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกัด (Tool Diameter) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

3.5.8.2 ความยาวของหัวกัด (Tool Length) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

3.5.8.3 ทิศทางการหมุนของหัวกัดแบบตามเข็มนาฬิกา (CW)

3.5.8.4 ทิศทางการหมุนของหัวกัดแบบทวนเข็มนาฬิกา (CCW)



รูปที่ 3.35 แสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้โปรแกรมสำหรับการกำหนดคุณสมบัติของหัวกัด

3.6 การสร้างรหัสจี และการจำลองเส้นทางการกัด

ในส่วนต่อประสานสำหรับผู้ใช้โปรแกรมของวิธีการกัดทั้ง 5 แบบนั้น จะมีปุ่มที่สำคัญสำหรับบริหารจัดการอยู่ 2 ปุ่มคือ

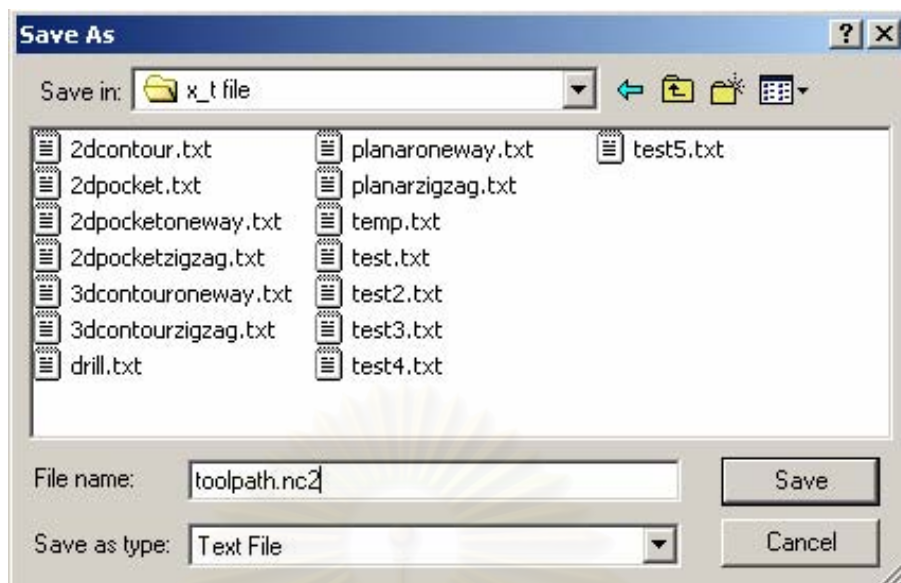
3.6.1 ปุ่มสำหรับการสร้างรหัสจี

ในรูปที่ 3.36 เป็นปุ่มที่ใช้ในการกด เพื่อทำการคำนวณหาเส้นทางการกัดให้กับแบบจำลอง ตามที่ผู้ใช้โปรแกรมได้กำหนดค่าพารามิเตอร์เอาไว้ เมื่อกดปุ่มนี้หลังจากที่ได้ค่าพารามิเตอร์สำหรับการกัดจนครบ จะมีไดอะล็อกสำหรับการบันทึกไฟล์ข้อมูลรหัสจี



รูปที่ 3.36 ปุ่มสำหรับการสร้างรหัสจี

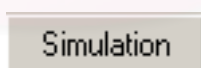
จากรูปที่ 3.37 เมื่อตั้งชื่อไฟล์ และกดปุ่มบันทึก (Save) โปรแกรมจะทำการเขียนรหัสจีตามไฟล์ที่ผู้ใช้โปรแกรมกำหนดไว้ และสามารถทำไปใช้ควบคุมเครื่องซีเอ็นซีต่อไปได้



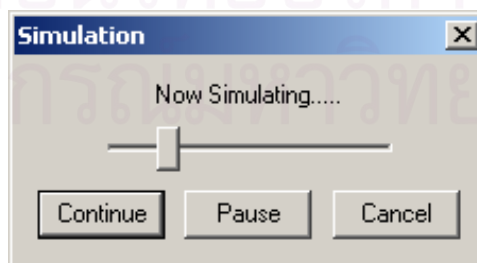
รูปที่ 3.37 ไดอะล็อกสำหรับการบันทึกไฟล์ข้อมูลรหัสจี

3.6.2 ปุ่มสำหรับการจำลองเส้นทางเดินการกัด

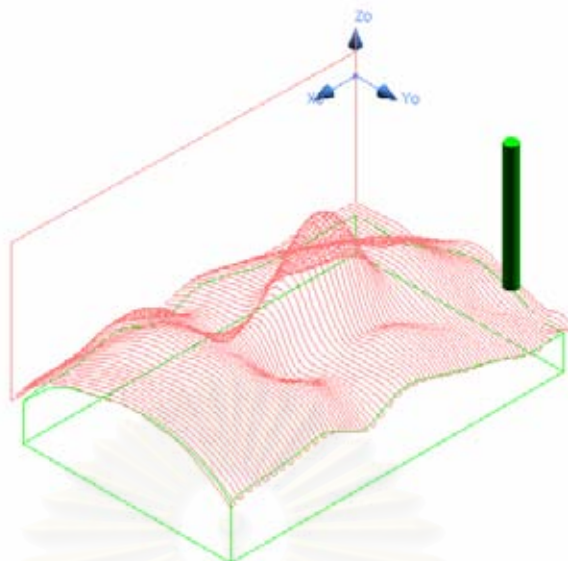
ในรูปที่ 3.38 เป็นปุ่มที่ใช้ในการกด เพื่อจำลองการกัดตามเส้นทางเดินที่คำนวณได้จากโปรแกรมในแบบภาพเคลื่อนไหว ตามที่ผู้ใช้โปรแกรมได้กำหนดค่าพารามิเตอร์เอาไว้ หลังจากที่ได้ค่าพารามิเตอร์สำหรับการกัดจนครบแล้วกดปุ่ม จะมีไดอะล็อกที่แจ้งให้ทราบว่ากำลังจำลองการกัดตามเส้นทางเดินที่คำนวณได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.39 ซึ่งจะมีปุ่มหยุด (Pause) และปุ่มแสดงต่อ (Continue) สำหรับการหยุดและแสดงภาพเคลื่อนไหว และมีแถบเลื่อนสำหรับปรับความเร็วในการจำลองการกัด รูปที่ 3.40 แสดงถึงการจำลองการกัดตามเส้นทางเดินที่คำนวณได้



รูปที่ 3.38 ปุ่มสำหรับการจำลองเส้นทางเดินการกัด



รูปที่ 3.39 ภาพแสดงไดอะล็อกที่แสดงว่าขณะนั้นมีการจำลองเส้นทางเดินการกัดอยู่



รูปที่ 3.40 ภาพแสดงการจำลองการกัดตามเส้นทางเดินที่คำนวณจากโปรแกรม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การทดสอบโปรแกรมและผลการทดสอบ

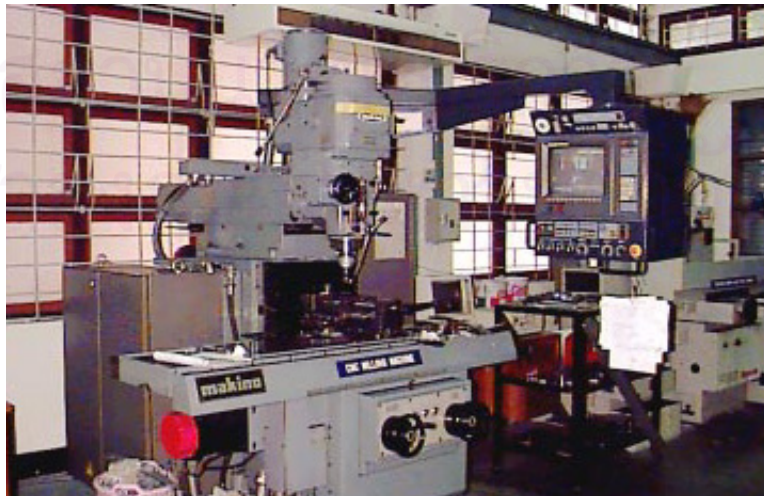
ในส่วนของการทดสอบโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้น ผู้วิจัยจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ขั้นตอนได้แก่

4.1 ขั้นตอนการใช้โปรแกรมสำหรับสร้างเส้นทางการกัดจากแบบจำลองโซลิด

ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้กำหนดแบบจำลองของชิ้นงานที่จะใช้ในการทดสอบ โดยมีรูปแบบต่างๆ ซึ่งครอบคลุมทั้งงานกัดแบบ 2 แกนครึ่ง และ 3 แกน รวมถึงงานเจาะ โดยในการกัดทดสอบชิ้นงานต่างๆ ที่ได้ออกแบบไว้เกือบทั้งหมด จำเป็นจะต้องใช้วิธีการในการกัดมากกว่า 1 วิธี เช่น การกัดรูปหน้าคนซึ่งเป็นพื้นผิวแบบเนิร์บส์ (NURBS Surface) จะต้องใช้วิธีการกัดหยาบ 3 แกน การกัดละเอียด 3 แกน และการกัดละเอียด 2 แกน การกัดรูปผิวขวิดซึ่งเกิดจากการหมุนเส้นโค้ง จะต้องใช้วิธีการกัดหยาบ 3 แกน และการกัดละเอียด 2 แกน เป็นต้น ซึ่งแบบจำลองของชิ้นงานที่ผู้วิจัยได้จัดเตรียมไว้นั้นมีความหลากหลายเพื่อที่จะให้การทดสอบโปรแกรมนั้นนั้นครอบคลุมวิธีการในการกัดมากที่สุด

4.2 ขั้นตอนการนำรหัสที่ได้ไปทำการกัดทดสอบจริง

เครื่องจักรซีเอ็นซี (CNC) ที่จะใช้ทดสอบการกัดชิ้นงานในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นเครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดเครื่องกัด (CNC Milling Machine) โดยเป็นเครื่องกัดซีเอ็นซีชนิดเพลตตั้ง (Vertical Milling Machine Center) ซึ่งมีแนวการควบคุม 3 แนวแกนคือ X, Y และ Z ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เครื่องกัดซีเอ็นซี รุ่นฟานุก โมเดล เอ็มเอ สิบห้า (FANUC Model MA 15)

ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยจะนำรหัสที่ได้จากโปรแกรมไปใช้ควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีของฟานัค โมเดล เอ็มเอ ลิบห้า เพื่อใช้กัดทดสอบชิ้นงานจริง ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการทดสอบส่วนใหญ่จะใช้ไม้เนื้อแข็งเป็นหลัก และยังมีบางชิ้นงานใช้เคมีคอลวูด (Chemical Wood) ในการกัดทดสอบ เพื่อดูผิวของชิ้นงานที่ได้จากการกัดวัสดุที่แตกต่างกัน โดยใช้โปรแกรมดีเอ็นซี (DNC) ในการส่งข้อมูลรหัสไปยังเครื่องกัดซีเอ็นซี

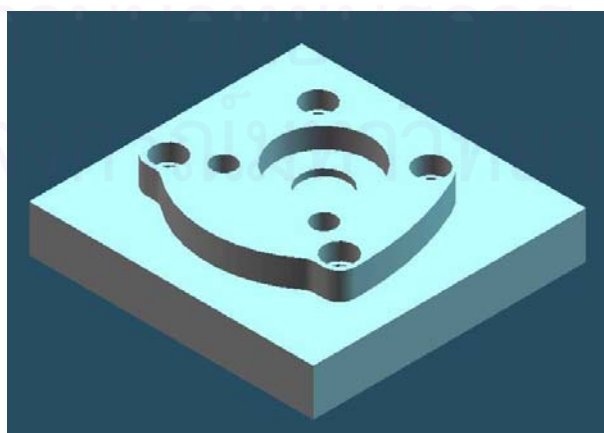
4.3 ขั้นตอนการทดสอบความถูกต้องของชิ้นงานที่กัดได้

ในขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยใช้เครื่องซีเอ็มเอ็มของบราวน์แอนด์ชาร์ป (Brown & Sharpe) ในการวัดขนาดของชิ้นงานที่กัดได้ และนำมาหาค่าผิดพลาดโดยเทียบกับขนาดของแบบจำลองโซลิดที่ได้ออกแบบไว้ในโปรแกรมแคด ในแต่ละตำแหน่งที่ทำการวัด จะวัดค่าซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

4.4 การทดสอบโปรแกรม

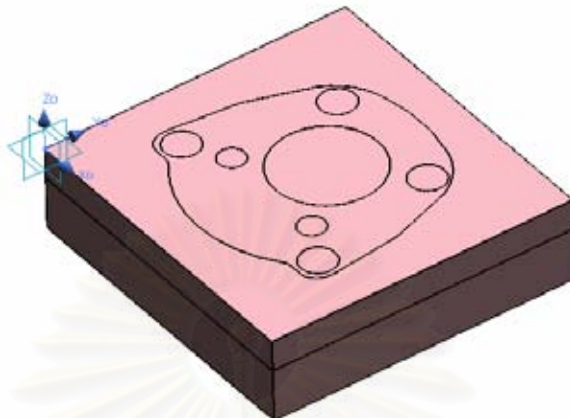
แบบชิ้นงานที่ 1

แบบชิ้นงานนี้วาดขึ้นด้วยโปรแกรมโซลิดเอดจ์ (Solid Edge) และนำมาตกแต่งใหม่ด้วยโปรแกรมซียูโซลิด (CU Solid) เพื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์บางอย่างให้เหมาะสมกับขนาดหัวกัดที่มี โดยลักษณะรูปร่างที่ผู้วิจัยสนใจนำไปใช้ในการกัดทดสอบนั้น เป็นลักษณะรูปร่างแบบ 2 มิติเท่านั้น เมื่อพิจารณาจากเส้นขอบของแบบจำลองจะเห็นได้ว่าประกอบไปด้วย เส้นส่วนโค้ง (Arc) หลายเส้นเชื่อมต่อกันเป็นวงปิด และมีการเจาะรูที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางหลายๆ ค่า ในแต่ละตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.2



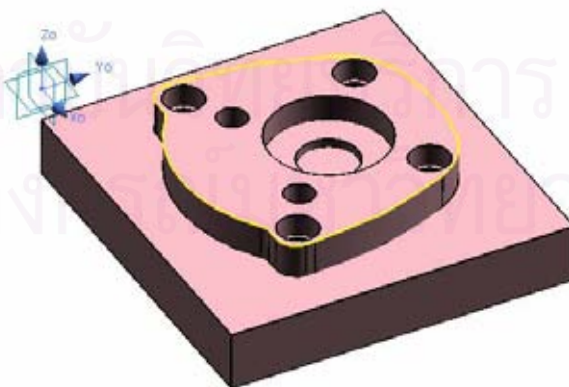
รูปที่ 4.2 แบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 1

1. ผู้วิจัยได้ใส่วัสดุสต็อก (Stock Material) เพิ่มเข้าไปในแบบจำลอง โดยมีระยะออฟเซตของวัสดุสต็อกเป็น 0 มิลลิเมตร ทำการตั้งค่าจุดกำเนิดไว้ที่ตำแหน่งมุมบนของวัสดุสต็อก ดังรูปที่ 4.3



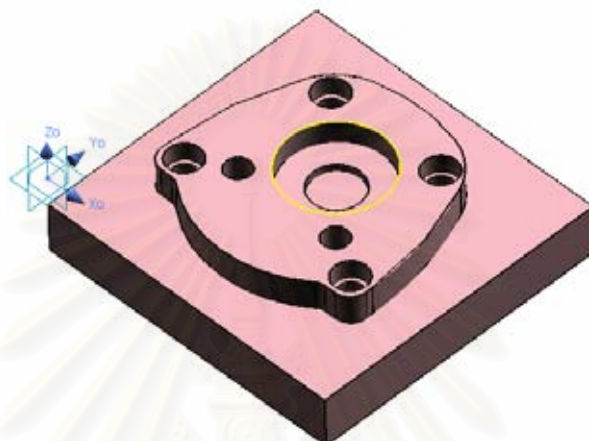
รูปที่ 4.3 การเพิ่มวัสดุสต็อกและกำหนดจุดกำเนิดแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 1

2. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับการกัดคอนทัวร์สองแกน โดยเลือกไปที่เส้นโค้งรอบนอกของแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.4 และเลือกรูปแบบการกัดเป็นแบบกัดด้านนอก (Outer) กัดลึกทั้งหมด 1 ระดับ ระดับละ 7 มิลลิเมตร เลือกระยะออฟเซตของเส้นโค้งปิดไว้ 12 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.1 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 1 ออกมา ต่อมาปรับค่าระยะออฟเซตของเส้นโค้งปิดไว้ 6 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.001 มิลลิเมตร ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ นั้นใช้เหมือนคำสั่งชุดแรก ทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 2



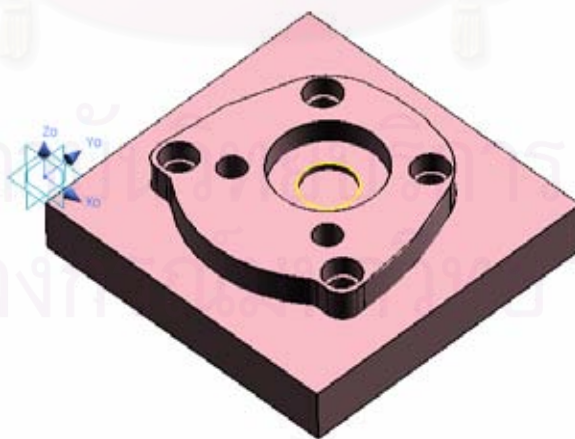
รูปที่ 4.4 การเลือกขอบรอบนอกจากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 1

3. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับการกัดคอนทัวร์สองแกน โดยเลือกไปที่เส้นโค้งวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 24 มิลลิเมตรดังรูปที่ 4.5 และเลือกรูปแบบการกัดเป็นแบบกัดด้านใน (Inner) กัดลึกทั้งหมด 1 ระดับ ระดับละ 5.3 มิลลิเมตร เลือกระยะออฟเซตของเส้นโค้งปิดไว้ 6 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.001 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 3



รูปที่ 4.5 การเลือกขอบวงกลมขนาด 24 มิลลิเมตรจากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 1

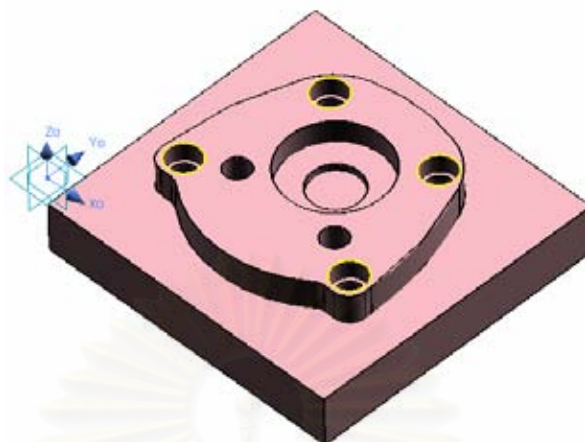
4. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับสำหรับงานเจาะ โดยเลือกไปที่เส้นโค้งวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12 มิลลิเมตรดังรูปที่ 4.6 กัดลึกทั้งหมด 1.7 มิลลิเมตร แบ่งเป็น 1 ระดับ ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 4



รูปที่ 4.6 การเลือกขอบวงกลมขนาด 12 มิลลิเมตรจากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 1

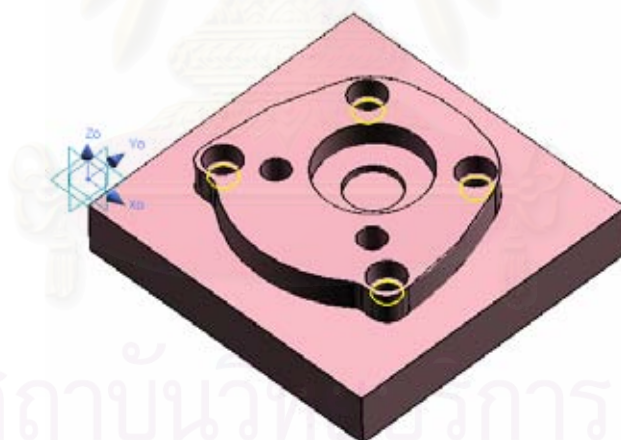
5. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับสำหรับงานเจาะ โดยเลือกไปที่เส้นโค้งวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 8 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.7 กัดลึกทั้งหมด 4.5 มิลลิเมตร แบ่งเป็น 1 ระดับ ส่วน

พารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 5



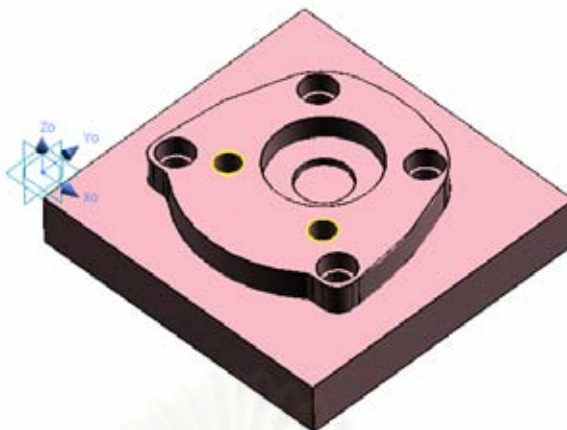
รูปที่ 4.7 การเลือกขอบวงกลมขนาด 8 มิลลิเมตรจากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 1

6. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับสำหรับงานเจาะ โดยเลือกไปที่เส้นโค้งวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.8 กัดลึกทั้งหมด 2.5 มิลลิเมตร แบ่งเป็น 1 ระดับ ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 6



รูปที่ 4.8 การเลือกขอบวงกลมขนาด 6 มิลลิเมตรจากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 1

7. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับสำหรับงานเจาะ โดยเลือกไปที่เส้นโค้งวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.9 กัดลึกทั้งหมด 7 มิลลิเมตร แบ่งเป็น 2 ระดับ ระยะยกตัวกำหนดเป็น 2 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 7



รูปที่ 4.9 การเลือกขอบวงกลมขนาด 6 มิลลิเมตรจากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 1

เมื่อดำเนินการตามขั้นตอนเหล่านี้เสร็จก็จะได้ไฟล์รหัสจีทั้งหมด 7 ไฟล์ นำไฟล์เหล่านี้ไปกัดชิ้นงานจริงด้วยเครื่องซีเอ็นซี โดยกัดตามลำดับขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น และใช้ไม้เป็นวัสดุในการทดลองและห้กัดแบบแพลตฟอร์ม โดยไฟล์ที่ 1 ถึง 4 ใช้หัวกัดขนาด 12 มิลลิเมตร ไฟล์ที่ 5 ใช้หัวกัดขนาด 8 มิลลิเมตร ไฟล์ที่ 6 ถึง 7 ใช้หัวกัดขนาด 6 มิลลิเมตร เมื่อกัดเสร็จก็จะได้ชิ้นงานจริงตามรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ชิ้นงานจริงจากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 1

เมื่อนำชิ้นงานไปวัดขนาดด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็ม โดยวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 4.11 โดยขนาดที่วัดได้แต่ละครั้งจะแสดงดังตารางที่ 4.1 ถึง 4.6

ในการวัดขนาดตำแหน่งที่ 1 ค่าเฉลี่ยคือ 23.9461 มิลลิเมตร เทียบกับแบบจำลองซึ่งมีขนาด 24 มิลลิเมตร คิดเป็นค่าความผิดพลาด 54 ไมครอน

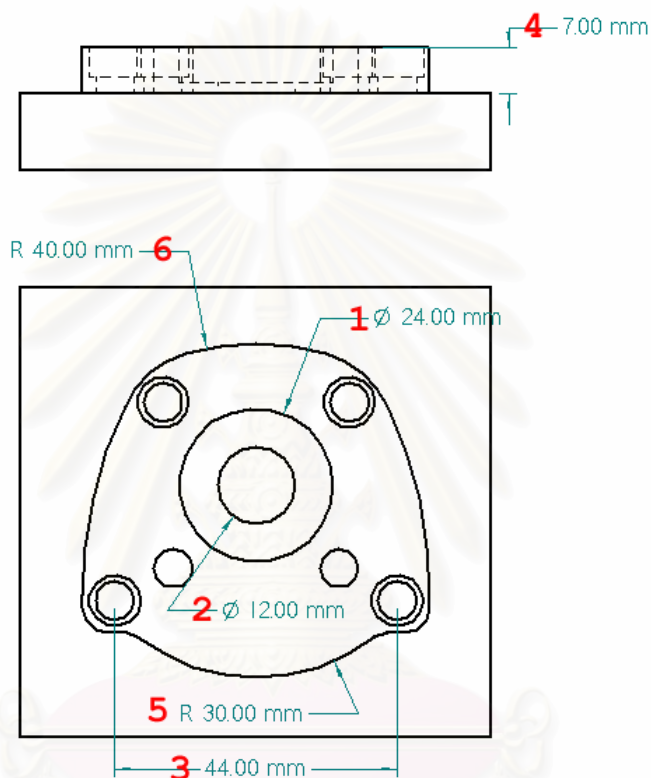
ในการวัดขนาดตำแหน่งที่ 2 ค่าเฉลี่ยคือ 11.9418 มิลลิเมตร เทียบกับแบบจำลองซึ่งมีขนาด 12 มิลลิเมตร คิดเป็นค่าความผิดพลาด 58 ไมครอน

ในการวัดขนาดตำแหน่งที่ 3 ค่าเฉลี่ยคือ 44.0290 มิลลิเมตร เทียบกับแบบจำลองซึ่งมีขนาด 44 มิลลิเมตร คิดเป็นค่าความผิดพลาด 29 ไมครอน

ในการวัดขนาดตำแหน่งที่ 4 ค่าเฉลี่ยคือ 6.9736 มิลลิเมตร เทียบกับแบบจำลอง ซึ่งมีขนาด 7 มิลลิเมตร คิดเป็นค่าความผิดพลาด 26 ไมครอน

ในการวัดขนาดตำแหน่งที่ 5 ค่าเฉลี่ยคือ 30.0373 มิลลิเมตร เทียบกับแบบจำลองซึ่งมีขนาด 30 มิลลิเมตร คิดเป็นค่าความผิดพลาด 37 ไมครอน

ในการวัดขนาดตำแหน่งที่ 6 ค่าเฉลี่ยคือ 40.0329 มิลลิเมตร เทียบกับแบบจำลองซึ่งมีขนาด 40 มิลลิเมตร คิดเป็นค่าความผิดพลาด 33 ไมครอน



รูปที่ 4.11 ตำแหน่งต่างๆ ที่จะวัดขนาดของแบบชิ้นงานที่ 1

ตารางที่ 4.1 ขนาดที่ตำแหน่ง 1 ของแบบชิ้นงานที่ 1

การวัดครั้งที่	ขนาดที่วัดได้ (mm)
1	23.9431
2	23.9539
3	23.9317
4	23.9600
5	23.9418
ค่าเฉลี่ย	23.9461
ค่าความผิดพลาด	0.0539

ตารางที่ 4.2 ขนาดที่ตำแหน่ง 2 ของแบบชิ้นงานที่ 1

การวัดครั้งที่	ขนาดที่วัดได้ (mm)
1	11.9412
2	11.9428
3	11.9411
4	11.9433
5	11.9408
ค่าเฉลี่ย	11.9418
ค่าความผิดพลาด	0.0582

ตารางที่ 4.3 ขนาดที่ตำแหน่ง 3 ของแบบชิ้นงานที่ 1

การวัดครั้งที่	ขนาดที่วัดได้ (mm)
1	44.0212
2	44.0436
3	44.0237
4	44.0117
5	44.0446
ค่าเฉลี่ย	44.0290
ค่าความผิดพลาด	0.0290

ตารางที่ 4.4 ขนาดที่ตำแหน่ง 4 ของแบบชิ้นงานที่ 1

การวัดครั้งที่	ขนาดที่วัดได้ (mm)
1	7.0154
2	6.9839
3	6.9838
4	6.9894
5	6.8953
ค่าเฉลี่ย	6.9736
ค่าความผิดพลาด	0.0264

ตารางที่ 4.5 ขนาดที่ตำแหน่ง 5 ของแบบชิ้นงานที่ 1

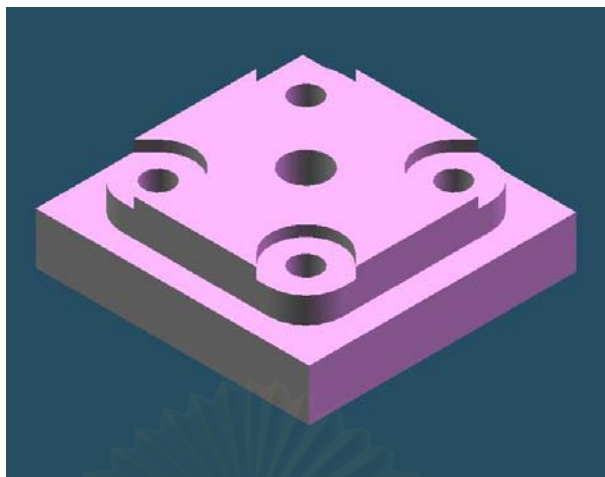
การวัดครั้งที่	ขนาดที่วัดได้ (mm)
1	60.1033
2	60.1969
3	60.0420
4	60.0720
5	59.9586
ค่าเฉลี่ย	60.0746
ค่าร้อยละ	30.0373
ค่าความผิดพลาด	0.0373

ตารางที่ 4.6 ขนาดที่ตำแหน่ง 6 ของแบบชิ้นงานที่ 1

การวัดครั้งที่	ขนาดที่วัดได้ (mm)
1	80.2657
2	79.8402
3	79.9160
4	80.4548
5	79.8522
ค่าเฉลี่ย	80.0658
ค่าร้อยละ	40.0329
ค่าความผิดพลาด	0.0329

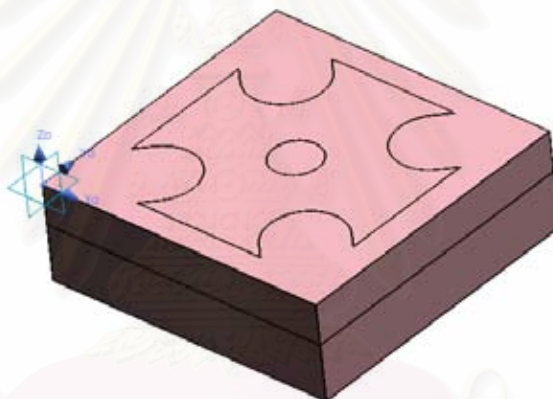
แบบชิ้นงานที่ 2

แบบชิ้นงานนี้วัดขึ้นด้วยโปรแกรมโซลิดเอดจ์ และนำมาตกแต่งใหม่ด้วยโปรแกรมซียูโซลิด เพื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์บางอย่างให้เหมาะสมกับขนาดหัวกัดที่มี โดยลักษณะรูปร่างที่ผู้วิจัยสนใจนำไปใช้ในการกัณฑ์ทดสอบนั้น เป็นลักษณะรูปร่างแบบ 2 มิติเหมือนแบบชิ้นงานที่ 1 เมื่อพิจารณาจากเส้นขอบของแบบจำลองจะเห็นได้ว่าประกอบไปด้วย เส้นตรง เส้นส่วนโค้ง ทั้งแบบโค้งเข้าและโค้งออกหลายเส้นเชื่อมต่อกันเป็นวงปิด และมีการเจาะรูที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางหลายๆ ค่าในแต่ละตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.12



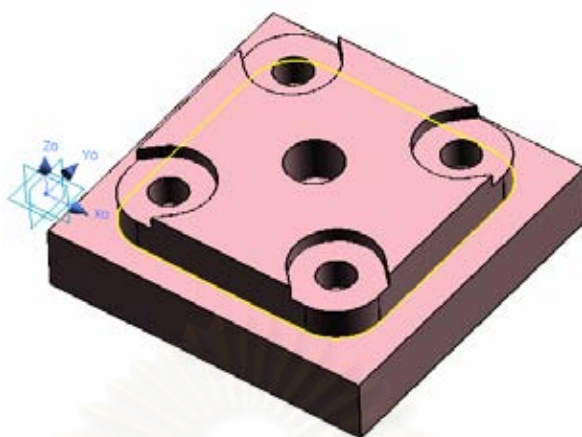
รูปที่ 4.12 แบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 2

1. ผู้วิจัยได้ใส่วัสดุสต็อก เพิ่มเข้าไปในแบบจำลอง โดยมีระยะออฟเซตของวัสดุสต็อกเป็น 0 มิลลิเมตร ทำการตั้งค่าจุดกำเนิดไว้ที่ตำแหน่งมุมบนของวัสดุสต็อก ดังรูปที่ 4.13



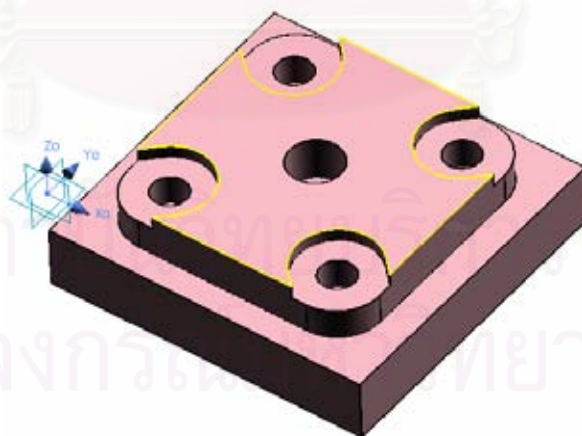
รูปที่ 4.13 การเพิ่มวัสดุสต็อกและกำหนดจุดกำเนิดแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 2

2. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับการกัดคอนทัวร์สองแกน โดยเลือกไปที่เส้นโค้งรอบนอกชั้นล่างของแบบจำลอง ดังรูปที่ 4.14 และเลือกรูปแบบการกัดเป็นแบบกัดด้านนอก (Outer) กัดลึกทั้งหมด 2 ระดับ ระดับละ 5 มิลลิเมตร เลือกระยะออฟเซตของเส้นโค้งปิดไว้ 12 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.1 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 1 ออกมา ปรับค่าระยะออฟเซตของเส้นโค้งปิดไว้ 8 มิลลิเมตร ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ นั้นใช้เหมือนคำสั่งชุดแรก ทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 2 ปรับค่าระยะออฟเซตของเส้นโค้งปิดไว้ 4 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.001 มิลลิเมตร ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ นั้นใช้เหมือนคำสั่งชุดแรก ทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 3



รูปที่ 4.14 การเลือกขอบรอบด้านล่างจากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 2

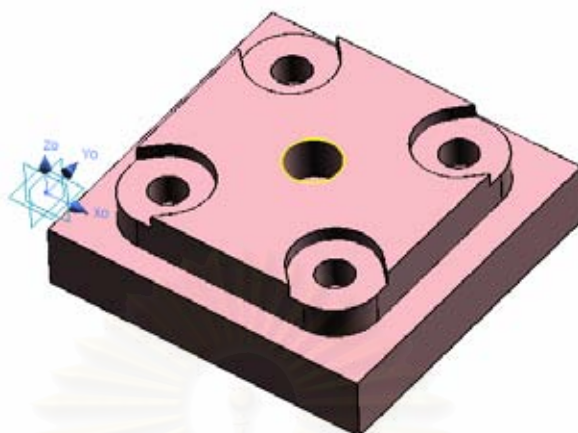
3. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับการกัดคอนทัวร์สองแกน โดยเลือกไปที่เส้นโค้งรอบนอกชั้นบนสุด ดังรูปที่ 4.15 และเลือกรูปแบบการกัดเป็นแบบกัดด้านนอก (Outer) กัดลึกทั้งหมด 1 ระดับ ระดับละ 3 มิลลิเมตร เลือกระยะออฟเซตของเส้นโค้งปิดไว้ 8 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.1 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 4 ปรับค่าระยะออฟเซตของเส้นโค้งปิดไว้ 4 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.001 มิลลิเมตร ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ นั้นใช้เหมือนคำสั่งชุดที่ 3 ทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 5



รูปที่ 4.15 การเลือกขอบรอบด้านบนบนจากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 2

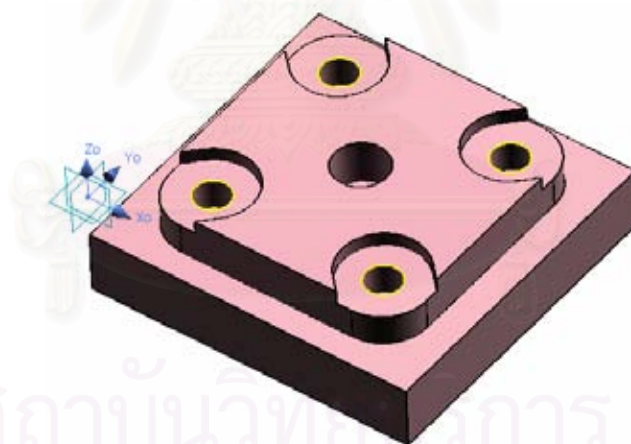
4. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับการกัดคอนทัวร์สองแกน โดยเลือกไปที่เส้นโค้งวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.16 และเลือกรูปแบบการกัดเป็นแบบกัดด้านใน (Inner) กัดลึกทั้งหมด 2 ระดับ ระดับละ 5 มิลลิเมตร เลือกระยะออฟเซตของเส้นโค้งปิดไว้ 4 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.001 มิลลิเมตร ส่วน

พารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 6



รูปที่ 4.16 การเลือกขอบวงกลมขนาด 12 มิลลิเมตร จากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 2

5. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับสำหรับงานเจาะ โดยเลือกไปที่เส้นโค้งวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 8 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.17 กัดลึกทั้งหมด 7 มิลลิเมตร แบ่งเป็น 2 ระดับ ระยะยกตัวกำหนดเป็น 2 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 7



รูปที่ 4.17 การเลือกขอบวงกลมขนาด 8 มิลลิเมตร จากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 2

เมื่อดำเนินการตามขั้นตอนเหล่านี้เสร็จก็จะได้ไฟล์รหัสจีทั้งหมด 7 ไฟล์ นำไฟล์เหล่านี้ไปกัดชิ้นงานจริงด้วยเครื่องซีเอ็นซี โดยกัดตามลำดับขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น และใช้ไม้เป็นวัสดุในการทดลองและหัวกัดแบบแพลตขนาด 8 มิลลิเมตร เมื่อกัดเสร็จก็จะได้ชิ้นงานจริงตามรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ชิ้นงานจริงจากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 2

เมื่อนำชิ้นงานไปวัดขนาดด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็ม โดยวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 4.19 โดยขนาดที่วัดได้แต่ละครั้งจะแสดงดังตารางที่ 4.7 ถึง 4.11

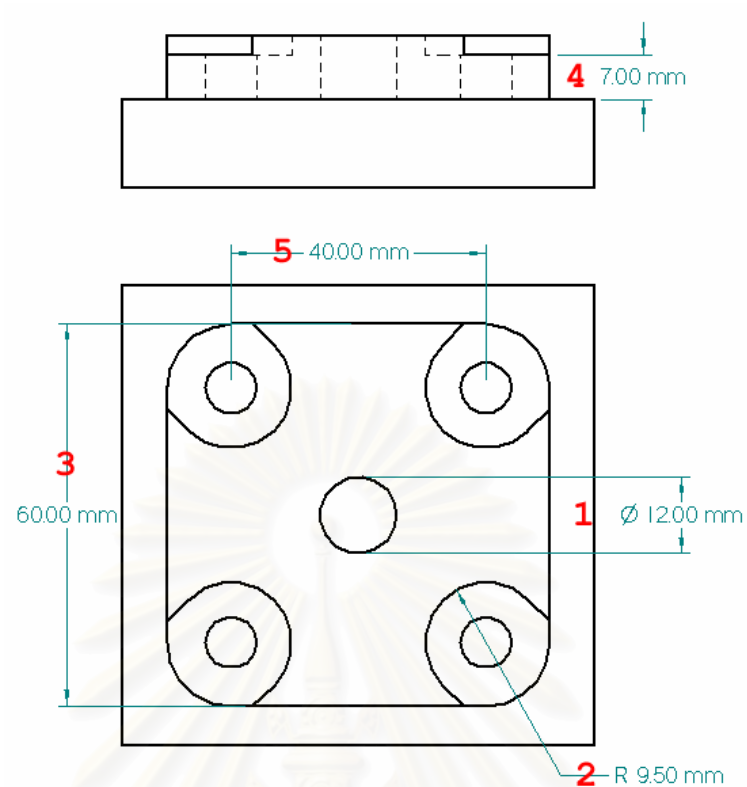
ในการวัดขนาดตำแหน่งที่ 1 ค่าเฉลี่ยคือ 11.9397 มิลลิเมตร เทียบกับแบบจำลองซึ่งมีขนาด 12 มิลลิเมตร คิดเป็นค่าความผิดพลาด 60 ไมครอน

ในการวัดขนาดตำแหน่งที่ 2 ค่าเฉลี่ยคือ 9.4606 มิลลิเมตร เทียบกับแบบจำลองซึ่งมีขนาด 12 มิลลิเมตร คิดเป็นค่าความผิดพลาด 39 ไมครอน

ในการวัดขนาดตำแหน่งที่ 3 ค่าเฉลี่ยคือ 60.0567 มิลลิเมตร เทียบกับแบบจำลองซึ่งมีขนาด 44 มิลลิเมตร คิดเป็นค่าความผิดพลาด 57 ไมครอน

ในการวัดขนาดตำแหน่งที่ 4 ค่าเฉลี่ยคือ 6.9771 มิลลิเมตร เทียบกับแบบจำลองซึ่งมีขนาด 7 มิลลิเมตร คิดเป็นค่าความผิดพลาด 23 ไมครอน

ในการวัดขนาดตำแหน่งที่ 5 ค่าเฉลี่ยคือ 39.9754 มิลลิเมตร เทียบกับแบบจำลองซึ่งมีขนาด 30 มิลลิเมตร คิดเป็นค่าความผิดพลาด 25 ไมครอน



รูปที่ 4.19 ตำแหน่งต่างๆ ที่จะวัดขนาดของแบบชิ้นงานที่ 2

ตารางที่ 4.7 ขนาดที่ตำแหน่ง 1 ของแบบชิ้นงานที่ 2

การวัดครั้งที่	ขนาดที่วัดได้ (mm)
1	11.9374
2	11.9422
3	11.9450
4	11.9298
5	11.9441
ค่าเฉลี่ย	11.9397
ค่าความผิดพลาด	0.0603

ตารางที่ 4.8 ขนาดที่ตำแหน่ง 2 ของแบบชิ้นงานที่ 2

การวัดครั้งที่	ขนาดที่วัดได้ (mm)
1	18.9282
2	18.9148
3	18.8981
4	18.9276
5	18.9377
ค่าเฉลี่ย	18.9213
ค่าร้อยละ	9.4606
ค่าความผิดพลาด	0.0394

ตารางที่ 4.9 ขนาดที่ตำแหน่ง 3 ของแบบชิ้นงานที่ 2

การวัดครั้งที่	ขนาดที่วัดได้ (mm)
1	60.0308
2	60.0384
3	60.1451
4	60.0317
5	60.0373
ค่าเฉลี่ย	60.0567
ค่าความผิดพลาด	0.0567

ตารางที่ 4.10 ขนาดที่ตำแหน่ง 4 ของแบบชิ้นงานที่ 2

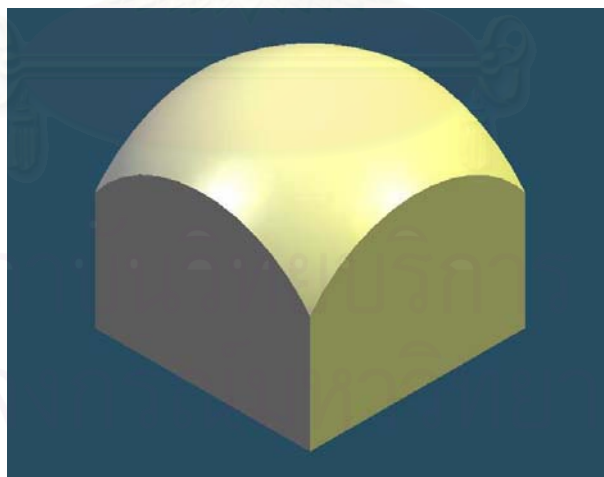
การวัดครั้งที่	ขนาดที่วัดได้ (mm)
1	6.9651
2	6.9801
3	7.0225
4	6.9519
5	6.9659
ค่าเฉลี่ย	6.9771
ค่าความผิดพลาด	0.0229

ตารางที่ 4.11 ขนาดที่ตำแหน่ง 5 ของแบบชิ้นงานที่ 2

การวัดครั้งที่	ขนาดที่วัดได้ (mm)
1	39.9697
2	39.9719
3	39.9823
4	39.9716
5	39.9816
ค่าเฉลี่ย	39.9754
ค่าความผิดพลาด	0.0246

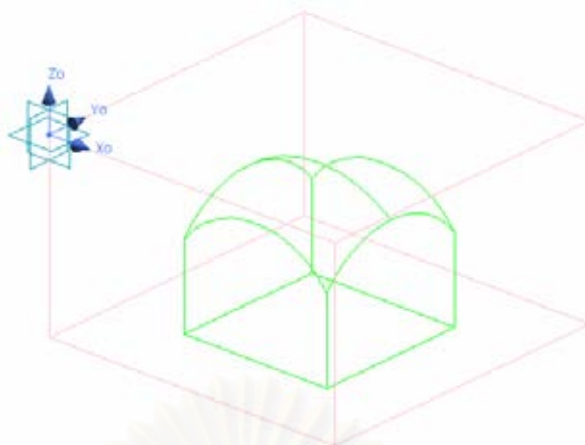
แบบชิ้นงานที่ 3

แบบชิ้นงานนี้วาดขึ้นด้วยโปรแกรมโซลิดเอดจ์ โดยสร้างก้อนโซลิดรูปทรงสี่เหลี่ยมขึ้นมาก่อน จากนั้นใช้คำสั่งในการหมุนส่วนโค้งเพื่อตัด (Revolution Cutout) โดยเลือกใช้ส่วนโค้งของวงกลมและหมุนรอบแกน Z ในการตัด รูปแบบจำลองที่ได้ จึงมีลักษณะพื้นผิวเป็นรูปส่วนของทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 4.20



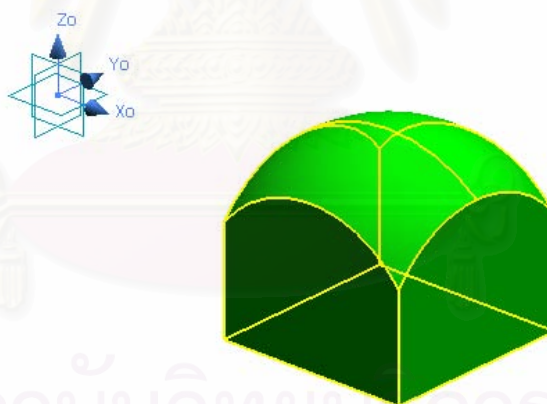
รูปที่ 4.20 แบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 3

1. ผู้วิจัยได้ใส่วัสดุสติก เพิ่มเข้าไปในแบบจำลอง โดยมีระยะออฟเซตของวัสดุสติกทางแกน x, y และ z เป็น 25, 25 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทำการตั้งค่าจุดกำเนิดไว้ที่ตำแหน่งมุมบนของวัสดุสติก ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 การเพิ่มวัสดุตัดอกและกำหนดจุดกำเนิดแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 3

2. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับการกัดหยาบ 3 แกน โดยเลือกไปที่ลำตัว (Body) ของแบบจำลอง ดังรูปที่ 4.22 เลือกรูปแบบการกัดเป็นแบบทิศทางเดียว (One-Way) กัดลึกทั้งหมด 5 ระดับ ระดับละ 9 มิลลิเมตร เลือกระยะออฟเซตของลำตัวไว้ 6 มิลลิเมตร กำหนดระยะห่างของเส้นทางเดินการกัด (Step Over) เท่ากับ 6 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 1



รูปที่ 4.22 การเลือกลำตัว จากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 3

3. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับการกัดคอนทัวร์สามแกน (3D Contour) โดยเลือกไปที่หน้า (Face) ของแบบจำลอง (ในที่นี้คือพื้นผิวที่เป็นส่วนของทรงกลม) ดังรูปที่ 4.23 เลือกรูปแบบการกัดเป็นแบบไปกลับ (Zig-Zag) เลือกระยะออฟเซตของหน้าไว้ 2.5 มิลลิเมตร กำหนดระยะห่างของเส้นทางเดินการกัด (Step Over) เท่ากับ 1 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.1 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 2



รูปที่ 4.23 การเลือกหน้า จากแบบจำลองโซลิดขั้นที่ 3

เมื่อดำเนินการตามขั้นตอนเหล่านี้เสร็จก็จะได้ไฟล์รหัสทั้งหมด 2 ไฟล์ นำไฟล์เหล่านี้ไปกัดขึ้นงานจริงด้วยเครื่องซีเอ็นซี โดยกัดตามลำดับขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น และใช้ไม้เป็นวัสดุในการทดลอง ในการกัดทดสอบครั้งนี้จะให้หัวกัด 2 หัว คือหัวกัดแบบแพลตขนาด 8 มิลลิเมตร สำหรับไฟล์แรก และหัวกัดแบบบอลขนาด 5 มิลลิเมตร สำหรับไฟล์ที่สอง เมื่อกัดเสร็จก็จะได้ชิ้นงานจริงตามรูปที่ 4.24

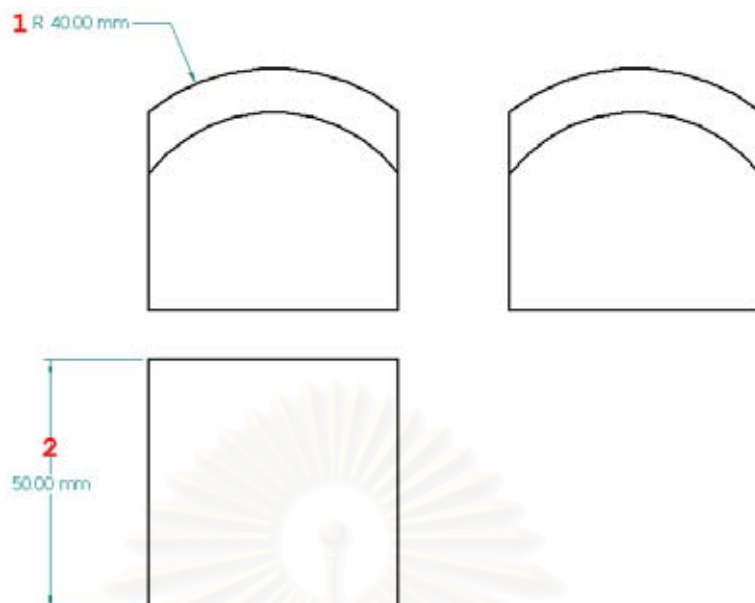


รูปที่ 4.24 ชิ้นงานจริงจากแบบจำลองโซลิดขั้นที่ 3

เมื่อนำชิ้นงานไปวัดขนาดด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็ม โดยวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 4.25 โดยขนาดที่วัดได้แต่ละครั้งจะแสดงดังตารางที่ 4.12 ถึง 4.13

ในการวัดขนาดตำแหน่งที่ 1 ค่าเฉลี่ยคือ 39.8892 มิลลิเมตร เทียบกับแบบจำลองซึ่งมีขนาด 40 มิลลิเมตร คิดเป็นค่าความผิดพลาด 111 ไมครอน

ในการวัดขนาดตำแหน่งที่ 2 ค่าเฉลี่ยคือ 50.0552 มิลลิเมตร เทียบกับแบบจำลองซึ่งมีขนาด 50 มิลลิเมตร คิดเป็นค่าความผิดพลาด 55 ไมครอน



รูปที่ 4.25 ตำแหน่งต่างๆ ที่จะวัดขนาดของแบบชิ้นงานที่ 3

ตารางที่ 4.12 ขนาดที่ตำแหน่ง 1 ของแบบชิ้นงานที่ 3

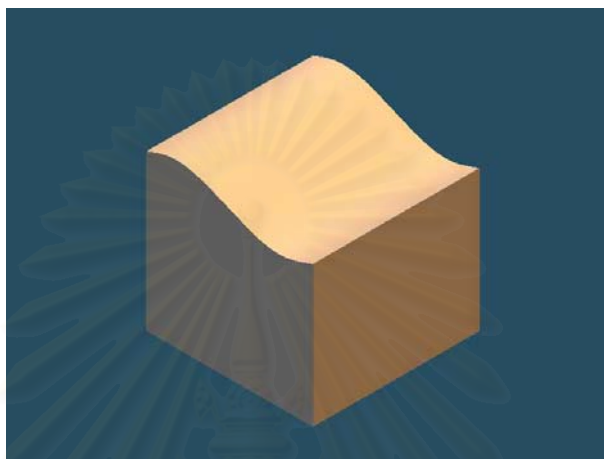
การวัดครั้งที่	ขนาดที่วัดได้ (mm)
1	79.7030
2	79.7520
3	79.8115
4	79.7520
5	79.8734
ค่าเฉลี่ย	79.7784
ค่าร้อยละ	39.8892
ค่าความผิดพลาด	0.1108

ตารางที่ 4.13 ขนาดที่ตำแหน่ง 2 ของแบบชิ้นงานที่ 3

การวัดครั้งที่	ขนาดที่วัดได้ (mm)
1	50.0344
2	50.0569
3	50.0404
4	50.0635
5	50.0809
ค่าเฉลี่ย	50.0552
ค่าความผิดพลาด	0.0552

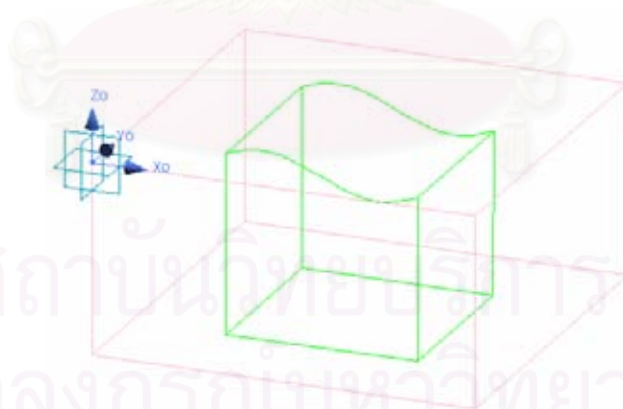
แบบชิ้นงานที่ 4

แบบชิ้นงานนี้วาดขึ้นด้วยโปรแกรมโซลิดเอดจ์ โดยสร้างก้อนโซลิด (Solid) รูปทรงสี่เหลี่ยมขึ้นมา จากนั้นใช้คำสั่งในการยึดส่วนโค้งเพื่อตัด (Protrusion Cutout) โดยเลือกใช้เส้นโค้งสไปลน์ (Spline Curve) ในการตัด รูปแบบจำลองที่ได้ จึงมีลักษณะพื้นผิวเป็นรูปลอนคลื่น ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 แบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 4

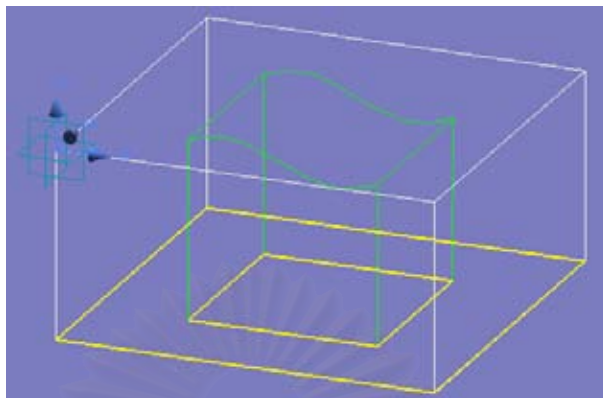
1. ผู้วิจัยได้ใส่วัสดุสต็อก เพิ่มเข้าไปในแบบจำลอง โดยมีระยะออฟเซตของวัสดุสต็อกทางแกน x , y และ z เป็น 25, 25 และ 0 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทำการตั้งค่าจุดกำเนิดไว้ที่ตำแหน่งมุมบนของวัสดุสต็อก ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 การเพิ่มวัสดุสต็อกและกำหนดจุดกำเนิดแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 4

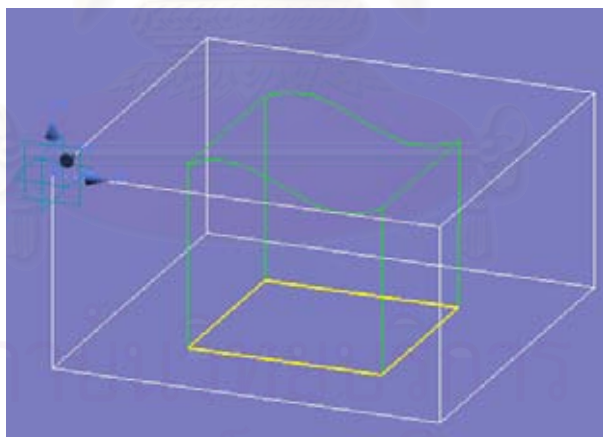
2. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับการกัดหยาบสองแกน โดยเลือกไปที่เส้นตรงที่เป็นวงปิดนอก (ซึ่งเป็นองค์ประกอบของวัสดุสต็อก) กับเส้นตรงที่เป็นวงปิดใน (ซึ่งเป็นองค์ประกอบของแบบจำลองที่เราออกแบบไว้) ดังรูปที่ 4.28 เพื่อที่จะกัดเอาวัสดุภายในบริเวณขอบเขตทั้งสองนี้ออกไป เลือกรูปแบบการกัดเป็นแบบไปกลับ (Zig-Zag) กัดลึกทั้งหมด 2 ระดับ ระดับละ 5 มิลลิเมตร เลือกระยะออฟเซตของเส้นวงปิดทั้งสองไว้ 4 มิลลิเมตร กำหนดระยะห่างของเส้นทาง

เดินการกัด (Step Over) เท่ากับ 4 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 1



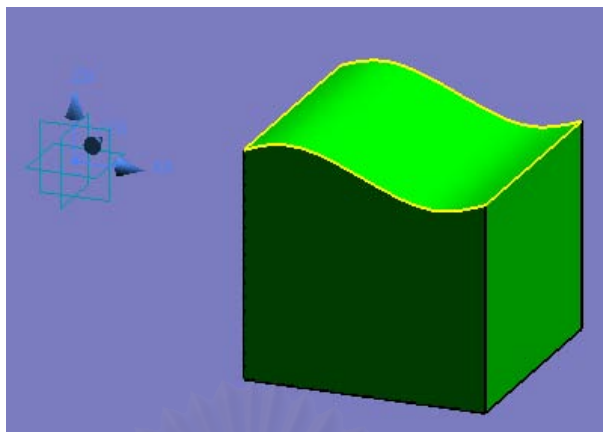
รูปที่ 4.28 การเลือกขอบวงปิด 2 วง จากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 4

3. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับการกัดคอนทัวร์สองแกน โดยเลือกไปที่เส้นตรงที่เป็นวงปิดในดังรูปที่ 4.29 และเลือกรูปแบบการกัดเป็นแบบกัดด้านนอก (Outer) กัดลึกทั้งหมด 2 ระดับ ระดับละ 5 มิลลิเมตร เลือกระยะออฟเซตของเส้นโค้งปิดไว้ 4 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.01 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 2



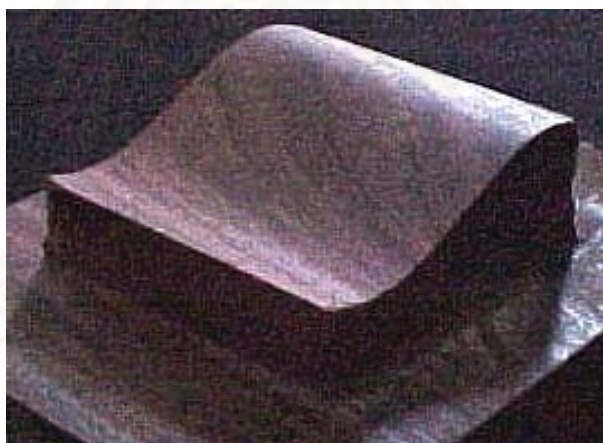
รูปที่ 4.29 การเลือกขอบวงปิด 1 วงรูปสี่เหลี่ยม จากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 4

4. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับการกัดแบบคอนทัวร์สามแกน (3D Contour) โดยเลือกไปที่หน้า (Face) ของแบบจำลอง (ในที่นี้คือพื้นผิวที่เป็นรูปลอนคลื่น) ดังรูปที่ 4.30 เลือกรูปแบบการกัดเป็นแบบไปกลับ (Zig-Zag) เลือกระยะออฟเซตของหน้าไว้ 2.5 มิลลิเมตร กำหนดระยะห่างของเส้นทางเดินการกัด (Step Over) เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.01 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 3



รูปที่ 4.30 การเลือกหน้า จากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 4

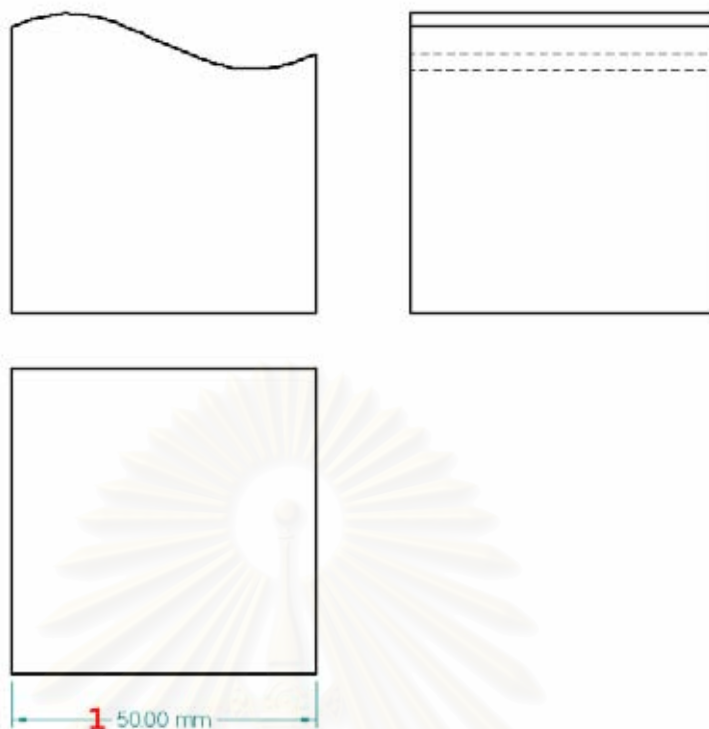
เมื่อดำเนินการตามขั้นตอนเหล่านี้เสร็จก็จะได้ไฟล์รหัสทั้งหมด 3 ไฟล์ นำไฟล์เหล่านี้ไปกัดชิ้นงานจริงด้วยเครื่องซีเอ็นซี โดยกัดตามลำดับขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น และใช้ไม้เป็นวัสดุในการทดลอง ในการกัดทดสอบครั้งนี้จะให้หัวกัด 2 หัว คือหัวกัดแบบแพลตขนาด 8 มิลลิเมตร สำหรับไฟล์ที่ 1 ถึง 2 และหัวกัดแบบบอลขนาด 5 มิลลิเมตร สำหรับไฟล์ที่ 3 เมื่อกัดเสร็จก็จะได้ชิ้นงานจริงตามรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ชิ้นงานจริงจากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 4

เมื่อนำชิ้นงานไปวัดขนาดด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็ม โดยวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 4.32 โดยขนาดที่วัดได้แต่ละครั้งจะแสดงดังตารางที่ 4.14

ในการวัดขนาดตำแหน่งที่ 1 ค่าเฉลี่ยคือ 50.0541 มิลลิเมตร เทียบกับแบบจำลองซึ่งมีขนาด 50 มิลลิเมตร คิดเป็นค่าความผิดพลาด 54 ไมครอน



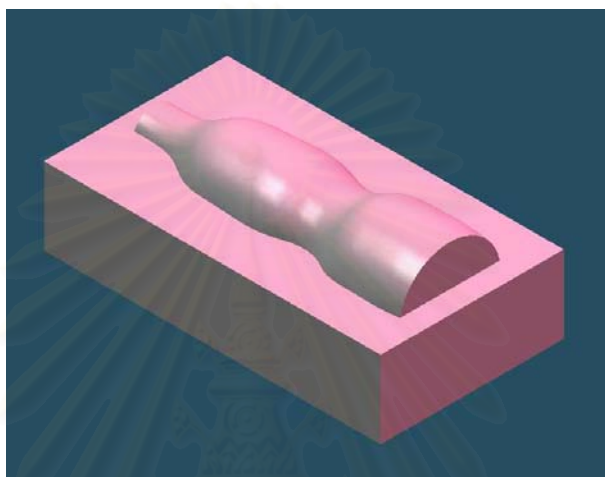
รูปที่ 4.32 ตำแหน่งต่างๆ ที่จะวัดขนาดของแบบชิ้นงานที่ 4

ตารางที่ 4.14 ขนาดที่ตำแหน่ง 1 ของแบบชิ้นงานที่ 4

การวัดครั้งที่	ขนาดที่วัดได้ (mm)
1	50.0170
2	50.1192
3	50.0451
4	50.0280
5	50.0611
ค่าเฉลี่ย	50.0541
ค่าความผิดพลาด	0.0541

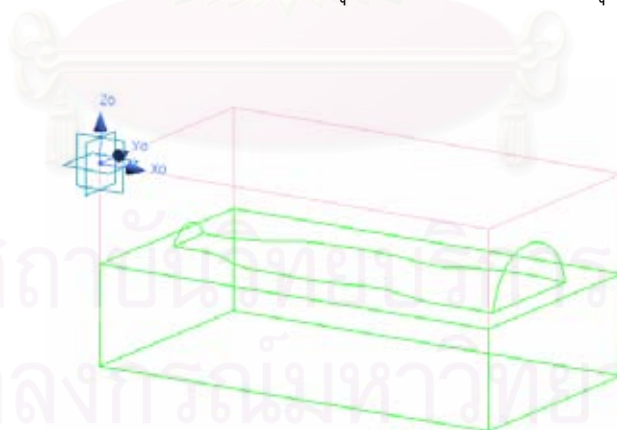
แบบชิ้นงานที่ 5

แบบชิ้นงานนี้วาดขึ้นด้วยโปรแกรมโซลิดเอดจ์ โดยสร้างก้อนโซลิดรูปทรงสี่เหลี่ยมขึ้นมาก่อน จากนั้นใช้คำสั่งในการหมุนเส้นโค้ง (Revolution) เพื่อสร้างโซลิด โดยเลือกใช้เส้นโค้งที่มีหลายๆ ส่วน (Multi Segment Curve) ประกอบกัน และหมุนรอบแกน X แล้วนำไปรวม (Unite) กับรูปทรงสี่เหลี่ยมก้อนแรก รูปแบบจำลองที่ได้ จึงมีลักษณะพื้นผิวที่ต้องการเป็นรูปขวดน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 แบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 5

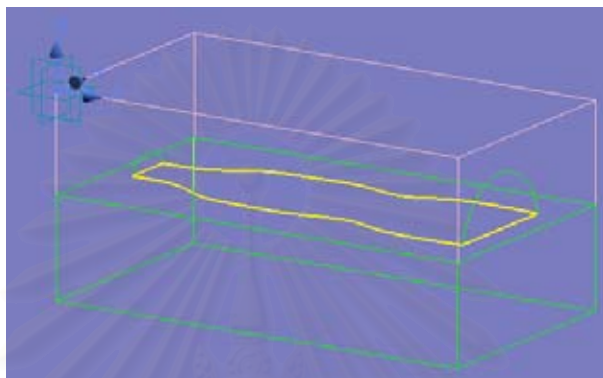
1. ผู้วิจัยได้ใส่วัสดุสต็อก เพิ่มเข้าไปในแบบจำลอง โดยมีระยะออฟเซตของวัสดุสต็อกเป็น 0 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทำการตั้งค่าจุดกำเนิดไว้ที่ตำแหน่งมุมบนของวัสดุสต็อก ดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 การเพิ่มวัสดุสต็อกและกำหนดจุดกำเนิดแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 5

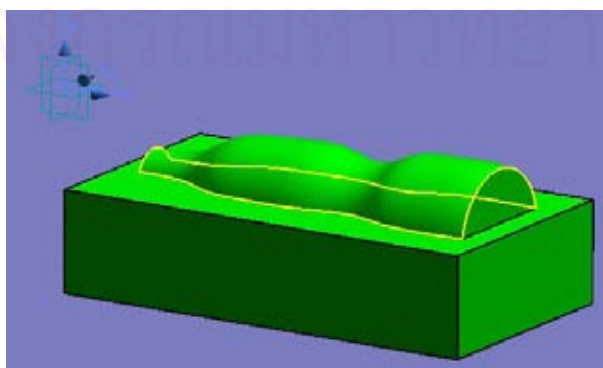
2. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับการกัดคอนทัวร์สองแกน โดยเลือกไปที่เส้นโค้งปิดที่เป็นรูปขวดน้ำ ดังรูปที่ 4.35 และเลือกรูปแบบการกัดเป็นแบบกัดด้านนอก (Outer) กัดลึกทั้งหมด 3 ระดับ ระดับละ 7 มิลลิเมตร เลือกระยะออฟเซตของเส้นโค้งปิดไว้ 18 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.1 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น

ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 1 ออกมา ปรับค่าระยะออฟเซตของเส้นโค้งปิดไว้ 12 มิลลิเมตร ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ นั้นใช้เหมือนคำสั่งชุดแรก ทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 2 ปรับค่าระยะออฟเซตของเส้นโค้งปิดไว้ 6 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.001 มิลลิเมตร ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ นั้นใช้เหมือนคำสั่งชุดแรก ทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 3



รูปที่ 4.35 การเลือกขอบวงปิด 1 วง จากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 5

3. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับการกัดคอนทัวร์สามแกน (3D Contour) โดยเลือกไปที่หน้า (Face) ของแบบจำลอง ดังรูปที่ 4.36 (ในที่นี้คือพื้นผิวที่เป็นรูปขวด) เลือกรูปแบบการกัดเป็นแบบไปกลับ (Zig-Zag) เลือกระยะออฟเซตของหน้าไว้ 5 มิลลิเมตร กำหนดระยะห่างของเส้นทางเดินการกัด (Step Over) เท่ากับ 1 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.1 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 4 ปรับค่าระยะออฟเซตของหน้าไว้ 2.5 มิลลิเมตร กำหนดระยะห่างของเส้นทางเดินการกัด (Step Over) เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.01 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 5



รูปที่ 4.36 การเลือกหน้าจากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 5

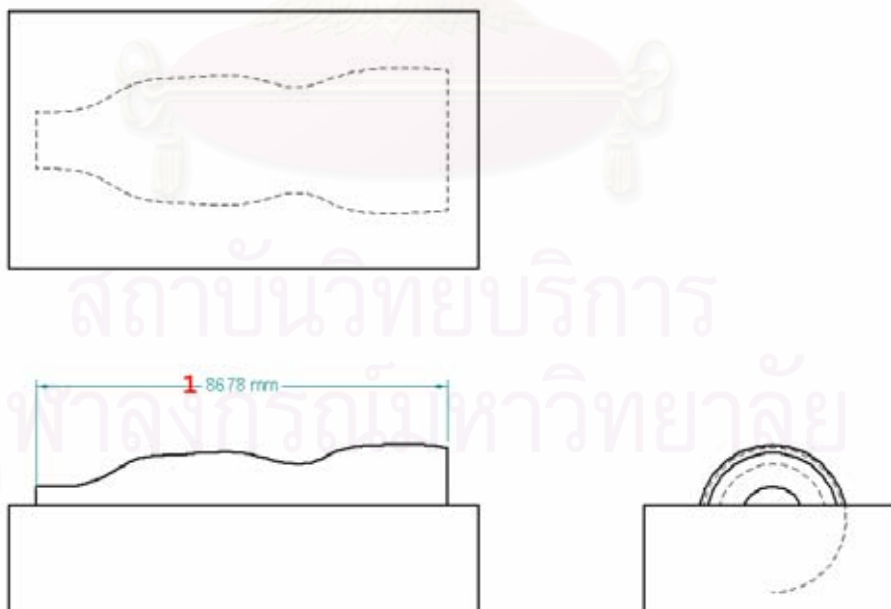
เมื่อดำเนินการตามขั้นตอนเหล่านี้เสร็จก็จะได้ไฟล์รหัสทั้งหมด 5 ไฟล์ นำไฟล์เหล่านี้ไปกัดชิ้นงานจริงด้วยเครื่องซีเอ็นซี โดยกัดตามลำดับขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น และใช้ไม้เป็นวัสดุในการทดลอง ในการกัดทดสอบครั้งนี้จะให้หัวกัด 2 หัว คือหัวกัดแบบแพลตขนาด 12 มิลลิเมตร สำหรับไฟล์ที่ 1 ถึง 3 และหัวกัดแบบบอลขนาด 5 มิลลิเมตร สำหรับไฟล์ที่ 4 และ 5 เมื่อกัดเสร็จก็จะได้ชิ้นงานจริงตามรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 ชิ้นงานจริงจากแบบจำลองโซลิดซ์ที่ 5

เมื่อนำชิ้นงานไปวัดขนาดด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็ม โดยวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 4.38 โดยขนาดที่วัดได้แต่ละครั้งจะแสดงดังตารางที่ 4.15

ในการวัดขนาดตำแหน่งที่ 1 ค่าเฉลี่ยคือ 86.8374 มิลลิเมตร เทียบกับแบบจำลองซึ่งมีขนาด 86.78 มิลลิเมตร คิดเป็นค่าความผิดพลาด 57 ไมครอน



รูปที่ 4.38 ตำแหน่งต่างๆ ที่จะวัดขนาดของแบบชิ้นงานที่ 5

ตารางที่ 4.15 ขนาดที่ตำแหน่ง 1 ของแบบชิ้นงานที่ 5

การวัดครั้งที่	ขนาดที่วัดได้ (mm)
1	86.8128
2	86.8355
3	86.8276
4	86.8877
5	86.8235
ค่าเฉลี่ย	86.8374
ค่าความผิดพลาด	0.0574

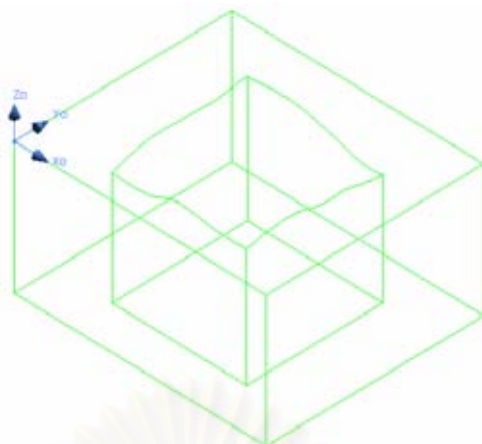
แบบชิ้นงานที่ 6

แบบชิ้นงานนี้วาดขึ้นด้วยโปรแกรมโซลิดเอดจ์ โดยสร้างก้อนโซลิดรูปทรงสี่เหลี่ยมขึ้นมาก่อน จากนั้นสร้างพื้นผิวจากที่ขรุขระขึ้นมา แล้วนำไปลบออกจากก้อนโซลิดรูปทรงสี่เหลี่ยมรูปแบบจำลองที่ได้จึงมีลักษณะพื้นผิวที่ต้องการเป็นพื้นผิวรูปแบบอิสระ (Free Form Surface) ดังแสดงในรูปที่ 4.39



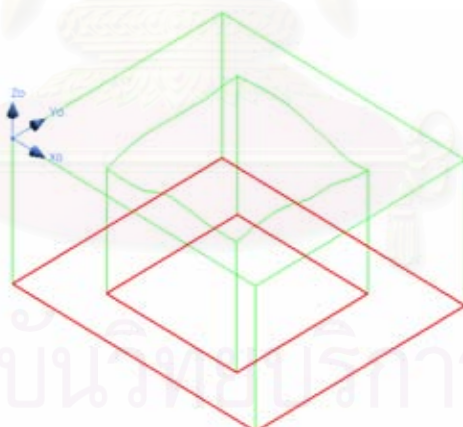
รูปที่ 4.39 แบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 6

1. ผู้วิจัยได้ใส่วัสดุสต็อกเพิ่มเข้าไปในแบบจำลอง โดยมีระยะออฟเซตของวัสดุสต็อกทางแกน x , y และ z เป็น 15, 15 และ 0 มิลลิเมตร ตามลำดับทำการตั้งค่าจุดกำเนิดไว้ที่ตำแหน่งมุมบนของวัสดุสต็อก ดังรูปที่ 4.40



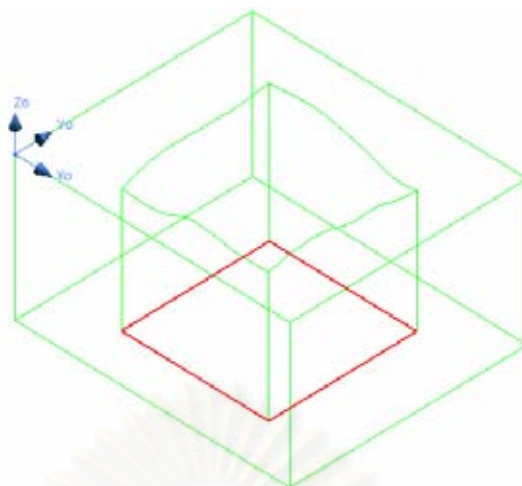
รูปที่ 4.40 การเพิ่มวัสดุสต็อกและกำหนดจุดกำเนิดแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 6

2. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับการกัดหยาบ 2 แกน โดยเลือกไปที่เส้นตรงที่เป็นวงปิดนอก (ซึ่งเป็นองค์ประกอบของวัสดุสต็อก) กับเส้นตรงที่เป็นวงปิดใน (ซึ่งเป็นองค์ประกอบของแบบจำลองที่เราออกแบบไว้) ดังรูปที่ 4.41 เพื่อที่จะกัดเอาวัสดุภายในบริเวณขอบเขตทั้งสองนี้ ออกไป เลือกรูปแบบการกัดเป็นแบบไปกลับ (Zig-Zag) กัดลึกทั้งหมด 4 ระดับ ระดับละ 7 มิลลิเมตร เลือกระยะออฟเซตของเส้นวงปิดทั้งสองไว้ 6 มิลลิเมตร กำหนดระยะห่างของเส้นทางเดินการกัด (Step Over) เท่ากับ 6 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 1



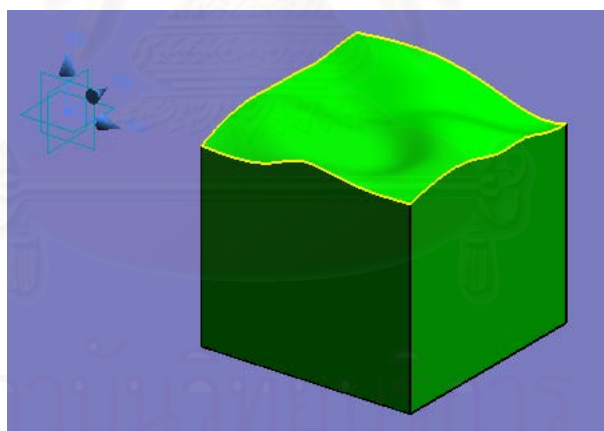
รูปที่ 4.41 การเลือกขอบวงปิด 2 วงด้านล่าง จากแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 6

3. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับการกัดคอนทัวร์สองแกน โดยเลือกไปที่เส้นตรงปิดรูปสี่เหลี่ยมด้านล่างสุดดังรูปที่ 4.42 และเลือกรูปแบบการกัดเป็นแบบกัดด้านนอก (Outer) กัดลึกทั้งหมด 4 ระดับ ระดับละ 7 มิลลิเมตร เลือกระยะออฟเซตของเส้นโค้งปิดไว้ 6 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.1 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 2



รูปที่ 4.42 การเลือกขอบวงปิด 1 วงด้านล่างจากแบบจำลองโซลิดขั้นที่ 6

4. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับการกัดคอนทัวร์สามแกน (3D Contour) โดยเลือกไปที่หน้า (Face) ของแบบจำลอง (ในที่นี้คือพื้นผิวขรุขระด้านบน) ดังรูปที่ 4.43 เลือกรูปแบบการกัดเป็นแบบไปกลับ (Zig-Zag) เลือกระยะออฟเซตของหน้าไว้ 2.5 มิลลิเมตร กำหนดระยะห่างของเส้นทางเดินการกัด (Step Over) เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.01 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 3



รูปที่ 4.43 การเลือกหน้าจากแบบจำลองโซลิดขั้นที่ 6

เมื่อดำเนินการตามขั้นตอนเหล่านี้เสร็จก็จะได้ไฟล์รหัสจีทั้งหมด 3 ไฟล์ นำไฟล์เหล่านี้ไปกัดชิ้นงานจริงด้วยเครื่องซีเอ็นซี โดยกัดตามลำดับขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น และใช้ไม้เป็นวัสดุในการทดลอง ในการกัดทดสอบครั้งนี้จะให้หัวกัด 2 หัว คือหัวกัดแบบแพลตขนาด 12 มิลลิเมตร สำหรับไฟล์ที่ 1 และ 2 และหัวกัดแบบบอลขนาด 5 มิลลิเมตร สำหรับไฟล์ที่ 3 เมื่อกัดเสร็จก็จะได้ชิ้นงานจริงตามรูป 4.44



รูปที่ 4.44 ชิ้นงานจริงจากแบบจำลองโซลิดชินที่ 6

เมื่อนำชิ้นงานไปวัดขนาดด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็ม โดยวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 4.45 โดยขนาดที่วัดได้แต่ละครั้งจะแสดงดังตารางที่ 4.16

ในการวัดขนาดตำแหน่งที่ 1 ค่าเฉลี่ยคือ 50.0664 มิลลิเมตร เทียบกับแบบจำลองซึ่งมีขนาด 50 มิลลิเมตร คิดเป็นค่าความผิดพลาด 66 ไมครอน



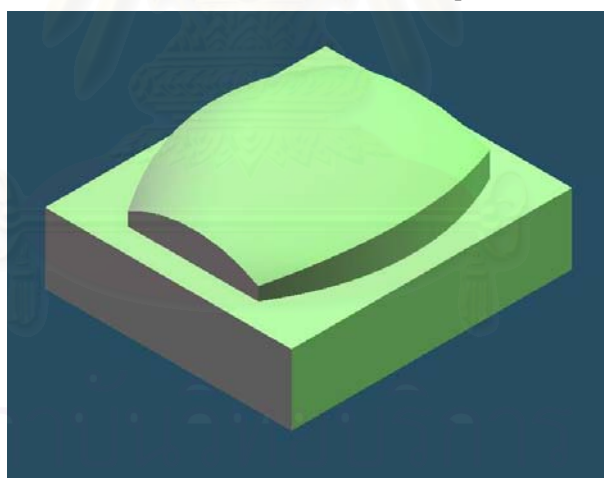
รูปที่ 4.45 ตำแหน่งต่างๆ ที่จะวัดขนาดของแบบชิ้นงานที่ 6

ตารางที่ 4.16 ขนาดที่ตำแหน่ง 1 ของแบบชิ้นงานที่ 6

การวัดครั้งที่	ขนาดที่วัดได้ (mm)
1	50.0100
2	50.0909
3	50.1003
4	50.0126
5	50.1184
ค่าเฉลี่ย	50.0664
ค่าความผิดพลาด	0.0664

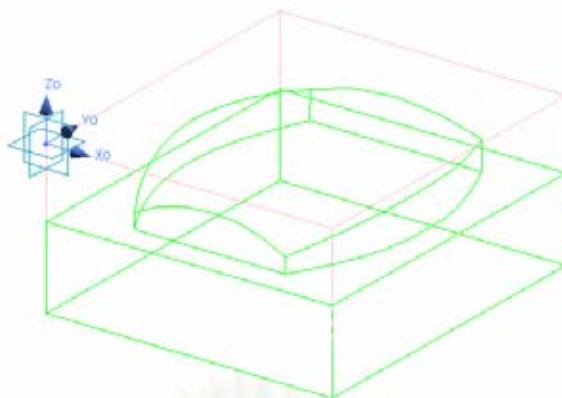
แบบชิ้นงานที่ 7

แบบชิ้นงานนี้วาดขึ้นด้วยโปรแกรมโซลิดเอดจ์ โดยสร้างก้อนโซลิดรูปทรงสี่เหลี่ยมขึ้นมาก่อน จากนั้นใช้คำสั่งในการสร้างแบบลอฟท์ (Loft) เพื่อสร้างโซลิด โดยเลือกใช้ระนาบอ้างอิง 4 ระนาบในการกำหนดส่วนโค้งปิดขึ้นมา 4 วง แล้วนำไปรวม (Unite) กับรูปทรงสี่เหลี่ยมก่อนแรก รูปแบบจำลองที่ได้ จึงมีลักษณะพื้นผิวแบบลอฟท์ ดังแสดงในรูปที่ 4.46



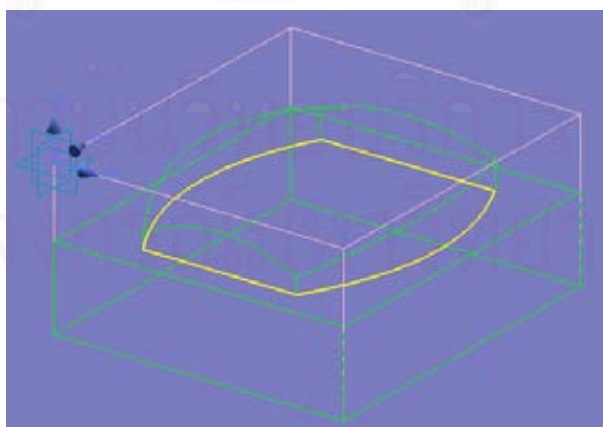
รูปที่ 4.46 แบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 7

1. ผู้วิจัยได้ใส่วัสดุสต็อก เพิ่มเข้าไปในแบบจำลอง โดยมีระยะออฟเซตของวัสดุสต็อกเป็น 0 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทำการตั้งค่าจุดกำเนิดไว้ที่ตำแหน่งมุมบนของวัสดุสต็อก ดังรูปที่ 4.47



รูปที่ 4.47 การเพิ่มวัสดุสุตติกและกำหนดจุดกำเนิดแบบจำลองโซลิดขึ้นที่ 7

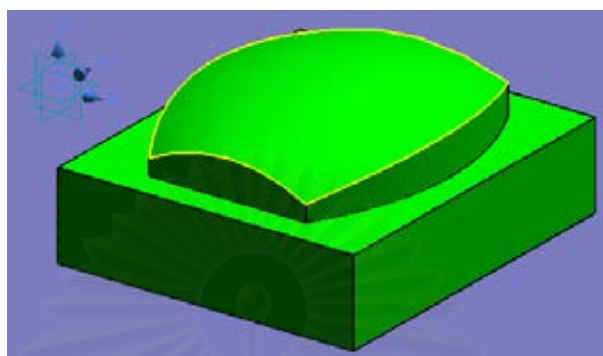
2. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับการกัดคอนทัวร์สองแกน โดยเลือกไปที่เส้นโค้งปิดตรงส่วนล่างของผิวลอฟท์ ดังรูปที่ 4.48 และเลือกรูปแบบการกัดเป็นแบบกัดด้านนอก (Outer) กัดลึกทั้งหมด 4 ระดับ ระดับละ 5 มิลลิเมตร เลือกระยะออฟเซตของเส้นโค้งปิดไว้ 16 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.1 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 1 ออกมา ปรับค่าระยะออฟเซตของเส้นโค้งปิดไว้ 12 มิลลิเมตร ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ นั้นใช้เหมือนคำสั่งชุดแรก ทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 2 ปรับค่าระยะออฟเซตของเส้นโค้งปิดไว้ 8 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.1 มิลลิเมตร ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ นั้นใช้เหมือนคำสั่งชุดแรก ทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 3 ปรับค่าระยะออฟเซตของเส้นโค้งปิดไว้ 4 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.001 มิลลิเมตร ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ นั้นใช้เหมือนคำสั่งชุดแรก ทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 4



รูปที่ 4.48 การเลือกขอบวงปิด 1 วงด้านตรงขอบล่างจากแบบจำลองโซลิดขึ้นที่ 7

3. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับการกัดคอนทัวร์สามแกน โดยเลือกไปที่หน้า (Face) ของแบบจำลอง (ในที่นี้คือพื้นผิวลอฟท์) ดังรูปที่ 4.49 เลือกรูปแบบการกัดเป็นแบบไปกลับ

(Zig-Zag) เลือกระยะออฟเซตของหน้าไว้ 2.5 มิลลิเมตร กำหนดระยะห่างของเส้นทางเดินการกัด (Step Over) เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.01 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 5



รูปที่ 4.49 การเลือกหน้าจากแบบจำลองโซลิดซ์ครั้งที่ 7

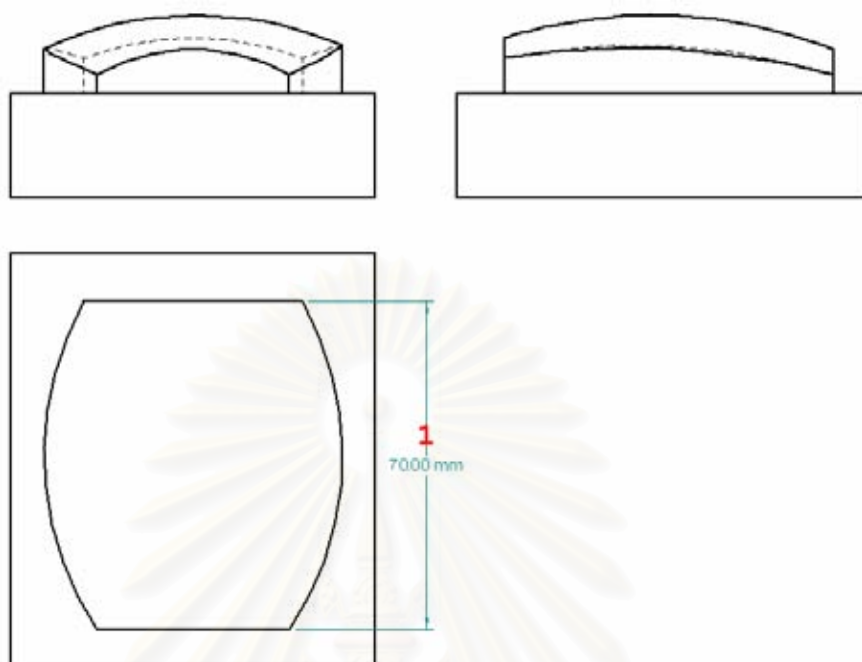
เมื่อดำเนินการตามขั้นตอนเหล่านี้เสร็จก็จะได้ไฟล์รหัสจีทั้งหมด 5 ไฟล์ นำไฟล์เหล่านี้ไปกัดชิ้นงานจริงด้วยเครื่องซีเอ็นซี โดยกัดตามลำดับขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น และใช้เคมีคอลลูดเป็นวัสดุในการทดลอง ในการกัดทดสอบครั้งนี้จะให้หัวกัด 2 หัว คือหัวกัดแบบแฟลตขนาด 8 มิลลิเมตร สำหรับไฟล์ที่ 1 ถึง 4 และหัวกัดแบบบอลขนาด 5 มิลลิเมตร สำหรับไฟล์ที่ 5 เมื่อกัดเสร็จก็จะได้ชิ้นงานจริงตามรูปที่ 4.50



รูปที่ 4.50 ชิ้นงานจริงจากแบบจำลองโซลิดซ์ครั้งที่ 7

เมื่อนำชิ้นงานไปวัดขนาดด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็ม โดยวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 4.51 โดยขนาดที่วัดได้แต่ละครั้งจะแสดงดังตารางที่ 4.17

ในการวัดขนาดตำแหน่งที่ 1 ค่าเฉลี่ยคือ 70.0449 มิลลิเมตร เทียบกับแบบจำลองซึ่งมีขนาด 70 มิลลิเมตร คิดเป็นค่าความผิดพลาด 45 ไมครอน



รูปที่ 4.51 ตำแหน่งต่างๆ ที่จะวัดขนาดของแบบชิ้นงานที่ 7

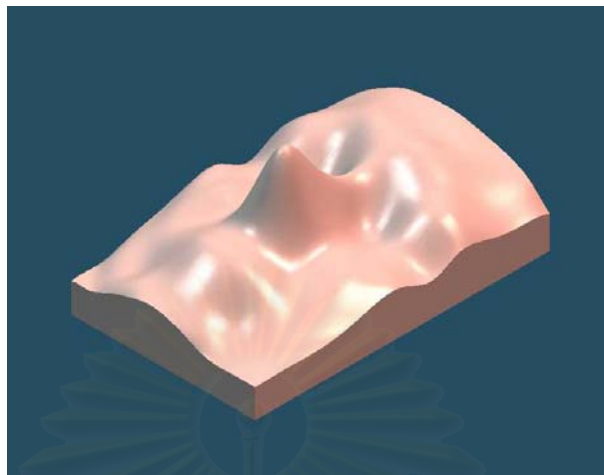
ตารางที่ 4.17 ขนาดที่ตำแหน่ง 1 ของแบบชิ้นงานที่ 7

การวัดครั้งที่	ขนาดที่วัดได้ (mm)
1	70.0291
2	70.0489
3	70.0611
4	70.0345
5	70.0508
ค่าเฉลี่ย	70.0449
ค่าความผิดพลาด	0.0449

แบบชิ้นงานที่ 8

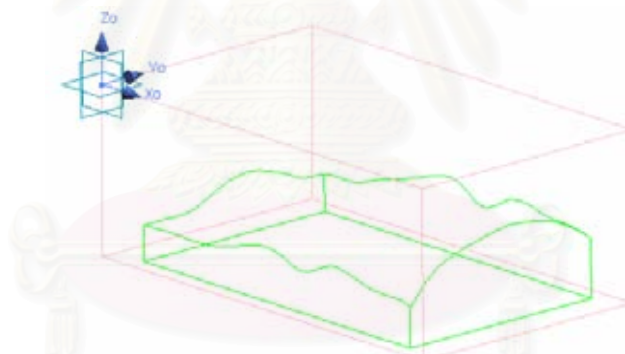
แบบชิ้นงานนี้สร้างขึ้นด้วยโปรแกรมยูนิกราฟฟิกส์ (UniGraphics Solution) โดยรับข้อมูลดีเอ็กซ์เอฟไฟล์ (DXF File) ซึ่งมีข้อมูลเป็นจุด แล้วทำการสร้างพื้นผิวขึ้นจากจุดเหล่านี้ โดยใช้คำสั่งในหมวดการสร้างพื้นผิวรูปร่างอิสระ (Free Form Surface) กำหนดดีกรีของสมการพื้นผิวที่ใช้เป็น 3 แล้วสร้างลำตัวแผ่นขึ้นมา หลังจากนั้นทำการยึดลำตัวแบบแผ่นนี้ไปจนถึงระนาบ

ที่กำหนดขึ้นเกิดเป็นรูปทรงโซลิด รูปแบบจำลองที่ได้ มีลักษณะพื้นผิวแบบรูปหน้าคน ดังแสดงในรูปที่ 4.52



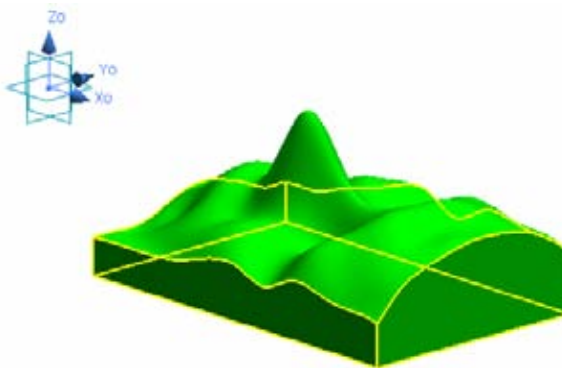
รูปที่ 4.52 แบบจำลองโซลิดขึ้นที่ 8

1. ผู้วิจัยได้ใส่วัสดุสต็อก เพิ่มเข้าไปในแบบจำลอง โดยมีระยะออฟเซตของวัสดุสต็อกทางแกน x , y และ z เป็น 8, 4 และ -10 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทำการตั้งค่าจุดกำเนิดไว้ที่ตำแหน่งมุมบนของวัสดุสต็อก ดังรูปที่ 4.53



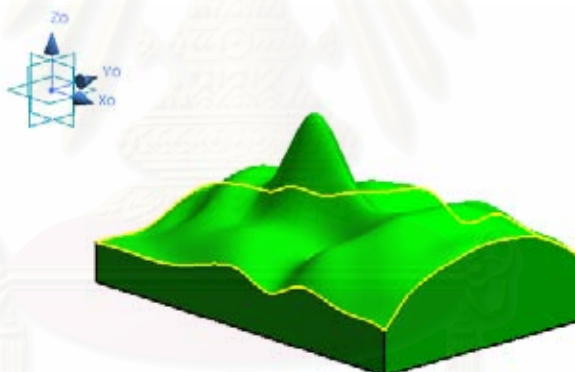
รูปที่ 4.53 การเพิ่มวัสดุสต็อกและกำหนดจุดกำเนิดแบบจำลองโซลิดขึ้นที่ 8

2. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับการกัดหยาบ 3 แกน โดยเลือกไปที่ลำตัว ของแบบจำลองดังรูปที่ 4.54 เลือกรูปแบบการกัดเป็นแบบไปกลับ (Zig-Zag) กัดลึกทั้งหมด 4 ระดับ ระดับละ 7 มิลลิเมตร เลือกระยะออฟเซตของลำตัวไว้ 2 มิลลิเมตร กำหนดระยะห่างของเส้นทางการเดินการกัด (Step Over) เท่ากับ 2 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางการกัดครั้งที่ 1



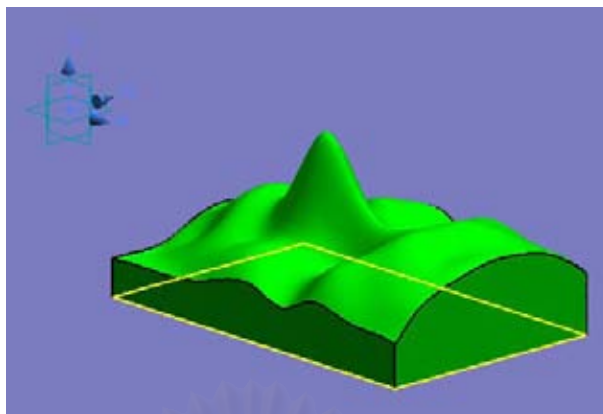
รูปที่ 4.54 การเลือกลำตัวจากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 8

3. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับการกัดคอนทัวร์สามแกน โดยเลือกไปที่หน้า (Face) ของแบบจำลอง (ในที่นี้คือพื้นผิวรูปหน้าคน) ดังรูปที่ 4.55 เลือกรูปแบบการกัดเป็นแบบไปกลับ (Zig-Zag) เลือกระยะออฟเซตของหน้าไว้ 2 มิลลิเมตร กำหนดระยะห่างของเส้นทางเดินการกัด (Step Over) เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.01 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 2



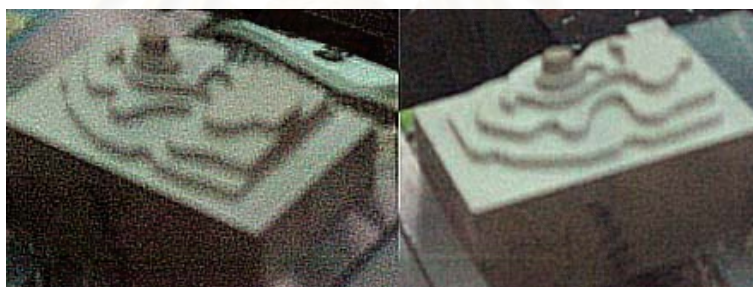
รูปที่ 4.55 การเลือกหน้าจากแบบจำลองโซลิดชิ้นที่ 8

4. ผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่งสำหรับการกัดคอนทัวร์สองแกน โดยเลือกไปที่เส้นตรงปิดรูปสี่เหลี่ยมตรงส่วนล่างของแบบจำลองดังรูปที่ 4.56 และเลือกรูปแบบการกัดเป็นแบบกัดด้านนอก (Outer) กัดลึกทั้งหมด 5 ระดับ ระดับละ 7 มิลลิเมตร เลือกระยะออฟเซตของเส้นโค้งปิดไว้ 6 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งเป็น 0.1 มิลลิเมตร ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเสร็จทำการคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดครั้งที่ 3



รูปที่ 4.56 การเลือกขอบวงปิด 1 วงด้านตรงขอบล่างจากแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 8

เมื่อดำเนินการตามขั้นตอนเหล่านี้เสร็จก็จะได้ไฟล์รหัสจีทั้งหมด 3 ไฟล์ นำไฟล์เหล่านี้ไปกัดชิ้นงานจริงด้วยเครื่องซีเอ็นซี โดยกัดตามลำดับขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น และใช้เคมีคอลลูดเป็นวัสดุในการทดลอง ในการกัดทดสอบครั้งนี้จะให้หัวกัด 2 หัว คือหัวกัดแบบบอลขนาด 4 มิลลิเมตร สำหรับไฟล์ที่ 1 ถึง 2 และหัวกัดแบบแฟลตขนาด 12 มิลลิเมตร สำหรับไฟล์ที่ 3 เมื่อกัดไฟล์แรกเสร็จชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะหยาดดังแสดงในรูปที่ 4.57 กัดเสร็จครบทุกไฟล์จะได้ชิ้นงานจริงตามรูปที่ 4.58



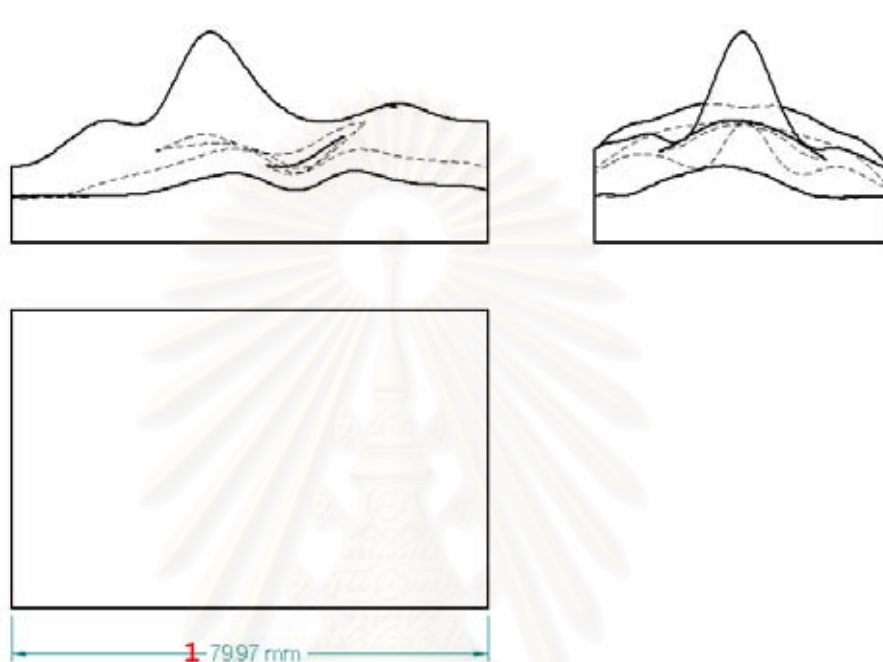
รูปที่ 4.57 ชิ้นงานจริงที่ได้จากการกัดหยาด 3 แกน



รูปที่ 4.58 ชิ้นงานจริงจากแบบจำลองโซลิดชั้นที่ 8

เมื่อนำชิ้นงานไปวัดขนาดด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็ม โดยวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 4.59 โดยขนาดที่วัดได้แต่ละครั้งจะแสดงดังตารางที่ 4.18

ในการวัดขนาดตำแหน่งที่ 1 ค่าเฉลี่ยคือ 80.0183 มิลลิเมตร เทียบกับแบบจำลองซึ่งมีขนาด 79.97 มิลลิเมตร คิดเป็นค่าความผิดพลาด 48 ไมครอน



รูปที่ 4.59 ตำแหน่งต่างๆ ที่จะวัดขนาดของแบบชิ้นงานที่ 8

ตารางที่ 4.18 ขนาดที่ตำแหน่ง 1 ของแบบชิ้นงานที่ 8

การวัดครั้งที่	ขนาดที่วัดได้ (mm)
1	80.0032
2	80.0387
3	80.0131
4	80.0112
5	80.0253
ค่าเฉลี่ย	80.0183
ค่าความผิดพลาด	0.0483

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในส่วนของสรุปผลการวิจัย ผู้วิจัยจะจำแนกตามโปรแกรมดังต่อไปนี้

5.1.1 โปรแกรมสำหรับงานเจาะ

โปรแกรมสามารถคำนวณหาเส้นทางเดินการกัด เพื่อทำการเจาะชิ้นงานตามขอบวงกลมที่เลือกไว้ได้ หัวกัดได้เดินตามเส้นทางตามที่ถูกเลือกได้ทำการออกแบบ กล่าวคือจากจุดเริ่มต้น แล้วเคลื่อนที่แบบรวดเร็วมาที่ระนาบที่ปลอดภัย เคลื่อนที่แบบรวดเร็วต่อไปยังตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรกที่ใช้โปรแกรมเลือกไว้โดยยังอยู่ในระนาบปลอดภัย ต่อมาหัวกัดจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเท่ากับอัตราป้อนที่กำหนดไปยังระนาบ X-Y เริ่มต้นที่ทำการเจาะ และทำการเจาะวัสดุเป็นลำดับขั้นตามความลึกที่กำหนดไว้ รวมถึงมีการยกตัวตามระยะยกตัวที่กำหนด เมื่อทำการเจาะรูแรกเสร็จหัวเจาะก็จะเคลื่อนที่ขึ้นมายังระนาบปลอดภัยแล้วเคลื่อนที่แบบรวดเร็วไปยังตำแหน่งจุดศูนย์กลางของรูถัดไปที่จะทำการเจาะ ซึ่งยังอยู่บนระนาบที่ปลอดภัย แล้วเริ่มการเจาะรูถัดไป ลักษณะการเดินของหัวเจาะจะมีเส้นทางเดินซ้ำแบบนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงรูสุดท้ายที่ทำการเจาะ เมื่อเจาะรูสุดท้ายเสร็จหัวเจาะจะเคลื่อนที่ขึ้นมายังระนาบปลอดภัยแล้วเคลื่อนที่แบบรวดเร็วไปยังตำแหน่งจุดเริ่มต้น

5.1.2 โปรแกรมสำหรับงานกัดหยาบ 2 แกน

โปรแกรมสามารถคำนวณหาเส้นทางเดินการกัด เพื่อทำการกัดชิ้นงานภายในบริเวณขอบวงปิดที่เลือกเอาไว้ได้ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือขอบวงปิด 1 วง และ 2 วง โดยจะกัดเนื้อวัสดุบริเวณภายในขอบเขตที่ใช้โปรแกรมได้เลือกเอาไว้

หัวกัดเดินตามเส้นทางที่ถูกเลือกได้ทำการออกแบบ กล่าวคือจากจุดเริ่มต้น แล้วเคลื่อนที่แบบรวดเร็วมาที่ระนาบที่ปลอดภัย เคลื่อนที่แบบรวดเร็วต่อไปยังตำแหน่งจุดเริ่มต้นของเส้นตรงแรกที่ถูกตัดด้วยระนาบ Y-Z แรกกับหน้าที่โปรแกรมคำนวณได้โดยยังอยู่ที่ระนาบปลอดภัย เคลื่อนที่ลงไปยังระนาบ X-Y แรกของการกัดด้วยอัตราเร็วเท่ากับอัตราป้อนที่กำหนดไว้ จากนั้นหัวกัดจะเดินแบบเส้นตรงไปจนถึงจุดปลายสุดของเส้นตรงแรก การเคลื่อนที่ของหัวกัดจะซ้ำในลักษณะนี้โดยขึ้นอยู่กับว่าเส้นทางเดินเป็นแบบทิศทางเดียวหรือไปกลับ จนกระทั่งกัดในระนาบ X-Y แรกเสร็จ หัวกัดก็จะเคลื่อนที่ขึ้นมาที่ระนาบปลอดภัย แล้วเคลื่อนที่แบบรวดเร็วไปยังตำแหน่ง

จุดเริ่มต้นของเส้นตรงแรกที่ถูกตัดด้วยระนาบ Y-Z แรกกับหน้าที่โปรแกรมคำนวณได้ แล้วเคลื่อนที่ลงไปยังระนาบ X-Y ถัดไป (ในกรณีกัณฑ์แบบ 2 แกนครึ่ง) วิธีการเดินของหัวกัทจะซ้ำในลักษณะเช่นนี้ จนกระทั่งกัทครบทุกระนาบ X-Y จะเคลื่อนที่ขึ้นมายังระนาบปลอดภัย แล้วเคลื่อนที่แบบรวดเร็วไปยังตำแหน่งจุดเริ่มต้น รูปร่างของชิ้นงานที่ได้จากการกัทจะมีลักษณะหยาบ และคล้ายกับแบบจำลองเท่านั้น

5.1.3 โปรแกรมสำหรับงานกัทแบบคอนทัวร์ 2 แกน

โปรแกรมสามารถคำนวณหาเส้นทางเดินการกัท เพื่อทำการกัทชิ้นงานภายในบริเวณขอบวงปิดที่เลือกเอาไว้ได้ โดยหัวกัทได้เดินตามเส้นทางที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบ กล่าวคือจากจุดเริ่มต้นแล้วเคลื่อนที่แบบรวดเร็วมายังระนาบที่ปลอดภัย เคลื่อนที่แบบรวดเร็วต่อไปยังตำแหน่งจุดเริ่มต้นของเส้นโค้งแรกๆที่โปรแกรมเลือกให้โดยยังอยู่ที่ระนาบปลอดภัย เคลื่อนที่ลงไปยังระนาบ X-Y แรกของการกัทด้วยอัตราเร็วเท่ากับอัตราป้อนที่กำหนดไว้ จากนั้นหัวกัทจะเดินในลักษณะทวนเข็มนาฬิกาเมื่อมองจากด้านบนของชิ้นงาน (ซึ่งจุดนี้ผู้วิจัยได้บังคับการจัดเรียงของค่าพารามิเตอร์เส้นโค้งให้เป็นลักษณะนี้อยู่แล้ว เพื่อให้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ทุกๆเส้นโค้งที่ถูกเลือก) หัวกัทจะเคลื่อนที่ไปตามโพรไฟล์ของขอบปิดจนครบรอบวงปิดกลับมายังจุดเดิม แล้วเคลื่อนที่ขึ้นมาบนระนาบปลอดภัย เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งจุดเริ่มต้นของเส้นโค้งแรกๆอีกครั้งหนึ่งแล้วเคลื่อนที่ลงไปยังระนาบ X-Y ถัดไปที่จะทำการกัท (ในกรณีกัณฑ์แบบ 2 แกนครึ่ง) จนกระทั่งกัทครบทุกระนาบ X-Y ก็จะเคลื่อนที่ขึ้นมายังระนาบปลอดภัย แล้วเคลื่อนที่แบบรวดเร็วไปยังตำแหน่งจุดเริ่มต้น รูปร่างของชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะตรงกับแบบจำลองโซลิดที่วาดไว้ โดยชิ้นงานที่ได้จะมีความถูกต้องของขนาดมากน้อยแค่ไหนขึ้นอยู่กับค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ที่ได้กำหนดไว้ด้วย

5.1.4 โปรแกรมสำหรับงานกัทหยาบ 3 แกน

โปรแกรมสามารถคำนวณหาเส้นทางเดินการกัทเพื่อทำการกัทชิ้นงานภายในบริเวณที่เกิดจากการกระทำบูลีนแบบลบของวัสดุติดกับลำตัวที่เลือกไว้ โดยหัวกัทได้เดินตามเส้นทางที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบ กล่าวคือจากจุดเริ่มต้นแล้วเคลื่อนที่แบบรวดเร็วมาที่ระนาบที่ปลอดภัย เคลื่อนที่แบบรวดเร็วต่อไปยังตำแหน่งจุดเริ่มต้นของเส้นตรงที่เกิดจากการตัดกันระหว่างระนาบ Y-Z แรกกับหน้าของชิ้นงาน ที่เกิดจากการตัดกันระหว่างระนาบ X-Y กับลำตัวซึ่งผ่านการกระทำบูลีนแบบลบแล้ว โดยยังอยู่ที่ระนาบปลอดภัย แล้วเคลื่อนที่ลงไปยังระนาบ X-Y แรกด้วยอัตราเร็วเท่ากับอัตราป้อนที่กำหนดไว้ จากนั้นจะหัวกัทจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงจากจุดแรกไปยังจุดสุดท้ายของเส้นตรง แล้วยกหัวกัทขึ้นมาบนระนาบปลอดภัย เพื่อหลบหลีกเนื้อวัสดุที่ไม่ต้องการ

กำจัด เมื่อเคลื่อนที่หลบพื้นบริเวณนั้นก็จะลงมาที่ระนาบ X-Y เดิมต่อต่อ (ซึ่งจุดนี้ผู้วิจัยได้บังคับ การเคลื่อนที่ของหัวกัทให้มีการเคลื่อนที่กลับไปที่ระนาบปลอดภัยทุกครั้ง เมื่อพบเจอจุดที่เป็น ขอบเขตของเส้นตรงเพื่อหลบหลีกวัสดุที่ไม่ต้องการกำจัดทิ้ง) เมื่อกัทที่ระนาบ X-Y แรกเสร็จ หัวกัท ก็จะเคลื่อนที่ขึ้นมาที่ระนาบปลอดภัย แล้วเคลื่อนที่ยังตำแหน่งจุดเริ่มต้นของเส้นตรงที่เกิดจากการ ตัดกันระหว่างระนาบ Y-Z แรกกับหน้าของชิ้นงาน ที่เกิดจากการตัดกันระหว่างระนาบ X-Y ถัดไป กับลำตัวซึ่งผ่านการกระทำบดแบบลบ แล้วเคลื่อนที่ลงไปยังระนาบ X-Y ถัดไปที่จะทำ การกัท จนกระทั่งกัทครบทุกระนาบ X-Y จะเคลื่อนที่ขึ้นมายังระนาบปลอดภัยแล้วเคลื่อนที่แบบ รวดเร็วไปยังตำแหน่งจุดเริ่มต้น รูปร่างของชิ้นงานที่ได้จากการกัทจะมีลักษณะหยาบเป็นชั้นๆ และ จะดูคล้ายกับแบบจำลองทำนั้น

5.1.5 โปรแกรมสำหรับงานกัทแบบคอนทัวร์ 3 แกน

โปรแกรมสามารถคำนวณหาเส้นทางเดินการกัทเพื่อทำการกัทชิ้นงานตามหน้า ที่ ผู้ใช้โปรแกรมเลือกเอาไว้ได้ โดยหัวกัทได้เดินตามเส้นทางที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบ กล่าวคือจาก จุดเริ่มต้นแล้วเคลื่อนที่แบบรวดเร็วมาที่ระนาบที่ปลอดภัย เคลื่อนที่แบบรวดเร็วต่อไปยังตำแหน่ง จุดเริ่มต้นของเส้นโค้งที่เกิดจากการตัดกันระหว่าง ระนาบ Y-Z แรกกับหน้าของชิ้นงาน โดยยังอยู่ที่ ระนาบปลอดภัย แล้วเคลื่อนที่ลงไปยังค่า Z ของจุดเริ่มต้นของเส้นโค้งด้วยอัตราเร็วเท่ากับอัตรา ป้อนที่กำหนดไว้ จากนั้นจะหัวกัทจะเคลื่อนที่ไปตามโพรไฟล์ของเส้นโค้งที่บนระนาบ Y-Z (ผู้วิจัย ได้บังคับให้เส้นทางเดินการกัทแต่ละเส้นที่ค่า X คงที่) โดยจะเคลื่อนที่ไปยังจุดสุดท้ายของเส้นโค้ง แรก และเคลื่อนที่ต่อไปยังเส้นโค้งถัดไปเรื่อยๆ จนครบ (มีทั้งการเคลื่อนที่แบบทิศทางเดียวและไป กลับ ตามพารามิเตอร์ที่ผู้ใช้โปรแกรมเลือก) เมื่อครบแล้วจะเคลื่อนที่ขึ้นไปยังระนาบปลอดภัย แล้ว เคลื่อนที่แบบรวดเร็วไปยังตำแหน่งจุดเริ่มต้น รูปร่างของชิ้นงานที่ได้จากการกัทจะมีลักษณะตรง กับจำลองซิลิโคนที่วาดไว้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

ในส่วนของหัวข้อการอภิปรายผู้วิจัยจะอภิปรายจำแนกตามแบบชิ้นงานที่ทำการกัดทดสอบ

5.2.1 แบบชิ้นงานที่ 1

ลักษณะของชิ้นงานที่กัดได้แสดงในรูปที่ 5.1 เมื่อมองด้วยตาเปล่ามีลักษณะตรงกับแบบจำลองทุกประการ โดยเฉพาะส่วนโค้ง ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นทางเดินไว้ถึง 1 ไมครอน แม้จะเป็นการกัดแบบเชิงเส้น แต่จะพบว่าเมื่อสัมผัสดูจะรู้สึกถึงเซกเมนต์ของเส้นตรงเลย ซึ่งเมื่อเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ที่สูงๆ เช่น 100 ไมครอน เมื่อสัมผัสส่วนโค้งจะรู้สึกได้ถึงเซกเมนต์ของเส้นตรงที่เชื่อมต่อกัน ตามขอบของเนื้อไม้ในบางส่วนมีการปริแตกออกมา เนื่องจากในขณะกัดชิ้นงานจริงผู้วิจัยได้เลือกใช้โหมดควบคุมความเร็วด้วยมือ ซึ่งสามารถกำหนดอัตราป้อนให้เร็วหรือช้าได้ ในบางครั้งได้เพิ่มความเร็วของหัวกัดให้เร็วถึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที ความเร็วรอบของเพลามอเตอร์ยังไม่เร็วพอสำหรับการกัดไม้ ผู้วิจัยได้กำหนดความเร็วรอบไว้ที่ 1200 รอบต่อนาที รวมถึงหัวกัดมีความสึกหรอไปบ้าง เป็นสาเหตุให้ขอบไม้บางช่วงแตกออกไป ในส่วนของค่าความผิดพลาดของชิ้นงาน จากการวัดขนาดด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็ม พบว่าชิ้นงานมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง 26-58 ไมครอน ถ้าจำแนกตามวิธีการกัดให้พิจารณารูปที่ 4.11 การวัดตำแหน่งที่ 3 จะเป็นการวัดขนาดเพื่อหาความถูกต้องของงานเจาะ ส่วนการวัดตำแหน่งที่ 1, 2, 4 และ 6 จะเป็นการวัดขนาดเพื่อหาความถูกต้องของงานกัด คอนทัวร์ 2 แกน ซึ่งพบว่าค่าความผิดพลาดสำหรับงานเจาะคือ 29 ไมครอน และค่าความผิดพลาดของงานกัดคอนทัวร์ 2 แกนอยู่ในช่วง 26 ถึง 58 ไมครอน โดยความผิดพลาดสูงสุดวัดได้คือตำแหน่งที่ 2 ซึ่งเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12 มิลลิเมตร ผู้วิจัยจึงทำการตรวจสอบจากไฟล์รหัสจี เพื่อดูเส้นทางการเจาะและการกัด เปรียบเทียบกับในแบบจำลองพบว่าตรงกัน ดังนั้นค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากการขั้นตอนการกัดทดสอบ เช่นความคลาดเคลื่อนของเครื่องกัดซีเอ็นซี ขั้นตอนที่มีการเปลี่ยนหัวกัดและทำการกำหนดตำแหน่งอ้างอิงใหม่ ขั้นตอนที่ผู้วิจัยวัดขนาดชิ้นงานด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็ม และหัวกัดมีความสึกหรอ



รูปที่ 5.1 แบบจำลองชิ้นที่ 1 กับชิ้นงานจริงที่กัดได้

5.2.2 แบบชิ้นงานที่ 2

ลักษณะของชิ้นงานที่กัดได้แสดงในรูปที่ 5.2 เมื่อมองด้วยตาเปล่ามีลักษณะตรงกับแบบจำลองทุกประการ โดยเฉพาะส่วนโค้ง ตามขอบของเนื้อไม้ในบางส่วนมีการปริแตก โดยเฉพาะส่วนที่เป็นขอบแหลมเล็ก ซึ่งวัสดุประเภทไม้นั้นไม่มีความแข็งเพียงพอจึงมีโอกาที่จะหักออกมาได้สำหรับส่วนที่มีขนาดเล็กมากๆ เช่นปลายแหลม และเนื่องจากในขณะกัดชิ้นงานจริง ผู้วิจัยได้เลือกใช้โหมดควบคุมความเร็วด้วยมือ ซึ่งสามารถกำหนดอัตราป้อนให้เร็วหรือช้าได้ รวมถึงหัวกัดมีความสึกหรอทำให้ขอบบางช่วงแตกออกไป ในส่วนของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวัดขนาดชิ้นงานด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็ม พบว่าชิ้นงานมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง 23-60 ไมครอน ถ้าจำแนกตามวิธีการกัดให้พิจารณารูปที่ 4.19 การวัดตำแหน่งที่ 5 จะเป็นการวัดขนาดเพื่อหาความถูกต้องของงานเจาะ ส่วนการวัดตำแหน่งที่ 1, 2, 3 และ 4 จะเป็นการวัดขนาดเพื่อหาความถูกต้องของงานกัดคอนทัวร์ 2 แกน ซึ่งพบว่าค่าความผิดพลาดสำหรับงานเจาะคือ 25 ไมครอน และค่าความผิดพลาดของงานกัดคอนทัวร์ 2 แกนอยู่ในช่วง 23 ถึง 60 ไมครอน โดยความผิดพลาดสูงสุดวัดได้คือตำแหน่งที่ 1 ซึ่งเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12 มิลลิเมตร ผู้วิจัยจึงทำการตรวจสอบจากไฟล์รหัสจี เพื่อดูเส้นทางการเจาะและการกัด เปรียบเทียบกับแบบจำลองพบว่าตรงกัน ดังนั้นค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากระบวนการกัดทดสอบ เช่นความคลาดเคลื่อนของเครื่องกัดซีเอ็นซี ขั้นตอนที่ผู้วิจัยวัดขนาดชิ้นงานด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็ม และหัวกัดมีความสึกหรอ

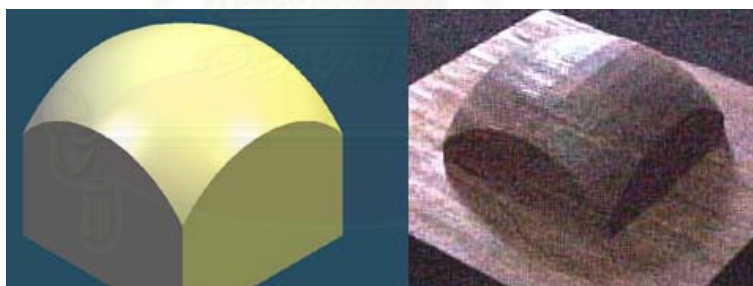


รูปที่ 5.2 แบบจำลองชิ้นที่ 2 กับชิ้นงานจริงที่กัดได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.3 แบบขึ้นงานที่ 3

ลักษณะของขึ้นงานที่กัดได้แสดงในรูปที่ 5.3 เมื่อมองด้วยตาเปล่ามีลักษณะคล้ายคลึงกับแบบจำลองทุกประการ แต่จะเห็นรอยเส้นทางเดินการกัดและเหลี่ยมของโค้งที่เกิดจากการประมาณด้วยเซกเมนต์เส้นตรงอย่างชัดเจน เนื่องจากในแบบขึ้นงานที่ 3 นั้น มีขั้นตอนการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ค่อนข้างหยาบ ซึ่งมีระยะห่างระหว่างหัวกัดเพียง 1 มิลลิเมตร ในขณะที่หัวกัดแบบบอลที่ใช้มีรัศมี 2.5 มิลลิเมตร และค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ที่ใช้ในการสร้างจุดจากเส้นโค้งนั้นกำหนดไว้เพียง 0.1 มิลลิเมตรหรือ 100 ไมครอนเท่านั้น พบว่าขึ้นงานมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง 55-111 ไมครอน ถ้าจำแนกตามวิธีการกัดให้พิจารณารูปที่ 4.25 การวัดตำแหน่งที่ 1 จะเป็นการวัดขนาดเพื่อหาความถูกต้องของงานกัดคอนทัวร์ 3 แกน ส่วนการวัดตำแหน่งที่ 2 จะเป็นการวัดขนาดเพื่อหาความถูกต้องของงานกัดคอนทัวร์ 2 แกน ซึ่งพบว่าค่าความผิดพลาดสำหรับงานกัดคอนทัวร์ 3 แกนคือ 111 ไมครอน และค่าความผิดพลาดของงานกัดคอนทัวร์ 2 แกนคือ 55 ไมครอน สาเหตุหลักที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดสูงเนื่องจากการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ และระยะห่างระหว่างเส้นทางเดินการกัดหยาบเกินไป ส่วนสาเหตุอื่นๆ เกิดมาจากความคลาดเคลื่อนของเครื่องกัดซีเอ็นซี ขั้นตอนที่มีการเปลี่ยนหัวกัดและทำการกำหนดตำแหน่งอ้างอิงใหม่ ขั้นตอนที่ใช้วัดขนาดขึ้นงานด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็ม และหัวกัดมีความสึกหรอ



รูปที่ 5.3 แบบจำลองขึ้นที่ 3 กับขึ้นงานจริงที่กัดได้

สถาบันวิจัยบรูก้า
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.4 แบบชิ้นงานที่ 4 ถึง 8

แบบชิ้นงานที่ 4 ถึง 8 แสดงในรูปที่ 5.4 เนื่องจากแบบชิ้นงานที่ 4 ถึง 8 นั้นเป็นแบบชิ้นงานที่เน้นพื้นผิวเป็นหลัก ไม่มีค่าขนาดมิติของพื้นผิวที่สามารถอ้างอิงได้ ส่วนขนาดที่สามารถวัดได้มีแต่ส่วนที่เป็นขอบเขตเท่านั้น ให้พิจารณาจากรูปที่ 4.32 4.38 4.45 4.51 และ 4.59 ค่าความผิดพลาดของขนาดขอบเขตที่วัดได้อยู่ในช่วง 48-66 ไมครอน โดยแต่ละตำแหน่งการวัดจะทดสอบความถูกต้องของการกัดคอนทัวร์ 2 แกน จากการตรวจสอบตำแหน่งบนรหัสจีกับแบบจำลองโซลิดแล้วพบว่ามีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจึงมีสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนของเครื่องกัดซีเอ็นซี ขั้นตอนที่มีการเปลี่ยนหัวกัดและทำการกำหนดตำแหน่งอ้างอิงใหม่ ขั้นตอนและผู้วิจัยวัดขนาดชิ้นงานด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็ม และหัวกัดมีความสึกหรอ ต่อไปนี้จะอภิปรายในเชิงกายภาพเท่านั้น

แบบชิ้นงานที่ 4 มีลักษณะผิวเป็นทรงกระบอกทาบulet ซึ่งมีรูปร่างเป็นลอนคลื่น และตรงกับแบบจำลองโซลิดที่ออกแบบ ผิวของชิ้นงานมีความโค้งที่เรียบเนื่องจากกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งไว้ 10 ไมครอน และระยะห่างระหว่างหัวกัด 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งผิวที่ได้มีความเรียบกว่าผิวทรงกลมของแบบชิ้นงานที่ 3 มาก

แบบชิ้นงานที่ 5 มีลักษณะผิวเป็นพื้นผิวเนิร์บส์ ซึ่งมีรูปร่างแบบอิสระ ชิ้นงานที่ได้นั้นมีรูปร่างเหมือนกับแบบจำลองโซลิดที่ออกแบบ ผิวของชิ้นงานมีความโค้งที่เรียบเนื่องจากกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งไว้ 10 ไมครอน และระยะห่างระหว่างหัวกัด 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งผิวที่ได้มีความเรียบเหมือนกับแบบชิ้นงานที่ 4

แบบชิ้นงานที่ 6 มีลักษณะผิวเป็นพื้นผิวจากการหมุน ซึ่งมีรูปร่างเป็นรูปขวด ตรงกับแบบจำลองโซลิดที่ออกแบบ ผิวของชิ้นงานมีความโค้งที่เรียบเนื่องจากกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งไว้ 10 ไมครอน และระยะห่างระหว่างหัวกัด 0.5 มิลลิเมตร และการกัดทดลองแบบชิ้นงานที่ 6 นี้ ได้กำหนดอัตราป้อนไว้ต่ำ ประมาณ 100 มิลลิเมตรต่ออนาที ผิวของชิ้นงานในส่วนของมุมแหลมจึงไม่มีรอยแตกเกิดขึ้น

แบบชิ้นงานที่ 7 มีลักษณะผิวเป็นพื้นผิวลอฟท์ รูปร่างตรงกับแบบจำลองโซลิดที่ออกแบบ ผิวของชิ้นงานมีความโค้งที่เรียบมากเนื่องจากกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งไว้ 10 ไมครอน และระยะห่างระหว่างหัวกัด 0.5 มิลลิเมตร และมีการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำการทดลองเป็นเคมีคอล วูด ซึ่งผิวที่ได้มีความเรียบสวยงามกว่าแบบชิ้นงานไม่อย่างชัดเจน

แบบชิ้นงานที่ 8 มีลักษณะผิวเป็นพื้นผิวเนิร์บส์แบบรูปร่างอิสระ มีรูปร่างตรงกับแบบจำลองโซลิดที่ออกแบบ การกัดแบบจำลองชิ้นนี้ต้องทำการติดตั้งหัวกัดให้ยาวออกมา มากกว่าปกติ เนื่องจากส่วนจุ่มกของพื้นผิวนั้น สูงประมาณ 30 มิลลิเมตรเทียบจากผิวล่าง ผิวของชิ้นงานมีความโค้งที่เรียบมากเนื่องจากกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเส้นโค้งไว้ 10 ไมครอน และระยะห่างระหว่างหัวกัด 0.5 มิลลิเมตร และมีการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำการทดลองเป็น เคมีคอล วูด ซึ่งผิวที่ได้นั้นมีความเรียบสวยงามกว่าแบบชิ้นงานไม้อย่างชัดเจน แต่จุดบกพร่องที่มองเห็นได้ คือการกัดบริเวณที่มีความชันสูงๆ นั้นจะเห็นรอยทางเดินของหัวกัดอย่างชัดเจนเป็นชั้นๆ อาจต้องปรับค่าพารามิเตอร์ในส่วนระยะห่างระหว่างเส้นทางเดินการกัดให้ละเอียดกว่า 0.5 มิลลิเมตร เช่น 0.1 มิลลิเมตร แต่ในกรณีนี้การคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดก็จะเสียเวลามาก และไฟล์รหัสจีทีได้จะมีขนาดใหญ่



รูปที่ 5.4 แบบชิ้นงานที่ 4 ถึง 8 เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่วาด

ในการทดสอบหาค่าความผิดพลาดของชิ้นงานทั้ง 8 ชิ้น สามารถสรุปค่าความผิดพลาดสำหรับวิธีการกัดแต่ละแบบออกมาได้ดังนี้

สำหรับงานเจาะ มีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง 25 ถึง 29 ไมครอน

สำหรับงานกัดคอนทัวร์ 2 แกนมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง 23 ถึง 66 ไมครอน

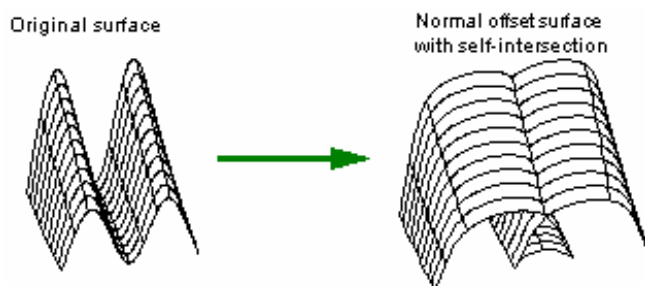
สำหรับงานกัดคอนทัวร์ 3 แกนมีค่าความผิดพลาด 111 ไมครอน

ในมาตรฐานงานอุตสาหกรรมทั่วไป การนำรหัสจีที่สร้างจากคอมพิวเตอร์ช่วยการผลิต ไปใช้ควบคุมเครื่องซีเอ็นซีเพื่อผลิตชิ้นงาน เมื่อทำการวัดขนาดชิ้นงานเพื่อหาความถูกต้องจะมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง 50 ถึง 70 ไมครอน สำหรับหัวกัดที่ยังไม่ทำการปรับเทียบขนาด และมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง 20-30 ไมครอนสำหรับหัวกัดที่ปรับเทียบขนาดแล้วรวมกับการเลือกเส้นทางการกัดให้เหมาะสมกับลักษณะของชิ้นงาน ผลการทดลองที่กล่าวมาแล้วในบทก่อนนั้นเป็นการทดลองที่ทำโดยไม่ได้มีการปรับค่าขนาดของหัวกัดหรือใช้หัวกัดเก่านั้นเอง ซึ่งค่าความผิดพลาดที่วัดได้อยู่ในช่วงเกณฑ์มาตรฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรม

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการกัดนั้น จำเป็นที่จะต้องมีการวางแผนล่วงหน้า เช่นการเลือกระยะออฟเซตของการกัดหยาบ 2 แกนนั้น ต้องคำนึงถึงระยะสิ้นสุดระหว่างขอบวงปิดด้านนอกกับขอบวงปิดด้านในด้วย โดยระยะออฟเซตนั้นจะต้องมีค่าไม่เกินครึ่งหนึ่งของระยะสิ้นสุดนี้ มิเช่นนั้นจะทำให้เส้นทางการกัดที่โปรแกรมคำนวณออกมาเกิดการผิดพลาด หรือโปรแกรมอาจไม่สามารถสร้างลำตัวซึ่งเกิดจากการเผื่อระยะที่ผิดพลาดนี้ได้

5.3.2 ขีดจำกัดของการสร้างพื้นผิวออฟเซต (Offset Surface) ของพาราโซลิดนั้น มีอยู่หลายประการเช่นการกำหนดระยะออฟเซตที่มีค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ไม่สอดคล้องกับค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ที่พาราโซลิดสามารถทำได้ พื้นผิวออฟเซตเกิดการตัดกันเอง (Self Intersecting Offset Surface) ดังแสดงในรูปที่ 5.5 หรือในบางพื้นผิวนั้นอาจไม่สามารถทำการออฟเซตได้ เนื่องจากผู้วิจัยได้กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของการสร้างพื้นผิวออฟเซตไว้ค่อนข้างละเอียดทำให้พื้นผิวบางประเภทไม่สามารถทำการออฟเซตให้มีค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ละเอียดได้ตามที่กำหนดไว้



รูปที่ 5.5 การเกิดพื้นผิวออฟเซตตัดกันเอง

5.3.3 ในการรับแบบจำลองบางรูป จำเป็นต้องตรวจสอบให้ดีว่ามีลำตัวอื่นๆ แทรกมาด้วยหรือไม่เพราะในบางครั้งแบบจำลองโซลิดที่รับมาจากโปรแกรมอื่น อาจเป็นลำตัวแบบนอน เมนิโฟลด์ (Non Manifold Body) ซึ่งเกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นในบางบริเวณ ทำให้การคำนวณหาเส้นทางเดินการกัดในบางแบบจำลองโซลิด ซึ่งมีการใช้การกระทำบูลีนแบบลบ ไม่สามารถหาเป้าหมายในการลบได้ จึงถือเอาลำตัวที่เป็นตัวตั้งลบออกด้วยค่าศูนย์ผลลัพธ์ที่ได้จึงเป็นลำตัวที่เป็นตัวตั้ง การเกิดกรณีเช่นนี้ขึ้นจะทำให้การกัดเกิดการผิดพลาดได้ เช่นในกระนาบนั้น หัวกัดจะเดินกัดวัสดุชิ้นงานออกหมดรวมถึงบริเวณที่เราต้องการให้คงอยู่ด้วย

5.3.4 โปรแกรมที่ผู้วิจัยออกแบบไว้ ไม่รองรับลำตัวแบบนอน เมนิโฟลด์ หากมีการพัฒนาต่อไป ควรทำการปรับปรุงขยายขีดความสามารถของโปรแกรมให้รองรับลำตัวทุกรูปแบบ เช่นลำตัวแบบเมนิโฟลด์ และนอน เมนิโฟลด์

5.3.5 ในการกำหนดพารามิเตอร์เพื่อสร้างเส้นทางเดินการกัดนั้น ควรกำหนดค่าที่เหมาะสมโดยที่ไม่น้อยและมากเกินไป เพราะถ้ากำหนดละเอียดมากเกินไป จะทำให้โปรแกรมมีใช้เวลาในการคำนวณนาน และไฟล์รหัสที่ได้มีขนาดใหญ่ ซึ่งอาจมากเกินไปจนความจำเป็น แต่ถ้ากำหนดความละเอียดต่ำเกินไปก็จะทำให้ชิ้นงานที่ออกมาดูหยาบ เส้นโค้งอาจกลายเป็นเส้นตรงหลายๆ เส้นต่อกัน ซึ่งผิวของชิ้นงานจะไม่เรียบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ใช้โปรแกรมด้วย

5.3.6 การกำหนดวัสดุตัดอกสำหรับแบบจำลองบางประเภทนั้น แม้บางครั้งเราไม่ใส่ค่าออฟเซตเอาไว้ อาจได้วัสดุตัดอกที่มีขนาดใหญ่กว่าความเป็นจริง เนื่องจากหลักการในการสร้างวัสดุตัดอกจะคำนวณจากโทโปโลยี บอกซ์ (Topology Box) ที่เล็กที่สุดซึ่งสามารถครอบลำตัวที่เราต้องการได้ ในบางครั้งลำตัวของเราอาจมีองค์ประกอบทางโทโปโลยีอื่นๆ ที่ไม่ได้ลบทิ้ง ทำให้การคำนวณหาโทโปโลยี บอกซ์มีขนาดใหญ่กว่าที่เราต้องการสำหรับลำตัว สามารถแก้ไขได้โดยสามารถใส่ค่าพารามิเตอร์ค่าออฟเซตเป็นจำนวนจริงลบได้ โปรแกรมจะไปทำการสร้างวัสดุตัดอกที่มีขนาดเล็กลงตามค่าออฟเซตที่ติดลบได้เช่นเดียวกัน

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ชาติ ตระการกุล. เทคโนโลยีซีเอ็นซี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2537.

มนูศักดิ์ จานทอง. การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิตร่วมกับอัตโนมัติโดยใช้ ARX. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

สาโรช พรวิจิตรจินดา. การประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์กราฟฟิกส์กับการควบคุมการทำงานของเครื่องซีเอ็นซี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.

ภาษาอังกฤษ

David F. Rogers & Alan Adams. Mathematical Elements For Computer Graphics. 2nd Edition. USA : McGraw-Hill, 1990.

David J. Kruglinski, Scot Wingo & George Shepherd. Programming Microsoft Visual C++. 5th Edition. USA : Microsoft Press, 1998.

Kate Gregory, Special Edition Using Visual C++ 6. USA : QUE, 1998.

Nanua Singh. Computer-Integrated Design And Manufacturing. USA : John Wiley & Sons, Inc, 1996.

Parasolid Technical Support Group. Parasolid Online Document V13.00.151. USA : Unigraphics Solutions Inc, 2001.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุกิจ วรรณโสภณกุล เกิดวันที่ 11 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2520 ที่อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย