



ระบบอัตโนมัติสำหรับการประเมินปริมาณการใช้สีในกระบวนการผลิต
ผลิตภัณฑ์ไม้ยางพารา
An Automated System for Estimation of Paint Consumption
in Rubberwood Manufacturing

รังสฤษฎ์ คงด้วง
RANGSARID KONGDOUNG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและระบบ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of
Master of Engineering in Industrial and Systems Engineering
Prince of Songkla University
2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ ระบบอัตโนมัติสำหรับการประเมินปริมาณการใช้สีในกระบวนการผลิต
 ผลิตภัณฑ์ไม้ยางพารา
 ผู้เขียน นายรังสฤษดิ์ คงด้วง
 สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาพรพรณ ไชยประพัทธ์)

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ รัตนวิไล)

.....กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาพรพรณ ไชยประพัทธ์)

.....

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พรชัย พงษ์ภักดิ์ทรานนท์)

(รองศาสตราจารย์ ดร.พรชัย พงษ์ภักดิ์ทรานนท์)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุมพล ยวงใย)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็น
 ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิชาวิศวกรรม
 อุตสาหการและระบบ

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มี
ส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาพรรณ ไชยประพัทธ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายรังสฤษฏ์ คงด้วง)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายรังสฤษดิ์ คงด้วง)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ ระบบอัตโนมัติสำหรับการประเมินปริมาณการใช้สีในกระบวนการผลิต
ผลิตภัณฑ์ไม้ยางพารา
ผู้เขียน นายรังสฤษฏ์ คงด้วง
ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระเบียบวิธีในการประเมินปริมาณการใช้สีและต้นทุนสีที่ใช้ในกระบวนการผลิตเฟอร์นิเจอร์จากไม้ยางพารา เพื่อเป็นการเพิ่มความสะดวกรวดเร็วในการประเมินต้นทุนสี ด้วยลักษณะของชิ้นงานมีหลากหลายรูปแบบ สีในกระบวนการผลิตมีหลายเฉดสี และประกอบกับมีความสูญเสียที่หลีกเลี่ยงไม่ได้เกิดขึ้นในกระบวนการพ่นสี ทำให้การประเมินต้นทุนมีความยุ่งยากซับซ้อน การขาดทักษะความเชี่ยวชาญและประสบการณ์ทำให้การประเมินปริมาณสีที่ใช้มีความผิดพลาด และจะส่งผลให้การประเมินต้นทุนผิดพลาดไปด้วย ระเบียบวิธีในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ คือ ขั้นตอนแรกเป็นการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะทางเรขาคณิตของของชิ้นงานด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ ค่าคุณลักษณะที่ได้ประกอบไปด้วย ความยาว ความกว้าง ความหนา ความยาวรอบรูป ปริมาตร และพื้นที่ผิว ขั้นตอนที่สองเป็นการทำนายพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีที่มีการปรับตั้งแตกต่างกันไปตามรูปแบบของชิ้นงานประกอบด้วย ความถี่อินเวอร์เตอร์ (variable frequency drive) สำหรับควบคุมความเร็วสายพานการผลิต และอัตราปั๊มสี (pump rate) โดยนำข้อมูลค่าคุณลักษณะที่ได้จากขั้นตอนแรกมาใช้ในการทำนายพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีด้วยการใช้เทคนิคฟัซซี่ลอจิก (fuzzy logic) ผลการทดลองพบว่าเทคนิคฟัซซี่ให้ค่าความถูกต้องเฉลี่ยในการทำนายเท่ากับ 95 % และขั้นตอนที่ 3 เป็นการนำค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีจากขั้นตอนที่สองมาวิเคราะห์หาปริมาณสีและต้นทุนสีโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ผลการวิเคราะห์ให้ค่าความถูกต้องเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 80% ซึ่งระเบียบวิธีสำหรับการประเมินปริมาณสีและต้นทุนที่ได้นำเสนอไว้นี้สามารถนำไปพัฒนาเป็นระบบอัตโนมัติในการประเมินต้นทุนได้ ซึ่งหากสามารถประเมินต้นทุนได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ จะส่งผลให้สามารถเพิ่มโอกาสในการแข่งขันทางธุรกิจได้ต่อไปในอนาคต

Thesis Title An Automated System for Estimation of Paint Consumption
in Rubberwood Manufacturing

Author Mr.RANGSARID KONGDOUNG

Major Program Industrial and Systems Engineering

Academic Year 2014

ABSTRACT

This research proposes an approach in estimating an amount of paint required, as well as paint cost, in a paint spraying process of a rubberwood furniture manufacturing company. Wide range of product models and paint shades, also inevitable paint loss, altogether complicate the estimation procedure. Lack of expertise and experience in the spraying process often results in estimation inaccuracy. In this study, the research methodology was divided into three main stages. In the first stage, geometric features of a workpiece including length, width, thickness, length, perimeter, volume and surface area were successfully derived using image processing techniques. Based on the workpiece features, parameters of the spraying process, i.e. variable frequency drive for conveyor speed control and the pump rate were predicted in the second stage. A fuzzy logic model was employed and an average prediction accuracy of 95% was obtained. In the last stage, a mathematical relationship between the process parameters and the amount of paint used was formulated. Paint cost was calculated therefrom. The model performance was evaluated and approximately 80% in accuracy was reported. The approach proposed in this study can be used to develop an automated cost estimation which will be more consistent and less error-prone.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการรูปภาพ	(11)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การผลิตตามความต้องการ (mass customization)	5
2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการประเมินต้นทุน (cost estimation)	8
2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการประมวลผลภาพดิจิทัล (digital image processing)	11
2.4 กระบวนการพ่นสี (painting process)	17
2.5 ระบบฟัซซีลอจิก (fuzzy logic system)	21
2.6 ทฤษฎีการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis)	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	39
3.1 ศึกษากระบวนการพ่นสีเฟออร์นิเจอร์ไม้ยางพารา	40
3.2 อุปกรณ์และประเภทของข้อมูลในการวิจัย	45
3.3 พัฒนาเทคนิคการทำนายพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี	48
บทที่ 4 การพัฒนาระบบในการทำนายพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีและปริมาณสี	62
4.1 การทำนายพารามิเตอร์กระบวนการพ่นสีด้วยเทคนิคฟัซซีลอจิก	62
4.2 วิเคราะห์ปริมาณสีที่ใช้ต่อชิ้นงาน	91

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	95
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	95
5.2 ข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัย	96
บรรณานุกรม	97
ภาคผนวก	101
ภาคผนวก ก ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ และคุณลักษณะของภาพ	102
ภาคผนวก ข ผลการทำนายพารามิเตอร์กระบวนการพ่นสีด้วยเทคนิคพีซีซีลोजิก	105
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอย	108
ประวัติผู้เขียน	116

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 แสดงตัวอย่างค่าคุณลักษณะที่ได้จากเครื่องมือ ในโปรแกรม MATLAB	17
3.1 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้อันทีจากการเก็บข้อมูลจริง	47
3.2 ประเภทและขอบเขตของค่าคุณลักษณะทางเรขาคณิตของชิ้นงาน	48
3.3 ขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี	48
3.4 ตัวอย่างข้อมูลค่าพารามิเตอร์ และคุณลักษณะของภาพจำนวน 48 ตัวอย่าง	56
3.5 ผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (correlation analysis)	58
3.6 ผลการเลือกตัวแปรอิสระในการทำนายความเร็วสายพานด้วยเทคนิค stepwise	58
3.7 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยของความเร็วสายพานการผลิต	59
3.8 การเลือกตัวแปรอิสระในการทำนายอัตราป้อนสี	60
4.1 ค่าต่ำสุด สูงสุดและค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะชิ้นงาน	65
4.2 ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ของแต่ละพีชชีเซต	65
4.3 ค่าความเป็นสมาชิกแต่ละฟังก์ชันในพีชชีเซตของระยะความยาวชิ้นงาน	68
4.4 ค่าความเป็นสมาชิกแต่ละฟังก์ชันในพีชชีเซตของปริมาตรชิ้นงาน	69
4.5 ค่าความเป็นสมาชิกแต่ละฟังก์ชันในพีชชีเซตของพื้นที่ผิวชิ้นงาน	71
4.6 ค่าความเป็นสมาชิกแต่ละฟังก์ชันในพีชชีเซตของความเร็วสายพาน	73
4.7 ค่าความเป็นสมาชิกแต่ละฟังก์ชันในพีชชีเซตของอัตราป้อนสี	75
4.8 กฎพีชชีสำหรับทำนายความเร็วสายพานการผลิต	76
4.9 กฎพีชชีสำหรับทำนายอัตราป้อนสี	79
4.10 ผลการทำนายพารามิเตอร์กระบวนการพ่นสีสำหรับข้อมูลเรียนรู้ของระบบ	89
4.11 ผลการทำนายพารามิเตอร์สำหรับข้อมูลในการทดสอบระบบ	90
4.12 ผลการคำนวณปริมาณการใช้สีของชิ้นงานตัวอย่าง	93

รายการรูปภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	ระเบียบวิธีในการประเมินปริมาณสีและต้นทุนสี	3
2.1	แสดงการจำแนกประเภทของ mass customization	6
2.2	แสดงภาพรวมของชนิดในการตัดสินใจของระบบ	7
2.3	แสดงจุดพิกัดบนภาพดิจิทัล	12
2.4	ภาพขาวดำ (binary image)	13
2.5	ภาพระดับเทา (gray scale image)	13
2.6	ภาพสี (color image)	14
2.7	กระบวนการลดทอนสัญญาณรบกวน	14
2.8	แสดงภาพที่ผ่านการลดทอนสัญญาณรบกวน	15
2.9	การหาขอบวัตถุในภาพ	15
2.10	การทดสอบภาพสำหรับวิธีการ segmentation	16
2.11	อุปกรณ์สำหรับวัดความหนืดสี	18
2.12	อุปกรณ์และวิธีการพ่นสีแบบต่างๆ	19
2.13	เปรียบเทียบวิธีการพ่นสีแบบไฟฟ้าสถิตกับแบบทั่วไป	20
2.14	เครื่องพ่นสีไฟฟ้าสถิตแบบแรงเหวี่ยง	20
2.15	การอัดประจุไฟฟ้าของเครื่องพ่นสี	21
2.16	แนวคิดแบบจริงเท็จและแนวคิดฟัซซี	22
2.17	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปสามเหลี่ยม	23
2.18	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู	24
2.19	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปเกาส์เซียน	24
2.20	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปประฆังคว่ำ	25
2.21	การยูเนียนของฟัซซีเซต A และ B	25
2.22	การอินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซต A และ B	26
2.23	การคอมพลีเมนต์ของฟัซซีเซต A	26
2.24	ขั้นตอนของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก	28

รายการรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.25	การอนุมานแบบ Mamdani	29
2.26	ตัวอย่างฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตแบบ Sugeno	30
2.27	วิธีหาค่าสมาชิกสูงสุด	30
2.28	วิธีหาจุดศูนย์ถ่วง	30
2.29	วิธีหาน้ำหนักเฉลี่ย	31
2.30	วิธีค่าเฉลี่ยสูงสุดของสมาชิก	31
2.31	วิธีจุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่ใหญ่สุด	31
3.1	วิธีดำเนินงานวิจัยและผลที่ได้แต่ละขั้นตอน	39
3.2	กระบวนการผลิตเฟอร์นิเจอร์จากไม้ยางพารา	41
3.3	กระบวนการพ่นสีของโรงงานกรณีศึกษา	42
3.4	มอนิเตอร์สำหรับปรับตั้งค่าพารามิเตอร์	42
3.5	อุปกรณ์ควบคุมสภาพแวดล้อมสำหรับถ่ายภาพ	46
3.6	แผนผัง (flowchart) ของการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์	49
3.7	การประมวลผลภาพเบื้องต้น (ก) ภาพสี RGB และ (ข) ภาพระดับเทา	51
3.8	การหาคุนลักษณะชิ้นงาน (ก) การแยกวัตถุจากพื้นหลัง (segmentation) (ข) การหาความยาวและความกว้างของชิ้นงาน	51
3.9	การหาคุนลักษณะชิ้นงาน (ก) การหาความยาวรอบรูป และ (ข) การหาพื้นที่ผิวของชิ้นงาน	51
3.10	แสดงจำนวนพิกเซลบนชิ้นงานตัวอย่าง	53
3.11	แสดงจำนวนพิกเซลที่อยู่ติดกันในแนวความยาวรอบรูปของชิ้นงาน	54
3.12	แสดงจำนวนพิกเซลทั้งหมดของปริมาตรชิ้นงาน	55
3.13	แสดงจำนวนพิกเซลของพื้นที่ผิวชิ้นงาน	55
4.1	ระบบฟัซซีลอจิกในการทำนายพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี	63
4.2	กราฟแบบกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ ความยาว ปริมาตร และพื้นที่ผิวชิ้นงาน	65
4.3	ฟัซซีเซตของระยะความยาวชิ้นงาน	68
4.4	ฟัซซีเซตของปริมาตรชิ้นงาน	70
4.5	ฟัซซีเซตของพื้นที่ผิวชิ้นงาน	71
4.6	ฟัซซีเซตของระดับความเร็วสายพานการผลิต	73

รายการรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.7	ฟิซซีเซตของระดับอัตราปัมป์	76
4.8	การอนุมานกฎฟิซซีของความเร็วสายพานการผลิต	84
4.9	การอนุมานกฎฟิซซีของอัตราปัมป์	86
4.10	ค่าฟิซซีรวมของความเร็วสายพาน	87
4.11	ค่าฟิซซีรวมของอัตราปัมป์	88

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันจะเห็นได้ว่าผู้ผลิตต่างพยายามปรับกลยุทธ์เพื่อที่จะตอบสนองต่อความต้องการที่หลากหลายของผู้บริโภค การผลิตด้วยระบบการผลิตปริมาณมาก (mass production) อาจจะไม่ใช่วิธีทางเลือกที่เหมาะสมอีกต่อไป โดยถึงแม้การผลิตแบบนี้จะมีข้อได้เปรียบด้านต้นทุนที่ต่ำก็ตาม แนวคิดใหม่ของระบบการผลิตคือการผลิตตามความต้องการ (mass customization) ซึ่งหมายถึงระบบที่ไม่ต้องผลิตสินค้าในปริมาณที่มาก แต่มีการผลิตสินค้าที่มีความแตกต่างเป็นเอกลักษณ์ตรงตามความต้องการของผู้บริโภคได้ โดยที่ไม่ทำให้ต้นทุนการผลิตสินค้าสูงขึ้นมากนัก แนวคิดนี้เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่มีการรับคำสั่งจ้างผลิตจากลูกค้าที่มีความชัดเจนในรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ โดยคำสั่งจ้างผลิตดังกล่าวอาจจะปรากฏในรูปของภาพถ่าย (image) สเก็ตช์ (sketch) หรือแบบพิมพ์เขียว (drawing) ในระบบการผลิตตามความต้องการนี้ การประเมินต้นทุนมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีความหลากหลายและเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาตามความต้องการของผู้บริโภค ผู้ผลิตจะต้องประเมินต้นทุนที่จะใช้ในการผลิตสินค้านั้นๆ ทุกครั้งก่อนที่จะตัดสินใจรับหรือไม่รับคำสั่งจ้างผลิตดังกล่าว การประเมินต้นทุนเป็นขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อน ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการประเมินเนื่องจากต้องอาศัยข้อมูลและประสบการณ์ในหลายด้าน เช่น วัสดุ เครื่องจักร กระบวนการผลิต และแรงงาน เป็นต้น หากผู้ผลิตประเมินราคาต้นทุนต่ำไป จะส่งผลให้กำหนดราคาสินค้านั้นต่ำไปด้วยและเกิดการขาดทุนในภายหลัง ในทางตรงกันข้าม ขีดความสามารถในการแข่งขันจะลดลงหากผู้ผลิตประเมินราคาต้นทุนสูงเกินความเป็นจริง ดังนั้นเมื่อผู้ผลิตมีระบบในการประเมินราคาต้นทุนได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ย่อมเป็นการช่วยให้อุตสาหกรรมมีการขยายตัวและเติบโตต่อไปในอนาคตได้

ด้วยอุตสาหกรรมไม้และผลิตภัณฑ์ไม้เป็นอุตสาหกรรมที่มีมูลค่าการส่งออกโดยเฉลี่ยต่อปีสูงถึง 2,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐในช่วง 4-5 ปีที่ผ่านมา [1-2] จึงนับได้ว่าเป็นภาคธุรกิจที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศและของประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน (AEC) ที่กำลังจะเกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2558 ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกศึกษากระบวนการประเมินต้นทุนในอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์จากไม้ยางพารา สินค้าในอุตสาหกรรมประเภทนี้มีวัตถุดิบที่สำคัญ 3 ส่วนด้วยกันคือ ไม้ยางพาราหรือไม้แปรรูปชนิดอื่น สี และชิ้นส่วนประกอบอื่นๆ เช่น กาว สกรู นอต ยาง หรือบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น โดยที่สีถือเป็นวัตถุดิบที่มีความยุ่งยากในการประเมินปริมาณและต้นทุนที่ใช้ในการผลิต เนื่องจากความหลากหลายของเฉดสีและความสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการพ่น จากการศึกษเบื้องต้นพบว่า ปริมาณสีที่ใช้ทั้งหมดมา

จากปริมาณของสีที่เกาะบนพื้นผิวชิ้นงานรวมกับปริมาณของสีที่สูญเสียไปในระหว่างการพ่น ปริมาณสีที่อยู่บนผิวชิ้นงานจะแปรผันตามพื้นที่ผิวของชิ้นงานนั้น แต่สำหรับปริมาณสีที่สูญเสียไปในระหว่างการพ่นยังเป็นสิ่งที่ไม่แน่นอน โดยปกติได้มีการกำหนดอัตราการใช้สีต่อหน่วยพื้นที่ผิวเป็นค่าคงที่ เพื่อให้สามารถทำการประเมินปริมาณสีที่จะใช้ได้ง่าย อัตราการใช้สีนี้ได้เพื่อรวมปริมาณที่สูญเสียไปในกระบวนการผลิตไว้แล้วด้วย แต่อาจจะแตกต่างกันไปตามชนิดของเม็ดสี ในการประเมินต้นทุนสี ผู้ประกอบการจะทำการประมาณพื้นที่ผิวของชิ้นงาน หากชิ้นงานนั้นมีลักษณะไม่ซับซ้อน จะทำการประมาณอย่างคร่าวๆ ด้วยสายตาหรือเครื่องมือวัด แต่หากชิ้นงานนั้นมีความซับซ้อน จะทำการคำนวณพื้นที่ผิวจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ซึ่งต้องเสียเวลาในการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่ต้องการ จากนั้นผู้ประกอบการจะทำการคำนวณปริมาณสีที่คาดว่าจะใช้จากสูตร

$$P=pA$$

โดยที่ P คือ ปริมาณการใช้สีทั้งหมด

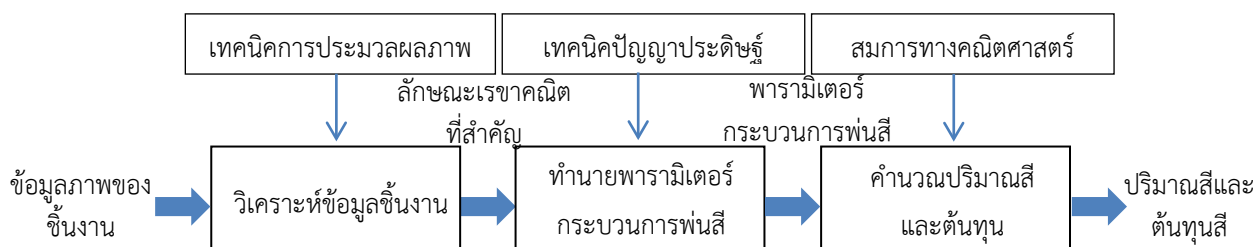
p คือ อัตราการใช้สีต่อหน่วยพื้นที่ผิว (ลิตรต่อตารางเมตร)

A คือ พื้นที่ผิวของชิ้นงาน (ตารางเมตร)

ด้วยความไม่สอดคล้องกันระหว่างวิธีการประเมินปริมาณการใช้สีและปริมาณการใช้สีจริงที่เกิดขึ้นในกระบวนการพ่น จึงส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการประเมินต้นทุนสี และด้วยรูปร่างชิ้นงานที่เข้าสู่กระบวนการพ่นมีความไม่แน่นอนและหลากหลาย การจะนำข้อมูลต้นทุนสีในอดีตมาใช้จึงเป็นไปได้ยาก จากการสำรวจพบว่า มีงานวิจัยบางส่วนที่ได้ทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการ [3–6] แต่ไม่ได้คำนึงถึงความแตกต่างและหลากหลายของลักษณะชิ้นงาน และถึงแม้จะมีงานวิจัยที่กล่าวโดยตรงถึงการนำปัจจัยของชิ้นงานมาใช้ในการประเมินปริมาณสี [7] แต่กระบวนการพ่นสีในงานวิจัยดังกล่าวเป็นกระบวนการที่ใช้คนควบคุม ปัจจัยแวดล้อมซึ่งก่อให้เกิดความสูญเสียจะแตกต่างจากกระบวนการพ่นสีอัตโนมัติที่ดำเนินการอยู่ในโรงงานกรณีศึกษา

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาระเบียบวิธีเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างระบบอัตโนมัติสำหรับการวางแผนกระบวนการพ่นสีและประเมินต้นทุนสีในระบบการผลิตตามความต้องการ ดังรูปที่ 1.1 ด้วยการรับข้อมูลภาพดิจิทัลของชิ้นงานมาคำนวณข้อมูลคุณลักษณะเรขาคณิตที่สำคัญ เช่น พื้นที่ผิว ความยาว เป็นต้น ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการปรับตั้งเครื่องพ่นสีด้วยการใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligence) โดยจากข้อมูลดังกล่าวผู้วิจัยจะสามารถประเมินปริมาณการใช้สีและต้นทุนสีได้แม่นยำและรวดเร็วมากขึ้นตั้งแต่รับใบสั่งจ้างผลิต ซึ่งจะเป็นการช่วยลดเวลาในการคำนวณและเป็นการสร้างพื้นฐานให้ระบบสามารถส่งผ่านข้อมูลจากกระบวนการออกแบบไป

ยังกระบวนการผลิตได้อย่างเป็นอัตโนมัติ แนวคิดนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการในการเพิ่มขีดความสามารถในการเจรจาต่อรองราคาและวางแผนการผลิตสำหรับผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น อันเป็นองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับระบบการผลิตตามความต้องการในอนาคต



รูปที่ 1.1 ระเบียบวิธีในการประเมินปริมาณสีและต้นทุนสี

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาระเบียบวิธีในการประเมินปริมาณสีและต้นทุนสีของชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์จากไม้ยางพารา โดยรับข้อมูลภาพดิจิทัลของชิ้นงาน (image) มาใช้ในการทำนายพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณปริมาณสีที่ใช้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- ระบบที่สร้างขึ้นเป็นเพียงระบบกึ่งอัตโนมัติเพื่อทำการทดลองการประเมินราคาต้นทุนสีที่ใช้ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ไม้ยางพาราในขั้นตอนกระบวนการพ่นสี โดยอาศัยข้อมูลภาพดิจิทัลของชิ้นงาน
- ข้อมูลของชิ้นงานที่ใช้สำหรับการประเมินราคาต้นทุนสีประกอบด้วย 2 ประเภท
 - 1) ภาพถ่ายของชิ้นงานตัวอย่าง จะต้องมีย่างน้อยสองภาพคือ ภาพถ่ายด้านบนและด้านข้างของชิ้นงาน โดยที่ชิ้นงานจะต้องมีลักษณะรูปทรงที่ไม่มีความซับซ้อน คือจากภาพถ่ายสามารถแสดงพื้นที่ของชิ้นงานจากด้านที่ถ่ายได้หมด
 - 2) เป็นชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์จากไม้ยางพาราแปรรูปเท่านั้น สำหรับกระบวนการพ่นสีด้วยเครื่องพ่นสีอัตโนมัติ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เทคนิคที่พัฒนาขึ้นถูกนำไปเป็นข้อมูลในการพัฒนาการประเมินต้นทุนสีของผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ยางพาราให้มีความถูกต้อง แม่นยำ และรวดเร็วมากยิ่งขึ้น
- 2) เทคนิคที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปเป็นส่วนหนึ่งในการสนับสนุนการผลิตตามความต้องการของอุตสาหกรรมการผลิตเฟอร์นิเจอร์จากไม้ยางพาราเพื่อเพิ่มโอกาสการแข่งขันทางธุรกิจในอนาคตได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ประกอบไปด้วยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตตามความต้องการ (mass customization) ซึ่งเป็นการศึกษาถึงกระบวนการผลิตเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าที่หลากหลาย ทฤษฎีการประเมินต้นทุน ทฤษฎีการประมวลผลภาพ เพื่อศึกษาถึงวิธีการวิเคราะห์หาคุณลักษณะของชิ้นงานจากภาพถ่าย ทฤษฎีการพันสี ทฤษฎีเกี่ยวกับระบบฟัซซีลอจิก (fuzzy logic) และทฤษฎีการสร้างสมการถดถอย โดยแต่ละทฤษฎีดังกล่าวข้างต้นมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การผลิตตามความต้องการ (mass customization)

การผลิตแบบตามความต้องการเป็นกลยุทธ์หนึ่งของกระบวนการผลิตที่กำลังได้รับความนิยม โดยในปี ค.ศ. 1993 Boynton และ Pine [8] ได้กล่าวว่าการผลิตแบบตามความต้องการเป็นการผลิตแบบปริมาณมากที่มุ่งนำเสนอสินค้าหรือบริการที่มีความหลากหลาย รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพด้วยต้นทุนต่ำ แนวคิดของการผลิตนี้สามารถที่จะตอบสนองความต้องการของลูกค้าด้วยกระบวนการผลิตที่มีความยืดหยุ่น และมีเครือข่ายของการจัดส่งผลิตภัณฑ์ให้กับลูกค้าด้วยต้นทุนที่ต่ำ ความท้าทายของระบบการผลิตแบบตามความต้องการคือความสามารถในการควบคุมต้นทุน คุณภาพ และความรวดเร็วในกระบวนการผลิต โดยที่มุมมองของผู้บริโภคที่มีต่อการผลิตแบบตามความต้องการคือความคาดหวังถึงคุณค่าของสินค้าที่ได้รับ เช่น คุณภาพของสินค้า หรือบริการการจัดส่งที่รวดเร็ว สำหรับความหมายและความเข้าใจเกี่ยวกับการผลิตแบบตามความต้องการนั้นกว้างมาก ดังนั้นในการประยุกต์ใช้จึงต้องมีการให้คำจำกัดความของกระบวนการผลิตที่ชัดเจนเช่น Tseng และ J. Jiao [9] ให้นิยามว่าเป็นระบบการผลิตที่นำ “เทคโนโลยี และระบบการจัดส่งที่ดี รวมถึงการบริการจะต้องสามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค ได้อย่างมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการผลิตแบบปริมาณมาก (mass production)”

ในปี ค.ศ. 2001 Da silveira [10] และในปี ค.ศ. 2006 Blecker และ Abdelkafi [11] ได้นำเสนอแรงผลักดันที่นำไปสู่การผลิตแบบตามความต้องการคือ

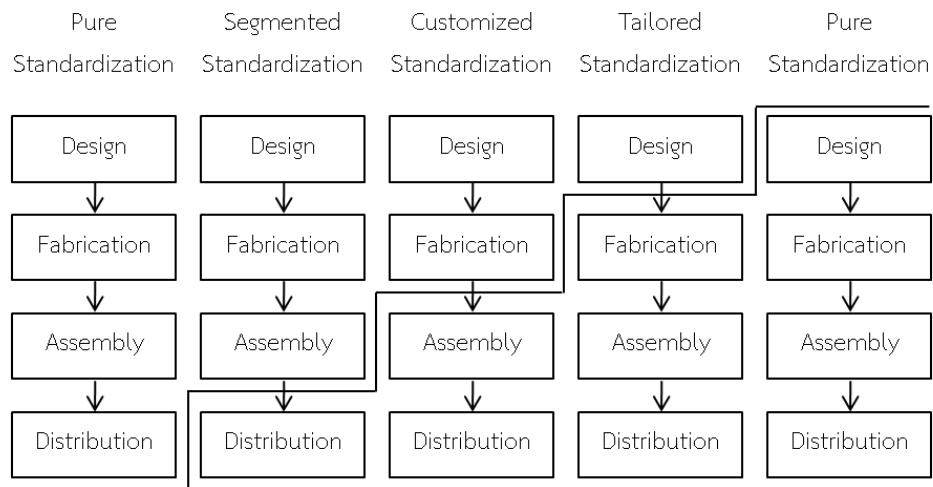
- 1) เทคโนโลยีการผลิตที่มีความยืดหยุ่นและเทคโนโลยีทางข้อมูล (information technology) ที่มีความก้าวหน้ามากขึ้นและสามารถจัดหามาได้ด้วยต้นทุนที่ต่ำกว่าแต่ก่อน
- 2) ตลาดมีการขยายตัวไปทั่วโลกทำให้ความต้องการของลูกค้ามีความหลากหลายมากขึ้น

ขึ้น

3) การแข่งขันที่รุนแรงมากขึ้นทำให้วัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์สั้นลง ปัจจัยเหล่านี้นำไปสู่การสิ้นสุดของการผลิตแบบปริมาณมาก

2.1.1 ชนิดของกลยุทธ์สำหรับการผลิตตามความต้องการ

การผลิตตามความต้องการเป็นการผลิตที่เปิดโอกาสให้ลูกค้าได้เข้ามามีส่วนร่วมในการแสดงความคิดเห็นเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้ในปี ค.ศ. 2013 Lampel [12] ได้แบ่งระดับการมีส่วนร่วมของลูกค้าในกระบวนการผลิตเป็น 5 ประเภท แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการจำแนกประเภทของ mass customization [12]

โดยแต่ละประเภทมีรายละเอียดดังนี้

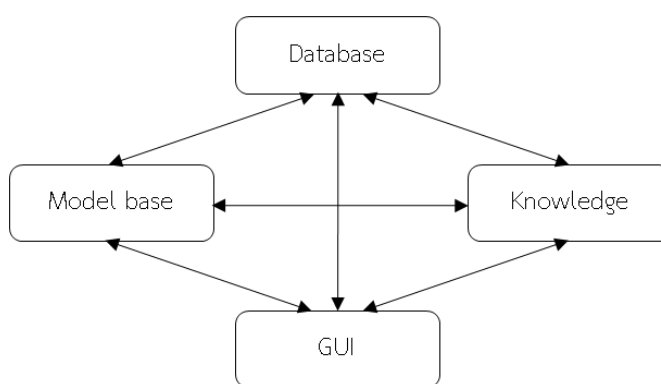
- pure standardization คือลูกค้าไม่มีส่วนร่วมในขั้นตอนใดเลย
- segmented standardization คือลูกค้าจะเข้ามามีส่วนร่วมในขั้นตอนของการขาย
- customized standardization คือลูกค้ามีส่วนร่วมในการออกแบบที่มีผลต่อการผลิต
- tailored customization คือการตัดสินใจของลูกค้ามีผลต่อกระบวนการผลิต
- pure customization คือลูกค้าเข้าไปมีส่วนร่วมได้ทุกขั้นตอนของการทำงาน

2.1.2 องค์ประกอบสนับสนุนการผลิตแบบตามความต้องการ

นอกเหนือจากองค์ประกอบหลักของระบบการผลิตทั่วไปแล้ว ระบบการผลิตแบบตามความต้องการต้องอาศัยเทคโนโลยีในการขับเคลื่อนที่แตกต่างจากระบบการผลิตแบบเดิมคือ

1) เทคโนโลยีสารสนเทศ (information technologies) หมายถึงเทคโนโลยีของข้อมูลสารสนเทศที่สามารถทำให้เกิดการขับเคลื่อนกระบวนการผลิตได้ทั้งหมดของห่วงโซ่อุปทาน ตั้งแต่ข้อมูลการขาย ระดับสินค้าคงคลัง คำสั่งซื้อต่อซัพพลายเออร์ และการส่งมอบให้กับลูกค้า เทคโนโลยีสารสนเทศสามารถช่วยลดความล่าช้าในการประมวลผลของคำสั่งซื้อและการจัดการในห่วงโซ่อุปทาน

2) ระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (decision support system: DSS) หมายถึงระบบที่ช่วยในการตัดสินใจในการตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในปริมาณที่ไม่แน่นอนได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยต้นทุนที่ต่ำ และสามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ซึ่งจะเป็นกุญแจสำคัญสำหรับความสำเร็จในการที่จะทำให้ระบบประสบความสำเร็จได้มีหลายปัจจัยด้วยกันที่ต้องตัดสินใจ ทั้งในส่วนของการผลิต การขนส่ง และต้นทุนของผลิตภัณฑ์เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีความรู้พื้นฐานสำหรับการตัดสินใจ โดยทั่วไปการประยุกต์ใช้ ระบบสนับสนุนการตัดสินใจจะประกอบด้วยสี่องค์ประกอบหลักได้แก่ ข้อมูลพื้นฐาน (database) โมเดลพื้นฐาน (model base) ความรู้พื้นฐาน (knowledge base) และ กราฟิกสำหรับผู้ใช้งาน (graphical user interface) โมเดลพื้นฐานประกอบด้วยโมเดลที่ใช้ในการดำเนินการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เช่น แบบจำลองหรืออัลกอริทึมต่างๆ สำหรับการคำนวณหรือวิเคราะห์เพื่อให้ผู้ใช้งานนำไปใช้ในการตัดสินใจได้ แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงภาพรวมของชนิดในการตัดสินใจของระบบ [13]

เป้าหมายสูงสุดของการผลิตแบบตามความต้องการคือการประสบความสำเร็จในทางเศรษฐศาสตร์ หลายบริษัทกำลังค้นหาวิธีที่จะพัฒนาความสามารถของระบบการผลิต วิธีการหนึ่งคือ การ

พัฒนาความสามารถของการออกแบบและระบบการผลิต แต่อย่างไรก็ตามผลการวิจัยที่มีอยู่ในปัจจุบันได้นำเสนอการพัฒนาและการนำไปปฏิบัติจริงในเรื่องการแก้ไขปัญหาล่าช้าก่อนข้างไม่ชัดเจน โดยที่บริษัทมากมายพบว่าเป็นการยากที่จะนำไปปฏิบัติ และอาจจะต้องเผชิญกับระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น อาจจะเป็นเรื่องด้วยยังขาดการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยอย่างเพียงพอและเหมาะสม

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีในด้านต่างๆ รวมถึงได้มีการพัฒนาแนวคิดหรือระเบียบวิธีเพื่อสนับสนุนการผลิต โดยที่ลูกค้าและซัพพลายเออร์ได้มีส่วนร่วมในการพัฒนาผลิตภัณฑ์มากขึ้น ในกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ หากได้มีการควบคุมต้นทุนและเลือกกระบวนการในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ได้อย่างเหมาะสมจะทำให้การผลิตตามความต้องการประสบความสำเร็จได้ นอกจากนี้การนำสินค้าเข้าสู่ตลาดที่รวดเร็วเป็นการช่วยเพิ่มความสามารถในการสร้างกำไรได้ในระยะแรก ซึ่งต้องอาศัยศักยภาพของกระบวนการออกแบบและผลิตสินค้า อย่างไรก็ตามผู้ผลิตที่นำระบบนี้มาใช้จะพบกับปัญหาความไม่แน่นอนที่เกิดจากความต้องการของลูกค้าที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ทำให้มีความยากลำบากในการวางแผนด้านต้นทุน คุณภาพของสินค้า และระยะเวลาในการผลิต รวมทั้งการขนส่งและการบริการลูกค้า ดังนั้น Frohlich และ Dixon [14] กล่าวว่าผู้ผลิตสินค้าและบริการในระบบการผลิตแบบนี้ต้องเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันเพื่อที่จะรักษาส่วนแบ่งทางการตลาดไว้ได้อย่างยั่งยืน

งานวิจัยนี้ได้เลือกอุตสาหกรรมผลิตเฟอร์นิเจอร์จากไม้ยางพาราไทยเป็นกรณีศึกษา เพราะสามารถที่จะปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตในบางขั้นตอน เช่นการประเมินต้นทุนให้มีความยืดหยุ่นตามลักษณะของสินค้าที่มีความหลากหลายตามลูกค้าต้องการได้ รวมทั้งนำผลที่ได้จากงานวิจัยชิ้นนี้ไปเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการผลิตแบบตามความต้องการในอุตสาหกรรมผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ยางพาราต่อไป

2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการประเมินต้นทุน (cost estimation)

ต้นทุน (cost) หมายถึง มูลค่าของทรัพยากรที่สูญเสียไปเพื่อให้ได้สินค้าหรือบริการ โดยมูลค่านั้นสามารถวัดได้เป็นหน่วยเงินตรา โดยการจัดแบ่งประเภทของต้นทุน สามารถแบ่งได้หลายแบบ ดังนี้

2.2.1 การจัดแบ่งประเภทของต้นทุนตามหน้าที่การผลิต สามารถแบ่งได้ดังนี้

- 1) ต้นทุนวัสดุทางตรง (direct materials cost) เป็นต้นทุนสำหรับวัสดุ ชิ้นส่วน ประกอบย่อยต่างๆ
- 2) ต้นทุนแรงงานทางตรง (direct labor cost) เป็นต้นทุนที่จ่ายให้กับแรงงานที่ใช้โดยตรงในการแปรสภาพวัตถุดิบให้เป็นสินค้าสำเร็จรูป

3) ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการผลิต (manufacturing overhead cost) เป็นต้นทุนในการผลิตทั้งหมดยกเว้นวัสดุทางตรงและค่าแรงทางตรง

2.2.2 การจัดแบ่งประเภทต้นทุนตามพฤติกรรมต้นทุน

1) ต้นทุนผันแปร (variable cost) เป็นต้นทุนที่เปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนหรือปริมาณการผลิต เช่นค่าแรงทางตรง ค่าวัสดุทางตรง เป็นต้น

2) ต้นทุนคงที่ (fixed cost) เป็นต้นทุนที่เกิดขึ้นเท่ากันตลอดกิจกรรม ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนการผลิต เช่น ค่าเสื่อมราคา ค่าประกันภัย ค่าเช่าโรงงาน เป็นต้น

2.2.3 การจัดแบ่งประเภทของต้นทุนตามความสัมพันธ์ของต้นทุนกับเหตุแห่งต้นทุน

1) ต้นทุนทางตรง (direct cost) หมายถึง ต้นทุนที่ใช้ในการก่อให้เกิดกิจกรรมนั้นๆ โดยตรง หรือระบุได้ชัดเจนว่าเป็นของผลิตภัณฑ์นั้น

2) ต้นทุนทางอ้อม (indirect cost) หมายถึง ต้นทุนผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถคิดเข้าโดยตรงกับผลิตภัณฑ์หรือแผนกนั้นๆ ได้อย่างชัดเจน

2.2.4 การจัดแบ่งประเภทของต้นทุนเพื่อการตัดสินใจ แบ่งได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

ก. ต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจ (relevant cost) แบ่งย่อยเป็น

1) ต้นทุนหลีกเลี่ยงได้ (avoidable cost) หมายถึง ต้นทุนที่กิจการใช้ในการดำเนินงานตามแบบที่เคยปฏิบัติอยู่ก่อนและไม่ต้องจ่ายเมื่อยกเลิกกิจกรรมนั้น

2) ต้นทุนที่แตกต่าง (differential cost) หมายถึง ต้นทุนที่เปลี่ยนแปลงไปจากต้นทุนที่หลีกเลี่ยงได้

3) ต้นทุนเสียโอกาส (opportunity cost) หมายถึง การนำทรัพยากรไปใช้ลงทุนกิจกรรมหนึ่งโดยเสียโอกาสในการเลือกทำกิจกรรมอื่นที่เหลือ

ข. ต้นทุนที่ไม่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจ (irrelevant cost)

1) ต้นทุนจม (sunk cost) หมายถึง เป็นต้นทุนที่จ่ายไปแล้วเมื่อในอดีตนอกจากนี้ยังหมายถึงต้นทุนที่ขาดหายไปไม่สามารถเรียกคืนกลับได้

2) ต้นทุนที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ (unavoidable cost) หมายถึง ต้นทุนที่ยังคงเกิดขึ้นถึงแม้ว่าจะยกเลิกกิจกรรมนั้นไปแล้ว

2.2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนการผลิต

1) โครงสร้างต้นทุนรวม (total cost) แบบแปรผัน หมายถึงต้นทุนที่ประกอบด้วยต้นทุนคงที่รวม (total fixed cost: TFC) และต้นทุนแปรผันรวม (total variable cost: TVC) ซึ่งมีรูปแบบสมการดังสมการที่ 2.1

$$TC = TFC + TVC \quad (2.1)$$

โดยที่ต้นทุนคงที่รวม (TFC) หมายถึงต้นทุนที่ประกอบด้วย ต้นทุนสินค้าคงที่ คือ ค่าใช้จ่ายคงที่ในการผลิต และต้นทุนด้านการค้าคงที่ซึ่งประกอบด้วยต้นทุนทางการตลาดและการบริหารคงที่

ต้นทุนแปรผันรวม (TVC) หมายถึงต้นทุนที่ประกอบด้วยต้นทุนสินค้าและต้นทุนการค้าแปรผัน โดยที่ต้นทุนสินค้าแปรผันประกอบด้วยต้นทุนในส่วนของต้นทุนวัตถุดิบทางตรง ต้นทุนแรงงานทางตรง และค่าใช้จ่ายอื่นๆ ในกระบวนการผลิต สำหรับต้นทุนการค้าแปรผันประกอบด้วยต้นทุนด้านการตลาดและบริหารแปรผันซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต

2) โครงสร้างต้นทุนรวม (total cost) แบบทางตรง-อ้อม หมายถึงต้นทุนที่ประกอบด้วย ต้นทุนสินค้าทางตรงและทางอ้อม (manufacturing costs) และต้นทุนการค้า (commercial costs) ซึ่งมีรูปแบบสมการดังสมการที่ 2.2

$$TC = MC + CC \quad (2.2)$$

โดยที่ ต้นทุนการผลิต (MC) หมายถึงต้นทุนที่ประกอบด้วยต้นทุนสินค้าทางตรงและต้นทุนสินค้าทางอ้อม โดยที่ต้นทุนสินค้าทางตรงได้แก่ ต้นทุนทางตรงในส่วนของวัตถุดิบและแรงงาน โดยที่ ต้นทุนสินค้าทางอ้อมได้แก่ ต้นทุนทางอ้อมในส่วนของวัตถุดิบและแรงงาน และรวมถึงค่าใช้จ่ายอื่นๆในกระบวนการผลิต

ต้นทุนการค้า (CC) หมายถึงต้นทุนที่ประกอบด้วยต้นทุนด้านการตลาดและต้นทุนบริหาร

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินต้นทุนของผลิตภัณฑ์พบว่าการประเมินต้นทุนเป็นกิจกรรมที่สำคัญซึ่งมีผลต่อกำไรของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบการผลิตตามความต้องการ ที่จะต้องดำเนินการให้เสร็จในเวลาที่สุดเร็วภายใต้ข้อมูลที่มีอยู่อย่างจำกัด นับเป็นความท้าทายอย่างมากที่จะทำให้การประเมินต้นทุนมีความถูกต้องก่อนการผลิตจริง ความพยายามในงานวิจัยนี้คือการพัฒนาเทคนิคและวิธีการใหม่ๆ ในการประเมินต้นทุนให้สอดคล้องกับต้นทุนที่เกิดจากการผลิตจริง ซึ่งผลจากการประเมินต้นทุนสามารถใช้ในการควบคุมกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ และใช้เป็นพารามิเตอร์อ้างอิงหรือเป็นตัวชี้วัดถึงความเป็นไปได้และผลกำไรที่จะได้รับของการพัฒนาผลิตภัณฑ์นั้น ในปี ค.ศ.

1998 Marx [15] ได้กล่าวถึงการนำเทคโนโลยีพื้นฐานมาประยุกต์ใช้สำหรับการประเมินต้นทุนของผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนการเริ่มต้นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ แต่ยังคงพบว่าฟังก์ชันและข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์และต้นทุนยังไม่เพียงพอ และปัญหาของค่าใช้จ่ายจากซัพพลายเออร์ที่ไม่แน่นอน จึงได้นำปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligence) และฟัซซีลอจิก (fuzzy logic) มาช่วยการประเมินต้นทุนของผลิตภัณฑ์ ต่อมาในปีค.ศ. 2002 Cawthorne และคณะ [16] ได้คิดค้นและพัฒนาระบบคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการประเมินต้นทุน (computer-aided costing system) จนปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการประเมินต้นทุนใหม่ๆ ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคต่างๆ มากมายเพื่อให้การประเมินต้นทุนมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น เช่น ฟัซซีลอจิก (fuzzy logic) [17–20] แบบจำลองแบบโครงข่ายประสาทเทียม (back-propagation neural network model) [21] แบบจำลองสมการถดถอย (regression model) [19–20], [22] การประมาณโดยอาศัยฟังก์ชันต้นทุน (parametric cost estimation technique) [23–24] การประเมินต้นทุนจากการจัดการข้อมูล [25] เป็นต้น และยังมีอีกหลายงานวิจัยที่ศึกษาการประเมินต้นทุนผลิตภัณฑ์ก่อนการผลิตจริง

นอกจากนี้ Kingsman และ คณะ [26] ได้นำระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (decision support systems: DSS) พัฒนาระบบในการประเมินต้นทุนและกำหนดราคาในการตกลงกันทางธุรกิจของการผลิตแบบ make-to-order (MTO) โดยการนำกฎในการประเมินต้นทุนนำไปใช้ในการตัดสินใจ ข้อมูลสำหรับการคำนวณต้นทุนของผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย ต้นทุนในส่วนของ วัตถุดิบ การติดตั้ง และ ต้นทุนรวมเป็นต้น ในการนำระบบสนับสนุนการตัดสินใจ ไปใช้นั้นจะอยู่บนพื้นฐานของกฎต่างๆ ที่ได้จากการออกแบบ ขั้นตอนการผลิต และอื่นๆ เป็นต้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ไม่แน่นอนและปัญหาของข้อมูลที่ไม่สามารถควบคุมได้ จึงได้นำเทคนิคฟัซซีลอจิก (fuzzy logic) และ โครงข่ายประสาทเทียม (neural-network: NN) มาช่วยในการประเมินต้นทุน

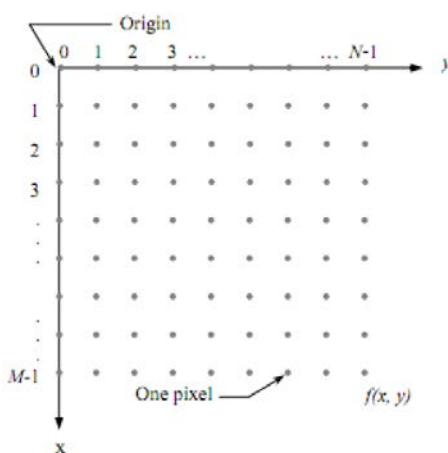
สำหรับการประเมินต้นทุนสีนั้น ได้พบว่ามีงานวิจัยของ Annaruemon และคณะ [27] ที่ได้ทำการศึกษาการประเมินต้นทุนของสีที่ใช้ในกระบวนการผลิตของเล่นเด็กจากไม้ยางพารา โดยได้นำ ฟัซซีลอจิก (fuzzy logic) มาใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะของชิ้นงานที่พ่นสีและ ปริมาณสีที่ใช้และต้นทุนที่เกิดขึ้น แต่เนื่องจากกระบวนการพ่นสีในงานวิจัยชิ้นนี้เป็นกระบวนการพ่นแบบ ใช้คนควบคุมหัวพ่น ซึ่งมีปัจจัยความไม่แน่นอนแตกต่างจากการควบคุมหัวพ่นแบบอัตโนมัติ ทำให้การประเมินต้นทุนสีในระบบการควบคุมหัวพ่นแบบอัตโนมัติจึงยังเป็นหัวข้อที่ควรจะศึกษา

2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการประมวลผลภาพดิจิทัล (digital image processing)

การประมวลผลภาพดิจิทัลเป็นการแปลงข้อมูลภาพให้อยู่ในรูปแบบดิจิทัล (digital format) หรือข้อมูลเชิงตัวเลข โดยมีวัตถุประสงค์ของการประมวลผลภาพ คือการปรับปรุงคุณภาพของภาพเพื่อให้มนุษย์สามารถมองเห็นรายละเอียดของภาพมากขึ้น และเพื่อให้คอมพิวเตอร์ตีความหมายของภาพได้ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดและทฤษฎีดังต่อไปนี้

2.3.1 ภาพดิจิทัล (digital image)

ภาพดิจิทัลคือภาพที่แสดงเป็นอาร์เรย์ (array) หลายมิติ หรือเป็นเมตริกซ์เชิงตัวเลข ภาพดิจิทัลจะแสดงในลักษณะสองมิติจะมีขนาดความกว้างและความสูงของภาพบนแนวแกน X และแนวแกน Y ส่วนจุดใดๆบนระนาบ XY จะเรียกแทนจุดนั้นว่าพิกเซล (pixel) แต่ละพิกเซลจะแสดงค่าความเข้มแสงของภาพเป็นฟังก์ชัน (x, y) หรือ $f(x, y)$ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.3



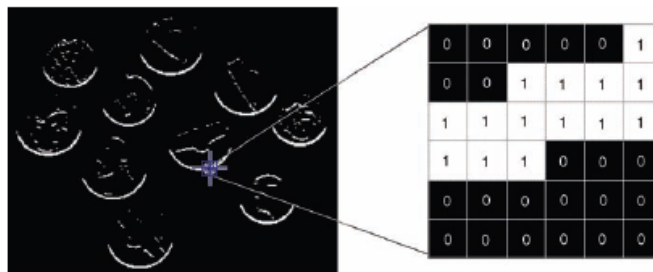
รูปที่ 2.3 แสดงจุดพิกัดบนภาพดิจิทัล [28]

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแทนภาพดิจิทัลด้วยเมตริกซ์ขนาด $M \times n$ ดังสมการที่ 2.3

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots & f(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \cdots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

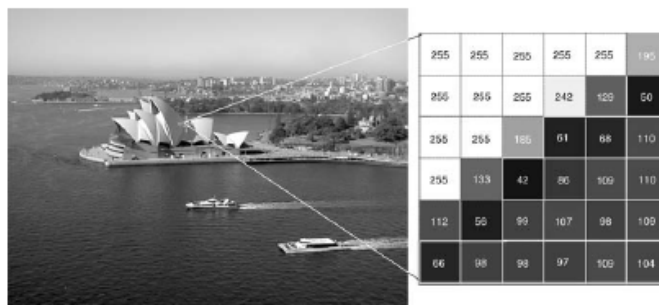
2.3.2 ประเภทของภาพดิจิทัล มีการจำแนกภาพออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

2.3.2.1 ภาพขาวดำ (binary image, 1-bit) คือภาพที่แต่ละพิกเซลมีค่าหนึ่งบิต สามารถแสดงได้เพียงสองสี คือสีขาวแทนด้วย 1 และสีดำแทนด้วย 0 แสดงดังรูปที่ 2.4



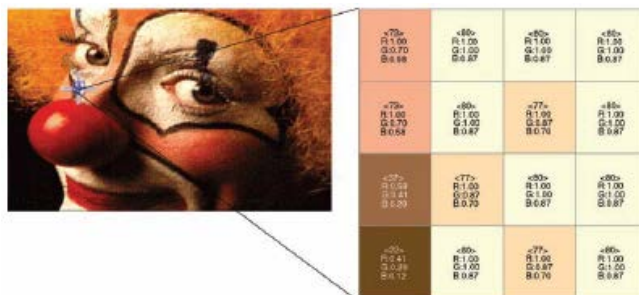
รูปที่ 2.4 ภาพขาวดำ (binary image) [29]

2.3.2.2 ภาพระดับเทา (gray-level image, 8-bit) คือภาพที่มีระดับความเข้มแต่ละพิกเซลสอดคล้องกับความเข้มแสงปกติในระดับสีเทา ซึ่งแต่ละพิกเซลสามารถแสดงเฉดสีจาก 0 (สีดำ) ถึง 255 (สีขาว) [0,255] มีขนาด 8 บิต หรือ 1 ไบต์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ภาพระดับเทา (gray scale image) [29]

2.3.2.3 ภาพสี (color image) หรือ 24-บิต (RGB, color image) คือภาพสีที่แต่ละพิกเซลมีส่วนประกอบของเวกเตอร์แทนสีแดง (red), สีเขียว (green) และสีน้ำเงิน (blue) โดยแต่ละสีสามารถแสดงความเข้มแสงได้ในช่วง [0,255] ทำให้แต่ละพิกเซลสามารถแสดงสีที่เป็นไปได้ทั้งหมด 256^3 เท่ากับ 16,777,216 แต่ละพิกเซลมีขนาด 24 บิต แสดงได้ดังรูปที่ 2.6

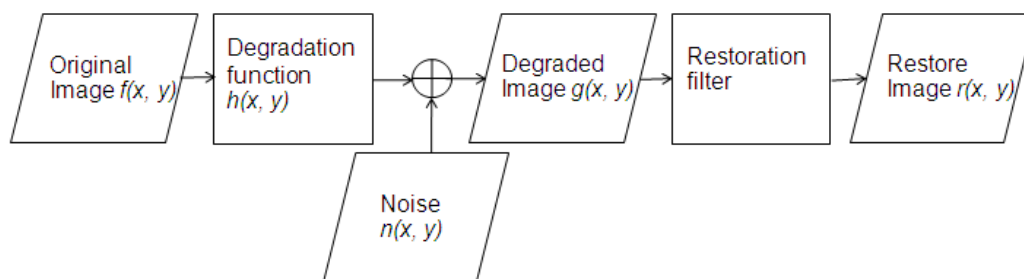


รูปที่ 2.6 ภาพสี (color image) [29]

2.3.3 การประมวลผลภาพดิจิทัล (digital image processing)

การประมวลผลภาพเป็นการนำข้อมูลดิจิทัลผ่านขั้นตอนต่างๆ ด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้ข้อมูลของภาพที่มีคุณภาพและง่ายต่อการนำไปประมวลผล โดยขั้นตอนพื้นฐานของการประมวลผลภาพด้วยคอมพิวเตอร์มีดังต่อไปนี้

2.3.3.1 การลดสัญญาณรบกวน (noise reduction) สัญญาณรบกวนคือ สัญญาณต่างๆ ที่เข้ามา หรือทำให้ภาพผิดเพี้ยน ไปจากที่ต้องการ ซึ่งเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุเช่น อุปกรณ์ในการถ่ายภาพ ระยะเวลาโฟกัส บุคคลผู้ถ่ายภาพ ฯลฯ ดังรูปที่ 2.7 เป็นการแสดงกระบวนการในการลดทอนสัญญาณรบกวน



รูปที่ 2.7 กระบวนการลดทอนสัญญาณรบกวน [29]

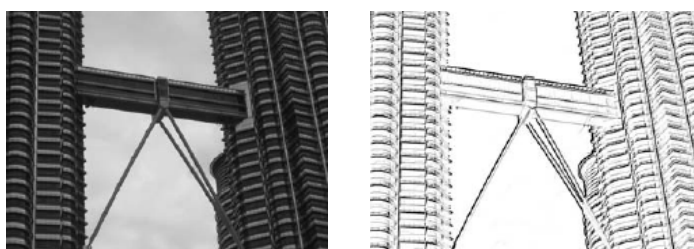
จากรูปที่ 2.7 จากไดอะแกรมภาพต้นแบบแทนด้วยฟังก์ชัน $f(x, y)$ ซึ่งถูกลดทอนคุณภาพจากสภาพแวดล้อมต่างๆ แทนด้วยฟังก์ชัน $h(x, y)$ และอาจมีสัญญาณรบกวนเข้ามาแทนด้วยฟังก์ชัน $n(x, y)$ และผลที่ได้แทนด้วยฟังก์ชัน $g(x, y)$ ซึ่งเป็นภาพที่มีสัญญาณรบกวนและคุณภาพต่ำ และ

เมื่อผ่านกระบวนการกรอง (restoration filter) ก็จะได้ภาพที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่แทนด้วยฟังก์ชัน $r(x, y)$ ซึ่งสามารถแสดงภาพตัวอย่างได้ดังรูปที่ 2.8



ก) ภาพต้นฉบับ ข) ภาพหลังลดทอนสัญญาณรบกวน
รูปที่ 2.8 แสดงภาพที่ผ่านการลดทอนสัญญาณรบกวน [29]

2.3.3.2 การตรวจหาขอบ (edge detection) การหาขอบภาพเป็นการหาเส้นรอบวัตถุที่อยู่ในภาพ เมื่อทราบเส้นรอบวัตถุจะทำให้สามารถคำนวณหาพื้นที่หรือสามารถจำแนกชนิดของวัตถุนั้นได้ ซึ่งสามารถแสดงภาพในการหาขอบของวัตถุได้ดังรูปที่ 2.9



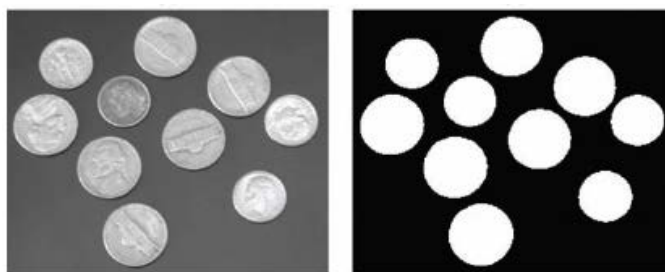
ก) ภาพต้นฉบับ ข) ภาพหลังจากตรวจจับขอบ
รูปที่ 2.9 การหาขอบวัตถุในภาพ [29]

2.3.3.3 การแบ่งย่อยส่วนประกอบภาพ (image segmentation) เป็นวิธีการลดจำนวนข้อมูลในรูปภาพที่ไม่จำเป็นออกจากการวิเคราะห์ ให้เหลือเฉพาะพื้นที่ของส่วนที่สนใจ โดยสามารถแบ่งประเภทการแบ่งย่อยส่วนประกอบภาพได้ 3 แบบคือ

- intensity-based segmentation เป็นวิธีการแยกองค์ประกอบของรูปภาพดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยดูจากความเหมือนกันของคุณสมบัติของจุดภาพภายในพื้นที่เพียงอย่างเดียว ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นภาพขาวดำด้วยวิธี thresholding โดยการแปลงภาพจะใช้วิธีเปรียบเทียบค่าความเข้มแต่ละพิกเซล

กับค่าอ้างอิง และเปลี่ยนค่าความเข้มในพิกเซลนั้นเป็น ขาว หรือ ดำ โดยสามารถแสดงเป็นสมการทางคณิตศาสตร์โดยมีข้อมูลภาพ $f(x, y)$ และภาพผลลัพธ์ที่ผ่านกระบวนการเป็น $g(x, y)$ ได้ดังสมการที่ 2.4

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } f(x, y) > T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.4)$$



ก) ภาพระดับเทา

ข) ภาพที่ผ่านวิธี thresholding

รูปที่ 2.10 การทดสอบภาพสำหรับวิธีการ segmentation [29]

- การแยกบริเวณโดยใช้ขอบของวัตถุ (edge based segmentation) เป็นการแยกองค์ประกอบของภาพโดยอาศัยความไม่ต่อเนื่องของคุณสมบัติของจุดภาพบริเวณรอยต่อระหว่างวัตถุกับฉากหลัง

- การหาค่าคุณลักษณะและการแทนค่า (feature extraction) เป็นวิธีการในการหาค่าคุณลักษณะของภาพและของวัตถุในภาพที่สนใจจากภาพขาวดำ (binary image) โดยที่วัตถุขาวดำ (binary object) ที่อยู่ในภาพคือพื้นที่ที่ต่อเนื่องกันภายในภาพขาวดำที่มีฟังก์ชัน $f(x, y)$ ซึ่งเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 2.5 ดังนี้

$$O_i(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } f(x, y) = O_i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.5)$$

ในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้โปรแกรม MATLAB ในการหาค่าคุณลักษณะของวัตถุในภาพโดยจะมีเครื่องมือในการวิเคราะห์ภาพ (IPT=image processing tool) ตัวอย่างเช่น regionprops ตารางด้านล่างแสดงตัวอย่างเครื่องมือวิเคราะห์ภาพของ regionprops ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างค่าคุณลักษณะที่ได้จากเครื่องมือ ในโปรแกรม MATLAB

คุณลักษณะ	ข้อมูลจากภาพ
area	ค่าจริงของจำนวนพิกเซลในพื้นที่
centroid	เวกเตอร์ที่ระบุจุดศูนย์กลางวัตถุ
perimeter	เวกเตอร์ของด้านนอกของแต่ละพื้นที่ในภาพ
pixelldxList	เวกเตอร์เชิงเส้นของพิกเซลในพื้นที่
pixellList	เมตริกที่ระบุตำแหน่งพิกเซลในพื้นที่

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าคุณลักษณะของวัตถุ (feature extraction) จากการประมวลผลภาพ จะเริ่มจากวิเคราะห์หาขอบของวัตถุซึ่งเป็นขั้นตอนเบื้องต้นที่สำคัญที่จะนำไปสู่การหาคุณลักษณะทางรูปร่างต่างๆ แม้ว่าอัลกอริทึมที่ใช้หาขอบจะมีหลายวิธีและมีผู้ทำการทดลองเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ไว้มากมาย แต่การจะใช้เทคนิคใดนั้นควรที่จะเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งานด้วย โดย Zou และ Bei Song [30] ได้นำเสนอวิธีในการแยกคุณลักษณะของขอบ เริ่มจากใช้เครื่องมือ (wavelet transform) ในการกำจัดสัญญาณรบกวนภายในภาพ แล้วนำมาทดสอบกับตัวดำเนินการในการตรวจหาขอบ เช่น การตรวจสอบขอบวัตถุที่แตกต่างกัน (differential edge detection) การเข้าสู่ระบบการตรวจหาขอบ (log edge detection) การตรวจสอบขอบด้วยวิธีเคนนี่ (canny edge detection) และการใช้รูปทรงของภาพไบนารี (binary morphology) พบว่าการตรวจสอบขอบด้วยวิธีแบบ canny จะให้เส้นขอบที่บางและมีการใช้ Gaussian filter ทำให้ลดสัญญาณรบกวนลงได้ นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดความละเอียดของขอบจากการกำหนดค่า threshold ได้ เมื่อได้ขอบของวัตถุในภาพที่สนใจแล้วจึงสามารถที่จะวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะของวัตถุได้ จากการสำรวจพบว่ามิงงานวิจัยมากมายที่ใช้การประมวลผลภาพในการวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะของวัตถุ [31-34] ผู้วิจัยจึงเกิดแนวคิดในการนำเทคนิคนี้มาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะทางเรขาคณิตของชิ้นส่วนเฟอร์นิเจอร์จากไม้ยางพารา ซึ่งจะเป็นการช่วยลดเวลาในการคำนวณและเป็นการสร้างพื้นฐานให้ระบบสามารถส่งผ่านข้อมูลจากกระบวนการออกแบบไปยังกระบวนการผลิตได้อย่างเป็นอัตโนมัติ

2.4 กระบวนการพ่นสี (painting process)

กระบวนการพ่นสีเป็นกระบวนการที่สำคัญอย่างหนึ่งของกระบวนการผลิตเฟอร์นิเจอร์จากไม้ยางพารา เพราะการที่จะทำให้กระบวนการพ่นสีเกิดประสิทธิภาพสูงสุด (transfer efficiency) จะต้องขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญได้แก่ ประสิทธิภาพของพนักงาน อุปกรณ์ในการพ่นสี สี ตัวทำละลาย เป็น

ต้น โดยที่ประสิทธิภาพของกระบวนการพ่นสีจะขึ้นอยู่กับปริมาณความสูญเสียของสีที่เกิดขึ้น ความสม่ำเสมอของสีที่เกาะบนชิ้นงาน อัตราการผลิตที่สูง และกระบวนการที่มีความเสถียรเป็นต้น แต่ละปัจจัยมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 สี (paint)

สีที่ใช้พ่นในกระบวนการพ่นสีจะมีอยู่ด้วยกันหลายประเภทและหลายเฉดสี ผู้ใช้จะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชิ้นงานแต่ละชนิด เช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ เพอร์นิเจอร์จากไม้ พลาสติก เป็นต้น โดยปัจจัยที่สำคัญจะต้องคำนึงถึงตัวละลายที่ใช้เป็นส่วนผสมสำหรับควบคุมความหนืดของสีให้เหมาะสมและคงที่ตลอดกระบวนการพ่นสี รวมถึงการเลือกอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับพ่นสี และสภาพแวดล้อมของกระบวนการพ่นสีที่เหมาะสมด้วย

2.4.2 ตัวทำละลาย (solvent)

ตัวทำละลายถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมของสีเพื่อให้สีที่ใช้มีความหนืดที่เหมาะสม โดยทั่วไปตัวทำละลายที่นิยมใช้คือทินเนอร์ (thinner) และน้ำ ในการเลือกใช้ตัวทำละลายจะขึ้นอยู่กับประเภทของสี ชิ้นงานที่ทำการพ่น และอุปกรณ์พ่นสี

2.4.3 ความหนืด (viscosity)

ความหนืดคือคุณสมบัติของสีในการต้านทานการไหล หรือการแตกตัวเป็นละอองของสี ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการพ่นสี ผู้ปฏิบัติงานจะต้องทำการตรวจสอบความหนืดของสีอยู่เสมอ เพราะเมื่อเวลาผ่านไปความหนืดของสีจะมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากตัวทำละลายที่ใช้ผสมจะระเหยหายไป ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบความหนืดของสีคือ ถ้วยวัดความหนืดสี โดยที่ค่าความหนืดของสีที่ได้คือเวลาการไหลของสีออกจากถ้วยวัดจนหมดโดยมีหน่วยวัดเป็นวินาที แสดงได้ดังรูปที่ 2.11



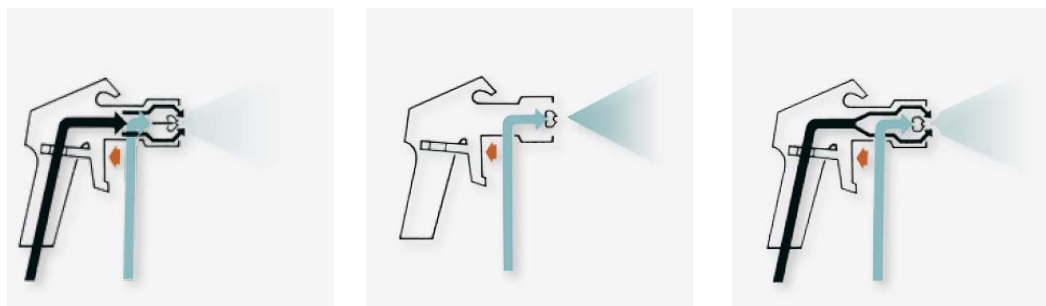
รูปที่ 2.11 อุปกรณ์สำหรับวัดความหนืดสี [35]

2.4.4 อุปกรณ์และวิธีการพ่น (spraying equipment and method)

2.4.4.1 วิธีแบบทั่วไป (conventional spraying) เป็นวิธีที่อาศัยแรงกดอากาศ เพื่อทำให้สีเป็นละอองและสามารถเกาะบนชิ้นงานได้ นิยมนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะสามารถใช้ได้กับชิ้นงานที่หลากหลาย แต่มีข้อเสียคือเกิดการสูญเสียของสีเป็นปริมาณมากในกระบวนการพ่นเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.12 ก

2.4.4.2 วิธีปริมาตรสูงความดันต่ำ (high volume low pressure: HVLP) เป็นวิธีที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดปัญหาการสูญเสียโดยการปรับปรุงปืนพ่นสีและหัวฉีดที่ทำให้เกิดละออง โดยใช้ปริมาตรของอากาศที่มากกว่าความดันต่ำ เพื่อให้สามารถควบคุมการเกิดละอองของสีได้ง่ายขึ้น ซึ่งวิธีการนี้เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้กับชิ้นงานที่เป็นของแข็งทั่วไปและยังสามารถลดการปล่อยก๊าซเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้ด้วย อุปกรณ์และวิธีการแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 ข

2.4.4.3 วิธีสูญญากาศ (airless spraying) วิธีการนี้จะทำให้ปริมาณสีที่สูญเสียน้อยกว่าวิธีทั่วไปแต่ความยืดหยุ่นในการใช้กับชิ้นงานน้อยกว่า สีที่ใช้สำหรับพ่นจะออกจากหัวฉีดโดยอาศัยแรงดันที่สูง (200 บาร์) ปริมาณสีและความกว้างของละอองสีที่ออกจากหัวฉีดจะได้จากการปรับขนาดของหัวฉีด ซึ่งวิธีนี้เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายสำหรับกระบวนการพ่นสีที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย อุปกรณ์และวิธีการแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 ค



ก) วิธีทั่วไป

ข) วิธีปริมาตรสูงความดันต่ำ

ค) วิธีสูญญากาศ

รูปที่ 2.12 อุปกรณ์และวิธีการพ่นสีแบบต่างๆ [35]

2.4.4.4 วิธีพ่นผสมอากาศ (air mix spraying) เป็นวิธีการหนึ่งที่ได้รับคามนิยมอย่างมากของกระบวนการพ่นสีสำหรับผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์จากไม้ เพราะง่ายต่อการปรับปริมาณและการควบคุมทิศทางละอองของสีที่เกิดขึ้น และมีการสูญเสียของสีในกระบวนการที่น้อย

2.4.4.5 วิธีพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatic spraying) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเป็นทางเลือกหนึ่งที่สำคัญสำหรับกระบวนการพ่นสี เช่นกระบวนการพ่นสีเฟอร์นิเจอร์ หรือชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น เทคนิคนี้อาศัยสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานและละอองสีที่เกิดจากกระบวนการอัดประจุไฟฟ้า จากรูปที่ 2.13 ก-ข แสดงตัวอย่างเช่นตำแหน่ง A แทนหัวลอบที่พ่นพ่นสี ละอองสีที่ออกจากหัวฉีดจะมีประจุลบ ขณะที่ตำแหน่ง B แทนชิ้นงานที่ต้องการพ่นสีมีประจุบวก เมื่อสีเข้าใกล้บริเวณชิ้นงานจะมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบบริเวณชิ้นงาน ทำให้ละอองสีบริเวณใกล้เคียงชิ้นงานถูกสนามแม่เหล็กไฟฟ้าดูดเข้ามาเคลือบชิ้นงาน



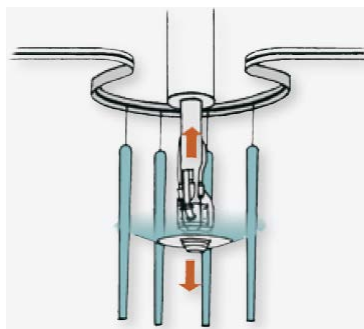
ก) วิธีพ่นทั่วไป

ข) วิธีพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

รูปที่ 2.13 เปรียบเทียบวิธีการพ่นสีแบบไฟฟ้าสถิตกับแบบทั่วไป [35]

2.4.4.5 วิธีพ่นสีไฟฟ้าสถิตแบบแรงเหวี่ยง (electrostatic rotary disc)

อาศัยแรงเหวี่ยงของจานหมุนในการทำให้ละอองของสีแตกตัว แสดงได้ดังรูปที่ 2.14 เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์เช่น ชิ้นส่วนของรถยนต์ เครื่องบิน เฟอร์นิเจอร์ไม้ อุปกรณ์ตกแต่งบ้าน โดยวิธีนี้เป็นวิธีการพ่นสีของโรงงานกรณีศึกษา

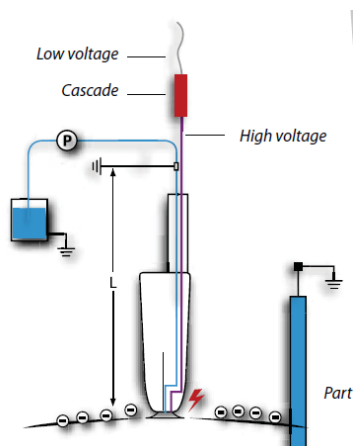


รูปที่ 2.14 เครื่องพ่นสีไฟฟ้าสถิตแบบแรงเหวี่ยง [35]

ข้อดีของเครื่องพ่นสีแบบแรงเหวี่ยง

- 1) ลักษณะการใช้งาน ผลจากการหมุนของจานพ่นสีด้วยความเร็วสูงทำให้สีแตกตัวเป็นละอองสีได้ดีและง่ายต่อการควบคุมทิศทางของละอองสีที่จะยึดเกาะบนผิวของชิ้นงาน
- 2) ใช้ได้กับช่วงของความหนืดสีที่หลากหลาย และตัวทำละลายที่เป็นน้ำและทินเนอร์
- 3) ช่วยลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต มีอัตราการผลิตที่สูง ส่งผลให้กระบวนการผลิตมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยเฉพาะเครื่องพ่นสีไฟฟ้าสถิตแบบจานหมุนจะทำให้กระบวนการพ่นสีมีประสิทธิภาพสูงสุด

นอกจากนี้ การใช้งานจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวทำละลายในการผสมสีสำหรับใช้ในกระบวนการผลิต เช่นทินเนอร์ และน้ำเป็นส่วนผสม ในโรงงานที่ทำการวิจัยได้ใช้ทินเนอร์เป็นส่วนผสม ตัวชิ้นงานจะถูกต่อกับสายดินและที่ตำแหน่งงานพ่นสีจะถูกอัดประจุด้วยกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อให้ละอองสีที่เกิดขึ้นมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นลบ เมื่อละอองสีเข้าไปใกล้ชิ้นงานซึ่งมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นบวกส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดแรงดูดให้ละอองสีไปเกาะบนชิ้นงาน โดยที่ขั้นตอนการทำให้เกิดประจุไฟฟ้าของเครื่องพ่นสีแสดงได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การอัดประจุไฟฟ้าของเครื่องพ่นสี [35]

2.5 ระบบฟัซซีลอจิก (fuzzy logic system)

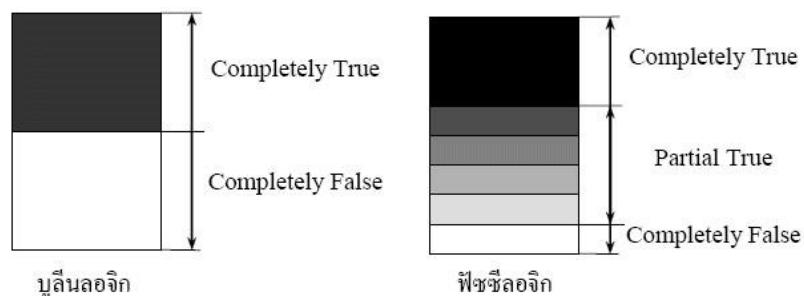
ฟัซซีลอจิกเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอนของข้อมูล ถูกคิดค้นขึ้นโดย L.A. Zadeh ในปี ค.ศ. 1965 [36] โดยอาศัยแนวคิดบนพื้นฐานความเป็นจริงที่กล่าวถึงเหตุการณ์ที่มีความไม่แน่นอน (uncertain) อาจเป็นสิ่งที่หรือเหตุการณ์ที่มีความคลุมเครือ (fuzzy) ซึ่งเป็นลักษณะทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นทั่วไป โดยเซตของเหตุการณ์ที่ไม่แน่นอนนี้ถูกเรียกว่าฟัซซีเซต (fuzzy set)

2.5.1 พื้นฐานของฟัซซีลอจิก

ทฤษฎีพื้นฐานของฟัซซีลอจิกที่ควรศึกษาในการออกแบบระบบฟัซซีลอจิก ประกอบด้วย แนวคิดแบบฟัซซี การดำเนินการทางฟัซซีเซต ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ตัวแปรภาษา และกฎฟัซซี โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.5.1.1 แนวคิดแบบฟัซซี

แนวคิดแบบฟัซซีเป็นเครื่องมือที่ใช้หลักการเลียนแบบแนวคิดที่ซับซ้อนของมนุษย์ เป็นแนวคิดที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง (partial true) โดยค่าความจริงจะอยู่ในช่วงระหว่างจริง (completely true) กับเท็จ (completely false) ซึ่งมีลักษณะที่พิเศษกว่าแนวคิดแบบจริงเท็จ (boolean logic) ที่จะมีค่าเป็นจริงกับเท็จเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แนวคิดแบบจริงเท็จและแนวคิดฟัซซี [37]

แนวคิดฟัซซีสามารถแก้ปัญหาข้อจำกัดของแนวคิดแบบจริงเท็จได้ โดยยอมให้มีค่าหรือระดับความเป็นสมาชิก (degree of membership) แสดงด้วยค่าตัวเลขระหว่าง 0 และ 1 โดยค่า 0 หมายถึงไม่เป็นสมาชิกในเซต ค่า 1 หมายถึงเป็นสมาชิกในเซต และค่าระหว่าง 0 กับ 1 เป็นสมาชิกบางส่วนในเซต ทำให้เกิดความราบเรียบในการเปลี่ยนจากพื้นที่นอกเซตไปอยู่ในเซตของสมาชิกต่างๆ โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นฟังก์ชันจัดเทียบ

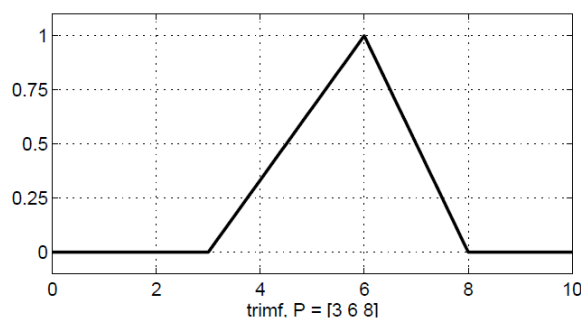
2.5.1.2 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function)

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นฟังก์ชันที่มีการกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ต้องการใช้งาน เป็นการแทนที่ตัวแทนที่มีความไม่ชัดเจน ไม่แน่นอน และคลุมเครือให้เป็นข้อมูลเชิงฟัซซี ดังนั้นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจึงเป็นส่วนที่สำคัญของการดำเนินการทางฟัซซี โดยเฉพาะรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะมีความสำคัญต่อกระบวนการคิดและแก้ไขปัญหา ซึ่งฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะสมมาตรกันหรือไม่สมมาตรกันทุกประการก็ได้ สำหรับรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกได้แก่

(1) ฟังก์ชันสามเหลี่ยม (triangular membership function)

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปสามเหลี่ยมมีทั้งหมด 3 พารามิเตอร์คือ $\{a, b, c\}$ สามารถคำนวณหาพารามิเตอร์ได้ดังสมการ 2.6 โดยรูปร่าง และตำแหน่งของพารามิเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.6

$$\text{triangular}(x: a, b, c) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x - a)/(b - a) & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b) & b \leq x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases} \quad (2.6)$$

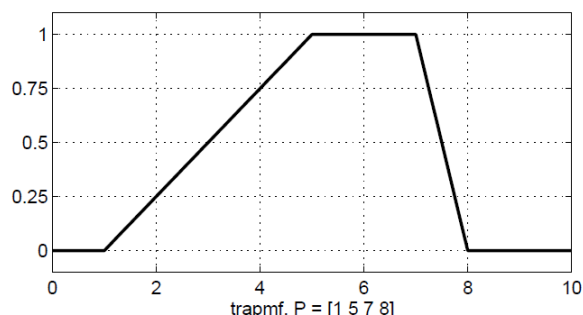


รูปที่ 2.17 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปสามเหลี่ยม [37]

(2) ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal membership function)

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมูมีทั้งหมด 4 พารามิเตอร์คือ $\{a, b, c, d\}$ สามารถคำนวณหาพารามิเตอร์ได้ดังสมการ 2.7 โดยรูปร่าง และตำแหน่งของพารามิเตอร์ดังรูปที่ 2.18

$$\text{trapezoidal}(x: a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x - a)/(b - a) & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ (d - x)/(d - c) & c \leq x < d \\ 0 & x \geq d \end{cases} \quad (2.7)$$

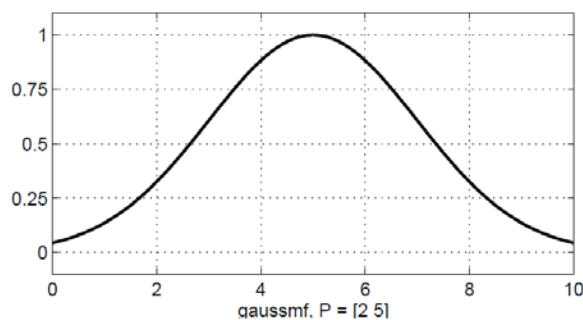


รูปที่ 2.18 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู [37]

(3) ฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian membership function)

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปเกาส์เซียนมีทั้งหมด 2 พารามิเตอร์คือ $\{m, \sigma\}$ ซึ่ง m หมายถึงค่าเฉลี่ย และค่า σ หมายถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน สามารถคำนวณหาพารามิเตอร์ได้ดังสมการ 2.8 โดยรูปร่าง และตำแหน่งของพารามิเตอร์ดังรูปที่ 2.19

$$\text{Gaussian}(x: m, \sigma) = \exp(-(x - m)^2 / \sigma^2) \quad (2.8)$$

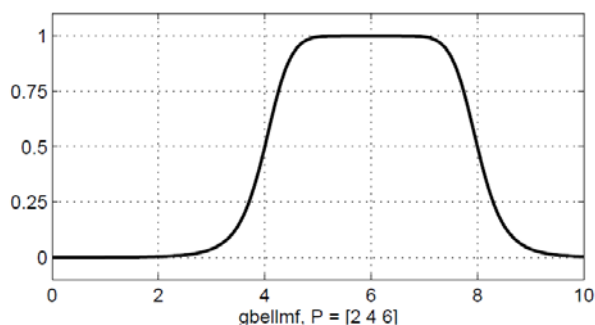


รูปที่ 2.19 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปเกาส์เซียน [37]

(4) ฟังก์ชันระฆังคว่ำ (bell-shaped membership function)

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูประฆังคว่ำมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 ค่าคือ $\{a, b, c\}$ สามารถคำนวณหาพารามิเตอร์ได้ดังสมการ 2.9 โดยรูปร่าง และตำแหน่งของพารามิเตอร์ดังรูปที่ 2.20

$$\text{Bell-shaped}(x: a, b, c) = 1 / (1 + |x - c| / a)^{2b} \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.20 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูประฆังคว่ำ [37]

การเลือกฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามารถเลือกตามความเหมาะสมและความครอบคลุมข้อมูลขาเข้า (input) โดยสามารถที่จะทับซ้อนกันเพื่อให้การดำเนินงานราบเรียบ ซึ่งมีความเป็นสมาชิกหลายค่าได้ และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเปลี่ยนแปลงแก้ไขให้เหมาะกับงานหรือตามความต้องการ

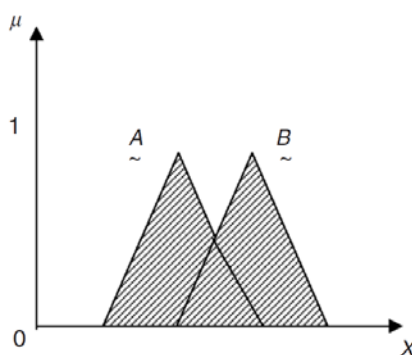
2.5.1.3 การดำเนินการทางฟัซซีเซต (fuzzy set operation)

การดำเนินการของฟัซซีเซตมีคุณสมบัติเหมือนกับเซตโดยทั่วไปมีด้วยกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ การยูเนียน (union) การอินเตอร์เซกชัน (intersection) และการคอมพลีเมนต์ (complement) ดังนี้

(1) การยูเนียน

การยูเนียนของฟัซซีเซตเป็นการดำเนินการโดยใช้คำสังหรือ (OR) สามารถดำเนินการได้ดังสมการ 2.10 ซึ่งผลการดำเนินการจะได้ระดับความเป็นสมาชิกทั้งหมดเป็นฟังก์ชันสมาชิกของทั้งเซต A และเซต B แสดงดังรูปที่ 2.21

$$\begin{aligned}\mu_{A \cup B}(x) &= \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \\ &= \max(\mu_A(x), \mu_B(x))\end{aligned}\quad (2.10)$$

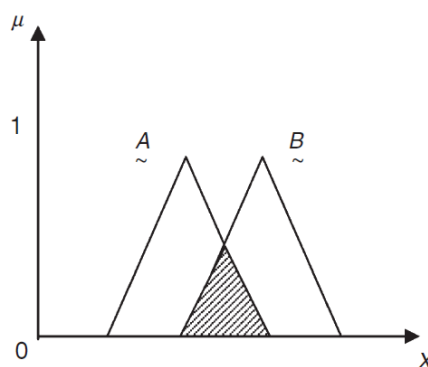


รูปที่ 2.21 การยูเนียนของฟัซซีเซต A และ B [37]

(2) การอินเตอร์เซกชัน

การอินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซตเป็นการดำเนินการโดยใช้คำสั่งและ (AND) สามารถดำเนินการได้ดังสมการ 2.11 ซึ่งผลการดำเนินการจะได้ระดับความเป็นสมาชิกทั้งหมดเป็นฟังก์ชันสมาชิกที่อยู่ทั้งเซต A และเซต B แสดงดังรูปที่ 2.22

$$\begin{aligned}\mu_{A \cap B}(x) &= \mu_A(x) \mu_B(x) \\ &= \min(\mu_A(x), \mu_B(x))\end{aligned}\quad (2.11)$$

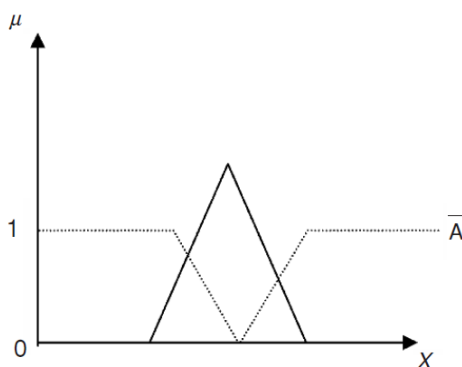


รูปที่ 2.22 การอินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซต A และ B [37]

(3) การคอมพลีเมนต์

การดำเนินการคอมพลีเมนต์เป็นการดำเนินการโดยใช้คำสั่งไม่ (NOT) สามารถดำเนินการได้ดังสมการ 2.12 ซึ่งผลการดำเนินการจะได้ระดับความเป็นสมาชิกทั้งหมดเป็นฟังก์ชันสมาชิกอื่นที่ไม่อยู่ในเซต A แสดงดังรูปที่ 2.23

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.23 การคอมพลีเมนต์ของฟัซซีเซต A [37]

2.5.1.4 ตัวแปรภาษา (linguistic variable)

ระบบฟัซซีลอจิกจะใช้ฟัซซีเซตในการระบุค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรภายในระบบ โดยฟัซซีเซตจะประกอบด้วยตัวแปรภาษาหรือตัวแปรฟัซซี ซึ่งจะเป็นค่าเชิงภาษาเช่น ร้อน กำลังดีหรือ เย็น เป็นต้น โดยค่าของตัวแปรเหล่านี้ถูกนำไปแปลเป็นค่าเชิงตัวเลขโดยอาศัยฟังก์ชันความเป็นสมาชิก เพื่อใช้ในการประมวลผลต่อไปเช่น กำหนดให้ X เป็นค่าของอุณหภูมิภายในห้อง ประโยค “อุณหภูมิร้อน” จึงประกอบไปด้วยตัวแปรฟัซซี “x เท่ากับอุณหภูมิ” และค่าของตัวแปร “x เท่ากับร้อน” เป็นต้น

2.5.1.5 กฎฟัซซี (fuzzy rule)

กฎของฟัซซีเป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรฟัซซี โดยปกติการออกแบบกฎดังกล่าวจะทำโดยผู้เชี่ยวชาญที่รู้ความสัมพันธ์ภายในของระบบเป็นอย่างดี และทำให้สามารถสรุปเป็นกฎความสัมพันธ์นั้นๆ ออกมาได้อย่างถูกต้อง โดยกฎของฟัซซีคือกลุ่มของประโยคเงื่อนไข IF-THEN (ถ้า-แล้ว) ในรูปแบบต่อไปนี้

IF x is A

THEN y is B

หรือ

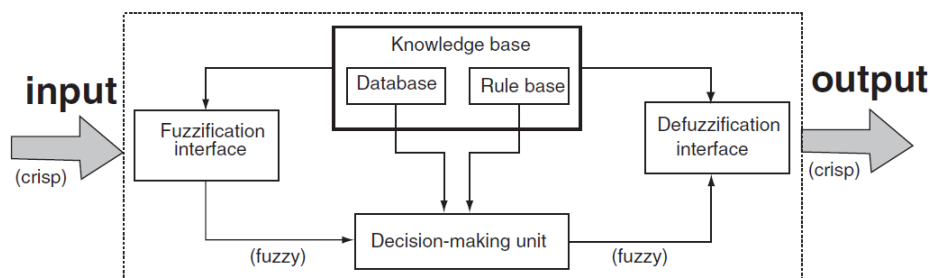
ถ้า x เท่ากับ A

แล้ว y เท่ากับ B

โดยที่ x และ y เป็นตัวแปรภาษา ส่วน A และ B เป็นค่าเชิงภาษา เป็นต้น ค่าเงื่อนไขใน IF จะมีความเป็นฟัซซีในระดับหนึ่ง ส่วน THEN จะถูกประเมินด้วยค่าระดับความเป็นสมาชิก ซึ่งจะให้ค่าที่สัมพันธ์ในระดับนั้นๆ โดยทุกเงื่อนไขในส่วน IF จะถูกประเมินพร้อมๆ กัน และรวมกันด้วยการดำเนินการทางฟัซซีเซตในหัวข้อ 2.5.1.3 เช่น AND หรือ OR สำหรับจำนวนของกฎควรเลือกใช้กฎที่จำเป็นเท่านั้น เนื่องจากจะส่งผลต่อความยุ่งยากในการออกแบบระบบของฟัซซี

2.5.2 ขั้นตอนของการประมวลผลแบบฟัซซี

ขั้นตอนการประมวลผลของฟัซซีลอจิกประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลักดังรูปที่ 2.24 ได้แก่ การทำฟัซซี การสร้างฐานกฎฟัซซี การอนุมาน และการทำค่าฟัซซีให้เป็นค่าปกติหรือการทำดีฟัซซี ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.24 ขั้นตอนของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก [37]

2.5.2.1 การทำฟัซซี (fuzzification)

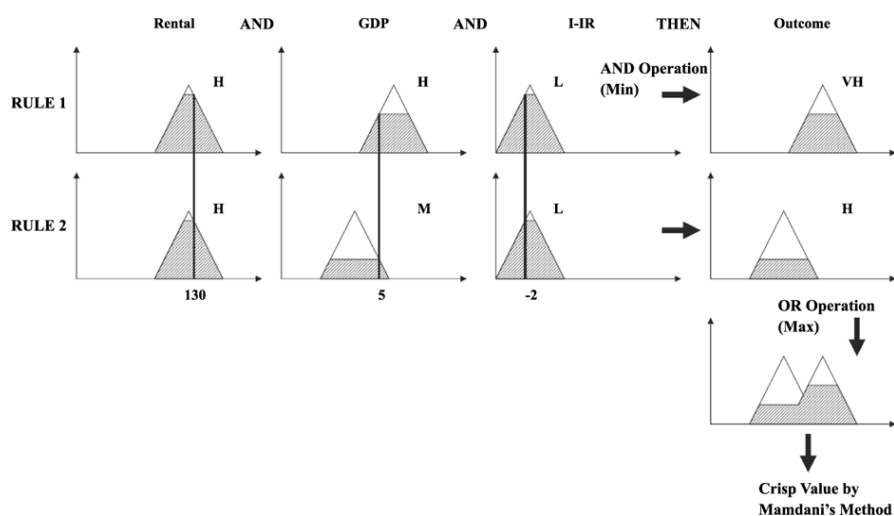
ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการแปลงอินพุตทั่วไป (crisp input) ที่ใช้สำหรับการแสดงแนวคิดและการสื่อสารของมนุษย์เป็นอินพุตแบบตัวแปรฟัซซี (fuzzy input) หรือฟัซซีเซต โดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function) ในการจัดการกับอินพุตให้เป็นข้อมูลเชิงฟัซซี ซึ่งฟังก์ชันความเป็นสมาชิกถือเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ระบบฟัซซีลอจิกสามารถจำลองความรู้จากผู้เชี่ยวชาญเข้าสู่ระบบได้ การออกแบบฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีองค์ประกอบที่ต้องพิจารณาได้แก่ ความสูง ความกว้างของเซตซึ่งแสดงถึงช่วงความเป็นสมาชิกของเซตนั้นๆ ความชันของเส้นขอบซึ่งแสดงถึงความเป็นฟัซซี โดยองค์ประกอบเหล่านี้ได้จากการออกแบบของผู้เชี่ยวชาญที่สามารถระบุความถูกต้องของตัวแปรได้ และองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญของการออกแบบฟังก์ชันความเป็นสมาชิกคือ รูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก โดยรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกได้แก่ แบบสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมคางหมู ระวังคว่ำ และเกาส์เซียน เป็นต้น การเลือกฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามารถเลือกตามความเหมาะสมและสามารถครอบคลุมข้อมูลอินพุตได้ สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกเป็นแบบสามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยมคางหมูซึ่งนิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีเส้นขอบเขตเป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถจำลองความสัมพันธ์ของขอบเขตได้ง่ายกว่ารูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบอื่นๆ อีกทั้งครอบคลุมข้อมูลอินพุตทั้งหมด

2.5.2.2 การสร้างฐานกฎฟัซซี (fuzzy rule base)

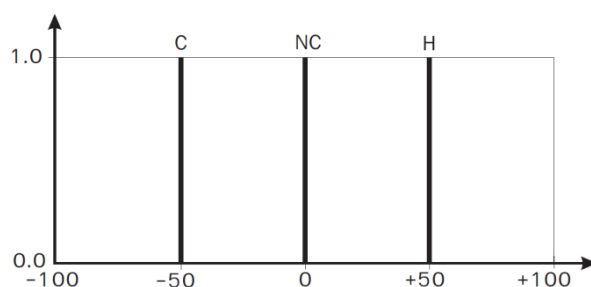
ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับเอาต์พุตโดยอาศัยหลักการของการหาเหตุและผล อาจสร้างจากการเก็บข้อมูล การตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญหรือค่าจากการทดลอง โดยเขียนเป็นกฎ ซึ่งจะมีลักษณะอยู่ในรูปของ If-Then โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยรูปแบบหรือสมการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน

2.5.2.3 กลไกการอนุมาน (inference engine)

ขั้นตอนนี้เป็น การส่งค่าจากค่าอินพุตของระบบไปยังเอาต์พุต โดยใช้หลักการของทฤษฎีเซต การอนุมานฟัซซีมีอยู่ 2 วิธีใหญ่ๆ คือแบบ Mamdani และแบบ Sugeno โดยการอนุมานแบบ Mamdani เป็นการอนุมานโดยใช้ตัวดำเนินการค่าต่ำสุด (minimum operator) สำหรับการเชื่อมประโยคแบบ “and” และใช้ตัวดำเนินการค่าสูงสุด (maximum operator) สำหรับการเชื่อมประโยคแบบ “or” ดังรูปที่ 2.25 ซึ่งมีข้อดีได้แก่ ตรงไปตรงมา และง่ายต่อความเข้าใจ เป็นที่ยอมรับนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง อีกทั้งสะดวกต่อระบบที่มีการป้อนอินพุตโดยตรงจากมนุษย์ ส่วนการอนุมานแบบ Sugeno จะแตกต่างจากแบบ Mamdani ในส่วนของเอาต์พุต โดยเอาต์พุตของแต่ละกฎจะเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 2.26 ซึ่งมีข้อดีได้แก่ มีประสิทธิภาพเชิงการคำนวณ มีค่าเอาต์พุตที่ต่อเนื่อง และเหมาะสมในการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani เพราะมีความเหมาะสมสำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตที่ต้องอาศัยความเชี่ยวชาญของผู้มีประสบการณ์ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์



รูปที่ 2.25 การอนุมานแบบ Mamdani [37]



รูปที่ 2.26 ตัวอย่างฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตแบบ Sugeno [37]

2.5.2.4 การทำดีฟัซซี (defuzzification)

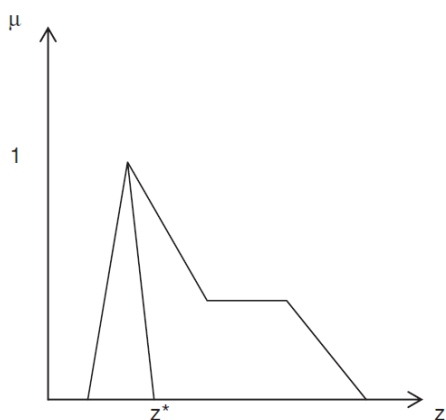
ขั้นตอนนี้เป็นการแปลงค่าเอาต์พุตเชิงฟัซซีจากการรวมกฎเป็นค่าเอาต์พุตที่ชัดเจน (crisp value) หรือค่าปกติ วิธีการทำค่าฟัซซีให้เป็นค่าปกติมีหลายแบบตัวอย่างเช่น

1) วิธีค่าสมาชิกสูงสุด (max-membership principle) วิธีการนี้คำตอบที่ได้คือค่าความเป็นสมาชิกสูงสุดสามารถหาได้จากสมการ 2.13 แสดงได้ดังรูปที่ 2.27

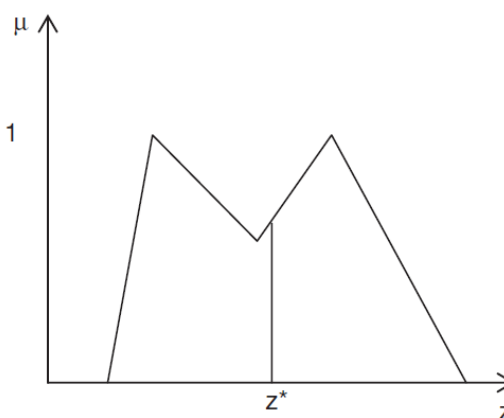
$$\mu_A(z^*) \geq \mu_A(z) \quad (2.13)$$

2) วิธีหาจุดศูนย์ถ่วง (centroid method) หรือ center of gravity (COG) ใช้หลักการหาจุดศูนย์ถ่วงของพื้นสามารถหาได้จากสมการ 2.14 แสดงได้ดังรูปที่ 2.28

$$z^* = \frac{\int \mu_A(z)zdz}{\int \mu_A(z)dz} \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.27 วิธีหาค่าสมาชิกสูงสุด [37]



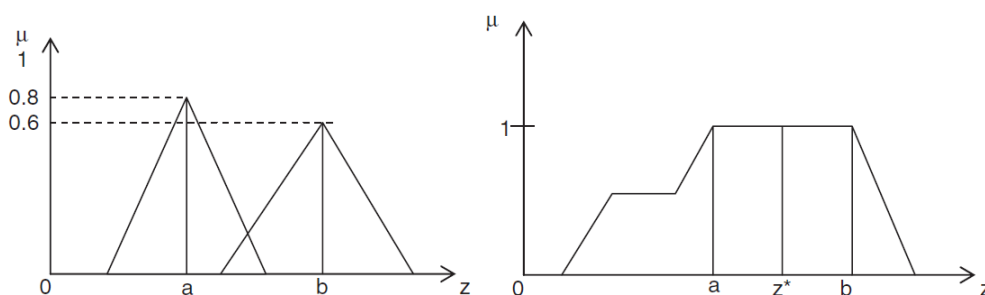
รูปที่ 2.28 วิธีหาจุดศูนย์ถ่วง [37]

3) วิธีหาน้ำหนักเฉลี่ย (weighted average method) คือหาค่าเฉลี่ยของพื้นที่ แต่วิธีนี้ใช้ได้กับเฉพาะรูปที่มีความสมมาตรเท่านั้น แสดงสมการ 2.15 และรูปที่ 2.29

$$z^* = \frac{\sum \mu_A(\bar{z})z}{\sum \mu_A(\bar{z})} \quad (2.15)$$

4) ค่าเฉลี่ยสูงสุดของสมาชิก (mean-max-membership) คล้ายกับวิธี ค่าสมาชิกสูงสุด แต่ใช้ค่าสูงสุดของค่าความเป็นสมาชิกหลายจุดมาหาค่าเฉลี่ย แสดงได้ดังสมการ 2.16 และรูปที่ 2.30

$$z^* = \frac{a+b}{2} \quad (2.16)$$



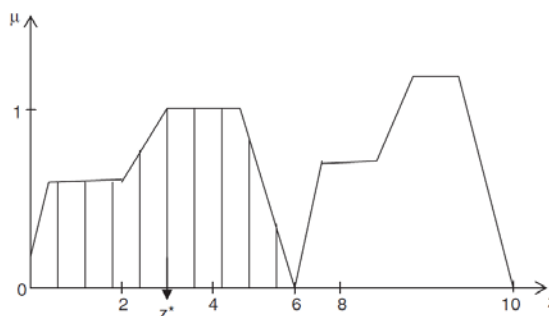
รูปที่ 2.29 วิธีหาน้ำหนักเฉลี่ย [37]

รูปที่ 2.30 วิธีค่าเฉลี่ยสูงสุดของสมาชิก [37]

5) วิธีจุดศูนย์กลางของพื้นที่ที่ใหญ่ที่สุด (center of largest area) เลือกเฉพาะพื้นที่ของส่วนที่ใหญ่กว่ามาหาจุดศูนย์กลาง เป็นไปตามสมการ 2.17 และตามรูปที่ 2.31

$$z^* = \frac{\int \mu_{cm}(z)zdz}{\int \mu_{cm}(z)dz} \quad (2.17)$$

โดยที่ c_m คือขอบเขตของพื้นที่ที่ใหญ่ที่สุด



รูปที่ 2.31 วิธีจุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่ใหญ่สุด [37]

งานวิจัยที่ผ่านมาในการนำเทคนิคฟuzzyลอจิกมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิตเช่น ในปี ค.ศ. 2001 Marcello และคณะ [38] ได้พัฒนาระบบฟuzzyลอจิกในการควบคุมความเร็วสายพานการผลิตของการลำเลียงขวดแก้วสำหรับจัดลำดับคิวของการผลิต โดยที่ข้อมูลขาเข้าของระบบ ได้แก่ ระยะเวลายาวของคิวขวดแก้วที่อยู่ติดกัน ระยะห่างระหว่างขวดแก้วแต่ละคิว ความเร็วของคิว โดยมีข้อมูลขาออกของระบบคือความเร็วของสายพานการผลิต ซึ่งผลที่ได้สามารถนำระบบฟuzzyมาใช้ในการควบคุมความเร็วของสายพานโดยมีประสิทธิภาพมากกว่าการควบคุมแบบเก่า และในปี ค.ศ. 2012 Tarso และคณะ [39] ได้นำเสนอระบบฟuzzyลอจิกในการควบคุมแรงดันน้ำในระบบการจ่ายน้ำโดยการควบคุมการเปิดปิดวาล์วและการควบคุมความเร็วโรเตอร์ของระบบปั๊ม ในการสร้างกฎฟuzzyโดยมีตัวแปรขาเข้าคือแรงดันที่ระดับสำคัญของระบบไฮดรอลิก ค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงของระบบ มอเตอร์-ปั๊ม (FREQ) แรงดันที่เกินหรือขนาดของวาล์ว (dif) ค่ามุมของวาล์ว (valve) และข้อมูลขาออกของระบบฟuzzyลอจิกคือ การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความถี่อินเวอร์เตอร์ในการควบคุม VFD (variable frequency drive) และการเพิ่มหรือลดลงของการเปิดปิดมุมของวาล์ว โดยที่ระบบฟuzzyลอจิกที่นำเสนอมีค่าความผิดพลาดสูงสุดในช่วงใกล้เข้าสู่สภาวะคงที่ของระบบ 3.4% ซึ่งเป็นค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ยังมีการนำเทคนิคฟuzzyลอจิกนำมาใช้ในการควบคุมกระบวนการต่างๆ เช่น การควบคุมน้ำหนักชิ้นงานบนสายพานลำเลียง ควบคุมกระบวนการแปรรูปวัสดุ ควบคุมระบบการติดตามตรวจสอบตำแหน่งด้วยเลเซอร์ การควบคุมกระบวนการในการฉีดพลาสติก และการควบคุมการสันสะเทือนของคานเป็นต้น

2.6 ทฤษฎีการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis)

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่สองตัวขึ้นไป โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณหรือพยากรณ์ค่าของตัวแปรตามจากตัวแปรอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 ประเภทการวิเคราะห์การถดถอย

การวิเคราะห์การถดถอยมีด้วยกันหลายประเภท ขึ้นกับลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระ โดยทั่วไปการวิเคราะห์การถดถอยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

1) สมการถดถอยเชิงเส้น (linear regression analysis) เป็นการวิเคราะห์การถดถอยที่มีลักษณะความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามเป็นแบบเส้นตรง การวิเคราะห์เชิงเส้นแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ

ก) การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (simple linear regression) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัว ประกอบด้วยตัวแปรตาม Y จำนวนหนึ่งตัว และตัวแปรอิสระ X จำนวนหนึ่งตัวแปร และสร้างรูปแบบสมการพยากรณ์ค่าตัวแปรตามด้วยตัวแปรอิสระ สามารถเขียนแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นได้ดังสมการที่ 2.18

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (2.18)$$

โดยที่	Y	คือ ตัวแปรตาม (dependent variable)
	X	คือ ตัวแปรอิสระ (independent variable)
	β_0	คือ ระยะเวลาตัดแกน y หรือค่าเริ่มต้นของเส้นสมการถดถอย
	β_1	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient)
	ε	คือ ความคลาดเคลื่อนอย่างสุ่ม

ข) การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (multiple linear regressions) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม Y จำนวนหนึ่งตัวแปร และตัวแปรอิสระ X จำนวนสองตัวแปรขึ้นไป และสร้างรูปแบบสมการพยากรณ์ค่าตัวแปรตามด้วยตัวแปรอิสระ การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณสามารถเขียนแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นได้ดังสมการได้ดังสมการที่ 2.19

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (2.19)$$

โดยที่	Y	คือ ตัวแปรตาม (dependent variable)
	X	คือ ตัวแปรอิสระ (independent variable)
	β_0	คือ ระยะเวลาตัดแกน y หรือค่าเริ่มต้นของเส้นสมการถดถอย
	$\beta_1 - \beta_n$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient) ตัวที่ 1 ถึงตัวที่ n
	ε	คือ ความคลาดเคลื่อนอย่างสุ่ม

โดยที่ค่า β_i เป็นค่าที่แสดงว่าเมื่อตัวแปรอิสระเปลี่ยนไป 1 หน่วย จะทำให้ตัวแปรตามเปลี่ยนแปลงไปเท่าใด ขณะที่ตัวแปรอิสระตัวอื่นๆ มีค่าคงที่

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณ เป็นการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรอิสระหลายๆ ตัวแปร กับตัวแปรตาม ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองสมการพยากรณ์จะพิจารณาจากการมีตัวแปรอยู่ในระบบสมการ ซึ่งเรียกว่า การนำตัวแปรเข้าระบบสมการที่นิยมมีด้วยกัน 4 วิธีดังนี้

ก) การคัดเลือกเข้าทั้งหมด (all enter) ถือว่าตัวแปรอิสระทุกตัวมีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม จึงนำตัวแปรอิสระทุกตัวเข้าระบบสมการพร้อมๆ กัน

ข) การคัดเลือกเพิ่มแบบเดินหน้า (forward) กำหนดให้เริ่มต้นสร้างสมการยังไม่มีตัวแปรใดอยู่ในระบบสมการ โดยนำตัวแปรอิสระที่มีขนาดของอิทธิพลสูงสุด (โดยพิจารณาจากค่า partial F ไม่ได้ดูจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์) เข้าไปสร้างสมการกับตัวแปรตามก่อน จากนั้นนำตัวแปรอิสระที่เหลือที่มีขนาดของอิทธิพลรองลงไปเข้าที่ละตัว และจะหยุดการนำตัวแปรอิสระเข้าระบบสมการ หากพบว่าตัวแปรนั้นมีขนาดของอิทธิพลน้อย (ไม่มีนัยสำคัญ) หรือไม่มีอิทธิพลเลย

ค) การคัดเลือกแบบถอยหลัง (backward) กำหนดให้เมื่อเริ่มสร้างสมการมีตัวแปรอิสระทุกตัวอยู่ครบในระบบสมการจากนั้นให้ทำการดึงตัวแปรอิสระที่มีขนาดของอิทธิพลน้อยสุด (ไม่มีนัยสำคัญ) ออกจากสมการทีละตัว (โดยพิจารณาจากค่า partial F) จนกระทั่งเหลือตัวแปรในระบบสมการเฉพาะที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

ง) การคัดเลือกแบบขั้นตอน (stepwise) เป็นวิธีการที่นำตัวแปรอิสระเข้าสมการทีละตัวตัวเช่นเดียวกับ forward และเมื่อตัวแปรนั้นเข้าไปอยู่ในระบบสมการแล้วจะทำการตรวจสอบย้อนกลับโดยวิธี backward อีกทีหนึ่ง ในทุกครั้งที่มีการนำตัวแปรอิสระเข้าสมการ

ก่อนการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างสมการพยากรณ์ตัวแปรตามด้วยตัวแปรอิสระ ต้องพิจารณาข้อตกลงเบื้องต้นของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นดังนี้

ก) ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น (X) และตัวแปรตาม (Y) มีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น (linearity)

ข) ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการพยากรณ์ต้องมีความแปรปรวนคงที่ (homogeneity of variance) พิจารณาจากแผนภาพการกระจาย (scatter plot) ซึ่งต้องมีการกระจายของข้อมูลใกล้เคียงกันอยู่เหนือและใต้ระดับ 0.0 และเป็นแนวที่เอียงผืนผ้า

ค) ค่าความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระต่อกัน (independent) หรือหมายถึงข้อมูลจะต้องไม่มีความสัมพันธ์ภายในตัวเอง ซึ่งการที่ข้อมูลมีความสัมพันธ์ภายในตัวเอง เรียกว่าการเกิด autocorrelation การตรวจสอบความเป็นอิสระของ error จะใช้ค่า Durbin-Watson โดยมีสมมติฐานดังนี้

H_0 : ไม่เกิด autocorrelation

H_1 : เกิด autocorrelation

ง) ตัวแปรที่นำมาใช้พยากรณ์ต้องไม่มีความสัมพันธ์กันเอง (multicollinearity) หมายถึงการเกิดความสัมพันธ์กันเองของตัวแปรอิสระ หรือมีความสัมพันธ์กันสูงเกินไป (จะมีเฉพาะในการ

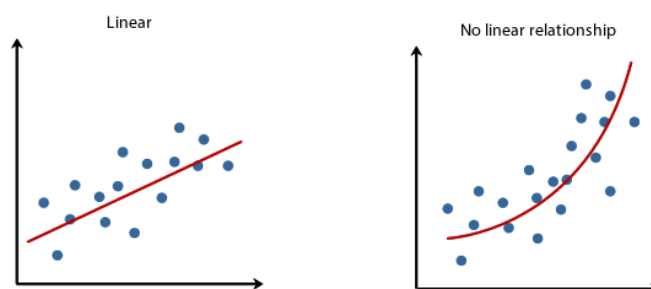
วิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณ) จะใช้ค่า variance inflation factor (VIF) หรือค่า tolerance หรือค่า eigenvalue ตัวใดตัวหนึ่งก็ได้ โดยมีเกณฑ์การตรวจสอบดังนี้

- ค่า VIF ที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 10 หากเกินกว่านี้แสดงว่าตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันเอง หรือแสดงว่าเกิด multicollinearity
- ค่า tolerance หากน้อยกว่า 0.1 แสดงว่าเกิด multicollinearity
- ค่า eigenvalue หาก eigenvalue ตัวที่มากที่สุดมีค่าไม่เท่ากับ 10 แสดงว่าเกิด multicollinearity

2) การวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non linear regression analysis) เป็นการวิเคราะห์การถดถอยที่มีลักษณะความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามไม่เป็นเชิงเส้น หรือเป็นแบบเส้นโค้ง ซึ่งการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ กับตัวแปรตามจะเริ่มจากการสร้างแผนภาพการกระจาย (scatter plot) เพราะแผนภาพการกระจายจะเป็นแนวทางให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง เป็นแบบเส้นตรงหรือเส้นโค้ง กรณีที่ความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง จะวิเคราะห์แบบการถดถอยเชิงเส้นตรงดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร x กับตัวแปร y ดังรูปที่ 2.32 ก) ส่วนกรณีที่ความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นโค้ง จะวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นโค้ง ดังรูปที่ 2.32 ข) ซึ่งการถดถอยแบบเส้นโค้งอาจแบ่งออกเป็นหลายรูปแบบ สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมทั่วไปจะพิจารณารูปแบบการถดถอยแบบเส้นโค้งโพลีโนเมียล (polynomial regression) ลำดับที่ p ซึ่งมีรูปแบบสมการดังสมการ 2.20

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \dots + \beta_p x^p + \varepsilon \quad (2.20)$$

โดยที่	Y	คือ ตัวแปรตาม (dependent variable)
	x	คือ ตัวแปรอิสระ (independent variable)
	β_0	คือ ระยะตัดแกน y หรือค่าเริ่มต้นของเส้นสมการถดถอย
	$\beta_1 - \beta_p$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient) ตัวที่ 1 ถึงตัวที่ p
	ε	คือ ความคลาดเคลื่อนอย่างสุ่ม



ก) รูปแบบการถดถอยแบบเชิงเส้น ข) รูปแบบการถดถอยแบบเส้นโค้งพหุนาม

รูปที่ 2.32 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอย

กรณีรูปแบบการถดถอยแบบเส้นโค้งพหุนามที่มีตัวแปรอิสระ 1 ตัวสามารถแสดงรูปแบบทั่วไปที่เป็นสมการกำลังสอง (quadratic model) มีรูปแบบดังสมการ 2.21 และสมการกำลังสาม (cubic model) มีรูปแบบดังสมการ 2.22

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \epsilon \quad (2.21)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \beta_3 X^3 + \epsilon \quad (2.22)$$

2.6.2 การทดสอบทางสถิติที่อธิบายความสอดคล้องและความเหมาะสมกับข้อมูลของแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีดังนี้

- 1) การทดสอบความเหมาะสมของโมเดล เป็นการตรวจสอบว่าตัวแปรอิสระ และตัวแปรตามมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกันหรือไม่ จะใช้สถิติทดสอบ ANOVA
- 2) การทดสอบค่าคงที่ และค่าสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยทีละตัวโดยใช้สถิติทดสอบ t
- 3) พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) และค่าความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ (standard error of estimate)

2.6.3 การทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

งานวิจัยนี้มีการพัฒนาแบบจำลองในการทำนายค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี ซึ่งค่าที่ประมาณได้มีความแตกต่างจากค่าจริง จึงต้องมีการทดสอบความสามารถของแบบจำลองนั้นๆ สำหรับการวัดความแม่นยำมีด้วยกันหลายวิธีดังนี้

- 1) วิธี mean error (ME) เป็นการวัดความคลาดเคลื่อนของค่าที่ทำนายกับค่าที่วัดได้จริง ซึ่งถ้าค่าที่ได้มีค่าน้อย แสดงว่ามีความคลาดเคลื่อนน้อย สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.23

$$ME = \frac{\sum_{n=1}^N Y^s - Y^a}{N} \quad (2.23)$$

โดยที่	Y^s	คือ ค่าที่ประมาณจากแบบจำลอง
	Y^a	คือ ค่าที่แท้จริง
	N	คือ จำนวนตัวอย่าง

2) วิธี mean square error (MSE) เป็นการวัดความคลาดเคลื่อนของค่าที่ทำนายกับค่าที่วัดได้จริงกำลังสองเฉลี่ย ซึ่งถ้าค่าที่ได้มีค่าน้อย แสดงว่าการทำนายมีความแม่นยำ สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.24

$$MSE = \frac{\sum_{n=1}^N (Y^s - Y^a)^2}{N} \quad (2.24)$$

โดยที่	Y^s	คือ ค่าที่ประมาณจากแบบจำลอง
	Y^a	คือ ค่าที่แท้จริง
	N	คือ จำนวนตัวอย่าง

3) วิธี root mean square error (RMSE) เป็นการวัดค่าความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าที่ประมาณได้จากแบบจำลอง ซึ่งถ้ามีค่าน้อยแสดงว่าแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.25

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (Y^s - Y^a)^2}{N}} \quad (2.25)$$

โดยที่	Y^s	คือ ค่าที่ประมาณจากแบบจำลอง
	Y^a	คือ ค่าที่แท้จริง
	N	คือ จำนวนตัวอย่าง

4) วิธี mean absolute percent error (MAPE) เป็นค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน ถ้าวิธีใดให้ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนน้อย แสดงว่าการพยากรณ์ยิ่งมีความแม่นยำ ซึ่งคำนวณได้จากสมการ 2.26

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n \left| \frac{T_t - Y_t}{T_t} \right| \times 100 \quad (2.26)$$

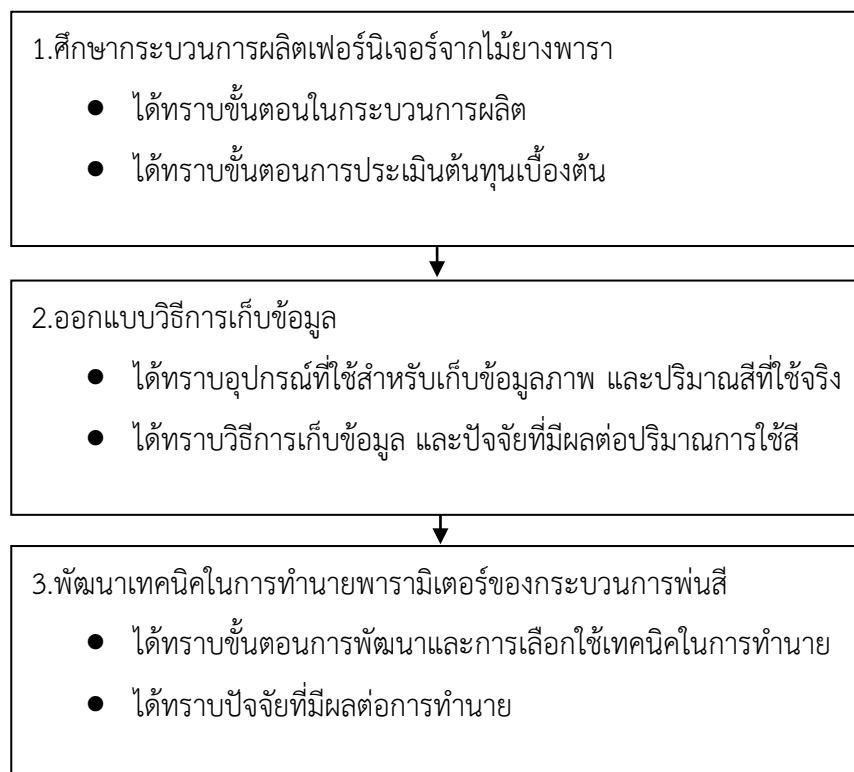
โดยที่	T_t	คือ ค่าจริงของผลลัพธ์ที่ต้องการในช่วงเวลา
	Y_t	คือ ค่าที่พยากรณ์ในช่วงเวลา t
	N	คือ จำนวนช่วงเวลาของข้อมูลที่พยากรณ์

ในงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยมาใช้ในวิเคราะห์หาปัจจัยหรือตัวแปรอิสระ คือคุณลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลภาพ เพื่อสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้ทำนายตัวแปรตามที่เกิดขึ้น คือค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี โดยที่รายละเอียดของการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยแสดงได้ในบทถัดไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการประเมินต้นทุนสีของกระบวนการผลิตเฟอร์นิเจอร์จากไม้ยางพารา โดยรูปแบบการวิจัยเป็นการคำนวณค่าคุณลักษณะที่สำคัญของชิ้นงานซึ่งเป็นชิ้นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์จากภาพถ่าย ข้อมูลที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี ปริมาณการใช้สีและต้นทุนสีต่อชิ้นงานสามารถคำนวณได้จากสมการคณิตศาสตร์ซึ่งแปรผันกับพารามิเตอร์นั้น โดยวิธีดำเนินงานวิจัยและผลที่ได้แต่ละขั้นตอนสามารถสรุปได้ดังแผนผังในรูปที่ 3.1

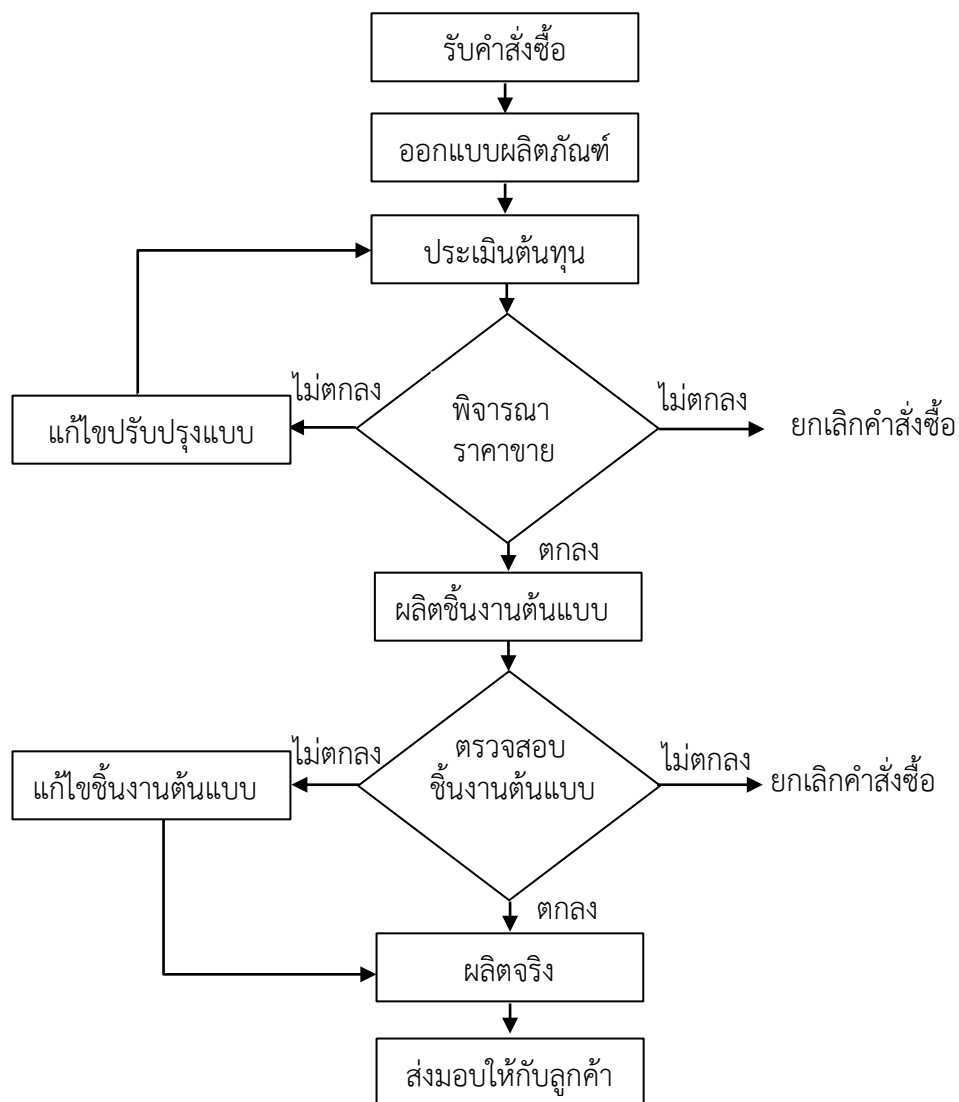


รูปที่ 3.1 วิธีดำเนินงานวิจัยและผลที่ได้แต่ละขั้นตอน

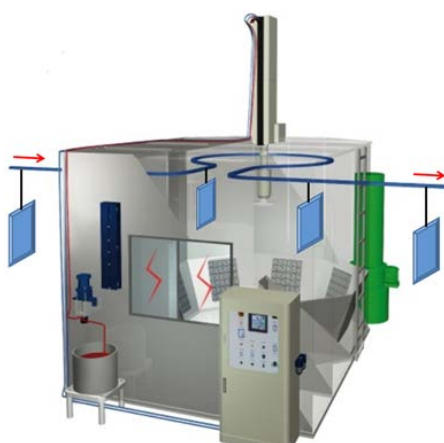
3.1 ศึกษากระบวนการพ่นสีเฟอร์นิเจอร์ไม้ยางพารา

กระบวนการผลิตเฟอร์นิเจอร์จากไม้ยางพาราของโรงงานกรณีศึกษาเริ่มจากโรงงานรับคำสั่งซื้อจากลูกค้า โดยทั่วไปคำสั่งซื้อจะเป็นภาพของชิ้นงานตัวอย่าง เมื่อได้รับคำสั่งซื้อฝ่ายออกแบบจะทำการออกแบบชิ้นงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินต้นทุนของผลิตภัณฑ์เบื้องต้น และกำหนดราคาขายให้กับลูกค้าได้รับทราบ โดยที่ลูกค้าสามารถปรับเปลี่ยนแบบของผลิตภัณฑ์เพื่อให้ได้ราคาของผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม เมื่อลูกค้ายืนยันคำสั่งซื้อสินค้าเบื้องต้น ผู้ผลิตจะทำการผลิตชิ้นงานต้นแบบ โดยที่ชิ้นงานต้นแบบนี้จะเป็นตัวอย่างสำหรับลูกค้าและผู้ผลิตเพื่อใช้กำหนดเป็นแบบของชิ้นงานร่วมกัน เมื่อชิ้นงานผ่านการตรวจสอบและมีการยืนยันคำสั่งซื้อจริงจากลูกค้า จากนั้นผู้ผลิตจะทำการผลิตจริงตามจำนวนคำสั่งซื้อ โดยที่ขั้นตอนของการผลิตจริงที่สำคัญได้แก่ การเตรียมชิ้นส่วนไม้ยางพารา การพ่นสี ตกแต่ง การประกอบ การบรรจุภัณฑ์ และขั้นตอนสุดท้ายคือการส่งมอบให้กับลูกค้า สามารถแสดงกระบวนการผลิตเฟอร์นิเจอร์จากไม้ยางพาราด้วยแผนภาพกระบวนการ (flowchart) ได้ดังรูปที่ 3.2

สำหรับงานวิจัยนี้กระบวนการผลิตที่ผู้วิจัยให้ความสนใจศึกษาคือกระบวนการพ่นสี ซึ่งมีรายละเอียดของกระบวนการพ่นสีดังนี้ เมื่อมีการเปลี่ยนแผนการผลิตในกระบวนการพ่นสีที่มีลักษณะและรูปร่างของชิ้นงานแตกต่างกันออกไป พนักงานหรือช่างเทคนิคที่มีหน้าที่รับผิดชอบในส่วนของการพ่นสีจะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องพ่นสีอัตโนมัติ โดยอาศัยประสบการณ์และความเชี่ยวชาญในการปรับตั้งค่าเพื่อให้สีที่เกาะที่ผิวของชิ้นงานมีความเหมาะสมสวยงามตามเกณฑ์มาตรฐานของโรงงานและของลูกค้า โดยที่ชิ้นงานจะถูกแขวนด้วยตะขอไปตามสายพานการผลิตโดยเว้นระยะห่างระหว่างชิ้นงานที่เหมาะสมเพื่อให้สีสามารถเกาะที่ผิวชิ้นงานได้อย่างทั่วถึง หลังจากนั้นชิ้นงานจะไหลไปตามสายพานการผลิตผ่านเข้าเครื่องพ่นสี ลักษณะภายในห้องพ่นสีประกอบด้วยงานพ่นสีที่มีแกนยึดจากด้านบนของเครื่อง ทำหน้าที่ในการพ่นละอองสีลงบนชิ้นงาน โดยที่งานพ่นสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ในแนวตั้ง ด้วยการปรับตั้งค่าระยะในการเคลื่อนที่และความเร็วได้ รวมถึงสามารถปรับปริมาณของสีมากหรือน้อยในการพ่นลงบนชิ้นงานตามความต้องการ ชิ้นงานจะไหลไปตามสายพานรอบแกนยึดงานพ่นสีในลักษณะครึ่งวงกลม และกระเบื้องที่อยู่เหนือเส้นลวดแขวนชิ้นงานจะกระทบกับแกนที่ยื่นจากสายพานภายในห้องเครื่อง เพื่อให้ชิ้นงานเปลี่ยนมุมไป 90 องศา จนครบ 360 องศา กับแกนของงานพ่นสีเพื่อให้ละอองสีสามารถเกาะลงบนผิวของชิ้นงานได้ทั่วบริเวณของชิ้นงาน สามารถแสดงกระบวนการพ่นสีชิ้นส่วนเฟอร์นิเจอร์ได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 กระบวนการผลิตเฟอร์ริเจอร์จากไม้ยางพารา



รูปที่ 3.3 กระบวนการพ่นสีของโรงงานกรณีศึกษา

3.1.1 พารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี

พารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีคือ ค่าพารามิเตอร์ที่จะมีการปรับตั้งใหม่ทุกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนแผนการผลิตในกระบวนการพ่นสีที่มีลักษณะและรูปร่างของชิ้นงานแตกต่างกันออกไป การปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 มอนิเตอร์สำหรับปรับตั้งค่าพารามิเตอร์

จากรูปที่ 3.4 เป็นตารางการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆของกระบวนการพ่นสี ประกอบด้วย

ระยะการเคลื่อนที่หัวพ่น P_p (mm) คือ ตารางสำหรับการตั้งช่วงระยะการเคลื่อนที่ของหัวพ่นสีเทียบกับระยะบนสุดจนถึงล่างสุดที่หัวพ่นสามารถเคลื่อนที่ได้ สามารถกำหนดแบ่งออกได้เป็น 5 ช่วงของระยะการเคลื่อนที่ตามความเหมาะสมเพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะรูปร่างของชิ้นงานชิ้นนั้นๆ เช่น

ต้องการพ่นสีบนชิ้นงานที่ต้องการเน้นการเกาะของสีลงบนพื้นผิวของชิ้นงานแต่ละช่วงที่แตกต่างกัน สามารถกำหนดแบ่งระยะการเคลื่อนที่ของหัวพ่นตามระยะของชิ้นงานที่จะต้องเน้นการพ่นสีที่แตกต่างกัน

ความเร็วการเคลื่อนที่ของหัวพ่น V_p (mm/s) คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวพ่นในแนวตั้งในแต่ละช่วงของระยะการเคลื่อนที่ที่ได้ปรับตั้งไว้ การปรับตั้งค่าความเร็วของแต่ละช่วงจะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของชิ้นงาน หรือความยากง่ายของการพ่นสีในระยะนั้นๆของชิ้นงานมากน้อยขนาดไหน เช่น ในระยะของชิ้นงานที่มีความซับซ้อน จะปรับให้ความเร็วของการเคลื่อนที่ของหัวพ่นช้ากว่าในช่วงระยะอื่น เพื่อให้สีสามารถเกาะลงบนชิ้นงานได้อย่างทั่วถึง

ระดับปริมาณสีที่พ่น (L_p, N_p, H_p) คือ ระดับของปริมาณสีที่ออกจากหัวพ่นประกอบด้วย 3 ระดับคือ น้อย (L_p), ปกติ (N_p), สูง (H_p) โดยปกติทางโรงงานจะปรับตั้งค่าอยู่ที่ N_p ช่วงการทำงาน (ON, OFF) คือ เป็นการกำหนดการทำงานของหัวพ่นในแต่ละช่วงระยะการเคลื่อนที่ของหัวพ่นสีที่ได้กำหนดไว้ ON หมายถึงหัวพ่นสีทำงาน และ OFF หมายถึงหัวพ่นสีหยุดพ่น ในแต่ละช่วงของระยะการเคลื่อนที่ของหัวพ่นที่ได้กำหนดไว้

ความเร็วสายพานการผลิต (conveyor speed) คือ ความเร็วของสายพานในการลำเลียงชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการพ่นสี การปรับความเร็วสายพานอาศัยหลักการปรับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าขาเข้ามอเตอร์ที่ใช้ขับสายพานผ่านทางอินเวอร์เตอร์ (inverter) ของเครื่องพ่นสี ดังนั้นในงานวิจัยนี้ความเร็วสายพานการผลิตที่เหมาะสมสำหรับลำเลียงชิ้นงานถูกกำหนดโดยการปรับค่าความถี่อินเวอร์เตอร์ (เฮิร์ตซ์) และในการปรับระดับของความถี่อินเวอร์เตอร์จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ของการพ่นสี เช่น รูปร่างลักษณะของชิ้นงานที่เปลี่ยนไป

อัตราการปั๊มสี (pump rate) คือ ความเร็วรอบของปั๊มที่ควบคุมปริมาณการไหลของสีในหนึ่งหน่วยเวลา (รอบต่อนาที) การปรับความเร็วรอบของปั๊มอาศัยหลักการปรับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของมอเตอร์ โดยพบว่าความเร็วรอบนี้จะแปรผันโดยตรงกับอัตราการไหลของสี การปรับระดับของความเร็วรอบของปั๊มเพื่อควบคุมปริมาณสีสำหรับพ่นบนชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ของการพ่นสี เช่น รูปร่างลักษณะของชิ้นงานที่เปลี่ยนไป

จากการศึกษากระบวนการพ่นสีของโรงงานกรณีศึกษาพบว่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีที่มีการปรับตั้งใหม่ทุกครั้งเมื่อลักษณะของชิ้นงานเปลี่ยนไปและมีผลต่อปริมาณสีที่ใช้ต่อชิ้นงานนั้นๆ โดยตรงคือ ความเร็วสายพานการผลิต และอัตราการปั๊มสี ซึ่งสามารถนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาคำนวณหาปริมาณสีที่ใช้ต่อชิ้น โดยที่แสดงรายละเอียดวิธีการคำนวณดังหัวข้อต่อไป

3.1.2 การคำนวณปริมาณที่ใช้ต่อชิ้น

ปริมาณที่ใช้คือปริมาณทั้งหมดที่ใช้ในการพ่นชิ้นงานซึ่งประกอบด้วยปริมาณที่เกาะบนผิวชิ้นงานและปริมาณที่สูญเสียในกระบวนการพ่น สามารถแสดงสมการที่ใช้ในการคำนวณวิเคราะห์หาปริมาณที่ใช้ต่อชิ้นจากค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นที่ 3.1 – 3.4 [40-41]

1) ความเร็วสายพานการผลิตจริง (conveyor speed)

$$= \frac{120 \times \text{VFD} \times \text{Diameter}_p \times \text{Pi}}{P_m \times I} \quad (3.1)$$

โดยที่	VFD	คือ ความถี่อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมความเร็วสายพาน
	Diameter _p	คือ ระยะเส้นผ่าศูนย์กลางของเฟืองขับสายพาน
	Pi	คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 3.14
	P _m	คือ จำนวนขั้วของมอเตอร์
	I	คือ อัตราการทรอบของมอเตอร์

2) อัตราปั๊มสี (pump flow rate)

$$Q_2 = \frac{Q_1 N_1}{N_2} \quad (3.2)$$

โดยที่	Q	คือ ปริมาณของการไหลขาออก
	N	คือ ความเร็วรอบของปั๊ม

หมายเหตุ: ตัวห้อย 1,2 คือ คือปั๊มตัวที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

3) อัตราการผลิต (production rate)

$$= \text{ความเร็วสายพานการผลิตจริง} \times \text{อัตราป้อนชิ้นงาน} \quad (3.3)$$

4) ปริมาณการใช้สีต่อชิ้น

$$= \text{อัตราปั๊มสี} / \text{อัตราการผลิต} \quad (3.4)$$

ดังได้กล่าวแล้วว่า กระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญในการผลิตตามความต้องการคือ การประเมินต้นทุน หากผู้ผลิตสามารถประเมินต้นทุนได้อย่างถูกต้องแม่นยำและรวดเร็ว จะส่งผลให้การกำหนดราคาเป็นไปอย่างสมเหตุสมผลและสามารถเพิ่มโอกาสในการแข่งขันทางธุรกิจได้ ด้วยต้นทุนของกระบวนการผลิตเฟอร์นิเจอร์มาจากหลายส่วนด้วยกันเช่น วัสดุดิบ แรงงาน การขนส่ง เป็นต้น ในงานวิจัย

นี้ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตการวิจัยเป็นการประเมินต้นทุนสี โดยปัจจุบันยังต้องอาศัยประสบการณ์ของพนักงานออกแบบในการประเมินจากขนาดพื้นที่ผิวของชิ้นงานดังสูตรการคำนวณในสมการที่ 3.5

$$P = A \times p \times C \quad (3.5)$$

- โดยที่ P คือ ต้นทุนของสี
 A คือ พื้นที่ผิวของชิ้นงาน (ตารางเมตร)
 p คือ อัตราการใช้สีต่อหน่วยพื้นที่ผิว (ลิตรต่อตารางเมตร)
 C คือ ราคาสี (บาทต่อลิตร)

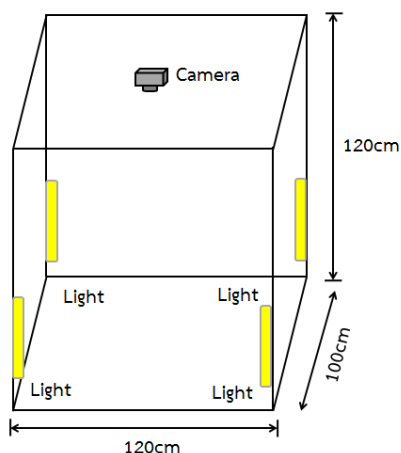
แต่จากการสำรวจพบว่าแท้จริงแล้วปริมาณการใช้สีขึ้นอยู่กับ การปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องพ่นสีที่ต้องปรับตั้งใหม่ทุกครั้งเมื่อลักษณะทางเรขาคณิตของชิ้นงานเปลี่ยนไป และพบว่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตทำให้ปริมาณการใช้สีคลาดเคลื่อนไปจากที่ประมาณการไว้ ส่งผลให้การประเมินต้นทุนมีความไม่แม่นยำ ความสูญเสียของสีที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากประสิทธิภาพของอุปกรณ์ในการพ่นสีและค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสมในช่วงแรกของการทดลองปรับตั้ง ดังนั้นเมื่อผู้ผลิตสามารถทราบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการพ่นสี จะทำให้ทราบปริมาณสีที่ต้องการได้ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงาน ซึ่งจะช่วยให้การประเมินต้นทุนรวมของผลิตภัณฑ์มีความแม่นยำและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น และนอกจากนี้ยังช่วยในการวางแผนกระบวนการผลิตได้ด้วย จากการเข้าไปศึกษากระบวนการพ่นสีของโรงงานที่ทำการวิจัยพบว่า ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการที่ส่งผลต่อปริมาณการใช้สีต่อชิ้นงานที่ผลิตได้ คือ ความเร็วสายพานการผลิต และ อัตราป้อนสี ซึ่งวิธีในการเก็บข้อมูลสามารถแสดงได้ในหัวข้อต่อไป

3.2 อุปกรณ์และวิธีการเก็บข้อมูล

ในงานวิจัยนี้ข้อมูลที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณการใช้สีและต้นทุน คือภาพถ่ายของชิ้นงาน และค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิต ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบอุปกรณ์และกระบวนการสำหรับการเก็บข้อมูลและประมวลผล โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 อุปกรณ์สำหรับเก็บข้อมูลภาพของชิ้นงาน

- 1) กล้องวิดีโอยี่ห้อ Basler รุ่น scA640-70gc ความละเอียด 659 x 490 พิกเซล
- 2) อุปกรณ์ควบคุมสภาพแวดล้อมในการถ่ายภาพ ได้แก่ หลอดไฟเพื่อให้ความสว่างผ่านกระดาษสีขาวสำหรับเป็นพื้นหลังในการถ่ายภาพ และแผ่นกระดาษสำหรับควบคุมแสงในกรณีที่ปริมาณแสงจากภายนอกมากเกินไปแสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ควบคุมสภาพแวดล้อมสำหรับถ่ายภาพ

3) ชิ้นงานเปรียบเทียบขนาด คือชิ้นงานที่ทราบขนาดจริงซึ่งจะถูกบันทึกภาพพร้อมกับชิ้นงานที่ต้องการศึกษา เพื่อใช้สำหรับเปรียบเทียบหาขนาดที่แท้จริงของชิ้นงาน

3.2.2 อุปกรณ์สำหรับเก็บข้อมูลปริมาณการใช้สีและค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี

1) ตารางสำหรับบันทึกข้อมูล และแสดงตัวอย่างของข้อมูลที่ได้นบันทึกดังตารางที่ 3.1
 2) นาฬิกาจับเวลา สำหรับจับเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดของชิ้นงานในกระบวนการพ่นสี
 3) ไม้บรรทัดที่มีความยาวไม่น้อยกว่า 1 เมตร เพื่อวัดระดับปริมาณสีที่ใช้ในกระบวนการผลิต

4) ถ้วยวัดความหนืดสี (viscosity cup) เพื่อวัดปริมาณความหนืดของสีแต่ละสีที่ใช้ในการพ่นตกแต่งชิ้นงาน

3.2.3 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับพัฒนาเทคนิค

1) โปรแกรมเชื่อมต่อระหว่างกล้องวิดีโอกับเครื่องคอมพิวเตอร์ (โปรแกรม Pylon Camera Software Suite)

2) โปรแกรม MATLAB R2012b โดยใช้เครื่องมือ Image Processing Toolbox สำหรับพัฒนาเทคนิคการประมวลผลภาพ

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้บันทึกจากการเก็บข้อมูลจริง

ผลิตภัณฑ์ (ชิ้นงาน)	ขนาดชิ้นงาน (เซนติเมตร)			สีที่ใช้	ความถี่ อินเวอร์เตอร์ (เฮิรตซ์)	อัตราป้อนสี (รอบ/นาที)	จำนวน ชิ้นงาน (ชิ้น)	เวลาผลิต (นาที)	ปริมาณสี (ลิตร)
	หนา	กว้าง	ยาว						
โมนาสเทเบิล (รางสไลด์ข้าง)	2.8	6.0	71.0	ดำ	26.0	56.0	150	20	23.3
คาร์ทบอดี (แผงในซ้าย)	2.0	33.6	75.0	ดำ	19.8	56.0	50	20	16.5
บริสโตรแซร์ (ขาหน้าซ้าย)	4.0	4.0	43.0	ดำ	28.5	40	300	25	16.5
วีดทอปคาร์ด	2.0	4.0	99.6	โอ๊ค	24.4	50	90	24	18.6

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลตัวอย่างของชิ้นงานจำนวนทั้งหมด 60 ตัวอย่างที่ไม่ซ้ำกันโดยแต่ละตัวอย่างจะเก็บข้อมูล 3 ชิ้น เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลโดยแบ่งเป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนาระบบในการทำนายปริมาณสี 48 ตัวอย่าง และข้อมูลสำหรับทดสอบความถูกต้องของระบบ 12 ตัวอย่าง โดยที่ข้อมูลแต่ละประเภทมีรายละเอียดดังนี้

1) ข้อมูลภาพ (image data)

ข้อมูลภาพคือ ภาพถ่ายของชิ้นงานที่มีการจัดสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพ เพื่อลดสัญญาณรบกวนและง่ายต่อการประมวลผล และภาพถ่ายของชิ้นงานแต่ละตัวอย่างสามารถแสดงลักษณะทางเรขาคณิตของชิ้นงานได้อย่างชัดเจน เพื่อที่จะสามารถประมวลผลหาค่าคุณลักษณะเรขาคณิตที่แท้จริงของชิ้นงานได้จากภาพถ่าย

2) ข้อมูลคุณลักษณะทางเรขาคณิต (geometric data)

คุณลักษณะทางเรขาคณิตของชิ้นงานตัวอย่างเบื้องต้นที่สำคัญได้แก่ ขนาดของความหนา ความกว้าง ความยาว ปริมาตร และพื้นที่ผิว เป็นต้น ซึ่งบันทึกจากแบบผลิตของชิ้นงานเพื่อใช้เปรียบเทียบความถูกต้องกับค่าที่ได้จากการประมวลผลภาพ โดยที่ขอบเขตค่าต่ำสุด-สูงสุดของค่าคุณลักษณะทางเรขาคณิตที่ได้วิเคราะห์จากจำนวนตัวอย่างทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ประเภทและขอบเขตของค่าคุณลักษณะทางเรขาคณิตของชิ้นงาน

คุณลักษณะของชิ้นงาน	ขอบเขตข้อมูล (ต่ำสุด-สูงสุด)
ความหนา (เซนติเมตร)	0.6 - 12.5
ความกว้าง (เซนติเมตร)	3.0 - 45.5
ความยาว (เซนติเมตร)	13.3 - 115.0
ความยาวรอบรูป (เซนติเมตร)	34.0 - 312.0
ปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	126.0 - 58937.5
พื้นที่ผิว (ตารางเซนติเมตร)	186.0 - 13330.0

3) ข้อมูลพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี (painting parameters)

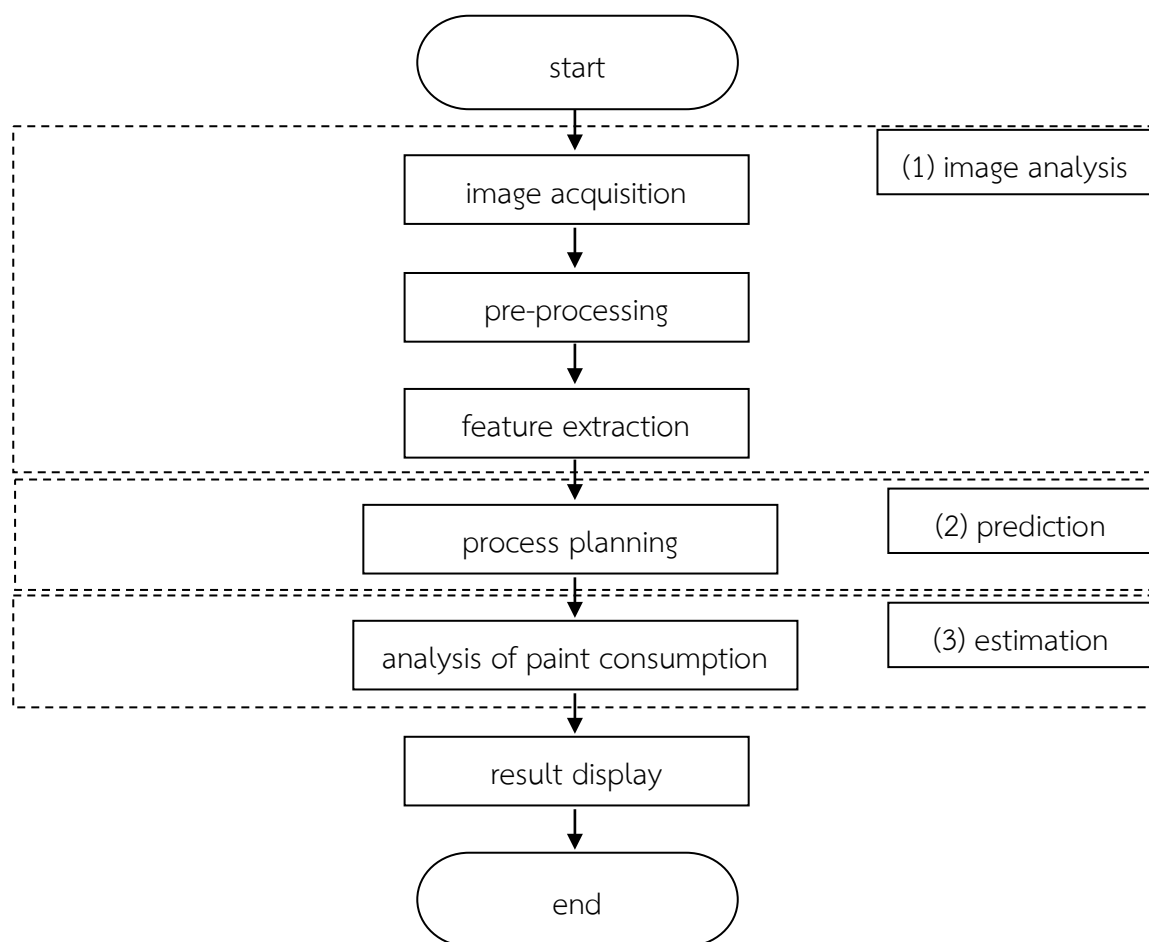
พารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีที่มีผลต่อปริมาณสีที่ใช้ต่อชิ้นงานประกอบด้วย ค่าความถี่อินเวอร์เตอร์ (เฮิร์ตซ์) ในการควบคุมความเร็วสายพาน และอัตราป้อนสีคือ ความเร็วรอบของปั๊ม ที่ควบคุมปริมาณการไหลของสีในหนึ่งหน่วยเวลา (รอบต่อนาที) ในการปรับระดับค่าพารามิเตอร์ทั้งสอง นั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ของการพ่นสี เช่น รูปร่างลักษณะของชิ้นงานที่เปลี่ยนไป ซึ่งต้องอาศัยความเชี่ยวชาญของพนักงานที่มีประสบการณ์ ตารางที่ 3.3 แสดงขอบเขตค่าต่ำสุดและสูงสุดของค่าพารามิเตอร์ กระบวนการพ่นสี

ตารางที่ 3.3 ขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี

ประเภทของค่าพารามิเตอร์	ขอบเขตข้อมูล (ต่ำสุด-สูงสุด)
ความถี่อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วสายพาน (เฮิร์ตซ์)	16.23 - 33.4
อัตราป้อนสี (รอบต่อนาที)	30 - 60

3.3 พัฒนาเทคนิคการทำนายพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี

การพัฒนาเทคนิคการทำนายพารามิเตอร์ ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ ส่วนแรกเป็นการ วิเคราะห์ข้อมูลภาพ เพื่อให้ได้มาซึ่งคุณลักษณะที่สำคัญของชิ้นงานที่มีผลต่อการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ และปริมาณการใช้สี ส่วนที่สองเป็นการทำนายพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีโดยการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ที่มีการปรับตั้งกับคุณลักษณะของชิ้นงาน และส่วนที่สามเป็นการ วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทำนาย และปริมาณสีที่ใช้จากสมการ ความสัมพันธ์ แสดงภาพรวมดังรูปที่ 3.6 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.6 แผนผัง (flowchart) ของการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.3.1 วิเคราะห์ข้อมูลภาพ (image analysis)

การวิเคราะห์ข้อมูลภาพเป็นการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะของชิ้นงานจากภาพเพื่อเป็นข้อมูลเข้าของระบบสำหรับการทำนายพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีประกอบด้วยกัน 3 ขั้นตอน ได้แก่การรับข้อมูลภาพ การประมวลผลภาพเบื้องต้นและการวิเคราะห์คุณลักษณะของภาพดังต่อไปนี้

3.3.1.1 การรับข้อมูลภาพ (image acquisition)

เริ่มจากนำข้อมูลภาพที่ถ่ายภายใต้การควบคุมสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ภาพที่ง่ายต่อการวิเคราะห์และมีสัญญาณรบกวนภายในภาพน้อยที่สุด ขั้นตอนนี้ได้ภาพ RGB แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 3.7(ก)

3.3.1.2 การประมวลผลภาพเบื้องต้น (image preprocessing)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนแรกในการประมวลผลภาพ โดยเริ่มต้นจากการแปลงภาพสี RGB เป็นภาพระดับเทา (grayscale) ดังรูปที่ 3.7(ข) และจะใช้ค่า เทรสโฮลต์อัตโนมัติในการแยกพื้นหลังของภาพออกจากวัตถุ โดยมีเงื่อนไขว่าถ้าความเข้มแสงที่พิกเซลตำแหน่งใด มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าเทรสโฮลต์ ให้ค่าพิกเซลในตำแหน่งนั้นมีค่าเป็น 0 หรือเปลี่ยนเป็นสีดำ และถ้าพิกเซลใดมีค่ามากกว่าค่าเทรสโฮลต์แล้วให้พิกเซลนั้นมีค่าเป็น 255 หรือเปลี่ยนเป็นสีขาว ซึ่งจะกลายเป็นภาพไบนารีที่มีเพียง 2 ค่าสี คือ สีขาวกับสีดำดังรูปที่ 3.8(ก) นอกจากนี้ยังมีการกำจัดสัญญาณรบกวนที่เป็นจุดเล็กๆ และเติมเต็มส่วนที่เป็นช่องว่างภายในภาพให้สมบูรณ์ แสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 3.8(ข)

3.3.1.3 การหาค่าคุณลักษณะ (feature extraction)

เป็นวัตถุประสงค์ของระบบการประมวลผลภาพ เพื่อนำค่าคุณลักษณะที่ได้ไปใช้ในการทำนายพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี โดยที่คุณลักษณะทางเรขาคณิตของชิ้นงานที่คาดว่าจะมีผลในการทำนายพารามิเตอร์เบื้องต้นประกอบด้วย 6 คุณลักษณะ คือ ความยาว ความกว้าง ความหนา ความยาวรอบรูป ปริมาตร และพื้นที่ผิว ซึ่งคุณลักษณะเหล่านี้จะได้ออกมาจากการประมวลผลภาพของภาพชิ้นงาน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- ก) ความยาว (length: L) วัดจากความยาวในแนวตั้งจากบนสุดถึงล่างสุด ดังรูปที่ 3.8 (ข)
- ข) ความกว้าง (width: W) วัดจากความกว้างที่กว้างที่สุดของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.8 (ข)
- ค) ความหนา (thickness: T) วัดจากความหนาสูงสุดตามแนวนอนของชิ้นงาน
- ง) ความยาวรอบรูป (perimeter: P) วัดจากความยาวรอบรูปในด้านที่มีความยาวและความกว้างมากที่สุด แสดงดังรูปที่ 3.9 (ก)
- จ) ปริมาตร (volume: V) ประเมินได้จากผลคูณของความกว้าง ความยาว และความสูง
- ฉ) พื้นที่ผิว (surface area: S) วัดจากพื้นที่ผิวในแต่ละด้านรอบชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.9 (ข)



(ก)

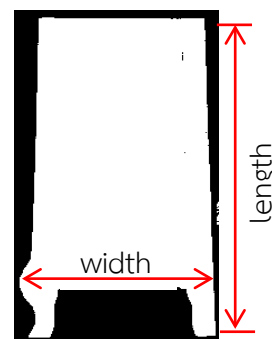


(ข)

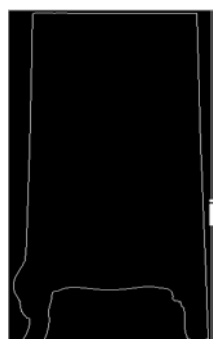
รูปที่ 3.7 (ก) ภาพสี RGB และ (ข) ภาพระดับเทา (grayscale)



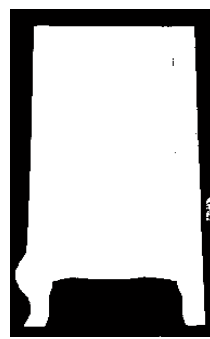
(ก)



(ข)

รูปที่ 3.8 (ก) การแยกวัตถุจากพื้นหลัง (segmentation)
(ข) การหาความยาวและความกว้างของชิ้นงาน

(ก)



(ข)

รูปที่ 3.9 (ก) การหาความยาวรอบรูป และ (ข) การหาพื้นที่ผิวของชิ้นงาน

3.3.1.4 ผลการหาค่าคุณลักษณะ (results of feature extraction)

การประมวลผลภาพจะใช้โปรแกรม MATLAB R2012a ในการวิเคราะห์ภาพถ่ายของชิ้นงานซึ่งถูกถ่ายภาพพร้อมกับวัตถุอ้างอิง โดยที่วัตถุอ้างอิงคือวัตถุที่ทราบขนาดจริงเพื่อใช้วิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนอ้างอิงระหว่างจำนวนพิกเซลต่อขนาดจริงของวัตถุภายในภาพนั้น และนำค่าอัตราส่วนอ้างอิงที่ได้คำนวณหาขนาดจริงของชิ้นงานต่อไป โดยที่ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะชิ้นงานแสดงได้ดังนี้

1) ความยาว (length)

ความยาวชิ้นงานเป็นความยาวในแนวดิ่งของชิ้นงานจากบนสุดถึงล่างสุด สามารถใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์โดยมีขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรกใช้เครื่องมือที่ชื่อ regionprops ใน Image Processing Toolbox ของโปรแกรมในการหาจำนวนพิกเซลที่อยู่ติดกันในแนวดิ่งตามแนวความยาวของชิ้นงานจากบนสุดถึงล่างสุด แสดงได้ดังรูปที่ 3.10 ขั้นตอนที่สองนำวัตถุอ้างอิงในภาพหาจำนวนพิกเซลที่อยู่ติดกันในแนวความยาวของวัตถุอ้างอิง และวัดขนาดความยาวจริงเพื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนอ้างอิงระหว่างจำนวนพิกเซลต่อระยะความยาวจากวัตถุอ้างอิงนั้น ขั้นตอนที่สามนำค่าอัตราส่วนที่ได้คำนวณหาระยะความยาวจริงของชิ้นงานโดยที่แสดงวิธีการคำนวณได้ดังนี้

ค่าคุณลักษณะชิ้นงานอ้างอิง

จำนวนพิกเซลในแนวความยาว = 71 พิกเซล

ขนาดความยาวจริง = 8.5 ซม.

$$\text{อัตราส่วนจำนวนพิกเซลต่อความยาว} = \frac{71}{8.5} = 8.33 \text{ พิกเซล/ซม.}$$

ค่าคุณลักษณะของชิ้นงานตัวอย่าง

จำนวนพิกเซลในแนวความยาว = 744 พิกเซล

$$\begin{aligned} \text{ความยาวชิ้นงาน} &= \frac{\text{จำนวนพิกเซลในแนวความยาว (พิกเซล)}}{\text{อัตราส่วนจำนวนพิกเซลต่อความยาว (พิกเซล/ซม)}} \\ &= \frac{744}{8.33} = 89.07 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

ดังนั้นความยาวของชิ้นงานที่ได้จากการประมวลผลภาพมีค่าเท่ากับ 89.07 เซนติเมตร

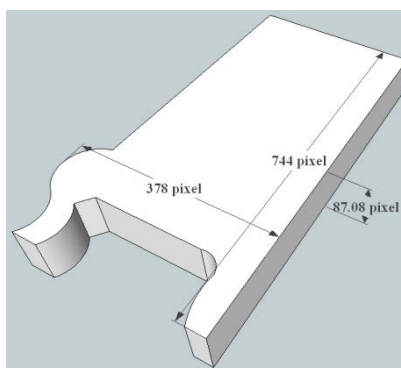
2) ความกว้าง (width)

ความกว้างของชิ้นงานสามารถใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์โดยมีขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรกใช้เครื่องมือที่ชื่อ regionprops ใน Image Processing Toolbox ของโปรแกรมในการหา

จำนวนพิกเซลที่อยู่ติดกันในแนวความกว้างของชิ้นงานช่วงที่กว้างที่สุด แสดงได้ดังรูปที่ 3.10 ขั้นตอนที่สองนำวัตถุอ้างอิงในภาพหาจำนวนพิกเซลที่อยู่ติดกันในแนวความกว้างของวัตถุอ้างอิง และวัดขนาดความยาวจริงของวัตถุเพื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนอ้างอิงระหว่างจำนวนพิกเซลต่อระยะความยาวจริงจากวัตถุอ้างอิงนั้น ขั้นตอนที่สามารถนำค่าอัตราส่วนที่ได้มาคำนวณหาระยะความกว้างจริงของชิ้นงาน โดยที่วิธีการคำนวณเหมือนกับวิธีที่ได้แสดงไว้ในกราฟหาความยาวจริงของชิ้นงาน

3) ความหนา (thickness)

ความหนาของชิ้นงานสามารถใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์โดยมีขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรกใช้เครื่องมือที่ชื่อ regionprops ใน Image Processing Toolbox ของโปรแกรมในการหาจำนวนพิกเซลที่อยู่ติดกันในแนวความหนาของชิ้นงานช่วงที่หนาที่สุด แสดงได้ดังรูปที่ 3.10 ขั้นตอนที่สองนำวัตถุอ้างอิงในภาพหาจำนวนพิกเซลที่อยู่ติดกันในแนวความหนาของวัตถุอ้างอิง และวัดขนาดความยาวจริงเพื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนอ้างอิงระหว่างจำนวนพิกเซลต่อระยะความยาวจริงของภาพ ขั้นตอนที่สามารถนำค่าอัตราส่วนที่ได้มาคำนวณหาระยะความหนาจริงของชิ้นงาน โดยที่วิธีการคำนวณเหมือนกับวิธีที่ได้แสดงไว้ในกราฟหาความยาวจริงของชิ้นงาน

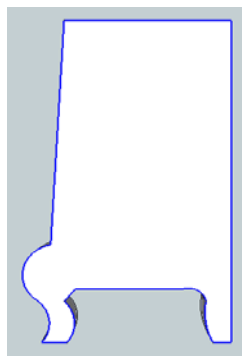


รูปที่ 3.10 แสดงจำนวนพิกเซลที่อยู่ติดกันในแนวความยาว ความกว้าง และความหนาของชิ้นงาน

4) ความยาวรอบรูป (perimeter)

ความยาวรอบรูปของชิ้นงานสามารถใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์โดยมีขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรกใช้เครื่องมือที่ชื่อ regionprops ใน Image Processing Toolbox ของโปรแกรมในการหาจำนวนพิกเซลที่อยู่ติดกันในแนวเส้นขอบรอบรูปชิ้นงานในด้านที่มีความยาวรอบรูปชิ้นงานมากที่สุด แสดงได้ดังรูปที่ 3.11 ขั้นตอนที่สองนำวัตถุอ้างอิงในภาพหาจำนวนพิกเซลที่อยู่ติดกันในแนวความ

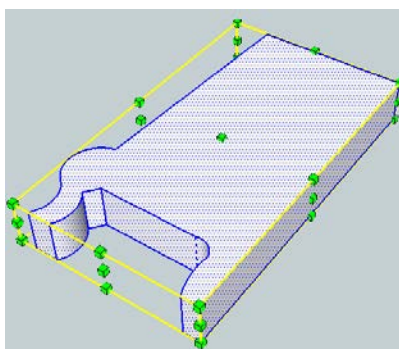
ยารอบรูปของวัตถุอ้างอิง และวัดขนาดความยาวจริงเพื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนอ้างอิงระหว่างจำนวนพิกเซลต่อระยะความยาวจริงของภาพ ขั้นตอนที่สามารถนำค่าอัตราส่วนที่ได้มาคำนวณหาระยะความยาวรอบรูปจริงของชิ้นงาน โดยที่วิธีการคำนวณเหมือนกับวิธีที่ได้แสดงไว้ใน การหาความยาวจริงของชิ้นงาน



รูปที่ 3.11 แสดงจำนวนพิกเซลที่อยู่ติดกัน
ในแนวความยาวรอบรูปของชิ้นงาน

5) ปริมาตร (volume)

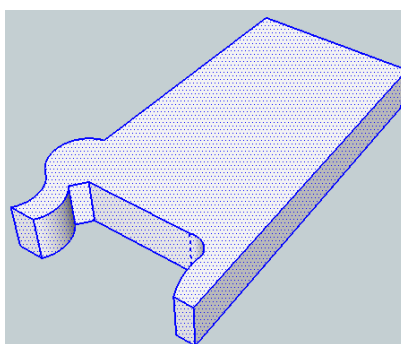
ปริมาตรชิ้นงานคือปริมาตรของเนื้อไม้ที่มีขนาดเท่ากับชิ้นงาน ขั้นตอนแรกสามารถใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์โดยมีขั้นตอนดังนี้ ใช้เครื่องมือที่ชื่อ regionprops ใน Image Processing Toolbox ในการหาจำนวนพิกเซลที่อยู่ติดกันในแนวของ ความยาว ความกว้าง และความหนาของชิ้นงาน แสดงได้ดังรูปที่ 3.12 และคำนวณหาขนาดจริงของชิ้นงานจากอัตราส่วนอ้างอิง โดยที่วิธีการคำนวณเหมือนกับวิธีที่ได้แสดงไว้ใน การหาความยาวจริงของชิ้นงาน



รูปที่ 3.12 แสดงจำนวนพิกเซลทั้งหมดของปริมาตรชิ้นงาน

6) พื้นที่ผิว (surface area)

การคำนวณหาพื้นที่ผิวทั้งหมดของชิ้นงานสามารถใช้โปรแกรม MATLAB โดยมีขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรกใช้เครื่องมือที่ชื่อ regionprops ใน Image Processing Toolbox ของโปรแกรมในการหาจำนวนพิกเซลที่อยู่ติดกันในพื้นที่ผิวของชิ้นงาน แสดงได้ดังรูปที่ 3.13 ขั้นตอนที่สองนำวัตถุอ้างอิงในภาพหาจำนวนพิกเซลที่อยู่ติดกันในพื้นที่ผิว และคำนวณหาพื้นที่จริงของวัตถุอ้างอิงเพื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนอ้างอิงระหว่างจำนวนพิกเซลต่อพื้นที่จริงของภาพ ขั้นตอนที่สามนำค่าอัตราส่วนที่ได้มาคำนวณหาพื้นที่ผิวจริงของชิ้นงาน แสดงวิธีการคำนวณได้ดังนี้



รูปที่ 3.13 แสดงจำนวนพิกเซลของพื้นที่ผิวชิ้นงาน

ค่าคุณลักษณะชิ้นงานอ้างอิง

$$\text{จำนวนพิกเซลบนพื้นที่ผิว} = 45 \times 71 = 3,195 \text{ พิกเซล}$$

$$\text{พื้นที่ผิวจริง} = 5.3 \times 8.5 = 45.05 \text{ ตร.ซม.}$$

$$\text{อัตราส่วนจำนวนพิกเซลต่อพื้นที่ผิวจริง} = \frac{3195}{45.05} = 70.92 \text{ พิกเซล/ตร.ซม.}$$

ค่าคุณลักษณะของชิ้นงานตัวอย่าง

$$\text{จำนวนพิกเซลบนพื้นที่ผิว} = 378 \times 748 = 282,744 \text{ พิกเซล}$$

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่ผิวจริง} &= \frac{\text{จำนวนพิกเซลบนพื้นที่ (พิกเซล)}}{\text{อัตราส่วนจำนวนพิกเซลต่อพื้นที่ผิว (พิกเซล/ตร.ซม.)}} \\ &= \frac{282,744}{70.92} \\ &= 3.96 \times 10^3 = 407.88 \text{ ตร.ซม.} \end{aligned}$$

ดังนั้นพื้นที่ผิวของชิ้นงานที่ได้จากการประมวลผลภาพมีค่าเท่ากับ 407.88 ตารางเซนติเมตร

จากขั้นตอนการประมวลผลภาพดังกล่าวข้างต้นทำให้ทราบคุณลักษณะของชิ้นงานที่สำคัญ ทั้ง 6 คุณลักษณะ จำนวน 48 ตัวอย่าง ซึ่งจะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลสำหรับวิเคราะห์และพัฒนาระบบในการทำนายการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี ที่ประกอบด้วย ความถี่อินเวอร์เตอร์ ควบคุมความเร็วสายพาน และอัตราป่นสี โดยที่ตัวอย่างของข้อมูลที่ได้แสดงดังตารางที่ 3.4 (รายละเอียดทั้ง 48 ตัวอย่างแสดงในตาราง ก-1 ภาคผนวก ก)

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างข้อมูลค่าพารามิเตอร์ และคุณลักษณะของภาพจำนวน 48 ตัวอย่าง

ตัวอย่างที่	หนา (ซม.)	กว้าง (ซม.)	ยาว (ซม.)	ความยาวรอบรูป (ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	พื้นที่ผิว (ตร.ซม.)	ความถี่อินเวอร์เตอร์ (เฮิรตซ์)	อัตราป่นสี (รอบ/นาที)
1	0.6	29.4	78.3	215.4	1381.212	4733.28	25.82	60
2	1.2	14.7	51.0	131.4	899.64	1657.08	25.00	40
3	1.5	7.2	26.4	67.2	285.12	480.96	26.43	45
4	1.5	21.4	26.4	95.6	847.44	1273.32	25.68	45
5	1.5	10.0	30.0	80	450	720	28.85	39
6	1.5	9.0	32.5	83	438.75	709.5	23.60	40
7	1.5	8.0	43.8	103.6	525.6	856.2	31.32	39
8	1.5	6.8	59.0	131.6	601.8	999.8	22.80	55
9	1.6	33.0	49.2	164.4	2597.76	3510.24	26.32	55
10	1.7	7.5	40.0	95	510	761.5	24.40	45
.
.
.
47	11.5	40.5	99.8	280.6	46481.85	11310.7	20.00	60
48	12.5	41.0	115.0	312	58937.5	13330	16.23	60

3.3.2 การทำนายพารามิเตอร์กระบวนการพ่นสี (painting parameter prediction)

ในขั้นตอนนี้จะนำคุณลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากข้อมูลภาพมาทำการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการปรับค่าพารามิเตอร์ และนำปัจจัยเหล่านั้นมาพัฒนาระบบในการทำนายค่าพารามิเตอร์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.3.2.1 การวิเคราะห์ทางสถิติด้วยสมการถดถอย (regression analysis)

การวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยเป็นการวิเคราะห์หาปัจจัยหรือตัวแปรอิสระที่มีผลต่อตัวแปรตาม ผลที่ได้คือสมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้ทำนายตัวแปรตามที่เกิดขึ้นได้เมื่อตัวแปรอิสระเปลี่ยนแปลงไป สำหรับงานวิจัยนี้ตัวแปรอิสระคือคุณลักษณะที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลภาพ และตัวแปรตามคือค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี จากขั้นตอนการวิเคราะห์หาคุณลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากการประมวลผลภาพมีทั้งหมด 6 คุณลักษณะที่คาดว่าจะมีผลต่อการปรับค่าพารามิเตอร์ ประกอบด้วย ความหนา ความกว้าง ความยาว ความยาวรอบรูป ปริมาตร และพื้นที่ผิว ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกตัวแปรอิสระที่มีความเหมาะสมโดยวิธีเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (stepwise regression) ซึ่งเป็นวิธีทดสอบความเหมาะสมตัวแปรอิสระที่นำเข้าสู่สมการทีละตัวโดยเลือกจากตัวแปรที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงที่สุด ขั้นตอนต่อไปจะมีการนำตัวแปรอิสระใหม่เข้าในสมการและจะทำการทดสอบผลกระทบท่อตัวแปรบางตัวที่อยู่ในสมการก่อนหน้า โดยที่ตัวแปรที่อยู่ก่อนหน้าสามารถถูกกำจัดออกจากสมการได้ หากพบว่าไม่มีความสำคัญทางสถิติในการพยากรณ์ ซึ่งสมการในการทำนายที่ได้จะเป็นรูปแบบย่อที่ประกอบด้วยตัวแปรอิสระที่มีความเหมาะสมที่สุด สามารถแสดงผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระได้ในภาคผนวก ค และผลการวิเคราะห์การเลือกตัวแปรอิสระและการใช้สมการถดถอยในการทำนายค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีแสดงวิธีวิเคราะห์ที่ได้ดังนี้

1) การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับทำนายความถี่อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วสายพาน

ขั้นตอนเริ่มต้นของการวิเคราะห์สมการถดถอยในการทำนายความเร็วสายพานการผลิตเริ่มจากการเลือกตัวแปรอิสระที่เหมาะสมสำหรับสมการถดถอยเชิงเส้นด้วยเทคนิควิธีการเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (stepwise) โดยการกำหนดค่าระดับนัยสำคัญในการเลือกตัวแปรเข้าและออกเท่ากับ 0.05 ($\alpha = 0.05$) โดยที่ผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ผลการเลือกตัวแปรอิสระในการทำนายความเร็วสายพานด้วยเทคนิค stepwise

ขั้นตอนการวิเคราะห์ stepwise			ผลการวิเคราะห์ด้วย stepwise						
ตัวแปรอิสระ	ขั้นตอนที่	สิ้นสุด	constant	coefficient	T-value	P-value	s	R ²	R ² (adj)
height	1								
width									
surface area	surface area	surface area	27.31	-0.00082	-6.15	0.000	3.16	45.11	43.92
perimeter									
volume									
length									

ตารางที่ 3.5 แสดงผลการวิเคราะห์การเลือกตัวแปรอิสระสำหรับการทำนายค่าความถี่อินเวอร์เตอร์ ผลการวิเคราะห์ของโปรแกรมเริ่มต้นในขั้นตอนที่ 1 ด้วยการเลือกตัวแปรอิสระที่ให้ค่า p-value ที่ต่ำที่สุดพบว่า คือพื้นที่ผิวของชิ้นงาน (surface area) ให้ค่า p-value ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.000 และขั้นตอนต่อไปจะทำการเพิ่มตัวแปรที่ให้ค่า p-value น้อยที่สุด และทำการลดตัวแปรก่อนหน้าที่ให้ค่า p-value มากที่สุดตามลำดับ ตารางที่ 3.5 โปรแกรมแสดงผลเพียงขั้นตอนที่ 1 เพราะไม่สามารถเพิ่มหรือลดตัวแปรอิสระตัวอื่นจากตัวแบบได้อีก ดังนั้นตัวแปรอิสระที่เหมาะสมสำหรับสมการถดถอยเชิงเส้นคือ พื้นที่ผิวของชิ้นงาน (surface area) เพียงตัวแปรเดียว เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแบบนี้โดยกำหนดให้ค่า p-value ถูกคำนวณที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ 3.6 และแสดงการทดสอบสมมติฐานความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม และกราฟการถดถอยของข้อมูลได้ในภาคผนวก ค

ตารางที่ 3.6 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยของความเร็วสายพานการผลิต

model	variable	coefficient	p-value	R ²
stepwise regression	constant	27.3084	0.000	45.10%
	s	-0.00082	0.000	
polynomial regression	constant	28.0302	0.000	47.1%
	s	-1.39×10^{-3}	0.004	
	s ²	0.5×10^{-8}	0.205	

จากตารางที่ 3.7 โปรแกรมแสดงผลลัพธ์เพียงขั้นตอนที่ 1 เพราะไม่สามารถเพิ่มหรือลดตัวแปรอิสระตัวอื่นจากตัวแบบได้อีก ดังนั้นตัวแปรอิสระที่เหมาะสมสำหรับสมการถดถอยคือ พื้นที่ผิวของชิ้นงาน (surface area) เพียงตัวแปรเดียว เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแบบนี้โดยกำหนดให้ค่า p-value ถูกคำนวณที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ 3.8 และแสดงการทดสอบสมมติฐานความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม และกราฟการถดถอยของข้อมูลได้ในภาคผนวก ค

ตารางที่ 3.8 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยของอัตราปัมสี

model	variable	coefficient	p-value	R ²
stepwise regression	constant	44.51	0.000	32.8%
	s	1.27×10^{-3}	0.000	
polynomial regression	constant	43.845	0.000	33.3%
	s	1.80×10^{-3}	0.046	
	s ²	-5.0×10^{-8}	0.566	

จากตารางที่ 3.8 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นและสมการถดถอยแบบพหุนาม พบว่าตัวแปรอิสระคือพื้นที่ผิวชิ้นงานมีความสัมพันธ์กับอัตราปัมสี เพราะค่า p-value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด ($\alpha = 0.05$) จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก โดยที่สมการถดถอยเชิงเส้นและสมการถดถอยแบบพหุนามมีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ที่ 32.8% และ 33.30%

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติเบื้องต้นโดยใช้สมการถดถอยในการทำนายพารามิเตอร์กระบวนการพ่นสีคือ ความเร็วสายพานการผลิต และอัตราปัมสีพบว่าค่า R² ของสมการถดถอยมีค่าน้อยกว่า 50% หมายความว่าตัวแปรอิสระมีผลต่อการทำนายค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีที่ต่ำ ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากปัจจัยอื่นเพิ่มเติมที่ไม่สามารถอธิบายได้หรือความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีอยู่ในรูปแบบที่ซับซ้อน ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำเทคนิคทางด้านปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligence : AI) ซึ่งหมายถึงการสร้างเครื่องจักรให้สามารถทำงานได้เหมือนมนุษย์ ที่เป็นการสร้างการเรียนรู้ให้กับคอมพิวเตอร์ เพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถจำลองการทำงานต่างๆ เลียนแบบพฤติกรรมของคนโดยเน้นแนวคิดตามแบบสมองมนุษย์ ที่มีการวางแผนการเรียนรู้ การให้เหตุผล การตัดสินใจ การแก้ปัญหา ตลอดจนการเลือกแนวทางในการดำเนินการในลักษณะคล้ายมนุษย์มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะทางเรขาคณิตของชิ้นงานที่ได้จากการประมวลผลภาพกับค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีได้แก่ ความเร็วสายพานการผลิต และอัตรา

ปี่มสี่ เพื่อให้มีความถูกต้องและใกล้เคียงกับการปรับค่าพารามิเตอร์โดยผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งการประยุกต์ใช้เทคนิคนี้จะได้กล่าวในบทต่อไป

บทที่ 4

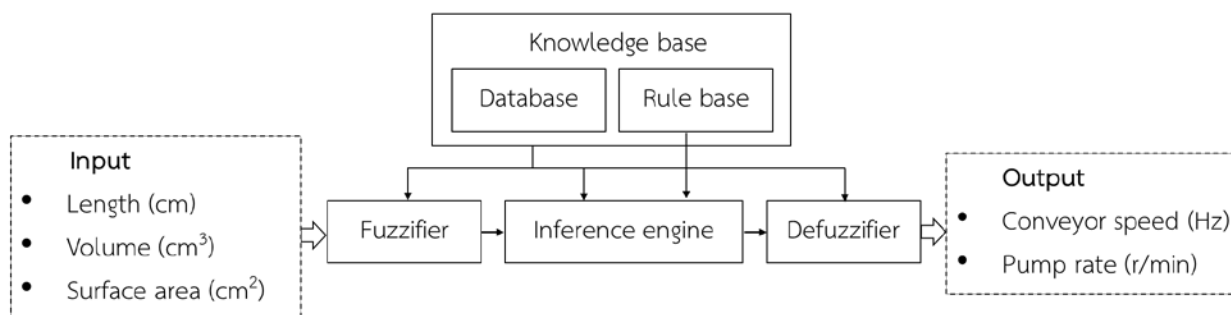
การพัฒนาระบบในการทำนายพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีและปริมาณสี

จากผลการดำเนินงานวิจัยในบทที่ 3 ทำให้ทราบว่าคุณลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากการประมวลผลภาพ เพื่อทำนายพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีที่ประกอบด้วยความเร็วสายพานการผลิตและอัตราป่นสี ซึ่งจะมีการปรับตั้งใหม่ทุกครั้งโดยพนักงานประจำเครื่องที่มีประสบการณ์เมื่อลักษณะของชิ้นงานเปลี่ยนไป ความเหมาะสมในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์จะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของชิ้นงาน เช่น ขนาดความยาว ความซับซ้อน เป็นต้น โดยพนักงานประจำเครื่องจะพิจารณาปริมาณการยึดเกาะและความสม่ำเสมอของเม็ดสีบนผิวชิ้นงานโดยทำการประเมินจากสายตาและความชำนาญเป็นหลัก โดยไม่ได้มีการกำหนดค่าการปรับพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีที่เป็นมาตรฐาน และจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้สมการถดถอยในการทำนายพารามิเตอร์กระบวนการพ่นสีในบทที่ 3 มีค่าเท่ากับ 45.1% และ 32.8 % ตามลำดับ หมายความว่าสมการถดถอยที่วิเคราะห์ได้ยังไม่สามารถทำนายค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีได้ดีพอ

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำเทคนิคฟัซซีลอจิก (fuzzy logic) มาใช้ในการทำนายจากการศึกษากระบวนการพ่นสีในโรงงานกรณีศึกษา รวมถึงเกณฑ์การตัดสินใจของพนักงานประจำเครื่องในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี พบว่าข้อมูลนำเข้าของระบบฟัซซีที่เหมาะสมคือ ข้อมูลที่สามารถแสดงถึง ขนาดรูปร่างภายนอกของชิ้นงาน ความซับซ้อน ซึ่งข้อมูลนำเข้าที่ได้คือค่าคุณลักษณะของชิ้นงานที่สำคัญจากการประมวลผลภาพประกอบด้วย 3 คุณลักษณะคือ ความยาว ปริมาตร และพื้นที่ผิวชิ้นงาน ซึ่งข้อมูลนำเข้าทั้ง 3 คาดว่ามีความเหมาะสมและเพียงพอต่อการทำนายพารามิเตอร์กระบวนการพ่นสีด้วยเทคนิคฟัซซีลอจิก โดยที่การพัฒนาเทคนิคการทำนายพารามิเตอร์กระบวนการพ่นสีด้วยเทคนิคฟัซซีลอจิกมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การทำนายพารามิเตอร์กระบวนการพ่นสีด้วยเทคนิคฟัซซีลอจิก

ฟัซซีลอจิก (fuzzy logic) เป็นตรรกศาสตร์ของการใช้เหตุผลแบบประมาณ ใช้ค่าระดับของความจริงแทนการใช้เพียงแค่ระดับ “ถูก” หรือ “ผิด” มีการนำความรู้และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญมาใช้ จัดทำระบบเพื่อจำลองรูปแบบการตัดสินใจ ฟัซซีสามารถนำไปใช้ในการจัดการกับปัญหาที่มีความคลุมเครือ ไม่แน่นอน และ ยุ่งยากซับซ้อน ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้สนใจนำหลักการฟัซซีเข้ามาใช้ในการออกแบบระบบการทำนายพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี ระบบในการทำนายค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีด้วยเทคนิคฟัซซีลอจิกมีโครงสร้างพื้นฐานแสดงได้ดังรูปที่ 4.1

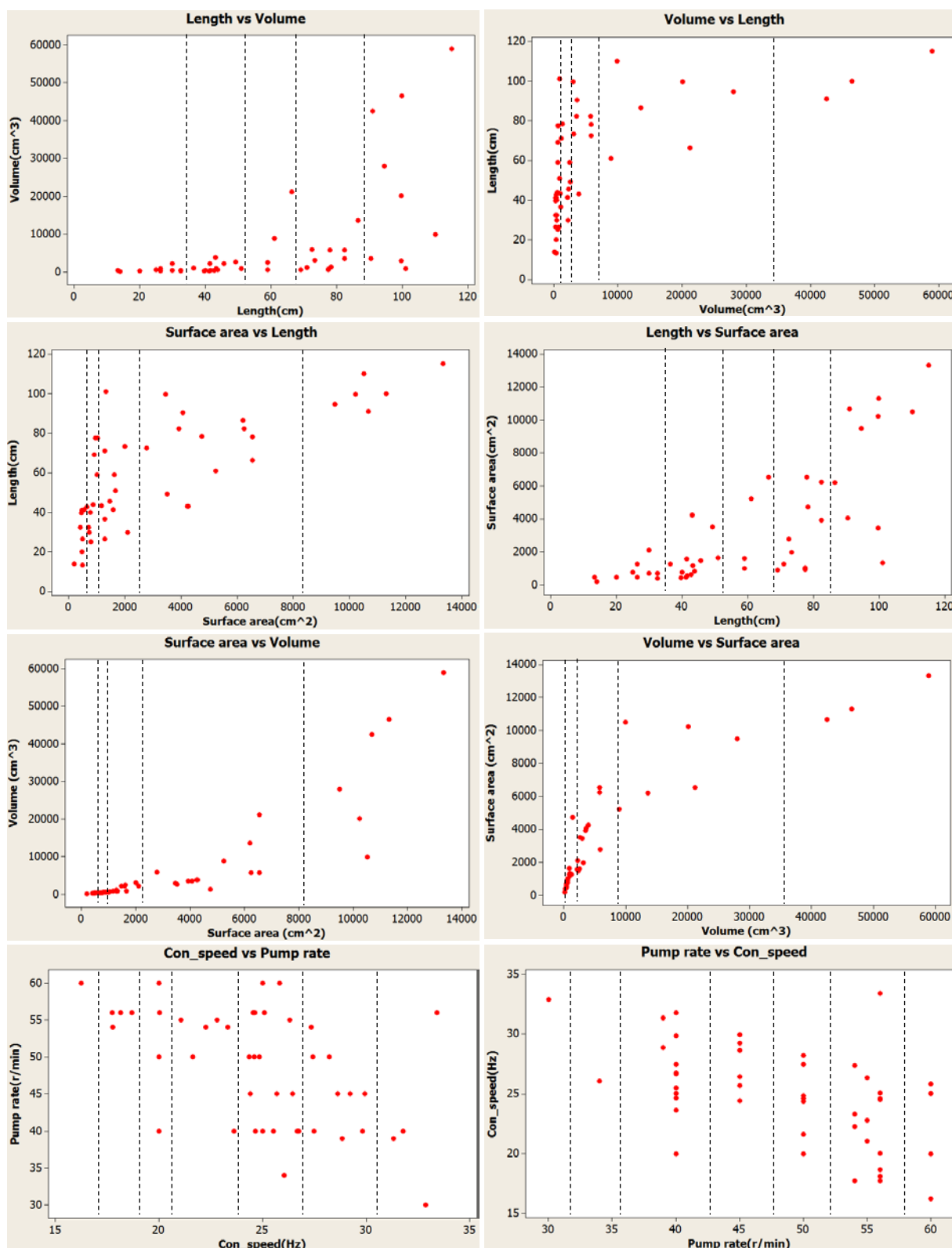


รูปที่ 4.1 ระบบฟuzzyลอจิกในการทำนายพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี

จากรูปที่ 4.1 เป็นโครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟuzzy ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 4 ส่วนได้แก่ การทำฟuzzyฟิเคชัน (fuzzification) การสร้างฐานกฎฟuzzy (fuzzy rule base) การอนุมาน (inference engine) และการทำค่าฟuzzyให้เป็นค่าปกติ (defuzzification) โดยผลการดำเนินการตามขั้นตอนและวิธีการในการพัฒนาเทคนิคสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

4.1.1 การทำฟuzzyฟิเคชัน (fuzzification)

ขั้นตอนนี้เป็นการแปลงอินพุตทั่วไป (crisp input) ซึ่งในงานวิจัยนี้คือค่าคุณลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากการประมวลผลภาพคือ ความยาว ปริมาตร และพื้นที่ผิวของชิ้นงานให้เป็นตัวแปรอินพุตแบบตัวแปรฟuzzy (fuzzy input) หรือฟuzzyเซตโดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function) การทำฟuzzyฟิเคชันเริ่มจากการนำข้อมูลคุณลักษณะของชิ้นงานแต่ละค่ามาทำการพล็อตแบบกระจาย (scatter plot) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของข้อมูลแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟแบบกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ ความยาว ปริมาตร และพื้นที่ผิว

จากการพิจารณารูปที่ 4.2 สามารถแบ่งกลุ่มข้อมูลคุณลักษณะตามการกระจายตัวได้ ดังนี้ ระยะความยาวของชิ้นงานควรแบ่งเป็น 5 ฟัชซีเซตคือ ต่ำมาก (very low: VL_L) ต่ำ (low: L_L) ปานกลาง (medium: M_L) สูง (high: H_L) และสูงมาก (very high: VH_L) ปริมาตรของชิ้นงานควรแบ่งเป็น 5 ฟัชซีเซตคือ ต่ำมาก (very low: VL_V) ต่ำ (low: L_V) ปานกลาง (medium: M_V) สูง (high: H_V) และสูงมาก (very high: VH_V) และพื้นที่ผิวของชิ้นงานควรแบ่งเป็น 5 ฟัชซีเซตคือ ต่ำมาก (very low: VL_S) ต่ำ (low: L_S) ปานกลาง (medium: M_S) สูง (high: H_S) และสูงมาก (very high: VH_S)

สำหรับพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี ความเร็วสายพานการผลิตควรแบ่งได้เป็น 7 ฟัชซีเซต ได้แก่ ต่ำมาก (very low: VL_C) ต่ำ (low: L_C) กลางต่ำ (medium low: ML_C) กลาง (medium: M_C) กลางสูง (medium high: MH_C) สูง (high: H_C) และสูงมาก (very high: VH_C) และอัตราป้อนสี ควรแบ่งได้เป็น 6 ฟัชซีเซต ได้แก่ ต่ำมาก (very low: VL_P) ต่ำ (low: L_P) กลางต่ำ (medium low: ML_P) กลาง (medium: M_P) กลางสูง (medium high: MH_P) และสูง (high: H_P) โดยที่ขอบเขตของค่าคุณลักษณะชิ้นงานได้แก่ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ยแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 และการกำหนดหาค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ของแต่ละระดับฟัชซีเซตของข้อมูลแต่ละประเภท แสดงดังตารางที่ 4.2

ตาราง 4.1 ค่าต่ำสุด สูงสุดและค่าเฉลี่ยของค่าคุณลักษณะชิ้นงาน

คุณลักษณะชิ้นงาน	ข้อมูลทั้งหมด	
	ต่ำสุด	สูงสุด
ความยาว (ซม.)	13.30	115.00
ปริมาตร (ลบ.ซม.)	126	58937.5
พื้นที่ผิว (ตร.ซม.)	186	13330

ตารางที่ 4.2 ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ของแต่ละฟัชซีเซต

ข้อมูลของระบบ	ตัวแปรของระบบ	ระดับฟัชซีเซต	ตัวแปรภาษา	ช่วงของฟัชซีเซต	
				ต่ำสุด	สูงสุด
อินพุต	ความยาว (ซม.)	1	ต่ำมาก (VL _L)	0.0	36.78
		2	ต่ำ (L _L)	26.57	55.13
		3	ปานกลาง (M _L)	45.10	72.25
		4	สูง (H _L)	62.70	89.80
		5	สูงมาก (VH _L)	79.0	115.0
	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	1	ต่ำมาก (VL _V)	0.0	740.5
		2	ต่ำ (L _V)	443.0	2000.0

ตารางที่ 4.2 ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ของแต่ละระดับฟัชชี (ต่อ)

ข้อมูลของระบบ	ตัวแปรของระบบ	ระดับฟัชชีเซต	ตัวแปรภาษา	ช่วงของฟัชชีเซต		
				ต่ำสุด	สูงสุด	
อินพุต	ปริมาตร (ลบ.ชม.)	3	ปานกลาง (M_V)	1130.0	6706.0	
		4	สูง (H_V)	4519.0	23265.0	
		5	สูงมาก (VH_V)	8759.0	58937.5	
	พื้นที่ผิว (ตร.ชม.)	1	ต่ำมาก (VL_S)	0.0	684.0	
		2	ต่ำ (L_S)	450.0	1385.0	
		3	ปานกลาง (M_S)	918.0	4168.0	
		4	สูง (H_S)	2187.0	8420.0	
		5	สูงมาก (VH_S)	5710.0	13330.0	
เอาต์พุต	ความถี่อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมความเร็วสายพาน (เฮิร์ตซ์)	1	ต่ำมาก (VL_C)	16.0	20.0	
		2	ต่ำ (L_C)	17.9	21.6	
		3	กลางต่ำ (ML_C)	20.4	24.6	
		4	กลาง (M_C)	22.5	26.0	
		5	กลางสูง (MH_C)	25.2	28.6	
		6	สูง (H_C)	27.0	32.1	
		7	สูงมาก (VH_C)	29.5	34.0	
	อัตราป้อน	(รอบต่อนาที)	1	ต่ำมาก (VL_P)	28.0	39.4
			2	ต่ำ (L_P)	33.0	45.0
			3	กลางต่ำ (ML_P)	39.9	50.0
		4	กลาง (M_P)	45.0	54.5	
		5	กลางสูง (MH_P)	50.0	60.0	
		6	สูง (H_P)	55.5	65.0	

ข้อมูลในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งแสดงค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละระดับจะถูกนำมาใช้ในการออกแบบค่าความเป็นสมาชิกของฟัชชีเซต ได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) ความยาวของชิ้นงาน (length)

ระดับความยาวของชิ้นงานแบ่งออกเป็น 5 ฟัชชีเซต เซตของคุณลักษณะความยาวชิ้นงานกำหนดได้คือ $length = \{ VL_L, L_L, M_L, H_L, VH_L \}$ และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของแต่ละเซตคือ $lengthmf = \{ 'trapmf', 'trimf', 'trimf', 'trimf', 'trapmf' \}$

$X = 13.30: 115.00$ ค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุดของระยะเวลายาวของชิ้นงาน

โดยที่ฟังก์ชันเซตของระยะเวลายาวชิ้นงานระดับต่ำมาก (very low) หรือ VL_L มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 4 ค่าคือ $\{a, b, c, d\}$ โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความยาวระดับต่ำมากดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{length}(VL_L) &= \text{trapmf}(x, [aVL_L, bVL_L, cVL_L, dVL_L]) \\ &= \text{trapmf}(x, [0, 0, 23.14, 36.78]) \end{aligned}$$

ฟังก์ชันเซตของระยะเวลายาวชิ้นงานระดับต่ำ (low) หรือ L_L มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3 ค่าคือ $\{a, b, c\}$ โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความยาวระดับต่ำดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{length}(L_L) &= \text{trimf}(x, [aL_L, bL_L, cL_L]) \\ &= \text{trimf}(x, [26.57, 41.06, 55.13]) \end{aligned}$$

ฟังก์ชันเซตของระยะเวลายาวชิ้นงานระดับปานกลาง (medium) หรือ M_L มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3 ค่าคือ $\{a, b, c\}$ โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความยาวระดับปานกลางดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{length}(M_L) &= \text{trimf}(x, [aM_L, bM_L, cM_L]) \\ &= \text{trimf}(x, [45.10, 59.26, 72.25]) \end{aligned}$$

ฟังก์ชันเซตของระยะเวลายาวชิ้นงานระดับสูง (high) หรือ H_L มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3 ค่าคือ $\{a, b, c\}$ โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความยาวระดับสูงดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{length}(H_L) &= \text{trimf}(x, [aH_L, bH_L, cH_L]) \\ &= \text{trimf}(x, [62.70, 75.51, 89.80]) \end{aligned}$$

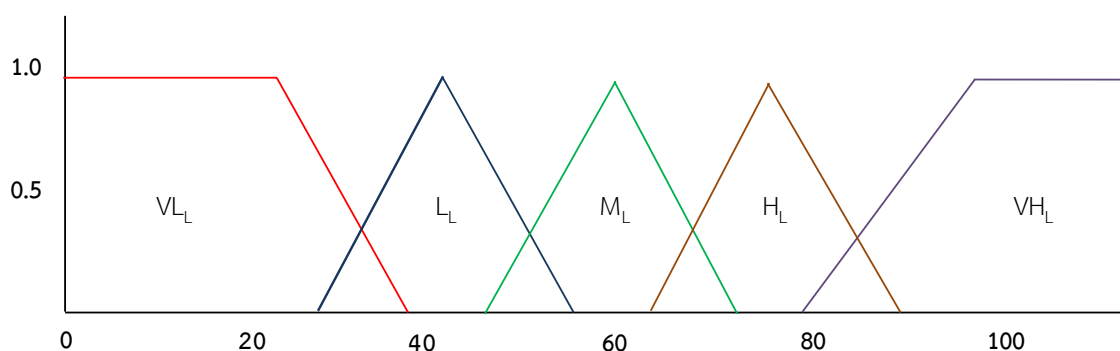
ฟังก์ชันเซตของระยะเวลายาวชิ้นงานระดับสูงมาก (very high) หรือ VH_L มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 4 ค่าคือ $\{a, b, c, d\}$ โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความยาวระดับสูงมากดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{length}(VH_L) &= \text{trapmf}(x, [aVH_L, bVH_L, cVH_L, dVH_L]) \\ &= \text{trapmf}(x, [79.0, 97.26, 115.0, 115.0]) \end{aligned}$$

โดยที่ค่าความเป็นสมาชิกแต่ละฟังก์ชันแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 และฟังก์ชันเซตของระยะเวลายาวชิ้นงานแสดงได้ดังรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าความเป็นสมาชิกแต่ละฟังก์ชันในฟuzzyเซตของระยะความยาวชิ้นงาน

ตัวแปร	ระดับฟuzzy	ตัวแปรภาษา	ฟังก์ชัน	ค่าความเป็นสมาชิก			
				a	b	c	d
ความยาว	1	ต่ำมาก (VL _L)	สี่เหลี่ยมคางหมู	0	0	23.14	36.78
	2	ต่ำ (L _L)	สามเหลี่ยม	26.57	41.06	55.13	
	3	กลาง (M _L)	”	45.10	59.26	72.25	
	4	สูง (H _L)	”	62.70	75.51	89.80	
	5	สูงมาก (VH _L)	สี่เหลี่ยมคางหมู	79.0	97.26	115.0	115.0



รูปที่ 4.3 ฟuzzyเซตของระยะความยาวชิ้นงานแบ่งออกเป็น 5 ฟuzzyเซต

2) ปริมาตรชิ้นงาน (volume)

ระดับปริมาตรของชิ้นงานแบ่งออกเป็น 5 ฟuzzyเซต เซตของคุณลักษณะปริมาตรชิ้นงานกำหนดได้คือ $\text{Volume} = \{ VL_V, L_V, M_V, H_V, VH_V \}$ และฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

$\text{volumemf} = \{ \text{'trapmf'}, \text{'trimf'}, \text{'trimf'}, \text{'trimf'}, \text{'trapmf'} \}$

$X = 126.00: 58937.5.00$ ค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุดของปริมาตรของชิ้นงาน

โดยที่ฟuzzyเซตของปริมาตรชิ้นงานระดับต่ำมาก (very low) หรือ VL_V มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 4 ค่าคือ {a, b, c, d} โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของปริมาตรระดับต่ำมากดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{volume} (VL_V) &= \text{trapmf}(x, [aVL_V, bVL_V, cVL_V, dVL_V]) \\ &= \text{trapmf}(x, [0, 0, 360.11, 740.5]) \end{aligned}$$

ฟังก์ชันเซตของปริมาตรชิ้นงานระดับต่ำ (low) หรือ L_V มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3 ค่าคือ $\{a, b, c\}$ โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของปริมาตรระดับต่ำดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{volume}(L_V) &= \text{trimf}(x, [a_{L_V}, b_{L_V}, c_{L_V}]) \\ &= \text{trimf}(x, [443, 879.33, 2000]) \end{aligned}$$

ฟังก์ชันเซตของปริมาตรชิ้นงานระดับปานกลาง (medium) หรือ M_V มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3 ค่าคือ $\{a, b, c\}$ โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของปริมาตรระดับปานกลางดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{volume}(M_V) &= \text{trimf}(x, [a_{M_V}, b_{M_V}, c_{M_V}]) \\ &= \text{trimf}(x, [1130, 3270, 6706]) \end{aligned}$$

ฟังก์ชันเซตของปริมาตรชิ้นงานระดับสูง (high) หรือ H_V มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3 ค่าคือ $\{a, b, c\}$ โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของปริมาตรระดับสูงดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{volume}(H_V) &= \text{trimf}(x, [a_{H_V}, b_{H_V}, c_{H_V}]) \\ &= \text{trimf}(x, [4519, 7618.28, 23265]) \end{aligned}$$

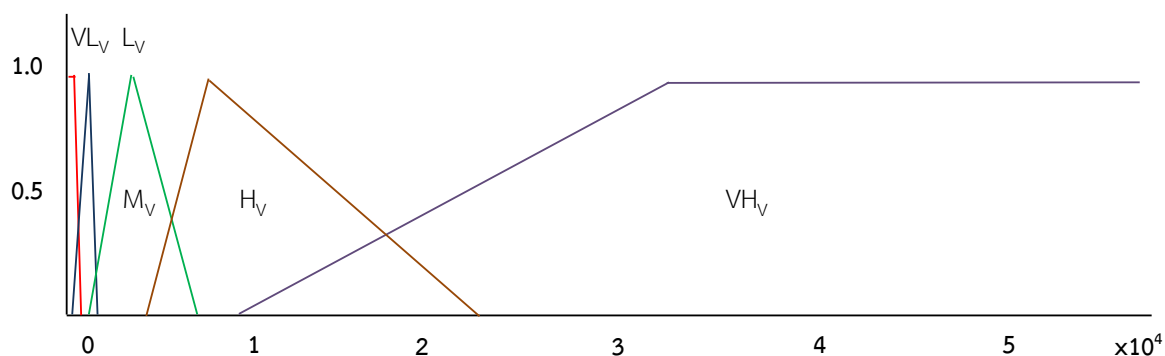
ฟังก์ชันเซตของปริมาตรชิ้นงานระดับสูงมาก (very high) หรือ VH_V มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 4 ค่าคือ $\{a, b, c, d\}$ โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของปริมาตรระดับสูงมากดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{volume}(VH_V) &= \text{trapmf}(x, [a_{VH_V}, b_{VH_V}, c_{VH_V}, d_{VH_V}]) \\ &= \text{trapmf}(x, [8759, 32972.6, 58937.5, 58937.5]) \end{aligned}$$

โดยที่ค่าความเป็นสมาชิกแต่ละฟังก์ชันแสดงได้ดังตารางที่ 4.4 และฟังก์ชันเซตของปริมาตรชิ้นงานแสดงได้ดังรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าความเป็นสมาชิกแต่ละฟังก์ชันในฟังก์ชันเซตของปริมาตรชิ้นงาน

ตัวแปร	ระดับฟังก์ชัน	ตัวแปรภาษา	ฟังก์ชัน	ค่าความเป็นสมาชิก			
				a	b	c	d
ปริมาตร	1	ต่ำมาก (VL_V)	สี่เหลี่ยมคางหมู	0	0	360.11	740.5
	2	ต่ำ (L_V)	สามเหลี่ยม	443	879.33	2000	
	3	กลาง (M_V)	"	1130	3270	6706	
	4	สูง (H_V)	"	4519	7618.28	23265	
	5	สูงมาก (VH_V)	สี่เหลี่ยมคางหมู	8759	32972.6	58937.5	58937.5



รูปที่ 4.4 ฟัชซีเซตของปริมาณชิ้นงานแบ่งออกเป็น 5 ฟัชซีเซต

3) พื้นที่ผิวชิ้นงาน (surface area)

ระดับพื้นที่ผิวของชิ้นงานแบ่งออกเป็น 5 ฟัชซีเซต เซตของคุณลักษณะพื้นที่ผิวชิ้นงาน กำหนดได้คือ surface area = { VL_S, L_S, M_S, H_S, VH_S } และฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

surface areamf = { 'trapmf', 'trimf', 'trimf', 'trimf', 'trapmf' }

X = 166.0: 13330.0 ค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุดของพื้นที่ผิวของชิ้นงาน

โดยที่ฟัชซีเซตของพื้นที่ผิวชิ้นงานระดับต่ำมาก (very low) หรือ VL_S มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 4 ค่าคือ {a, b, c, d} โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของพื้นที่ผิวระดับต่ำมากดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{surface area (VL}_S) &= \text{trapmf}(x, [a\text{VL}_S, b\text{VL}_S, c\text{VL}_S, d\text{VL}_S]) \\ &= \text{trapmf}(x, [0, 0, 421.2, 684.3]) \end{aligned}$$

ฟัชซีเซตของพื้นที่ผิวชิ้นงานระดับต่ำ (low) หรือ L_S มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3 ค่าคือ {a, b, c} โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของพื้นที่ผิวระดับต่ำดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{surface area (L}_S) &= \text{trimf}(x, [a\text{L}_S, b\text{L}_S, c\text{L}_S]) \\ &= \text{trimf}(x, [450.0, 811.1, 1385.0]) \end{aligned}$$

ฟัชซีเซตของพื้นที่ผิวชิ้นงานระดับปานกลาง (medium) หรือ M_S มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3 ค่าคือ {a, b, c} โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของพื้นที่ผิวระดับปานกลางดังนี้คือ

$$\text{surface area (M}_S) = \text{trimf}(x, [a\text{M}_S, b\text{M}_S, c\text{M}_S])$$

$$= \text{trimf}(x, [918.0, 1602.7, 4168.0])$$

ฟังก์ชันเซตของพื้นที่ผิวชั้นงานระดับสูง (high) หรือ H_S มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3 ค่าคือ $\{a, b, c\}$ โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของพื้นที่ผิวระดับสูงดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{surface area } (H_S) &= \text{trimf}(x, [aH_S, bH_S, cH_S]) \\ &= \text{trimf}(x, [2187.3, 4885.7, 8420.0]) \end{aligned}$$

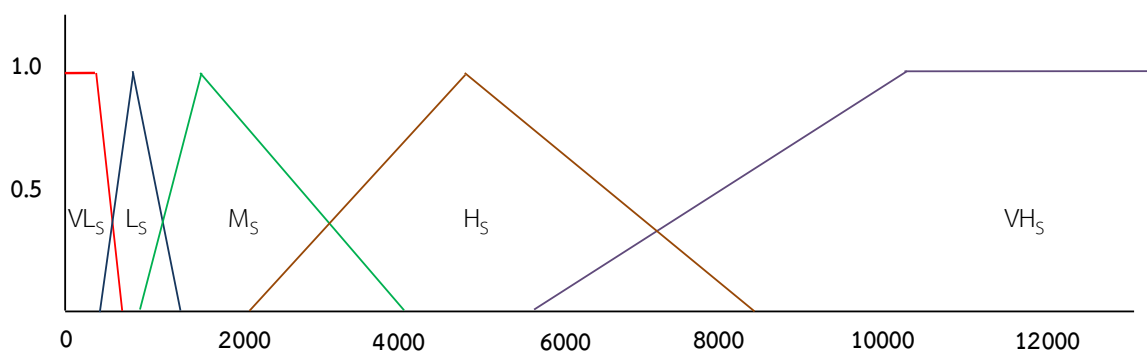
ฟังก์ชันเซตของพื้นที่ผิวชั้นงานระดับสูงมาก (very high) หรือ VH_S มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 4 ค่าคือ $\{a, b, c, d\}$ โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของพื้นที่ผิวระดับสูงมากดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{surface area } (VH_S) &= \text{trapmf}(x, [aVH_S, bVH_S, cVH_S, dVH_S]) \\ &= \text{trapmf}(x, [5710.0, 10298.0, 13330.0, 13330.0]) \end{aligned}$$

โดยที่ค่าความเป็นสมาชิกแต่ละฟังก์ชันแสดงได้ดังตารางที่ 4.5 และฟังก์ชันเซตของพื้นที่ผิวชั้นงานแสดงได้ดังรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าความเป็นสมาชิกแต่ละฟังก์ชันในฟังก์ชันเซตของพื้นที่ผิวชั้นงาน

ตัวแปร	ระดับฟuzzy	ตัวแปรภาษา	ฟังก์ชัน	ค่าความเป็นสมาชิก			
				a	b	c	d
พื้นที่ผิว	1	ต่ำมาก (VL_S)	สี่เหลี่ยมคางหมู	0	0	421.2	684.3
	2	ต่ำ (L_S)	สามเหลี่ยม	450.0	811.1	1385.0	
	3	กลาง (M_S)	"	918.0	1602.7	4168.0	
	4	สูง (H_S)	"	2187.3	4885.7	8420.0	
	5	สูงมาก (VH_S)	สี่เหลี่ยมคางหมู	5710.0	10298.0	13330.0	13330.0



รูปที่ 4.5 ฟังก์ชันเซตของพื้นที่ผิวชั้นงานแบ่งออกเป็น 5 ฟังก์ชันเซต

4) ความเร็วสายพานการผลิต (conveyor speed)

ผลลัพธ์หรือข้อมูลขาออก (output) คือระดับความเร็วของสายพานการผลิตถูกแบ่งเป็น 7 ฟังก์ชันเซต เซตของคุณลักษณะความเร็วสายพานการผลิตกำหนดได้คือ conveyor speed = { VL_C, L_C, ML_C, M_C, MH_C, H_C, VH_C } และฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

conveyor speedmf = {'trimf', 'trimf', 'trimf', 'trimf', 'trimf', 'trimf', 'trapmf'}

X = 16.00: 34.00 ค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุดของความเร็วสายพานการผลิต

โดยที่ฟังก์ชันเซตของความเร็วสายพานระดับต่ำมาก (very low) หรือ VL_C มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3 ค่าคือ {a, b, c,} โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความเร็วสายพานระดับต่ำมากดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{conveyor speed (VL}_C) &= \text{trimf (x, [aVL}_C, \text{bVL}_C, \text{cVL}_C]) \\ &= \text{trimf (x, [16, 17.67, 20])} \end{aligned}$$

ฟังก์ชันเซตของความเร็วสายพานระดับต่ำ (low) หรือ L_C มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3 ค่าคือ {a, b, c,} โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความเร็วสายพานระดับต่ำดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{conveyor speed (L}_C) &= \text{trimf (x, [aL}_C, \text{bL}_C, \text{cL}_C]) \\ &= \text{trimf (x, [17.9, 20.12, 21.6])} \end{aligned}$$

ฟังก์ชันเซตของความเร็วสายพานระดับกลางต่ำ (medium low) หรือ ML_C มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3 ค่าคือ {a, b, c,} โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความเร็วสายพานระดับกลางต่ำดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{conveyor speed (ML}_C) &= \text{trimf (x, [aML}_C, \text{bML}_C, \text{cML}_C]) \\ &= \text{trimf (x, [20.36, 22.17, 24.6])} \end{aligned}$$

ฟังก์ชันเซตของความเร็วสายพานระดับกลาง (medium) หรือ M_C มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3 ค่าคือ {a, b, c,} โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความเร็วสายพานระดับกลางดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{conveyor speed (M}_C) &= \text{trimf (x, [aM}_C, \text{bM}_C, \text{cM}_C]) \\ &= \text{trimf (x, [22.48, 24.85, 26])} \end{aligned}$$

ฟังก์ชันเซตของความเร็วสายพานระดับกลางสูง (medium high) หรือ MH_C มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3 ค่าคือ {a, b, c,} โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความเร็วสายพานระดับกลางสูงดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{conveyor speed (MH}_C) &= \text{trimf (x, [aMH}_C, \text{bMH}_C, \text{cMH}_C]) \\ &= \text{trimf (x, [25.18, 26.43, 28.6])} \end{aligned}$$

ฟังก์ชันเซตของความเร็วสายพานระดับสูง (high) หรือ H_C มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3 ค่าคือ {a, b, c} โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความเร็วสายพานระดับสูงดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{conveyor speed (H}_C) &= \text{trimf (x, [aH}_C, \text{bH}_C, \text{cH}_C]) \\ &= \text{trimf (x, [26.95, 29, 32.13])} \end{aligned}$$

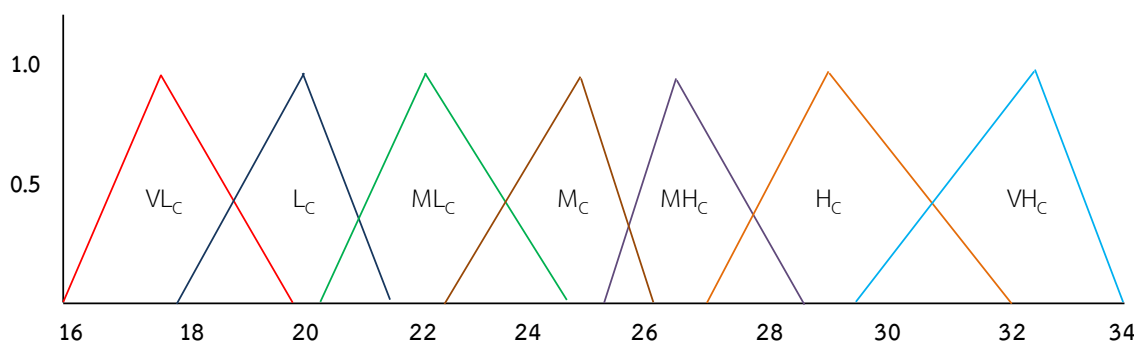
ฟังก์ชันเซตของความเร็วสายพานระดับสูงมาก (very high) หรือ VH_C มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3 ค่าคือ {a, b, c} โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความเร็วสายพานระดับสูงมากดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{conveyor speed (H}_C) &= \text{trimf (x, [aVH}_C, \text{bVH}_C, \text{cVH}_C]) \\ &= \text{trimf (x, [29.47, 32.5, 34])} \end{aligned}$$

โดยที่ค่าความเป็นสมาชิกแต่ละฟังก์ชันแสดงได้ดังตารางที่ 4.6 และฟังก์ชันเซตของความเร็วสายพานแสดงได้ดังรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าความเป็นสมาชิกแต่ละฟังก์ชันในฟังก์ชันเซตของความเร็วสายพาน

ตัวแปร	ระดับฟังก์ชัน	ตัวแปรภาษา	ฟังก์ชัน	ค่าความเป็นสมาชิก		
				a	b	c
ความเร็วสายพาน การผลิต	1	ต่ำมาก (VL_C)	สามเหลี่ยม	16	17.67	20
	2	ต่ำ (L_C)	"	17.9	20.12	21.6
	3	กลางต่ำ (ML_C)	"	20.36	22.17	24.6
	4	กลาง (M_C)	"	22.48	24.85	26
	5	กลางสูง (MH_C)	"	25.18	26.43	28.6
	6	สูง (H_C)	"	26.95	29	32.13
	7	สูงมาก (VH_C)	"	29.47	32.5	34



รูปที่ 4.6 ฟัชชีเซตของระดับความเร็วสายพานการผลิต (output) แบ่งออกเป็น 7 ฟัชชีเซต

5) อัตราปั๊มสี (pump rate)

ผลลัพธ์หรือข้อมูลขาออก (output) คือระดับความเร็วของอัตราปั๊มสีถูกแบ่งเป็น 6 ฟัชชีเซตของคุณลักษณะอัตราปั๊มสีกำหนดได้คือ pump rate = { VL_p, L_p, ML_p, M_p, MH_p, H_p, VH_p } และฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

pump rate_{mf} = { 'trimf', 'trimf', 'trimf', 'trimf', 'trimf', 'trimf' }

X = 28.00: 65.00 ค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุดของอัตราปั๊มสี

โดยที่ฟัชชีเซตของอัตราปั๊มสีระดับต่ำมาก (very low) หรือ V_p มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3 ค่าคือ {a, b, c} โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราปั๊มสีระดับต่ำมากดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{pump rate (VL}_p) &= \text{trimf (x, [aVL}_p, \text{bVL}_p, \text{cVL}_p]) \\ &= \text{trimf (x, [28, 32, 39.35])} \end{aligned}$$

ฟัชชีเซตของอัตราปั๊มสีระดับต่ำ (low) หรือ L_p มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3 ค่าคือ {a, b, c} โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราปั๊มสีระดับต่ำดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{pump rate (L}_p) &= \text{trimf (x, [aL}_p, \text{bL}_p, \text{cL}_p]) \\ &= \text{trimf (x, [33, 39.7, 45])} \end{aligned}$$

ฟัชชีเซตของอัตราปั๊มสีระดับกลางต่ำ (medium low) หรือ ML_p มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3 ค่าคือ {a, b, c} โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราปั๊มสีระดับกลางต่ำดังนี้คือ

$$\text{pump rate (ML}_p) = \text{trimf (x, [aML}_p, \text{bML}_p, \text{cML}_p])$$

$$= \text{trimf}(x, [39.85, 45, 50])$$

ฟังก์ชันเซตของอัตราปั๊มระดับกลาง (medium) หรือ M_p มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3 ค่าคือ $\{a, b, c\}$ โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราปั๊มระดับกลางดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{pump rate } (M_p) &= \text{trimf}(x, [aM_p, bM_p, cM_p]) \\ &= \text{trimf}(x, [45, 50, 54.5]) \end{aligned}$$

ฟังก์ชันเซตของอัตราปั๊มระดับกลางสูง (medium high) หรือ MH_p มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3 ค่าคือ $\{a, b, c\}$ โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราปั๊มระดับกลางสูงดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{pump rate } (MH_p) &= \text{trimf}(x, [aMH_p, bMH_p, cMH_p]) \\ &= \text{trimf}(x, [50, 55.11, 60]) \end{aligned}$$

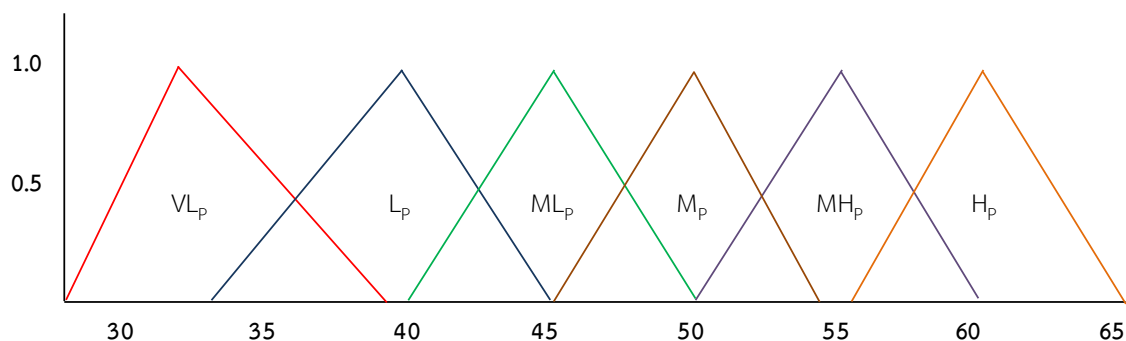
ฟังก์ชันเซตของอัตราปั๊มระดับสูง (high) หรือ H_p มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมด 3 ค่าคือ $\{a, b, c\}$ โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราปั๊มระดับสูงดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{pump rate } (H_p) &= \text{trimf}(x, [aH_p, bH_p, cH_p]) \\ &= \text{trimf}(x, [55.5, 60, 65]) \end{aligned}$$

โดยที่ค่าความเป็นสมาชิกแต่ละฟังก์ชันแสดงได้ดังตารางที่ 4.7 และฟังก์ชันเซตของอัตราปั๊มแสดงได้ดังรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าความเป็นสมาชิกแต่ละฟังก์ชันในฟังก์ชันเซตของอัตราปั๊ม

ตัวแปร	ระดับฟังก์ชัน	ตัวแปรภาษา	ฟังก์ชัน	ค่าความเป็นสมาชิก		
				a	b	c
อัตราปั๊ม	1	ต่ำมาก (VL_p)	สามเหลี่ยม	28	32	39.35
	2	ต่ำ (L_p)	"	33	39.7	45
	3	กลางต่ำ (ML_p)	"	39.85	45	50
	4	กลาง (M_p)	"	45	50	54.5
	5	กลางสูง (MH_p)	"	50	55.11	60
	6	สูง (H_p)	"	55.5	60	65



รูปที่ 4.7 ฟัชซีเซตของระดับอัตราปั๊มสี (output) แบ่งออกเป็น 6 ฟัชซีเซต

เมื่อกำหนดฟัชซีเซตแล้ว ต่อไปทำการจัดเทียบข้อมูลปริมาณระดับค่าคุณลักษณะของชิ้นงานให้เป็นข้อมูลเชิงฟัชซี โดยพิจารณาว่าปริมาณค่าคุณลักษณะแต่ละประเภทอยู่ในระดับสมาชิกใดของแต่ละคุณลักษณะ พร้อมทั้งพิจารณาและจัดเทียบความสัมพันธ์ของอินพุตซึ่งเป็นปริมาณของความยาว ปริมาตร และพื้นที่ผิวของชิ้นงาน กับเอาต์พุตซึ่งเป็นระดับความเร็วของสายพานการผลิต และอัตราปั๊มสี เมื่อทำการกำจัดข้อมูลความสัมพันธ์ที่ซ้ำกันจะได้ ผลลัพธ์เป็นกฎของฟัชซี

4.1.2 ผลการสร้างฐานกฎฟัชซี (fuzzy rule base)

1) กฎฟัชซีสำหรับทำนายความเร็วสายพานการผลิต

ขั้นตอนนี้เป็นการจัดเทียบข้อมูลในรูปฟัชซีและสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับเอาต์พุตโดยเขียนเป็นกฎ แล้วทำการกำจัดข้อมูลที่ซ้ำกัน ซึ่งจะมีลักษณะอยู่ในรูปแบบของ If –then จากการวิเคราะห์จะได้ผลลัพธ์กฎของฟัชซีทั้งหมด 28 กฎ แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 กฎฟัชซีสำหรับทำนายความเร็วสายพานการผลิต

กฎ	ระดับความเป็นสมาชิก			ระดับความเร็วสายพานการผลิต
	ความยาว	พื้นที่ผิว	ปริมาตร	
1	medium (M _L)	high (H _V)	high (H _S)	very low (VL _C)
2	very high (VH _L)	very high (VH _V)	high (H _S)	
3	very high (VH _L)	very high (VH _V)	very high (VH _S)	
4	high (H _L)	medium (M _V)	high (H _S)	low (L _C)

ตารางที่ 4.8 กฎฟuzzyสำหรับทำนายความเร็วสายพานการผลิต (ต่อ)

กฎ	ระดับความเป็นสมาชิก			ระดับความเร็วสายพานการผลิต
	ความยาว	พื้นที่ผิว	ปริมาตร	
5	high (H _L)	high (H _V)	medium (M _S)	low (L _C)
6	very high (VH _L)	medium (M _V)	high (H _S)	
7	low (L _L)	medium (M _V)	high (H _S)	
8	medium (M _L)	low (L _V)	low (L _S)	medium low (ML _C)
9	medium (M _L)	medium (M _V)	medium (M _S)	
10	low (L _L)	very low (VL _V)	low (L _S)	medium (M _C)
11	low (L _L)	medium (M _V)	medium (M _S)	
12	medium (M _L)	low (L _V)	medium (M _S)	
13	medium (M _L)	high (H _V)	high (H _S)	
14	high (H _L)	low (L _V)	low (L _S)	
15	high (H _L)	high (H _V)	very high (VH _S)	
16	very high (VH _L)	low (L _V)	medium (M _S)	
17	very high (VH _L)	high (H _V)	very high (VH _S)	
18	very low (VL _L)	low (L _V)	low (L _S)	medium high (MH _C)
19	very low (VL _L)	low (L _V)	medium (M _S)	
20	low (L _L)	low (L _V)	medium (M _S)	
21	high (H _L)	low (L _V)	medium (M _S)	medium high (MH _C)
22	high (H _L)	low (L _V)	high (H _S)	
23	very low (VL _L)	very low (VL _V)	very low (VL _S)	high (H _C)
24	very low (VL _L)	very low (VL _V)	low (L _S)	

ตารางที่ 4.8 กฎฟuzzyสำหรับทำนายความเร็วสายพานการผลิต (ต่อ)

กฎ	ระดับความเป็นสมาชิก			ระดับความเร็วสายพานการผลิต
	ความยาว	พื้นที่ผิว	ปริมาตร	
25	low (L_L)	very low (VL_V)	very low (VL_S)	high (H_C)
26	low (L_L)	low (L_V)	low (L_S)	
27	very low (VL_L)	medium (M_V)	medium (M_S)	very high (VH_C)
28	high (H_L)	medium (M_V)	medium (M_S)	

จากตารางที่ 4.8 สามารถแสดงตัวอย่างกฎในรูปประโยคภาษาได้ดังนี้

1. If (length is medium) and (volume is high) and (surface area is high) then (conveyor speed is very low)
2. If (length is very high) and (volume is high) and (surface area is high) then (conveyor speed is very low)
3. If (length is very high) and (volume is very high) and (surface area is very high) then (conveyor speed is very low)
4. If (length is high) and (volume is medium) and (surface area is high) then (conveyor speed is low)
5. If (length is high) and (volume is high) and (surface area is medium) then (conveyor speed is low)
6. If (length is very high) and (volume is medium) and (surface area is high) then (conveyor speed is low)
7. If (length is low) and (volume is medium) and (surface area is high) then (conveyor speed is medium low)
8. If (length is medium) and (volume is low) and (surface area is low) then (conveyor speed is medium low)
9. If (length is medium) and (volume is medium) and (surface area is medium) then (conveyor speed is medium low)

10. If (length is low) and (volume is very low) and (surface area is low) then (conveyor speed is medium)

.

.

.

27. If (length is very low) and (volume is medium) and (surface area is medium) then (conveyor speed is very high)

28. If (length is medium) and (volume is medium) and (surface area is medium) then (conveyor speed is very high)

2) กฎฟuzzyสำหรับทำนายอัตราป้อนสี

ขั้นตอนนี้เป็นการจัดเทียบข้อมูลในรูปฟuzzyและสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับเอาต์พุตโดยเขียนเป็นกฎ แล้วทำการจัดข้อมูลที่ซ้ำกัน ซึ่งจะมีลักษณะอยู่ในรูปแบบของ if –then จากการวิเคราะห์จะได้ผลลัพธ์กฎของฟuzzyทั้งหมด 28 กฎ แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 กฎฟuzzyสำหรับทำนายอัตราป้อนสี

กฎ	ระดับความเป็นสมาชิก			ระดับอัตราป้อนสี
	ความยาว	พื้นที่ผิว	ปริมาตร	
1	low (L _L)	medium (M _V)	medium (M _S)	very low (VL _P)
2	very low (VL _L)	very low (VL _V)	low (L _S)	low (L _P)
3	very low (VL _L)	low (L _V)	low (L _S)	
4	very low (VL _L)	medium (M _V)	medium (M _S)	
5	low (L _L)	very low (VL _V)	very low (VL _S)	
6	medium (M _L)	low (L _V)	medium (M _S)	
7	medium (M _L)	high (H _V)	high (H _S)	
8	high (H _L)	low (L _V)	medium (M _S)	
9	very low (VL _L)	very low (VL _V)	very low (VL _S)	medium low (ML _P)

ตารางที่ 4.9 กฎฟuzzyสำหรับทำนายอัตราป่าไม้ (ต่อ)

กฎ	ระดับความเป็นสมาชิก			ระดับอัตราป่าไม้
	ความยาว	พื้นที่ผิว	ปริมาตร	
10	very low (VL _L)	low (L _V)	medium (M _S)	medium low (ML _P)
11	low (L _L)	very low (VL _V)	low (L _S)	
12	low (L _L)	low (L _V)	low (L _S)	
13	low (L _L)	medium (M _V)	high (H _S)	medium (M _P)
14	high (H _L)	low (L _V)	low (L _S)	
15	high (H _L)	medium (M _V)	high (H _S)	
16	very high (VH _L)	low (L _V)	medium (M _S)	
17	low (L _L)	low (L _V)	medium (M _S)	medium high (MH _P)
18	medium (M _L)	low (L _V)	low (L _S)	
19	medium (M _L)	medium (M _V)	medium (M _S)	
20	medium (M _L)	very high (VH _V)	high (H _S)	medium high (MH _P)
21	high (H _L)	medium (M _V)	medium (M _S)	
22	high (H _L)	high (H _V)	medium (M _S)	
23	high (H _L)	high (H _V)	very high (VH _S)	
24	very high (VH _L)	medium (M _V)	high (H _S)	
25	very high (VH _L)	very high (VH _V)	high (H _S)	
26	very high (VH _L)	very high (VH _V)	very high (VH _S)	
27	high (H _L)	low (L _V)	high (H _S)	high (H _P)
28	very high (VH _L)	high (H _V)	very high (VH _S)	

จากตารางที่ 4.9 สามารถแสดงกฎในรูปประโยคภาษาได้ดังนี้

1. If (length is low) and (volume is medium) and (surface area is medium) then (pump rate is very low)
2. If (length is very low) and (volume is very low) and (surface area is low) then (pump rate is low)
3. If (length is very low) and (volume is low) and (surface area is low) then (pump rate is low)
4. If (length is very low) and (volume is medium) and (surface area is medium) then (pump rate is low)
5. If (length is low) and (volume is very low) and (surface area is very low) then (pump rate is low)
6. If (length is medium) and (volume is low) and (surface area is medium) then (pump rate is low)
7. If (length is medium) and (volume is high) and (surface area is high) then (pump rate is low)
8. If (length is high) and (volume is low) and (surface area is medium) then (pump rate is low)
9. If (length is very low) and (volume is very low) and (surface area is very low) then (pump rate is medium low)
10. If (length is very low) and (volume is low) and (surface area is medium) then (pump rate is medium low)
- .
- .
- .
27. If (length is high) and (volume is low) and (surface area is high) then (pump rate is high)
28. If (length is very high) and (volume is high) and (surface area is very high) then (pump rate is high)

4.1.3 ผลการอนุมาน (inference engine)

ขั้นตอนนี้เป็นกำหนัดส่วนเอาต์พุตจากการอนุมานกฎของฟัซซี่โดยใช้หลักการของทฤษฎีเซต สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้การอนุมานฟัซซี่แบบแมมดานี (mamdani) โดยเป็นวิธีการอนุมานแบบค่าสูงสุด – ต่ำสุด (max-min inference) เป็นการอนุมานโดยใช้ตัวดำเนินการต่ำสุด (minimum operator) ซึ่งเชื่อมประโยคแบบ “or” ด้วยหลักการยูเนียนของทฤษฎีเซต สำหรับข้อดีของการอนุมานฟัซซี่แบบแมมดานีได้แก่ ตรงไปตรงมาง่ายต่อความเข้าใจ เป็นที่ยอมรับในการใช้งานอย่างกว้างขวาง และสะดวกต่อระบบที่มีการป้อนอินพุตโดยตรงจากมนุษย์ ซึ่งผลการอนุมาน มี 5 ขั้นตอนโดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1.3.1 ผลการอนุมานของฟัซซี่ของเอาต์พุตความเร็วสายพานการผลิต

1) พิจารณากฎฟัซซี่ที่ตรงกับข้อมูลนำเข้า

ขั้นตอนนี้เป็นกำหนัดพิจารณาว่าความยาว ปริมาตรและขนาดพื้นที่ผิวที่เป็นข้อมูลนำเข้านั้น สอดคล้องกับกฎใดในตารางที่ 4.8 บ้าง ยกตัวอย่างเช่นถ้าชิ้นงานมีค่าคุณลักษณะทางเรขาคณิตดังนี้คือ มีขนาดความยาวเท่ากับ 41.4 ซม. ปริมาตรเท่ากับ 2175.156 ลบ.ซม. และขนาดพื้นที่ผิวเท่ากับ 1587.20 ตร.ซม. พบว่าขนาดความยาวอยู่ในเซตระดับ “ต่ำ (low: L_L)” ปริมาตรชิ้นงานอยู่ในเซตระดับ “ต่ำ (low: L_V)” และ “กลาง (medium: M_V)” ปริมาณพื้นที่ผิวของชิ้นงานอยู่ในระดับ “กลาง (medium: M_S)” พร้อมทั้งพิจารณาความสัมพันธ์กับระดับความเร็วสายพานการผลิตจากตารางที่ 4.8 พบว่าได้ผลลัพธ์กฎของฟัซซี่ที่เป็นไปได้ 2 กฎได้แก่ กฎข้อที่ 11 และ กฎข้อที่ 20

- กฎข้อที่ 11 คือ ถ้าขนาดความยาวของชิ้นงานอยู่ระดับ “ต่ำ” ปริมาตรของชิ้นงานอยู่ระดับ “กลาง” และปริมาณพื้นที่ผิวชิ้นงานอยู่ระดับ “กลาง” ดังนั้นระดับความเร็วสายพานการผลิตอยู่ในความเร็วระดับ “กลาง”
- กฎข้อที่ 20 คือ ถ้าขนาดความยาวของชิ้นงานอยู่ระดับ “ต่ำ” ปริมาตรของชิ้นงานอยู่ระดับ “ต่ำ” และปริมาณพื้นที่ผิวชิ้นงานอยู่ระดับ “กลาง” ดังนั้นระดับความเร็วสายพานการผลิตอยู่ในความเร็วระดับ “กลางสูง”

2) พิจารณาระดับความเป็นสมาชิกของข้อมูลนำเข้าหรืออินพุต

โดยค่าระดับความเป็นสมาชิกของข้อมูลนำเข้าของ ความยาวชิ้นงาน ปริมาตร และพื้นที่ผิวของชิ้นงานแสดงได้ดังรูปที่ 4.8

3) อนุมานระดับความเป็นสมาชิกโดยใช้ตัวดำเนินการค่าต่ำสุด

ขั้นตอนนี้เป็นกำหนัดพิจารณาระดับความเป็นสมาชิก โดยพิจารณาจากระดับความเป็นสมาชิกของข้อมูลนำเข้าแต่ละกฎฟัซซี่และเชื่อมระดับความเป็นสมาชิกของแต่ละข้อมูลนำเข้าด้วยคำสั่ง “and” ซึ่งใช้

หลักการอินเตอร์เซกชันของทฤษฎีเซตหรือเลือกระดับความเป็นสมาชิกที่มีค่าต่ำที่สุด ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งจากรูปจะพบว่า

- กฎข้อที่ 11 ระดับความเป็นสมาชิกที่น้อยที่สุดคือ ค่าระดับความเป็นสมาชิกของปริมาตรชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 0.488
- กฎข้อที่ 20 ระดับความเป็นสมาชิกที่น้อยที่สุดคือ ค่าระดับความเป็นสมาชิกของปริมาตรชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 0.300

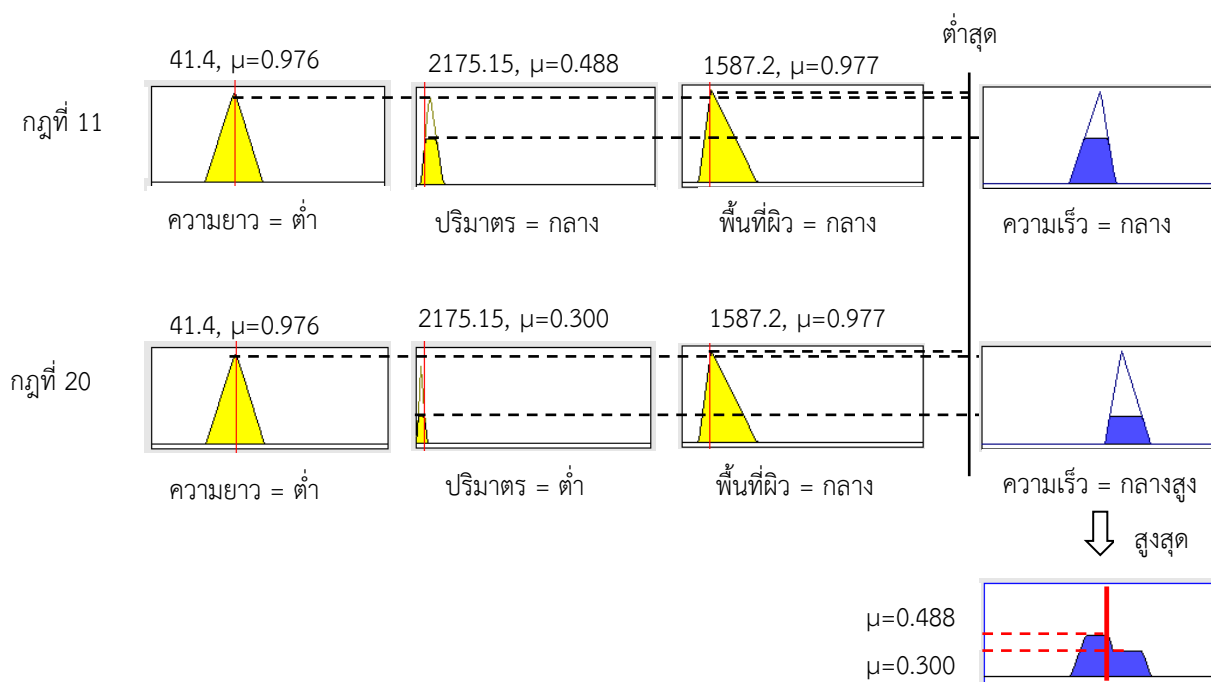
4) กำหนดค่าระดับความเป็นสมาชิกของคำตอบ

ขั้นตอนนี้เป็นกรนำค่าระดับความเป็นสมาชิกของคำตอบ โดยการนำค่าความเป็นสมาชิกของข้อมูลนำเข้าต่ำสุดในแต่ละกฎฟัซซีจากขั้นตอนที่ 3 ข้างต้น ใช้ในการกำหนดค่าระดับความเป็นสมาชิกของคำตอบ ทำให้เหลือเซตคำตอบเฉพาะส่วนค่าความเป็นสมาชิกต่ำสุด โดยที่แต่ละกฎค่าความเป็นสมาชิกของคำตอบที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 4.8 สรุปได้ดังนี้

- กฎข้อที่ 11 ระดับความเป็นสมาชิกของความเร็วสายพานการผลิตมีค่าเท่ากับระดับความเป็นสมาชิกของปริมาตรชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 0.488
- กฎข้อที่ 20 ระดับความเป็นสมาชิกของความเร็วสายพานการผลิตมีค่าเท่ากับระดับความเป็นสมาชิกของปริมาตรชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 0.300

5) รวมฟังก์ชันแสดงระดับความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต

ขั้นตอนนี้เป็นกรรวมระดับความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตทั้ง 2 กฎ โดยใช้ตัวดำเนินการค่าสูงสุด (maximum operator) ซึ่งเชื่อมประโยคแบบ “or” โดยอาศัยหลักการยูเนียนของทฤษฎีเซตหรือเป็นการเลือกค่าระดับความเป็นสมาชิกสูงสุดในการรวมกฎ ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การอนุมานกฎฟัซซีของความเร็วสายพานการผลิต

4.1.3.2 ผลการอนุมานของฟัซซีของเอาต์พุตตราปัมสี

1) พิจารณากฎฟัซซีที่ตรงกับข้อมูลนำเข้า

ยกตัวอย่างเช่น ถ้าชิ้นงานผ่านกระบวนการประมวลผลภาพและสามารถคำนวณได้ว่า มีค่าคุณลักษณะทางเรขาคณิตดังนี้คือ มีขนาดความยาวเท่ากับ 72.5 ซม. ปริมาตรเท่ากับ 5872.5 ลบ.ซม. และขนาดพื้นที่ผิวเท่ากับ 2772.0 ตร.ซม. พบว่าขนาดความยาวอยู่ในเซตระดับ “สูง (high: H_L)” ปริมาตรชิ้นงานอยู่ในเซตระดับ “กลาง (medium: M_V)” และ “สูง (high: H_V)” ปริมาณพื้นที่ผิวของชิ้นงานอยู่ในระดับ “กลาง (medium: M_S)” และ “สูง (high: H_S)” พร้อมทั้งพิจารณาความสัมพันธ์กับระดับเอาต์พุตปัมสีจากตารางที่ 4.9 พบว่าได้ผลลัพธ์กฎของฟัซซีของการทำนายพารามิเตอร์เอาต์พุตปัมสีของกระบวนการพ่นสีที่เป็นไปได้ 3 กฎได้แก่ กฎข้อที่ 15, 21 และ กฎข้อที่ 22

- กฎข้อที่ 15 คือ ถ้าขนาดความยาวของชิ้นงานอยู่ระดับ “สูง” ปริมาตรของชิ้นงานอยู่ระดับ “กลาง” และปริมาณพื้นที่ผิวชิ้นงานอยู่ระดับ “สูง” ดังนั้นระดับเอาต์พุตปัมสีอยู่ในระดับ “กลาง”
- กฎข้อที่ 21 คือ ถ้าขนาดความยาวของชิ้นงานอยู่ระดับ “สูง” ปริมาตรของชิ้นงานอยู่ระดับ “กลาง” และปริมาณพื้นที่ผิวชิ้นงานอยู่ระดับ “กลาง” ดังนั้นระดับเอาต์พุตปัมสีอยู่ในระดับ “กลางสูง”

- กฎข้อที่ 22 คือ ถ้าขนาดความยาวของชิ้นงานอยู่ระดับ “สูง” ปริมาตรของชิ้นงานอยู่ระดับ “สูง” และปริมาณพื้นที่ผิวชิ้นงานอยู่ระดับ “กลาง” ดังนั้นระดับอัตราปัมส์อยู่ในระดับ “กลางสูง”

2) พิจารณาระดับความเป็นสมาชิกของข้อมูลนำเข้าหรืออินพุต

โดยค่าระดับความเป็นสมาชิกของข้อมูลนำเข้าของ ความยาวชิ้นงาน ปริมาตร และพื้นที่ผิวของชิ้นงานแสดงได้ดังรูปที่ 4.9

3) อนุমানระดับความเป็นสมาชิกโดยใช้ตัวดำเนินการค่าต่ำสุด

ขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาพิจารณาระดับความเป็นสมาชิก โดยพิจารณาจากระดับความเป็นสมาชิกของข้อมูลนำเข้าแต่ละกฎพีซซีโดยเชื่อมระดับความเป็นสมาชิกของแต่ละข้อมูลนำเข้าด้วยคำสั่ง “and” ซึ่งใช้หลักการอินเตอร์เซกชันของทฤษฎีเซตหรือเลือกระดับความเป็นสมาชิกที่มีค่าต่ำที่สุดโดยผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.9 ซึ่งจากรูปจะพบว่า

- กฎข้อที่ 15 ระดับความเป็นสมาชิกที่น้อยที่สุดคือ ค่าระดับความเป็นสมาชิกของพื้นที่ผิวชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 0.215
- กฎข้อที่ 21 ระดับความเป็นสมาชิกที่น้อยที่สุดคือ ค่าระดับความเป็นสมาชิกของปริมาตรชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 0.242
- กฎข้อที่ 22 ระดับความเป็นสมาชิกที่น้อยที่สุดคือ ค่าระดับความเป็นสมาชิกของปริมาตรชิ้นงาน 0.436

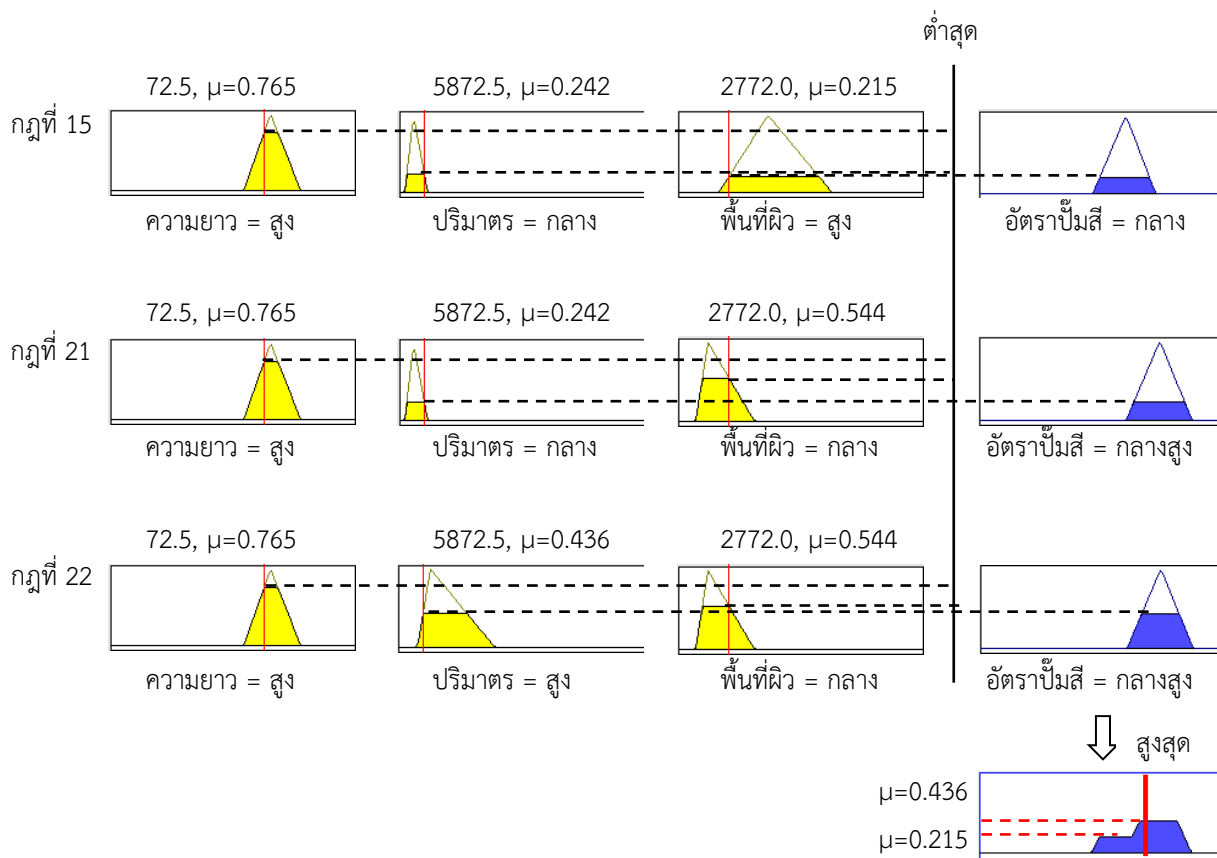
4) กำหนดค่าระดับความเป็นสมาชิกของคำตอบ

โดยการนำค่าความเป็นสมาชิกของข้อมูลนำเข้าต่ำสุดในแต่ละกฎพีซซีจากขั้นตอนที่ 3 ข้างต้น โดยเซตคำตอบที่ได้ในแต่ละกฎจะมีค่าเท่ากับค่าความเป็นสมาชิกต่ำสุดของข้อมูลนำเข้าของระบบ โดยที่แต่ละกฎค่าความเป็นสมาชิกของคำตอบที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 4.9 สรุปได้ดังนี้

- กฎข้อที่ 15 ระดับความเป็นสมาชิกของอัตราปัมส์มีค่าเท่ากับระดับความเป็นสมาชิกของพื้นที่ผิวของชิ้นงานคือมีค่าเท่ากับ 0.215
- กฎข้อที่ 21 ระดับความเป็นสมาชิกของอัตราปัมส์มีค่าเท่ากับระดับความเป็นสมาชิกของปริมาตรของชิ้นงานคือมีค่าเท่ากับ 0.242
- กฎข้อที่ 22 ระดับความเป็นสมาชิกของอัตราปัมส์มีค่าเท่ากับระดับความเป็นสมาชิกของปริมาตรของชิ้นงานคือมีค่าเท่ากับ 0.436

5) รวมฟังก์ชันแสดงระดับความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต

ขั้นตอนนี้เป็นกรรวมระดับความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตทั้ง 3 กฎ โดยใช้ตัวดำเนินการค่าสูงสุด (maximum operator) ซึ่งเชื่อมประโยคแบบ “or” โดยอาศัยหลักการยูเนียนของทฤษฎีเซต หรือเป็นการเลือกค่าระดับความเป็นสมาชิกสูงสุดในการรวมกฎ ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การอนุมานกฎฟัซซีของอัตราปั๊มสี

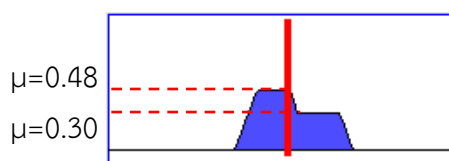
4.1.4 ผลการทำค่าฟัซซีให้เป็นค่าปกติ (defuzzification)

ขั้นตอนนี้เป็นกรแปลงฟัซซีเอาต์พุตจากการอนุมานหรือการรวมกฎในขั้นตอนที่ 4.1.3 ให้เป็นค่าเอาต์พุตที่ชัดเจน (crisp value) นั่นคือความเร็วของสายพานการผลิตและอัตราปั๊มสี สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการหาจุดศูนย์กลางถ่วง (centroid) หรือ center of gravity (COG) ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย โดยที่จุดศูนย์กลางถ่วงรวมสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟของผลลัพธ์จากการอนุมานโดยที่ผลลัพธ์ดังกล่าวถูกแบ่งส่วนพื้นที่เป็นรูปร่างเรขาคณิตมาตรฐาน ได้แก่ สามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมคางหมู เป็นต้น จากนั้นค่าศูนย์กลางถ่วงโดยรวมจะถูกคำนวณจากผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟคูณกับจุดศูนย์กลางของพื้นที่ใต้กราฟนั้นๆ หาค่าด้วยผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.15

$$Z_{COG} = \frac{\sum_i^n (\text{area}_i \times \text{center}_i)}{\sum_i^n \text{area}_i}$$

4.1.4.1 ผลการแปลงค่าพีชชีเป็นค่าจริงของความเร็วสายพานการผลิต

จากขั้นตอนการรวมฟังก์ชันแสดงระดับความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต จะได้ฟังก์ชันรวมของการแสดงระดับความเป็นสมาชิกของความเร็วสายพานการผลิตดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ค่าพีชชีรวมของความเร็วสายพาน

จากรูปที่ 4.10 สามารถแบ่งพื้นที่ของค่าพีชชีรวมของความเร็วสายพานได้ 6 พื้นที่ย่อยเพื่อความสะดวกในการคำนวณหาค่าจริงของเอาต์พุตด้วยวิธีการหาจุดศูนย์กลางถ่วงโดยมีค่าพื้นที่และจุดศูนย์กลางดังนี้

- พื้นที่ที่ 1 มีค่าพื้นที่และจุดศูนย์กลางเท่ากับ 0.282 และ 22.865 ตามลำดับ
- พื้นที่ที่ 2 มีค่าพื้นที่และจุดศูนย์กลางเท่ากับ 0.879 และ 24.537 ตามลำดับ
- พื้นที่ที่ 3 มีค่าพื้นที่และจุดศูนย์กลางเท่ากับ 0.020 และ 25.511 ตามลำดับ
- พื้นที่ที่ 4 มีค่าพื้นที่และจุดศูนย์กลางเท่ากับ 0.065 และ 25.547 ตามลำดับ
- พื้นที่ที่ 5 มีค่าพื้นที่และจุดศูนย์กลางเท่ากับ 0.694 และ 26.813 ตามลำดับ
- พื้นที่ที่ 6 มีค่าพื้นที่และจุดศูนย์กลางเท่ากับ 0.094 และ 28.18 ตามลำดับ

แทนค่าในสมการที่ 2.14 จะได้

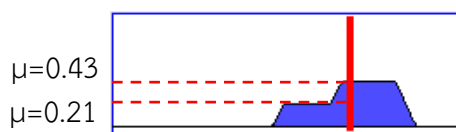
$$Z_{COG} = \frac{[(0.282 \times 22.865)+(0.879 \times 24.537)+(0.020 \times 25.511)+ (0.065 \times 25.547)+(0.694 \times 26.813)+(0.094 \times 28.18)]}{[0.282+0.879+0.020+0.065+0.694+0.094]}$$

$$Z_{COG} = 25.292$$

จากการคำนวณสรุปได้ว่าการแปลงค่าพีชชีของเอาต์พุตเป็นค่าจริงของค่าความเร็วอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมความเร็วสายพานการผลิตด้วยวิธีการหาจุดศูนย์กลางถ่วงทำให้ได้ค่าจริงที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิคพีชชีลอจิกมีค่าเท่ากับ 25.30 เฮิร์ตซ์

4.1.4.2 ผลการแปลงค่าฟuzzyเป็นค่าจริงของอัตราป้อนสี

จากขั้นตอนการรวมฟังก์ชันแสดงระดับความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต จะได้ฟังก์ชันรวมของการแสดงระดับความเป็นสมาชิกของอัตราป้อนสีดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ค่าฟuzzyรวมของอัตราป้อนสี

จากรูปที่ 4.11 สามารถแบ่งพื้นที่ของค่าฟuzzyรวมของอัตราป้อนสีได้ 6 พื้นที่ย่อยเพื่อความสะดวกในการคำนวณหาค่าจริงของเอาต์พุตด้วยวิธีการหาจุดศูนย์กลางถ่วงโดยมีค่าแต่ละพื้นที่และจุดศูนย์กลางดังนี้

- พื้นที่ที่ 1 มีค่าพื้นที่และจุดศูนย์กลางเท่ากับ 0.116 และ 45.361 ตามลำดับ
- พื้นที่ที่ 2 มีค่าพื้นที่และจุดศูนย์กลางเท่ากับ 0.866 และ 48.097 ตามลำดับ
- พื้นที่ที่ 3 มีค่าพื้นที่และจุดศูนย์กลางเท่ากับ 0.012 และ 50.148 ตามลำดับ
- พื้นที่ที่ 4 มีค่าพื้นที่และจุดศูนย์กลางเท่ากับ 0.024 และ 50.166 ตามลำดับ
- พื้นที่ที่ 5 มีค่าพื้นที่และจุดศูนย์กลางเท่ากับ 3.338 และ 54.045 ตามลำดับ
- พื้นที่ที่ 6 มีค่าพื้นที่และจุดศูนย์กลางเท่ากับ 0.465 และ 58.578 ตามลำดับ

แทนค่าในสมการที่ 2.14 จะได้

$$Z_{COG} = \frac{[(0.116 \times 45.361) + (0.866 \times 48.097) + (0.012 \times 50.148) + (0.024 \times 50.166) + (3.338 \times 54.045) + (0.465 \times 58.578)]}{[0.116 + 0.866 + 0.012 + 0.024 + 3.338 + 0.465]}$$

$$Z_{COG} = 53.17$$

จากการคำนวณสรุปได้ว่าการแปลงค่าฟuzzyเอาต์พุตเป็นค่าจริงของอัตราป้อนสีด้วยวิธีการหาจุดศูนย์กลางถ่วงทำให้ได้ค่าจริงที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิคฟuzzyลอจิกมีค่าเท่ากับ 53.17 รอบต่อนาที

4.1.5 ผลการทำนายพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี

เทคนิคที่ถูกพัฒนาขึ้นถูกประเมินผลความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบกับผลการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีโดยผู้เชี่ยวชาญ ในการประเมินผลการปรับค่าพารามิเตอร์เมื่อลักษณะของชิ้นงานเปลี่ยนไป เบื้องต้นชิ้นงานจำนวน 48 ตัวอย่างสำหรับการเรียนรู้ของระบบ และจำนวน 12 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบระบบ โดยกำหนดให้การปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของพนักงานมีค่า

ความถูกต้อง 100 % ซึ่งผลการประเมินแสดงดังตารางที่ 4.10 และ 4.11 (แสดงรายละเอียดผลการ
ทำนายพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีทั้ง 48 ตัวอย่างในภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.10 ผลการทำนายพารามิเตอร์กระบวนการพ่นสีสำหรับข้อมูลเรียนรู้ของระบบ

ชั้น ที่	ยาว (ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	พื้นที่ผิว (ตร.ซม.)	ความถี่อินเวอร์เตอร์ (เฮิร์ตซ์)			อัตราป้อนสี (รอบต่อนาที)		
				ข้อมูล จริง	ผลการ ทำนาย	คลาดเคลื่อน (%)	ข้อมูล จริง	ผลการ ทำนาย	คลาดเคลื่อน (%)
1	13.3	372.4	481.6	29.94	29.4	1.80	45.0	44.0	2.22
2	14.0	126.0	186.0	28.22	29.4	4.18	45.0	45.0	0.00
3	20.0	360.0	476.0	28.2	29.4	4.26	45.0	44.2	1.78
4	25.0	630.0	780.4	26.73	28.3	5.87	40.0	39.1	2.25
5	26.4	847.44	1273.3	25.68	26.8	4.36	45.0	42.9	4.67
6	26.4	285.12	480.9	29.64	29.4	0.81	45.0	44.0	2.22
7	30.0	450.0	720.0	28.85	28.0	2.95	39.0	40.8	4.62
8	30.0	2250.0	2100.0	31.77	29.1	8.40	40.0	37.4	6.50
9	32.5	438.75	709.5	25.34	27.1	6.95	45.0	42.0	6.67
10	32.5	260.0	406.0	29.83	29.4	1.44	40.0	41.3	3.25
11	36.5	1040.25	1290.7	25.6	26.8	4.69	54.0	53.9	0.19
12	39.7	277.9	450.7	28.62	29.4	2.73	39.0	39.2	0.51
13	40.0	510.0	761.5	24.4	24.4	0.00	45.0	44.9	0.22
14	41.2	288.4	467.2	28.78	29.1	1.11	40.0	39.5	1.25
.
.
.
47	110.0	9900.0	10520	25.0	23.8	4.80	60.0	59.8	0.33
48	115.0	58937.5	13330	16.23	17.9	10.29	55.0	55.0	0.00
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)						4.57			3.67

ตารางที่ 4.11 ผลการทำนายพารามิเตอร์สำหรับข้อมูลในการทดสอบระบบ

ขั้น ที่	ยาว (ชม.)	ปริมาตร (ลบ.ชม)	พื้นที่ผิว (ตร.ชม)	ความถี่อินเวอร์เตอร์ (เฮิร์ตซ์)			อัตราปั๊มสี (รอบต่อนาที)		
				ข้อมูล จริง	ผลการ ทำนาย	คลาดเคลื่อน (%)	ข้อมูล จริง	ผลการ ทำนาย	คลาดเคลื่อน (%)
1	18.0	324.0	432.0	28.41	29.4	3.48	40.0	45.0	12.50
2	26.0	208.0	328.0	28.96	29.4	1.52	45.0	45.0	0.00
3	35.5	284.0	442.0	27.64	29.4	6.37	35.0	39.9	14.00
4	40.6	527.8	716.2	25.62	26.4	3.04	45.0	44.9	0.22
5	43.0	688.0	720.0	30.62	28.5	6.92	45.0	44.9	0.22
6	59.0	944.0	976.0	24.45	22.6	7.57	50.0	52.2	4.40
7	64.5	1380.3	1681.1	26.86	25.9	3.57	45.0	42.1	6.44
8	71.0	1192.8	1283.2	27.22	26.0	4.48	45.0	43.0	4.44
9	75.0	5040.0	5474.4	22.96	19.8	13.76	50.0	49.8	0.40
10	78.5	5102.5	5546.5	20.41	19.8	2.99	55.0	49.8	9.45
11	99.6	796.8	1211.2	25.54	24.4	4.46	45.0	49.8	10.67
12	112.6	3265.4	3773.8	20.0	19.8	1.00	56.0	55.0	1.79
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)						4.93			5.38

จากผลการทำนายพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีที่มีการปรับตั้งเมื่อขึ้นงานมีลักษณะทางเรขาคณิตที่เปลี่ยนไปคือความเร็วสายพานการผลิตและอัตราปั๊มสีพบว่า การใช้เทคนิคพีซีซีในการทำนายข้อมูลซึ่งถูกแบ่งออกเป็นสองชุดข้อมูล คือข้อมูลสำหรับการสร้างกฎ จำนวน 48 ข้อมูล และทดสอบระบบ จำนวน 12 ข้อมูล พบว่าข้อมูลสำหรับใช้สร้างกฎเมื่อนำมาทำนายด้วยเทคนิคพีซีซีที่สร้างขึ้น ความเร็วสายพานการผลิต และอัตราปั๊มสี มีค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 4.57% และ 3.67% ตามลำดับ สำหรับข้อมูลชุดที่ใช้ทดสอบระบบผลจากการทำนายความเร็วสายพานและอัตราปั๊มสีด้วยเทคนิคพีซีซีมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 4.93% และ 5.38% ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์พบว่า ความคลาดเคลื่อนของผลการทำนายส่วนหนึ่งเกิดจาก

1) ความไม่แน่นอนและไม่สม่ำเสมอของเกณฑ์ตัดสินใจในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีของพนักงานประจำเครื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อโรงงานกรณีศึกษามีพนักงานที่ทำหน้าที่นี้ 2 คนด้วยกัน

2) ลักษณะของชิ้นงาน เติสซี และความหนืดของสีที่มีความหลากหลาย

3) ความไม่แน่นอนของคุณภาพเนื้อไม้ รวมถึงประสิทธิภาพของเครื่องพ่นสี

ซึ่งเงื่อนไขเหล่านี้จะต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญของพนักงานประจำเครื่อง โดยที่ผู้ประกอบการไม่มีกฎเกณฑ์หรือข้อกำหนดตายตัวที่เป็นมาตรฐานในการปรับตั้ง ดังนั้นจึงทำให้การสร้างกฎและพัฒนาระบบในการทำนายมีความยุ่งยากและซับซ้อน ส่งผลให้การทำนายค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีและปริมาณสีที่ใช้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น

4.2 วิเคราะห์ปริมาณสีที่ใช้ต่อชิ้นงาน

ปริมาณสีที่ใช้คือปริมาณสีทั้งหมดที่ใช้ในการพ่นชิ้นงานซึ่งประกอบด้วยปริมาณสีที่เกาะบนผิวชิ้นงานและปริมาณสีที่สูญเสียในกระบวนการพ่น การวิเคราะห์ปริมาณสีที่ใช้ทำได้โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณปริมาณสีจากค่าพารามิเตอร์ของเครื่องพ่นสีคือความถี่อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมความเร็วสายพานการผลิตและอัตราป้อนสี ทฤษฎีในการคำนวณแสดงได้ในบทที่ 3 ในหัวข้อที่ 3.1 และสมการที่ใช้คำนวณคือสมการที่ 3.1 ถึง 3.4 และค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนคำนวณได้จากสมการที่ 2.26 สามารถแสดงตัวอย่างวิธีการคำนวณ และผลที่ได้จากการวิเคราะห์หาปริมาณสีของชิ้นงานได้ดังตารางที่ 4.12

4.2.1 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณการใช้สี

1) คุณสมบัติของชิ้นงาน

ชื่อชิ้นงาน: โมนาสเทเบิล (monaz table)

ชื่อชิ้นส่วน: แผ่นสไลด์กลาง (middle slide)

ขนาดชิ้นงาน หน้ากว้าง×ยาว (ซม.): 2.8×6.0×71.0

ค่าคุณลักษณะของชิ้นงาน: ความยาว = 71.0 ซม, ปริมาตร = 1192.8 ลบ.ซม.

และพื้นที่ผิวชิ้นงาน = 1283.2 ตร.ซม.

ปริมาณสีที่ใช้จริงต่อชิ้น = 0.087 ลิตร/ชิ้น

2) พารามิเตอร์กระบวนการพ่นสี

ความถี่อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมความเร็วสายพาน (conveyor speed) = 26 เฮิร์ตซ์

อัตราปั๊มสี (pump rate) = 43 รอบ/นาที

$$3) \text{ อัตราปั๊มสี (pump flow rate) ; } Q_2 = \frac{Q_1 N_1}{N_2}$$

$$Q_2 = \frac{(0.528 \text{ ลิตร/นาที}) (54 \text{ รอบ/นาที})}{(43 \text{ รอบ/นาที})}$$

$$Q_2 = 0.66 \text{ ลิตร/นาที}$$

$$4) \text{ ความเร็วสายพานการผลิตจริง (conveyor speed) = } \frac{120 \times \text{VFD} \times \text{Diameter}_p \times \text{Pi}}{P_m \times I}$$

$$= \frac{120 \times 25 \times 0.508 \times 3.14}{4 \times 200}$$

$$= 6.220 \text{ เมตร/นาที}$$

$$5) \text{ อัตราการผลิต (production rate) = ความเร็วสายพานการผลิตจริง} \times \text{อัตราป้อนชิ้นงาน}$$

$$= (6.220 \text{ เมตร/นาที}) \times (1.5 \text{ ชิ้น/เมตร})$$

$$= 9.33 \text{ ชิ้น/นาที}$$

$$6) \text{ ปริมาณการใช้สีต่อชิ้น} = \frac{\text{อัตราปั๊มสี/อัตราการผลิต}}{9.33}$$

$$= \frac{0.66}{9.33}$$

$$= 0.071 \text{ ลิตร/ชิ้น}$$

$$7) \text{ เปอร์เซ็นความคลาดเคลื่อน} = \left| \frac{(\text{ปริมาณสีที่ใช้จริง} - \text{ปริมาณสีจากการคำนวณ})}{\text{ปริมาณสีที่ใช้จริง}} \right| \times 100$$

$$= \left| \frac{(0.087 - 0.071)}{0.087} \right| \times 100$$

$$= 18.32 \%$$

ผลการคำนวณที่ได้ปริมาณสีที่ใช้ในกระบวนการพ่นของชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 0.071 ลิตร ต่อชิ้น และเมื่อคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเปรียบเทียบกับปริมาณสีที่ใช้จริงที่ได้จากการเก็บ ข้อมูลมีค่าเท่ากับ 18.32 % แสดงผลการวิเคราะห์ของชิ้นงานทดสอบ 12 ตัวอย่าง ได้ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลการคำนวณปริมาณการใช้สีของชิ้นงานตัวอย่าง

ชิ้น ที่	ยาว (ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	พื้นที่ผิว (ตร.ซม.)	ความถี่ อินเวอร์เตอร์ (เฮิรตซ์)	อัตราป่นสี (รอบ/นาที)	อัตราการใช้สี (ลิตร/ชิ้น)		
						ข้อมูล จริง	ผลการ ทำนาย	คลาดเคลื่อน (%)
1	18.0	324.0	432.0	29.4	45.0	0.078	0.060	23.02
2	26.0	208.0	328.0	29.4	45.0	0.074	0.060	18.86
3	35.5	284.0	442.0	29.4	39.9	0.086	0.068	21.25
4	40.6	527.8	716.2	26.4	44.9	0.084	0.067	20.21
5	43.0	688.0	720.0	28.5	44.9	0.079	0.062	21.42
6	59.0	944.0	976.0	22.6	52.2	0.084	0.067	19.83
7	64.5	1380.3	1681.1	25.9	42.1	0.092	0.073	20.81
8	71.0	1192.8	1283.2	26.0	43.0	0.087	0.071	18.32
9	75.0	5040.0	5474.4	19.8	49.8	0.097	0.081	16.94
10	78.5	5102.5	5546.5	19.8	49.8	0.104	0.081	22.53
11	99.6	796.8	1211.2	24.4	49.8	0.085	0.065	23.08
12	112.6	3265.4	3773.8	19.8	55.0	0.092	0.073	21.05
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)							20.61	

จากตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณสีที่ใช้ต่อชิ้นในกระบวนการพ่นสี พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของชิ้นงานตัวอย่างสำหรับทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นทั้งหมด 12 ตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 20.61 %

จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่า ความคลาดเคลื่อนของผลการวิเคราะห์ปริมาณสีที่ใช้เกิดจาก

1) ความคลาดเคลื่อนจากผลการทำนายค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์

2) การใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณปริมาณสีที่ใช้โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นการคำนวณในกรณีที่สามารถทำการผลิตได้อย่างเต็มประสิทธิภาพหรืออุดมคติ แต่ในกระบวนการผลิตจริงไม่สามารถที่จะดำเนินการผลิตได้เต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากอายุการใช้งานที่ยาวนานของเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ เช่น เครื่องพ่นสี ปืนที่ใช้สำหรับดูดสี สายพานลำเลียง มอเตอร์สำหรับขับสายพาน เป็นต้น

3) ความสูญเสียของสีที่เกิดขึ้นในกระบวนการพ่นสี เกิดจากประสิทธิภาพของเครื่องจักรและการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสมของพนักงานประจำเครื่องทำให้ปริมาณสีที่ออกจากหัวพ่นไม่ได้เกาะบนผิวชิ้นงานทั้งหมด

ดังนั้นแนวทางหนึ่งในการนำไปประยุกต์ใช้คือการประเมินปริมาณสีมากกว่าที่ทำนายไว้เป็นปริมาณโดยเฉลี่ย 20 เปอร์เซ็นต์

แนวทางในการพัฒนาระบบในอนาคตให้มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้นสามารถทำได้ โดย การเพิ่มปัจจัยข้อมูลนำเข้าของระบบที่คาดว่าจะมีผลต่อการตัดสินใจของพนักงานเช่น ความหนืดของสี แรงดันลมในการพ่นสี ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวพ่น เป็นต้น และการเพิ่มจำนวนชิ้นงานตัวอย่างสำหรับเป็นฐานข้อมูลของระบบในการสร้างกฎในการทำนายซึ่งจะทำให้กฎที่ได้สอดคล้องกับเกณฑ์ในการตัดสินใจของพนักงานมากที่สุด ส่งผลให้ระบบที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณสีที่ใช้ในกระบวนการพ่นสีก่อนทำการผลิตจริง และสามารถทำนายค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีที่เหมาะสม ซึ่งจะสามารถช่วยให้ผู้ประกอบการประเมินต้นทุนของผลิตภัณฑ์ล่วงหน้าได้อย่างแม่นยำและรวดเร็วก่อนทำการผลิตจริง ในกรณีที่ผู้ประกอบการได้รับคำสั่งซื้อเป็นผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่ที่ยังไม่เคยทำการผลิตและประเมินต้นทุนมาก่อน

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระเบียบวิธีในการประเมินปริมาณสีและต้นทุนสีของผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ยางพาราด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ จากการสำรวจพบว่าปริมาณการใช้สีของโรงงานกรณีศึกษา เกิดจากการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีที่มีการปรับตั้งใหม่ทุกครั้งเมื่อลักษณะทางเรขาคณิตของชิ้นงานเปลี่ยนไป จากการเข้าไปศึกษากระบวนการพ่นสีของโรงงานกรณีศึกษาพบว่า ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีที่ส่งผลต่อปริมาณการใช้สีต่อชิ้นที่ผลิตได้ คือ ความเร็วสายพานการผลิต และ อัตราป้อนสี ทางผู้วิจัยจึงเสนอการนำเทคนิคการประมวลผลภาพมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะทางเรขาคณิตของชิ้นงาน เพื่อนำมาเป็นข้อมูลของระบบที่พัฒนาขึ้นในการทำนายพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี และนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณการใช้สีและต้นทุนสีของชิ้นงาน ในการพัฒนาเทคนิคในส่วนแรกผู้วิจัยเริ่มจากการพัฒนาอัลกอริทึมเพื่อวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะทางเรขาคณิตของชิ้นงานที่คาดว่าจะมีผลต่อการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ ประกอบด้วย 6 คุณลักษณะคือ ความยาว ความกว้าง ความสูง เส้นรอบรูป ปริมาตร และพื้นที่ผิวชิ้นงาน ส่วนที่สองนำค่าคุณลักษณะชิ้นงานที่ได้มาเป็นข้อมูลทำนายพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี เริ่มจากใช้สมการถดถอยในการทำนายโดยเลือกตัวแปรอิสระที่มีความเหมาะสมโดยวิธีเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (stepwise regression) ในการกำจัดตัวแปรค่าคุณลักษณะชิ้นงานที่ไม่มีผลต่อค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีผลที่ได้คือเหลือพื้นที่ผิวของชิ้นงานเพียงตัวแปรเดียว และจากการใช้สมการถดถอยแบบเส้นโค้งโพลีโนเมียลกำลังสองในการทำนาย ความเร็วสายพานการผลิต และอัตราป้อนสี ผลจากการวิเคราะห์พบว่าผลการทำนายได้ให้ค่าความถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 45% และ 32.8% ตามลำดับ ต่อมาเลือกใช้เทคนิคฟuzzyลอจิกในการทำนายพบว่าข้อมูลนำเข้าของระบบฟuzzyที่เหมาะสม คือข้อมูลที่สามารถแสดงถึง ขนาดรูปร่างภายนอกของชิ้นงาน ความซับซ้อน ซึ่งข้อมูลนำเข้าที่ได้ประกอบด้วย 3 คุณลักษณะคือ ความยาว ปริมาตร และพื้นที่ผิวชิ้นงาน ซึ่งข้อมูลนำเข้าทั้ง 3 จากการวิเคราะห์พบว่ามีความเหมาะสมและเพียงพอต่อการทำนายพารามิเตอร์กระบวนการพ่นสีด้วยเทคนิคฟuzzyลอจิก ผลจากการทำนายความเร็วสายพานการผลิต และอัตราป้อนสี ได้ให้ค่าความถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 95.07 % และ 94.62 % ตามลำดับ ผลการทำนายที่ได้จากเทคนิคฟuzzyลอจิกให้ค่าความถูกต้องสูงกว่าการทำนายด้วยสมการถดถอยมาก เนื่องจาก เทคนิคฟuzzyลอจิกเหมาะสำหรับวิเคราะห์หรือทำนายผลในกรณีที่ปัจจัยมีความไม่แน่นอน มีความซับซ้อนของข้อมูล แต่จะอาศัยการจำลองความรู้ หรือประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ โดยการใช้เหตุผล ส่วนที่สามนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้คำนวณหาปริมาณสี

ที่ใช้ต่อขึ้นด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของชิ้นงานตัวอย่างสำหรับทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นทั้งหมด 12 ตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 20.61 % จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่า ความคลาดเคลื่อนของผลการวิเคราะห์ปริมาณสีที่ใช้เกิดจาก ความคลาดเคลื่อนของผลการทำนายค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี การใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณปริมาณสีดังกล่าวข้างต้น ซึ่งเป็นการคำนวณในกรณีที่สามารถทำการผลิตได้อย่างเต็มประสิทธิภาพหรืออุดมคติ แต่ในกระบวนการผลิตจริงไม่สามารถที่จะดำเนินการผลิตได้เต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากอายุการใช้งานที่ยาวนานของเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ เช่น เครื่องพ่นสี ปืนที่ใช้สำหรับดูดสี สายพานลำเลียงมอเตอร์สำหรับขับสายพาน และความสูญเสียของสีที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการประเมินปริมาณสีที่ใช้ในกระบวนการพ่นสี

5.2 ข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัย

ในการทำนายพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี หรือกระบวนการผลิตอื่นๆ ยังมีอีกหลายเทคนิคที่น่าสนใจและได้รับความนิยมน้อยกว่าหลาย เช่น เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม (neural network) การทำงานร่วมกันของโครงข่ายประสาทเทียมและฟัซซี่ลอจิก (neuro-fuzzy) และระบบผู้เชี่ยวชาญ (expert system) เป็นต้น โดยแต่ละเทคนิคมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะของข้อมูลและประเภทของงานนั้นๆ ดังนั้นหากผู้วิจัยต้องการพัฒนาผลการทำนายให้มีความถูกต้องแม่นยำและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น สามารถนำเทคนิคดังกล่าวข้างต้นมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่อไปในอนาคตได้

บรรณานุกรม

- [1] กระทรวงการค้า, “Thailand Trading Report,” กรมการค้าระหว่างประเทศ, 30-Jul-2013. [Online]. Available: <http://www.google.co.th>.
- [2] สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, “มูลค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์ไม้ยางพารา,” สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, 30-Jul-2013. [Online]. Available: http://www.ops3.moc.go.th/thtrade/yearly_bal.
- [3] S. Datta, “Modeling of plasma spray coating process using statistical regression analysis,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 2013, no. 66, pp. 967–980.
- [4] T. Goyal, “Multi-response optimization of low-pressure cold-sprayed coatings through Taguchi method and utility concept,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 2013, no. 64, pp. 903–914.
- [5] M. A. S. Arkan and T. Balkan, “Process modeling, simulation, and paint thickness measurement for robotic spray painting,” *J. Robot. Syst.*, vol. 2000, no. 17, pp. 479–494.
- [6] M. Plesniak, “Transfer efficiency for airless painting systems,” *JCT Res.*, vol. 2004, no. 1, pp. 137–145.
- [7] P. Annaruemon and C. Supapan, “A Fuzzy Time-Driven Activity-Based Costing Model in an Uncertain Manufacturing Environment,” *Proc. Asia Pac. Ind. Eng. Manag. Syst. Conf.*
- [8] J. Pine, H. Gilmore, and J. Boynton, “Making Mass Customization Work,” *Harv. Bus. Rev.*, vol. 1993, no. 71(5), pp. 108–118.
- [9] M. . Tseng and J. Jiao, *Mass Customization*, in *Handbook of Industrial Engineering*, vol. 2007. John Wiley & Sons.
- [10] G. Silveira, D. Borenstein, and F. Fogliatto, “Mass customization: Literature review and research directions,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 2001, no. 72, pp. 1–13.
- [11] T. Blecker and N. Abdelkafi, “Complexity and variety in mass customization systems: analysis and recommendations,” *Manag. Decis.*, vol. 2006, no. 44, pp. 908–929.
- [12] Lampel, “Customizing Customization,” 18-Mar-2013. [Online]. Available: <http://www.scribd.com/doc/86381372/Lampel-Customizing-Customization>.

- [13] G. Qiao, R. . Lu, and C. McLean, “Flexible manufacturing systems for mass customisation manufacturing,” *Int. J. Mass Cust.*, vol. Jan. 2006, no. 1, pp. 374–393.
- [14] Frohlich and J. . Dixon, “A taxonomy of manufacturing strategies revisited,” *J. Oper. Manag.*, vol. 2001, no. 19(5), pp. 541–558.
- [15] W. Marx, D. Mavris, and D. Schrage, “A knowledge-based system integrated with numerical analysis tools for aircraft life-cycle design,” *AI EDAM*, vol. 1998, no. 12, pp. 211–229.
- [16] C.-N. M, D. L. V. J, and W. P.A, “An intelligent knowledge-based system for cost estimating in the make-to-order environment,” *Comput.-Aided Eng. J.*, vol. 2002, no. 6, pp. 121–127, Aug.
- [17] E. M. Shehab and H. S. Abdalla, “Manufacturing cost modelling for concurrent product development,” *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, vol. 2001, no. 17, pp. 341–353.
- [18] F.-C. Yuan, “The use of a fuzzy logic-based system in cost-volume-profit analysis under uncertainty,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 2009, no. 36, pp. 1155–1163.
- [19] P. L. P. Wasantha, “Constitutive models describing the influence of the geometry of partially-spanning joints on jointed rock mass strength: Regression and fuzzy logic analysis of experimental data,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 2012, no. 39, pp. 7663–7672.
- [20] H. Fazlollahtabar and N. Mahdavi-Amiri, “Design of a neuro-fuzzy–regression expert system to estimate cost in a flexible jobshop automated manufacturing system,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 2012, pp. 1–15.
- [21] Y. F. Zhang, “Feature-based cost estimation for packaging products using neural networks,” *Comput. Ind.*, vol. 1996, no. 32, pp. 95–113.
- [22] B. Verlinden, “Cost estimation for sheet metal parts using multiple regression and artificial neural networks,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 2008, no. 111, pp. 484–492.

- [23] S. Cavalieri, P. Maccarrone, and R. Pinto, "Parametric vs. neural network models for the estimation of production costs: A case study in the automotive industry," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 2004, no. 91, pp. 165–177.
- [24] A. C. Caputo and P. M. Pelagagge, "Parametric and neural methods for cost estimation of process vessels," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 2008, no. 112, pp. 934–954.
- [25] K. H, ten B. E, and L. E, "Integrated cost estimation based on information management," *Prod. Eng. Dev. Ger. WGP-Annalen*, vol. 1999, no. 6, pp. 125–130.
- [26] B. . Kingsman and A. Souza, "A knowledge-based decision support system for cost estimation and pricing decisions in versatile manufacturing companies," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 1997, no. 53, pp. 119–139.
- [27] P. C. Annaruemon and C. Supapan, "A Fuzzy Time-Driven Activity-Based Costing Model in an Uncertain Manufacturing Environment," *Proc. Asia Pac. Ind. Eng. Manag. Syst. Conf.*
- [28] R. . Gonzalez, *Digital image processing*, vol. 1992. Addison-Wesley.
- [29] O. Marques, *Practical image and video processing using MATLAB*. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2011.
- [30] B. Song and F. Cui, "Edge Feature Extraction Based on Digital Image Processing Techniques," *Proc. IEEE Int. Conf. Autom. Logist.*, vol. 2008.
- [31] M. Omid, M. Khojastehnazhand, and A. Tabatabaeefar, "Estimating volume and mass of citrus fruits by image processing technique," *J. Food Eng.*, vol. 2010, no. 100, pp. 315–321.
- [32] S. B and S. K, "Image processing method to measure sugarcane leaf area," *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 2011, no. 3(8), pp. 394–400.
- [33] G. Xiong and J. Liu, "Cutting Tool Wear Measurement by Using Active Contour Model Based Image Processing," *Int. Conf. Mechatron. Autom.*, vol. 2011, pp. 670–675.
- [34] K. Forbes, "Volume Estimation of Fruit from Digital Profile Images," degree of Master of Science in Engineering, Cape Town, 2000.

- [35] SAMES, *selection guide Electrostatic Liquid Finishing Solutions*, 1st ed., vol. March 2012. France.
- [36] L. . Zadeh, "Fuzzy sets," *Inf. Control*, vol. 1965, no. 8, pp. 338–353.
- [37] S. . Sivanandam, S. Sumathi, and S. . Deepa, *Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB*, vol. 2007. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [38] M. Braglia, "Designing a belt conveyor controller in a bottling plant using fuzzy logic and genetic algorithms," *Packag. Technol. Sci.*, vol. Dec 2001, no. 14, pp. 231–248.
- [39] B. SDTMB, "Operational optimisation of water supply networks using a fuzzy system," *Water Res. Comm.*, vol. 2012, no. 38, Jul.
- [40] renold, *CONVEYOR CHAIN DESIGNER GUIDE*. engineering excellence.
- [41] R. JOSEPH and POTTEBAUM, "Optimal Characteristics of a Variable-Frequency Centrifugal Pump Motor Drive," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. JANUARY/FEBRUARY 1984, no. IA-20.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีและคุณลักษณะชิ้นงานจากภาพ

ตารางที่ ก-1 ตัวอย่างข้อมูลค่าพารามิเตอร์ และคุณลักษณะของภาพจำนวน 48 ตัวอย่าง

ตัวอย่าง ที่	หนา (ซม.)	กว้าง (ซม.)	ยาว (ซม.)	ความยาว รอบรูป (ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	พื้นที่ผิว (ตร.ซม.)	ความถี่ อินเวอร์เตอร์ (เฮิรตซ์)	อัตราป้อนสี (รอบ/ นาที)
1	2.0	14.0	13.3	54.6	372.4	481.6	29.94	45
2	3.0	3.0	14.0	34	126	186	27.34	54
3	2.0	9.0	20.0	58	360	476	28.20	50
4	2.0	12.6	25.0	75.2	630	780.4	26.73	40
5	1.5	7.2	26.4	67.2	285.12	480.96	26.43	45
6	1.5	21.4	26.4	95.6	847.44	1273.32	25.68	45
7	2.5	30.0	30.0	120	2250	2100	31.77	40
8	1.5	10.0	30.0	80	450	720	28.85	39
9	2.0	4.0	32.5	73	260	406	29.83	40
10	1.5	9.0	32.5	83	438.75	709.5	23.60	40
11	1.9	15.0	36.5	103	1040.25	1290.7	23.30	54
12	2.0	3.5	39.7	86.4	277.9	450.7	28.62	45
13	1.7	7.5	40.0	95	510	761.5	24.40	45
14	2.0	3.5	41.2	89.4	288.4	467.2	26.66	40
15	3.7	14.2	41.4	111.2	2175.156	1587.2	26.04	34
16	2.0	4.5	41.5	92	373.5	557.5	29.22	45
17	1.7	5.7	42.7	96.8	413.763	651.34	25.51	40
18	2.0	45.0	43.0	176	3870	4222	21.04	55
19	2.0	45.5	43.0	177	3913	4267	24.36	50
20	2.0	11.0	43.2	108.4	950.4	1167.2	27.43	50

ตารางที่ ก-1 ตัวอย่างข้อมูลค่าพารามิเตอร์ และคุณลักษณะของภาพจำนวน 48 ตัวอย่าง (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่	หนา (ซม.)	กว้าง (ซม.)	ยาว (ซม.)	ความยาว รอบรูป (ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	พื้นที่ผิว (ตร.ซม.)	ความเร็ว สายพาน (เฮิร์ตซ์)	อัตราป้อนสี (รอบ/นาที)
21	1.5	8.0	43.8	103.6	525.6	856.2	31.32	39
22	5.0	10.0	45.7	111.4	2285	1471	24.53	56
23	1.6	33.0	49.2	164.4	2597.76	3510.24	26.32	55
24	1.2	14.7	51.0	131.4	899.64	1657.08	25.00	40
25	6.5	6.5	59.0	131	2492.75	1618.5	22.26	54
26	1.5	6.8	59.0	131.6	601.8	999.8	22.80	55
27	4.0	36.5	61.0	195	8906	5233	24.65	40
28	9.0	35.5	66.3	203.6	21182.85	6539.7	17.73	56
29	2.0	4.5	69.0	147	621	915	21.63	50
30	2.8	6.0	71.0	154	1192.8	1283.2	27.47	40
31	9.0	9.0	72.5	163	5872.5	2772	20.02	56
32	6.5	6.5	73.4	159.8	3101.15	1992.9	33.40	56
33	2.0	4.0	77.5	163	620	946	32.87	30
34	2.0	4.5	77.5	164	697.5	1025.5	24.62	56
35	1.9	39.1	78.0	234.2	5794.62	6544.58	25.07	56
36	0.6	29.4	78.3	215.4	1381.212	4733.28	25.82	60
37	2.0	35.0	82.4	234.8	5768	6237.6	20.00	50
38	2.0	21.3	82.4	207.4	3510.24	3925.04	20.00	50
39	5.5	28.5	86.5	230	13558.87	6195.5	17.76	54
40	2.0	20.0	90.4	220.8	3616	4057.6	20.00	40
41	11.0	42.5	91.0	267	42542.5	10672	18.69	56
42	7.5	39.5	94.6	268.2	28025.25	9484.9	17.76	54
43	4.5	44.8	99.6	288.8	20079.36	10223.7	18.13	56

ตารางที่ ก-1 ตัวอย่างข้อมูลค่าพารามิเตอร์ และคุณลักษณะของภาพจำนวน 48 ตัวอย่าง (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่	หนา (ซม.)	กว้าง (ซม.)	ยาว (ซม.)	ความยาว รอบรูป (ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	พื้นที่ผิว (ตร.ซม.)	ความเร็ว สายพาน (เฮิร์ตซ์)	อัตราป้อนสี (รอบ/นาที)
44	2.0	15.0	99.6	229.2	2988	3446.4	24.83	50
45	11.5	40.5	99.8	280.6	46481.85	11310.7	20.00	60
46	2.0	4.5	101.0	211	909	1331	24.60	50
47	2.0	45.0	110.0	310	9900	10520	25.00	60
48	12.5	41.0	115.0	312	58937.5	13330	16.23	60

ภาคผนวก ข

ผลการทำนายพารามิเตอร์กระบวนการพ่นสีด้วยเทคนิคพีซีแอลจิก

ตาราง ข-1 ผลการทำนายพารามิเตอร์กระบวนการพ่นสีด้วยเทคนิคพีซีแอลจิก

ชั้นที่	ยาว (ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	พื้นที่ผิว (ตร.ซม.)	ความถี่อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็ว สายพาน (เฮิร์ตซ์)			อัตราป่นสี (รอบต่อนาที)		
				ข้อมูลจริง	ผลการ ทำนาย	คลาดเคลื่อน (%)	ข้อมูล จริง	ผลการ ทำนาย	คลาดเคลื่อน (%)
1	13.3	372.4	481.6	29.9	29.4	1.8	45.0	44.0	2.2
2	14.0	126.0	186.0	28.2	29.4	4.2	45.0	45.0	0.0
3	20.0	360.0	476.0	28.2	29.4	4.3	45.0	44.2	1.8
4	25.0	630.0	780.4	26.7	28.3	5.9	40.0	39.1	2.3
5	26.4	847.4	1273.3	25.7	26.8	4.4	45.0	42.9	4.7
6	26.4	285.1	481.0	29.6	29.4	0.8	45.0	44.0	2.2
7	30.0	450.0	720.0	28.9	28.0	2.9	39.0	40.8	4.6
8	30.0	2250.0	2100.0	31.8	29.1	8.4	40.0	37.4	6.5
9	32.5	438.8	709.5	25.3	27.1	6.9	45.0	42.0	6.7
10	32.5	260.0	406.0	29.8	29.4	1.4	40.0	41.3	3.2
11	36.5	1040.3	1290.7	25.6	26.8	4.7	54.0	53.9	0.2
12	39.7	277.9	450.7	28.6	29.4	2.7	39.0	39.2	0.5
13	40.0	510.0	761.5	24.4	24.4	0.0	45.0	44.9	0.2
14	41.2	288.4	467.2	28.8	29.1	1.1	40.0	39.5	1.3
15	41.4	2175.2	1587.2	24.7	25.3	2.6	34.0	33.3	2.1
16	41.5	373.5	557.5	25.2	27.8	10.3	45.0	41.1	8.7
17	42.7	413.8	651.3	25.5	25.9	1.5	45.0	43.5	3.3
18	43.0	3870.0	4222.0	21.0	22.4	6.5	50.0	49.8	0.4

ตาราง ข-1 ผลการทำนายพารามิเตอร์กระบวนการพ่นสีด้วยเทคนิคพีซีแอลจิก (ต่อ)

ชั้นที่	ยาว (ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	พื้นที่ผิว (ตร.ซม.)	ความถี่อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็ว สายพาน (เฮิร์ตซ์)			อัตราป่นสี (รอบต่อนาที)		
				ข้อมูลจริง	ผลการ ทำนาย	คลาดเคลื่อน (%)	ข้อมูล จริง	ผลการ ทำนาย	คลาดเคลื่อน (%)
19	43.0	3913.0	4267.0	22.6	22.4	0.9	50.0	49.8	0.4
20	43.2	950.4	1167.2	27.4	26.8	2.3	54.0	55.0	1.9
21	43.8	525.6	856.2	24.8	24.4	1.7	45.0	44.9	0.2
22	45.7	2285.0	1471.0	24.5	25.0	1.9	30.0	35.1	17.0
23	49.2	1040.3	1290.7	26.3	25.1	4.6	55.0	47.5	13.6
24	51.0	899.6	1657.1	25.0	25.4	1.6	40.0	45.3	13.3
25	59.0	2492.8	1618.5	22.3	22.7	2.0	54.0	55.0	1.9
26	59.0	601.8	999.8	22.8	22.8	0.0	55.0	50.0	9.1
27	61.0	8906.0	5233.0	24.7	24.4	1.0	40.0	39.4	1.5
28	66.3	21182.9	6539.7	17.7	19.4	9.4	56.0	50.3	10.2
29	69.0	621.0	915.0	25.1	23.5	6.3	50.0	51.9	3.8
30	71.0	1192.8	1283.2	27.5	26.0	5.4	40.0	43.0	7.5
31	72.5	5872.5	2772.0	20.0	25.0	24.9	56.0	53.3	4.8
32	73.4	3101.2	1992.9	33.4	32.0	4.2	56.0	55.0	1.8
33	77.5	697.5	1025.5	24.4	25.0	2.5	50.0	46.5	7.0
34	77.5	620.0	946.0	24.6	24.6	0.1	50.0	48.3	3.4
35	78.0	5794.6	6544.6	25.1	21.6	13.8	56.0	52.0	7.1

ตาราง ข-1 ผลการทำนายพารามิเตอร์กระบวนการพ่นสีด้วยเทคนิคพีซีซีลอจิก (ต่อ)

ชั้นที่	ยาว (ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	พื้นที่ผิว (ตร.ซม.)	ความถี่อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็ว สายพาน (เฮิร์ตซ์)			อัตราป่นสี (รอบต่อนาที)		
				ข้อมูลจริง	ผลการ ทำนาย	คลาดเคลื่อน (%)	ข้อมูล จริง	ผลการ ทำนาย	คลาดเคลื่อน (%)
36	78.3	1381.2	4733.3	25.8	25.3	2.0	60.0	57.9	3.5
37	82.4	3510.2	3925.0	20.0	22.5	12.5	50.0	51.3	2.6
38	82.4	5768.0	6237.6	20.0	21.2	6.0	54.0	53.5	0.9
39	86.5	13558.9	6195.5	17.8	20.1	13.2	54.0	56.6	4.8
40	90.4	3616.0	4057.6	20.0	19.8	1.0	55.0	55.0	0.0
41	91.0	42542.5	10672.0	17.9	17.9	0.0	56.0	55.0	1.8
42	94.6	28025.3	9484.9	17.8	17.9	0.8	55.0	55.0	0.0
43	99.6	20079.4	10223.8	18.1	19.9	9.8	55.0	56.6	2.9
44	99.6	2988.0	3446.4	20.6	19.8	3.9	56.0	55.0	1.8
45	99.8	46481.9	11310.7	18.2	17.9	1.6	56.0	55.0	1.8
46	101.0	909.0	1331.0	24.6	24.4	0.8	50.0	49.8	0.4
47	110.0	9900.0	10520.0	25.0	23.8	4.8	60.0	59.8	0.3
48	115.0	58937.5	13330.0	16.2	17.9	10.3	55.0	55.0	0.0
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)						4.57			3.67

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ทางสถิติด้วยสมการถดถอย (regression analysis)

การวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยเป็นการวิเคราะห์หาปัจจัยหรือตัวแปรอิสระที่มีผลต่อตัวแปรตาม ผลที่ได้คือสมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้ทำนายตัวแปรตามที่เกิดขึ้นได้เมื่อตัวแปรอิสระเปลี่ยนแปลงไป สำหรับงานวิจัยนี้ตัวแปรอิสระคือคุณลักษณะที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลภาพ และตัวแปรตามคือค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี จากขั้นตอนการวิเคราะห์หาคุณลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากการประมวลผลภาพมีทั้งหมด 6 คุณลักษณะที่คาดว่าจะมีผลต่อการปรับค่าพารามิเตอร์ ประกอบด้วย ความหนา ความกว้าง ความยาว ความยาวรอบรูป ปริมาตร และพื้นที่ผิว ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเบื้องต้นเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามหรือการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (correlation analysis) แสดงดังตารางที่ ค-1

จากตารางที่ ค-1 การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ซึ่งใช้วัดความสำคัญของความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรจะมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 หากค่าสัมประสิทธิ์มีค่าเข้าใกล้ -1 หรือ 1 แสดงถึงความสัมพันธ์กันในระดับสูง โดยมีเครื่องหมายบวกและลบหน้าตัวเลขสัมประสิทธิ์จะบอกถึงทิศทางของความสัมพันธ์ ถ้าหากเครื่องหมายเป็นบวกหมายถึงการมีความสัมพันธ์กันไปในทิศทางเดียวกัน และหากมีเครื่องหมายลบหมายถึง การมีความสัมพันธ์กันไปในทิศทางตรงกันข้าม จากตารางที่ 3.5 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากการประมวลผลภาพกับค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสี พบว่าตัวแปรอิสระทั้ง 6 ตัว ประกอบด้วย ความสูง (height) ความกว้าง (width) ความยาว (length) ความยาวรอบรูป (perimeter) ปริมาตร (volume) และพื้นที่ผิว (surface area) มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม คือ ความเร็วสายพานการผลิต (conveyor speed) และ อัตราปั๊มสี (pump rate) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ข้อกำหนดเบื้องต้นของการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณระบุว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (multicollinearity) ด้วยกันจะต้องไม่สูงเกินไป (น้อยกว่า 0.80) จากตาราง ค-1 พบว่าตัวแปรอิสระบางคู่มีความสัมพันธ์กันเองสูงจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องนำตัวแปรอิสระทั้งหมดใส่ในตัวแบบของสมการถดถอยเพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์กันเองระหว่างตัวแปรอิสระ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกตัวแปรอิสระที่มีความเหมาะสมโดยวิธีเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (stepwise regression) ซึ่งเป็นวิธีทดสอบความเหมาะสมตัวแปรอิสระที่นำเข้าสู่สมการทีละตัวโดยเลือกจากตัวแปรที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุด ขั้นตอนต่อไปจะมีการนำตัวแปรอิสระใหม่เข้ามาในสมการและจะทำการทดสอบผลกระทบต่อบางตัวที่อยู่ในสมการก่อนหน้า โดยที่ตัวแปรที่อยู่ก่อนหน้าสามารถถูกกำจัดออกจากสมการได้ หากพบว่าไม่มีความสำคัญทางสถิติในการพยากรณ์ ซึ่งสมการในการทำนายที่ได้จะเป็นรูปแบบย่อที่ประกอบด้วยตัวแปรอิสระที่มีความเหมาะสมที่สุด ผลการวิเคราะห์การเลือกตัวแปรอิสระและการใช้สมการถดถอยในการทำนายค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการพ่นสีแสดงวิธีวิเคราะห์ที่ได้ดังนี้

1) การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับทำนายความถี่อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วสายพาน

ขั้นตอนเริ่มต้นของการวิเคราะห์สมการถดถอยในการทำนายความเร็วสายพานการผลิตเริ่มจากการเลือกตัวแปรอิสระที่เหมาะสมสำหรับสมการถดถอยเชิงเส้นด้วยเทคนิควิธีการเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (stepwise) โดยการกำหนดค่าระดับนัยสำคัญในการเลือกตัวแปรเข้าและออกเท่ากับ 0.05 ($\alpha = 0.05$) โดยที่ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ ค-2

ตารางที่ ค-2 ผลการเลือกตัวแปรอิสระในการทำนายความเร็วสายพานด้วยเทคนิค stepwise

ขั้นตอนการวิเคราะห์ stepwise			ผลการวิเคราะห์ด้วย stepwise						
ตัวแปรอิสระ	ขั้นตอนที่ 1	สิ้นสุด	constant	coefficient t	T-value	P-value	s	R ²	R ² (adj)
height									
width									
surface area	surface area	surface area	27.31	-0.00082	-6.15	0.000	3.16	45.11	43.92
perimeter									
volume									
length									

ตารางที่ ค-2 แสดงผลการวิเคราะห์การเลือกตัวแปรอิสระสำหรับการทำนายค่าความถี่อินเวอร์เตอร์ ผลการวิเคราะห์ของโปรแกรมเริ่มต้นในขั้นตอนที่ 1 ด้วยการเลือกตัวแปรอิสระที่ให้ค่า p-value ที่ต่ำที่สุดพบว่าเป็นพื้นที่ผิวของชิ้นงาน (surface area) ให้ค่า p-value ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.000 และขั้นตอนต่อไปจะทำการเพิ่มตัวแปรที่ให้ค่า p-value น้อยที่สุด และทำการลดตัวแปรก่อนหน้าที่ให้ค่า p-value มากที่สุดตามลำดับ ตารางที่ ค-2 โปรแกรมแสดงผลลัพธ์เพียงขั้นตอนที่ 1 เพราะไม่สามารถเพิ่มหรือลดตัวแปรอิสระตัวอื่นจากตัวแบบได้อีก ดังนั้นตัวแปรอิสระที่เหมาะสมสำหรับสมการถดถอยเชิงเส้นคือ พื้นที่ผิวของชิ้นงาน (surface area) เพียงตัวแปรเดียว การตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมีสมมติฐานดังนี้

H_0 : ตัวแปรอิสระไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม

H_1 : ตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม

สมการถดถอยเชิงเส้นที่ได้จากการกำจัดตัวแปรอิสระที่ไม่มีความสำคัญแสดงได้ดังสมการ

$$Y_1 = 27.3 - 8.17 \times 10^{-4} S$$

จากสมการ Y_1 คือความเร็วสายพานการผลิต S คือ พื้นที่ผิวของชิ้นงาน โดยมีค่าคงที่เท่ากับ 27.3 และค่าสัมประสิทธิ์ของสมการเส้นตรงมีค่าเท่ากับ -8.17×10^{-4} ค่าความถูกต้องของสมการถดถอยในการทำนายความเร็วสายพานการผลิตแสดงได้ในตารางที่ ค-3

เนื่องจากความถูกต้องในการทำนายด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นยังไม่เป็นที่น่าพอใจ ผู้วิจัยจึงได้นำรูปแบบสมการถดถอยเส้นโค้งพหุนามีเดียลกำลังสองมาใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ โดยมีสมการรูปแบบเต็มดังสมการ

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 S^2 + \varepsilon$$

จากสมการ Y_1 คือ ความเร็วสายพานการผลิตเป็นตัวแปรตามโดยมีตัวแปรอิสระคือ พื้นที่ผิวชิ้นงาน (S) พบว่ามีสัมประสิทธิ์ของส่วนที่เป็นสมการเชิงเส้นตรงคือ β_1 และสัมประสิทธิ์ของส่วนที่เป็นสมการกำลังสองคือ β_2 เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแบบนี้โดยกำหนดให้ค่า p-value ถูกคำนวณที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ ค-3 และสมการถดถอยพหุนามีเดียลที่ได้ดังสมการ

$$Y_1 = 28.0 - 1.39 \times 10^{-3} S + 0.5 \times 10^{-8} S^2$$

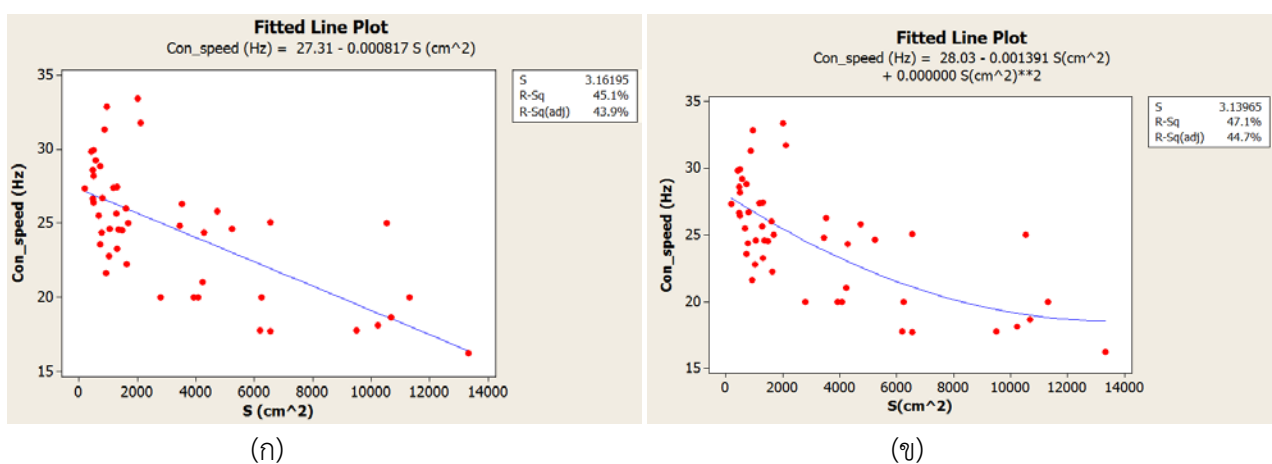
ตารางที่ ค-3 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยของความเร็วยสายพานการผลิต

model	variable	coefficient	p-value	R ²
stepwise regression	constant	27.3084	0.000	45.10%
	s	-0.00082	0.000	
polynomial regression	constant	28.0302	0.000	47.1%
	s	-1.39×10 ⁻³	0.004	
	s ²	0.5×10 ⁻⁸	0.205	

จากตารางที่ ค-3 สำหรับสมการถดถอยเชิงเส้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค stepwise พบว่าตัวแปรอิสระคือพื้นที่ผิวชิ้นงานมีความสัมพันธ์กับความเร็วยสายพานการผลิต เพราะค่า p-value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด ($\alpha = 0.05$) จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก เมื่อพิจารณาค่า R² ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการพยากรณ์ พบว่า R² = 45.10% นั้นหมายความว่า ค่าความเร็วยสายพานการผลิตขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวชิ้นงานประมาณ 45.10% และอีก 54.9% ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ หรืออาจจะกล่าวได้ว่าสมการถดถอยเชิงเส้นสามารถพยากรณ์ความเร็วยสายพานการผลิตได้ถูกต้องเพียง 45.1% และเมื่อนำค่าพื้นที่ผิวชิ้นงานและความเร็วยสายพานการผลิตมาพล็อตกราฟแล้วลากเส้นกราฟถดถอยผ่านจุดของข้อมูลหรือเป็นการ fitted curve เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูลจะได้เป็นเส้นกราฟดังรูปที่ ค-(ก)

สำหรับสมการถดถอยแบบพหุนามีเดียล ตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กับความเร็วยสายพานการผลิตอย่างน้อยหนึ่งตัว เพราะค่า p-value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด (α

=0.05) จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก โดยที่สมการถดถอยรูปแบบเต็มมีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ที่พิจารณาจากค่า R^2 ซึ่งค่า $R^2 = 47.10\%$ หมายความว่าค่าความเร็วสายพานการผลิตขึ้นอยู่กับตัวแปรอิสระประมาณ 47.10% และ อีก 52.9% ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ หรืออาจจะกล่าวได้ว่าสมการถดถอยรูปแบบเต็มสามารถพยากรณ์ความเร็วสายพานการผลิตได้ถูกต้อง 47.10% และเมื่อนำค่าพื้นที่ผิวชิ้นงานและความเร็วสายพานการผลิตมาพล็อตกราฟแล้วลากเส้นกราฟถดถอยแบบโพลีโนเมียลเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูลจะได้เป็นเส้นกราฟดังรูปที่ ค-1(ข)



รูปที่ ค-1 (ก) เส้นกราฟถดถอยเชิงเส้นตรง และ (ข) เส้นกราฟถดถอยแบบโพลีโนเมียลสำหรับการทำนายความเร็วสายพานการผลิต

2) การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับทำนายอัตราป้อนสี

ขั้นตอนเริ่มต้นของการวิเคราะห์สมการถดถอยในการทำนายอัตราป้อนสีเริ่มจากการเลือกตัวแปรอิสระที่เหมาะสมสำหรับสมการถดถอยด้วยเทคนิควิธีการเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (stepwise) โดยการกำหนดค่าระดับนัยสำคัญในการเลือกตัวแปรเข้าและออกเท่ากับ 0.05 (= 0.05) โดยที่ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ ค-4

ตารางที่ ค-4 การเลือกตัวแปรอิสระในการทำนายอัตราปี้มสี

ขั้นตอนการวิเคราะห์ stepwise			ผลการวิเคราะห์ด้วย stepwise						
ตัวแปรอิสระ	ขั้นตอนที่ 1	สิ้นสุด	constant	coefficient t	T-value	P-value	s	R ²	R ² (adj)
height									
width									
surface area	surface area	surface area	44.51	0.00127	4.73	0.000	6.4	32.76	31.3
perimeter									
volume									
length									

จากตารางที่ ค-4 โปรแกรมแสดงผลลัพธ์เพียงขั้นตอนที่ 1 เพราะไม่สามารถเพิ่มหรือลดตัวแปรอิสระตัวอื่นจากตัวแบบได้อีก ดังนั้นตัวแปรอิสระที่เหมาะสมสำหรับสมการถดถอยคือ พื้นที่ผิวของชิ้นงาน (surface area) เพียงตัวแปรเดียวเช่นเดียวกัน เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามโดยมีสมมติฐานดังนี้

H_0 : ตัวแปรอิสระไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม

H_1 : ตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม

สมการถดถอยเชิงเส้นที่ได้จากการกำจัดตัวแปรอิสระที่ไม่มีความสำคัญแสดงได้ดังสมการ

$$Y_2 = 44.51 + 1.273 \times 10^{-3} S$$

จากสมการ Y_2 คืออัตราปี้มสี S คือ พื้นที่ผิวของชิ้นงาน โดยมีค่าคงที่เท่ากับ 44.51 และค่าสัมประสิทธิ์ของสมการเส้นตรงมีค่าเท่ากับ 1.273×10^{-3} ค่าความถูกต้องของสมการถดถอยเชิงเส้นในการทำนายอัตราปี้มสีแสดงได้ในตารางที่ ค-5

สมการถดถอยเส้นโค้งพหุนามเมื่อยกกำลังสองได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ เพิ่มเติมโดยมีสมการรูปแบบเต็มดังสมการ

$$Y_2 = \alpha_0 + \alpha_1 S + \alpha_2 S^2 + \epsilon$$

จากสมการ Y_2 คือ อัตราปี้มสีเป็นตัวแปรตามโดยมีตัวแปรอิสระคือ พื้นที่ผิวชิ้นงาน (S) พบว่ามีสัมประสิทธิ์ของส่วนที่เป็นสมการเชิงเส้นตรงคือ α_1 และสัมประสิทธิ์ของส่วนที่เป็นสมการกำลังสองคือ α_2 เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแบบนี้โดยกำหนดให้ค่า p-value ถูกคำนวณที่

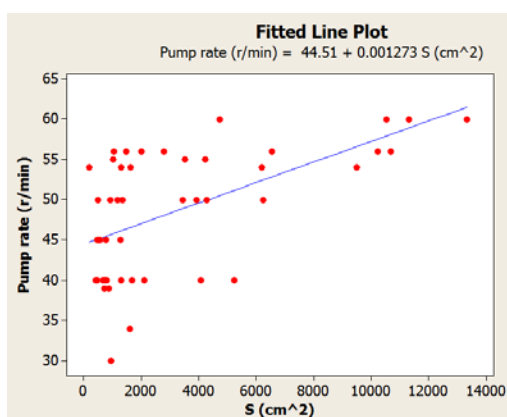
ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ ค-5 และสมการถดถอยโพลีโนเมียลที่ได้ดังสมการ

$$Y_2 = 43.8 + 1.80 \times 10^{-3} S - 0.5 \times 10^{-7} S^2$$

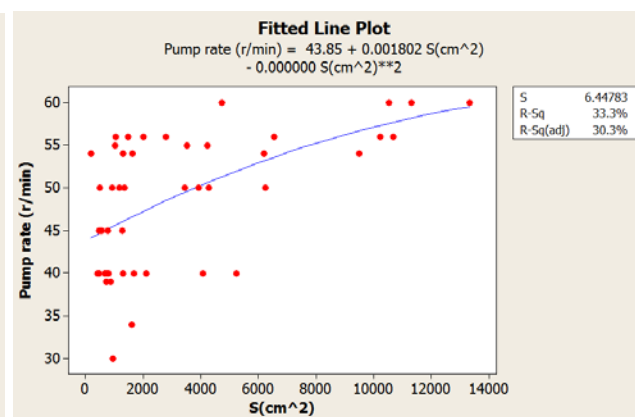
ตารางที่ ค-5 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยของอัตราปั๊มสี

model	variable	coefficient	p-value	R ²
stepwise regression	constant	44.51	0.000	32.8%
	s	1.27×10^{-3}	0.000	
polynomial regression	constant	43.845	0.000	33.3%
	s	1.80×10^{-3}	0.046	
	s ²	-5.0×10^{-8}	0.566	

จากตารางที่ ค-5 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นและสมการถดถอยแบบโพลีโนเมียล พบว่าตัวแปรอิสระคือพื้นที่ผิวชิ้นงานมีความสัมพันธ์กับอัตราปั๊มสี เพราะค่า p-value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด ($\alpha = 0.05$) จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก โดยที่สมการถดถอยเชิงเส้นและสมการถดถอยแบบโพลีโนเมียลมีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ที่ 32.8% และ 33.30% ตามลำดับ เมื่อนำค่าพื้นที่ผิวชิ้นงานและอัตราปั๊มสีมาพล็อตกราฟแล้วลากเส้นกราฟถดถอยแบบเชิงเส้นและแบบโพลีโนเมียลเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูลจะได้เป็นเส้นกราฟดังรูปที่ ค-2 (ก และ ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ ค-2 (ก) เส้นกราฟถดถอยเชิงเส้นตรง และ (ข) เส้นกราฟถดถอยแบบโพลีโนเมียล สำหรับการทำนายอัตราปั๊มสี