การประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกบนพื้นฐานความหยาบผิวแบบ 3 มิติ ของการตัดเฉือนเสมือนจริงและพารามิเตอร์การฉีดพลาสติก

วีระชาติ เวชกามา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ปีการศึกษา 2561

ESTIMATION OF GLOSS FOR PLASTIC INJECTION PARTS BASED ON 3D SURFACE ROUGHNESS OF VIRTUAL MACHINING AND PLASTIC INJECTION PARAMETERS

Weerachart Wetchakama

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements

For The Degree of Master Engineering Program in Engineering Technology

Graduate School

Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2018

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกบนพื้นฐานความหยาบผิวแบบ 3 มิติของการตัดเฉือนเสมือนจริงและพารามิเตอร์การฉีดพลาสติก
โดย	วีระชาติ เวชกามา
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวิศวกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิโรช ทัศนะ

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิชิต สุขเจริญพงษ์)

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. .....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต สุขสวัสดิ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์)

..... กรรมการ

(ดร. ดอน แก้วดก)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิโรช ทัศนะ)

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY TNI

วีระชาติ เวชกามา : การประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกบนพื้นฐานความหยาบผิวแบบ 3 มิติของการตัดเฉือนเสมือนจริงและพารามิเตอร์การฉีดพลาสติก, อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิโรช ทัศนะ, 64 หน้า.

ความมันเงาเป็นหนึ่งในคุณสมบัติที่สำคัญของชิ้นส่วนพลาสติกโดยทั่วไปแล้วชิ้นส่วนพลาสติกมีแนวโน้มเติบโตสูงขึ้น เช่น ชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ปัจจุบันชิ้นส่วนพลาสติก ไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการพ่นสีหรือเคลือบสีหลังจากผ่านกระบวนการฉีดพลาสติก ความมันเงาของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีดพลาสติกจำเป็นต้องผลิตจากแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก โดยความมันเงาจะขึ้นอยู่กับอิทธิพลจาก 3 ปัจจัยหลัก คือ ความหยาบผิวของคาวิตี้แม่พิมพ์ คุณสมบัติทางเคมีของเม็ดพลาสติก และพารามิเตอร์การฉีดพลาสติก ซึ่งความหยาบผิวของคาวิตี้เป็นสิ่งสำคัญในการสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ต้องผ่านกระบวนการตัดเฉือนบนเครื่องกัดซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซนเตอร์ เพื่อให้ได้ความหยาบผิวที่เหมาะสมก่อนที่จะทำการผลิตแม่พิมพ์จึงต้องมีการประมาณค่าพารามิเตอร์การตัดเฉือน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกบนพื้นฐานวิธีโครงข่ายประสาทเทียม โดยพิจารณาค่าป้อนเข้าของค่าพารามิเตอร์การฉีดพลาสติก และค่าความหยาบผิวคาวิตี้แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกจากกระบวนการตัดเฉือนเสมือนจริงของกระบวนการกัดขึ้นรูปพื้นผิวด้วยวิธีพิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ พิกัดรูปร่างเรขาคณิตและการโก่งงอของดอกกัดบนเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน ผลการประมาณค่าความมันเงาจากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม เปรียบเทียบกับค่าความมันเงาของชิ้นงานที่วัดจริง พบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของความมันเงาอยู่ที่ 2.28 %

บัณฑิตวิทยาลัย ลายมือชื่อนักศึกษา .....

สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2561

WEERACHART WETCHAKAMA: ESTIMATION OF GLOSS FOR PLASTIC INJECTION PARTS BASED ON 3D SURFACE ROUGHNESS OF VIRTUAL MACHINING AND PLASTIC INJECTION PARAMETERS. ADVISOR: ASST. PROF. DR. WIROJ THASANA, 64 PP.

The gloss is one of the most important characteristics of plastic injection molding parts. In general, the finished plastic parts are a growing trend towards using in automotive parts, electronic appliance, etc. Nowadays, plastic injection parts do not need to be painted or coated after the injection molding processes. The gloss of the plastic injection molding process needs to consider the influence of the three main factors such as surface roughness of cavity, chemical properties of plastic and injection parameters, etc. The surface roughness of cavity and injection parameters are one of the most important characteristics of gloss. The gloss that occurs with the parts of plastic injection processes, the surface roughness of the plastic injection mold was considered. The cavity mold is machined on a CNC machining center. Therefore, in order to obtain the appropriate surface roughness before producing the actual cavity mold, it is important to consider the estimation of machining parameters. The objective of this research is to estimate of gloss for plastic injection parts based on the artificial neural network (ANN) method considering the input values of plastic injection parameters and 3D surface roughness of mold cavity from the virtual machining of the shape generation motion processes in milling operation based on kinetic motion deviations, cutting tools geometries, tools deflection and machining parameters. The shape generation motions with deviations are mathematically described by homogeneous transformation matrices 4x4 on 3-axis CNC machining center. The results of the gloss estimation by the ANN model compare with the actual measured found that the average error was 2.28 %

.

Graduate School Student's Signature .....

Field of Engineering of Technology Advisor's Signature .....

Academic Year 2018

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับคำปรึกษาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิโรช ทัศนะ ประธานกรรมการสอบ รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต สุขสวัสดิ์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าพระนครเหนือ กรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์ และดร. ดอน แก้วดก อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ รวมถึงอาจารย์ทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้ด้วย ที่คอยให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในทุกขั้นตอนของการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี เพื่อให้งานวิจัยฉบับนี้มีความเรียบร้อยสมบูรณ์

และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาและทุนวิจัยเพื่อพัฒนาผลงานวิจัย ขอบพระคุณพ่อ แม่ ครอบครัว และเพื่อน ๆ ทุกท่านทั้งผู้ที่กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนาม ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาและสนับสนุนในการทำงาน จนดำเนินงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

วีระชาติ เวชกามา

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY TNI

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญรูป ..... ฎ

บทที่

1 บทนำ 1
ที่มาและความสำคัญ 1
ความสำคัญของการวิจัย 3
วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3
ขอบเขตของการวิจัย 3
ผลที่คาดว่าจะได้รับ 4
แผนงานและระยะเวลาดำเนินการ 5
คำอธิบายศัพท์ 5

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 7
ระบบการตัดเฉือนเสมือนจริง 7
อนุกรมวิธานของเครื่องมือกลและการตัดเฉือนเสมือนจริง 8
กระบวนการตัดเฉือน 9
การจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการกัดขึ้นรูป 13
โมเดลการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่ 13
การหาค่าที่เหมาะสม 20
โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks: ANN) 20
การประมาณค่าที่ดีที่สุดแบบ MZF 22
สมการสำหรับการประมาณค่าความหยาบผิวแบบ 2 มิติ 23
ความหยาบผิวแบบ 2 มิติ 23

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
2	ค่าทฤษฎีของความหยาบผิว	24
	ค่ายอดสูงสุดของโปรไฟล์	24
	ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยเลขคณิตของโปรไฟล์	25
	ค่าเฉลี่ยกำลังสองของโปรไฟล์	26
	สมการสำหรับการประมาณค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติ	26
	ค่ายอดสูงสุดของพื้นผิว	26
	ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยเลขคณิตและค่าความสูงเฉลี่ยกำลังสองของพื้นผิว	27
	การวัดความมันเงา	28
	การทบทวนวรรณกรรม	29
3	วิธีดำเนินการวิจัย	32
	กระบวนการดำเนินการวิจัย	32
	การสร้างโมเดลการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของกระบวนการกัดขึ้นรูป	34
	โมเดลการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของกระบวนการกัดขึ้นรูป	34
	โมเดลแรงการตัดเฉือนของดอกกัดบอลโนสเอ็นมิล	37
	โมเดลการโก่งงอของดอกกัด	38
	วิธีการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการกัดขึ้นรูป	38
	การจำลองการประมาณค่าความหยาบผิว 3 มิติ	40
	การกำหนดกำหนดพารามิเตอร์การตัดเฉือนและระดับการทดลอง	40
	การออกแบบการทดลอง Orthogonal Array, L9 (3^3)	41
	วิธีการประมาณค่าความมันเงาด้วยวิธี ANN	41
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	44
	การเปรียบเทียบผลการจำลองความหยาบผิว	44
	การออกแบบการทดลอง Orthogonal Array, L9 (3^3)	46
	ผลของความหยาบผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ	47
	การวิเคราะห์ผลการจำลองค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติ	48

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
4	การยืนยันผลค่าความหยาบผิวของโมเดลการจำลองการตัดเฉือน	50
	ผลการประมาณค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติที่ดีที่สุด	52
	ผลการประมาณค่าความมันเงาที่ดีที่สุดด้วยวิธี ANN	52
	การกำหนดรูปแบบ ANN	52
	การประมาณค่าความมันเงาที่ดีที่สุดด้วยวิธี ANN	54
5	บทสรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	57
	สรุปผลการทดลอง	57
	การประมาณค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติ	57
	การประมาณค่าค่าความมันเงาที่ดีที่สุด	57
	อภิปรายผล	58
	ข้อเสนอแนะ	58
บรรณานุกรม		60
ประวัติย่อผู้วิจัย		64

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY TNI

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

1.1 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินงานปี พ.ศ. 2561 – 2562 5

2.1 เมทริกซ์การเคลื่อนที่แนวเส้นตรงและการเคลื่อนที่แบบหมุน 19

2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 31

3.1 ความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางจากมาตรฐาน ISO 230-1:2012 38

3.2 การออกแบบปัจจัยควบคุมและระดับการทดลอง 43

3.3 รูปแบบการทดลองแบบ Orthogonal Array, L9 (3^3) 43

4.1 การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวทางทฤษฎีและค่าจากการจำลองที่ไม่ได้พิจารณาการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และการโก่งงอของดอกกัด 48

4.2 รูปแบบการทดลองแบบ Orthogonal Array, L9 (3^3) 50

4.3 ค่าความหยาบผิวของการจำลองพื้นผิวที่พิจารณาค่าการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และการโก่งงอของดอกกัด 51

4.4 ผลลัพธ์ของการจำลองค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติ และค่า S/N ratio 52

4.5 ปัจจัยพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าผลตอบสนอง S/N ratio 52

4.6 ผลของความหยาบผิวที่วัดได้เปรียบเทียบกับโมเดลการจำลองการตัดเฉือน 55

4.7 ผลการประมาณค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติพร้อมผลของความมันเงาที่ระดับปัจจัยควบคุมที่ส่งผลต่อความมันเงา 56

4.8 ผลของค่า MSE แต่ละรูปแบบโครงสร้าง 58

4.9 ผลการประมาณค่าความมันเงาจากแบบจำลอง ANN กับชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน 59

4.10 ผลการประมาณค่าความมันเงาจากแบบจำลอง ANN กับชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ 59

สารบัญรูป

รูป หน้า

1.1 อันดับสินค้าการส่งออกของประเทศไทยในปี 2559 ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศกระทรวงพาณิชย์ 2

2.1 อนุกรมวิธานของการเชื่องโยงหน้าที่การทำงานของระบบ VMT และ Vmach 8

2.2 แสดงรูปแบบเรขาคณิตของดอกกัดเอ็นมิลและกระบวนการกัด 11

2.3 แสดงมุมการกัดแบบ (a) กัดตาม (down milling) (b) กัดสวน (up milling) 13

2.4 องค์ประกอบของระบบการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการกัดขึ้นรูป 14

2.5 ปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของการกัดชิ้นงาน 15

2.6 รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของเครื่องมือกล 16

2.7 แผนภาพเชน-ลิ้งก์ ของการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่ 16

2.8 โครงสร้างและการทำงานของ ANN 21

2.9 ลักษณะพารามิเตอร์หลักของความหยาบผิว 24

2.10 โมเดลในอุดมคติของความหยาบผิวแบบ 2 มิติ 25

2.11 นิยามแอมพลิจูดพารามิเตอร์ของ Rz (JIS B 0601:2001) 26

2.12 นิยามแอมพลิจูดพารามิเตอร์ของ Ra (JIS B 0601:2001) 26

2.13 พิกัดสำหรับการวัดค่าความหยาบผิว 27

2.14 นิยามของความหยาบผิว *Sz* 28

2.15 หลักการของการวัดความมันเงา 29

2.16 มุมที่ใช้วัดความเงา (Gloss angle) 30

3.1 ลำดับขั้นตอนการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติก 35

3.2 แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกและแม่พิมพ์อินเสิร์ทฝั่งคาวิตี้ (ซ้าย) และคอร์ (ขวา) 35

3.3 แผนผังการเคลื่อนที่แนวป้อน (feed motion) และการเคลื่อนที่หลัก (main motion) ของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน 37

3.4 แผนผังการจำลองผิวชิ้นงานของกระบวนการกัดขึ้นรูป 41

3.5 ขนาดร่องการกัดขึ้นรูปที่พิจารณาจุดสัมผัสของมุมดอกกัด 42

3.6 ตัวอย่างการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงที่พิจารณาการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และการโก่งงอ 42

3.7 โครงสร้างของ ANN ในงานวิจัย 44

3.8 แผนผังการประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติก 45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป หน้า

4.1 พื้นผิวการจำลองที่ไม่ได้พิจารณาการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และการโก่งงอของดอกกัด 49

4.2 พื้นผิวการจำลองที่พิจารณาการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และการโก่งงอของดอกกัด 50

4.3 ผลกระทบหลักของปัจจัยควบคุมที่ส่งผลต่อ a) ค่าเฉลี่ยของความหยาบผิว b) ค่าเฉลี่ยของ S/N ratio 53

4.4 ตำแหน่งการวัดความหยาบผิวแบบ 2 มิติของแม่พิมพ์ 54

4.5 กราฟเปรียบเทียบค่าความมันเงาระหว่างค่าความมันเงาจากแบบจำลอง ANN กับค่าความมันเงาที่วัดจริงของชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน 60

สถาบันการอาชีวศึกษาไทย-ญี่ปุ่น THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY TNI

บทที่ 1
บทนำ

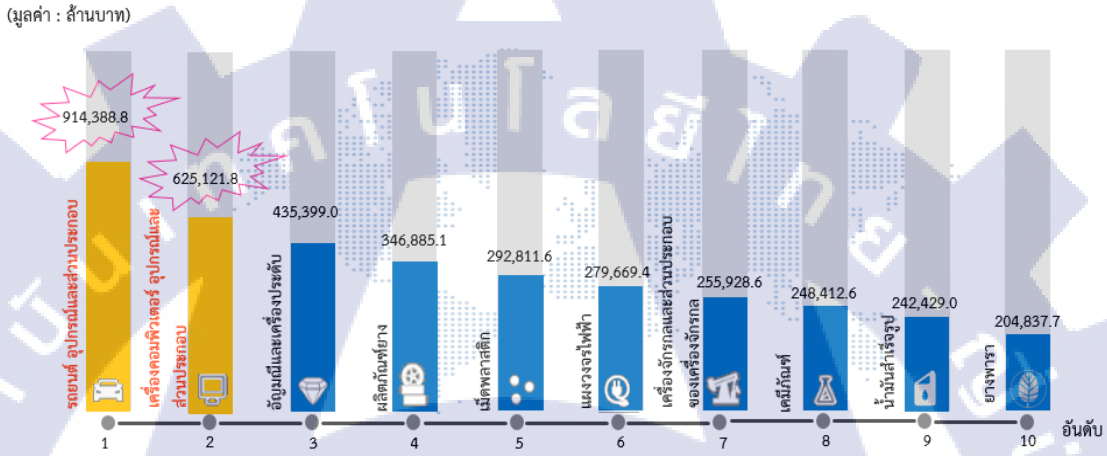
1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันเทคโนโลยีและนวัตกรรมต่าง ๆ ได้มีการพัฒนาเพื่อตอบสนองความต้องการและอำนวยความสะดวกในการดำรงชีวิตของมนุษย์ เทคโนโลยีได้มีความก้าวหน้าพัฒนาอย่างรวดเร็วจนสามารถเปลี่ยนเป็นยุคอุตสาหกรรม 4.0 ที่พัฒนาเทคโนโลยีสื่อสารกับเครื่องจักรและระบบการผลิตอัจฉริยะได้อย่างสิ้นเชิง อาทิเช่น เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์ช่วยคิดและวิเคราะห์สิ่งต่าง ๆ ด้วยเหตุและผลจนสามารถตอบโต้การสนทนาเรียนรู้และจดจำสิ่งต่าง ๆ ได้อย่างลึกซึ้งและเทคโนโลยีเสมือนจริง (Virtual Reality: AR) ที่ผสมผสานเทคโนโลยีการมองเห็นกับโลกของความ เป็นจริงเข้ากับการมองของมนุษย์ปกติและเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสิ่ง (Internet of Things: IoT) และเทคโนโลยีหุ่นยนต์ (Robots) เป็นต้น สำหรับในภาคอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนไฟฟ้าและอิเล็คทรอนิกส์และชิ้นส่วนอวกาศยานจำเป็นต้องพึ่งเครื่องจักรกลในการผลิตและจำลองการผลิตจาก “จริง” ไป “เสมือนจริง” โดยความช่วยเหลือของคอมพิวเตอร์ทางด้านเทคนิคการจำลองทางกายภาพของระบบการผลิตเสมือนจริงและเลียนแบบพฤติกรรมของระบบกรรมวิธีการผลิตก่อนที่จะไปทำการผลิตจริงเพื่อลดจำนวนของการทดสอบและทดลองในโรงฝึกปฏิบัติงาน เพื่อให้มีความถูกต้องแม่นยำและเที่ยงตรง [1] ซึ่งอุตสาหกรรมดังกล่าวจำเป็นต้องมีการปรับตัวเพื่อให้ทันต่อการพัฒนากระบวนการผลิตที่รองรับกับเทคโนโลยีดังกล่าวอันจะนำไปสู่การลดขั้นตอนการผลิตและเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์

อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์สำหรับในประเทศไทยนั้นก็ได้เป็นศูนย์กลางการผลิตในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งมีส่วนช่วยในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจการส่งออกผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนต่าง ๆ สร้างมูลค่าให้กับประเทศอย่างมาก โดยข้อมูลสินค้าส่งออกสำคัญของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2560 พบว่ารถยนต์อุปกรณ์และส่วนประกอบมีสัดส่วนและมูลค่าสูงที่สุด รองลงมาคือเครื่องคอมพิวเตอร์อุปกรณ์และส่วนประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 จะเห็นว่าสินค้าดังกล่าวส่วนใหญ่ล้วนแต่เป็นชิ้นส่วนที่ทำมาจากพลาสติกหรือมีพลาสติกเป็นองค์ประกอบทั้งนั้น [2] จึงถือได้ว่ากระบวนการฉีดและขึ้นรูปพลาสติกเป็นกระบวนการหลักในการผลิตสินค้าและผลิตภัณฑ์ต่างๆ ดังนั้นอุตสาหกรรมการฉีดและขึ้นรูปพลาสติกจะยังคงมีแนวโน้มและอัตราการผลิตที่สูงขึ้นในอนาคต

เมื่อเร็ว ๆ นี้รัฐบาลได้มีการกำหนดนโยบายการพัฒนาประเทศไปสู่ยุคอุตสาหกรรม 4.0 [3] ซึ่งเป็นการเตรียมความพร้อมและการปรับตัวให้ทันกับเทคโนโลยีปัจจุบัน และภาคอุตสาหกรรมการผลิตในประเทศไทยจำเป็นต้องนำเอาเทคโนโลยีสมัยใหม่แบบต่าง ๆ เข้ามาประยุกต์ใช้อย่างเหมาะสมในแต่ละชนิดอุตสาหกรรมเพื่อประโยชน์ในการเพิ่มประสิทธิภาพทางการผลิตและเพิ่มมูลค่าให้กับ

ผลิตภัณฑ์ ดังนั้นเพื่อเป็นการตอบสนองความต้องการของลูกค้าและเพิ่มความสามารถในการแข่งขัน ชิ้นงานฉีดพลาสติกจึงจำเป็นต้องมีการออกแบบที่มีลักษณะพิเศษ พื้นผิวภายนอกมีความสวยงามมันเงา และมีสีสันเพื่อสร้างความแตกต่างให้กับผลิตภัณฑ์ ซึ่งถ้าหากว่าสามารถทำให้ชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ผ่านกระบวนการฉีดมีลักษณะพื้นผิวภายนอกที่สวยงามไม่มีข้อบกพร่องตั้งแต่เริ่มแรกผลิตชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ก็จะนำไปสู่การลดขั้นตอนของกระบวนการเคลือบสีและขั้นตอนการพ่นสีทำให้ต้นทุนในการผลิตย่อมลดลงได้ด้วย



รูปที่ 1.1 อันดับสินค้าการส่งออกของประเทศไทยในปี 2559 ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ [4]

ชิ้นงานฉีดพลาสติกของชิ้นส่วนยานยนต์และอิเล็กทรอนิกส์จะผลิตได้ตามขนาด รูปร่าง และข้อกำหนดที่ต้องการนั้นจำเป็นต้องพึ่งแม่พิมพ์ (plastic injection mold) สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติก ซึ่งเป็นเครื่องมือหลักในการผลิต ในงานฉีดพลาสติกสิ่งที่ต้องการมากที่สุดคือรูปลักษณ์ภายนอกต้องสวยงามและต้องมีความมันเงาไม่มีข้อบกพร่อง ซึ่งมีอิทธิพลมาจาก 3 ปัจจัยหลักคือ ความหยาบผิวของคาวิตี้แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก คุณสมบัติทางเคมีของเม็ดพลาสติก และพารามิเตอร์การฉีดพลาสติก [5] ซึ่งความหยาบผิว ของคาวิตี้เป็นสิ่งสำคัญในการสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก โดยต้องผ่านกระบวนการตัดเฉือนบนเครื่องกัดซีเอ็นซี แมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ โดยมีการกำหนดพารามิเตอร์การตัดเฉือน การเลือกเครื่องมือตัดและการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องจักรให้เหมาะสม ซึ่งจากเทคโนโลยีที่ผ่านมาการสร้างความหยาบผิวของคาวิตี้นั้นทำบนพื้นฐานของการศึกษาจากคู่มือประจำเครื่องและการลองผิดลองถูกเพื่อให้ได้ต้นแบบผลิตภัณฑ์ ทำให้ระยะเวลาของการผลิตคาวิตี้ยาวนาน ซึ่งวิธีดังกล่าวมีข้อเสียคือไม่สามารถรับประกันพารามิเตอร์

ต่าง ๆ ของการตัดเฉือนที่นำไปสู่คุณภาพที่กำหนดของคาวิตี้แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกได้ ในปัจจุบันได้มีนักวิจัยศึกษาคุณภาพความหยาบผิวของคาวิตี้ก่อนการผลิตจริง [6-8] เพื่อลดระยะเวลาและเพิ่มความถูกต้องแม่นยำ และเที่ยงตรงดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตามก็ยังไม่มีคำตอบที่ชัดเจนในการศึกษานี้

การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกจะต้องหาพารามิเตอร์การฉีดจากคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering: CAE) สำหรับทำการวิเคราะห์ตรวจสอบปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีดพลาสติกเช่น ใช้ในการจำลองการฉีดและวิเคราะห์การไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานฉีดอาทิเช่น การโก่งงอ (warpage) รอยยุบตัว (sink marks) ปัญหาการฉีดไม่เต็ม (short shot) เป็นต้น แต่เครื่องมือดังกล่าวยังไม่สามารถวิเคราะห์หรือประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกได้ ดังนั้นจากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงศึกษาการประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกก่อนการผลิตชิ้นงานจริง บนพื้นฐานความหยาบผิวคาวิตี้และพารามิเตอร์การฉีดพลาสติก เพื่อนำไปสู่การแก้ปัญหาในงานผลิตชิ้นงานฉีดพลาสติกก่อนที่จะผลิตชิ้นงานจริง ซึ่งส่งผลให้ผลิตภาพของการผลิตเพิ่มขึ้นและต้นทุนการผลิตลดลง

1.2 ความสำคัญของการวิจัย

1.2.1 สามารถเพิ่มความมันเงาที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานฉีดพลาสติกสำเร็จรูป

1.2.2 สามารถลดการใช้เวลา แรงงานงานคน ในการตรวจสอบและแก้ไขกระบวนการฉีดพลาสติกและทำแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.3.1 เพื่อประมาณค่าความหยาบผิวคาวิตี้ของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกบนพื้นฐานของการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงของกระบวนการกัดพื้นผิวด้วยวิธีพิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์พิกัดรูปร่างเรขาคณิตและการโก่งงอของดอกเอ็นมิลล์บอลโน้ส (end mill ball nose)

1.3.2 เพื่อประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกบนพื้นฐานหลักการวิธีโครงข่ายประสาทเทียมแบบการแพร่ย้อนกลับ (back propagation) โดยพิจารณาค่าป้อนเข้าของความหยาบผิวคาวิตี้แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกจากกระบวนการตัดเฉือนเสมือนจริงของกระบวนการกัดขึ้นรูปพื้นผิว

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

โครงงานวิจัยนี้มีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับการศึกษาพิกัดความคลาดเคลื่อนและค่าความหยาบผิวของชิ้นงานแบบ 3 มิติบนพื้นฐานจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงสำหรับกระบวนการกัดโดยพิจารณา

การเบี่ยงเบน คิเนเมติกส์ พิกัดรูปร่างเรขาคณิตและการโก่งงอของดอกเอ็นมิลล์บอลโน้ส (end mill ball nose) ซึ่งผู้วิจัยได้จำกัดขอบเขตการศึกษาไว้ดังนี้

1.4.1 การประมาณค่าความหยาบผิวคาวิตี้ของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกบนพื้นฐานการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงของกระบวนการกัดพื้นผิวบนเครื่องกัดซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ 3 แกนขนาดเล็ก ยี่ห้อ Makino แบบรุ่น S33 ด้วยวิธีพิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์แบบโฮโมจีเนียสทรานสฟอร์มเมชั่นเมทริกซ์ (homogeneous transformation matrics) พิกัดรูปร่างเรขาคณิตและการโก่งงอของดอกเอ็นมิลล์บอลโน้ส (end mill ball nose) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm

1.4.2 การยืนยันผลค่าความหยาบผิวที่ได้จากการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงเปรียบเทียบกับค่าความหยาบผิวจริงของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่วัดจากเครื่องวัดความหยาบผิว

1.4.3 การยืนยันผลค่าความหยาบผิวที่ได้จากการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงเปรียบเทียบกับค่าความหยาบผิวจริงของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่วัดจากเครื่องวัดความหยาบผิว (surface roughness tester) ยี่ห้อ Mitutoyo แบบรุ่น SJ-210

1.4.4 การยืนยันรูปแบบของจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงของกระบวนการกัดพื้นผิวใช้คุณสมบัติของแม่พิมพ์วัสดุ AL7075T651

1.4.5 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการยืนยันผลค่าความหยาบผิวจากการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงคือแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกสำหรับทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์เป็นวัสดุ S50C

1.4.6 การประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกพิจารณาบนพื้นฐานหลักการวิธีโครงข่ายประสาทเทียมแบบการแพร่ย้อนกลับ (back propagation) โดยพิจารณาค่าป้อนเข้าของค่าพารามิเตอร์การฉีดพลาสติกจากงานวิจัยที่นำเสนอโดยกฤช ฉายสุริยะกุล [9] และความหยาบผิวคาวิตี้แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกจากกระบวนการตัดเฉือนเสมือนจริงของกระบวนการกัดขึ้นรูปพื้นผิว

1.4.7 การยืนยันผลการประมาณค่าความมันเงาเปรียบเทียบกับค่าความมันเงาที่ได้จากการวัดความมันเงาจริงของชิ้นงานฉีดพลาสติกจากงานวิจัยที่นำเสนอโดยกฤช ฉายสุริยะกุล [9]

1.4.8 ระยะเวลาในงานวิจัยนี้ดำเนินการตั้งแต่เดือนเมษายน พ.ศ. 2561 ถึง เมษายน พ.ศ. 2562

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ชิ้นงานฉีดพลาสติกที่มีความมันเงาและถูกต้องแม่นยำเที่ยงตรงก่อนการผลิตจริง

1.5.2 ลดเวลาความสูญเสียในระหว่างกระบวนการผลิตจากการต้องหยุดเครื่องเพื่อแก้ไขปรับตั้งค่าพารามิเตอร์

1.5.3 ลดขั้นตอนเวลาในการลองผิดลองถูกก่อนผลิตจริงและลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ

1.5.4 เกิดประสิทธิภาพในการใช้งานของเครื่องฉีดพลาสติก

1.5.5 เพิ่มศักยภาพเทคโนโลยีการทำแม่พิมพ์คาวิตี้และการฉีดชิ้นงานพลาสติกให้สูงขึ้น

1.6 แผนงานและระยะเวลาดำเนินการ

ตารางที่ 1.1 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินงานปี พ.ศ. 2561 – 2562

ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน		ปี พ.ศ.															
		ปี 2561												ปี 2562			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
1.	ศึกษาข้อมูลทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง																
2.	สอบหัวข้อโครงร่างและอนุมัติ																
3.	ออกแบบระเบียบวิธีวิจัย																
4.	เตรียมอุปกรณ์เครื่องมือสำหรับงานวิจัย																
5.	สร้างโมเดลการตัดเฉือนเสมือนจริง																
6.	เขียนโปรแกรม Virtual Machining ด้วย MATLAB																
7.	ประมาณค่าความมันเงาด้วย ANN																
8.	ปฏิบัติการทดลองและเก็บข้อมูล																
9.	วิเคราะห์และยืนยันการทดลองเปรียบเทียบกับชิ้นงานจริง																
10.	นำเสนอผลงานทางวิชาการ																
11.	สรุปผลและจัดทำวิทยานิพนธ์																
12.	สอบวิทยานิพนธ์																

1.7 คำอธิบายศัพท์

1.7.1 **เครื่องกัดซีเอ็นซีแมชชีนเซ็นเตอร์ 3 แกน** หมายถึงเครื่องกัดที่ควบคุมเชิงตัวเลขด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ควบคุมการเคลื่อนที่ 3 แกน คือ X, Y, และแกน Z

1.7.2 **การตัดเฉือนเสมือนจริง** หมายถึง การประยุกต์ใช้ระบบคอมพิวเตอร์จำลองสถานการณ์จริงทางกายภาพที่แสดงออกมาเป็นกราฟฟิกเช่น การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการสร้างภาพ 3 มิติ การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยแสดงภาพกราฟฟิกของผิวชิ้นงานที่ได้จากการกัดโดยป้อนปัจจัยนำเข้า [10]

1.7.3 **คิเนเมติกส์ (Kinematics)** หมายถึง กลศาสตร์แขนงหนึ่งที่ศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของวัตถุ ซึ่งได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง เวลา ความเร็ว ความเร่ง โดยไม่พิจารณาถึงแรงที่มากระทำหรือสาเหตุของการเคลื่อนที่ [11]

1.7.4 **ความมันเงา (Gloss)** คือ สมบัติการสะท้อนแสงบนพื้นผิวของวัตถุตามทฤษฎีกฎสะท้อนแสงกับความเงาและความมัว วัตถุที่มีลักษณะมีความเงาสูง (high gloss) จะสามารถสะท้อน

ลำแสงโดยมีมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน แต่ถ้าลำแสงที่สะท้อนออกมามีความกระจัดกระจาย วัตถุก็จะมีลักษณะด้านไปจนถึงกึ่งเงา (matte to semi-gloss) [12]

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกบนพื้นฐานความหยาบผิวแบบ 3 มิติ ด้วยการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงของกระบวนการกัดพื้นผิวโดยวิธีพิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ พิกัดรูปร่างเรขาคณิตและการโก่งงอของดอกเอ็นมิลล์บอลโน้ส เพื่อประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกบนพื้นฐานหลักการวิธีโครงข่ายประสาทเทียมแบบการแพร่ย้อนกลับ ซึ่งมีทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

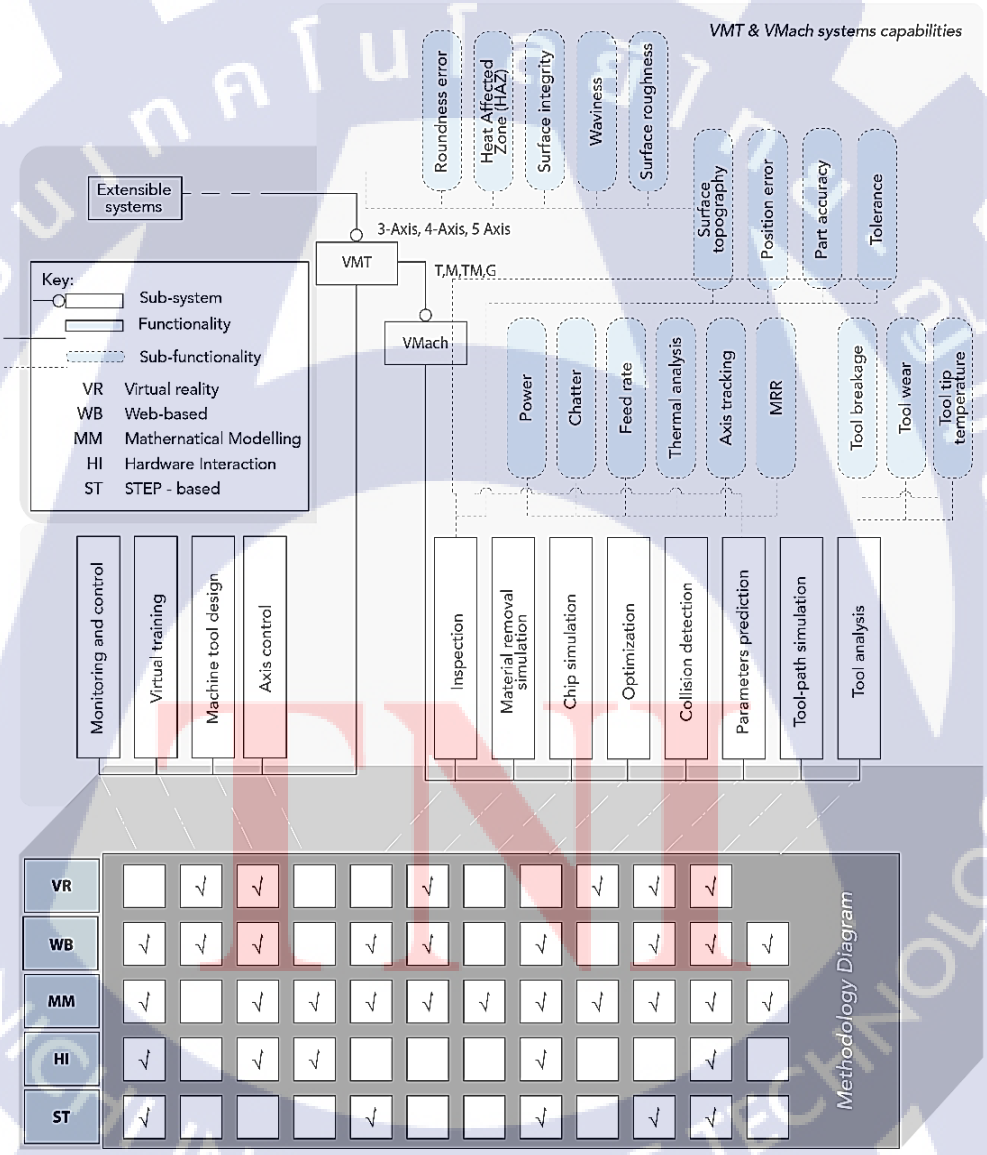
- ระบบการตัดเฉือนเสมือนจริง
- อนุกรมวิธานของเครื่องมือกลและการตัดเฉือนเสมือนจริง
- กระบวนการตัดเฉือน
- การจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการกัดขึ้นรูป
- โมเดลการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่
- การหาค่าที่เหมาะสม
- สมการสำหรับการประมาณค่าความหยาบผิวแบบ 2 มิติ
- สมการสำหรับการประมาณค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติ
- การวัดความมันเงา
- การทบทวนวรรณกรรม

2.1 ระบบการตัดเฉือนเสมือนจริง [13]

ระบบการตัดเฉือนเสมือนจริง คือ ระบบการตัดเฉือนที่เกี่ยวข้องกับการใช้เครื่องมือกลสำหรับการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ด้วยการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์และซอฟท์แวร์ในการผลิต เพื่อจำลองพฤติกรรมและข้อผิดพลาดของสภาพแวดล้อมจริงในระบบเสมือนจริงของการผลิต การจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงจึงเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์อย่างมากสำหรับการผลิตที่ช่วยให้การผลิตถูกต้องตั้งแต่ครั้งแรกโดยไม่จำเป็นต้องมีการทดสอบทางกายภาพในการผลิต ปัจจุบันระบบเสมือนจริงได้พัฒนาและนำไปใช้ในการผลิตเช่น เครื่องมือกลเสมือนจริง (virtual machine tools) การตัดเฉือนเสมือนจริง (virtual machining) การประกอบเสมือนจริง (virtual assembly) เครื่องมือตัดเสมือนจริง (virtual tooling) และการทำต้นแบบเสมือนจริง (virtual prototype) เป็นต้น

2.2 อนุกรมวิธานของเครื่องมือกลเสมือนจริงและการตัดเฉือนเสมือนจริง

การจำลองในระบบการผลิตนั้น สามารถแบ่งหมวดหมู่ออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ ตามกรอบสภาพแวดล้อมของการผลิตที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสามารถจำแนกบนพื้นฐานเมทริกซ์ระบบการผลิตย่อยได้ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงอนุกรมวิธานของการเชื่องโยงหน้าที่การทำงานของระบบเสมือนจริง โดยที่อนุกรมวิธานนี้มุ่งเน้นไปที่เครื่องมือกลเสมือนจริง (Virtual Machine Tool: VMT) และการตัดเฉือนเสมือนจริง (Virtual Machining: Vmach) ซึ่งทั้งสองส่วนนี้สามารถเชื่อมโยงไปยังโดเมนของระบบการผลิตแบบเสมือนจริง การประกอบเสมือนจริงและการทำต้นแบบเสมือนจริง



รูปที่ 2.1 อนุกรมวิธานของการเชื่องโยงหน้าที่การทำงานของระบบ VMT และ Vmach [13]

ในอนุกรมวิธานจะแบ่งออกเป็น 3 ชั้น ประกอบด้วย ชั้นระบบย่อย (sub-system) ชั้นฟังก์ชั่น (functionality) และชั้นฟังก์ชั่นย่อย (sub-functionality) โดยที่ชั้นระบบย่อย (sub-system) คือชั้นที่ประกอบไปด้วยส่วนของระบบเสมือนจริงชนิดต่าง ๆ เช่น เครื่องมือกลเสมือนจริง (VMT) การตัดเฉือนเสมือนจริง (Vmach) ส่วนชั้นฟังก์ชั่น (functionality) คือ ชั้นฟังก์ชันการทำงานของระบบซึ่งอาจประกอบไปด้วยฟังก์ชันย่อย โดยแต่ละฟังก์ชั่นย่อยมีลำดับหน้าที่เกี่ยวพันกับโดเมนเป้าหมายและขอบเขตของคุณลักษณะที่แตกต่างกัน โดเมนเครื่องมือกลเสมือนจริง (VMT) จะรวมถึงการวิเคราะห์การจำลองเครื่องมือกลในชุดควบคุมซีเอ็นซี (Computer Numerical Control: CNC) สำหรับงานวิจัยนี้จะอยู่ในส่วนโดเมนการตัดเฉือนเสมือนจริง (Vmach) โดยจะมุ่งเน้นการวิเคราะห์กระบวนการตัดเฉือน เช่น การกัด การกลึง และงานเจียร เป็นต้น ซึ่งมีการวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ เช่น การประมาณค่าแรงกระทำ อัตราขจัดเนื้อวัสดุ ค่าความคลาดเคลื่อนของการตัดเฉือน เวลาในการตัดเฉือน อัตราป้อน อุณหภูมิ เป็นต้น ส่วนระบบที่อยู่ภายใต้โดเมนเครื่องมือกลเสมือนจริง (VMT) นั้นจะสามารถจำลองฟังก์ชั่นได้มากขึ้น เช่น การควบคุมและตรวจสอบความเสมือน (virtual monitoring and control) การสอนความเสมือน (virtual training) การออกแบบเครื่องมือกล (machine tool design) และแกนควบคุมฟังก์ชั่นภายใต้โดเมนการตัดเฉือนเสมือนจริง (Vmach) เช่น การจำลองอัตราขจัดเนื้อวัสดุ (material removal simulation) การตรวจสอบการชน (collision detection) การประมาณการพารามิเตอร์ (parameters prediction) การวิเคราะห์การสึกหรอและค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัด (tool wear analysis and tool breakage analysis)

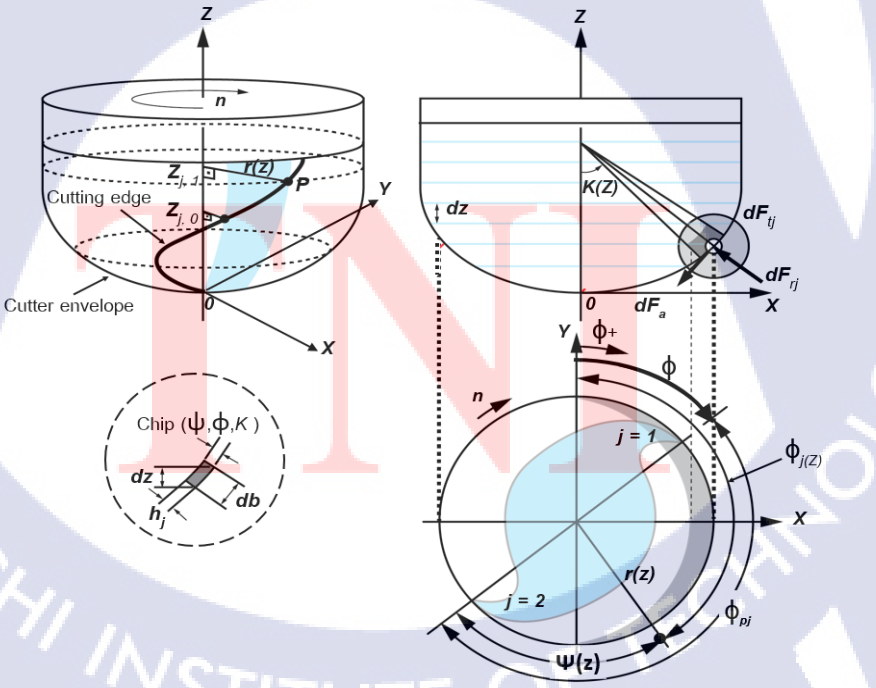
2.3 กระบวนการตัดเฉือน

กระบวนการตัดเฉือน คือการสร้างรูปทรงของชิ้นงานที่ต้องการโดยการตัดเฉือนเนื้อวัสดุออก โดยไม่มีการเปลี่ยนรูปวัสดุทางโครงสร้างภายใน (microstructure) ซึ่งจะใช้เครื่องมือตัดหรือมีดตัด (cutting tool) รูปทรงแบบต่าง ๆ โดยมีองค์ประกอบสำคัญที่เกี่ยวข้องในกระบวนการตัดเฉือน คือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้วยแรงเฉือน (shear deformation) ทำให้เกิดเศษตัด (chip) เมื่อเศษตัดถูกกัดออกจากชิ้นงานจะเกิดผิวชิ้นงานใหม่ ซึ่งกระบวนการตัดเฉือนนี้ใช้ในการผลิตชิ้นงานโลหะให้มีรูปร่างต่าง ๆ ซึ่งสามารถจำแนกประเภทการตัดเฉือนได้ 3 แบบ คือ การกลึงขึ้นรูป (turning processes) เช่น การกลึงปอก การกลึงปาดหน้า การกลึงเกลียวทั้งเกลียวในและเกลียวนอก การคว้านขึ้นรูป เป็นต้น และการกัดขึ้นรูป (milling processes) เช่น การกัดผิวหน้า (Face milling) การกัดบ่า การกัดร่อง การกัดตามรูปร่าง เป็นต้น และกระบวนการตัดเฉือนอื่น ๆ เช่น การขัดผิวรูด้านใน (honing) การแทงขึ้นรูป (broaching) การทำฟันเฟือง (gear cutting) เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้นี้จะกล่าวถึงและเน้นไปที่กระบวนการตัดเฉือนของงานกัดขึ้นรูป

งานกัดขึ้นรูป มีลักษณะการตัดเฉือนโดยให้เครื่องมือตัดหรือดอกกัด (milling cutter) หมุนรอบตัวเองและเคลื่อนที่ด้วยอัตราป้อนสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน เพื่อทำการตัดฉือนทำให้เกิดระนาบของพื้นผิวใหม่ ซึ่งการกัดมีสองประเภทใหญ่ ๆ คือ การกัดแนวนอน (horizontal milling processes) และการกัดแนวตั้ง (vertical milling processes) โดยในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่กระบวนการกัดผิวหน้าในแนวตั้งด้วยเครื่องมือกลซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์แบบ 3 แกน ที่สามารถประยุกต์ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการตัดเฉือนพื้นผิวคาวิตี้ของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก สำหรับประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติก ซึ่งในกระบวนการตัดเฉือนนี้จะต้องพิจารณาแรงในการตัดเฉือนที่ส่งผลต่อความหยาบพื้นผิวคาวิตี้ของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

2.3.1 โมเดลแรงการตัดเฉือนของดอกกัดเอ็นมิล [14]

ดอกกัดทั่วไปจะมีร่องฟันคมตัด (flute) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งมีระบบพิกัดแทนด้วยแกน XYZ โดยทิศทาง X และ Y จะแทนทิศทางในแนวตั้งฉากกับระยะป้อนของการตัดเฉือนของ โดยให้สัญลักษณ์ D, R, R_r, R_z, α_1, α_2 และ H คือ พารามิเตอร์รูปทรงเรขาคณิตที่ใช้อธิบายลักษณะดอกกัดเอ็นมิล และ M_z, N_z, M_r และ N_r คือพารามิเตอร์รูปทรงเรขาคณิตที่ได้คำนวณและอธิบายใน [15] แรงในการการตัดเฉือนในร่องฟันที่ตำแหน่งมุมการหมุนตัด (φ) สามารถแสดงด้วยรูปแบบโมเดลกลไกแบบลัมพ์ (lumped mechanism model: LMM) ดังแสดงในสมการที่ 1



รูปที่ 2.2 แสดงรูปแบบเรขาคณิตของดอกกัดเอ็นมิลและกระบวนการกัด

$$F_{T,i,j}(\varphi) = K_T h_{i,j}(\varphi) b_{i,j}$$
$$F_{R,i,j}(\varphi) = K_R h_{i,j}(\varphi) b_{i,j} \quad (1)$$
$$F_{A,i,j}(\varphi) = K_A h_{i,j}(\varphi) b_{i,j}$$

และ

$$h_{i,j}(\varphi) = h^c{}_{i,j}(\varphi) \sin k(z)$$
$$b_{i,j} = z_{i,j} / \sin k(z) \quad (2)$$

โดยที่ K_T, K_R, K_A, คือ สัมประสิทธ์ของแรงตัดในเส้นสัมผัสวงกลม รัศมี และทิศทางในแนวแกนตามลำดับ

$h_{i,j}(\varphi)$ และ Z เป็นความหนาของเศษที่ยังไม่เกิดการตัดเฉือนที่มุมของการตัดเฉือนขณะที่ทำการตัดเฉือน และมุมหมุนของดอกกัดเอ็นมิลจะสัมพันธ์กับแกนส่วนประกอบ j_{th} ของ i_{th} ร่องฟัน ตามลำดับ และเพื่อความสะดวกในการคำนวณแรงตัด ขอบคมตัดจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อยของแกนคมตัดที่มีความยาวเทียบเท่าความยาวแกน ดังนั้นเพื่อความสะดวกของงานวิจัยนี้จึงแทนความยาวแกนด้วย j_{th} เอลิเมนต์ และจำนวนร่องฟันแทนด้วย i_{th} ที่เป็นสัญญลักษณ์ของ $z_{i,j}$ ซึ่ง $z_{i,j} = z_{i,k}$ (k = 1, 2, ...) คือ ผลรวมแรงตัดทั้งหมดตามแนวแกนตามองค์ประกอบของดอกกัดเอ็นมิลที่ตัดเฉือนบางๆ จากด้านล่างของร่องฟันไปจนถึงความลึกตามแนวแกนสุดท้ายของการตัด การกระจายของแรงตัดที่เกิดขึ้นโดยแกน j_{th} เอลิเมนต์ของร่องฟันที่ i_{th} ที่ตำแหน่งพิกัดเอลิเมนต์ P ที่แสดงดังรูปที่ 2.3 ด้วยมุมการหมุนตัด (φ) ของดอกกัดเอ็นมิลสามารถแสดงด้วยสมการที่ 1 หรือ โมเดลกลไกแบบคู่ (Dual Mechanism Model: DMM) ดังสมการที่ 3

$$F_{T,i,j}(\varphi) = K_{Tc} h_{i,j}(\varphi) b_{i,j} + K_{Te} b_{i,j}$$
$$F_{R,i,j}(\varphi) = K_{Rc} h_{i,j}(\varphi) b_{i,j} + K_{Re} b_{i,j} \quad (3)$$
$$F_{A,i,j}(\varphi) = K_{Ac} h_{i,j}(\varphi) b_{i,j} + K_{Ae} b_{i,j}$$

โดยที่ K_{qc} และ K_{qe} (q = T, R หรือ A) คือสัมประสิทธ์ของแรงที่สอดคล้องกับแรงเฉือนของเศษ (chip shearing) และขอบการถู (edge rubbing)

จากสมการที่ 1 และ 3 สามารถจัดให้อยู่ในรูปทิศทางตามแนวแกน X, Y และ Z ดังนี้

$$\begin{bmatrix} F_{X,i,j}(\varphi) \\ F_{Y,i,j}(\varphi) \\ F_{Z,i,j}(\varphi) \end{bmatrix} = g(\theta_{i,j}(\varphi))T(\theta_{i,j}(\varphi)) \begin{bmatrix} F_{T,i,j}(\varphi) \\ F_{R,i,j}(\varphi) \\ F_{A,i,j}(\varphi) \end{bmatrix} \quad (4)$$

โดย

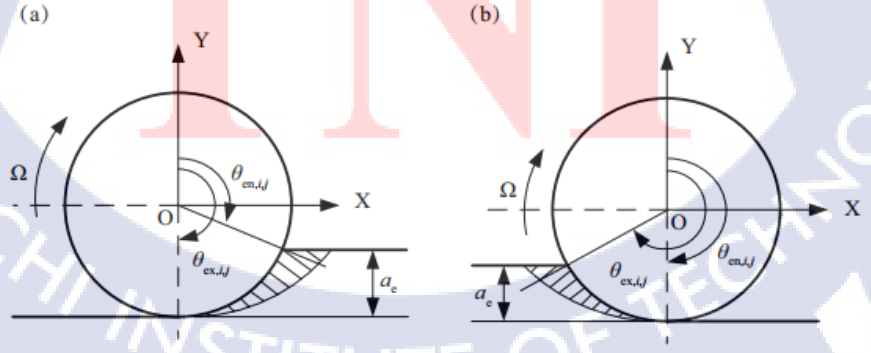
$$T(\theta_{i,j}(\varphi)) = \begin{bmatrix} -\cos\theta_{i,j}(\varphi) & -\sin k(z)\sin\theta_{i,j}(\varphi) & -\cos k(z)\sin\theta_{i,j}(\varphi) \\ \sin\theta_{i,j}(\varphi) & -\cos k(z)\sin\theta_{i,j}(\varphi) & -\cos k(z)\cos\theta_{i,j}(\varphi) \\ 0 & \cos k(z) & -\sin k(z) \end{bmatrix} \quad (5)$$

โดยที่ $\theta_{i,j}(\varphi)$ คือ ตำแหน่งมุมดอกกัดเอ็นมิลซึ่งสัมพันธ์กับแกนที่ *j*th ของเอลิเมนต์ของร่องฟันที่ *i*th ที่มุมการหมุนตัด (φ) ซึ่งมุมจะถูกกำหนดในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจากแกน Y ไปยังเอลิเมนต์ฟังก์ชัน

$g(\theta_{i,j}(\varphi))$ คือ ฟังก์ชันที่ใช้หาเอลิเมนต์ว่าทำการตัดเฉือนหรือไม่ดังแสดงในสมการที่ 6

$$g(\theta_{i,j}(\varphi)) = \begin{cases} 1, & \theta_{en,i,j}(\varphi) \le \theta_{i,j}(\varphi) \le \theta_{ex,i,j}(\varphi) \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (6)$$

โดยที่ $\theta_{en,i,j}(\varphi)$ และ $\theta_{ex,i,j}(\varphi)$ คือ มุมเข้าและออกสัมพันธ์กับแกนที่ *j*th ของส่วนเอลิเมนต์ร่องฟันที่ *i*th ซึ่งแสดงรูปร่างเรขาคณิตดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 มุมการกัดแบบ (a) กัดตาม (down milling) (b) กัดสวน (up milling)

สุดท้ายองค์ประกอบของแรงตัดทั้งหมดคือ $F_s(\varphi)$ $(s = X, Y \text{ or } Z)$ ที่มุมการหมุนตัด (φ) สามารถหาได้จากผลรวมของแรงที่มากระทำบนร่องฟันและเอลิเมนต์ดังแสดงในสมการที่ 7

$$F_s(\varphi) = \sum_{i,j} F_{s,i,j}(\varphi), \quad s = X, Y \text{ or } Z \tag{7}$$

เมื่อดอกกัดเอ็นมิลได้ทำการตัดเฉือนกับตัวชิ้นงานตามแรงในสมการที่ 7 ทำให้ดอกกัดเกิดการโก่งงอ จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนตามแนวแกน X, Y และ Z เพื่อให้การจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงมีความแม่นยำมากขึ้นจึงต้องพิจารณาการโก่งงอของดอกกัดเข้าไปด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการชดเชยการโก่งงอดังแสดงในสมการที่ 8 [1]

$$A_{(x,y,z)} = \frac{F_{s(x,y,z)}}{3El}(L - 0.5a)^3 \tag{8}$$

โดยที่ $F_{s(x,y,z)}$ คือ แรงการตัดเฉือนในแต่ละแกนของแกน X, Y และ Z

E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น (N/m^2)

l คือ โมเมนต์ความเฉื่อย ($kg.m^2$)

L คือ ความยาวของดอกกัด (mm)

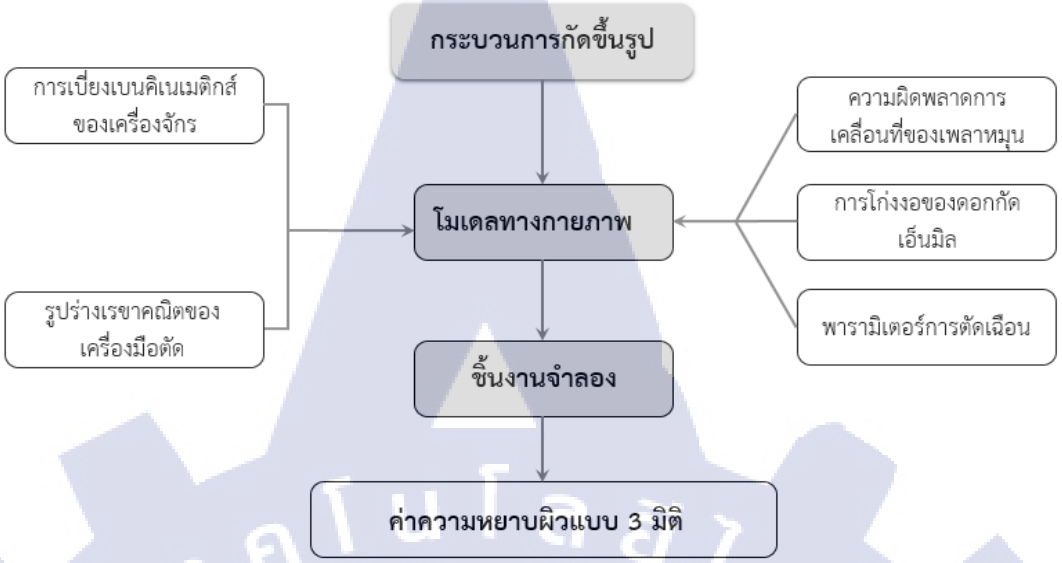
a คือ ความลึกการกัดในแนวแกน (mm)

2.4 การจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการกัดขึ้นรูป [16]

การจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงต้องคำนึงถึงปัจจัยของกระบวนการตัดเฉือนเป็นหลักสำหรับการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการกัดขึ้นรูปด้วยเครื่องจักรซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซนเตอร์และการสร้างชิ้นส่วนจำลองพิจารณาจากการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ ความผิดพลาดการเคลื่อนที่ของเพลาหมุน และความผิดพลาดพิกัดรูปร่างเรขาคณิตของดอกกัดเอ็นมิล ชิ้นงานที่สร้างขึ้นจากการจำลองจะนำมาทำการกัดจริงด้วยเครื่องจักรแล้วนำมาทำการประมาณค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติและความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตของชิ้นงาน ซึ่งองค์ประกอบสำคัญในระบบการตัดเฉือนเสมือนจริงในงานกัดแสดงดังรูปที่ 2.4

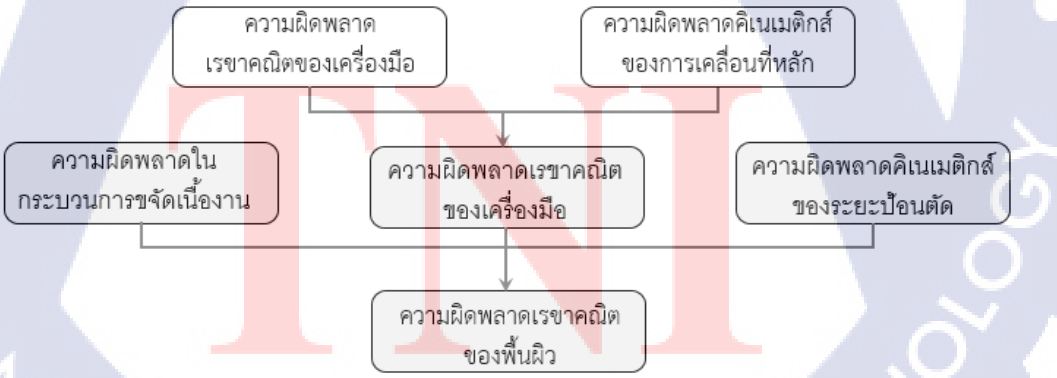
2.5 โมเดลการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่ (Model of Shape Generation Motions) [16]

ความผิดพลาดทางเรขาคณิตของผิวชิ้นงานเกิดมาจากความผิดพลาดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างเครื่องมือตัดและชิ้นงาน ความผิดพลาดทางเรขาคณิตของเครื่องมือและความผิดพลาดในกระบวนการขจัดเนื้องาน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดการกัดชิ้นงาน



รูปที่ 2.4 องค์ประกอบของระบบการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการกัดขึ้นรูป

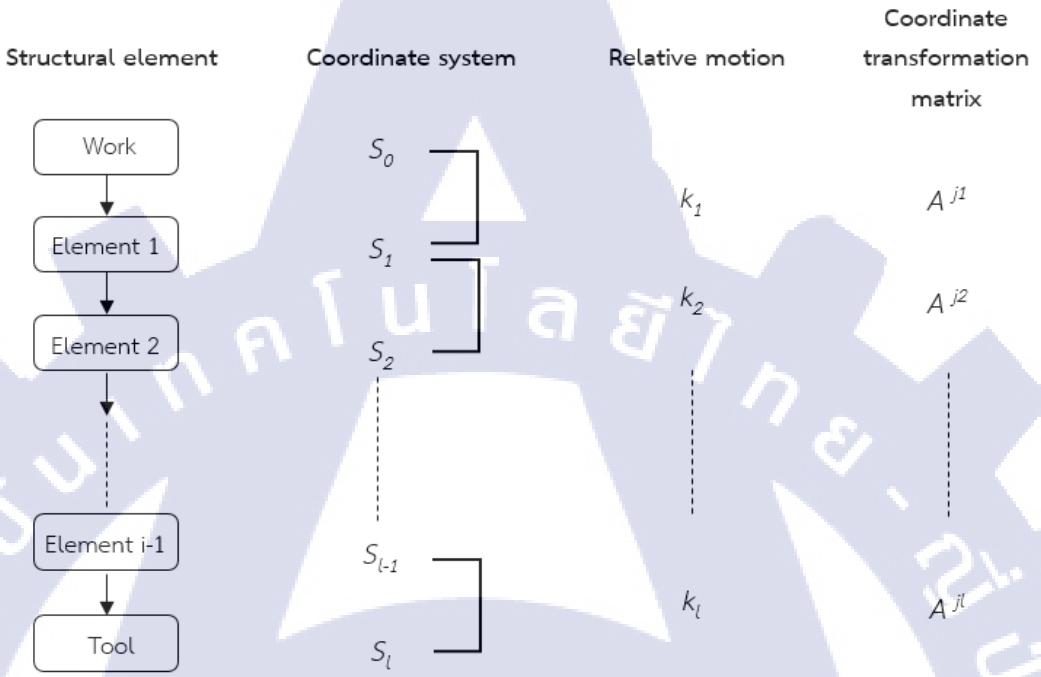
ของพื้นผิวชิ้นงานและความสัมพันธ์จากมุมมองจุดพิกัดของกระบวนการสร้างรูปร่างจากเครื่องมือกล ความเที่ยงตรงทางเรขาคณิตของพื้นผิวชิ้นงานที่ไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้มาจากปัจจัยในการออกแบบโครงสร้างและกระบวนการผลิตของทุกส่วนประกอบของเครื่องมือกล ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่แสดงในรูปที่ 2.5 นั้น แต่ละปัจจัยมีความซับซ้อนและไม่มีความชัดเจน ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความผิดพลาดการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างเครื่องมือและชิ้นงาน



รูปที่ 2.5 ปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของการกัดชิ้นงาน

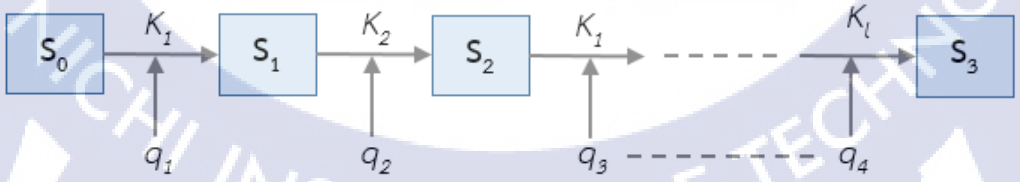
กระบวนการสร้างรูปร่างของเครื่องมือกลโดยทั่วไปนำเสนอด้วยวิธีการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่และรูปร่างเรขาคณิตของเครื่องมือ การสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่เป็นการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของ

เครื่องมือต่อชิ้นงานที่ดำเนินการด้วยชุดของส่วนประกอบแข็งเกร็งของเครื่องมือ ซึ่งรูปที่ 2.6 แสดงภาพประกอบอธิบายส่วน ประกอบแข็งเกร็ง (rigid components) ที่เรียกว่าหน่วยย่อย (unit element) และการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่ระหว่างแต่ละหน่วย



รูปที่ 2.6 รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของเครื่องมือกล

รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพกลไกเชื่อมต่อแบบลูกโซ่ (chain-link diagram) ของการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่ ให้สัญลักษณ์ S_0, S_1, ..., S_i แทนกลไกเชื่อมต่อ โดยที่ S_0 คือชิ้นงานที่ต้องการตัดเฉือน S_i คือเครื่องมือตัด และ S_1, ..., S_{i-1} คือ กลไกเชื่อมต่อระดับกลาง และ q_0, q_1, ..., q_i คือ พารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของหน่วยส่วนประกอบ และ k_1, k_2, ..., k_i คือ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของหน่วยส่วนประกอบ



รูปที่ 2.7 แผนภาพเชน-ลิ้งก์ ของการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่

2.5.1 จุดพิกัดโฮโมจีเนียส (Homogeneous point of coordinate)

จุดพิกัดโฮโมจีเนียสคือเวกเตอร์ลำดับที่สี่ในพื้นที่ 3 มิติ ซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ เวกเตอร์เจาะจง (eigenvectors) และเวกเตอร์ไม่เจาะจง (non-eigenvectors) โดยจะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างเรขาคณิต จุดพิกัดของเวกเตอร์ตำแหน่งจะเป็นของเวกเตอร์เจาะจง ส่วนเวกเตอร์ที่หาได้ด้วยวิธีอนุพันธ์หรือการแปลงรูปของเวกเตอร์ตำแหน่งจากเล็กน้อยไปจนถึงอนันต์จะเป็นของส่วนเวกเตอร์ไม่เจาะจง พิกัดของเวกเตอร์ลำดับที่สี่เรียกว่า พิกัดโฮโมจีเนียส (homogeneous coordinate) เวกเตอร์เจาะจงจะมีอยู่สี่พิกัดโฮโมจีเนียสซึ่งเท่ากับความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน และเวกเตอร์ไม่เจาะจงจะมีอยู่สี่พิกัดโฮโมจีเนียสที่เท่ากับศูนย์

จุดของเวกเตอร์ตำแหน่งพิกัดคาร์ทีเซียน (cartesian coordinate) *x, y, z* เขียนในรูปแบบหลักของเวกเตอร์ลำดับที่สี่ได้ดังนี้

$$r = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \tag{9}$$

เพื่อให้ประหยัดพื้นที่ในการเขียน สามารถเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปแบบแถวได้ดังนี้

$$r = (x, \mathrm{y}, \mathrm{z}, 1)^T$$

โดยที่ T คือสัญลักษณ์ของทรานสโพสเมทริกซ์ (transpose of matrix) และเวกเตอร์ r สามารถแสดงได้ดังนี้

$$r = xe^1 + ye^2 + ze^3 + 1\mathrm{e}^4$$

โดย e^1, e^2, e^3 คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector) ของระบบพิกัด ส่วน e^4 คือ เวกเตอร์ตำแหน่ง (radius vector) ของพิกัด

$$e^4 = (0, 0, 0, 1)^T \tag{10}$$

2.5.2 การแปลงรูปพิกัด (Transformation of coordinate)

การแปลงรูปพิกัดสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$X_0 = A_{i,j}(q_1, q_2, \ldots q_l)X_l \tag{11}$$

โดยที่ X_l คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของจุดพิกัดบนเครื่องมือตัดในระบบพิกัด

X_0 คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของจุดในระบบพิกัดของชิ้นงาน

$A_{i,j}$ คือ เมทริกซ์ 4x4 ที่มีโครงสร้างดังนี้

$$A = \left[\begin{array}{ccc:c} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ \hdashline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] \tag{12}$$

เมทริกซ์ที่ด้านบนซ้ายขนาด 3x3 คือระบบการหมุน S_i และสัมพันธ์กับพิกัดเริ่มต้น O_i ซึ่งเมทริกซ์นี้แสดงในรูปเมทริกซ์ตั้งฉาก (orthogonal matrix) เช่น ที่ i, j, k = 1, 2 และ 3

$$\sum_{j=1}^{3} a_{ij}a_{kj} = \sum_{j=1}^{3} a_{ji}a_{jk} = \begin{cases} 0, & if\ i \neq k, \\ 1, & if\ i = k, \end{cases} \tag{13}$$

และนอกจากนี้ ดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์ คือ

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = 1 \tag{14}$$

ระบบ S_{i-1} และ S_i จะผูกกับสองกลไกเชื่อมโยงการสร้างรูปร่าง โดยที่การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของกลไกเชื่อมโยงจำกัดอยู่ที่หกการเชื่อมโยง จากสมการ (11) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$a_{ij}(q_1, q_2, \ldots q_l) = \prod_{i=1}^{l} A_{\gamma i}^{\alpha i}(\beta_i) \tag{15}$$

โดยที่ $A_{\gamma i}^{\alpha i}(\beta_i)$ คือ เมทริกซ์ 4x4 ที่แสดงการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และตำแหน่งเคลื่อนที่

$\alpha(1,...6)$ คือ แสดงทิศทางของการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และตำแหน่งเคลื่อนที่ หมายเลข 1, 2 และ 3 หมายถึงการเคลื่อนที่แนวเส้นตรงและทิศทางตามแกน X, Y และ Z หมายเลข 4, 5 และ 6 การเคลื่อนที่แบบหมุนและตำแหน่งรอบแกน X, Y และ Z

β คือ แสดงค่าการการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และตำแหน่งเคลื่อนที่

γ คือ แสดงค่าระบบพิกัด

การเคลื่อนที่สัมพัทธ์แสดงด้วย A^{α} คือ การเคลื่อนที่ตามแนวแกน X, Y และ Z หรือการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกน X, Y และ Z ซึ่งสามารถแสดงเมทริกซ์ได้ดังตารางที่ 2.1

2.5.3 โฮโมจีเนียสทรานสฟอร์มเมชั่นเมทริกซ์ของความคลาดเคลื่อนการหมุนและการเคลื่อนที่ (Homogeneous Transformation Matrix of rotation and translation: HTM)

การศึกษาพฤติกรรมความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรนั้น รูปแบบคิเนเมติกส์ของเครื่องจักรสามารถจัดให้อยู่ในรูปของ HTM และความคลาดเคลื่อนแต่ละชนิดสามารถวิเคราะห์ได้โดยการหาความคลาดเคลื่อนที่ส่งผลต่อความแม่นยำของตำแหน่งจุดตัดโดยพิจารณาจากตัวชิ้นงาน พารามิเตอร์ของความคลาดเคลื่อนสามารถแสดงด้วย HTM ได้ดังสมการที่ 16

$$E_{N'N} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z & \varepsilon_y & \delta_x \\ \varepsilon_z & 1 & -\varepsilon_x & \delta_y \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

โดยที่ δ_y คือ ความคลาดเคลื่อนตำแหน่งในทิศทางแกน Y

δ_x คือ ความคลาดเคลื่อนทางตรงในทิศทางแกน X

δ_z คือ ความคลาดเคลื่อนทางตรงในทิศทางแกน Z

ε_y คือ ความคลาดเคลื่อนเชิงมุมของแกน Y (Roll movement)

ε_x คือ ความคลาดเคลื่อนเชิงมุมของแกน X (Pitch movement)

ε_z คือ ความคลาดเคลื่อนเชิงมุมของแกน X (Yaw movement)

ตารางที่ 2.1 เมทริกซ์การเคลื่อนที่แนวเส้นตรงและการเคลื่อนที่แบบหมุน

Motion type	Axis	Relative Motion	Transformation Matrix
Translation Motion (การเคลื่อนที่แนวเส้นตรง)	X	1	$A^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	Y	2	$A^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	z	3	$A^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Rotary Motion (การเคลื่อนที่แบบหมุน)	A	4	$A^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	B	5	$A^5 = \begin{bmatrix} \cos\psi & 0 & \sin\psi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\psi & 0 & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Rotary Motion (การเคลื่อนที่แบบหมุน)	C	6	$A^6 = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

2.6 การหาค่าที่เหมาะสม

การหาค่าที่เหมาะสมเป็นเทคนิคการหาคำตอบชั้นสูง โดยอาศัยความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ วิธีการนี้เป็นการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาใด ๆ ด้วยกระบวนการแก้ปัญหาเชิงคณิตศาสตร์หรือที่เรียกว่า การหาคำตอบที่ดีที่สุด [17] ปัจจุบันเทคนิคหรือวิธีการหาค่าที่เหมาะสมเป็นที่นิยมกันมีหลากหลายวิธีและนำไปประยุกต์ใช้ในหลายสาขาวิชา เช่น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm: GA) การจำลองการอบเหนียว (simulated annealing: SA) การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (particle swarm optimization: PSO) การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยระบบอาณาจักรมด (ant colony optimization) การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยโครงข่ายประสาทเทียม (neural network-based optimization) และ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ (fuzzy logic optimization)

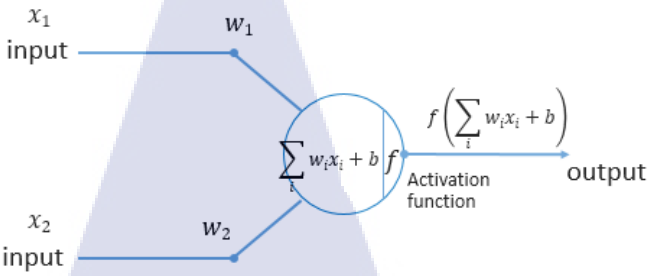
สำหรับงานวิจัยนี้เลือกศึกษาการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการการประมาณค่าที่เหมาะสมของความมันเงาชิ้นงานฉีดพลาสติก สำหรับการประมาณค่าความหยาบพื้นผิวแบบ 3 มิติ ที่ได้จากการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงจะใช้การประมาณค่าบนพื้นฐานค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบ Minimum Zone Flatness (MZF)

2.6.1 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks: ANN)

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นหนึ่งในเทคนิคของการทำเหมืองข้อมูล (data mining) ซึ่งใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับประมวลผลสารสนเทศด้วยการคำนวณแบบคอนเนคชันนิสต์ (connectionist) เพื่อจำลองการทำงานของเครือข่ายประสาทในสมองมนุษย์ด้วยวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องมือซึ่งมีความสามารถในการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ (pattern recognition) และการสร้างความรู้ใหม่ (knowledge extraction) เช่นเดียวกับความสามารถที่มีในสมองมนุษย์

สำหรับในคอมพิวเตอร์นิวรอน (neurons) ประกอบด้วยการป้อนเข้า (input) และการป้อนออก (output) เหมือนกันโดยจำลองให้การป้อนเข้าแต่ละอันมีน้ำหนัก (weight) เป็นตัวกำหนดน้ำหนักของการป้อนเข้า โดยนิวรอนแต่ละหน่วยจะมีค่าการตอบสนอง (threshold) เป็นตัวกำหนดว่าน้ำหนักรวมของการป้อนเข้าต้องมากขนาดไหนจึงจะสามารถส่งการป้อนออกไปยังนิวรอนตัวอื่นได้ เมื่อนำนิวรอนแต่ละหน่วยมาต่อกันให้ทำงานร่วมกันการทำงานนี้ในทางตรรกะแล้วก็จะเหมือนกับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดในสมองเพียงแต่ในคอมพิวเตอร์ทุกอย่างเป็นตัวเลขเท่านั้นเอง การทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8

จากรูปที่ 2.8 เมื่อมีการป้อนเข้าเข้ามายังโครงข่ายก็จะนำเอาค่าการป้อนเข้ามาคูณกับค่าน้ำหนักของแต่ละขา ผลที่ได้จากค่าการป้อนเข้าทุก ๆ ขาของนิวรอนจะเอามารวมกันตามสมการที่ (17)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างและการทำงานของ ANN

$$\sum_{i=1}^{n} w_i x_i + b \tag{17}$$

โดยที่ x_i คือ ค่าที่ป้อนเข้า

w_i คือ ค่าน้ำหนัก

b คือ ค่าเอนเอียง

ข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผลใน ANN จะต้องมีการแปลงข้อมูลด้วยการทำนอร์มอลไลซ์ (normalization) ก่อนทั้งข้อมูลที่เป็นค่าในการป้อนเข้าและข้อมูลค่าป้อนออกหรือค่าผลที่คาดหวัง เพื่อให้ข้อมูลดังกล่าวอยู่ในรูปช่วงสั้น ๆ เช่นช่วง 0 ถึง 1 โดยสามารถทำนอร์มอลไลซ์ได้ดังสมการ [18]

$$x_i = \frac{2}{d_{\max} - d_{\min}}(d_i - \mathrm{d}_{\min}) - 1 \tag{18}$$

โดยที่ $d_{\max}$ คือ ค่าที่มากที่สุดของค่าป้อนเข้าหรือค่าป้อนออก

$d_{\min}$ คือ ค่าที่น้อยที่สุดของค่าป้อนเข้าหรือค่าป้อนออก

d_i คือ ค่าที่ i ของค่าป้อนเข้าหรือค่าป้อนออก

หลังจากที่ค่าการป้อนเข้าทุก ๆ ขาของนิวรอนมารวมกัน ก็เอามาเทียบกับค่าการตอบสนองที่กำหนดไว้ ถ้าผลรวมมีค่ามากกว่าค่าการตอบสนองแล้ว นิวรอนก็จะส่งค่าไปยังการป้อนออกและค่าการป้อนออกนี้ก็จะถูกส่งไปยังค่าการป้อนเข้าของนิวรอนอื่น ๆ ที่เชื่อมกันในโครงข่าย ถ้าค่าน้อยกว่าค่าการตอบสนองก็จะไม่เกิดการป้อนออก หลังจากนั้นก็จะนำข้อมูลทั้งหมดมารวมกันเป็นผลลัพธ์โดย

คำนวณค่าที่ส่งออกโดยผ่านฟังก์ชัน (activate function) เช่น ฟังก์ชันที่นิยมใช้กันเช่น linear function, sigmoid function, hyperbolic tangent function, hard limit function เป็นต้น ค่าน้ำหนักและค่าการตอบสนองเป็นค่าที่สำหรับสิ่งที่เราต้องการเพื่อให้คอมพิวเตอร์รู้จำ ซึ่งเป็นค่าที่ไม่แน่นอนแต่สามารถกำหนดให้คอมพิวเตอร์ปรับค่าเหล่านั้นได้โดยการสอนให้มันรู้จักรูปแบบของสิ่งที่เราต้องการให้มันรู้จำเรียกว่า กระบวนการย้อนกลับของการรู้จำ (back propagation) ในการฝึกโครงข่ายประสาทเทียมที่มีการเชื่อมโยงไปข้างหน้า (feed-forward neural networks) จะมีการใช้อัลกอริทึมแบบกระบวนการย้อนกลับของการรู้จำเพื่อใช้ในการปรับปรุงน้ำหนักคะแนนของเครือข่าย (network weight) หลังจากใส่รูปแบบข้อมูลสำหรับฝึกให้แก่เครือข่ายในแต่ละครั้งแล้ว ค่าที่ได้รับจากเครือข่ายจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่คาดหวัง แล้วทำการคำนวณหาค่าความผิดพลาด ซึ่งค่าความผิดพลาดนี้จะถูกส่งกลับเข้าสู่เครือข่ายเพื่อใช้แก้ไขค่าน้ำหนักคะแนนต่อไป [19] โดยค่าความผิดพลาดคำนวณจากสมการที่ (19)

$$ERR = \frac{1}{2}(\mathrm{P} - \mathrm{P}')^2 \tag{19}$$

P คือ ค่าที่ได้จากการทดลองสำหรับเทียบผลกับ ANN หรือค่าเป้าหมายของ ANN

P' คือ ค่าประมาณการที่ได้จากโมเดล ANN หรือค่าป้อนออกของ ANN

2.6.2 การประมาณค่าที่ดีที่สุดแบบ MZF

การจำลองการสร้างพื้นผิวความเป็นทรงกระบอกให้มีความใกล้เคียงพื้นผิวงานจริงมากที่สุดจะประมาณค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติ โดยประมาณค่าที่ดีที่สุดของเส้นแนวแกนทรงกระบอกด้วยวิธี MZF ซึ่งพิจารณาสมการจากงานวิจัยที่นำเสนอโดย W. Thasana และ S. Chianrabutra [20]

การจำลองการสร้างพื้นผิวความเป็นทรงกระบอกแบบ 3 มิติ ของกระบวนการกัดขึ้นรูปใช้จุดพิกัด Pi(Xi, Yi, Zi) คือจุดใด ๆ ที่อยู่บนพื้นผิวทรงกระบอกจำลองที่ห่างจากแนวแกนกลางเป็นระยะทาง di โดยกำหนดให้ t คือ ผลต่างของระยะทาง di ที่จุด Pi ที่มีค่ามากสุดกับจุด Pi ที่มีระยะน้อยสุด คือพื้นที่ที่เรียกว่า MZF ที่เป็นเทคนิคในการประเมินค่าความราบบนพื้นผิว แสดงได้ดังสมการที่ (20)

$$\begin{aligned} t &= f(\alpha, \beta, \gamma) \\ &= \min(\max(d_i) - \min(d_i)) \\ &= \min(d_{max} - d_{min}) \end{aligned} \tag{20}$$

α, β, γ คือ ตำแหน่งของแกน X, Y และแกน Z ของความราบบนพื้นผิวจำลองที่สร้างขึ้น

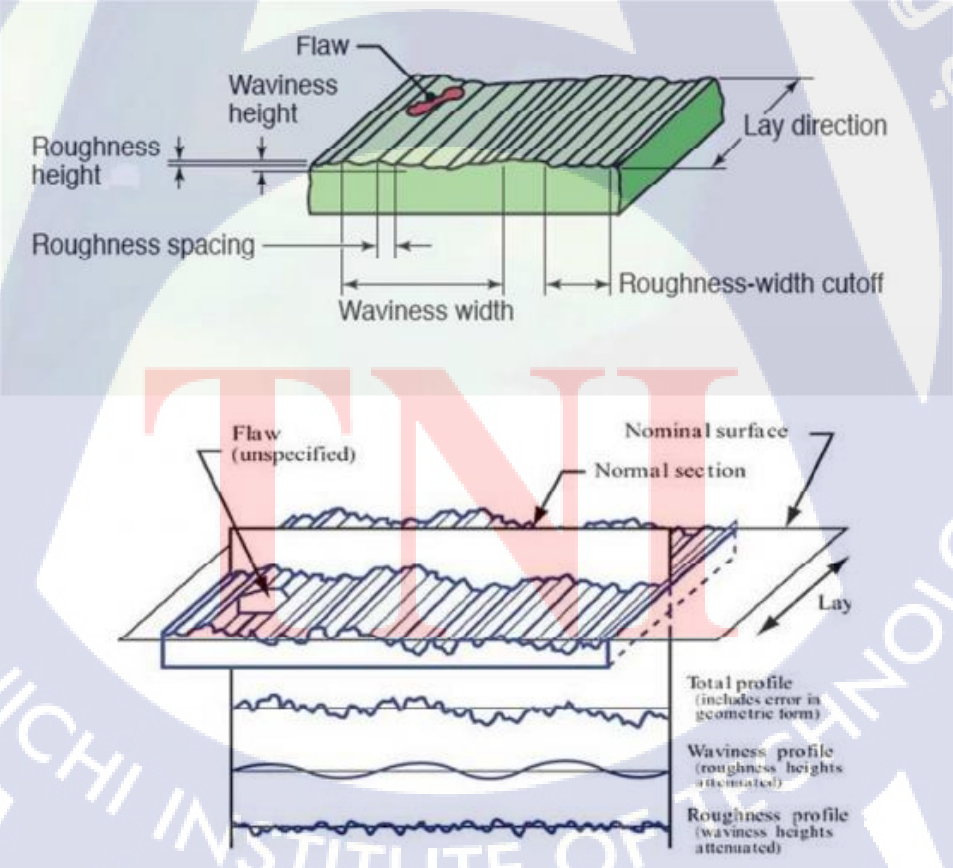
d_{max} คือ ระยะทางห่างจากดาตัมไปหาตำแหน่งพื้นผิวที่มากที่สุด

d_{min} คือ ระยะทางห่างจากดาตัมไปหาตำแหน่งพื้นผิวที่น้อยที่สุด

2.7 สมการสำหรับการประมาณค่าความหยาบผิวแบบ 2 มิติ [16]

2.7.1 ความหยาบผิวแบบ 2 มิติ

ผิวงาน (surface) คือคุณลักษณะที่ประกอบไปด้วย 3 พารามิเตอร์หลัก คือ ความหยาบของผิว (roughness) ความเป็นคลื่นของผิว (waviness) และเลย์ (lay) ความหยาบผิว คือ ความผิดปกติของผิวงานที่เป็นผลมาจากการผ่านกระบวนการผลิตหรือผ่านการใช้งานมาแล้ว เช่น การตัดเฉือนจากคมมีดตัดหรือการสึกหรอ ความเป็นคลื่นของผิว คือ ช่วงระยะที่กว้างกว่าช่วงความหยาบผิวที่เบี่ยงเบนไปจากความราบเรียบพื้นผิว (flatness) เลย์ คือ แนวทิศทางรอยสันยอดของความหยาบผิวซึ่งพารามิเตอร์หลักทั้ง 3 สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะพารามิเตอร์หลักของความหยาบผิว [16]

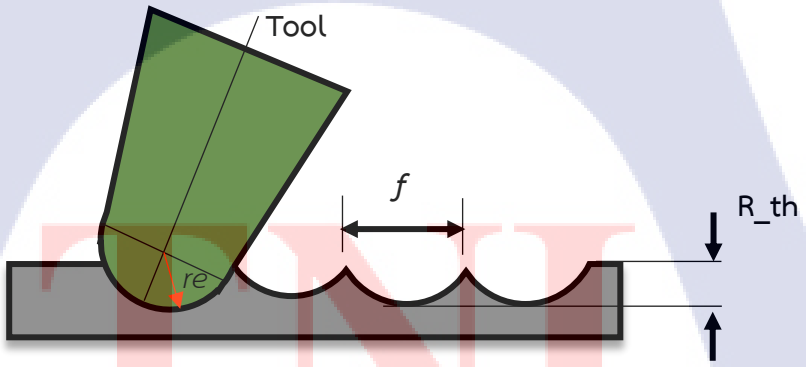
ค่าความหยาบผิวสามารถประมาณได้จากค่าดังต่อไปนี้ คือ ค่าทฤษฎีของความหยาบผิวสูงสุด (Rz_th) ค่าทฤษฎีของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra_th) ค่าความหยาบผิวสูงสุดแบบ 2 มิติ (Rz) ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแบบ 2 มิติ (Ra)) ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสองแบบ 2 มิติ (Rq) ที่เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 4287:1997 และ JIS B 0601:2001 ซึ่งสมการความหยาบผิวจะได้นำเสนอในลำดับถัดไป

2.7.2 ค่าทฤษฎีของความหยาบผิว

โมเดลความหยาบผิวในอุดมคติของกระบวนการเจาะและกระบวนการกลึงขึ้นรูปจะพิจารณาจากรัศมีปลายมีด (nose radius: r_e) และอัตราป้อน (feed rate: f) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.10 ค่าความหยาบผิว Rz_th จาก มาตรฐาน JIS B 0601:2001 และค่า Ra_th สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Rz_th = \frac{f^2}{8r_e} \tag{21}$$

$$Ra_th = \frac{0.0321 f^2}{r_e} \tag{22}$$

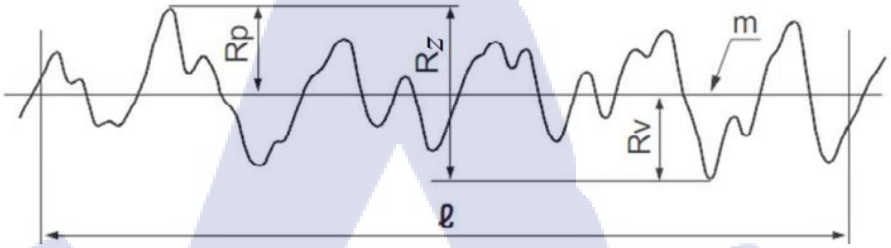


รูปที่ 2.10 โมเดลในอุดมคติของความหยาบผิวแบบ 2 มิติ

2.7.3 ค่ายอดสูงสุดของโปรไฟล์

ค่าความหยาบผิว Rz แบบ 2 มิติ คือ ค่าระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด ในช่วงของตัวอย่างความยาม ℓ ในทิศทางของเส้นเฉลี่ยค่าความหยาบผิว ค่าพารามิเตอร์ Rz ตามมาตรฐาน JIS B 0601:2001 ที่วัดในช่วงความยาว 12.5 mm และตามมาตรฐาน JIS B 0633:2001 สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (23)

$$Rz = Rp + |Rv| = \max\{E_i\} + \min\{|E_i|\} \quad (23)$$

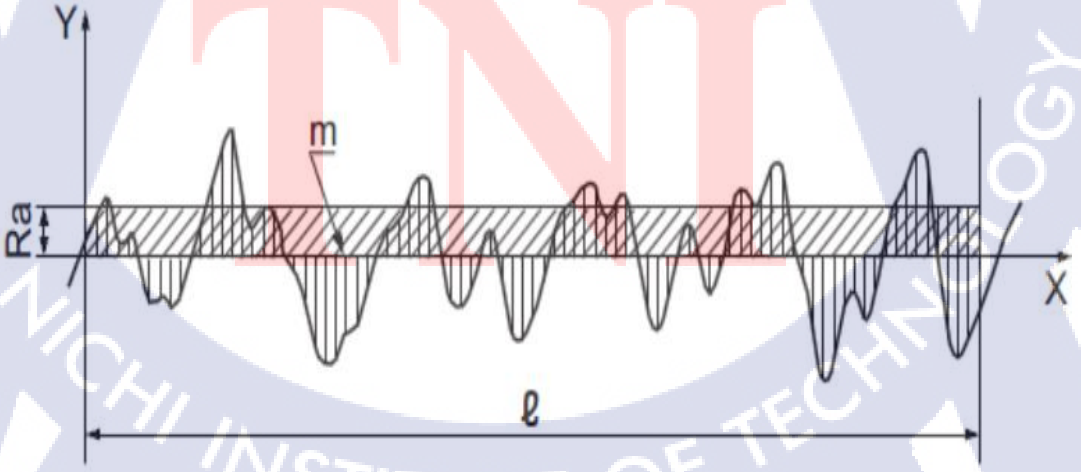


รูปที่ 2.11 นิยามแอมพลิจูดพารามิเตอร์ของ Rz (JIS B 0601:2001)

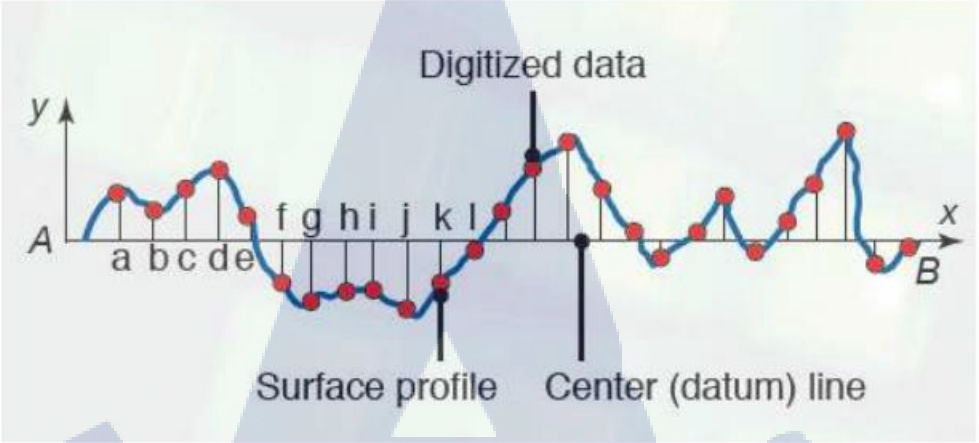
2.7.4 ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยเลขคณิตของโปรไฟล์

ค่าความหยาบผิวแบบ 2 มิติ Ra ตามมาตรฐาน JIS B 0601:2001 สามารถหาได้ตามสมการที่ (24) เมื่อความหยาบของผิวกำหนดโดยฟังก์ชัน *y=f(x)* แกน X คือทิศทางแนวเส้นเฉลี่ย และแกน Y คือเส้นความหยาบของผิวในแนวตั้ง ที่ช่วงความยาวการวัดอ้างอิง ℓ ความหยาบผิวแบบ 2 มิติ Ra อธิบายดังรูปที่ 2.12 และ 2.13

$$Ra = \frac{1}{\ell}\int_0^{\ell} |y|\, dx \cong \frac{y_a + y_b + y_c + \ldots + y_N}{N} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} |E_i| \quad (24)$$



รูปที่ 2.12 นิยามแอมพลิจูดพารามิเตอร์ของ Ra (JIS B 0601:2001)



รูปที่ 2.13 พิกัดสำหรับการวัดค่าความหยาบผิว [16]

2.7.5 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของโปรไฟล์

ค่าความหยาบผิวแบบ 2 มิติ Rq ตามมาตรฐาน ISO 4287:1997 สามารถหาได้ตามสมการที่ (25) เมื่อความหยาบของผิวกำหนดโดยฟังก์ชัน $y=f(x)$ แกน X คือทิศทางแนวเส้นเฉลี่ย และแกน Y คือเส้นความหยาบของผิวในแนวตั้ง ที่ช่วงความยาวการวัดอ้างอิง ℓ ความหยาบผิวแบบ 2 มิติ Rq อธิบายดังรูปที่ 2.13

$$Rq = \left(\frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} y^2 dx \right)^{1/2} \cong \left(\frac{y_a^2 + y_b^2 + y_c^2 + \ldots + y_N^2}{N} \right)^{1/2} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (E_i)^2 \right)^{1/2} \quad (25)$$

2.8 สมการสำหรับการประมาณค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติ [16]

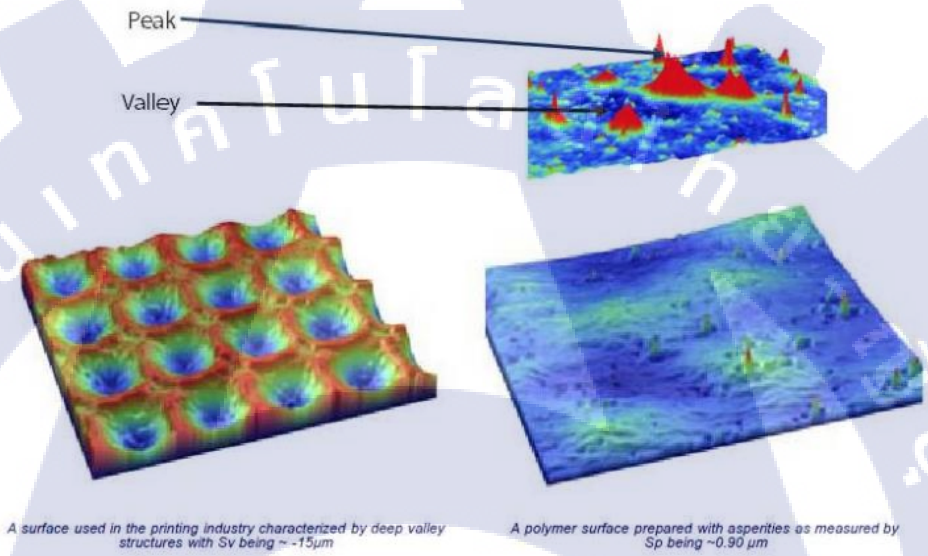
ความหยาบผิวแบบ 3 มิตินั้น ยังไม่มีการกล่าวถึงกันอย่างกว้างขวางนัก ในการพิจารณาความความหยาบผิวแบบ 3 มิติ นั้น จะใช้แทนด้วยสัญลักษณ์ “S” ในการบ่งบอกตัวแปรพารามิเตอร์แบบ 3 มิติ เพื่อให้แตกต่างจากแบบ 2 มิติ ตามมาตรฐาน ISO 25178 part 2

2.8.1 ค่ายอดสูงสุดของพื้นผิว

พารามิเตอร์ความหยาบผิวแบบ 3 มิติ ของค่ายอดสูงสุดของพื้นผิว (Sz) จะคล้ายกับการประมาณค่าของความหยาบผิวแบบ 2 มิติ ที่วัดเส้นความยาว 12.5 mm แต่ความหยาบผิวแบบ 3 มิติจะวัดเป็นพื้นที่ 12.5 x 12.5 mm^2 จากจุดของการสร้างผิวหน้า อ้างอิงตามมาตรฐาน JIS B 0633: 2001

จากรูปที่ 2.14 พารามิเตอร์ *Sp* คือ ยอดสูงสุดของพื้นผิวหรือที่เรียกว่า ความสูงของจุดที่สูงที่สุดของพื้นผิว พารามิเตอร์ *Sv* คือ ก้นร่องที่ลึกที่สุดของพื้นผิวหรือที่เรียกว่า ความลึกของจุดที่ต่ำที่สุดของพื้นผิว โดยความสูงนับจากระนาบเฉลี่ย ค่า *Sp* จะเป็นบวกเสมอ ส่วนค่า *Sv* จะเป็นลบเสมอ แสดงผลรวมของค่ายอดสูงสุดของพื้นผิว สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (26)

$$Sz = Sp + |Sv| = \max\{\mathrm{E}_i\} + \min\{|E_i|\} \tag{26}$$



รูปที่ 2.14 นิยามของความหยาบผิว *Sz* [16]

2.8.2 ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยเลขคณิตและค่าความสูงเฉลี่ยกำลังสองของพื้นผิว

พารามิเตอร์ความหยาบผิวแบบ 3 มิติ ของค่าเฉลี่ยเลขคณิตของพื้นผิว (*Sa*) และค่าความสูงเฉลี่ยกำลังสองของพื้นผิว (*Sq*) หาได้จากค่าสัมบูรณ์ความสูงเฉลี่ยภายในพื้นที่ *A* ที่กำหนดโดยฟังก์ชัน *z(x,y)* โดยคิดพื้นที่ขนาด 12.5x12.5 mm^2 จากจุดที่สร้างผิวหน้าขึ้น อ้างอิงตามมาตรฐาน JIS B 0633:2001 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Sa = \tfrac{1}{A}\iint_A |z(x,y)|\,dxdy \cong \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|E_i| \tag{27}$$

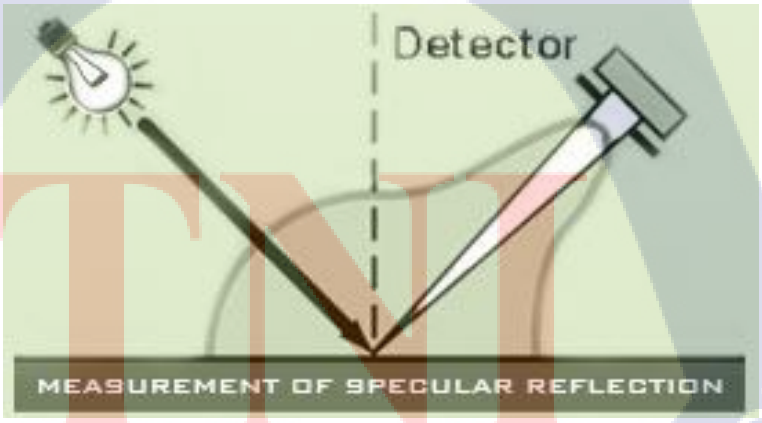
$$Sq = \left(\frac{1}{A} \iint_A z^2(x,y)dxdy \right)^{1/2} \cong \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (E_i)^2 \right)^{1/2} \quad (28)$$

2.9 การวัดความมันเงา [9]

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ความมันเงา (gloss) คือ สมบัติการสะท้อนแสงบนพื้นผิวของวัตถุตามทฤษฎีกฎสะท้อนแสงกับความเงาและความมัว ดังนั้นในการวัดความมันเงาต้องอาศัยเครื่องมือวัดความมันเงา (gloss meter) ที่มีคุณสมบัติการสะท้อนแสงบนพื้นผิวของวัตถุ วัตถุที่ใช้ทดสอบมีหลากหลายประเภทซึ่งมีคุณลักษณะที่แตกต่างกันเช่น อโลหะ (non-metal) มีคุณสมบัติการสะท้อนมากเมื่อมุมในการวัดมาก ๆ (วัดจากเส้นตั้งฉากวัตถุ) หรือ โลหะ (metal) มีคุณสมบัติการสะท้อนแสงได้มากที่มุมเล็ก ๆ เห็นได้ว่าวิธีการวัดความมันเงาจึงมีมุมที่แตกต่างกันไปตามประเภทวัตถุทดสอบการประยุกต์ใช้งานของเครื่องวัดความมันเงาที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการควบคุมคุณภาพสินค้าในภาคอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์และอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

ส่วนประกอบของเครื่องวัดความมันเงาโดยทั่วไปแล้ว เครื่องวัดความมันเงาจะมีส่วนประกอบดังแสดงในรูปที่ 2.9 ได้แก่

1. หลอดไฟ (lamp) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงฉายลงบนผิวทดสอบ โดยแสงจากหลอดไฟนั้นต้องผ่านเลนส์ 2 ชั้นเพื่อควบคุมลักษณะแสงที่ตกกระทบผิวทดสอบให้เป็นเส้นขนาน
2. Filter detector ทำหน้าที่ตรวจวัดแสงที่สะท้อนจากผิวชิ้นงาน

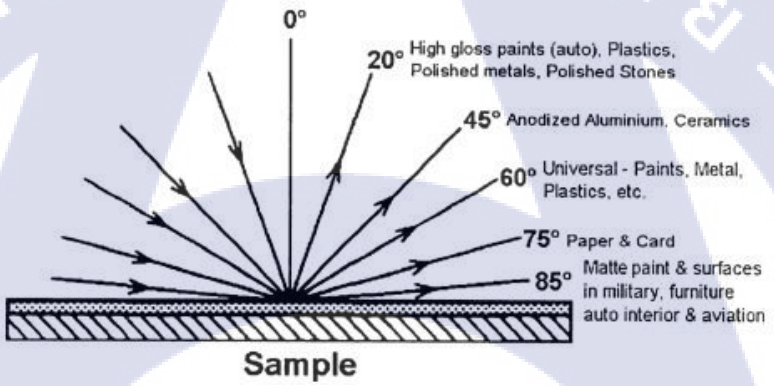


รูปที่ 2.15 หลักการของการวัดความมันเงา [9]

หน่วยการวัดความมันเงาจะใช้สัญลักษณ์ GU (gloss unit) ในอุตสาหกรรมมีที่วัดความเงาในช่วง 0-100 GU ได้แก่ อุตสาหกรรมพลาสติกเคลือบสี (non-metallic coating) ส่วนอุตสาหกรรมที่วัดความเงาวัสดุที่มีความเงาสูงกว่าเช่น กระจกเงา ต้องใช้เครื่องวัดที่มีย่านการวัดความเงาสูงถึง 2000

GU หากวัสดุที่มีความเงาสูงกว่า 2000 GU เช่น วัสดุโปร่งใส จะไม่ใช้หน่วยวัด GU แต่จะใช้เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของแสงที่ตกกระทบ ซึ่งแต่ละมุมองศาจะสามารถใช้วัดความมันเงาตามคุณสมบัติของวัสดุดังแสดงในรูปที่ 2.10

รูปที่ 2.10 มุมที่ใช้วัดความมันเงาโดยทั่วไปแล้วมีอยู่ 3 มุม คือ 20° , 60° และ 85° ซึ่งการใช้งานที่แตกต่างกันไปตามความสามารถในการสะท้อนแสงของวัตถุ โดยมุมขนาดเล็ก 20° จะใช้วัดชิ้นงานที่มีความมันสูงหรือชิ้นงานเคลือบสีหรือขัดมาเป็นอย่างดี ส่วนใหญ่จะมีค่าความมันเงาอยู่ที่มากกว่า 70 GU ส่วนชิ้นงานที่มีความมันเงาต่ำจะใช้มุมวัดที่ใหญ่ขึ้นที่ 85° ค่าความมันเงาอยู่ต่ำกว่า 10 GU ซึ่งหมายความว่าแสงสามารถลอดผ่านได้น้อยจึงต้องทำให้มุมกว้างขึ้น ส่วนมุมวัดขนาด 45° จะใช้วัดชิ้นงานประเภทเซรามิก หนัก สิ่งทอหรืออลูมิเนียมและมุม 75° จะใช้วัดในชิ้นงานประเภทกระดาษหรือสิ่งพิมพ์ต่างๆ



รูปที่ 2.16 มุมที่ใช้วัดความเงา (Gloss angle) [9]

2.8 การทบทวนวรรณกรรม

ผู้วิจัยได้ทำการการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้วยการการหาข้อมูลในฐานข้อมูลมาตรฐานต่าง ๆ จากเว็บไซต์ พร้อมทั้งหาบทความเพิ่มเติมที่เกี่ยวข้องกับงานการตัดเฉือนเสมือนจริง การหาค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องจักรซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ 3 แกน เครื่องจักรซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ 5 แกน และปัจจัยที่ส่งผลต่อความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติก เป็นต้น โดยได้พบงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังสรุปในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลำดับที่	ผู้เขียน	ปีที่ตีพิมพ์	หัวข้องานวิจัยที่นำเสนอ
1	S. Ibaraki *et al.* [21]	2010	การทดสอบการตัดเฉือนเพื่อระบุความคลาดเคลื่อนคิเนเมติกส์บนเครื่องมือกล 5 แกน
2	M. Soori *et al.* [22]	2013	มิติและความคลาดเคลื่อนของเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกนในระบบการตัดเฉือนเสมือนจริง
3	A. Takahashi *et al* [23]	2014	การวิเคราะห์การเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของเครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์บนพื้นฐานความคลาด เคลื่อนเรขาคณิต
4	Y. Altintas and S. Chao [24]	2016	ทิศทางการสะท้านอิสระในงานกัด 5 แกนด้วยดอกกัดบอล-เอ็น
5	วิโรช ทัศนะ และดอน แก้วดก [1]	2017	การตัดเฉือนเสมือนจริงของกระบวนการกลึงด้วยวิธีการพิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ การสึกหรอเครื่องมือตัด และการโก่งขอของชิ้นงาน
6	K. Chaisuriyakul and W. Thasana [5]	2017	การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและการหล่อเย็นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ส่งผลต่อความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติก
7	S. E. Layegh and I. Lazoglu [25]	2017	วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวสามมิติในงานกัด 5 แกนด้วยดอกกัดบอล-เอ็น

จากตารางที่ 2.2 A. Takahashi และคณะ [23] ได้ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของเครื่องมือกลและความคลาดเคลื่อนเรขาคณิตด้วยการจำลองรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ 5 แกน สามชนิด คือ workpiece rotation type, tool & workpiece rotation type และ tool rotation type จากการศึกษาพบว่าการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ 5 แกน ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนเรขาคณิตของแต่ละตำแหน่งบนชุดการเคลื่อนที่ให้ผลที่แตกต่างกัน แต่ก็ยังไม่ได้พิจารณาการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ที่ปลายของดอกกัดเอ็นมิลและพารามิเตอร์ของการตัดเฉือนแบบพื้นผิวหน้าเพื่อนำมาประมาณค่าการตัดเฉือนเสมือนจริง

วิโรช ทัศนะ และดอน แก้วดก [1] ได้ศึกษาการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงเทียบกับผลการตัดเฉือนจริงของกระบวนการกลึงขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการพิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์การสึกหรอเครื่องมือตัด และการโก่งงอของชิ้นงานบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อประมาณค่าความเป็นทรงกระบอกของชิ้นงานเสมือนจริง ผลการศึกษาพบว่าความเป็นทรงกระบอกจากการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงและจากชิ้นงานจริงแตกต่างกันที่ 4.055 % อย่างไรก็ตามผู้วิจัยดังกล่าวยังไม่ได้วัดค่าเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์จริงของเครื่องกลึงซีเอ็นซีด้วยวิธี Double ball bar: DBB และวัดแรงการตัดเฉือนจากเซนเซอร์วัดแรง รวมถึงค่าการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงด้วย

K. Chaisuriyakul and W. Thasana [5] ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและการหล่อเย็นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ส่งผลต่อความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกโดยเลือกศึกษาพารามิเตอร์อุณหภูมิของผิวแม่พิมพ์ฝั่งคาวิตี้ อุณหภูมิพลาสติกปลายหัวฉีด และความเร็วของการฉีด ซึ่งทำการออกแบบการทดลองโดยวิธีการของวิธีพื้นผิวตอบสนอง แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวยังไม่ได้พิจารณาปัจจัยจากความหยาบผิวฝั่งคาวิตี้ของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

S. E. Layegh and I. Lazoglu [25] ได้ศึกษาลักษณะพื้นผิวสามมิติในงานกัด 5 แกนด้วยดอกกัดบอลโน๊สเอ็นมิล เพื่อทำนายลักษณะพื้นผิวและค่าพารามิเตอร์ความหยาบพื้นผิวชิ้นงานเช่น ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและค่าเฉลี่ยกำลังสองของความหยาบผิว โดยพิจารณาพารามิเตอร์ในการตัดเฉือนคืออัตราการป้อนกัด จำนวนร่องฟันของดอกกัด ระยะห่างของทางเดินดอกกัด (step over) และความลึกในการกัด ด้วยการจำลองลักษณะพื้นผิวสามมิติด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เทียบกับการกัดชิ้นงานจริงแต่ก็ยังไม่ได้พิจารณาการโก่งงอของดอกกัด

จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้นจะเห็นได้ว่ามีการศึกษาและทำการวิจัยเกี่ยวข้องกับการตัดเฉือนเสมือนจริงด้วยวิธีการพิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ อย่างไรก็ตามยังไม่มีการพิจารณาปัจจัยการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ที่ปลายของดอกกัดเอ็นมิลและพารามิเตอร์ของการตัดเฉือนแบบผิวหน้าพื้นผิวสำหรับนำมาประมาณค่าความหยาบพื้นผิวแบบ 3 มิติ ในงานกัดขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดมินิซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซนเตอร์ 3 แกน แบบแนวนอนด้วยดอกกัดบอลโนสเอ็นมิล เพื่อนำค่าความหยาบพื้นผิวของการตัดเฉือนเสมือนจริงมาประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติก และส่วนงานวิจัยที่ศึกษาเรื่องความมันเงาก็ยังไม่ได้พิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความมันเงาจากความหยาบพื้นผิวฝั่งคาวิตี้ของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ดังนั้นงานนี้จึงเลือกศึกษาการประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกบนพื้นฐานความหยาบผิวแบบ 3 มิติของการตัดเฉือนเสมือนจริงและพารามิเตอร์การฉีดพลาสติก

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยในการศึกษาครั้งนี้ใช้ระเบียบวิจัยเชิงทดลองโมเดลเพื่อให้งานวิจัยบรรลุและเป็นไปตามวัตถุประสงค์ ผู้วิจัยจึงได้กำหนดวิธีดำเนินการตามขั้นตอนปฏิบัติดังต่อไปนี้

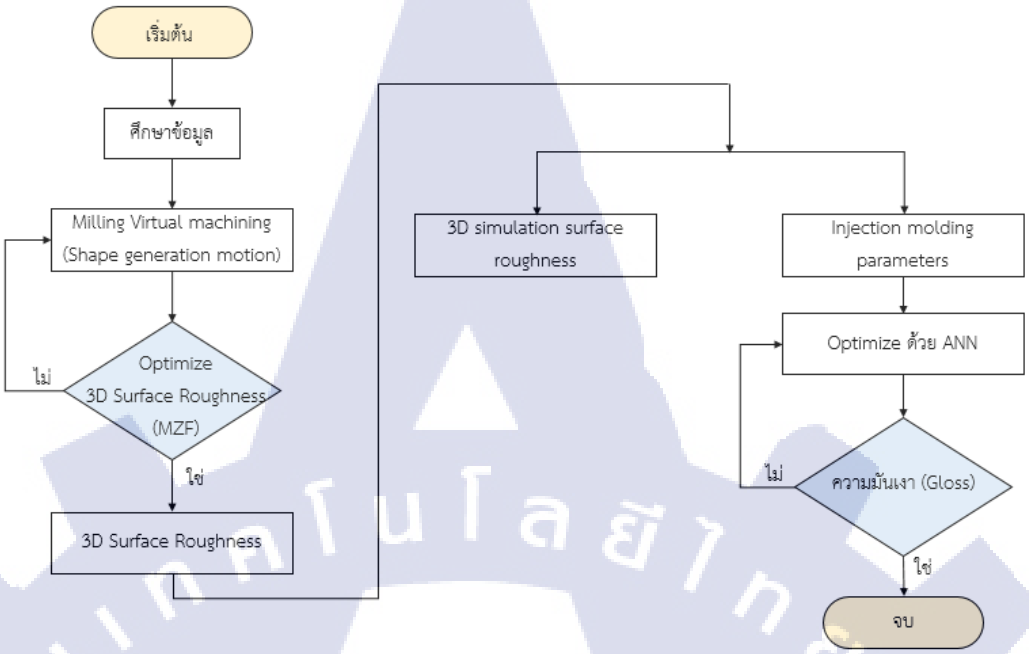
- กระบวนการดำเนินการวิจัย
- การสร้างโมเดลการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของกระบวนการกัดขึ้นรูป
- วิธีการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการกัดขึ้นรูป
- การจำลองการประมาณค่าความหยาบผิว 3 มิติ
- วิธีการประมาณค่าความมันเงาด้วยวิธี ANN

3.1 กระบวนการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อหาค่าความมันเงาที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานฉีดพลาสติกสำเร็จรูป จากค่าความหยาบผิวคาวิตี้ของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกบนพื้นฐานของการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงของกระบวนการกัดพื้นผิวด้วยวิธีพิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ พิกัดรูปร่างเรขาคณิต และการโก่งงอของดอกเอ็นมิลบอลโนสบนเครื่องกัดซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ 3 แกน แล้วทำการสร้างพื้นผิวจำลองด้วยโมเดลการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่บนพื้นฐานการจำลองโมเดลคณิตศาตร์แบบโฮโมจีเนียสทราสฟอร์เมชั่นเมทริกซ์ 4X4 หลังจากนั้นหาค่าที่เหมาะสมของความหยาบผิวด้วยวิธี MZF เพื่อนำค่าความหยาบผิวดังกล่าวมาประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกบนพื้นฐานหลักการวิธีโครงข่ายประสาทเทียม โดยพิจารณาค่าป้อนเข้าของความหยาบผิวคาวิตี้และค่าพารามิเตอร์การฉีดพลาสติก ซึ่งสามารถเขียนเป็นลำดับขั้นตอนทำวิจัยดังรูปที่ 3.1 ได้ดังนี้

จากรูปที่ 3.1 มีกระบวนการวิจัยของการศึกษาการประมาณค่าความมันเงาของชิ้นส่วนพลาสติกซึ่งมีระเบียบวิธีการวิจัย ดังแสดงหัวข้อต่อไปนี้

3.1.1 ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ผ่านการขึ้นรูปจากกระบวนการกัดรวมถึงปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการกัดแม่พิมพ์เพื่อเก็บข้อมูลพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการตัดเฉือน เช่น การเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ของเครื่องกัดซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ 3 แกน รูปร่างเรขาคณิตของเครื่องมือตัด ความผิดพลาดการเคลื่อนที่ของเพลาหมุน แรงตัดเฉือนของเครื่องมือตัดและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง โดยแม่พิมพ์ที่ใช้ในการศึกษาค่าความหยาบผิวจากการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงคือแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกสำหรับทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์เป็นวัสดุ S50C ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ลำดับขั้นตอนการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติก

รูปที่ 3.2 แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกและแม่พิมพ์อินเสิร์ทฝั่งคาวิตี้ (ซ้าย) และคอร์ (ขวา)

3.1.2 ศึกษากระบวนการฉีดพลาสติกและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อความมันเงาในการฉีดชิ้นส่วนพลาสติก เช่นอุณหภูมิของผิวแม่พิมพ์ฝั่งคาวิตี้ อุณหภูมิพลาสติกปลายหัวฉีด อุณหภูมิ

บาร์เรล ความเร็วของการฉีด เป็นต้น สำหรับเป็นปัจจัยป้อนเข้าในการประมาณค่าความมันเงาด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม

3.1.3 สร้างโมเดลการจำลองกระบวนการกัดด้วยวิธีการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่ (shape generation motions) โดยพิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์และวิธีการคำนวณคณิตศาสตร์ทางโฮโมจีเนียสทรานสฟอร์เมชั่นเมทริกซ์ 4X4 ของกลุ่มจุดพิกัดบนพื้นผิวชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการกัดขึ้นรูปเพื่อเป็นตัวเลขอ้างอิงสำหรับประเมินค่าความคลาดเคลื่อน 3 มิติ

3.1.4 เขียนโปรแกรมการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงเพื่อหาค่าความหยาบผิวด้วยโปรแกรม MATLAB โดยป้อนค่าพารามิเตอร์การตัดเฉือนของเครื่องกัดซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ 3 แกนและพารามิเตอร์แรงตัดเฉือนของเครื่องมือตัดเพื่อสร้างพื้นผิวจำลองสำหรับประมาณค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติ โดยการจำลองผ่านโปรแกรมสองรูปแบบคือรูปแบบที่ยังไม่พิจารณาค่าการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์และรูปแบบที่พิจารณาค่าเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ โดยรูปแบบที่ยังไม่พิจารณาค่าการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์จะใช้สำหรับยืนยันค่าความหยาบผิวกับค่าทางทฤษฎีที่คำนวณจากพารามิเตอร์ของระยะป้อนกัดต่อฟัน และรัศมีดอกกัด (ball nose radius: re) ซึ่งสามารถใช้เป็นค่าการยืนยันโมเดลการเปรียบเทียบผลการจำลองค่าความหยาบผิวแบบเฉลี่ย (Ra) และค่าความหยาบผิวสูงสุด (Rz) และค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแบบ 3 มิติ (Sa) ของรูปแบบที่พิจารณาค่าเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ได้

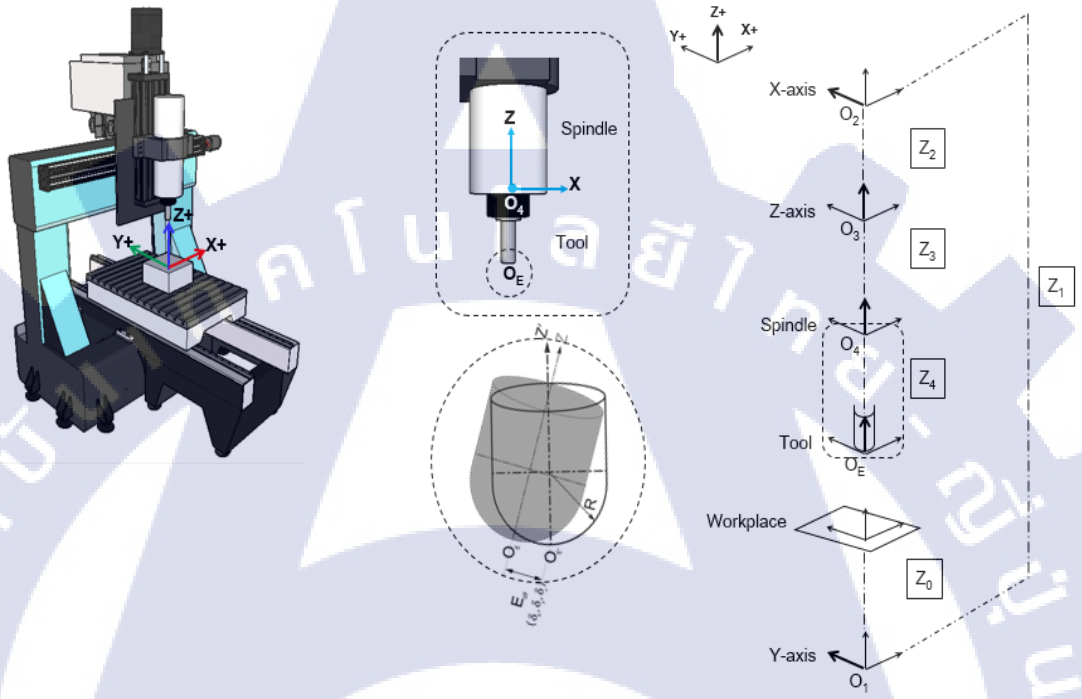
3.1.5 ประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม โดยพิจารณาปัจจัยป้อนเข้าจากค่าความหยาบผิวที่เหมาะสมที่ได้จากข้อที่ 3.1.4 และค่าพารามิเตอร์การฉีดพลาสติกที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกจากงานวิจัยเรื่องการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและการหล่อเย็นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ส่งผลต่อความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกจากงานวิจัยที่นำเสนอโดยกฤช ฉายสุริยะกุล [9]

3.2 การสร้างโมเดลการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของกระบวนการกัดขึ้นรูป

3.2.1 โมเดลการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของกระบวนการกัดขึ้นรูป

เครื่องกัดซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ 3 แกน ที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมการผลิตปัจจุบันมีอยู่หลายชนิด แต่ละชนิดก็มีโครงสร้างและองค์ประกอบทางกายภาพที่แตกต่างกัน สำหรับงานวิจัยนี้เลือกศึกษาเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกนแบบแนวตั้ง (3-axes vertical milling machine) โดยมีการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงสามแกน คือแกน X, Y, Z การสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่ (shape generation motion) [23] ของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน พิจารณาจากแผนผังการเคลื่อนที่แนวป้อน (feed motion) และการเคลื่อนที่หลัก (main motion) จากชิ้นงานบนแท่นวาง ประกอบกับพิกัดรูปร่างเรขาคณิตของดอกกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยจัดให้อยู่ในรูปแบบการคำนวณคณิตศาสตร์

ทางโฮโมจีเนียสทรานสฟอร์มเมชั่นเมทริกซ์ (homogeneous transformation matrix: HTM) 4X4 และสามารถสรุปสมการการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่ที่รวมความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางระหว่างคู่ของแกนการเคลื่อนที่โดยเริ่มจากตำแหน่งของชิ้นงานบนเครื่องกัดสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 21



รูปที่ 3.3 แผนผังการเคลื่อนที่แนวป้อน (feed motion) และการเคลื่อนที่หลัก (main motion) ของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน

$$r_w = A_3(-z_0)\, A_2(y)\, E_{YX}\, A_3(z_1)\, A_1(x)\, E_{XZ}\, A_3(-z_2)\, A_3(z)$$
$$E_{ZS}\, A_3(-z_3)\, A_3(-z_4)\, r_e \qquad (29)$$

r_w คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของจุดในระบบพิกัดชิ้นงาน

r_e คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของจุดในระบบพิกัดที่ปลายดอกกัด

$A_1(*)$ คือ HTM 4x4 การเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงตามแกน X

$A_2(*)$ คือ HTM 4x4 การเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงตามแกน Y

$A_3(*)$ คือ HTM 4x4 การเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงตามแกน Z

x, y, z คือ พารามิเตอร์การเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงตามแกน X, Y และ Z ตามลำดับ

z_i คือ ระยะทางในแนวการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่งระหว่างคู่ที่ i ของแท่นเคลื่อนที่

E_{YX} คือ ความผิดพลาดการเคลื่อนที่ของตำแหน่งและทิศทางระหว่างแกน Y กับแกน X

E_{XZ} คือ ความผิดพลาดการเคลื่อนที่ของตำแหน่งและทิศทางระหว่างแกน X กับแกน Z

E_{ZS} คือ ความผิดพลาดการเคลื่อนที่ของตำแหน่งและทิศทางระหว่างแกน Z กับเพลาหมุน (spindle)

สำหรับความผิดพลาดของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน ในงานวิจัยนี้อ้างอิงความผิดพลาด (geometric error) ของตำแหน่งและทิศทางจากมาตรฐาน ISO-230-1:2012 [26] ประกอบด้วย 5 พารามิเตอร์ ดังตารางที่ 3.1 และจากตารางที่ 3.1 ความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางระหว่างในแต่ละคู่ของการเคลื่อนที่จะนำไปใส่ใน HTM 4x4 ของสมการที่ (29)

ตารางที่ 3.1 ความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางจากมาตรฐาน ISO 230-1:2012

X-axis	Y-axis	Z-axis	(C1) -Spindle
(0)	-	-	0
-	(0)	-	0
-	-	(0)	-
-	0	ε_{xz}	$\varepsilon_{x(c)}$
0	-	ε_{yz}	$\varepsilon_{y(c)}$
ε_{zx}	0	-	-

ε_{ZX} คือ ความผิดพลาดเชิงมุมในแนวหมุนรอบแกน Z ทิศทางเคลื่อนที่ไปยังแกน X

ε_{XZ} คือ ความผิดพลาดเชิงมุมในแนวหมุนรอบแกน X ทิศทางเคลื่อนที่ไปยังแกน Z

ε_{YZ} คือ ความผิดพลาดเชิงมุมในแนวหมุนรอบแกน Y ทิศทางเคลื่อนที่ไปยังแกน Z

$\varepsilon_{X(C)}$ คือ ความผิดพลาดเชิงมุมในแนวหมุนรอบแกน X ทิศทางเคลื่อนที่ไปยังเพลาหมุน

$\varepsilon_{Y(C)}$ คือ ความผิดพลาดเชิงมุมในแนวหมุนรอบแกน Y ทิศทางเคลื่อนที่ไปยังเพลาหมุน

รูปแบบ HTM 4x4 ของสมการที่ (29) แสดงได้ดังนี้

$$A_3=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&-Z_0\\0&0&0&1\end{bmatrix}\quad A_2=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&y\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}\quad E_{YX}=\begin{bmatrix}1&-\varepsilon_{zx}&0&0\\\varepsilon_{zx}&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}$$

$$A_3=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&z_1\\0&0&0&1\end{bmatrix}\quad A_1=\begin{bmatrix}1&0&0&x\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}\quad E_{XZ}=\begin{bmatrix}1&-\varepsilon_{zx}&\varepsilon_{yz}&0\\\varepsilon_{zx}&1&-\varepsilon_{xz}&0\\-\varepsilon_{yz}&\varepsilon_{xz}&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}$$

$$A_3=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&z_2\\0&0&0&1\end{bmatrix}\quad A_3=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&z\\0&0&0&1\end{bmatrix}\quad E_{ZS}=\begin{bmatrix}1&0&\varepsilon_{yz}+\varepsilon_{y(c)}&0\\0&1&-\varepsilon_{xz}-\varepsilon_{x(c)}&0\\-\varepsilon_{yz}-\varepsilon_{y(c)}&\varepsilon_{xz}+\varepsilon_{x(c)}&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}$$

$$A_3=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&-z_3\\0&0&0&1\end{bmatrix}\quad A_3=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&-z_4\\0&0&0&1\end{bmatrix} \tag{30}$$

ตัวอย่าง HTM 4x4 ของการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่จากชิ้นงานถึงแกน X แสดงดังนี้

$$Awx = A_3(-z_0)\,A_2(y)\,E_{YX}$$

$$Awx=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&-Z_0\\0&0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&y\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&-\varepsilon_{zx}&0&0\\\varepsilon_{zx}&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix}1&-\varepsilon_{zx}&0&0\\\varepsilon_{zx}&1&0&y\\0&0&1&-z_0\\0&0&0&1\end{bmatrix} \tag{31}$$

3.2.2 โมเดลแรงการตัดเฉือนของดอกกัดบอลโนสเอ็นมิล

การตัดเฉือนในกระบวนการกัดขึ้นรูปบนเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน จะอาศัยการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างเครื่องมือตัดกับชิ้นงาน ซึ่งในการตัดเฉือนนี้จะเกี่ยวข้องกับแรงของการตัดเฉือนและทำให้เกิดเศษตัดโลหะออกมาเมื่อพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นกับเศษตัดและดอกกัดบอลโน๊สเอ็นมิลของการกัดขึ้นรูปชิ้นงาน สามารถแยกองค์ประกอบของแรงได้สามรูปแบบคือ แรงในแนวสัมผัส (tangential force: Ft) แรงในแนวรัศมี (radial force: Fr) และแรงในแนวแกน (axial force: Fa) [15] ดังแสดงในหัวข้อที่ 2.3.1 ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้ค่าสัมประสิทธ์แรงตัดที่นำเสนอโดย Soori และคณะ [22] ที่ได้ทำการทดลองและยืนยันผลแล้วมาใช้ในการคำนวณค่าองค์ประกอบของแรงทั้งสามชนิด เพื่อนำมาหาแรงลัพธ์ของการตัดเฉือนได้ตามสมการที่ (7)

3.2.3 โมเดลการโก่งงอของดอกกัด

การโก่งงอของดอกกัดขณะดำเนินการตัดเฉือนมีอิทธิพลต่อคุณภาพของชิ้นงานเป็นอย่างมาก โดยการโก่งงอของดอกกัดเกิดจากการที่ดอกกัดทำการตัดเฉือนเนื้อวัสดุชิ้นงาน แรงในการตัดเฉือนส่งผลทำให้เกิดการเบี่ยงเบนตำแหน่งดอกกัด โดยเคลื่อนที่เบี่ยงเบนเป็นระยะจากตำแหน่งทางทฤษฎี เพื่อให้เส้นทางเดินการตัดเฉือนเสมือนจริงของดอกกัดมีค่าใกล้เคียงกับเส้นทางเดินการตัดเฉือนจริงมากที่สุดจึงต้องพิจารณาการโก่งงอของดอกกัดซึ่งการคำนวณระยะการโก่งงอของดอกกัดจะนำแรงลัพธ์ของการตัดเฉือนที่ได้จากหัวข้อ 3.2.2 มาคำนวณในสมการที่ (8)

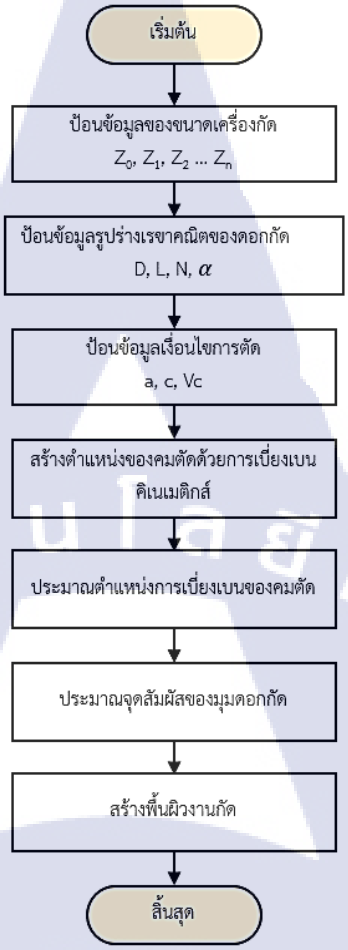
3.3 วิธีการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการกัดขึ้นรูป [16]

ระบบการตัดเฉือนเสมือนจริงได้ถูกพัฒนานำมาใช้ในการจำลองกระบวนการกัดขึ้นรูปด้วยการสร้างรูปร่างและวิเคราะห์ของชุดพิกัดจุดหลาย ๆ จุดร่วมกับการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์เพื่อแสดงพื้นผิวหน้าของงานกัด ลำดับขั้นตอนของกระบวนการตัดเฉือนเสมือนจริงของงานกัดแสดงได้ดังรูปที่ 3.4

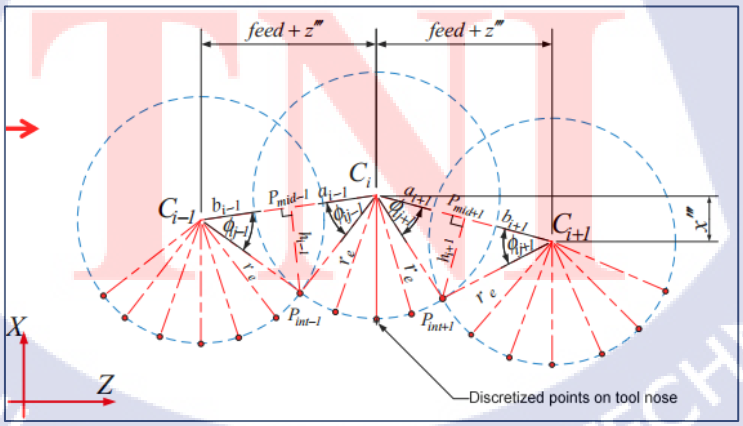
จากรูปที่ 3.4 แสดงลำดับขั้นตอนการจำลองผิวชิ้นงานของกระบวนการกัดขึ้นรูปบนพื้นฐานการป้อนข้อมูลของการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ รูปร่างเรขาคณิตของดอกกัด และข้อมูลเงื่อนไขการตัด ซึ่งสัญญลักษณ์ a, c Vc คือ ความลึกของการตัด ระยะป้อนต่อฟัน และความเร็วตัด ตามลำดับ

รูปที่ 3.5 แสดงการประมาณจุดสัมผัสของมุมดอกกัดจะพิจารณาจากร่องของการกัด C_{i-1}, C_i , และ C_{i+1} คือ tool nose center ของจำนวนรอบการป้อนกัด 3 รอบ r_e คือรัศมีดอกกัด P_{int-1}, P_{int+1} คือ จุดตัดของเส้น tool nose ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่อ้างอิง [27] เมื่อพิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ จุดศูนย์กลางของ tool nose จะไม่อยู่ในแนวเส้นตรงระนาบเดียวกันและมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างต่อเนื่อง

ตัวอย่างการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงของกระบวนการกัดพื้นผิวแม่พิมพ์วัสดุ AL7075T651 ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยตลอดการจำลองมีจุดพิกัดบนพื้นผิวที่ได้รับ 10,000 จุด

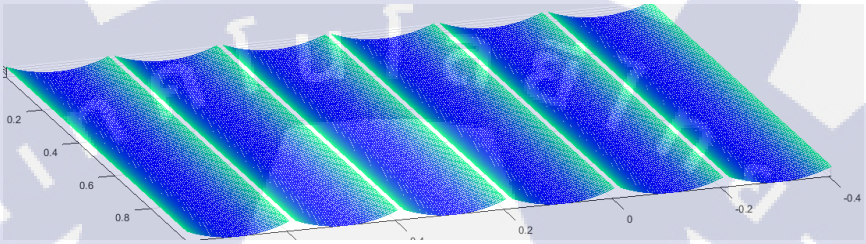


รูปที่ 3.4 แผนผังการจำลองผิวชิ้นงานของกระบวนการกัดขึ้นรูป



รูปที่ 3.5 ขนาดร่องการกัดขึ้นรูปที่พิจารณาจุดสัมผัสของมุมดอกกัด [27]

สำหรับค่าพารามิเตอร์การเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของรูปที่ 3.6 ตามสมการที่ (21) จะใช้ตัวเลขแบบสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติโดยค่าความผิดพลาดเชิงมุม (ε) ใช้ค่าระหว่าง 0 – 100 μrad การตัดเฉือนใช้ดอกกัดบอลโน๊สเอ็นมิลทำจากวัสดุเหล็กกล้ารอบสูง (HSS) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 mm มุมเอียงคมตัด 30 องศา แบบ 2 ร่องคมตัด สัมประสิทธิ์แรงตัด K_{tc} = 937.334, K_{te} = 5.0386, K_{rc} = 292.067, K_{re} = 6.7597, K_{ac} =171.37 และ K_{ae} = -0.83067, E = 200 Gpa, a = 0.06 mm, f = 0.25 mm/tooth, Vc = 132 m/min ระยะ Z_0 = 195 mm, Z_1 = 995 mm, Z_2 = 280 mm, Z_3 = 320 mm, Z_4 = 100 mm, x = 325 mm, y = 250 mm, z = 225 mm



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงที่พิจารณาการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส และการโก่งงอ

3.4 การจำลองการประมาณค่าความหยาบผิว 3 มิติ

3.4.1 การกำหนดกำหนดพารามิเตอร์การตัดเฉือนและระดับการทดลอง

ทุกๆ จุด ที่อยู่บนพื้นผิวจำลองที่สร้างขึ้น ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Taguchi Orthogonal Array, L9 (3^3) โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้ปัจจัยควบคุมที่เป็นตัวแปรต้นคือ ความลึกของการตัด (a) ระยะป้อนกัดต่อฟัน (c) และความเร็วตัด (Vc) รวม 3 ตัวแปร โดยมีระดับการทดลอง 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งในแต่ละระดับของปัจจัยควบคุมอ้างอิงค่าจากแค็ตตาล็อกดอกกัดบอลโน๊สเอ็นมิลยี่ห้อ sumitomo รุ่น GSX mill ballnose และพารามิเตอร์อื่น ๆ ตามหัวข้อที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 การออกแบบปัจจัยควบคุมและระดับการทดลอง

ลำดับ	ปัจจัยควบคุม	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 3
1	ความลึกของการตัด (a)	0.06	0.12	0.18
2	ระยะป้อนกัดต่อฟัน (c)	0.08	0.17	0.25
3	ความเร็วตัด (V_c)	132	264	396

3.4.2 การออกแบบการทดลอง Orthogonal Array, L9 (3^3)

ตารางที่ 3.3 แสดงจำนวนรูปแบบการทดลองทั้งหมด 9 การทดลองของพารามิเตอร์การตัดเฉือน 3 ปัจจัยควบคุมที่ 3 ระดับการทดลอง ซึ่งในการออกแบบการทดลอง Orthogonal Array, L9 (3^3) ใช้โปรแกรม MINITAB ในการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงที่พิจารณาการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ และการโก่งงอของดอกกัด ดังแสดงในตารางที่ 3.3

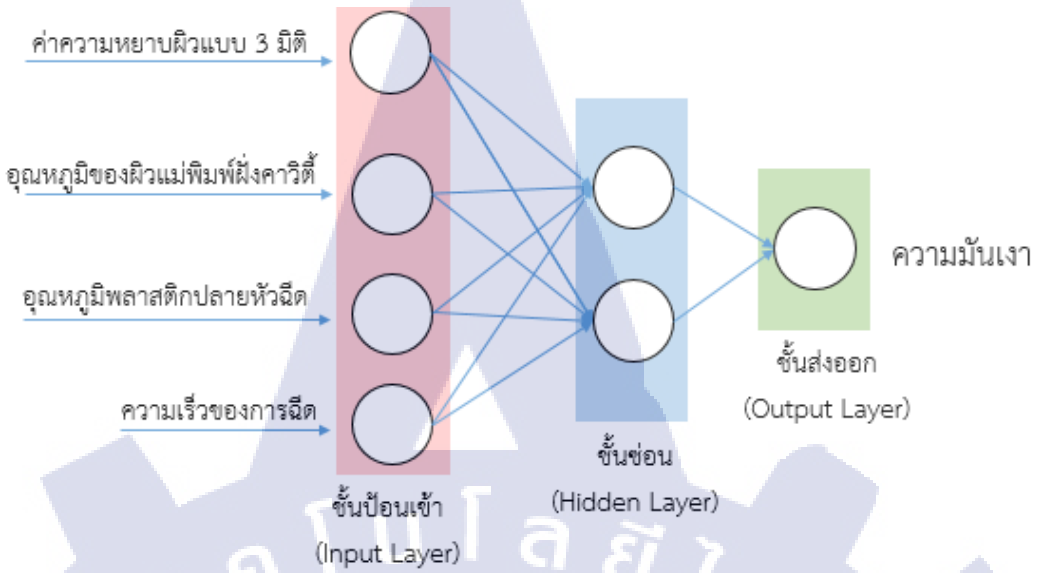
ตารางที่ 3.3 รูปแบบการทดลองแบบ Orthogonal Array, L9 (3^3)

No.	Control factors		
	a (mm)	c (mm/tooth)	v_c (m/min)
1	0.06	0.08	132
2	0.06	0.17	264
3	0.06	0.25	396
4	0.12	0.08	264
5	0.12	0.17	396
6	0.12	0.25	132
7	0.18	0.08	396
8	0.18	0.17	132
9	0.18	0.25	264

3.5 วิธีการประมาณค่าความมันเงาด้วยวิธี ANN

ในการประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกสำหรับงานวิจัยนี้จะทำการประมาณด้วยวิธี ANN บนพื้นฐานกล่องเครื่องมือ ANN ในโปรแกรม MATLAB (matlab ANN toolbox) ซึ่งโครงสร้างของ ANN จะประกอบไปด้วย 3 ชั้น คือชั้นป้อนเข้า (input layer) ชั้นซ่อน (hidden layer) และชั้นส่งออก (output layer)

เนื่องจากมีข้อกำหนดในเรื่องของความจำ การประมวลผล และเวลาในการคำนวณของเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังนั้นในการประมาณค่าความมันเงาของงานวิจัยนี้สามารถออกแบบโครงสร้างของ ANN ได้ดังรูปที่ 3.7

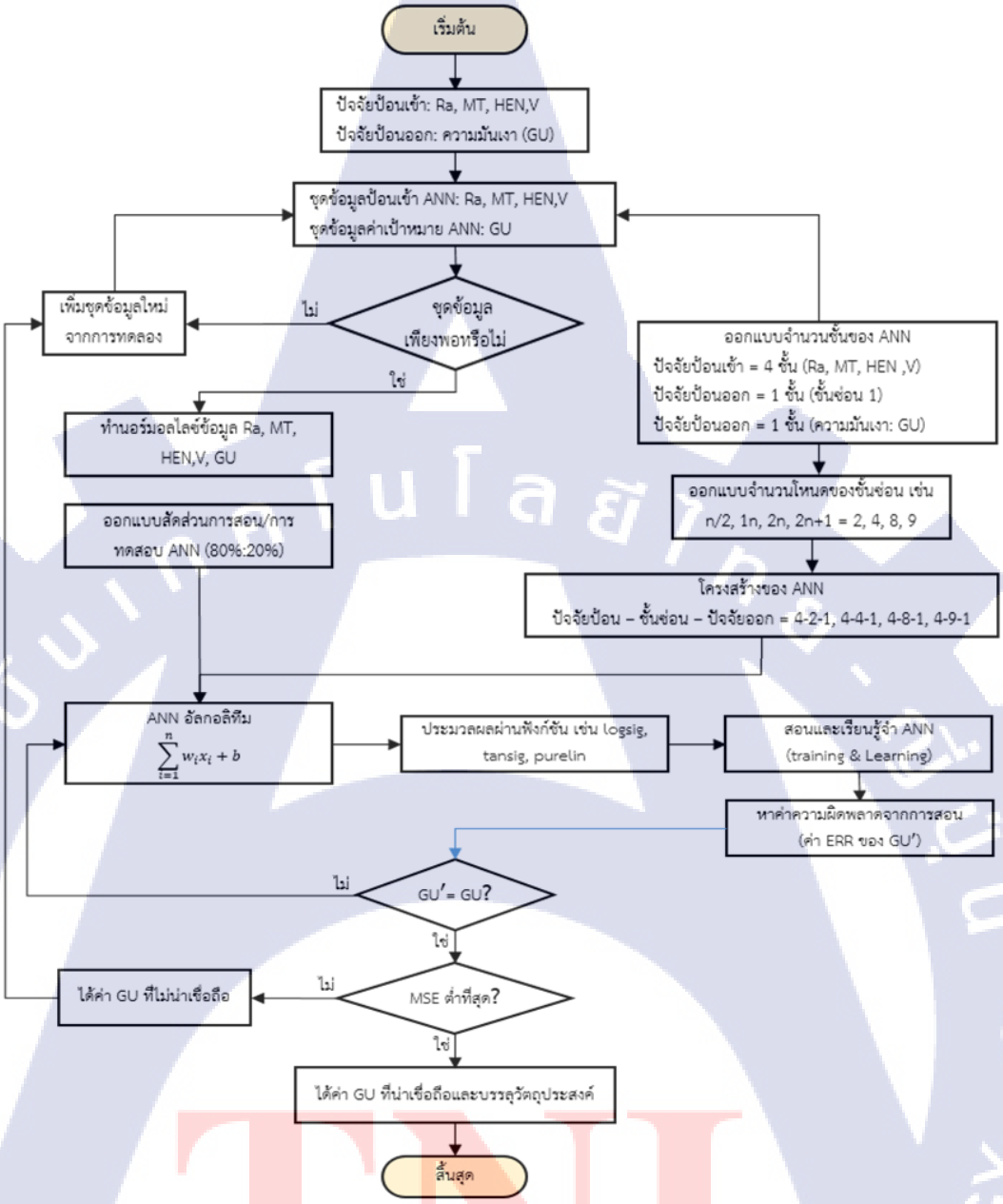


รูปที่ 3.7 โครงสร้างของ ANN ในงานวิจัย

จากรูปที่ 3.7 ชั้นป้อนเข้ามีค่าป้อนเข้า 4 ค่า คือ ค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติ (Sa) อุณหภูมิของผิวแม่พิมพ์ฝั่งคาวิตี้ (MT) อุณหภูมิพลาสติกปลายหัวฉีด (HEN) และความเร็วของการฉีด (V) ชั้นส่งออกมีค่าส่งออกมี 1 ค่าคือค่าความมันเงา (GU) ส่วนในชั้นซ่อนมี 1 ชั้น โดยกำหนดให้จำนวนโหนด (node) ของชั้นซ่อนอ้างอิงจากค่าแนะนำ [19] ที่ n/2 โดยที่ n คือจำนวนของค่าป้อนเข้า จะได้จำนวนโหนดของชั้นซ่อนที่ 5/2 = 2.5 ≈ 2

กระบวนการทำงานของ ANN ในงานวิจัยนี้จะทำการประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยมีแผนผังการประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกดังรูปที่ 3.8

จากรูปที่ 3.8 ค่าความมันเงาที่เหมาะสมที่สุดของชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ได้จากวิธี ANN ก็จะทำการยืนยันผลลัพธ์เทียบกับกับค่าความมันเงาที่เหมาะสมที่สุดของชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ได้จากสมการพยากรณ์ค่าความมันเงาด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนองโดยวิธีดังกล่าวได้ค่าความมันเงาสูงสุดอยู่ที่ 92.8 GU ที่ค่าพารามิเตอร์ของการฉีดพลาสติกที่เหมาะสมที่สุดดังนี้ คือ อุณหภูมิของผิวแม่พิมพ์ฝั่งคาวิตี้ 76.82 องศาเซลเซียส อุณหภูมิพลาสติกปลายหัวฉีด 223.18 องศาเซลเซียส ความเร็วของการฉีด 166.82 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองจริงเท่ากับร้อยละ 80.67



รูปที่ 3.8 แผนผังการประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติก

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

หลังจากที่ได้ดำเนินการตามวิธีดำเนินการวิจัย ผู้วิจัยได้จำลองการประมาณค่าความหยาบผิว 3 มิติ โดยการจำลองพื้นผิวทรงกระบอกจากกระบวนการกัดขึ้นรูป ด้วยโปรแกรม MATLAB และทำการออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดพารามิเตอร์การตัดเฉือนและระดับการทดลองสำหรับกระบวนการจำลองดังกล่าว ซึ่งจะอภิปรายผลตามหัวข้อดังต่อไปนี้

- การเปรียบเทียบผลการจำลองความหยาบผิว
- การวิเคราะห์ผลการจำลองค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติ
- ผลการประมาณค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติที่ดีที่สุด
- ผลการประมาณค่าความมันเงาที่ดีที่สุดด้วยวิธี ANN

การออกแบบการทดลองดำเนินการด้วยวิธี Taguchi Orthogonal Array, L9 (3^3) ปัจจัยควบคุมที่เป็นตัวแปรต้นคือ ความลึกของการตัด (a) ระยะป้อนกัดต่อฟัน (c) และความเร็วตัด (Vc) รวม 3 ตัวแปร โดยมีระดับการทดลอง 3 ระดับ เพื่อทำการทดลองการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวระหว่างค่าความหยาบผิวทางทฤษฎีกับค่าความหยาบผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ที่ได้จากการจำลองโดยยังไม่ได้พิจารณาค่าการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ และการโก่งงอของดอกกัดเพื่อเป็นการยืนยันค่ากับค่าความหยาบผิวทางทฤษฎี หลังจากนั้นจึงทำการทดลองหาค่าความหยาบผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ด้วยการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงที่พิจารณาการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ และการโก่งงอของดอกกัด

การสรุปผลและยืนยันผลการทดลอง ในงานวิจัยนี้การยืนยันผลปัจจัยควบคุมที่เป็นค่าดีที่สุดด้วยการพิจารณาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (signal to noise ratio: S/N) เพื่อหาค่าปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพความหยาบผิวแบบ 3 มิติ เมื่อได้ค่าปัจจัยควบคุมที่เป็นค่าดีที่สุดแล้วจะนำมาทำการจำลองหาค่าความหยาบผิวเพื่อให้ได้ค่าใกล้เคียงกับค่าความหยาบผิวจริงของมีพิมพ์ฉีดพลาสติกสำหรับนำไปเป็นปัจจัยป้อนเข้าในการหาค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติ ที่ดีที่สุด

4.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองความหยาบผิว

การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวระหว่างค่าความหยาบผิวทางทฤษฎีกับค่าความหยาบผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ที่ได้จากการจำลองโดยยังไม่ได้พิจารณาค่าการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ และการโก่งงอของดอกกัด โดยค่าความหยาบผิวทางทฤษฎีคำนวณจากพารามิเตอร์ของระยะป้อนกัดต่อฟัน และรัศมีดอกกัด (ball nose radius: re) ซึ่งสามารถใช้เป็นค่าการยืนยันโมเดลการเปรียบเทียบผลการจำลองค่าความหยาบผิวแบบเฉลี่ย (Ra) และค่าความหยาบผิวสูงสุด (Rz)

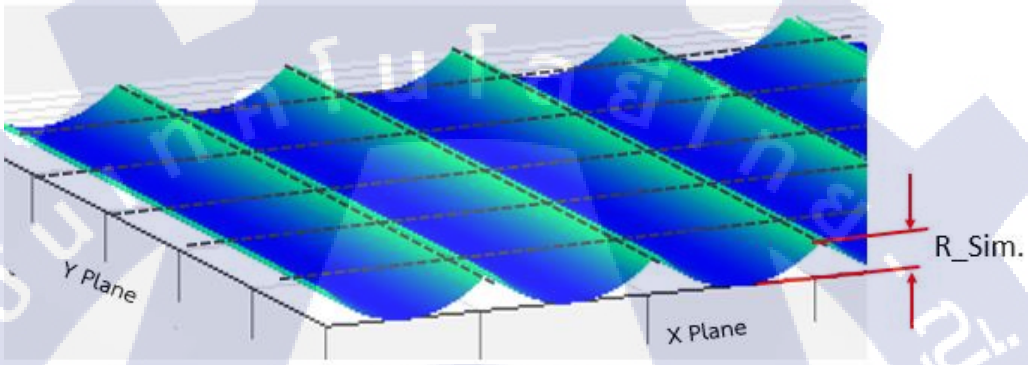
และค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแบบ 3 มิติ (Sa) ได้ ผลการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวทางทฤษฎีและค่าจากการจำลองที่ยังไม่ได้พิจารณาการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และการโก่งงอของดอกกัดแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวทางทฤษฎีและค่าจากการจำลองที่ไม่ได้พิจารณาเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และการโก่งงอของดอกกัด

No.	Machining parameters				Surface roughness (μm)				
					Theory	Simulation			
	re (mm)	a (mm)	c (mm/tooth)	v_c (m/min)	Rz_th (a)	Rz (b)	Ra (c)	Sa (d)	Diff (a-b)
1	1	0.06	0.08	132	0.8	0.7977	0.7977	0.7977	0.0023
2	1	0.06	0.17	264	3.6125	3.567	3.567	3.567	0.0455
3	1	0.06	0.25	396	7.8125	7.6045	7.6045	7.6045	0.2080
4	3	0.12	0.08	264	0.2667	0.2666	0.2666	0.2666	0.0001
5	3	0.12	0.17	396	1.2042	1.2024	1.2024	1.2024	0.0018
6	3	0.12	0.25	132	2.6042	2.5962	2.5962	2.5962	0.0080
7	5	0.18	0.08	396	0.1600	0.1599	0.1599	0.1599	0.0001
8	5	0.18	0.17	132	0.7225	0.7218	0.7218	0.7218	0.0007
9	5	0.18	0.25	264	1.5625	1.5606	1.5606	1.5606	0.0019
				Total	18.7451	18.4767	18.4767	18.4767	0.2684
								AVG.	**0.0298**
								%Diff	**1.43**

จากตารางที่ 4.1 สำหรับผลลัพท์ค่า Ra, Rz และ Sa มีค่าเท่ากันเนื่องจากจุดพิกัดบนพื้นผิวจำลองที่สร้างขึ้นดังกล่าวปราศจากค่าเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ และการโก่งงอของดอกกัด

เมื่อพิจารณาพื้นที่หน้าตัดของระนาบ 2 มิติ จึงทำให้ค่าความหยาบผิวทุกหน้าตัดเท่ากันทุกระนาบ และหากพิจารณาบนระนาบ 3 มิติ ที่ประกอบไปด้วยหน้าตัดระนาบ 2 มิติ หลาย ๆ ระนาบรวมกัน แล้วจะส่งผลให้ค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติมีค่าเท่ากันกับค่าความหยาบผิว 2 มิติ ซึ่งทั้งสามค่ามีความใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี (Rz_th) ที่การประมาณค่า 10,000 จุดพิกัดบนพื้นผิวทรงกระบอกจำลองที่สร้างขึ้นโดยแตกต่างกันที่ 1.43 % และค่าเฉลี่ยความแตกต่างอยู่ที่ 0.2984 μm ดังนั้นค่าประมาณการความหยาบผิวแบบ 2 มิติ จะนำไปยืนได้จากโมเดลการจำลองจึงเป็นค่าประมาณการเบื้องต้นสำหรับใช้ในการยืนยันผลค่าความหยาบผิวแบบ 3 ในขั้นตอนถัดไป



รูปที่ 4.1 พื้นผิวการจำลองที่ไม่ได้พิจารณาการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และการโก่งงอของดอกกัด

รูปที่ 4.1 แสดงผลของพื้นผิวการจำลองที่ไม่ได้พิจารณาการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และการโก่งงอของดอกกัดทีพารามิเตอร์การตัดเฉือน รัศมีดอกกัด1 mm ระยะป้อนลึก 0.06 mm อัตราป้อนกัด 0.05 mm/tooth ความเร็วการตัด 396 m/min

4.1.1 การออกแบบการทดลอง Orthogonal Array, L9 (3^3)

การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติ ของพื้นผิวจำลองกรณีที่พิจารณาการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และการโก่งงอของดอกกัด แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งได้จำนวนรูปแบบการทดลองทั้งหมด 9 การทดลองของพารามิเตอร์การตัดเฉือน 3 ปัจจัยควบคุมที่ 3 ระดับการทดลอง ซึ่งในการออกแบบการทดลอง Orthogonal Array, L9 (3^3) ใช้โปรแกรม MINITAB ในการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงที่พิจารณาการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ และการโก่งงอของดอกกัด

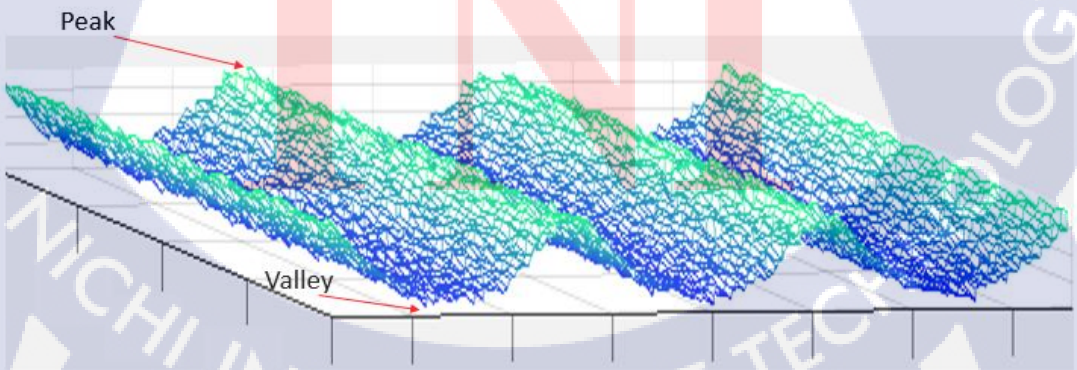
ตารางที่ 4.2 รูปแบบการทดลองแบบ Orthogonal Array, L9 (3^3)

No.	Control factors		
	a (mm)	c (mm/tooth)	v_c (m/min)
1	0.06	0.08	132
2	0.06	0.17	264
3	0.06	0.25	396
4	0.12	0.08	264
5	0.12	0.17	396
6	0.12	0.25	132
7	0.18	0.08	396
8	0.18	0.17	132
9	0.18	0.25	264

4.1.2 ผลของความหยาบผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ

ผลของความหยาบผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ที่ได้จากการจำลองกระบวนการกัดขึ้นรูปที่พิจารณาการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ และการโก่งงอของดอกกัด แสดงดังตารางที่ 4.3 ซึ่งการจำลองนี้จะใช้ค่ารัศมีดอกกัด 3 mm

รูปที่ 4.2 แสดงผลของพื้นผิวการจำลองที่ไม่ได้พิจารณาการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และการโก่งงอของดอกกัดทีพารามิเตอร์การตัดเฉือน รัศมีดอกกัด 3 mm ระยะป้อนลึก 0.06 mm อัตราป้อนกัด 0.05 mm/tooth ความเร็วการตัด 396 m/min



รูปที่ 4.2 พื้นผิวการจำลองที่พิจารณาการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และการโก่งงอของดอกกัด

ตารางที่ 4.3 ค่าความหยาบผิวของการจำลองพื้นผิวที่พิจารณาค่าการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และการโก่งงอของดอกกัด

No.	Machining parameters				Surface roughness Simulation	
	re (mm)	a (mm)	c (mm/tooth)	v_c (m/min)	Ra (μm)	Sa (μm)
1	3	0.06	0.08	132	0.2959	0.2545
2	3	0.06	0.17	264	0.2825	0.2023
3	3	0.06	0.25	396	0.2755	0.1716
4	3	0.12	0.08	264	0.2725	0.2659
5	3	0.12	0.17	396	0.2887	0.2452
6	3	0.12	0.25	132	0.2767	0.2076
7	3	0.18	0.08	396	0.2914	0.2851
8	3	0.18	0.17	132	0.2229	0.1745
9	3	0.18	0.25	264	0.1959	0.1239

4.2 การวิเคราะห์ผลการจำลองค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติ

หลังจากได้ออกแบบการทดลองของการจำลองการกัดขึ้นรูปตามตารางที่ 4.2 แล้วแต่ละพารามิเตอร์การตัดเฉือนที่ระดับต่างกันส่งผลให้ค่าความหยาบผิวแตกต่างกันไปตามจำนวนการทดลองที่ได้ออกแบบ ในงานวิจัยนี้การยืนยันผลปัจจัยควบคุมที่เป็นค่าดีที่สุดจะพิจารณาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (signal to noise ratio: S/N) โดยผลตอบสนองค่า S/N ratio ของพารามิเตอร์การตัดเฉือนจากการจำลองสำหรับความหยาบผิวแบบ 3 มิติแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งลักษณะพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อคุณภาพความหยาบผิวคือลักษณะ S/N ratio ที่ค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (smaller-the-better)

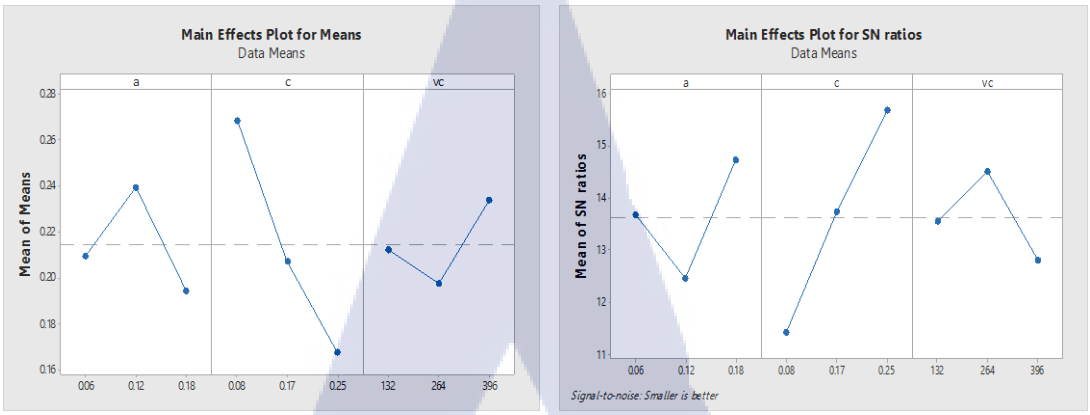
ตารางที่ 4.5 แสดงปัจจัยพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าผลตอบสนอง S/N ratio และค่าผลตอบสนองเฉลี่ยของความหยาบผิวสำหรับกระบวนการจำลองการกัดขึ้นรูปบนพื้นฐานค่าพารามิเตอร์การตัดเฉือนของความลึกของการตัด (a) ระยะป้อนต่อฟัน (c) และความเร็วตัด (Vc) ที่ เป็นปัจจัยควบคุม

ตารางที่ 4.4 ผลลัพธ์ของการจำลองค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติ และค่า S/N ratio

No.	Level of factor			Simulation	
	a	c	v_c	Sa (μm)	S/N ratio (dB)
1	0.06	0.08	132	0.2545	11.8862
2	0.06	0.17	264	0.2023	13.8801
3	0.06	0.25	396	0.1716	15.3097
4	0.12	0.08	264	0.2659	11.5056
5	0.12	0.17	396	0.2452	12.2096
6	0.12	0.25	132	0.2076	13.6555
7	0.18	0.08	396	0.2851	10.9001
8	0.18	0.17	132	0.1745	15.1641
9	0.18	0.25	264	0.1239	18.1386

ตารางที่ 4.5 ปัจจัยพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าผลตอบสนอง S/N ratio

Level	Control factor			Control factor		
	S/N ratios Control factors			Means Control factors		
	a	c	v_c	a	c	v_c
1	13.69	11.43	13.57	0.2095	0.2685	0.2122
2	12.46	13.75	14.51	0.2396	0.2073	0.1974
3	14.73	15.70	12.81	0.1945	0.1677	0.2340
Delta	2.28	4.27	1.70	0.0451	0.1008	0.0366
Rank	2	1	3	2	1	3



a) b)

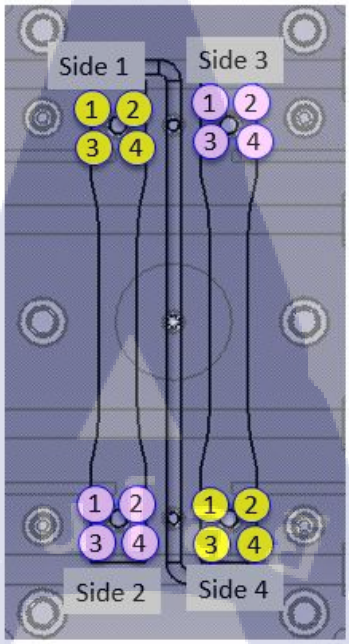
รูปที่ 4.3 ผลกระทบหลักของปัจจัยควบคุมที่ส่งผลต่อ a) ค่าเฉลี่ยของความหยาบผิว b) ค่าเฉลี่ยของ S/N ratio

จากการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Taguchi orthogonal array L9, (3^3) ที่พิจารณาค่า S/N ratio ที่สูงที่สุด จากรูปที่ 4.1 ค่าปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพความหยาบผิวแบบ 3 มิติ คือ ความลึกของการตัด (a) = 0.18 mm ที่ระดับ 3 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความหยาบผิวที่ 0.1945 µm และอัตราการป้อนกัด (c) = 0.25 mm/tooth ที่ระดับ 3 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความหยาบผิวที่ 0.1677 µm และความเร็วตัด (Vc) = 264 m/min ที่ระดับ 2 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความหยาบผิวที่ 0.1974 µm

4.3 การยืนยันผลค่าความหยาบผิวของโมเดลการจำลองการตัดเฉือน

การยืนยันผลความหยาบผิวของโมเดลการจำลองการตัดเฉือนจะทำการยืนยันผลจากค่าความหยาบผิว 2 มิติที่วัดจริงจากแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเทียบกับค่าความหยาบผิว 2 มิติ จากโมเดลการจำลองที่พิจารณาค่าเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน ที่ใช้ในการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์ โดยใช้ค่าปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพความหยาบผิวจากหัวข้อที่ 4.2 โดยการวัดจากเครื่องวัดความหยาบผิวทั้งหมดสี่ด้าน ๆ ละ สี่ตำแหน่งของแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งผลของความหยาบผิวที่วัดได้เปรียบเทียบกับโมเดลการจำลองการตัดเฉือนแสดงดังตารางที่ 4.6

จากตารางที่ 4.6 ผลของความหยาบผิวแบบ 2 มิติที่วัดได้เปรียบเทียบกับโมเดลการจำลองการตัดเฉือนที่พิจารณาค่าเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน แตกต่างกันเฉลี่ย 0.012 µm จึงใช้ยืนยันค่าความหยาบผิวแบบ 2 มิติ



รูปที่ 4.4 ตำแหน่งการวัดความหยาบผิวแบบ 2 มิติของแม่พิมพ์

ตารางที่ 4.6 ผลของความหยาบผิวที่วัดได้เปรียบเทียบกับโมเดลการจำลองการตัดเฉือน

ความหยาบผิว	**ด้านที่**	**ตำแหน่ง 1**	**ตำแหน่ง 2**	**ตำแหน่ง 3**	**ตำแหน่ง 4**	**Ra เฉลี่ย** µm	**Ra จำลอง** µm	**ผลต่างเฉลี่ย** µm
Ra	1	0.250	0.312	0.333	0.387	0.290	0.302	0.012
	2	0.330	0.248	0.261	0.245			
	3	0.316	0.315	0.282	0.253			
	4	0.270	0.318	0.195	0.331			

เนื่องจากความหยาบผิวแบบ 2 มิติ ที่ได้จากโมเดลการจำลองที่ยังไม่ได้พิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ได้ถูกยืนยันผลเทียบกับค่าทฤษฎีจากหัวข้อที่ 4.1 แล้วพบว่า ค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติ มีค่าเท่ากันกับค่าความหยาบผิว 2 มิติ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการประมาณค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติจากผลของการพิจารณาค่าเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ในโมเดลการจำลอง เนื่องจากงานวิจัยนี้

ไม่ได้ทำการวัดความหยาบผิวแบบ 3 มิติ จริงที่แม่พิมพ์ เพื่อให้ได้ความหยาบผิวแบบ 3 มิติที่มีค่าใกล้เคียงกับความหยาบผิวของแม่พิมพ์จริงซึ่งจะเป็นข้อเสนอแนะในการทำงานวิจัยในอนาคตต่อไป

4.3 ผลการประมาณค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติที่ดีที่สุด

หลังจากที่ได้ค่าปัจจัยที่ดีที่สุดจากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Taguchi orthogonal array L9, (3^3) ที่พิจารณาค่า S/N ratio ที่ส่งผลต่อคุณภาพความหยาบผิวแบบ 3 มิติตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 4.2 แล้ว จะนำค่าปัจจัยที่ดีที่สุดดังกล่าวมาทำการประมาณค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติจากกระบวนการจำลองการกัดขึ้นรูป โดยพิจารณาค่าการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และการโก่งงอของดอกกัด โดยจะทำการจำลองทั้งหมด 19 ครั้งเพื่อให้สอดคล้องการออกแบบการทดลองสำหรับวัดความมันเงาด้วยการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต 19 ตัวอย่างที่นำเสนอโดย กฤช ฉายสุริยะกุล [9] เพื่อเป็นข้อมูลปัจจัยป้อนเข้าสำหรับการประมาณค่าความมันเงา ผลการประมาณค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติพร้อมผลของความมันเงาที่ระดับปัจจัยควบคุมที่ส่งผลต่อความมันเงาแสดงดังตารางที่ 4.7 โดยผลการประมาณค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติ ใช้พารามิเตอร์การตัดเฉือนที่ D = 6 mm, a = 0.18 mm, c = 0.25 mm/tooth, Vc = 264 mm/min

4.4 ผลการประมาณค่าความมันเงาที่ดีที่สุดด้วยวิธี ANN

4.4.1 การกำหนดรูปแบบ ANN

ในการประมาณค่าความมันเงาในงานวิจัยนี้จะดำเนินการโดยจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบการแพร่ย้อนกลับ (back propagation) ผ่านกล่องเครื่องมือของโปรแกรม MATLAB โดยออกแบบจำนวนโหนดของชั้นซ่อนตามวิธีที่นำเสนอโดย A.M. Zain et al. [17] คือ n/2, 1n, 2n และ 2n+1 โดยที่ n คือ จำนวนของปัยจัยป้อนเข้า ซึ่งงานวิจัยนี้มีปัจจัยป้อนเข้า 4 ปัจจัยคือ ความหยาบผิวแบบ 3 มิติ อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ อุณหภูมิปลายหัวฉีด และความเร็วฉีดย้ำ ดังนั้นโครงสร้างของ ANN จำนวน 1 ชั้นซ่อน จึงมี 4 รูปแบบดังนี้ 4-2-1, 4-4-1, 4-8-1, 4-9-1 ยกตัวอย่างความหมายของรูปแบบ 4-2-1 คือ โครงสร้าง ANN ที่มีปัจจัยป้อนเข้า 4 ปัจจัย มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อน 2 โหนด และมีปัจจัยป้อนออก 1 ปัจจัย จากข้อมูลค่าความมันเงาในตารางที่ 4.4 แต่ละลำดับการทดสอบจะนำมาใช้ฝึกหัด (training) และทดสอบ (testing) ในแบบจำลอง ANN มีข้อมูลทั้งหมด 19 ชุดข้อมูล โดยที่ชุดข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็น 2 สวน สวนแรกใช้เพื่อการฝึกหัด แบบจำลอง ANN จำนวน 15 ชุดข้อมูล และใช้เพื่อทดสอบแบบจำลอง ANN จำนวน 4 ชุดข้อมูล คิดเป็นอัตราส่วน 80% : 20% โดยกำหนดให้การสอน (train) มีคา Epoch เทากับ 1,000 ค่า Gradient มีคาจาก 1.0 – 1.0 $^{e-7}$ และ Validation check เทากับ 6

ตารางที่ 4.7 ผลการประมาณค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติพร้อมผลของความมันเงาที่ระดับปัจจัยควบคุมที่ส่งผลต่อความมันเงา

ที่	ความหยาบผิวแบบ 3 มิติ: Sa (µm)	อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์: MT (°C)	อุณหภูมิปลายหัวฉีด: HEN (°C)	ความเร็วฉีดย้ำ: VH (mm/sec)	ระดับความมันเงา (GU)	ฝึกสอน/ทดสอบ
1	0.2604	50	230	140	55.09	ฝึกสอน
2	0.3585	70	230	140	67.41	ฝึกสอน
3	0.3683	50	250	140	39.64	ฝึกสอน
4	0.2652	70	250	140	58.07	ทดสอบ
5	0.2076	50	230	160	60.80	ฝึกสอน
6	0.3027	70	230	160	68.90	ฝึกสอน
7	0.2455	50	250	160	39.29	ฝึกสอน
8	0.3759	70	250	160	54.38	ทดสอบ
9	0.3418	43.18	240	150	39.19	ฝึกสอน
10	0.4178	76.82	240	150	53.41	ฝึกสอน
11	0.3567	60	223.18	150	72.73	ฝึกสอน
12	0.3477	60	256.81	150	37.65	ทดสอบ
13	0.2569	60	240	133.18	39.68	ฝึกสอน
14	0.2712	60	240	166.81	40.15	ฝึกสอน
15	0.3027	60	240	150	40.32	ฝึกสอน
16	0.3418	60	240	150	43.97	ทดสอบ
17	0.2076	60	240	150	40.64	ฝึกสอน
18	0.3759	60	240	150	43.18	ฝึกสอน
19	0.4178	60	240	150	42.58	ฝึกสอน

ส่วนการเรียนรู้จะใช้กฎการเรียนรู้ (Training Function) แบบ Levenberg Marquardt Algorithm (TRAINLM) และใช้ Adaption Learning Function แบบ Gradient descent with

momentum weight and bias learning function (LEARNGDM) สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ใช้แบบ Tan-sigmoid Transfer Function (Tansig) ซึ่งมีสมการฟังก์ชัน ดังนี้

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \tag{30}$$

ส่วนดัชนีที่ใช้วัดความแมนยำของแบบจำลอง ANN งานวิจัยนี้ใช้ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Squared Error: MSE) ในการเปรียบเทียบความแมนยำของผลการประมาณค่าความมันเงาจากแบบจำลอง ANN แต่ละรูปแบบโครงสร้างของ ANN ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.7 และเพื่อให้ค่าของปัจจัยป้อนเข้าอยู่ในช่วงที่เหมาะสม งานวิจัยนี้จึงมีการปรับค่าปัจจัยป้อนเข้าที่ใช้กับแบบจำลอง ANN ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมโดยแปลงค่าข้อมูลเป็นแบบบรรทัดฐาน (normalization) โดยปรับค่าข้อมูลให้อยู่ในขอบเขต [0,1] ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับฟังก์ชันของแบบจำลอง ANN [28]

จากตารางที่ 4.8 รูปแบบโครงสร้างจากแบบจำลอง ANN ของผลการประมาณค่าความมันเงาพบว่ารูปแบบโครงสร้าง 4-9-1 ได้ค่า MSE ที่ 0.00016 ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุด ดังนั้นจึงนำรูปแบบโครงสร้างนี้มาใช้อ้างอิงสำหรับผลลัพธ์ของการประมาณค่าความมันเงา

ตารางที่ 4.8 ผลของค่า MSE แต่ละรูปแบบโครงสร้าง

ลำดับ	รูปแบบโครงสร้าง	Regression		
		Training	All	MSE
1	4-2-1	0.99877	0.92095	0.166
2	4-4-1	0.54538	0.51529	1.17
3	4-8-1	0.99994	0.99341	0.008
4	4-9-1	0.99982	0.99751	0.00016

4.4.2 การประมาณค่าความมันเงาที่ดีที่สุดด้วยวิธี ANN

ในการประมาณค่าความมันเงาที่ดีที่สุดด้วยวิธี ANN จะนำรูปแบบโครงสร้างและข้อมูลการจำลอง ANN จากหัวข้อที่ 4.4.1 มาใช้ในการประมาณค่าความมันเงาเพื่อเปรียบเทียบความแมนยำของผลการประมาณค่าความมันเงาที่ได้จากแบบจำลอง ANN กับผลของความมันเงาที่ได้จากตารางที่ 4.7 โดยการเปรียบเทียบแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ การเปรียบเทียบผลการประมาณค่าความมันเงา

จากแบบจำลอง ANN กับชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ และผลการประมาณค่าความมันเงาจากแบบจำลอง ANN กับชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และตารางที่ 4.10

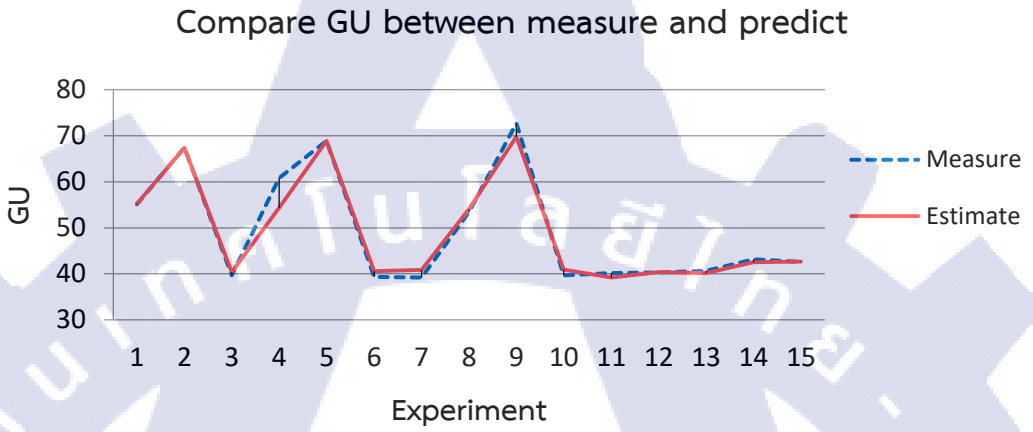
ตารางที่ 4.9 ผลการประมาณค่าความมันเงาจากแบบจำลอง ANN กับชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ

ที่	Sa (μm)	MT (°C)	HEN (°C)	VH (mm/ sec)	ระดับความมันเงา (GU)			
					ที่ วัดจริง	ประมาณค่า โดย ANN	Error	% Error
1	0.2652	70	250	140	58.07	49.23	8.84	15.23
2	0.3759	70	250	160	54.38	37.68	16.70	30.70
3	0.3477	60	256.81	150	37.65	37.65	0.00	0.00
4	0.3418	60	240	150	43.97	39.15	4.82	10.97

ตารางที่ 4.10 ผลการประมาณค่าความมันเงาจากแบบจำลอง ANN กับชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน

ที่	Sa (μm)	MT (°C)	HEN (°C)	VH (mm/ sec)	ระดับความมันเงา (GU)			
					ที่ วัดจริง	ประมาณค่า โดย ANN	Error	% Error
1	0.2604	50	230	140	55.09	55.26	0.1724	0.31
2	0.3585	70	230	140	67.41	67.39	0.0250	0.04
3	0.3683	50	250	140	39.64	40.39	0.7453	1.88
4	0.2076	50	230	160	60.80	54.36	6.4393	10.59
5	0.3027	70	230	160	68.90	68.89	0.0105	0.02
6	0.2455	50	250	160	39.29	40.58	1.2908	3.29
7	0.3418	43.18	240	150	39.19	40.86	1.6658	4.25
8	0.4178	76.82	240	150	53.41	54.10	0.6932	1.30
9	0.3567	60	223.18	150	72.73	69.77	2.9622	4.07
10	0.2569	60	240	133.18	39.68	40.91	1.2305	3.10
11	0.2712	60	240	166.81	40.15	39.19	0.9591	2.39
12	0.3027	60	240	150	40.32	40.36	0.0438	0.11
13	0.2076	60	240	150	40.64	40.14	0.5025	1.24
14	0.3759	60	240	150	43.18	42.55	0.6264	1.45
15	0.4178	60	240	150	42.58	42.68	0.1038	0.24

จากผลการประมาณค่าความมันเงาจากแบบจำลอง ANN กับค่าความมันเงาที่วัดจริงของชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบตามตารางที่ 4.9 พบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของการประมาณความมันเงาอยู่ที่ 14.23 % ส่วนผลการประมาณค่าความมันเงาจากแบบจำลอง ANN กับค่าความมันเงาที่วัดจริงของชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนตามตารางที่ 4.10 พบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของการประมาณความมันเงาอยู่ที่ 2.28 %



รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบค่าความมันเงาระหว่างค่าความมันเงาจากแบบจำลอง ANN กับค่าความมันเงาที่วัดจริงของชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน

จากรูปที่ 4.5 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าความมันเงาระหว่างค่าความมันเงาจากแบบจำลอง ANN กับค่าความมันเงาที่วัดจริงของชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนจะพบว่าแผนภาพของกราฟทั้งสองเส้นมีความใกล้เคียงกันและมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย

บทที่ 5
บทสรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกบนพื้นฐานความหยาบผิวแบบ 3 มิติของการตัดเฉือนเสมือนจริงและพารามิเตอร์การฉีดพลาสติกสำหรับการวิจัยนี้สามารถสรุปผลการดำเนินการวิจัย ได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 การประมาณค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติ

การประมาณค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติ_พิจารณาบนการตัดเฉือนเสมือนจริงของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน การจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงพิจารณาบนพื้นฐานของการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ HTM โดยพิจารณาค่าความผิดพลาดการเคลื่อนที่ของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกนและการโก่งงอของดอกกัดที่เป็นผลมาจากแรงตัดเฉือน ซึ่งจำลองพื้นผิวจากกระบวนการกัดขึ้นรูปที่ดำเนินการโดยวิธี MZF ด้วยโปรแกรม MATLAB บนจุดพิกัดพื้นผิวที่ได้รับ 10,000 จุด ผลความหยาบผิวที่ได้จากการจำลองพื้นผิวทรงกระบอกจะนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณค่าทางทฤษฎี โดยค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติ มีความแตกต่างกับค่าความหยาบผิวที่ได้จากค่าทฤษฎีที่ 1.43 % และมีค่าความแตกต่างของความหยาบผิวเฉลี่ยอยู่ที่ 0.2984 μm การวิเคราะห์ผลการจำลองค่าความหยาบผิวแบบ 3 มิติ พิจารณาจากค่า S/N ratio ที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Taguchi orthogonal array L9 (3^3), ซึ่งค่าปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพความหยาบผิวแบบ 3 มิติ ที่ดีที่สุดคือ คือ ความลึกของการตัด (a) = 0.18 mm ที่ระดับ 3 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความหยาบผิวที่ 0.1945 μm และอัตราการป้อนกัด (c) = 0.25 mm/tooth ที่ระดับ 3 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความหยาบผิวที่ 0.1677 μm และความเร็วตัด (Vc) = 264 m/min ที่ระดับ 2 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความหยาบผิวที่ 0.1974 μm

5.1.2 การประมาณค่าค่าความมันเงาที่ดีที่สุด

การประมาณค่าค่าความมันเงาที่ดีที่สุดพิจารณาบนรูปแบบโครงสร้างจากแบบจำลอง ANN รูปแบบโครงสร้าง 4-9-1 โดยมีปัจจัยป้อนเข้า 4 ปัจจัยคือ ความหยาบผิวแบบ 3 มิติ อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ อุณหภูมิปลายหัวฉีด และความเร็วฉีดย้ำ ข้อมูลค่าความมันเงาจะนำมาใช้ฝึกหัด (training) และทดสอบ (testing) ในแบบจำลอง ANN ทั้งหมด 19 ชุดข้อมูล โดยที่ชุดข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกใช้เพื่อการฝึกหัด แบบจำลอง ANN จำนวน 15 ชุดข้อมูล และใช้เพื่อทดสอบแบบจำลอง ANN จำนวน 4 ชุดข้อมูล โดยกำหนดให้การสอน (train) มีค่า Epoch เทากับ

1,000 ค่า Gradient มีค่าจาก 1.0 – 1.0 $^{e-7}$ และ Validation check เท่ากับ 6 การเรียนรู้จะใช้กฎการเรียนรู้ (Training Function) แบบ TRAINLM และใช้ Adaption Learning Function แบบ LEARNGDM สำหรับฟังก์ชันถ่าย Tansig ผลการประมาณค่าความมันเงาจากแบบจำลอง ANN กับค่าความมันเงาที่วัดจริงของชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนพบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของการประมาณความมันเงาอยู่ที่ 2.28 % ผลการประมาณค่าความมันเงาจากแบบจำลอง ANN กับค่าความมันเงาที่วัดจริงของชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ พบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของการประมาณความมันเงาอยู่ที่ 14.23 % เหตุผลที่ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของการประมาณความมันเงาของชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน เนื่องจากมีข้อมูลที่ใช้เป็นปัจจัยป้อนเข้าสำหรับแบบจำลอง ANN น้อยกว่าชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน จึงทำให้มีความแม่นยำในการประมาณค่าความมันเงาน้อยกว่าด้วย

5.2 อภิปรายผล

อุตสาหกรรมฉีดพลาสติกในปัจจุบันมีการแข่งขันที่สูง ดังนั้นเพื่อเป็นการตอบสนองความต้องการของลูกค้าและเพิ่มความสามารถในการแข่งขัน ชิ้นงานฉีดพลาสติกจึงจำเป็นต้องมีการออกแบบที่มีลักษณะพิเศษ พื้นผิวภายนอกมีความสวยงามมันเงาและมีสีสันเพื่อสร้างความแตกต่างให้กับผลิตภัณฑ์ ซึ่งถ้าหากว่าสามารถทำให้ชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ผ่านกระบวนการฉีดมีลักษณะพื้นผิวภายนอกที่สวยงามไม่มีข้อบกพร่องตั้งแต่เริ่มแรกผลิตชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ก็จะนำไปสู่การลดขั้นตอนของกระบวนการเคลือบสีและขั้นตอนการพ่นสีทำให้ต้นทุนในการผลิตย่อมลดลงได้ด้วย อีกทั้งปัจจุบันยังไม่มีเครื่องมือใดที่สามารถวิเคราะห์หรือประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกได้ ดังนั้นจากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงศึกษาการประมาณค่าความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติกก่อนการผลิตชิ้นงานจริง บนพื้นฐานความหยาบผิวคาวิตี้และพารามิเตอร์การฉีดพลาสติก เพื่อนำไปสู่การแก้ปัญหาในงานผลิตชิ้นงานฉีดพลาสติกก่อนที่จะผลิตชิ้นงานจริง ซึ่งส่งผลให้ผลิตภาพของการผลิตเพิ่มขึ้นและต้นทุนการผลิตลดลง

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 งานวิจัยนี้ทำการประมาณค่าความมันเงาที่ดีที่สุดของชิ้นงานฉีดพลาสติกด้วยวิธี ANN บนกล่องเครื่องมือโปรแกรม MATLAB ซึ่งผลลัพธ์จะได้เฉพาะค่าตัวเลขความมันเงา ที่ยังไม่สามารถนำข้อมูลมาคำนวณสำหรับการสร้างสมการพยากรณ์ทางคณิตศาสตร์ที่คำนึงถึงตัวแปรปัจจัยร่วม (interaction factor) ที่ส่งผลต่อความมันเงาได้ ซึ่งการวิเคราะห์ข้อมูลตัวแปรปัจจัยร่วม เพื่อนำมาสร้างสมการพยากรณ์ทางคณิตศาสตร์สามารถดำเนินการผ่านส่วนของการติดต่อกับผู้ใช้ด้วยรูปภาพ

(Graphical User Interface: GUI) ของโปรแกรม ซึ่งวิธีการดังกล่าวผู้วิจัยจะดำเนินการในงานวิจัยในอนาคตต่อไป

5.3.2 ในงานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะปัจจัยความหยาบผิวแบบ 3 มิติ และพารามิเตอร์การฉีดพลาสติก ส่วนสมบัติทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการฉีด ที่เป็นปัจจัยส่งผลต่อค่าความมันเงาของผิวชิ้นงานฉีดพลาสติกตามทฤษฎีด้านอื่นๆ ไม่ได้พิจารณานำมาศึกษาในครั้งนี้ ซึ่งอาจจะให้ความแม่นยำของผลลัพธ์การประมาณค่าความมันเงาที่สมบูรณ์ขึ้น ถือเป็นข้อเสนอแนะในแนวทางการวิจัยในอนาคตต่อไป

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY TNI

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

[1] วิโรช ทัศนะ และดอน แก้วดก, “การตัดเฉือนเสมือนจริงของกระบวนการกลึงด้วยวิธีการพิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ การสึกหรอเครื่องมือตัด และการโก่งขอของชิ้นงาน,”การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2560, IE NETWORK 2017, จังหวัดเชียงใหม่, 12-15 กรกฎาคม 2560, หน้า 609-614.

[2] Rjcmold, *“Do You Know How Many Plastic Parts are Used in a Car?,”* [Online]. Available: https://www.rjcmold.com/do-you-know-how-many-plastic-parts-are-used-in-a-car/. [Accessed: April 9, 2018].

[3] กระทรวงอุตสาหกรรม, *ยุทธศาสตร์การพัฒนาอุตสาหกรรมไทย 4.0 ระยะ 20 ปี (พ.ศ. 2560 - 2579)*, กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม, 2559.

[4] กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศกระทรวงพาณิชย์, *“สินค้าออกสำคัญ10 อันดับแรกของประเทศไทยปีพุทธศักราช 2560,”* [Online].Available: http://www2.ops3. moc.go.th/. [Accessed: 8 เมษายน 2561].

[5] K. Chaisuriyakul and W. Thasana, “Study of heating and cooling temperature of Injection molding to effect on glossy of plastic Injection parts,” *International Conference on Mechanical Engineerings*, ICOME 2017, Bangkok, Thailand, December 12-15, 2017, pp. 1,238-1,246.

[6] M. Soori, et al., “Virtual machining considering dimensional, geometrical and tool deflection errors in three-axis CNC milling machines,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 33, no. 4, pp. 498-507, October 2014.

[7] M. Soori, et al., “Dimensional and geometrical errors of three-axis CNC milling machines in a virtual machining system,” *Computer-Aided Design*, vol. 45, no.11, pp. 1,306-1,313, November 2013.

[8] Y. Altintas, et al., “Virtual process systems for part machining operations,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 63, no.2, pp. 585-605, December 2014.

[9] กฤช ฉายสุริยะกุล, “การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและการหล่อเย็นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ส่งผลต่อความมันเงาของชิ้นงานฉีดพลาสติก” วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (เทคโนโลยีวิศวกรรม), สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, กรุงเทพฯ, 2561.

[10] W. Thasana, et al., "A Study on estimation of three-dimensional tolerances based on simulation of virtual machining in turning processes including kinematic motion deviations," *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol. 9, no. 1, pp. 507-520, March 2015.

[11] ฝ่ายนวัตกรรมเพื่อการเรียนรู้สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, *"พจนานุกรมศัพท์วิทยาศาสตร์คณิตศาสตร์และเทคโนโลยี,"* [Online]. Available: https:// escivocab.ipst. ac.th/ evocab/detail/1686. [Accessed: 9 เมษายน 2561].

[12] Trump Speciality, *"ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับความเงาและความมัว,"* [Online]. Available: http:// www.trumpspeciality.com/2017/01/15/ความเงาและความมัว/. [Accessed: 9 เมษายน 2561].

[13] A. Abdul Kadir, et al., "Virtual machine tools and virtual machining-A technological review," *Robotic and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 27, no. 3, pp. 494-508, June 2011.

[14] W. Zhang, and M. Wan, *"Milling Simulation: Metal Milling Mechanics, Dynamics and Clamping Principles,"* London: ISTE Ltd, 2016.

[15] S. Engin, and Y. Altintas, "Mechanics and dynamics of general milling cutters part I: Helical end mills," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 41, no. 15, pp. 2,195-2,112, December 2001.

[16] W. Thasana, "*A Study on Estimation of Three-Dimensional Surface Roughness and Tolerances Based on Virtual Machining Systems Considering Kinematic Motion Deviations*," Ph.D. Dissertation (Mechanical Engineering), Osaka Prefecture University, Japan, 2015.

[17] ThaiCostReduction, *"Optimization,"* [Online]. Available: http: // www.thaicost reduction.com/DocFile/n023%20 optimization.pdf. [Accessed: May 19, 2018].

[18] A. Mohd Zain, et al., "Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no. 2 pp. 1,755-1,768, March 2010.

[19] วิทยา พรพัชรพงศ์, *"โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks - ANN),"* [Online]. Available: https://www.gotoknow.org /posts/ 163433. [Accessed: 20 พฤษภาคม 2561].

[20] W. Thasana, and S. Chianrabutra, "A comparison between simulation and experiment of virtual machining in CNC turning machine considering kinematic motion deviations, tool wear and workpiece deflection errors," *Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing*, vol.13, no. 1, pp. JAMDSN0009, January 2019.

[21] S. Ibaraki et al., "Machining tests to identify kinematic errors on five-axis machine tools," *Precision Engineering*, vol. 34, no. 3, pp. 387-398, July 2012.

[22] M. Soori et al., "Dimentional and geometrical error of three-axis CNC milling machines in virtual machining system," *Computer-Aided Design*, vol. 45, no. 11 pp. 1,306-1,313, November 2013.

[23] A. Takahashi et al., "Analysis of kinematic motion deviations of machining centers base on geometric tolerances," *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol. 8 no. 4, pp. JAMDSM0060, October 2014.

[24] Y. Altintas and S. Chao, "Chatter free tool orientations in 5-axis ball-end milling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 106, pp. 89–97, July 2016.

[25] S. E. Layegh and I. Lazoglu, "3D surface topography analysis in 5-axis ball-end milling," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 66, no. 1, pp. 133-136, April 2017.

[26] Internationnal Standard, "*ISO 230-1 Test Code for Machine Tools - Part 1: Geometric Accuracy of Machines Operating Under No-Load or Quasi-Static Conditions*," Jenewa: ISO office, 2012.

[27] H. Ramaswami, "*An Integrated Framework for Virtual Machining and Inspection of Turned Parts*," Ph.D. Dissertation (Industrial Engineering), University of Cincinnati, Ohio, USA, 2010. [Online]. Available: http://rave.ohiolink.edu / etdc / view? acc_ num = ucin 1282574694, [Accessed: January 5, 2019].

[28] B. Anuja Beatrice et al., "Surface roughness prediction using artificial neural network in hard turning of AISI H13 steel with minimal cutting fluid application," *Procedia Engineering,* vol. 97, pp. 205 – 211, December 2014.