



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การกำหนดจำนวนและตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสมภายในแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูป
ผลิตภัณฑ์ยาง โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

Optimization of Number and Locations of Gates for Rubber Injection Mold by using
Genetic Algorithms

นามผู้วิจัย นายทิวากร อภิรักษ์ธนากร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์อัญญา วงษ์โต, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมเจตน์ พชรพันธ์, Dr.-Ing.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การกำหนดจำนวนและตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสมภายในแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูป
ผลิตภัณฑ์ยาง โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

Optimization of Number and Locations of Gates for Rubber Injection Mold by
using Genetic Algorithms

โดย

นายทิวากร อภิรักษ์ธนากร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
พ.ศ. 2555

ทิวากร อภิรักษ์ธนากร 2555: การกำหนดจำนวนและตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสม
ภายในแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ปริญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชา
วิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์อัญชนา วงษ์โต, Ph.D.
136 หน้า

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาและประยุกต์ใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) ร่วมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Genetic Algorithm, MOGA) ในการวิเคราะห์จำนวนและตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสมภายในแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง โดยใช้ผลการวิเคราะห์จากคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer-Aided Engineering, CAE) ในการสร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งจากผลการพิจารณารูปแบบการไหล (Flow pattern) และตำแหน่งรอยประสาน (Weld line location) ของแบบจำลอง 2D 2.5D และ 3D เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริง พบว่า แบบจำลอง 2.5D มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้วิเคราะห์การไหลสำหรับชิ้นงานผนังบาง เนื่องจากมีรูปแบบการไหลที่สอดคล้องกับการทดสอบฉีดจริงมากที่สุด โดยในกรณีศึกษาที่ 1 ได้ศึกษาชิ้นงานกรอบหน้าจอของคอมพิวเตอร์แบบพกพา ที่มี 4 ทางเข้า ซึ่งกำหนดค่าแรงดันฉีดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดในแต่ละทางเข้าเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การใช้ ANN ร่วมกับ MOGA สามารถทำนายตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสมที่สุดได้ โดยมีความแม่นยำเฉลี่ย 97.12% สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ผู้วิจัยได้พัฒนาแนวทางเพื่อลดจำนวนข้อมูลในการฝึกสอน โดยใช้ชิ้นงานที่มี 1 ทางเข้า ซึ่งใช้ค่าแรงดันฉีดและตำแหน่งรอยประสานเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ พบว่า มีความแม่นยำเฉลี่ย 99.39% และในกรณีศึกษาที่ 3 ผู้วิจัยได้กำหนดเงื่อนไขให้สามารถเพิ่มจำนวนทางเข้าในกรณีที่แรงดันฉีดมีค่าสูงเกินกว่าที่กำหนด และใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เช่นเดียวกับกรณีศึกษาที่ 2 โดยประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีแบ่งครึ่งช่วง (Bisection method) ซึ่งแนวทางที่พัฒนาขึ้น พบว่ามีความแม่นยำเฉลี่ย 86.39% นอกจากนี้เมื่อนำผลการทดสอบของกรณีศึกษาที่ 2 ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริง พบว่า ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับการทดสอบฉีดจริง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่ได้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการกำหนดจำนวนและตำแหน่งของทางเข้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Thiwakorn Aphirakthanakorn 2012: Optimization of Number and Locations of Gates for Rubber Injection Mold by using Genetic Algorithms. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Miss Anchana Wongsto, Ph.D. 136 pages.

In this work, the Artificial Neural Network (ANN) was developed and employed with Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) in order to optimize the number and locations of gates in rubber injection mold. The predicted results obtained from Computer Aided Engineering (CAE) program i.e. CADMOLD were utilized to construct the multi-functional objectives. The 2, 2.5, and 3D models were simulated and compared with those obtained from experiments regarding the flow pattern and weld line location. The flow pattern analysis obtained from thin-wall moldings indicated that the 2.5D model was in agreement with the experimental result. For the case study 1, the front case of notebook computer, the number of gates used was 4 and the injection pressure and its standard deviations (SD) were specified as multi-functional objectives. The analytical results showed that the ANN incorporated with MOGA can be used for the prediction of gate and air vent locations with the accuracy of 97.12%. For the case study 2, the injection pressure and weld line location were employed as multi-functional objectives and the number of gate used was reduced to 1 gate. The accuracy for the developed model was 99.39%. For the case study 3, the model was developed by using the bi-section method in order to reduce the time consuming during the optimization for weld line location and that can also increase the number of gate used when the maximum injection pressure was reached. It was found that the developed model can predict the occurred injection pressure and weld line position with the accuracy of 86.39%. In addition, it can also be seen that the predicted results obtained in the case study 2 were in good agreement with those from existing experimental results. Therefore, it can be concluded that the developed model can be employed as a valuable tool for the optimization of the number and location of gates.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ อ.ดร. อัญชนา วงษ์โต ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษา ตลอดจนการให้ความช่วยเหลือแก้ไขปัญหาต่างๆ ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. สมเจตน์ พิชรพันธ์ กรรมการที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้โอกาส คำแนะนำ และความช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ฝ่าย 5 อุดสาหกรรมที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย ในโครงการวิจัยขนาดกลางเรื่องยางพารา (Medium Project of Rubber, MPR)

ขอขอบคุณ คุณวัชรพงษ์ ชูแก้ว และคุณธนวัฒน์ ตั้งเชื่อนขันธ นักวิจัยของกลุ่มวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตยางและพลาสติก (Plastic and Rubber Processing Research Group; PaRP) รวมถึงเพื่อนๆ และน้องๆ ในกลุ่ม ที่ให้ความช่วยเหลือทุกๆ ด้าน จนงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณ บิดา มารดา ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดมา ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะสามารถนำไปใช้เพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจและประเทศชาติได้เป็นอย่างดี

ทิวากร อภิรักษ์ธนากร

ตุลาคม 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	63
อุปกรณ์	63
วิธีการ	64
ผลและวิจารณ์	84
สรุปและข้อเสนอแนะ	108
สรุป	108
ข้อเสนอแนะ	110
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	111
ภาคผนวก	116
ภาคผนวก ก ค่าแรงต้นคิด และเวลาคิด ที่ได้จากการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ ทางวิศวกรรม	117
ภาคผนวก ข การกำหนดสมบัติของวัสดุ	122
ภาคผนวก ค ขั้นตอนการออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ฉีด	127
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	136

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางนำเลื่อนต่อขนาดของแม่พิมพ์	26
2	สมการอัตราเครียดเฉือน	31
3	ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบต่างๆ	45
4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย	69
5	การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสมในเครือข่ายประสาทเทียม	74
6	การออกแบบการทดลองเพื่อหาจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน	75
7	การออกแบบการทดลองเพื่อหาขนาดประชากร	76
8	การออกแบบการทดลองเพื่อหาอัตราการสลับสายพันธุ์	77
9	การออกแบบการทดลองเพื่อหาอัตราการกลายพันธุ์	78
10	การวิเคราะห์รูปร่างการไหลภายในแม่พิมพ์ฉีดโดยใช้เอลิเมนต์แบบ 2D 2.5D 3D และชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปจริง ที่ปริมาตรการฉีดแตกต่างกัน	85
11	การทดลองเพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสมของเครือข่ายประสาทเทียม เมื่อค่าแรงดันฉีดสูงสุดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละตำแหน่งทางเข้าเป็นข้อมูลส่งออก	86
12	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อข้อมูลส่งออกคือ ค่าแรงดันฉีดสูงสุด	89
13	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อมีข้อมูลส่งออกคือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า	92
14	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 1 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าแรงดันฉีดสูงสุดเป็นข้อมูลส่งออก	93

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
15	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 2 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าแรงดันฉีดสูงสุดเป็นข้อมูลส่งออก	94
16	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 1 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าเป็นข้อมูลส่งออก	95
17	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 2 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าเป็นข้อมูลส่งออก	96
18	สถาปัตยกรรมเครือข่ายที่เหมาะสม สำหรับกรณีศึกษา: หน้าจอของคอมพิวเตอร์แบบพกพา	97
19	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมกรณีศึกษา: หน้าจอของคอมพิวเตอร์แบบพกพา	99
20	การวิเคราะห์รูปร่างการไหลภายในแม่พิมพ์ฉีดจากโปรแกรมวิเคราะห์การไหลและจากการฉีดขึ้นรูปยาง ที่ปริมาตรการฉีดแตกต่างกัน	105

ตารางผนวกที่

1	ค่าแรงดันฉีดและเวลาฉีดสำหรับกรณีศึกษาแบบจำลองของหน้าจอของคอมพิวเตอร์แบบพกพาดำเนินการของทางเข้าเพื่อใช้ในการฝึกสอน	118
2	ขนาดของเครื่องฉีดยางและเทอร์โมพลาสติก	130
3	ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นที่เหมาะสมกับขนาดของชิ้นงาน	134

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การไหลที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแผ่นประกบคู่ด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน	5
2	การไหลภายในท่อที่มีแรงดันแตกต่างกัน	6
3	พฤติกรรมของการไหลของของไหลนิวโตเนียน (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับ อัตราเฉือนเฉือน (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเฉือนเฉือน	7
4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับเวลา	8
5	พฤติกรรมของการไหลของของไหลนอนนิวโตเนียน (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนเฉือน (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเฉือนเฉือน	9
6	ความสัมพันธ์ระหว่าง Log (Shear stress) และ Log (Shear rate) ของของไหลประเภทซูโด พลาสติก	10
7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการไหล และรูปแบบการไหลในท่อทรงกระบอก	13
8	โครงสร้างพื้นฐานของยางธรรมชาติ	14
9	เครื่องบดผสมยาง (ก) เครื่องบดผสมระบบปิด (ข) เครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง	16
10	แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป	18
11	แม่พิมพ์อัดส่งขึ้นรูป	19
12	ส่วนประกอบของเครื่องฉีดขึ้นรูป	20
13	สกรูในเครื่องฉีดขึ้นรูป (ก) เทอร์โมพลาสติก (ข) ยาง	21
14	ระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์ (ก) แบบข้อพับ (ข) แบบไฮดรอลิก	22
15	แม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น	23
16	แม่พิมพ์ฉีดแบบสามแผ่น	24
17	ส่วนประกอบพื้นฐานของแม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น	24
18	ก้านรูฉีดและบ่อพักเย็น (ก) ตำแหน่งของบ่อพักเย็น (ข) ขนาดของก้านรูฉีด (ค) ขนาดของสลักรูฉีดและบ่อพักเย็น	27

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
19 ลักษณะหน้าตัดของทางวิ่ง (ก) ทางวิ่งแบบกลม (ข) ทางวิ่งแบบพาราโบลิค (ค) ทางวิ่งแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (ง) ทางวิ่งแบบสี่เหลี่ยมและครึ่งวงกลม	28
20 อัตราส่วนของขนาดทางวิ่งระหว่างทางวิ่งหลักและทางวิ่งรอง	29
21 ตัวอย่างการจัดวางแบบทางวิ่งแบบสมมาตร	29
22 ชนิดของทางเข้า (ก) แบบก้านรูปรี (ข) แบบเข็มนาฬิกา (ค) แบบขอบ (ง) แบบวงแหวน (จ) แบบม่าน (ฉ) แบบพัด (ช) แบบฟิล์ม และ (ญ) แบบแถบ	32
23 ขนาดของช่องระบายอากาศ	34
24 โครงสร้างตาข่าย (ก) แบบ 2 มิติ (ข) แบบ 2.5 มิติ (ค) แบบ 3 มิติ	36
25 เครือข่ายประสาทในทางชีววิทยา	39
26 โครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียมหนึ่งหน่วยแบบง่าย (ก) แบบไม่มีไบแอส และ (ข) แบบมีไบแอส	44
27 เครือข่ายประสาทเทียมหนึ่งหน่วยแบบหลายข้อมูลนำเข้า	46
28 เครือข่ายชั้นเดียวที่มีจำนวน S นิวรอน	47
29 เครือข่ายหลายชั้นในรูปของเมตริกซ์	47
30 เครือข่ายย้อนกลับแบบง่าย	48
31 แบบจำลองเครือข่ายประสาทแบบแพร่กระจายย้อนกลับ	48
32 วัฏจักรของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	51
33 ขั้นตอนทั่วไปของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	53
34 การเข้ารหัสแบบเลขฐานสอง	54
35 การเข้ารหัสแบบค่าต่างๆ	54
36 การเข้ารหัสแบบพหุมิวเตชัน	54
37 การเข้ารหัสแบบต้นไม้	55
38 วงล้อรูเล็ตจากค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม	57
39 วงล้อรูเล็ตจากกระบวนการเฟ้นสุ่มสากล	58
40 การสลับสายพันธุแบบจุดเดียว	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
41 การสลับสายพันธุ์แบบหลายจุด	59
42 การสลับสายพันธุ์แบบสมำเสมอ	59
43 ขั้นตอนการดำเนินการในงานวิจัย	65
44 ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นกรอบหรือกลวงบริเวณตรงกลาง	67
45 แบบจำลองชิ้นงานสำหรับกรณีศึกษา: หน้าจอของคอมพิวเตอร์แบบพกพา	67
46 ความน่าจะเป็นของค่าผิดพลาดที่มีการกระจายชนิดปกติ	70
47 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและลำดับที่ของการทดลอง	70
48 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและค่าเฉลี่ย	71
49 ตำแหน่งทางเข้าต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง (หน่วย: mm)	72
50 ขั้นตอนการใช้เครื่องมือช่วยประสานเทียมร่วมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	75
51 ขั้นตอนการกำหนดจำนวนและตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสมที่สุด เมื่อให้แรงดันฉีดและตำแหน่งรอยประสานเป็นค่าวัตถุประสงค์	81
52 แบบจำลองชิ้นงานสำหรับกรณีศึกษา: ชิ้นงานที่มีอินเลอร์ภายในชิ้นงาน	82
53 การกำหนดตำแหน่งของทางเข้าและรอยประสานกรณี 1 ทางเข้า	83
54 การแจกแจงความน่าจะเป็นเพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อข้อมูลส่งออกคือ ค่าแรงดันฉีดสูงสุด	87
55 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อข้อมูลส่งออกคือ ค่าแรงดันฉีดสูงสุด	88
56 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อข้อมูลส่งออกคือ ค่าแรงดันฉีดสูงสุด	88
57 แผนภาพกล่องเพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อข้อมูลส่งออกคือ ค่าแรงดันฉีดสูงสุด	89
58 การแจกแจงความน่าจะเป็นเพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อมีข้อมูลส่งออกคือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า	90

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
59 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อมีข้อมูลส่งออกคือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า	91
60 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อมีข้อมูลส่งออกคือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า	91
61 แผนภาพกล่องเพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อมีข้อมูลส่งออกคือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า	92
62 แผนภาพกล่องเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 1 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าแรงดันฉีดสูงสุดเป็นข้อมูลส่งออก	93
63 แผนภาพกล่องเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 2 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าแรงดันฉีดสูงสุดเป็นข้อมูลส่งออก	94
64 แผนภาพกล่องเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 1 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าเป็นข้อมูลส่งออก	95
65 แผนภาพกล่องเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 2 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าเป็นข้อมูลส่งออก	96
66 ผลการทำนายค่าแรงดันฉีดสูงสุดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า	98
67 ชุดคำตอบพารามิเตอร์ ระหว่างค่าแรงดันฉีดสูงสุดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า	100
68 ค่าแรงดันฉีดสูงสุด (ก) ก่อนหาค่าที่เหมาะสม (ข) ภายหลังจากหาค่าที่เหมาะสม	100
69 ตำแหน่งของช่องระบายอากาศ (ก) ตำแหน่งช่องระบายอากาศอยู่ใกล้อินลิร์ท (ข) ตำแหน่งช่องระบายอากาศที่เหมาะสม	101

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
70	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันฉีดสูงสุดและตำแหน่งของทางเข้า (ก) ข้อมูลที่นำมาใช้ฝึกสอน (ข) ค่าที่ทำนายได้โดยแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม	102
71	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของรอยประสานและตำแหน่งของทางเข้า (ก) ข้อมูลที่นำมาใช้ฝึกสอน (ข) ค่าที่ทำนายได้โดยแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม	103
72	ชุดคำตอบพารามิเตอร์ของความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของรอยประสานและค่าแรงดันฉีดสูงสุด	103
73	ตำแหน่งของรอยประสานและช่องระบายอากาศจากโปรแกรมวิเคราะห์การไหลเมื่อกำหนดตำแหน่งของทางเข้าที่ได้จากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	104
74	คำตอบพารามิเตอร์ของความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของรอยประสานและค่าแรงดันฉีดสูงสุด กรณีสองทางเข้า	107
ภาพผนวกที่		
1	การกำหนดสมบัติของวัสดุ	123
2	ขั้นตอนการป้อนข้อมูลความหนืด	124
3	ขั้นตอนการหาค่าคงที่ของแบบจำลอง Careau-WLF	124
4	ขั้นตอนการพล็อตกราฟความหนืดและอัตราเครียดเฉือนที่อุณหภูมิต่างๆ	125
5	ขั้นตอนการป้อนข้อมูลอัตราคงรูป	125
6	ขั้นตอนการหาค่าคงที่ของแบบจำลอง Deng-Isayev	126
7	ขั้นตอนการพล็อตกราฟความหนืดและอัตราเครียดเฉือนที่อุณหภูมิต่างๆ	126
8	ลักษณะของชิ้นงานที่ออกแบบเพื่อทดสอบฉีดขึ้นรูป (หน่วย: mm)	128
9	ขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด	129
10	ระยะของรูยัดฉีดกับหน้าแปลนเครื่องฉีดของ Rep V37/100	131
11	ระยะของรูยัดฉีดกับหน้าแปลนเครื่องฉีดเทอร์โมพลาสติก Arburg 320C 500-	131
250		131

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
12 แม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น	132
13 อินเลอร์สำหรับปรับเปลี่ยนตำแหน่งทางเข้า	132
14 การจัดวางตำแหน่งก้านกระทุ้งที่บริเวณชิ้นงาน	134
15 การประกอบยึดแม่พิมพ์กับเครื่องฉีด (ก) เทอร์โมพลาสติก (ข) ยาง	135

การกำหนดจำนวนและตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสมภายในแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูป ผลิตภัณฑ์ยาง โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

Optimization of Number and Locations of Gates for Rubber Injection Mold by using Genetic Algorithms

คำนำ

ประเทศไทยสามารถผลิตและส่งออกยางธรรมชาติได้เป็นอันดับหนึ่งของโลก แต่เนื่องจากการขาดองค์ความรู้และเทคโนโลยีในการแปรรูป ส่งผลทำให้มีการนำยางธรรมชาติไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางที่มีมูลค่าสูงได้ค่อนข้างน้อย การแปรรูปผลิตภัณฑ์ยางภายในประเทศส่วนใหญ่ เป็นการใช้ประสบการณ์และการลองผิดลองถูก (Trial and error) ที่สั่งสมมาเป็นระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งนับเป็นองค์ความรู้ที่เกิดขึ้นเฉพาะบุคคลหรือองค์กร ทำให้อุตสาหกรรมการแปรรูปผลิตภัณฑ์ยางของประเทศไทยไม่พัฒนาเท่าที่ควร ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนคอมพิวเตอร์ ยานยนต์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางที่สำคัญ คือ กระบวนการฉีดขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ เนื่องจากให้อัตราการผลิตสูงและสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม นอกเหนือจากต้นทุนด้านเครื่องจักรและราคาของแม่พิมพ์ฉีดที่สูงกว่ากระบวนการอื่นแล้ว ยังต้องอาศัยความรู้และประสบการณ์ หรือใช้เทคโนโลยีจากต่างประเทศในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีด ทั้งนี้ในภาพรวมของอุตสาหกรรมในประเทศไทย ยังคงพบปัญหาในการออกแบบส่วนประกอบของแม่พิมพ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การออกแบบทางเข้า (Gate) หากกำหนดจำนวนและตำแหน่งของทางเข้าไม่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดปัญหาข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ได้ ยกตัวอย่างเช่น การฉีดไม่เต็มเบ้าพิมพ์ (Short shot) เนื่องจากการออกแบบทางเข้าที่มีขนาดเล็กเกินไป หรือวางตำแหน่งของทางเข้าไม่เหมาะสม และในการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่หรือมีขนาดบาง อาจต้องเพิ่มจำนวนของทางเข้า ทำให้เกิดรอยประสาน (Weld line) ขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ที่บริเวณรอยประสานมีค่าลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยางที่ผสมสารตัวเติม (วัชรพงษ์, 2549) การกำหนดตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสม ส่งผลให้ตำแหน่งของรอยประสานเกิดขึ้นบนบริเวณที่ไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของชิ้นงานได้ (Lee and Kim, 2007)

ในปัจจุบันได้มีการนำคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) มาใช้ในการกำหนดจำนวนและตำแหน่งของทางเข้า รวมถึงการกำหนดเงื่อนไขในกระบวนการฉีดที่เหมาะสม เพื่อลดต้นทุนการผลิตในส่วนของเวลาในการออกแบบผลิตภัณฑ์ และการผลิตแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (ยกตัวอย่างเช่น Moldflow Cadmould และ Moldex เป็นต้น) ยังคงต้องอาศัยการลองผิดลองถูก และความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำเครือข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม เพื่อลดขั้นตอนในการลองผิดลองถูก ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัยสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบแม่พิมพ์ร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ทำให้สามารถออกแบบทางเข้าที่มีจำนวนและตำแหน่งที่เหมาะสมได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาถึงปัจจัยในการออกแบบแม่พิมพ์ ยกตัวอย่างเช่น จำนวน และตำแหน่งของทางเข้า ที่ส่งผลต่อแรงดันฉีด และตำแหน่งรอยประสานที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง
2. เพื่อศึกษาและประยุกต์ใช้เครือข่ายประสาทเทียมร่วมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม สำหรับกำหนดจำนวนและตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสมภายในแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

การตรวจเอกสาร

1. สมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว

สมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือการเสียรูป (Deformation) ของพอลิเมอร์หลอมเหลว และความสามารถในการไหล (Flow ability) เมื่อได้รับแรงกระทำ โดยทั่วไปสมบัติการไหลของวัสดุแต่ละประเภทมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นความรู้เกี่ยวกับสมบัติการไหลของพอลิเมอร์จึงมีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติก และยาง ซึ่งอาศัยหลักการให้ความร้อนและการให้แรงดันในการทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ ข้อมูลของสมบัติการไหลสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตได้ ยกตัวอย่างเช่น ความสามารถในการกระบวนการผลิต (Processability) การกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Product quality) หรือปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิต (Process conditions) ซึ่งได้แก่ แรงดัน (Pressure) อุณหภูมิ (Temperature) และอัตราการไหล (Flow rate) เป็นต้น

การไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวสามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบ คือ การไหลในรูปแบบที่เกิดจากแรงเฉือน (Shear flow) และการไหลในรูปแบบที่เกิดจากแรงดึง (Elongational flow) โดยการไหลในรูปแบบที่เกิดจากแรงเฉือนเป็นรูปแบบการไหลที่สำคัญ เนื่องจากการไหลที่เกิดขึ้นในเครื่องมือผสม และเครื่องมือขึ้นรูปชนิดต่างๆ ลักษณะการไหลที่เกิดจากแรงเฉือน สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ การไหลแบบลากดึง (Drag flow) และการไหลที่เกิดจากความแตกต่างของแรงดัน (Pressure driven flow) โดยมีรายละเอียดของแต่ละประเภทดังนี้

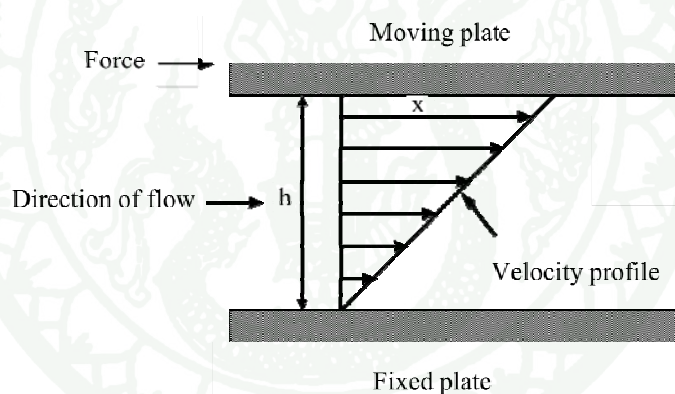
- การไหลแบบลากดึง เป็นการไหลที่เกิดขึ้นจากแรงที่มากกระทำกับผนังหรือผิวของการไหล ยกตัวอย่างเช่น การไหลของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของแผ่นประกบคู่ที่มีความเร็วแตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของความเร็วในการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่อยู่ระหว่างพื้นผิวแผ่นประกบทั้งสอง โดยพอลิเมอร์หลอมเหลวที่อยู่ติดกับผิวที่เคลื่อนที่ (Moving plate) มีความเร็วในการไหลสูงที่สุด และมีความเร็วในการไหลลดลงเมื่อเข้าใกล้แผ่นที่อยู่กับที่ (Fixed plate) ดังแสดงในภาพที่ 1 ตัวอย่างการไหลในลักษณะนี้ เช่น การไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในสกรูของเครื่องฉีด โดยค่าความเค้นเฉือน (Shear stress, τ) ค่าความเครียดเฉือน (Shear strain, γ) และค่าอัตราเครียดเฉือน (Shear rate, $\dot{\gamma}$) มีความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{x}{h} \quad (2)$$

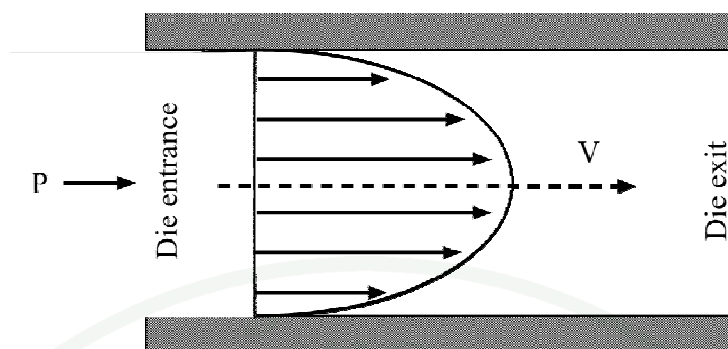
$$\dot{\gamma} = \frac{1}{h} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{v}{h} \quad (3)$$

โดยที่	F	คือ	แรงเฉือน (N)
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัด (m^2)
	h	คือ	ระยะห่างระหว่างแผ่นประกบ (m)
	v	คือ	ความเร็วของแผ่นประกบ (m.s^{-1})



ภาพที่ 1 การไหลที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแผ่นประกบคู่ด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน

- การไหลที่เกิดจากความแตกต่างของแรงดัน เป็นการไหลที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของแรงดัน โดยพอลิเมอร์ไหลจากปลายท่อด้านที่มีแรงดันสูงไปยังปลายท่อด้านที่มีแรงดันต่ำ และมีความเร็วในการไหลสูงสุดที่บริเวณกึ่งกลางของท่อและต่ำสุดที่บริเวณที่ติดกับผนัง ดังแสดงในภาพที่ 2 ตัวอย่างการไหลในลักษณะนี้ เช่น การไหลของพอลิเมอร์ในแม่พิมพ์



ภาพที่ 2 การไหลภายในท่อที่มีแรงดันแตกต่างกัน

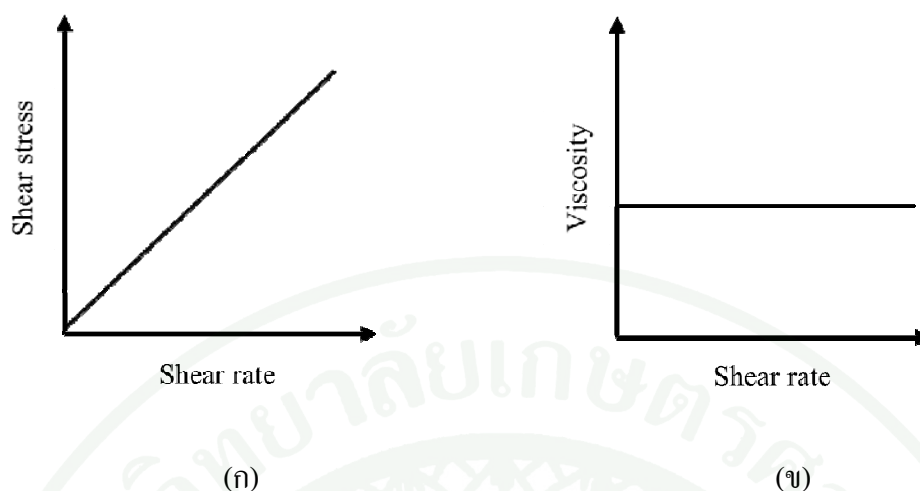
1.1 ประเภทของของไหล

โดยทั่วไปสามารถแบ่งของไหลในรูปแบบของแรงเฉือนออกเป็น 2 ประเภทหลัก ดังนี้

1.1.1 ของไหลนิวโตเนียน (Newtonian fluid)

ของไหลนิวโตเนียนเป็นกลุ่มของของไหลที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น สารละลาย เจือจาง และน้ำมัน เป็นต้น ของไหลประเภทนี้มีคุณสมบัติ (Viscosity, η) ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าอัตราเฉือนเฉือน ในการหาค่าของความหนืดในรูปแบบของแรงเฉือนสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนต่ออัตราเฉือน ดังสมการที่ 4

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (4)$$



ภาพที่ 3 พฤติกรรมการไหลของของไหลนิวโตเนียน (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือน (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเฉือน

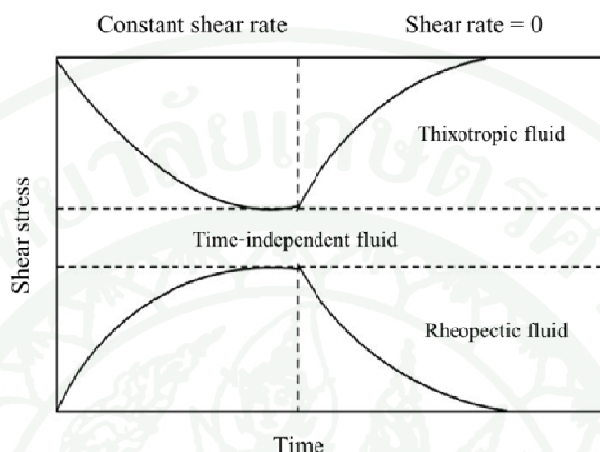
1.1.2 ของไหลนอนิวโตเนียน (Non-newtonian fluid)

ของไหลนอนิวโตเนียนเป็นของไหลที่ค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงตามอัตราเฉือน โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือน และความหนืดกับอัตราเฉือนที่ไม่เป็นเส้นตรง ของไหลนอนิวโตเนียนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่ ของไหลที่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time-dependent fluid) และของไหลที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time-independent fluid) โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1. ของไหลที่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time-dependent fluid) คือ ของไหลที่มีค่าความเค้นเฉือนเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ณ อัตราเฉือนหนึ่งๆ ของไหลในกลุ่มนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

- ของไหลไทโซทรอปิก (Thixotropic) เป็นคือ ของไหลที่มีค่าความหนืดลดลงตามเวลาที่อยู่ในระบบ เมื่อให้อัตราเฉือนคงที่ และมีความหนืดเพิ่มขึ้นจนมีค่ากลับมาเท่าเดิม เมื่อหยุดให้อัตราเฉือน ตัวอย่างของของไหลที่มีพฤติกรรมเช่นนี้ ได้แก่ น้ำสลัด และโยเกิร์ต เป็นต้น

- ของไหลรีโอเพกติก (Rheopectic) คือ ของไหลที่มีความหนืดเพิ่มขึ้นตามเวลาเมื่ออัตราครีดยืดเค้นคงที่ และค่าความหนืดมีแนวโน้มลดลงจนมีค่าเท่าเดิมเมื่อหยุดให้อัตราครีดยืดเค้น ยกตัวอย่างเช่น สารแขวนลอย หรือโคลน เป็นต้น



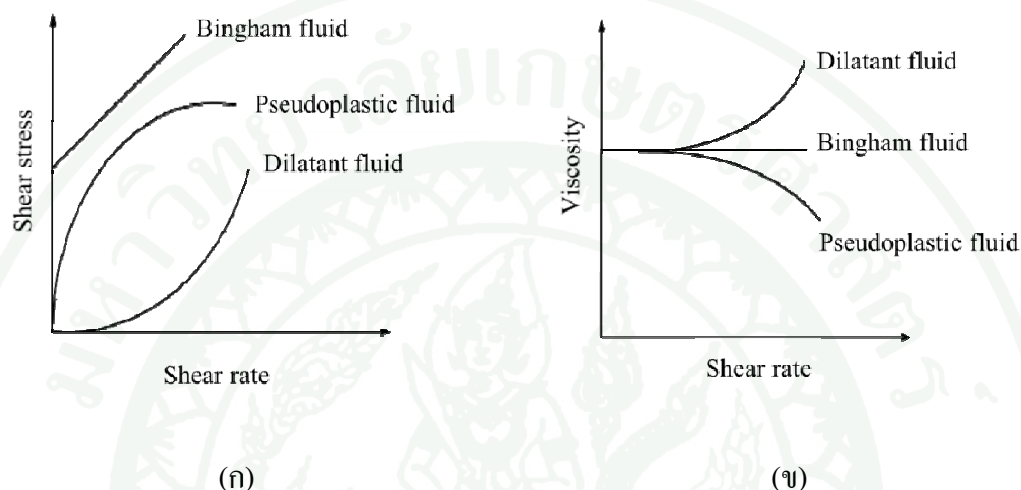
ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับเวลา

2. ของไหลที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time-independent fluid) คือ ของไหลที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความเค้นเฉือนหรือความหนืดเมื่ออัตราครีดยืดเค้นเปลี่ยนแปลงไป โดยไม่ขึ้นกับเวลา ซึ่งสามารถแบ่งของไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลาได้ 3 ประเภท ได้แก่ ของไหลบิงแฮม (Bingham fluid) ของไหลไดลาแทนท์ (Dilatant fluid) และของไหลซูโดพลาสติก (Pseudoplastic fluid) โดยมีรายละเอียดดังนี้

- ของไหลบิงแฮม (Bingham fluid) มีพฤติกรรมการไหลคล้ายกับของไหลนิวโตเนียน ของไหลประเภทนี้เกิดการไหลได้เมื่อมีค่าความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงความเค้นเฉือนคราก (Yield stress) ตัวอย่างของของไหลประเภทนี้ ได้แก่ ซอสมะเขือเทศ และยาสีฟัน เป็นต้น

- ของไหลไดลาแทนท์ (Dilatant fluid) เป็นของไหลที่มีค่าความเค้นเฉือนหรือความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราครีดยืดเค้นเพิ่มขึ้น ตัวอย่างของของไหลประเภทนี้ ได้แก่ น้ำแป้งและเจลของพิวซี เป็นต้น

- ของไหลซูโดพลาสติก (Pseudoplastic fluid) เป็นของไหลที่มีค่าความหนืดและอัตราการเพิ่มขึ้นของความเค้นเฉือนลดลง เมื่ออัตราเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ทำให้สายโซ่มอเลกุลเกิดการคลายตัวมากขึ้น ตัวอย่างของไหลที่มีพฤติกรรมประเภทนี้ ได้แก่ พอลิเมอร์หลอมเหลว และหมึกพิมพ์ เป็นต้น



ภาพที่ 5 พฤติกรรมการไหลของของไหลนอนนิวโตเนียน (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือน (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเฉือน

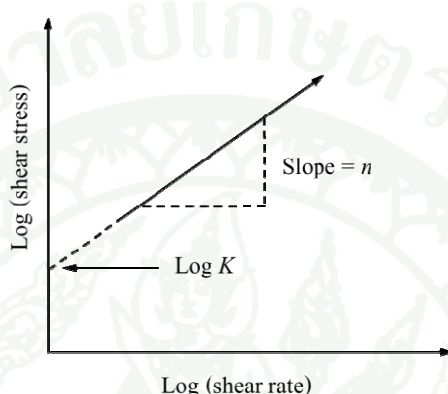
เนื่องจากของไหลประเภทนี้มีค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าอัตราเฉือน ทำให้ไม่สามารถระบุค่าความหนืดรวมได้ อย่างไรก็ตาม สามารถหาค่าความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ได้ โดยใช้ค่าดัชนีการไหล (Power law index, n) จากสมการยกกำลัง (Power law equation) ดังแสดงในสมการที่ 5

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n \quad (5)$$

เมื่อ K คือ ค่าคงที่การไหล (Power law consistency) ซึ่งบ่งบอกถึงความหนืดของพอลิเมอร์ที่อัตราเฉือนต่ำๆ (อัตราเฉือนเทียบกับ 1 s^{-1}) และ n คือ ค่าดัชนีการไหล ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะของของไหลได้ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อค่า n น้อยกว่า 1 ของไหลแสดงสมบัติเป็นของไหลซูโดพลาสติก เมื่อค่า n มากกว่า 1 ของไหลแสดงสมบัติเป็นของไหลไดลาแทนท์ และเมื่อค่า n เท่ากับ 1 ของไหลแสดงสมบัติเป็นของไหลประเภทนิวโตเนียน โดยค่า n ดังกล่าวสามารถ

พิจารณาได้จากสมการที่ 6 และสามารถหาค่า n ได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Log (Shear stress) และ Log (Shear rate) ดังแสดงในภาพที่ 6 และสามารถหาค่า K ได้จากจุดตัดแกน Log (Shear stress)

$$\log \tau = \log K + n \log \dot{\gamma} \quad (6)$$



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Log (Shear stress) และ Log (Shear rate) ของขงไหลประเภทซูโดพลาสติก

1.2 การทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว

การทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวโดยใช้เครื่องคาปิลลารีรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเฉือนต่อเนื่อง ปรับเปลี่ยนอัตราเฉือนและควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของแท่งกด โดยมีหลักการทำงาน คือ ใช้แรงดันที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแท่งกดอัดให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลเข้าสู่หัวขึ้นรูป ซึ่งสามารถตรวจวัดค่าแรงดันที่เกิดขึ้นได้จากชุดตรวจวัดแรงดัน (Pressure transducer) ที่ติดตั้งอยู่ในบริเวณก่อนทางเข้าหัวขึ้นรูป โดยความเร็วของแท่งกดและแรงดันที่เกิดขึ้นสามารถนำไปคำนวณหาอัตราเฉือนปรากฏ (Apparent shear rate, $\dot{\gamma}$) และความเค้นเฉือนปรากฏ (Apparent shear stress, τ) ที่เกิดขึ้นเมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลผ่านหัวขึ้นรูปหน้าตัดกลมและหน้าตัดสี่เหลี่ยม จากสมการที่ 7-10 ตามลำดับ โดยสมการที่ 11 เป็นสมการสำหรับการหาค่าความหนืดปรากฏ (Apparent shear viscosity, η)

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (7)$$

$$\tau = \frac{\Delta PR}{2L} \quad (8)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{6Q}{WH^2} \quad (9)$$

$$\tau = \frac{H\Delta P}{2L} \quad (10)$$

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (11)$$

เมื่อ	R	คือ รัศมีของหัวขึ้นรูปหน้าตัดกลม (m)
	W	คือ ความกว้างของหัวขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยม (m)
	H	คือ ความสูงของหัวขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยม (m)
	L	คือ ความยาวของหัวขึ้นรูป (m)
	Q	คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร = vA ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
	ΔP	คือ ความดันตกคร่อมหัวขึ้นรูป (Pa)
	η	คือ ความหนืดปรากฏ (Pa.s)
	v	คือ ความเร็วของแท่งกด (m.s^{-1})
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดของห้องหลอมเหลวทรงกระบอก (m^2)

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา พบว่า พอลิเมอร์หลอมเหลวมีสมบัติความเป็นนอนิวโตเนียน ซึ่งมีรูปแบบการไหลที่เปลี่ยนแปลงตลอดระยะทางการไหล จึงได้มีการปรับแก้สมการที่ใช้ในการหาอัตราครีดยืดเค้น โดยการระบุตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับรูปแบบการไหล คือ ค่าดัชนีการไหล เพื่อให้ได้อัตราครีดยืดเค้นแท้จริง (True shear rate, $\dot{\gamma}_{true}$) ซึ่งการปรับแก้นี้เรียกว่า การปรับแก้แบบราบิโนวิทซ์ (Rabinowitsch corrections) และนอกจากนี้ยังพบว่า แรงดันที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งก่อนทางเข้าหัวขึ้นรูปมีความไม่เป็นเชิงเส้น จึงได้มีการปรับแก้บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป (Entrance correction) เพื่อให้ได้ค่าแรงดันที่แท้จริง ซึ่งเรียกว่า การปรับแก้ของ Bagley (Bagley

corrections) (Bagley, 1957) อย่างไรก็ตามการปรับแก้บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปนั้น อยู่บนสมมติฐานที่ว่า แรงดันบริเวณทางออกมีค่าเป็นศูนย์ (Zero-exit pressure) แต่จากผลงานวิจัยต่อมาแสดงให้เห็นว่า ค่าแรงดันที่ตำแหน่งทางออกหัวขึ้นรูปมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ (Non-zero exit pressure) จึงควรพิจารณาถึงแรงดันที่บริเวณทางออกหัวขึ้นรูปด้วย วิธีการปรับแก้แบบนี้เรียกว่า การปรับแก้บริเวณทางออกหัวขึ้นรูป (Exit correction)

1.3 การปรับแก้รูปแบบการไหลหรือการปรับแก้แบบราบิโนวิทซ์ (Rabinowitsch corrections)

การปรับแก้ราบิโนวิทซ์เป็นการปรับแก้ค่าอัตราครีดยืดเนื่องมาจากพอลิเมอร์ไหลอมเหลวโดยทั่วไปมีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก และมีรูปแบบการไหลแบบพาราโบลา ที่มีความสัมพันธ์กับความเร็วและรูปแบบการไหลของพอลิเมอร์ โดยค่า n บ่งบอกถึงรูปแบบการไหลและความเป็นนอนนิวโตเนียนของพอลิเมอร์ จากการพิจารณาสมการที่ 12 พบว่าค่า n ที่ลดลง ทำให้รูปแบบของพอลิเมอร์เป็นแบบปลั๊ก (Plug flow) มากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 7 และค่า n ที่ได้ สามารถนำมาใช้หาค่าอัตราครีดยืดจริงของหัวขึ้นรูปแบบหน้าตัดกลมและแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมได้ ดังสมการที่ 13 และ 14 ตามลำดับ

$$V(r) = \frac{3n+1}{n+1} V^* \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{1+\left(\frac{1}{n}\right)} \right] \quad (12)$$

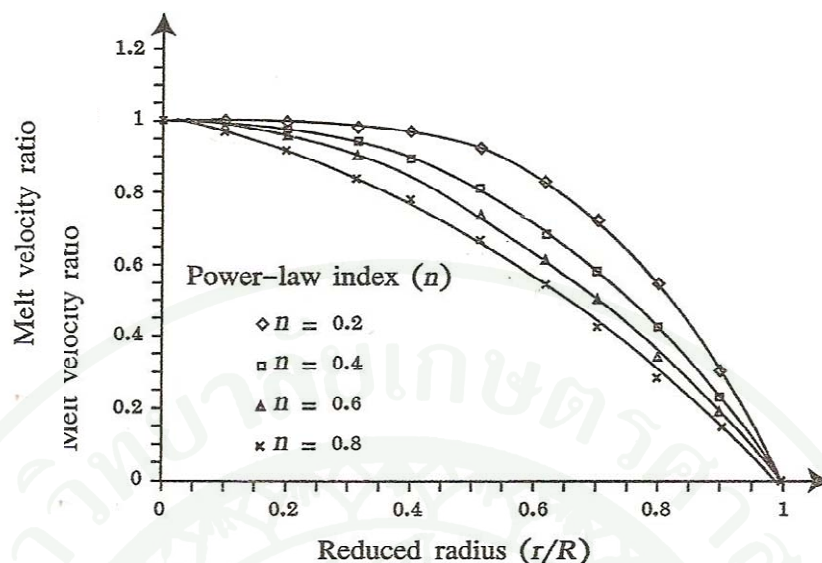
$$\dot{\gamma}_{true} = \left[\frac{3n+1}{4n} \right] \left[\frac{4Q}{\pi R^3} \right] \quad (13)$$

$$\dot{\gamma}_{true} = \left[\frac{2n+1}{4n} \right] \left[\frac{6Q}{WH^3} \right] \quad (14)$$

โดยที่ n หมายถึง ค่าดัชนีการไหล

$V_{(r)}$ หมายถึง ความเร็วของพอลิเมอร์ ณ ตำแหน่งต่างๆ บนหน้าตัดหัวขึ้นรูป (m.s^{-1})

V^* หมายถึง ความเร็วเฉลี่ยการไหล (m.s^{-1})



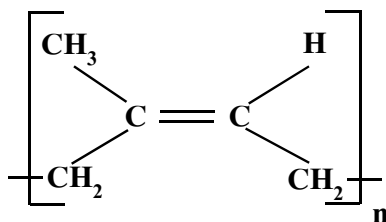
ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการไหล และรูปแบบการไหลในท่อทรงกระบอก

2. ยางธรรมชาติ (Natural rubber)

ยางธรรมชาติ เป็นยางที่ได้มาจากต้นยางพารา มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* มีต้นกำเนิดจากประเทศบราซิลในทวีปอเมริกาใต้ ก่อนกระจายตัวเข้าสู่ประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ รวมถึงประเทศไทย น้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางพารามีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแขวนลอยอยู่ในน้ำประมาณ 30% โดยน้ำหนัก โดยที่ปริมาณของเนื้อยางขึ้นอยู่กับชนิดของพันธุ์ยาง อายุต้นยาง และฤดูกาล

2.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีโครงสร้างทางเคมีคือ ซิส-1, 4-พอลิไอโซพรีน (Cis-1, 4-polyisoprene) โดยยาง 1 โมเลกุลประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C_5H_8) จำนวนมากต่อกันเป็นสายยาว และมีการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลที่ตำแหน่ง Cis 1-4 ดังแสดงในภาพที่ 8 โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 200,000 ถึง 500,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้าง โปรตีน น้ำตาล และกรดไขมันในยางธรรมชาติ ทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพ รวมถึงเป็นสารกระตุ้นให้ยางคงรูป (Antioxidant and activator of cure) และธาตุบางชนิด ได้แก่ โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส แมงกานีส ทองแดง และเหล็ก เป็นตัวเร่งการเสื่อมสภาพของยาง (วารกรณ์, 2552)



ภาพที่ 8 โครงสร้างพื้นฐานของยางธรรมชาติ

จากภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ ซึ่งว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกัมมันต์ ยางธรรมชาติจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาการคงรูปโดยใช้กัมมันต์ได้ อย่างไรก็ตามการที่ยางธรรมชาติมีพันธะคู่ในสายโซ่โมเลกุลทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ยางธรรมชาติเกิดการเสื่อมสภาพได้ โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสถานะสามารถเกิดผลึกได้ เช่น ที่อุณหภูมิต่ำโมเลกุลของยางบางส่วนสามารถจัดเรียงตัวได้ค่อนข้างเป็นระเบียบจึงสามารถเกิดผลึกได้ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ยางสามารถอ่อนตัวลงและกลับสู่สภาพเดิม โดยอัตราการเกิดผลึกมากที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ -26°C การเกิดผลึกนี้ทำให้ยางธรรมชาติมีความแข็งแรงและสมบัติความเป็นอีลาสติกลดลง การเกิดผลึกของยางธรรมชาติยังสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อได้รับการดึงยืด (Strain induced crystallization) ทำให้ยางบริเวณนั้นมีสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนไปอย่างชัดเจน คือเปลี่ยนสภาพจากโปร่งแสง (Transparent) ไปเป็นทึบแสง (Opaque) ซึ่งสังเกตได้ง่ายในยางคงรูปที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม และยังทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของยางเป็นระเบียบตามทิศทางที่ได้รับแรงดึง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน (Benzene) เฮกเซน (Hexane) และโทลูอีน (Toluene) ทั้งนี้ยางธรรมชาติมีการละลายในตัวทำละลายดังกล่าวลดลงเมื่อผ่านกระบวนการคงรูป เนื่องจากการเกิดพันธะเชื่อมขวางของโมเลกุลเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ทำให้เกิดเพียงการบวมตัวเท่านั้น

2.2 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ เป็นยางที่มีความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง เมื่อไม่มีแรงจากภายนอกมากระทำกับยาง ยางสามารถกลับสู่ขนาดและรูปร่างเดิมได้อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อถูกดึงยืด ซึ่งช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ยางธรรมชาติจึงมีค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงมากโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารเสริมแรงเข้าช่วย ถึงแม้ว่ายางธรรมชาติมีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย อย่างไรก็ตาม ยางธรรมชาติยังคงมีข้อด้อยในเรื่องของการเสื่อมสภาพ เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซน โดยมีความร้อนและแสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเหตุนี้ในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์ จึงต้องมีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Anti-oxidants) เพื่อยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ

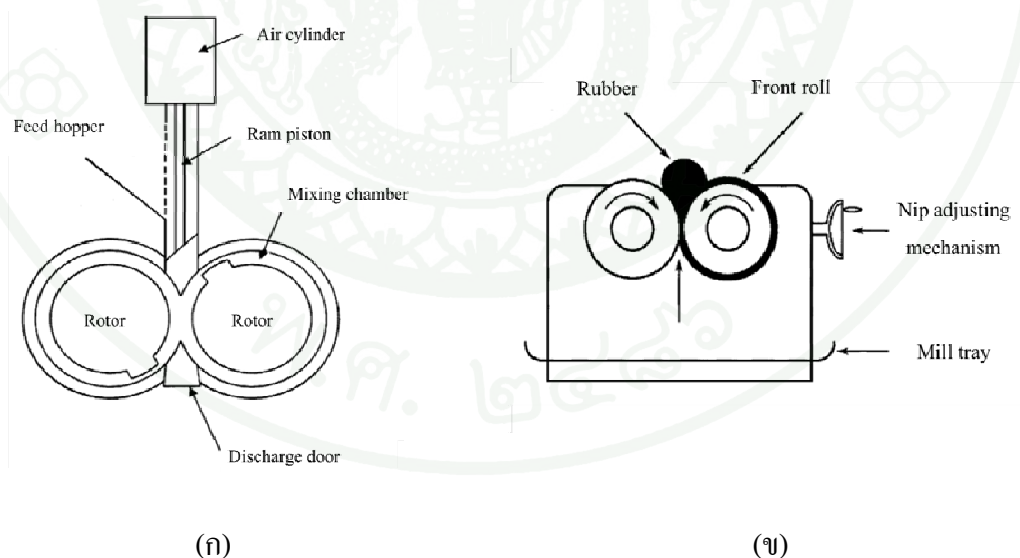
3. การเตรียมยางคอมพาวนด์

ยางธรรมชาติสามารถนำไปใช้งานได้ โดยผ่านกระบวนการคงรูปร่างหรือกระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง (Crosslinking) ทั้งนี้กระบวนการดังกล่าวต้องใช้สารเคมีต่างๆ เพื่อให้ยางเกิดการคงรูปและมีสมบัติตรงตามต้องการ โดยสารเคมีที่ใช้สามารถแบ่งได้เป็น สารทำให้เกิดการคงรูปของยาง (Vulcanizing agents) และสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป (Accelerators) นอกจากนั้นอาจมีสารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators) สารตัวเติม (Fillers) และสารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aids) รวมถึงสารเคมีอื่นๆ ที่ทำหน้าที่เฉพาะด้านเพื่อเสริมสมบัติในการใช้งาน เช่น สารช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากแสงแดดและโอโซน เป็นต้น

การบดยางให้นุ่ม หรือการทำให้ยางมีความหนืดลดลง เรียกขั้นตอนนี้ว่า มาสติเคชัน (Mastication) โดยทั่วไปแล้วจำเป็นต้องบดยางธรรมชาติให้นุ่มก่อนการเติมสารเคมีเพื่อให้สารเคมีสามารถกระจายตัวภายในเนื้อยางได้ทั่วถึง ในขณะที่ยางสังเคราะห์อาจไม่ต้องมีขั้นตอนดังกล่าว เนื่องจากสามารถควบคุมการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลได้ ในส่วนของการผสมยางกับสารเคมี ซึ่งสามารถผสมในเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และเครื่องบดผสมระบบปิด

(Internal mixer) โดยขั้นตอนการบดผสมสารเคมีต่างๆ ในยางนั้นต้องจัดลำดับการผสมอย่างถูกต้อง เช่น สารเข้ากับยางได้ยาก ต้องเติมเป็นลำดับแรก ในขณะที่สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปควรเติมเป็นลำดับหลัง เพื่อป้องกันยางคงรูปก่อนเวลา ทั้งนี้การบดผสมยางเข้ากับสารตัวเติมในปริมาณมาก อาจใช้สารช่วยในกระบวนการผลิตเพื่อลดความหนืดของยาง เพื่อให้สารตัวเติมสามารถกระจายตัวภายในเนื้อยางได้ดีขึ้น ยางที่บดผสมสารเคมีแล้วควรเก็บไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนการนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ (พงษ์ธร, 2550)

เครื่องบดผสมยางที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ เครื่องบดผสมระบบปิด ดังแสดงในภาพที่ 9(ก) เป็นเครื่องบดผสมที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถบดยางได้ครั้งละมากๆ สามารถควบคุมอุณหภูมิการบด และการฟุ้งกระจายของสารเคมีได้ดีในขณะบดผสม แต่เครื่องบดผสมประเภทนี้มีราคาที่สูง ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดและประสิทธิภาพของเครื่อง และอีกประเภทคือเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง ดังแสดงในภาพที่ 9(ข) ซึ่งประกอบด้วยลูกกลิ้งที่ทำด้วยเหล็กหล่อผิวเรียบเรียงขนานกันในแนวนอน ลูกกลิ้งลูกหน้ามีสกรูสำหรับปรับช่องระหว่างลูกกลิ้งทั้งสองเพื่อควบคุมปริมาณการใส่ยาง การใช้เครื่องประเภทนี้ต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน



ภาพที่ 9 เครื่องบดผสมยาง (ก) ระบบปิด (ข) ระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง

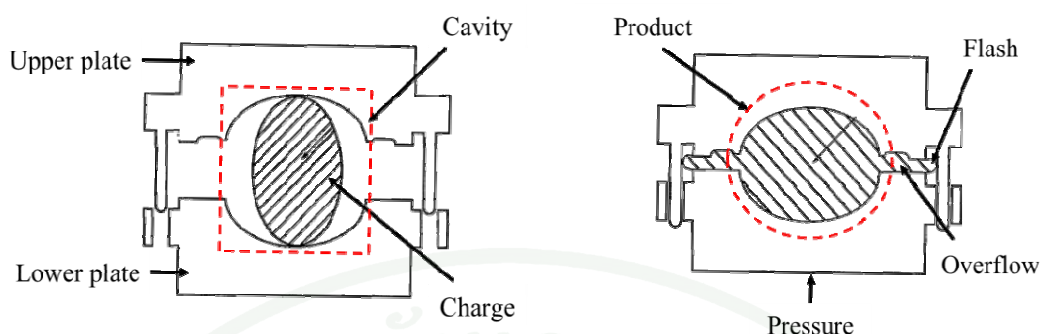
ที่มา: Funt (2009)

4. กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางโดยใช้แม่พิมพ์ (Rubber molding process)

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางโดยใช้แม่พิมพ์ เป็นกระบวนการทำให้ยางเกิดการคงรูปและเกิดเป็นรูปร่างตามแบบที่ต้องการ ซึ่งอาศัยหลักการให้ความร้อนและการให้แรงดันเพื่อให้ยางไหลตามแบบ กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยทั่วไป ได้แก่ กระบวนการอัดขึ้นรูป กระบวนการอัดส่งขึ้นรูป และกระบวนการฉีดขึ้นรูป

4.1 กระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding)

กระบวนการอัดขึ้นรูปยาง เป็นกระบวนการขึ้นรูปที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็ก เนื่องจากมีต้นทุนด้านเครื่องจักรและแม่พิมพ์ที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่น แม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูป ประกอบด้วยแม่พิมพ์ 2 ส่วนหลัก คือ แม่พิมพ์ส่วนบน (Upper plate) และแม่พิมพ์ส่วนล่าง (Lower plate) ดังแสดงในภาพที่ 10 ขนาดของแม่พิมพ์ขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงาน และจำนวนเบ้าพิมพ์ (Cavity) ขั้นตอนการขึ้นรูปเริ่มจากการวางยางคอมพาวนด์ลงไปบนเบ้าพิมพ์ จากนั้นจึงปิดแม่พิมพ์และอัดยางคอมพาวนด์ให้ไหลจนเต็มเบ้าพิมพ์ โดยมีแท่งความร้อน (Heater rod) ให้ความร้อนกับแม่พิมพ์ เพื่อให้ยางเกิดปฏิกิริยาคงรูป นอกจากนี้ในกรณีที่ชิ้นงานมีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน สามารถใช้เทคนิคอัดและกลาย (Bumping) เพื่อไล่อากาศภายในแม่พิมพ์ออก ส่งผลให้ยางสามารถไหลเข้าแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น โดยทั่วไปแล้วควรเตรียมยางคอมพาวนด์ให้มีปริมาณมากกว่าปริมาตรเบ้าพิมพ์ประมาณ 10% เพื่อให้ยางไหลได้เต็มแบบ และมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ ทั้งนี้ต้องมีการตัดแต่งชิ้นงานหลังนำปลดออกจากแม่พิมพ์ หากมียางไหลเกินจากเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์ (Parting line) หรือที่เรียกว่า ครีบ (Flash)

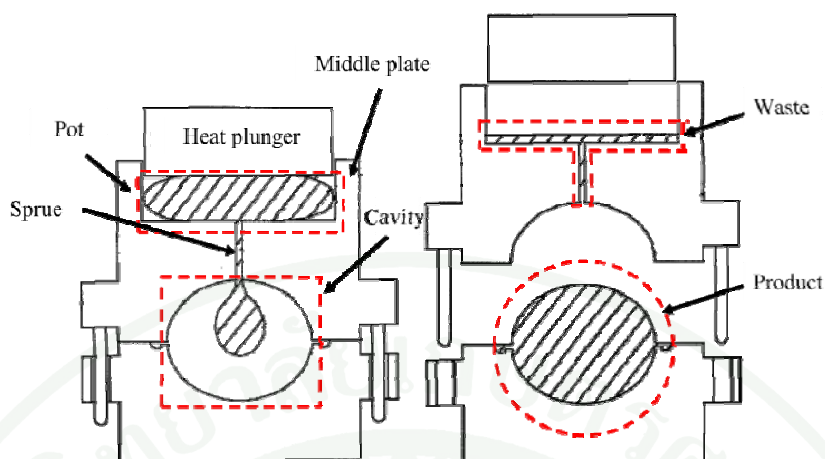


ภาพที่ 10 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป

ที่มา: Ciesielski (1999)

4.2 กระบวนการอัดส่งขึ้นรูป (Transfer molding)

กระบวนการอัดส่งขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากกระบวนการอัดขึ้นรูปเพื่อให้สามารถผลิตชิ้นงานที่ซับซ้อน และให้ความหนาแน่นของชิ้นงานมากกว่า นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมรอบเวลาการผลิตได้ดีกว่า เนื่องจากความร้อนเฉือน (Shear heating) ที่เกิดขึ้นขณะที่ยางคอมพาวนด์ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ ส่งผลให้ลดระยะเวลาในการคงรูปของยางคอมพาวนด์ภายในเบ้าพิมพ์ อย่างไรก็ตามนอกเหนือจากต้นทุนการผลิตแม่พิมพ์ที่สูงกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูปแล้ว กระบวนการอัดส่งยังมีข้อเสียที่เกิดจากก้านรูฉีก รวมถึงส่วนของแม่พิมพ์ด้านบนและทางวิ่ง (Runner) ที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ส่วนล่างในกรณีขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบหลายเบ้าพิมพ์ (Multiple cavities) ดังนั้นจึงเหมาะกับการผลิตในปริมาณมาก ส่วนประกอบของแม่พิมพ์อัดส่งขึ้นรูปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ แม่พิมพ์ส่วนบนที่มีลักษณะคล้ายแท่งกด (Plunger) แม่พิมพ์ส่วนกลาง (Middle plate) ที่มีช่องว่าง (Pot) สำหรับใส่ยางคอมพาวนด์ และเบ้าพิมพ์ส่วนล่างที่เป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในภาพที่ 11 หลักการของกระบวนการอัดส่ง คือ การใช้แม่พิมพ์แผ่นบนอัดให้ยางคอมพาวนด์ไหลผ่านรูฉีก (Sprue) เข้าสู่เบ้าพิมพ์

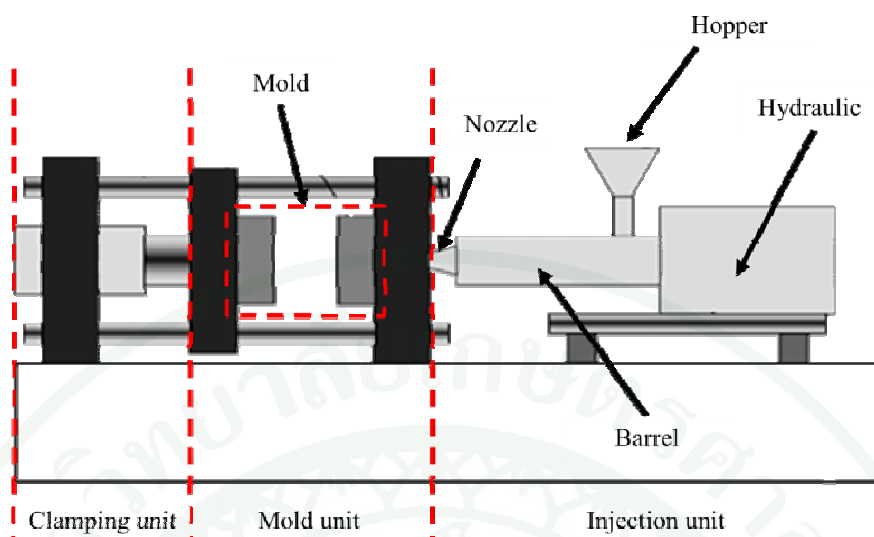


ภาพที่ 11 แม่พิมพ์อัดส่งขึ้นรูป

ที่มา: Ciesielski (1999)

4.3 กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding)

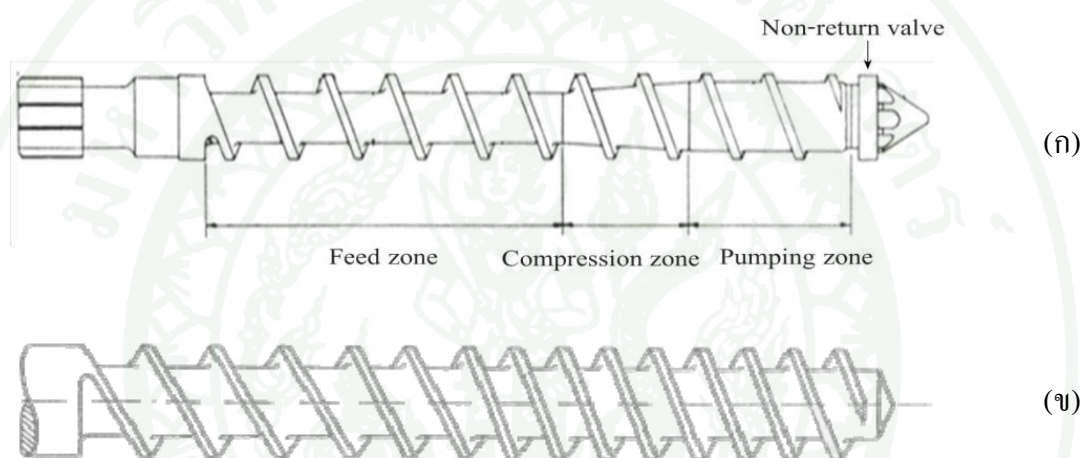
กระบวนการฉีดขึ้นรูป เป็นกระบวนการขึ้นรูปที่มีความได้เปรียบกระบวนการขึ้นรูปแบบอื่นๆ ทั้งในเรื่องของระยะเวลาการผลิต รูปร่างและความสม่ำเสมอของชิ้นงาน เนื่องจากสามารถควบคุมความเร็วและแรงดันฉีดในการฉีดขึ้นรูปได้ หลักการทั่วไปของกระบวนการฉีดขึ้นรูป คือ การใช้กระบอกสูบ (Ram) หรือสกรู (Screw) อัดเนื้ออย่างภายในกระบอกฉีด เนื้อจะถูกฉีดผ่านหัวฉีด (Nozzle) เข้าสู่รูฉีดของแม่พิมพ์ โดยรูฉีดเชื่อมต่อกับทางวิ่ง และทางเข้า ก่อนเข้าสู่เบ้าพิมพ์ ส่วนประกอบของเครื่องฉีดขึ้นรูป ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ดังแสดงในภาพที่ 12 ได้แก่ ชุดฉีด (Injection unit) ชุดแม่พิมพ์ (Mold unit) และชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ (Clamping unit) ตามลำดับ



ภาพที่ 12 ส่วนประกอบของเครื่องฉีดขึ้นรูป

4.3.1 ชุดฉีด (Injection unit) เป็นส่วนประกอบสำคัญในการเตรียมเนื้อยางเพื่อใช้ในการฉีด โดยชุดฉีดมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ห้องหลอมเหลว (Barrel) สกรู และกรวยเติม (Hopper) ตามลำดับ การตั้งอุณหภูมิห้องหลอมเหลวของเครื่องฉีดพลาสติก ควรอยู่ในช่วงของอุณหภูมิขึ้นรูป อย่างไรก็ตาม ในกรณีของการตั้งอุณหภูมิห้องหลอมเหลวสำหรับฉีดยาง ต้องใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการคงรูปของยาง โดยอุณหภูมิห้องหลอมเหลวควรอยู่ระหว่าง 80-100°C เพื่อป้องกันการสูกตัวของยางก่อนกำหนด ในส่วนของสกรูที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ ช่วงการลำเลียง (Feed zone) เป็นช่วงที่ร่องเกลียวของสกรูมีความลึกมากที่สุด และมีความยาวประมาณครึ่งหนึ่งของสกรู ทำหน้าที่ลำเลียงพอลิเมอร์ลงมาจากกรวยเติมไปยังช่วงการอัด (Compression zone) ซึ่งเป็นช่วงที่สกรูมีความลึกของร่องเกลียวลดลง เริ่มเกิดการหลอมละลายของเม็ดพอลิเมอร์ เนื่องจากความร้อนจากเข็มขัดให้ความร้อน (Heater band) และความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือน (Shear heating) ส่งผลให้เม็ดพอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลวที่ช่วงนี้ ช่วงสุดท้ายคือ ช่วงเพิ่มความดัน (Pumping zone) เป็นช่วงที่สกรูมีความลึกของร่องเกลียวน้อยที่สุด เพื่อให้มีความหนาแน่นของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt density) มากที่สุด ส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงสุด และทำให้เม็ดพอลิเมอร์ที่ยังไม่เกิดการหลอมเหลวเกิดการหลอมเหลวกลายเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) เพื่อพร้อมสำหรับการฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ต่อไป อย่างไรก็ตาม สกรูที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปยาง มีความแตกต่างจากสกรูที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก ดังแสดงในภาพที่ 13 กล่าวคือ สกรูที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกมีอัตราส่วนการอัด (Compression ratio) ประมาณ 4 ต่อ 1 และมีอัตราส่วนความ

ยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D ratio) ประมาณ 20 ถึง 25 ต่อ 1 (Verbraak and Meijer, 1989) ในขณะที่สกรูสำหรับการฉีดยางมีความลึกของร่องเกลียวเท่ากันตลอดความยาวของสกรู หรือมีอัตราส่วนการอัด เท่ากับ 1 และมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12 ถึง 16 ต่อ 1 การออกแบบดังกล่าว ส่งผลให้สามารถลดความร้อนเนื่อง และระยะเวลาที่ยางคอมพาวนด์อยู่ในระบบ (Residence time) เพื่อป้องกันการสุกตัวก่อนกำหนด นอกจากนี้ สกรูที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปยางไม่จำเป็นต้องมีวาล์วกันไหลย้อนกลับ (Non-return valve) ที่บริเวณหัวสกรู เนื่องจากยางมีความหนืดสูงและใช้ความเร็วในการฉีดขึ้นรูปที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับการฉีดขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก

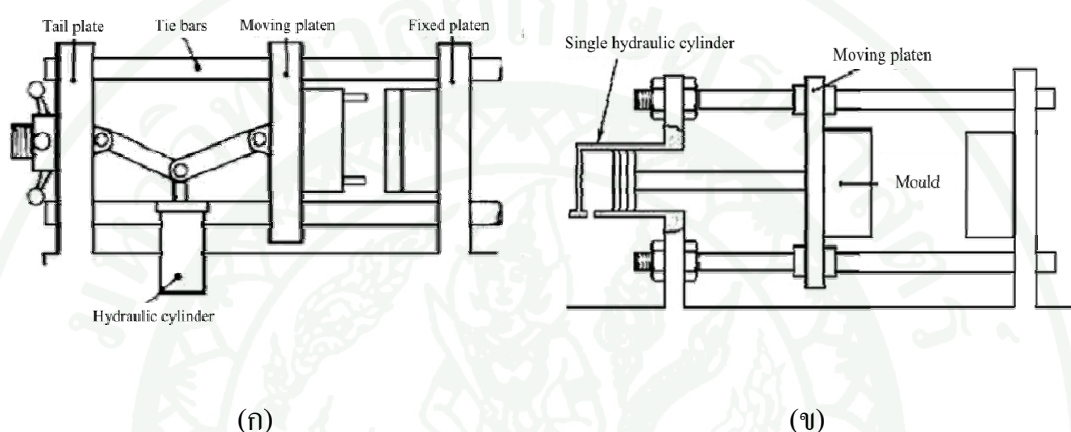


ภาพที่ 13 สกรูในเครื่องฉีดขึ้นรูป (ก) เทอร์โมพลาสติก และ (ข) ยาง

ที่มา: Rauwendall (1986)

4.3.2 ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ (Clamping unit) ทำหน้าที่ควบคุมการปิดหรือเปิดแม่พิมพ์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ระบบปิด-เปิดแบบข้อพับ (Toggle clamping system) และระบบปิด-เปิดแบบไฮดรอลิก (Hydraulic clamping system) ซึ่งระบบปิด-เปิดแบบข้อพับ นิยมใช้ในเครื่องฉีดขนาดเล็กและขนาดกลาง โดยใช้ระบบไฮดรอลิกหรือใช้มอเตอร์ในการขับเคลื่อนเพื่อดันปิดแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 14(ก) ข้อเด่นของระบบปิด-เปิดแบบข้อพับคือมีความเร็วในการปิด-เปิดแม่พิมพ์สูง และมีระบบล็อกอัตโนมัติ (Self-locking) ทำให้ประหยัดพลังงาน อย่างไรก็ตามระบบปิด-เปิดแบบข้อพับ มีข้อจำกัดในด้านความทนทานและความแม่นยำในการใช้งาน เนื่องจากเป็นระบบทางกล จึงมีการสึกหรอสูงกว่าระบบปิด-เปิดแบบไฮดรอลิก รวมไปถึงต้องมีความหนาของแม่พิมพ์ที่เหมาะสมกับความยาวของข้อพับ เพื่อให้สามารถล็อกอัตโนมัติได้ ในขณะที่

ที่ระบบปิด-เปิดแบบไฮดรอลิก เป็นระบบที่เหมาะสมกับเครื่องฉีดขนาดกลางและขนาดใหญ่ มีข้อดีคือสามารถควบคุมระยะและแรงในการปิด-เปิดได้แม่นยำ ทำให้ลดการสึกหรอ และมีความแม่นยำในการปิด-เปิดแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตามข้อด้อยของระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบไฮดรอลิก คือ มีความเร็วในการปิด-เปิดแม่พิมพ์ที่ช้าและใช้พลังงานที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบปิด-เปิดแบบข้อพับ โดยมีลักษณะในการทำงานดังแสดงในภาพที่ 14(ข)



ภาพที่ 14 ระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์ (ก) แบบข้อพับ และ (ข) แบบไฮดรอลิก

ที่มา: Jones (2008)

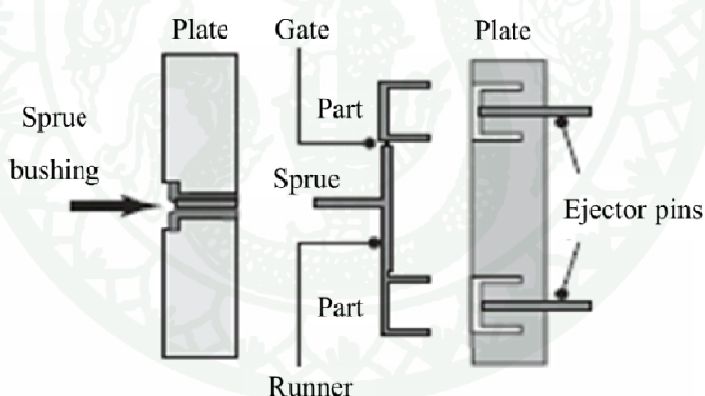
4.3.3 ชุดแม่พิมพ์ฉีด (Injection mold unit) เป็นส่วนประกอบหลักของกระบวนการฉีดขึ้นรูป ซึ่งประกอบไปด้วย รูฉีด ทางวิ่ง ทางเข้า และเบ้าพิมพ์ โดยทั่วไปการเลือกชนิดของแม่พิมพ์ฉีดขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของชิ้นงาน และเงื่อนไขต่างๆ ในกระบวนการผลิต สำหรับแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง มีการให้ความร้อนกับแม่พิมพ์โดยการฝังแท่งความร้อน ให้มีอุณหภูมิประมาณ 140-160°C แต่หากแม่พิมพ์มีอุณหภูมิที่สูงเกินไป อาจส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพ (Degradation) ในยางธรรมชาติได้

5. หลักการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดเบื้องต้น

ผู้ออกแบบควรพิจารณาถึงขนาดและจำนวนของชิ้นงานก่อนเป็นอันดับแรก เนื่องจากขนาดและจำนวนของชิ้นงาน ส่งผลต่อการกำหนดชนิดและขนาดของแม่พิมพ์ รวมถึงลักษณะและขนาดของเครื่องฉีด

5.1 ชนิดของแม่พิมพ์ฉีด

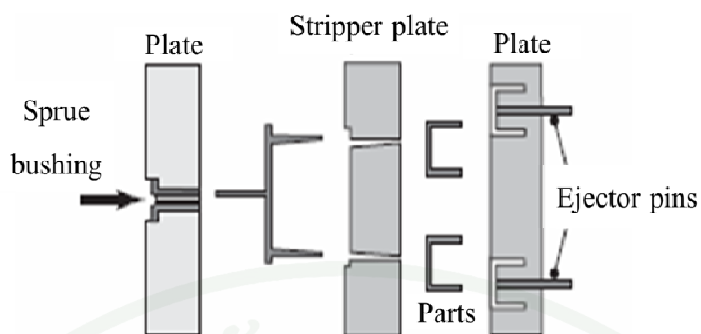
5.1.1 แม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น (Two-plate injection mold) เป็นแม่พิมพ์ที่นิยมใช้ในการผลิตชิ้นงานที่ปราศจากร่องหรือบ่า (Undercut) มีเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์ (Parting line) เพียงเส้นเดียวหรือมีตำแหน่งสำหรับปลดชิ้นงาน ทางวิ่ง และก้านรูฉีดเพียงตำแหน่งเดียว ดังแสดงในภาพที่ 15 โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีส่วนของรูฉีด ทางวิ่ง และทางเข้าติดออกมาด้วย จึงจำเป็นต้องมีการตัดแต่งชิ้นงานภายหลังกระบวนการขึ้นรูป



ภาพที่ 15 แม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น

ที่มา: Osswald *et al.* (2008)

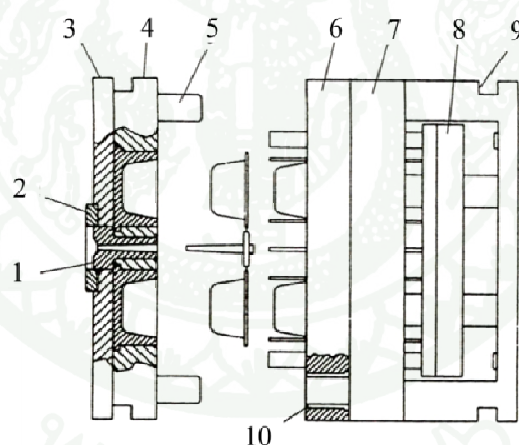
5.1.2 แม่พิมพ์แบบสามแผ่น (Three-plate injection mold) แม่พิมพ์ฉีดแบบสามแผ่นเป็นแม่พิมพ์ที่ออกแบบให้มีเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์ 2 เส้น หรือมีตำแหน่งเปิดแม่พิมพ์ 2 ตำแหน่ง ส่วนใหญ่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปที่ต้องการให้มีระบบปลดรูฉีด ทางวิ่ง และทางเข้าออกจากชิ้นงานโดยอัตโนมัติ ดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 แม่พิมพ์ฉีดแบบสามแผ่น

ที่มา: Osswald *et al.* (2008)

ส่วนประกอบพื้นฐานของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกแบบสองแผ่น (Two plate mold) แสดงในภาพที่ 17 โดยส่วนประกอบของแม่พิมพ์ฉีดประกอบด้วยส่วนสำคัญ ได้แก่



ภาพที่ 17 ส่วนประกอบพื้นฐานของแม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น

ที่มา: Osswald *et al.* (2008)

1. ปลอกกรูฉีด (Sprue bush) รัศมีของบารับบนปลอกกรูฉีดต้องมีขนาดใหญ่กว่ารัศมีของหัวฉีด โดยรูของปลอกกรูฉีดควรมีขนาดใหญ่กว่ารูของหัวฉีดประมาณ 0.8-1 mm และมีมุมเรียวระหว่าง 3-5 องศา ทำให้ถอดแกนรูฉีดได้สะดวกขึ้น ซึ่งอาจใช้สลักบังคับตำแหน่งหรือสกรูยึดเพื่อป้องกันไม่ให้ปลอกกรูฉีดส่วนที่อยู่ติดกับทางวิ่ง เกิดการหมุนเลื่อนตำแหน่งขณะใช้งานได้

รวมถึงเพื่อป้องกันไม่ให้ปลอกกรูติดเคลื่อนที่ถอยหลัง โดยการทำเป็นบ่าที่ปลายและยึดด้วยแหวนบังคับศูนย์

2. แหวนบังคับศูนย์ (Locating ring) ทำหน้าที่กำหนดให้แม่พิมพ์วางตัวอยู่ในตำแหน่งแนวกรีด และกำหนดตำแหน่งของแม่พิมพ์ให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องบนหน้าแปลนของเครื่องฉีด โดยควรสวมเข้ากับรูทรงกระบอกบนหน้าแปลนได้พอดี

3. แผ่นยึดด้านบน (Fixed base plate) ทำหน้าที่ยึดแม่พิมพ์ส่วนที่อยู่กับที่เข้ากับหน้าแปลนของเครื่องฉีด

4. แผ่นเข้าพิมพ์ (Fixed cavity plate) เป็นส่วนกำหนดผิวรอบนอกของชิ้นงาน

5. เพลาน้ำ (Guide pin) ทำหน้าที่ปรับตำแหน่งของหน้าสัมผัสแม่พิมพ์ และทำหน้าที่คล้ายสลักบังคับตำแหน่ง โดยให้เพลาน้ำตัวหนึ่งใหญ่กว่าอีกตัวหนึ่งหรือเยื้องศูนย์ออกจากตำแหน่งปกติ ควรติดตั้งเพลาน้ำตั้งแต่ 2-4 ตัว สำหรับแม่พิมพ์แบบสี่เหลี่ยม และ 3 ตัว สำหรับแม่พิมพ์แบบทรงกระบอกบาง เพลาน้ำถูกออกแบบให้สวมพอดีกับปลอกนำ และขยายรูทางด้านหลังของปลอกนำให้ใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลาน้ำ เส้นผ่านศูนย์กลางของเพลาน้ำควรมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของปลอกนำ อย่างน้อย 7 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลาน้ำต่อขนาดของแม่พิมพ์แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางนำเลื่อนต่อขนาดของแม่พิมพ์

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใช้งาน (mm)	ขนาดของแม่พิมพ์ (mm)
10	125 x 125 ถึง 125 x 156
14	156 x 156 ถึง 196 x 396
18	246 x 246 ถึง 246 x 496
22	296 x 296 ถึง 346 x 594
30	396 x 396 ถึง 544 x 594
38	594 x 594

ที่มา: ชาลี (2546)

6. แผ่นคอร์ (Core plate) เป็นแผ่นรองรับชิ้นส่วนของอินเลอร์ทส่วนคอร์ (Core insert)

7. แผ่นรองหลัง (Spacer block) เป็นแผ่นรองรับชิ้นส่วนของอินเลอร์ทส่วนคอร์ หรือของแผ่นคอร์ ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับแม่พิมพ์

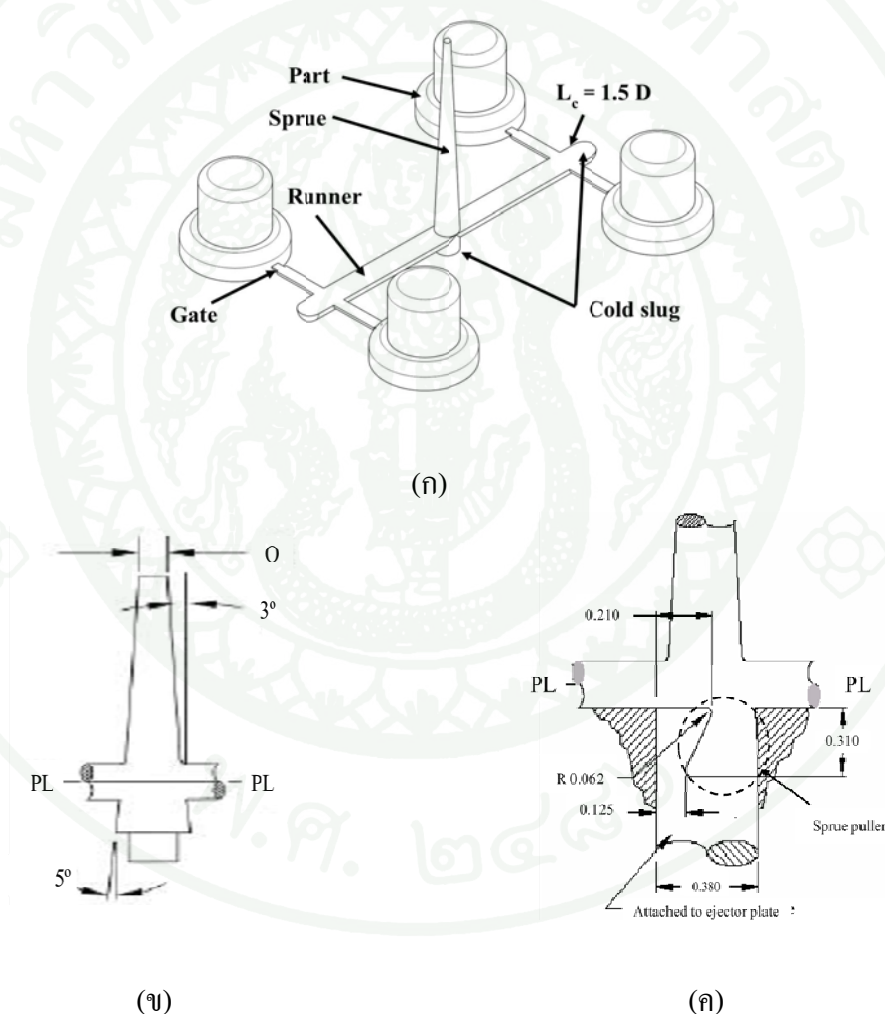
8. ระบบปลด (Ejection system) มีแผ่นตัวปลด (Ejector plate) ทำหน้าที่ กำหนดและรักษาดำแหน่งของก้านกระทุ้งในแนวนอนขณะเคลื่อนที่

9. แผ่นฐานยึดล่าง (Bottom clamping plate) ทำหน้าที่ยึดแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องฉีดโดยใช้สกรูยึด มีรูปบริเวณตรงกลางของแผ่นฐานยึดล่างเพื่อรับกับเพลาคระทุ้งของเครื่องฉีด

10. ปลอกนำ (Guide bushing) ทำหน้าที่สวมเข้ากับเพลานำ เพื่อช่วยในการ กำหนดตำแหน่งขณะประกอบแม่พิมพ์

5.2 การออกแบบรูฉีด

รูฉีดเป็นส่วนที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลจากหัวฉีดเข้าสู่ทางวิ่ง และมีบ่อพักเย็น (Cold slug) เพื่อป้องกันการแข็งตัวที่บริเวณด้านหน้าของพอลิเมอร์หลอมเหลว รวมถึงช่วยในการดึงก้านรูฉีดออกจากสักรูฉีด (Sprue puller) บ่อพักเย็นควรอยู่ในตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทาง การไหลตั้งฉากกับทิศทางเดิม เช่น ด้านใต้ของก้านรูฉีด หรือที่ปลายของทางวิ่ง โดยมีความยาวประมาณ 1.5 เท่า ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางวิ่ง (Beaumont, 2004) ดังแสดงในภาพที่ 18



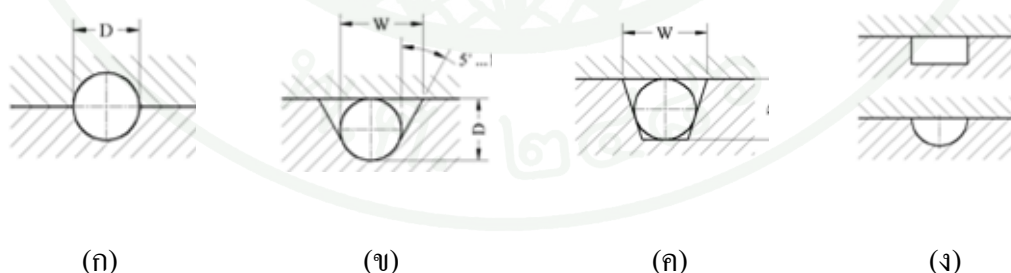
ภาพที่ 18 ก้านรูฉีดและบ่อพักเย็น (ก) ตำแหน่งของบ่อพักเย็น (ข) ขนาดของก้านรูฉีด และ (ค) ขนาดของสักรูฉีดและบ่อพักเย็น

ที่มา: Beaumont (2004); Harper (2006)

5.3 การออกแบบทางวิ่ง

ทางวิ่งทำหน้าที่นำพาพอลิเมอร์หลอมเหลวจากกรู๊นดเข้าสู่เป้าพิมพ์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ทางวิ่งเย็น (Cold runner) และทางวิ่งร้อน (Hot runner) โดยทางวิ่งเย็น เป็นทางวิ่งที่อยู่ในระนาบเดียวกับชิ้นงาน ทำให้ติดกับชิ้นงานเมื่อปลดออก ใช้น้ำมันพิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น ข้อดีของทางวิ่งเย็น คือ มีราคาถูกและออกแบบได้ง่าย อย่างไรก็ตามต้องมีการตัดแต่งชิ้นงานภายหลังจากกระบวนการฉีดขึ้นรูป ต่างกับทางวิ่งร้อนที่ใช้ร่วมกับแม่พิมพ์แบบสามแผ่น ซึ่งให้ความร้อนกับแผ่นแม่พิมพ์ส่วนที่เป็นทางวิ่ง เพื่อรักษาอุณหภูมิของพอลิเมอร์ให้อยู่ในช่วงของการหลอมเหลว พอลิเมอร์หลอมเหลวในทางวิ่งร้อนสามารถใช้ในการฉีดของรอบถัดไปโดยไม่เป็นของเสียในกระบวนการผลิต ทำให้ใช้แรงดันฉีดน้อยกว่า มีแรงบิดแม่พิมพ์น้อยกว่า อย่างไรก็ตามข้อด้อยของระบบทางวิ่งร้อน ได้แก่ แม่พิมพ์และอุปกรณ์ที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปมีราคาสูงกว่าระบบทางวิ่งเย็น รวมไปถึงการใช้ทางเข้าแบบเข็มสำหรับทางวิ่งร้อน ทำให้เกิดความร้อนสูง ซึ่งอาจทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวเกิดการเสื่อมสภาพได้ ทางวิ่งร้อนนิยมนำไปใช้กับการฉีดเทอร์โมพลาสติก แต่ไม่เหมาะกับการฉีดยาง

5.3.1 ลักษณะหน้าตัดของทางวิ่ง ทางวิ่งควรมีอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดต่อพื้นที่ผิวสัมผัสสูงที่สุด เมื่อพิจารณาจากการส่งถ่ายแรงดันและการถ่ายเทความร้อน โดยทั่วไปหน้าตัดของทางวิ่งที่ใช้มี 4 แบบ คือ แบบกลม (Round) แบบพาราโบลา (Parabolic) แบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal) และแบบสี่เหลี่ยม (Rectangle) หรือครึ่งวงกลม (Half round) ดังแสดงในภาพที่ 19

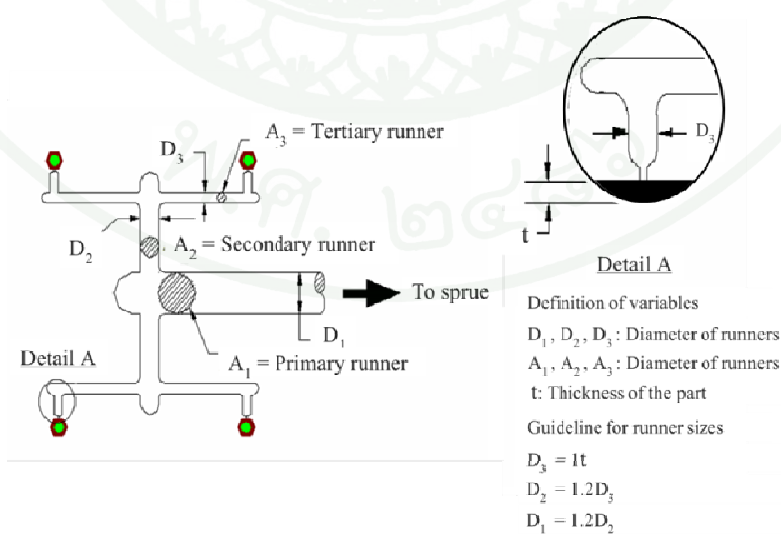


ภาพที่ 19 ลักษณะหน้าตัดของทางวิ่ง (ก) ทางวิ่งแบบกลม (ข) ทางวิ่งแบบพาราโบลา (ค) ทางวิ่งแบบสี่เหลี่ยมคางหมู และ (ง) ทางวิ่งแบบสี่เหลี่ยมและครึ่งวงกลม

ที่มา: ชาลี (2546)

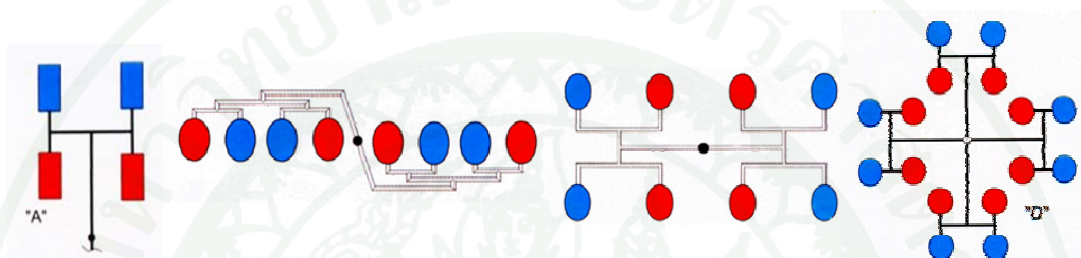
ทางวิ่งแบบกลม มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับพอลิเมอร์หลอมเหลวที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแบบอื่นๆ ส่งผลให้มีการสูญเสียความร้อนและความเสียดทานน้อย จึงมีอัตราการเย็นตัวที่ช้าที่สุด สามารถให้แรงดันฉีดและแรงดันคงค้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม รอยต่อของทางวิ่งบนแม่พิมพ์ทั้งสองด้านต้องประกบตรงกันพอดี ซึ่งอาศัยความเที่ยงตรง (Precision) มาก จึงมีค่าใช้จ่ายและเวลาในการผลิตสูง ในส่วนของทางวิ่งแบบพาราโบลา มีลักษณะคล้ายกับหน้าตัดรูปวงกลม สามารถผลิตได้ง่ายกว่า เนื่องจากการกัดเซาะร่องที่แผ่นแม่พิมพ์เพียงด้านเดียว ทางวิ่งแบบนี้มีการสูญเสียความร้อนมากกว่าทางวิ่งแบบกลม เช่นเดียวกับทางวิ่งแบบสี่เหลี่ยมคางหมู ถึงแม้ว่าการกัดเซาะร่องทำได้ง่ายกว่าแบบพาราโบลา แต่มีการสูญเสียความร้อนมากกว่า สำหรับทางวิ่งแบบสี่เหลี่ยมและครึ่งวงกลม เป็นลักษณะของทางวิ่งที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลวมาก มีการสูญเสียความร้อนและมีความเสียดทานสูง ส่งผลให้มีอัตราการเย็นตัวเร็วกว่าเมื่อเทียบกับทางวิ่งในลักษณะอื่นๆ อย่างไรก็ตาม ทางวิ่งแบบสี่เหลี่ยมและครึ่งวงกลมมีข้อดีในเรื่องของการกัดเซาะร่องที่ทำได้ง่าย

5.3.2 ขนาดของทางวิ่ง ผู้ออกแบบต้องพิจารณาถึงขนาดของทางวิ่งให้เหมาะสมกับขนาดของชิ้นงาน โดยทั่วไปขนาดของทางวิ่งลำดับสาม (Tertiary runner) ควรมีความเท่ากับความหนาของชิ้นงาน และทางวิ่งรอง (Secondary runner) ควรมีความ 1.2 เท่าของทางวิ่งลำดับสาม เช่นเดียวกับทางวิ่งหลักซึ่งมีความเท่ากัน 1.2 เท่าของทางวิ่งรอง การออกแบบขนาดทางวิ่งหลักและทางวิ่งรอง ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 อัตราส่วนของขนาดทางวิ่งระหว่างทางวิ่งหลักและทางวิ่งรอง

5.3.3 การร่างแบบทางวิ่ง ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ จำนวนของเบ้าพิมพ์ ลักษณะของชิ้นงาน ชนิดของแม่พิมพ์ และชนิดของทางเข้า ในการออกแบบเพื่อร่างแบบทางวิ่งมีข้อพิจารณาหลัก 2 ประการ คือ ความยาวของทางวิ่งควรออกแบบให้สั้นที่สุดเพื่อลดการสูญเสียแรงดัน (Pressure losses) และระบบทางวิ่งต้องสมดุลกัน โดยระยะทางที่พอลิเมอร์ไหลออกจากจากรูฉีดไปยังทางเข้าของชิ้นงานในแต่ละเบ้าพิมพ์ต้องเท่ากัน เพื่อให้พอลิเมอร์ไหลเต็มเบ้าพิมพ์ได้พร้อมๆ กัน ตัวอย่างการจัดวางทางวิ่งแบบสมมาตร ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ตัวอย่างการจัดวางแบบทางวิ่งแบบสมมาตร

ที่มา: Beaumont (2004)

5.4 การออกแบบทางเข้า

การออกแบบทางเข้าต้องพิจารณาถึงชนิด (Type) จำนวน (Number) และตำแหน่ง (Location) ควรออกแบบทางเข้าให้อยู่บริเวณที่มีความหนามากที่สุดของชิ้นงาน รวมถึงควรเป็นตำแหน่งที่ส่งผลให้เกิดรอยประสานขึ้นบนบริเวณที่ไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน ทางเข้าควรมีขนาดเล็กและบาง เพื่อให้ง่ายต่อการตัดออกจากชิ้นงานภายหลังการขึ้นรูป รวมถึงเพื่อเพิ่มความเร็วในการไหลของพอลิเมอร์ไหลออกจากช่องฉีด ส่งผลให้ความหนืดของพอลิเมอร์ลดลงเนื่องจากความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้น และไหลเข้าสู่เบ้าพิมพ์ได้ง่ายขึ้น ในขณะที่พอลิเมอร์ไหลเต็มเบ้าพิมพ์ ทางเข้าที่บางยังทำหน้าที่ป้องกันพอลิเมอร์ไหลย้อนกลับเมื่อสกรูหมุนถอยหลังเพื่อเตรียมเนื้อในรอบการฉีดถัดไป เนื่องจากเป็นส่วนที่แข็งตัวเร็วที่สุด อย่างไรก็ตาม ทางเข้าที่มีขนาดเล็กและบาง ส่งผลให้เกิดอัตราเครียดเฉือนสูงขึ้น หากอัตราเครียดเฉือนมีค่าสูงเกินไป อาจส่งผลให้เกิดความร้อนสูงขึ้น เกิดการเสื่อมสภาพ หรือเกิดการคงรูปบางส่วนในกรณีของยางได้ ยกตัวอย่างเช่น อัตราเครียดเฉือนที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปยางควรมีค่าไม่เกิน $1,000 \text{ s}^{-1}$ (Isayev, 1991) เป็นต้น ค่าอัตราเครียดเฉือนสามารถคำนวณได้จากสมการสำหรับการไหลผ่าน

ทางเข้าที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยม (Slit die) และที่มีหน้าตัดกลม (Circular die) รวมถึงแบ่งตามสมบัติการไหลของของไหลทั้งแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid) และนอนนิวโตเนียนแบบซูโดพลาสติก (Non-newtonian pseudoplastic fluid) ดังแสดงในตารางที่ 2

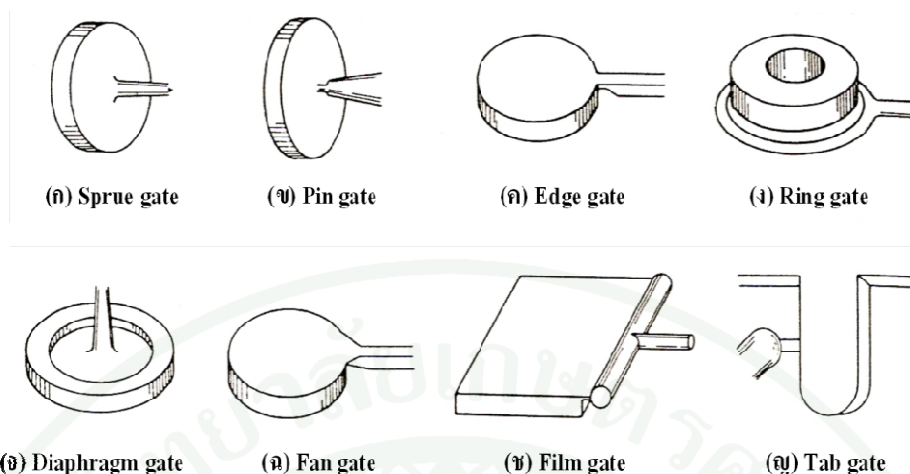
ตารางที่ 2 สมการอัตราครีคเนียน

ลักษณะของทางเข้า	นิวโตเนียน	นอนนิวโตเนียนแบบซูโดพลาสติก
แบบแถบสี่เหลี่ยม	$\dot{\gamma} = \frac{6Q}{wh^2}$	$\dot{\gamma} = \frac{2 \left(2 + \frac{1}{n} \right) Q}{wh^2}$
แบบกลม	$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3}$	$\dot{\gamma} = \frac{\left(3 + \frac{1}{n} \right) Q}{\pi R^3}$

ที่มา: Kazmer (2007)

- เมื่อ Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
 R คือ รัศมีของทางเข้าหน้าตัดกลม (m)
 w คือ ความกว้างของทางเข้าหน้าตัดสี่เหลี่ยม (m)
 h คือ ความสูงของทางเข้าหน้าตัดสี่เหลี่ยม (m)
 n คือ ค่าดัชนีการไหล

ในทางปฏิบัติทางเข้าควรมีความหนาอยู่ที่ 50-75% ของความหนาชิ้นงาน สำหรับการขึ้นรูปวัสดุเทอร์โมพลาสติก และ 80-90% สำหรับวัสดุประเภทยาง โดยที่ความยาวของทางเข้า (Gate land) ไม่ควรเกิน 1.5 mm โดยทั่วไป ชนิด และขนาดของทางเข้าที่นิยมใช้ แสดงในภาพที่ 22 ซึ่งได้แก่



ภาพที่ 22 ชนิดของทางเข้า (ก) แบบก้านรูฉีด (ข) แบบเข็ม (ค) แบบขอบ (ง) แบบวงแหวน
(จ) แบบมัน (ฉ) แบบพัด (ช) แบบฟิล์ม และ (ญ) แบบแถบ

ที่มา: Beaumont (2004)

5.4.1 ทางเข้าแบบก้านรูฉีด (Sprue gate) เป็นทางเข้าที่พอลิเมอร์ไหลลงไหลเข้าสู่เบ้าพิมพ์โดยตรงจากรูฉีด เหมาะสำหรับการฉีดขึ้นงานที่มีขนาดใหญ่ สามารถฉีดได้เพียง 1 เบ้าพิมพ์ ในกรณีของแม่พิมพ์แบบสองแผ่น และควรมีความยาวของทางเข้าสั้นที่สุดเท่าที่ทำได้

5.4.2 ทางเข้าแบบเข็ม (Pin gate) เหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและมีลักษณะซับซ้อน โดยมีจุดเด่น คือ กำหนดบริเวณทางเข้ามีขนาดเล็ก ขนาดของทางเข้าแบบเข็มที่เหมาะสม คือ มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 40-50% ของความหนาของผนังชิ้นงาน และมีความยาวของทางเข้าประมาณ 0.5-0.75 mm

5.4.3 ทางเข้าแบบขอบ (Edge gate) เป็นทางเข้าที่อยู่บริเวณขอบของชิ้นงาน หรือบริเวณเส้นแบ่งผิวแม่พิมพ์ ทำให้ลดรอยตำหนิที่เกิดบนชิ้นงานได้ มีลักษณะเป็นแถบสี่เหลี่ยม ควรมีความหนาอยู่ที่ 50-70% ของความหนาผนังชิ้นงาน และมีความยาวทางเข้าอยู่ระหว่าง 0.5-1 mm

5.4.4 ทางเข้าแบบวงแหวน (Ring gate) มีลักษณะเหมือนทางเข้าแบบมัน เหมาะกับชิ้นงานที่เป็นลักษณะท่อในแม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่นที่มีเบ้าพิมพ์มากกว่าหนึ่งชุด ทางเข้าแบบวง

แหวนมีทางเข้าของพอลิเมอร์หลอมเหลวรอบๆ ผิวเส้นรอบวงด้านนอกของชิ้นงาน ทำให้ช่วยลดผลกระทบจากการไหลแบบ Hesitation

5.4.5 ทางเข้าแบบม่าน (Diaphragm gate) มีรูฉีดเชื่อมต่อไปจนถึงทางเข้าที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของท่อเล็กน้อย พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลจากรูฉีดออกไปรอบๆ เป็นรัศมีเข้าไปยังชิ้นงาน ความหนาของทางเข้าแบบม่านที่จุดเริ่มต้นควรมีความหนาอยู่ที่ 125% ของความหนาของผนัง และมีความหนาก่อนเข้าชิ้นงาน 50-70% ของความหนาผนัง โดยมีความยาวทางเข้าประมาณ 0.5 mm

5.4.6 ทางเข้าแบบพัด (Fan gate) เป็นทางเข้าที่อยู่บริเวณขอบของชิ้นงานเช่นเดียวกับทางเข้าแบบขอบ แต่มีขนาดความกว้างมากกว่า ทางเข้าแบบพัดเหมาะกับชิ้นงานที่กว้างและมีผนังบาง เนื่องจากทางเข้าแบบพัดมีการไหลที่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม จากความกว้างของทางเข้า ทำให้หลงเหลือรอยตำหนิขนาดใหญ่บนชิ้นงาน ทางเข้าควรมีความหนาไม่เกิน 70% ของความหนาผนังชิ้นงาน และมีความกว้างทางเข้าตั้งแต่ 6 mm จนถึง 25% ของความกว้างชิ้นงาน

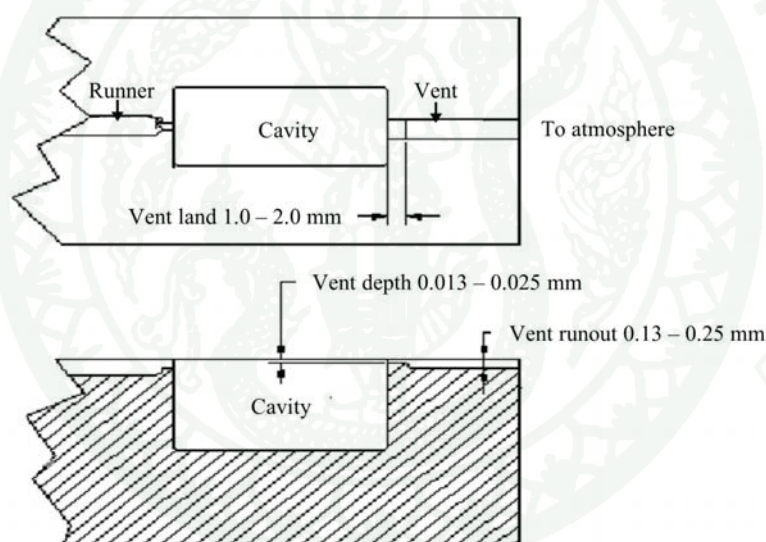
5.4.7 ทางเข้าแบบฟิล์ม (Film gate) มีลักษณะเหมือนทางเข้าแบบขอบสี่เหลี่ยมที่มีขนาดยาว โดยวางตำแหน่งทางเข้าขนานไปตลอดความกว้างของชิ้นงาน แต่อาจให้มีความหนาที่บางลงได้ ช่วยประหยัดเวลาในการตัดแต่งผิวชิ้นงานหลังการฉีด ทางเข้าแบบฟิล์มมีพื้นที่การไหลมาก ส่งผลให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลเต็มเบ้าพิมพ์ได้เร็ว แต่อาจมีข้อด้อยคือ เกิดรอยตำหนิบนผิวชิ้นงานกว้างและต้องตัดแต่งชิ้นงาน โดยทั่วไปมีความหนาของทางเข้าอยู่ที่ 0.25-1.5 mm

5.4.8 ทางเข้าแบบแถบ (Tab gate) โดยทั่วไปใช้กับชิ้นงานที่แบนและบาง เพื่อลดความเค้นเฉือนในเบ้าพิมพ์ โดยฉีดเข้าทางด้านข้างของชิ้นงาน รอยต่อระหว่างทางวิ่งกับทางเข้าแบบแถบทำเป็นมุมฉากเพื่อป้องกันไม่ให้พลาสติกหลอมเหลวพุ่งเข้าสู่เบ้าพิมพ์และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้พอลิเมอร์ไหลเข้าเบ้าพิมพ์ได้อย่างสม่ำเสมอ ทางเข้าแบบแถบควรมีความหนาอย่างน้อย 75% ของความหนาผนังชิ้นงาน

5.5 การออกแบบช่องระบายอากาศ (Venting design)

โดยทั่วไป ช่องระบายอากาศมักถูกกำหนดให้อยู่บริเวณเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์และสลักปลด อย่างไรก็ตาม ข้อบกพร่องบนชิ้นงาน ยกตัวอย่างเช่น ชิ้นงานไม่เต็มแบบ (Short shot) และรอยไหม้ (Burn marks) ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในบริเวณสุดท้ายที่พอลิเมอร์ไหลอมเหลวไหลเข้าไปถึงในเบ้าพิมพ์ รวมถึงที่ตำแหน่งรอยประสาน การกำหนดตำแหน่งของช่องระบายอากาศที่บริเวณเหล่านี้จึงมีความสำคัญ ช่องระบายอากาศควรมีความลึก (Vent depth) จากเส้นแบ่งส่วนของแม่พิมพ์ ในช่วงระหว่าง 0.013-0.025 mm มีความยาว (Vent land) ประมาณ 1-2 mm และมีความลึกระหว่างปลายของช่องระบายอากาศไปยังนอกแม่พิมพ์ (Vent runout) ประมาณ 0.13-0.25 mm ดังแสดงในภาพที่

23



ภาพที่ 23 ขนาดของช่องระบายอากาศ

6. การวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

ในปัจจุบันมีการนำคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม มาใช้ในการจำลองและวิเคราะห์การไหลในกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยสามารถวิเคราะห์การไหลที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ และประเมินความสำเร็จของการออกแบบชิ้นงาน รวมถึงพิจารณาข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้น ทำให้สามารถหาสาเหตุ และแก้ไขชิ้นงานที่มีข้อบกพร่องได้ก่อนกระบวนการผลิตจริง ส่งผลให้สามารถลดต้นทุนในการผลิต และป้องกันการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงาน ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการจำลองการ

ไหล ได้แก่ Moldflow Cadmould Moldex และ 3D Sigma เป็นต้น แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการจำลองการไหลมีลักษณะเป็น โครงสร้างตาข่าย (Mesh) ประเภทต่างๆ โดยโครงสร้างตาข่ายเหล่านี้ เกิดจากการแบ่งรูปทรงของชิ้นงานออกเป็น ส่วนย่อยๆ หรือเอลิเมนต์ (Element) แล้วจึงนำมาประกอบเข้าด้วยกัน และเชื่อมต่อกันที่จุดโหนด (Node) เอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองการไหลสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. เอลิเมนต์ชนิด 1 มิติ หรือแบบคาน (Beam element) เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างโหนดสองโหนด สามารถใช้ในการจำลองระบบการฉีด (Injection system) หรือระบบหล่อเย็น (Cooling system)
2. เอลิเมนต์ชนิด 2 มิติ หรือแบบแผ่นผิวสามเหลี่ยม (Triangle) เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างโหนดสามโหนด สามารถใช้ในการจำลองรูปทรงของชิ้นงาน (Part geometry) รวมถึงอินเสิร์ตของแม่พิมพ์ (Mold insert)
3. เอลิเมนต์ชนิด 3 มิติ หรือแบบพีระมิดฐานสามเหลี่ยม (Tetrahedron) เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างโหนดสี่โหนด สามารถใช้ในการจำลองส่วนต่างๆ ของแบบจำลองการไหล ยกตัวอย่างเช่น รูปทรงของชิ้นงาน คอร์ของแม่พิมพ์ (Cores) หรือระบบการฉีด เป็นต้น

6.1 โครงสร้างตาข่ายในการจำลองการฉีด

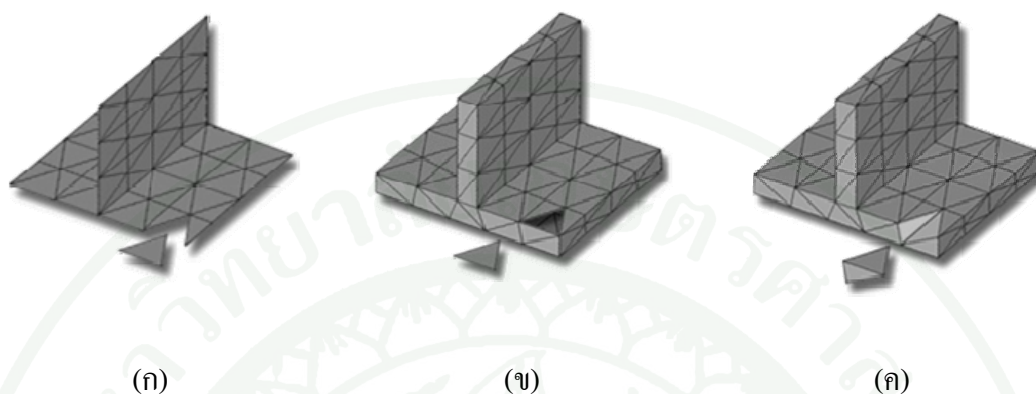
โครงสร้างตาข่ายที่ใช้ในการจำลองการฉีดสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

6.1.1 โครงสร้างตาข่ายแบบ 2 มิติ (2D or midplane) กำหนดโดยการสร้างเอลิเมนต์ชนิด 2 มิติ หรือแบบแผ่นผิวสามเหลี่ยมที่จุดกึ่งกลางความหนาของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 24(ก)

6.1.2 โครงสร้างตาข่ายแบบ 2.5 มิติ (2.5D or dual domain) กำหนดโดยการสร้างเอลิเมนต์ชนิด 2 มิติ หรือแบบแผ่นผิวสามเหลี่ยมที่พื้นผิวนอกของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 24(ข)

6.1.3 โครงสร้างตาข่ายแบบ 3 มิติ (3D or solid) กำหนดโดยการสร้างเอลิเมนต์ชนิดพีระมิดฐานสามเหลี่ยมลงบนชิ้นงาน 3 มิติ ดังแสดงในภาพที่ 24(ค)

ในการสร้างโครงสร้างตาข่ายทั้ง 3 ประเภท สามารถนำเอลิเมนต์ชนิด 1 มิติ หรือชนิด 2 มิติ มาผสมผสานเพื่อจำลองระบบการฉีดหรือระบบหล่อเย็นของแบบจำลองการไหลได้



ภาพที่ 24 โครงสร้างตาข่าย (ก) แบบ 2 มิติ (ข) แบบ 2.5 มิติ และ (ค) แบบ 3 มิติ

ที่มา: Shoemaker (2008)

6.2 สมมติฐานในการจำลองการไหล

6.2.1 โครงสร้างตาข่ายแบบ 2 มิติ และ 2.5 มิติ ใช้สมมติฐานร่วมกันในการวิเคราะห์การไหลของพอลิเมอร์ ได้แก่

- การไหลของพอลิเมอร์ในโครงสร้างตาข่ายแบบ 2 มิติ และ 2.5 มิติ มีลักษณะเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และมีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบนิวโตเนียนทั่วไป (Generalized newtonian fluid)

- ไม่นำผลของความเฉื่อย (Inertia effect) และแรงโน้มถ่วง (Gravity effect) มาใช้ในการวิเคราะห์ เนื่องจากชิ้นงานที่เหมาะสมต่อโครงสร้างตาข่ายแบบ 2 และ 2.5 มิติมีลักษณะบาง และเป็นการไหลแบบราบเรียบ

- การนำความร้อน (Heat conduction) ในแนวระนาบ (In-plane) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการนำความร้อนในทิศทางความหนา (Thickness direction)

- การพาความร้อน (Heat convection) ในทิศทางความหนา มีค่าน้อยมาก เพราะการไหลส่วนใหญ่เกิดขึ้นในแนวระนาบ

- พื้นที่บริเวณขอบของชิ้นงานมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวทั้งหมด จึงไม่พิจารณาการสูญเสียความร้อน (Heat loss) ที่บริเวณขอบ

6.2.2 สมมติฐานในการกำหนดขนาดเอลิเมนต์ ในการจำลองการไหลของพอลิเมอร์แบบ 2 มิติ และ 2.5 มิติ มีการใช้เอลิเมนต์ 3 ประเภท ซึ่งแต่ละประเภทมีสมมติฐานในการจำลองการไหลดังนี้

- เอลิเมนต์ชนิด 1 มิติ หรือแบบคาน ใช้ในการจำลองระบบฉีดและระบบหล่อเย็นของโครงสร้างตาข่ายแบบ 2 มิติ และ 2.5 มิติ โดยสามารถกำหนดรูปร่างและขนาดของพื้นที่หน้าตัดได้ โดยมีสมการการไหลแบบนิวโตเนียนทั่วไปภายในท่อทรงกลมสมมาตรรอบแกน (Axis symmetric circular-tube) รูปร่างของหน้าตัดที่ไม่ได้เป็นวงกลมสามารถแทนที่ด้วยหน้าตัดแบบวงกลมเสมือนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter) เท่ากัน แต่ปรับขนาดของอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volumetric flow rate) ลงมาให้มีความเร็วในการไหลโดยเฉลี่ยเท่ากับรูปร่างหน้าตัดที่แท้จริง บริเวณที่พื้นที่หน้าตัดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว มีการสูญเสียบริเวณข้อต่อ (Juncture loss) หรือการสูญเสียไฮดรอลิก (Hydraulic loss) เกิดขึ้นในการไหล มีการชดเชยโดยใช้สมการเชิงประจักษ์ (Empirical model) ที่มีพื้นฐานอยู่บนการปรับแก้โดยใช้ตัวคูณของ Bagley เพื่อชดเชยแรงดัน ความเค้นเฉือน และอัตราเฉื่อยเฉือนที่เปลี่ยนแปลงไป การใช้เอลิเมนต์ชนิด 1 มิติ มีข้อด้อยอยู่ที่ไม่สามารถวิเคราะห์การเสียดสมดุลจากการเหนี่ยวนำโดยแรงเฉือน (Shear induced imbalance) ที่อาจเกิดขึ้นในบางระบบ

- เอลิเมนต์ชนิด 2 มิติ หรือแบบแผ่นผิวสามเหลี่ยม ในโครงสร้างตาข่ายแบบ 2 มิติ (Midplane mesh) หรือเอลิเมนต์ชนิดเปลือก (Shell element) สามารถนำมาใช้ในการจำลองชิ้นงาน 3 มิติ ที่มีลักษณะเป็นแผ่นผิวบาง โดยสามารถกำหนดความหนาของแผ่นผิวให้กับเอลิเมนต์ชนิดนี้ได้ อาจเรียกโครงสร้างตาข่ายที่ประกอบจากเอลิเมนต์ชนิดนี้ได้ว่าโครงสร้างตาข่ายแบบ 2.5 มิติ เนื่องจากเอลิเมนต์มีลักษณะเป็นผิวบาง 2 มิติ แต่มีการกำหนดความหนาเสมือนกับเป็นชิ้นงานสามมิติ อย่างไรก็ตามรูปร่างของชิ้นงานที่สามารถจำลองได้ด้วยโครงสร้างเครือข่ายชนิดนี้มีข้อจำกัด โดยอัตราส่วนของความกว้างต่อความหนาในแต่ละส่วนของชิ้นงานควรมีค่าน้อย

ประมาณ 4 ต่อ 1 (Shoemaker, 2008) เพื่อไม่ให้ผลการวิเคราะห์เกิดความคลาดเคลื่อน (Error) มากเกินไป

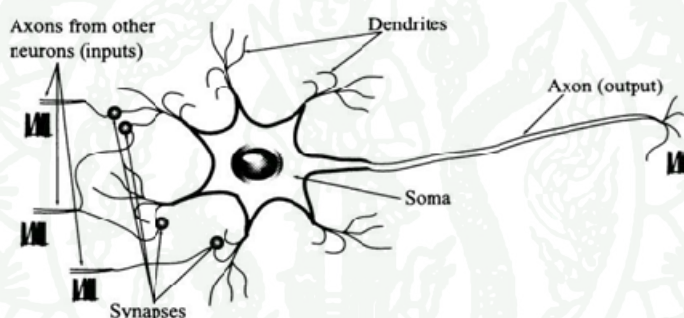
- เอลิเมนต์ชนิด 2 มิติ หรือแบบแผ่นผิวสามเหลี่ยมในโครงสร้างตาข่ายแบบ 2.5 มิติ (Dual domain) สามารถนำมาใช้ในการจำลองชิ้นงาน 3 มิติ โดยกำหนดเอลิเมนต์แบบแผ่นผิว 2 มิติ ลงบนแผ่นผิวนอก (Surface) ของชิ้นงาน 3 มิติ อาศัยหลักการเดียวกับโครงสร้างตาข่ายแบบ 2 มิติ แต่มีข้อแตกต่างกับโครงสร้างเครือข่ายแบบ 2 มิติ ในการคำนวณความหนาของชิ้นงาน โดยโครงสร้างตาข่ายแบบ 2.5 มิติ มีการคำนวณความหนาของชิ้นงานจากระยะห่างระหว่างเอลิเมนต์ที่อยู่ตรงข้ามกันในทิศทางความหนา ดังนั้นเอลิเมนต์ในแต่ละด้านของชิ้นงานในทิศทางความหนา ต้องได้รับการจัดเรียงให้ตรงกัน เพื่อให้การคำนวณความหนาเป็นไปอย่างเหมาะสม เพราะฉะนั้นความหนาแน่น และการกระจายตัวของเอลิเมนต์จึงมีผลอย่างมากต่อความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ อาจเรียกโครงสร้างตาข่ายที่ประกอบจากเอลิเมนต์ชนิดนี้ได้ว่าโครงสร้างตาข่ายแบบ 2.5 มิติ แบบปรับปรุง หรือแบบ 2.5D modified โครงสร้างเครือข่ายควรมีการจัดเรียงเอลิเมนต์ในแต่ละฝั่งตรงข้ามของทิศทางความหนาให้ตรงกันอย่างน้อย 85% โดยประมาณ

6.2.3 โครงสร้างตาข่ายแบบ 3 มิติ มีสมมติฐานในการจำลองการไหลของโครงสร้างตาข่ายแบบ 3 มิติ ได้แก่

- แบบจำลองการไหลใช้สมการการไหลนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-stokes equation)
- มีการคำนวณแรงดัน ความเร็วในแต่ละทิศทาง และอุณหภูมิในแต่ละโหนด
- มีการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในทุกทิศทาง
- นำผลกระทบของความเฉื่อยและแรงโน้มถ่วงมาพิจารณา

7. แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

เครือข่ายประสาทเทียม เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการประมวลผลข้อมูล โดยจำลองจากการทำงานของเครือข่ายประสาทของสิ่งมีชีวิต ดังแสดงในภาพที่ 25 ซึ่งประกอบด้วย ส่วนของการประมวลผลที่เรียกว่า นิวรอน (Neuron) เมื่อสัมผัสกับวัตถุนิดหนึ่ง นิวรอนตัวแรกเป็นตัวกำหนดลักษณะของสัญญาณ โดยมีใยประสาท (Dendrites) ทำหน้าที่รับสัญญาณผ่านเส้นใยประสาท และส่งสัญญาณไปยังตัวเซลล์ (Soma) หลังจากนั้นตัวเซลล์มีการประมวลผลโดยการรวมสัญญาณ และแปลงสัญญาณออกไปเป็นสัญญาณที่มีความถี่ต่างกับตอนแรก และส่งสัญญาณนี้ออกไปยังแกนประสาทนาออก (Axon) ในแต่ละเครือข่ายประสาทที่เชื่อมต่อกัน โดยจุดประสานประสาท (Synapse) สัญญาณนี้ส่งต่อกันไปจนกระทั่งสามารถรับรู้ได้ถึงลักษณะของวัตถุนั้น



ภาพที่ 25 เครือข่ายประสาทในทางชีววิทยา

ที่มา: Gupta *et al.* (1993)

การศึกษาเครือข่ายประสาทเทียมมีประวัติความเป็นมาเริ่มในปี ค.ศ. 1943 McCulloch และ Pitts แห่งมหาวิทยาลัยชิคาโก ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้นำเสนอเครือข่ายประสาทเทียมอย่างง่าย โดยมีหลักการในการรวมค่าข้อมูลนำเข้าพร้อมทั้งค่าน้ำหนักประสาท แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าจุดเปลี่ยนระดับ (Thresholding) จากหลักการพื้นฐานนี้ ได้เป็นต้นแบบให้นักวิจัยจำนวนมากได้คิดค้นรูปแบบของเครือข่ายประสาทเทียมแบบต่างๆ มากมายจนถึงปัจจุบัน

คุณลักษณะสำคัญของเครือข่ายประสาทเทียม คือ ความสามารถในการเรียนรู้ (Learn) ตัวเครือข่ายถูกสอนโดยการป้อนข้อมูลรูปแบบ (Pattern) ต่างๆ ที่ต้องการให้เครือข่ายเรียนรู้ด้วยกฎการเรียนรู้ (Learning rule) และทำให้เป็นทั่วไป (Generalize) เพื่อให้เครือข่ายสามารถแยกแยะ

รูปแบบของข้อมูลนำเข้าแบบใหม่ๆ ที่ตัวเครือข่ายไม่รู้จำมาก่อนได้ และใช้การคำนวณเชิงนิเวศ (Neural computing) ซึ่งเป็นกระบวนการคำนวณหรือประมวลผลข้อมูล โดยใช้โครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียมในการตอบสนองเชิงปรับตัวได้กับข้อมูลนำเข้าของระบบตามกฎการเรียนรู้ของเครือข่าย แต่ละนิเวศสามารถมีข้อมูลนำเข้าได้หลายข้อมูล แต่มีข้อมูลส่งออกเพียงข้อมูลเดียว แต่ละข้อมูลส่งออกถูกส่งแยกไปยังข้อมูลนำเข้าของนิเวศอื่นๆ ภายในเครือข่าย ซึ่งมีค่าถ่วงน้ำหนักเป็นตัวกำหนดกำลังของการติดต่อภายในและช่วยในการตัดสินใจ การทำงานของนิเวศในบางเครือข่ายถูกกำหนดไว้ตายตัว หรือกำหนดให้สามารถปรับเปลี่ยนได้ โดยเป็นการปรับแต่งจากภายนอกเครือข่าย หรือนิเวศสามารถปรับได้ด้วยตัวเอง ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการเรียนรู้ และจดจำของเครือข่ายประสาทเทียม

นิเวศเป็นหน่วยประมวลผลพื้นฐานที่สำคัญในการทำงานของเครือข่ายประสาทเทียม (ปรมินทร์, 2544) มีองค์ประกอบ 3 ส่วน คือ

1. กลุ่มของการเชื่อมโยงหรือไซแนปส์ เป็นตัวกำหนดการเชื่อมโยงระหว่างนิเวศ
2. ตัวบวก (Adder) สำหรับรวมข้อมูลป้อนเข้าที่คูณด้วยค่าการเชื่อมโยงแล้ว อาจเรียกได้ว่าเป็นการรวมเชิงเส้น (Linear combination)
3. ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) มีหน้าที่จำกัดช่วงข้อมูลส่งออกให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ ดังแสดงในสมการที่ 15

$$y_i(t+1) = f(\sum w_{ij}x_j(t) - \theta_i) \quad (15)$$

โดยที่ w_{ij} คือ ค่าน้ำหนักที่เชื่อมต่อ
 x_j คือ ค่าข้อมูลนำเข้า
 θ_i คือ ค่าจุดเปลี่ยนระดับ
 y_i คือ ค่าข้อมูลส่งออก
 f คือ ฟังก์ชันถ่ายโอน

จากความสามารถในการจำลองพฤติกรรมทางกายภาพของระบบที่มีความซับซ้อนจากข้อมูลที่ป้อนเพื่อให้มีการเรียนรู้ ทำให้มีการนำเครือข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้งานเป็นจำนวนมาก เช่น งานการจัดจำรูปแบบที่มีความไม่แน่นอน งานการประมาณค่าฟังก์ชันหรือการประมาณความสัมพันธ์ งานที่สิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอเนื่องจากวงจรเครือข่ายประสาทเทียมสามารถปรับตัวเองได้ การวิเคราะห์และออกแบบระบบที่ช่วยในการแนะนำผู้ปฏิบัติงาน การควบคุมระบบปรับอากาศของอาคารเพื่อให้ประหยัดพลังงานมากที่สุดในขณะที่ยังรักษาสมรรถนะของระบบไว้สูงสุด การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองพฤติกรรมของวัตถุที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง (Shen *et al.*, 2004) หรือใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ (Sadeghi, 2000; Kenig, 2001) เป็นต้น อย่างไรก็ตามกระบวนการพัฒนาแบบจำลองจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลที่มีมากพอเพื่อให้เกิดความแม่นยำ และจำเป็นต้องเลือกใช้สถาปัตยกรรมเครือข่ายที่เหมาะสม

7.1 ประเภทของเครือข่ายประสาทเทียม

เมื่อพิจารณาจากสถาปัตยกรรมเครือข่ายแล้ว สามารถแบ่งประเภทของเครือข่ายประสาทเทียมได้ 2 แบบ ได้แก่ การแบ่งตามโครงสร้างของเครือข่าย และการแบ่งตามลักษณะของการเรียนรู้ เมื่อแบ่งตามโครงสร้างของเครือข่าย สามารถแบ่งออกได้ 2 โครงสร้าง ได้แก่

1. เครือข่ายไปข้างหน้า (Feed-forward networks) มีการเชื่อมต่อระหว่างชั้นเป็นแบบทิศทางเดียว จากข้อมูลนำเข้าไปยังข้อมูลส่งออก โดยไม่มีการข้ามชั้นหรือส่งข้อมูลกลับ ได้แก่ เครือข่ายเพอร์เซ็ปตรอนแบบชั้นเดียว (Single-layer perceptron) เครือข่ายเพอร์เซ็ปตรอนแบบหลายชั้น (Multilayer perceptron) และฟังก์ชันฐานหลักรัศมี (Radial basis function) เป็นต้น เครือข่ายแบบนี้เหมาะสมกับงานทั่วไปที่มีความสัมพันธ์ของตัวแปรไม่ซับซ้อน

2. เครือข่ายย้อนกลับ (Recurrent networks) มีการเชื่อมต่อภายในระหว่างนิวรอนในรูปแบบป้อนกลับหรือวงรอบ ข้อมูลสามารถส่งผ่านไปได้อย่างอิสระทั้งในลำดับชั้นถัดไป ชั้นก่อนหน้า หรือชั้นเดียวกัน โครงสร้างลักษณะนี้ได้แก่ เครือข่ายการแข่งขัน (Competitive network) แผนที่จัดการตัวเอง (Self-Organizing Map, SOM) และเครือข่ายฮอปฟิลด์ (Hopfield) เป็นต้น เครือข่ายย้อนกลับเหมาะสำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อนมากกว่าเครือข่ายไปข้างหน้า แต่นำมาประยุกต์ใช้ได้ยากกว่า เนื่องจากความซับซ้อนของแบบจำลองที่ต้องอาศัยเวลาในการเรียนรู้มาก

และใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการสร้างเครือข่ายประสาทเทียมที่มีความแม่นยำในการคำนวณ

เครือข่ายประสาทเทียมสามารถแบ่งได้อีกตามลักษณะของการเรียนรู้ ซึ่งขั้นตอนการเรียนรู้ นับว่ามีความสำคัญมากในการสอนเครือข่ายให้สามารถทำงานได้ โดยการเรียนรู้ คือ การปรับค่าน้ำหนัก (Weight) ให้เหมาะสมกับงาน แบ่งเป็น 3 ลักษณะคือ การเรียนรู้แบบมีครูสอน การเรียนรู้แบบเสริม และการเรียนรู้แบบไม่มีครูสอน

1. การเรียนรู้แบบมีครูสอน (Supervised learning) เป็นการเรียนรู้ที่มีทั้งชุดข้อมูลนำเข้า (Input) และชุดข้อมูลเป้าหมาย (Target) เช่น การเรียนรู้แบบแพร่กระจายกลับ (Back Propagation learning, BP) เมื่อได้ผลลัพธ์ออกมาจากชุดข้อมูล ผลลัพธ์ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จริง ทำให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนหรือความผิดพลาด (Error) ออกมา จึงต้องมีกระบวนการปรับค่าน้ำหนัก เพื่อให้ค่าผลลัพธ์ที่ได้มีความใกล้เคียงกับค่าจริงมากขึ้น

2. การเรียนรู้เชิงบังคับหรือแบบเสริม (Reinforcement learning) เป็นลักษณะการสอนเครือข่ายโดยไม่แสดงถึงค่าที่ถูกต้องในเครือข่าย เพียงแต่เป็นการเรียนรู้ที่ให้คำตอบว่าถูกหรือผิดเท่านั้น เครือข่ายได้รับรางวัลเมื่อคำตอบถูก เพื่อเป็นการเพิ่มค่าถ่วงน้ำหนักของข้อมูลนำเข้าบางหน่วย และได้รับการลงโทษถ้าผลการคำนวณออกมาผิด โดยลดค่าถ่วงน้ำหนักลง

3. การเรียนรู้แบบไม่มีครูสอน (Unsupervised learning) เป็นลักษณะการเรียนรู้จากสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีแค่ชุดข้อมูลนำเข้าเท่านั้น ไม่มีชุดข้อมูลเป้าหมาย เครือข่ายต้องเรียนรู้ให้สามารถค้นพบโครงสร้างที่เหมาะสมกับรูปแบบของข้อมูลนำเข้า โดยเพิ่มความสำคัญให้กับค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมโยงกับหน่วยข้อมูลนำเข้าที่ตอบสนองได้ดีกับข้อมูลส่งออก และลดความสำคัญของหน่วยข้อมูลนำเข้าที่อ่อนแอลง

รูปแบบการสอนของเครือข่ายประสาทเทียมขึ้นอยู่กับข้อมูลที่เครือข่ายประสาทเทียมได้รับ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับงานที่แตกต่างกันออกไป เช่น การประมาณค่าผลลัพธ์ต่างๆ จากข้อมูลในอดีต เหมาะสมกับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีการสอน หรือการจำแนกสิ่งของต่างๆ ออกจากกัน ต้องอาศัยข้อกำหนดจากข้อมูลต่างๆ ซึ่งเหมาะสมกับเครือข่ายประสาทเทียมที่ไม่มีการสอน

7.2 สถาปัตยกรรมของเครือข่ายประสาทเทียม

ข้อควรพิจารณาเริ่มแรกในการใช้งานเครือข่ายประสาทเทียม คือ การศึกษาสถาปัตยกรรมของเครือข่าย โดยทั่วไปประกอบด้วย 2 ส่วน คือ แบบจำลองของนิวรอน และสถาปัตยกรรมการเชื่อมต่อกันเป็นเครือข่ายของนิวรอน

7.2.1 แบบจำลองของนิวรอน (Neuron model)

- เครือข่ายประสาทเทียมหนึ่งหน่วยแบบง่าย มีค่าข้อมูลนำเข้าเป็นสเกลาร์หนึ่งค่า โดยไม่มีค่าเอนเอียงหรือไบแอส (Bias) โดยค่าสเกลาร์ p ถูกป้อนเข้าและคูณกับค่าความแข็งแรง (Strength) ซึ่งเป็นค่าถ่วงน้ำหนัก (Scalar weight, w) และได้ผลคูณเป็นค่าสเกลาร์ของข้อมูลนำเข้าที่ถูกจัดน้ำหนัก wp ส่งต่อไปยังฟังก์ชันถ่ายโอน ซึ่งเกิดเป็นค่าสเกลาร์ของข้อมูลส่งออก (Scalar output, a) ดังแสดงในภาพที่ 26(ก) ค่าตัวแปรส่งออก a สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 16 และ 17

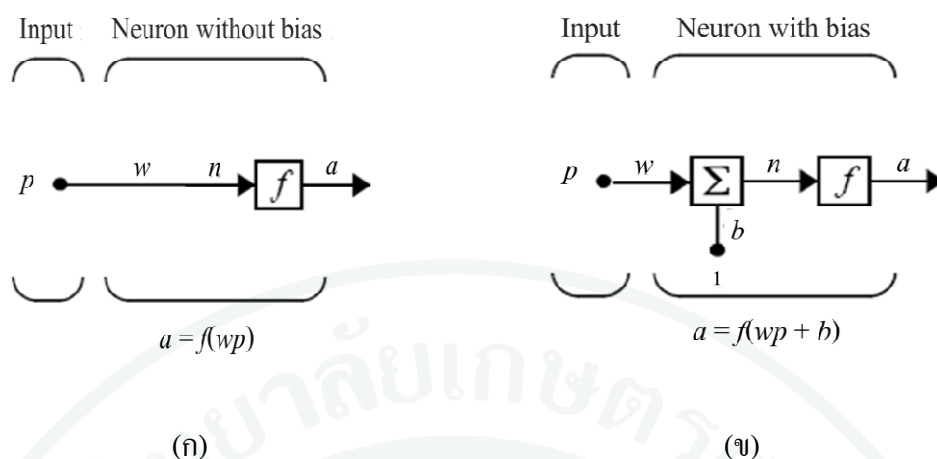
$$n = wp \quad (16)$$

$$a = f(n) = f(wp) \quad (17)$$

ในกรณีที่ค่าข้อมูลนำเข้าเป็นสเกลาร์หนึ่งค่า และมีค่าไบแอส b ซึ่งมีข้อมูลนำเข้าเป็น 1 ดังแสดงในภาพที่ 26(ข) ค่าข้อมูลส่งออก a สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 18 และ 19

$$n = wp + b \quad (18)$$

$$a = f(n) = f(wp + b) \quad (19)$$



ภาพที่ 26 โครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียมหนึ่งหน่วยแบบง่าย (ก) แบบไม่มีไบแอส และ (ข) แบบมีไบแอส

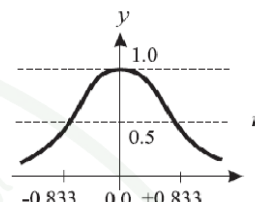
ที่มา: Demuth *et al.* (2008)

ค่าข้อมูลส่งออกที่แท้จริงขึ้นอยู่กับฟังก์ชันถ่ายโอนที่เลือกใช้ ส่วนค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสสามารถปรับค่าได้จากกฎการเรียนรู้ โดยฟังก์ชันถ่ายโอนทำหน้าที่รวมค่าเชิงตัวเลขจากข้อมูลส่งออกของนิวรอน แล้วตัดสินใจเลือกรูปแบบของสัญญาณข้อมูลส่งออก การเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบที่นำมาเอาเครือข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้ ฟังก์ชันถ่ายโอนที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบต่างๆ

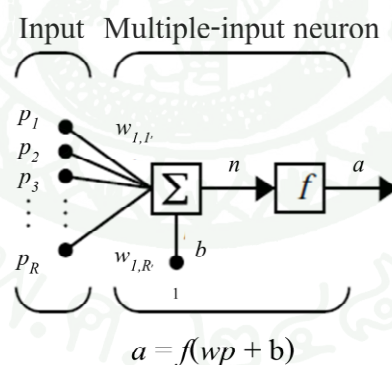
ชื่อฟังก์ชัน	สมการความสัมพันธ์	กราฟความสัมพันธ์
Hard limit	$f(n) = \begin{cases} 0; & n < 0 \\ 1; & n \geq 0 \end{cases}$	
Symmetrical hard limit	$f(n) = \begin{cases} -1; & n < 0 \\ 1; & n \geq 0 \end{cases}$	
Linear	$f(n) = n$	
Log-sigmoid	$f(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}}$	
Tan-sigmoid	$f(n) = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$	

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ชื่อฟังก์ชัน	สมการความสัมพันธ์	กราฟความสัมพันธ์
Radial basis function	$f(n) = e^{-n^2}$	

ที่มา: Demuth *et al.* (2008)

- เครือข่ายประสาทเทียมหนึ่งหน่วยแบบหลายข้อมูลนำเข้า โดยปกติเครือข่ายประสาทเทียมมักมีข้อมูลนำเข้ามากกว่า 1 ตัว โดยพิจารณาได้จากภาพที่ 27 ซึ่งเป็นเครือข่ายที่มีข้อมูลนำเข้า R ตัว และมีข้อมูลนำเข้า $p_1, p_2, \dots, p_R$ มีค่าถ่วงน้ำหนัก $w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1R}$ ซึ่งสามารถเขียนในรูปเมตริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนัก W (Weight matrix)

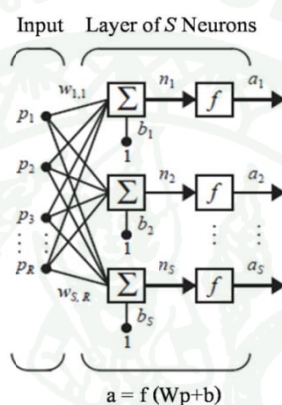


ภาพที่ 27 เครือข่ายประสาทเทียมหนึ่งหน่วยแบบหลายข้อมูลนำเข้า

ที่มา: Demuth *et al.* (2008)

7.2.2 สถาปัตยกรรมการเชื่อมต่อกันเป็นเครือข่ายของนิวรอน

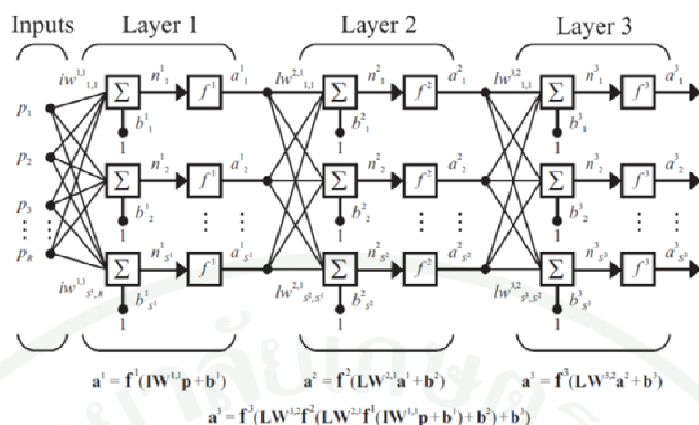
สถาปัตยกรรมของเครือข่ายที่แตกต่างกัน ส่งผลให้พฤติกรรมของเครือข่ายแตกต่างกันด้วย โดยปกติเครือข่ายประสาทเทียมที่มีเพียง 1 นิวรอน อาจไม่เพียงพอ ต้องใช้นิวรอนเพิ่มมากขึ้น และทำงานขนานกันไปหลายๆ ชั้น โครงสร้างของเครือข่ายชั้นเดียวที่มีนิวรอนหลายๆ ชั้น แสดงในภาพที่ 28



ภาพที่ 28 เครือข่ายชั้นเดียวที่มีจำนวน S นิวรอน

ที่มา: Demuth *et al.*, (2008)

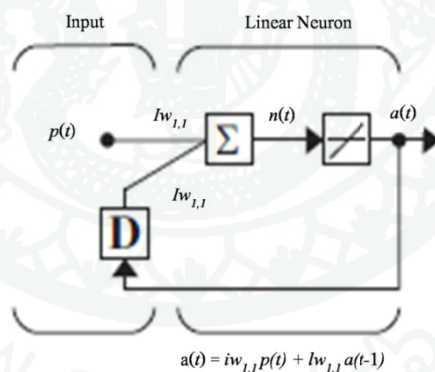
ในทางปฏิบัติ เครือข่ายประสาทเทียมมักมีโครงสร้างหลายชั้น ดังแสดงในภาพที่ 29 พบว่า ในแต่ละชั้นสามารถมีจำนวนนิวรอนที่แตกต่างกันได้ ซึ่งเครือข่ายหลายชั้นมีประสิทธิภาพเหนือกว่าเครือข่ายชั้นเดียว แต่มีจำนวนพารามิเตอร์มากกว่าเช่นกัน



ภาพที่ 29 เครือข่ายหลายชั้นในรูปของเมตริกซ์

ที่มา: Demuth *et al.* (2008)

เครือข่ายย้อนกลับ แตกต่างจากเครือข่ายไปข้างหน้าตรงที่มีการวนรอบแบบป้อนกลับ (Feedback) ภายในเครือข่าย โดยข้อมูลส่งออกของแต่ละนิวรอนถูกเชื่อมต่อและป้อนกลับไปยังข้อมูลนำเข้าของทุกๆ นิวรอน ดังแสดงในภาพที่ 30

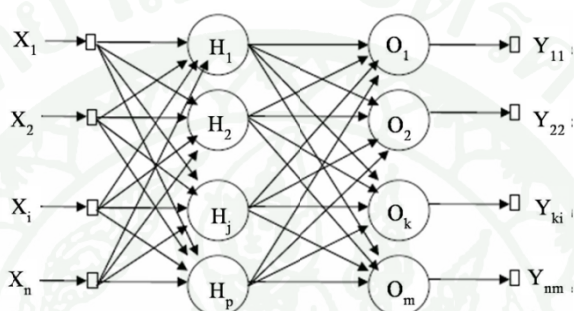


ภาพที่ 30 เครือข่ายย้อนกลับแบบง่าย

ที่มา: Demuth *et al.* (2008)

7.3 การเรียนรู้แบบแพร่กลับ (Back-Propagation learning, BP)

7.3.1 การทำงานของเครือข่ายประสาทแบบแพร่กระจายย้อนกลับ (Backpropagation neural network) เป็นวิธีการฝึกสอนเครือข่ายประสาทหลายชั้นแบบส่งผ่านไปข้างหน้า (Multilayer feed forward neural network) ซึ่งประกอบด้วยชั้นข้อมูลนำเข้า ชั้นซ่อนเร้น และชั้นข้อมูลส่งออก ดังแสดงในภาพที่ 31



ภาพที่ 31 แบบจำลองเครือข่ายประสาทแบบแพร่กระจายย้อนกลับ

เครือข่ายประสาทแบบแพร่กระจายย้อนกลับ ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก ดังนี้

1. หน่วยประมวลผล (Processing elements)
2. คำนำน้หนักและฟังก์ชันถ่ายโอน (Weight and transfer function)
3. ชั้นข้อมูลนำเข้า (Input layer)
4. ชั้นซ่อนเร้นของหน่วยประมวลผล (Hidden layer)
5. การเชื่อมต่อของแต่ละนิวรอน (Connections)
6. การเรียนรู้จากการปรับค่าน้หนัก (Adaptive learning)

7. ชั้นแสดงผลลัพธ์ (Output layer)

สำหรับขั้นตอนวิธีการเรียนรู้แบบแพร่กระจายย้อนกลับ เริ่มต้นจากสุ่มค่าถ่วงน้ำหนัก และนำข้อมูลนำเข้าที่ส่งผ่านเข้ามาในชั้นรับข้อมูล ปรับปรุงน้ำหนัก (Input weight) และเรียนรู้จนได้เป็นผลลัพธ์ออกมา จากนั้นจึงนำค่าผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ต้องการเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อน โดยใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาด (Mean Square Error, MSE) และป้อนค่าความคลาดเคลื่อนนั้นกลับเข้าสู่เครือข่ายเพื่อปรับปรุงน้ำหนักในรอบถัดไป โดยเรียนรู้เช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนได้ข้อผิดพลาดที่น้อยที่สุด หรือค่าผิดพลาดนั้นอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ตามที่กำหนดไว้

เครือข่ายประสาทเทียมมีรูปแบบและการประมวลผลเลียนแบบจากระบบของสิ่งมีชีวิต ซึ่งสามารถปรับตัวต่อผลตอบสนองของข้อมูลนำเข้าได้ พารามิเตอร์ต่างๆ ของเครือข่าย เช่น จำนวนนิวรอน (Neural) จำนวนชั้นซ่อน (Hidden layer) จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน (Neural in hidden layer) อัตราการเรียนรู้ (Learning rate) และจำนวนรอบการฝึก (Epochs) นำไปสู่ผลและลักษณะการทำงานที่ต่างกันออกไป ดังนั้น การออกแบบสถาปัตยกรรมที่เหมาะสมจึงมีผลอย่างมากต่อความแม่นยำของแบบจำลอง เมื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะการลู่เข้า โดยการเทียบผลจากการค้นหาเส้นทางบนพื้นผิวความผิดพลาดของวิธีแพร่กระจายย้อนกลับ วิธีการเคลื่อนลงตามความชัน (Steepest descent) วิธีเกาส์-นิวตัน (Gauss-Newton) และวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ต (Levenberg-Marquardt, LM) ซึ่ง Samarasinghe (2006) ได้เปรียบเทียบแต่ละแบบจำลองและพบว่า วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ต มีข้อได้เปรียบเหนือกว่าอีก 3 วิธี ในแง่ของความเร็ว และประสิทธิภาพในการลู่เข้าสู่ค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้ จึงได้เลือกใช้การเรียนรู้เครือข่ายแบบวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ต

8. ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA)

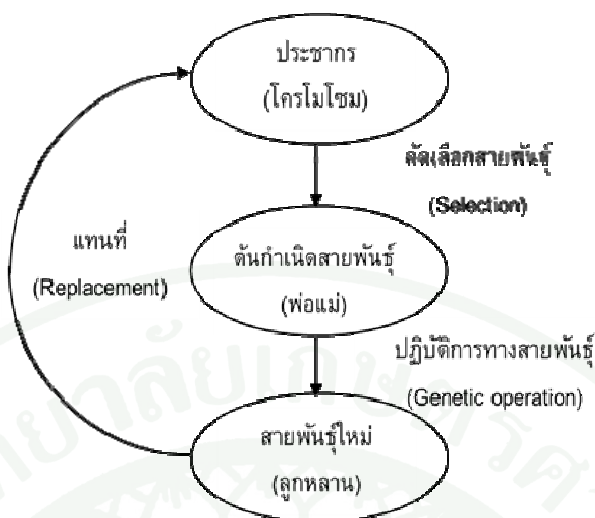
ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เป็นวิธีการที่พัฒนามาจากระบวนการทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตจากการวิวัฒนาการ หรือการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิต และใช้กระบวนการทางพันธุศาสตร์เข้ามาช่วยในกระบวนการค้นหาคำตอบของปัญหา ซึ่งถูกคิดขึ้นโดย John Holland ที่ได้ตีพิมพ์หลักการของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นครั้งแรก ในช่วง ค.ศ. 1960 จากนั้นขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีการใช้งาน 2 แขนงหลัก คือ หาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

(Optimization) และการเรียนรู้ในเครื่องจักร (Machine learning) ในแขนงการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดนั้น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมถูกนำมาใช้ในหลายๆ งาน เช่น การหาฟังก์ชันที่ดีที่สุด การประมวลผลภาพ และการควบคุม เป็นต้น ในงานทางด้านกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมถูกนำมาใช้ในการหาตัวแปรในกระบวนการผลิตที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น กระบวนการที่ทำให้เกิดการหดตัว (Shrinkage) หรือบิดตัว (Warpage) น้อยที่สุด (Kurtaran *et al.*, 2005) และการหาตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสม รวมทั้งตำแหน่งช่องระบายอากาศภายในแม่พิมพ์ (Mathur *et al.*, 1998) ข้อดีของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบดั้งเดิม คือ สามารถแก้ปัญหาในปริภูมิที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous search space) ได้ และไม่ต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับอนุพันธ์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหา แต่มีข้อเสีย คือ ต้องอาศัยการคำนวณซ้ำหลายๆ รอบ ทำให้ต้องใช้เวลานานในการคำนวณ

การทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นลักษณะของการหาคำตอบแบบคู่ขนาน (Parallel search) โดยคำตอบที่ได้จากการหาคำตอบในแต่ละรุ่น (Generation) มีการเปลี่ยนรูป (Transformation) เพื่อนำไปสู่การค้นหาคำตอบที่ดีขึ้นในรุ่นถัดไป การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับคำตอบ (Solution) ในกลุ่มประชากร (Population) นั้น เป็นการสำรวจพื้นที่ในการค้นหา (Search space) และส่งเสริมให้มีการถ่ายทอดคุณลักษณะที่ดีของคำตอบที่ค้นพบไปยังรุ่นถัดไป เพื่อนำไปสู่คำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุด (Optimum solution) หรือประชากรที่มีลักษณะที่ดีที่สุด (Fittest individual)

วัฏจักรของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ดังแสดงในภาพที่ 32 โดยทั่วไปแล้ว ประกอบด้วย 3 กระบวนการสำคัญ ได้แก่

1. การคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection) คือ ขั้นตอนการคัดเลือกประชากรที่ดีในระบบให้เป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์
2. ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (Genetic operation) คือ วิธีการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมด้วยวิธีการทางสายพันธุ์
3. การแทนที่ (Replacement) คือ การนำลูกหลานที่กำเนิดใหม่ไปแทนประชากรรุ่นเก่า



ภาพที่ 32 วัฏจักรของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

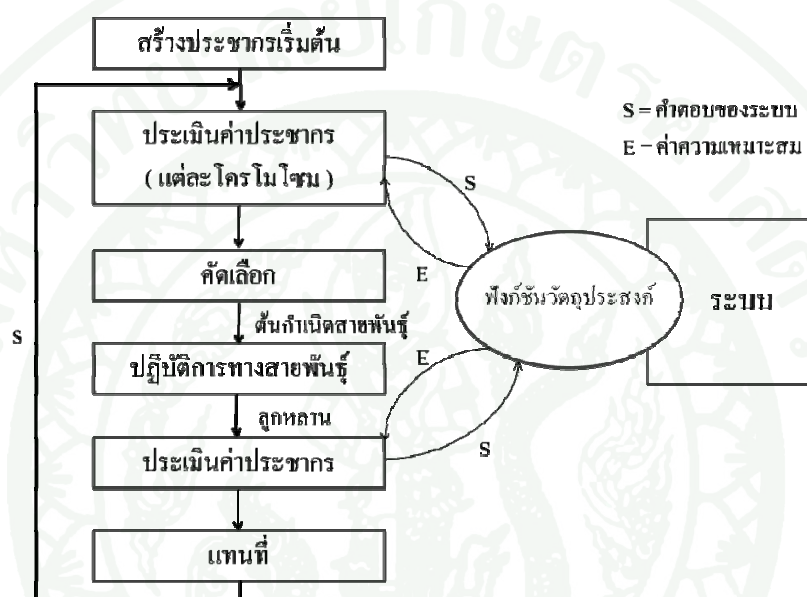
ที่มา: อาทิตย์ (2552)

แม้ว่าขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่หากมีการกำหนดฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness function) และช่วงของตัวแปรที่ไม่เหมาะสม อาจทำให้เกิดการลู่เข้าคำตอบก่อนถึงคำตอบที่เหมาะสม การกำหนดขอบเขตของค่าตัวแปรและความถูกต้องของข้อมูลจึงมีผลกระทบต่อการกำหนดฟังก์ชันเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการพัฒนาขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เช่น ขนาดประชากร (Population size) อัตราการสลับสายพันธุ์ (Crossover rate) และอัตราการกลายพันธุ์ (Mutation rate) จำเป็นต้องกำหนดให้เหมาะสม

8.1 การทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ขั้นตอนทั่วไปของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและการเชื่อมโยงเข้ากับระบบเพื่อนำไปใช้งาน ดังแสดงในภาพที่ 33 โดยเริ่มจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น เช่น ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ฟังก์ชันความเหมาะสม รวมถึงรูปแบบโครโมโซม จากนั้นจึงเริ่มเข้าสู่กระบวนการทำงาน โดยสร้างประชากรต้นกำเนิดตามรูปแบบโครโมโซมที่กำหนดไว้ จากนั้นเมื่อถอดรหัสสมาชิกของโครโมโซมได้เป็นค่าของตัวแปรตัดสินใจ (Decision value) แล้วหาค่าวัตถุประสงค์ (Objective value) หรือค่าตัวแปรตัดสินใจของสมาชิกโครโมโซมในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อหาค่าความเหมาะสม จากนั้นจึงเริ่มเข้าสู่กระบวนการของตัวดำเนินการทั้งสาม คือ การคัดเลือกสายพันธุ์

(Selection) การสลับสายพันธุ์ (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation) โดยนำเอาเฉพาะโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่เป็นที่น่าพอใจชุดหนึ่งเก็บไว้ แล้วนำมาสลับสายพันธุ์และกลายพันธุ์จนได้เป็นโครโมโซมชุดใหม่ จากนั้นนำโครโมโซมชุดใหม่ที่ได้มาหาค่าความเหมาะสมอีกครั้ง และดำเนินการตามขั้นตอนเดิมต่อไปจนกระทั่งถึงรุ่นสุดท้าย (Max generation) ตามที่กำหนดไว้ หรือเมื่อได้คำตอบของปัญหาที่ต้องการ



ภาพที่ 33 ขั้นตอนทั่วไปของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ที่มา: อาทิตย์ (2552)

8.2 การออกแบบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ในการนำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมต้องออกแบบตามขั้นตอนต่อไปนี้

8.2.1 การเข้ารหัสโครโมโซม (Chromosome encoding) การเข้ารหัสโครโมโซมขึ้นอยู่กับปัญหา ซึ่งรูปแบบของปัญหาที่ต่างกันทำให้รูปแบบของโครโมโซมแตกต่างกัน การเข้ารหัสโครโมโซมเป็นการออกแบบให้โครโมโซมเป็นตัวแทนของคำตอบจากระบบ กระบวนการภายในของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมองคำตอบของระบบอยู่ในรูปโครโมโซมที่เรียกว่า จีโนไทป์ (Genotype)

- การเข้ารหัสแบบเลขฐานสอง (Binary Encoding) แต่ละตำแหน่งของอินในโครโมโซมแทนด้วยค่า 1 หรือ 0 เท่านั้น ดังภาพที่ 34 โดย 1 แทนการเลือก และ 0 แทนไม่เลือก

โครโมโซม A :

0	1	0	1	0
---	---	---	---	---

โครโมโซม B :

1	1	1	0	0
---	---	---	---	---

ภาพที่ 34 การเข้ารหัสแบบเลขฐานสอง

- การเข้ารหัสแบบค่าต่างๆ (Value Encoding) แต่ละตำแหน่งของอินในโครโมโซมแทนด้วยค่าต่างๆ โดยมีรูปแบบ เช่น ตัวอักษร จำนวนจริง และค่าสิ่งต่างๆ เป็นต้น ซึ่งรูปแบบของโครโมโซมนี้เหมาะสมกับปัญหาที่ค่อนข้างซับซ้อน ดังแสดงในภาพที่ 35

โครโมโซม A :

b	m	e	o	e
---	---	---	---	---

โครโมโซม B :

1.29	0.28	3.25	1.97	2.46
------	------	------	------	------

โครโมโซม C :

back	left	left	right	back
------	------	------	-------	------

ภาพที่ 35 การเข้ารหัสแบบค่าต่างๆ

- การเข้ารหัสแบบเพอมิวเตชัน (Permutation Encoding) ทุกตำแหน่งของอินในโครโมโซมเป็นค่าของจำนวนนับของตำแหน่งในแต่ละลำดับ ซึ่งเหมาะในการลำดับตำแหน่งของปัญหา เช่น ปัญหาของเส้นทางเดินของเซลส์แมน (Traveling salesman problem) ดังแสดงในภาพที่ 36

โครโมโซม A :

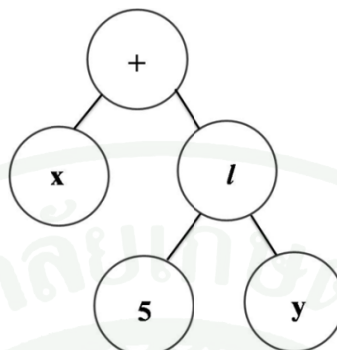
1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

โครโมโซม B :

9	8	7	6	5
---	---	---	---	---

ภาพที่ 36 การเข้ารหัสแบบเพอมิวเตชัน

- การเข้ารหัสแบบต้นไม้ (Tree encoding) เหมาะกับปัญหาที่เกี่ยวกับการพัฒนาโปรแกรมโดยทุกตำแหน่งของยีนในโครโมโซมเป็นกิ่งของต้นไม้ ดังแสดงในภาพที่ 37



ภาพที่ 37 การเข้ารหัสแบบต้นไม้

8.2.2 การประเมินค่าความเหมาะสม

- ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) เป็นส่วนสำคัญในการประเมินผลคำตอบของระบบ โดยประเมินคำตอบจากโครโมโซมเทียบกับเป้าหมายของระบบ กรณีที่เป็นการค้นหาค่าน้อยที่สุด (Minimization problem) คำตอบที่ดีที่สุดของระบบคือ โครโมโซมที่มีค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด

- ฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสม (Fitness function) เป็นฟังก์ชันที่นำการประเมินที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไปเปลี่ยนเป็นค่าความเหมาะสม (Fitness value) โดยการคำนวณค่าการประเมินของโครโมโซมทั้งหมด เทียบกับโครโมโซมด้วยตัวเอง และปรับให้มีค่าอยู่บนบรรทัดฐานเดียวกัน ค่าความเหมาะสมนี้ถูกนำไปใช้เป็นตัววัดเพื่อคัดเลือกโครโมโซมที่ใช้ในการสืบสายพันธุ์รุ่นถัดไป

8.2.3 การคัดเลือกสายพันธุ์ เป็นขั้นตอนในการคัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุด จากภายในกลุ่มประชากรทั้งหมด และนำโครโมโซมที่ถูกคัดเลือกไปใช้เป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ของประชากรรุ่นถัดไป โดยการพิจารณาจากค่าความเหมาะสมของโครโมโซมนั้นๆ สามารถแบ่งวิธีการคัดเลือกสายพันธุ์ออกได้ 2 กลุ่มหลัก คือ การใช้ค่าความเหมาะสมโดยตรง โดยใช้ค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซมในการคัดเลือกสายพันธุ์ และการใช้ค่าความเหมาะสมโดยอ้อม คือ

การแปลงค่าความเหมาะสมให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ เช่น ทำให้เป็นบรรทัดฐานอยู่ในช่วง $[0, 1]$ ขั้นตอนในการคัดเลือกสายพันธุ์ ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ

1. การกำหนดค่าโอกาส P ในการถูกคัดเลือก เพื่อเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ การกำหนดค่าโอกาสสามารถแบ่งได้หลายวิธี ได้แก่

- การคัดเลือกด้วยการแบ่งเป็นสัดส่วน (Proportionate selection) กำหนดให้โครโมโซม S มีค่าความเหมาะสมเป็น $E(S)$ ค่า $\tilde{E}$ คือ ค่าความเหมาะสมเฉลี่ยของโครโมโซมทั้งหมด และค่า $P(S)$ แสดงถึงความสามารถในการเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ของแต่ละโครโมโซม วิธีการแบ่งสัดส่วนเป็นวิธีที่ง่ายแต่อาจนำไปสู่คำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ (Local optimum) ค่าโอกาสในการถูกคัดเลือกของโครโมโซม ดังแสดงในสมการที่ 20

$$P(S) = \frac{E(S)}{\tilde{E}} \quad (20)$$

- การคัดเลือกแบบโบลต์ซมันน์ (Boltzmann selection) เป็นการแก้ปัญหาของค่าโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมเป็นลบ รวมถึงลดความแตกต่างของค่าความเหมาะสมของประชากรโดยรวม ค่าโอกาสในการถูกคัดเลือกของโครโมโซม ดังแสดงในสมการที่ 21

$$P(S) = \frac{e^{E(S)}}{\tilde{E}} \quad (21)$$

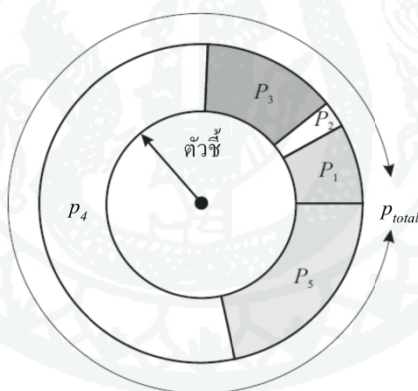
- การคัดเลือกแบบจัดอันดับ (Ranking selection) โครโมโซมถูกจัดเรียงให้มีอันดับ r ตามค่าความเหมาะสม โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมดีที่สุดอยู่ที่โครโมโซมอันดับ N ข้อดีของวิธีนี้ คือ ค่าโอกาสในการถูกคัดเลือกไม่แปรผันกับขนาดของค่าความเหมาะสม แต่ขึ้นกับอันดับของโครโมโซม ค่าโอกาสในการถูกคัดเลือกของโครโมโซม ดังแสดงในสมการที่ 22

$$P(S) = \frac{r}{\tilde{E}} \quad (22)$$

- การคัดเลือกแบบจัดการแข่งขัน (Tournament selection) ทำได้โดยการสุ่มแบ่งคัดเลือกโครโมโซม K ตัว เพื่อจัดการแข่งขันขนาด K (Tournament size) แล้วเลือกโครโมโซมที่มีค่าประเมณดีที่สุดจากการแข่งขัน ด้วยความน่าจะเป็นเท่ากับ p และเลือกโครโมโซมที่มีค่าประเมณดีเป็นอันดับรองลงมา จนถึงอันดับที่ n ด้วยความน่าจะเป็น $p(1-p)^{n-1}$

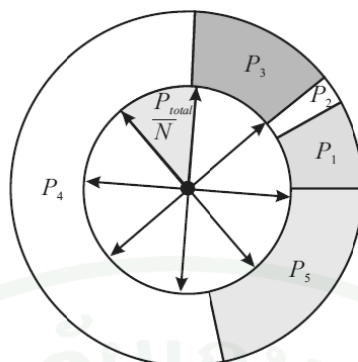
2. ขั้นตอนหลังจากการกำหนดค่าโอกาส P ให้กับแต่ละโครโมโซมแล้ว คือการชักตัวอย่าง โดยเป็นการนำค่าโอกาสนั้นไปแปลงให้เป็นตัวเลข ซึ่งแสดงถึงจำนวนลูกหลานที่โครโมโซมนั้นสามารถให้กำเนิดในขั้นต่อไปได้

- วิธีการชักตัวอย่างแบบวงล้อรูเล็ต (Roulette wheel sampling) กำหนดให้ P_{total} คือ ผลรวมของค่าโอกาสในการถูกคัดเลือกของโครโมโซมประชากรทั้งกลุ่ม โดยมีค่าเทียบเท่ากับเส้นรอบวงของวงล้อรูเล็ต ค่าตัวชี้ถูกสุ่มระหว่าง $0-P_{total}$ กระบวนการนี้จึงเปรียบได้กับการหมุนวงล้อในเกมรูเล็ต ดังแสดงในภาพที่ 38



ภาพที่ 38 วงล้อรูเล็ตจากค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม

- วิธีการชักตัวอย่างแบบกระบวนการเฟ้นสุ่มสากล (Stochastic Universal Sampling, SUS) วิธีการนี้แตกต่างจากแบบวงล้อรูเล็ตตรงที่มีการใช้ตัวชี้มากกว่าหนึ่งตัว ในการคัดเลือกโครโมโซม N ตัว มีตัวชี้ทั้งหมด N ตัว แต่ละตัวมีระยะห่างเท่ากันและมีค่าเท่ากับ $\frac{P_{total}}{N}$ ดังแสดงในภาพที่ 39 วิธีนี้ช่วยลดความเหลื่อมล้ำในการคัดเลือกลง โดยโครโมโซมที่มีค่า P สูง มีโอกาสถูกชี้ด้วยจำนวนตัวชี้ในจำนวนที่มากกว่าโครโมโซมที่มีค่า P ที่ต่ำกว่า

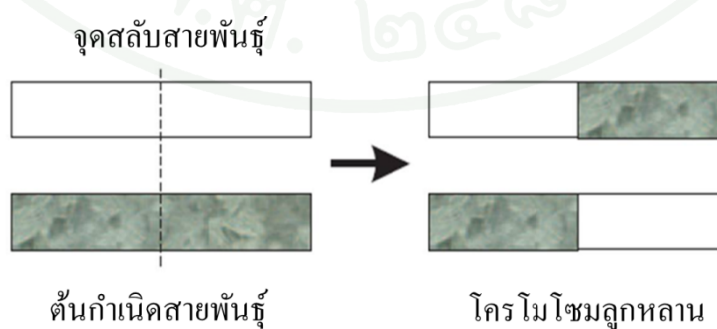


ภาพที่ 39 วงล้อรูเล็ตจากกระบวนการเฟ้นสุ่มสากล

8.2.4 ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (Genetic operation) เป็นการนำเอาโครโมโซมที่เป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ได้จากกระบวนการคัดเลือก มาเปลี่ยนแปลงให้เกิดโครโมโซมใหม่ขึ้นมา โดยทั่วไปมี 2 วิธีหลักๆ คือ การสลับสายพันธุ์ (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation)

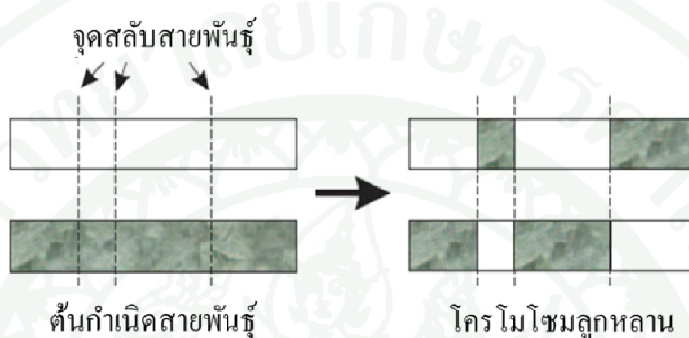
1. การสลับสายพันธุ์ เป็นวิธีการรวมตัวใหม่ของโครโมโซม โดยเป็นการรวมส่วนย่อยระหว่างโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ตั้งแต่สองโครโมโซมขึ้นไป ให้กลายเป็นโครโมโซมลูกหลาน โดยปกติมีการกำหนดอัตราการสลับสายพันธุ์โดยใช้ความน่าจะเป็น (P_c) เป็นตัวกำหนด รูปแบบของการสลับสายพันธุ์ ได้แก่

- การสลับสายพันธุ์แบบจุดเดียว (Single-point crossover) โดยการให้โครโมโซมลูกหลานมีสายพันธุ์ของแต่ละต้นกำเนิดอยู่อย่างละหนึ่งส่วน และใช้จุดตัดในการสลับสายพันธุ์ที่ได้จากการสุ่มเลือก ดังแสดงในภาพที่ 40



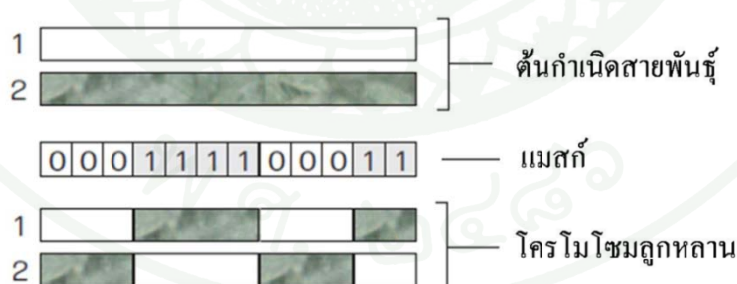
ภาพที่ 40 การสลับสายพันธุ์แบบจุดเดียว

- การสลับสายพันธุ์แบบหลายจุด (Multiple-point crossover) โครโมโซมลูกหลานมีสายพันธุ์ของต้นกำเนิดอยู่มากกว่าหนึ่งส่วน หลักการเลือกจุดตัดในการสลับสายพันธุ์มีอยู่หลายแบบ ที่นิยมใช้ คือ การสุ่มเลือก การสุ่มหลายจุดส่งผลให้เกิดความหลากหลายมากขึ้น และมีการเข้าสู่ค่าตอบได้ครอบคลุมพื้นที่ของคำตอบมากยิ่งขึ้น การสลับสายพันธุ์แบบหลายจุด ดังแสดงในภาพที่ 41



ภาพที่ 41 การสลับสายพันธุ์แบบหลายจุด

- การสลับสายพันธุ์แบบสม่ำเสมอ (Uniform crossover) วิธีการนี้ถูกออกแบบให้ทุกจุดบนโครโมโซมสามารถเป็นจุดตัดได้ โดยอาจใช้ตัวพรางชนิดเลขฐานสองช่วยในการสลับสายพันธุ์ การสลับสายพันธุ์แบบสม่ำเสมอ ดังแสดงในภาพที่ 42



ภาพที่ 42 การสลับสายพันธุ์แบบสม่ำเสมอ

2. การกลายพันธุ์ เป็นวิธีการแปรผันโครโมโซม เปรียบได้กับการกลายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิต ทำให้มีความหลากหลายเกิดขึ้นมากในกลุ่มประชากร และป้องกันไม่ให้เกิดการเข้าสู่ค่าต่ำสุดเฉพาะถิ่นเร็วเกินไป ส่งผลให้คำตอบที่เกิดขึ้นในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถครอบคลุมพื้นที่การค้นหาคำตอบได้ทั่วถึงยิ่งขึ้น Prugel-Bennett (2001) รายงานว่า อัตราการกลาย

พันธุ์ขึ้นอยู่กับขนาดประชากร จึงควรปรับค่าให้เหมาะสมกับขนาดของประชากรเพื่อให้เกิดการสำรวจพื้นที่ในการค้นหาคำตอบอย่างทั่วถึง และป้องกันไม่ให้อาณาประชามีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่มีความคล้ายคลึงกันทั้งหมด

8.2.5 การแทนที่ เป็นการนำโครโมโซมลูกหลานมาแทนที่ประชากรรุ่นก่อน การแทนที่โครโมโซมแบ่งเป็น 2 วิธี คือ

1. การแทนที่ประชากรทั้งรุ่น (Generational GA) เป็นการนำประชากรลูกหลานไปแทนที่ประชากรเก่าทั้งหมด
2. การแทนที่ประชากรแบบบางส่วน (Partial GA) เป็นการนำประชากรลูกหลานไปแทนที่ประชากรเก่าเพียงบางส่วน จึงต้องมีการคัดเลือกโดยพิจารณาจากค่าความเหมาะสมของโครโมโซม

8.3 การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์

การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ มีรูปแบบสมการโดยทั่วไป ดังแสดงในสมการที่ 23

$$\begin{aligned} &\text{Minimize/Maximize } F_m(x), m = 1, 2, 3, \dots, M \\ &\text{Subject to } g_j(x) = 0, j = 1, 2, 3, \dots, J \\ &\text{and } h_k(x) = 0, k = 1, 2, 3, \dots, K \end{aligned} \quad (23)$$

โดย x เป็นเวกเตอร์ที่มีจำนวน n ตัว กล่าวคือ มีข้อมูลนำเข้า $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ และมีจำนวนวัตถุประสงค์ M จำนวน ซึ่งแต่ละวัตถุประสงค์ต้องการให้เป็นค่าน้อยที่สุดหรือมากที่สุด แทนด้วยเวกเตอร์ $F = \{F_1(x), F_2(x), \dots, F_M(x)\}$ โดยที่ $g_j(x)$ และ $h_k(x)$ เป็นฟังก์ชันเงื่อนไขแบบเท่ากัน (Equalities constraint) และ ไม่เท่ากัน (Inequalities constraint) ตามลำดับ และมีขอบเขตของข้อมูลนำเข้า (Bounds) อยู่ระหว่างขอบเขตบน x_i'' และขอบเขตล่าง x_i'

การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์มี 2 วิธีหลักๆ คือ วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight-sum method) และวิธีพื้นฐานพาเรโต (Pareto-based approach) สำหรับวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักเป็นการนำทุกวัตถุประสงค์มารวมกัน โดยที่แต่ละวัตถุประสงค์ถูกจัดความสำคัญโดยค่าถ่วงน้ำหนัก ส่งผลให้เหลือเพียงฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียว และได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเพียงค่าเดียว ข้อดีของวิธีนี้ คือ ง่ายต่อการนำไปใช้ และได้คำตอบจากการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักโดยผู้ใช้งาน อย่างไรก็ตาม เป็นการยากที่คำตอบหรือผลเฉลยเพียงคำตอบเดียว สามารถทำให้ได้ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดพร้อมกันทุกวัตถุประสงค์ ดังนั้นกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาลักษณะนี้ คือ กลุ่มของผลเฉลยพาเรโตที่เหมาะสมที่สุด (Pareto optimal solutions) ซึ่งสามารถหาได้จากหลักการครอบงำแบบพาเรโต (Pareto domination) โดยมีหลักการ คือ ไม่มีวัตถุประสงค์ใดที่คำตอบ x แย่กว่าคำตอบ y และมีอย่างน้อย 1 วัตถุประสงค์ที่คำตอบ x ดีกว่าคำตอบ y หรืออาจกล่าวได้ว่า คำตอบ x ใดๆ ครอบงำ หรือดีกว่าคำตอบ y จากหลักการนี้ ส่งผลให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดหลายคำตอบ จากนั้นอาจเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดค่าหนึ่ง โดยให้ความสำคัญที่ค่าวัตถุประสงค์ใดวัตถุประสงค์หนึ่ง หรืออาจใช้ค่าวัตถุประสงค์อื่นเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ

9. การประยุกต์ใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยแม่พิมพ์

มีผู้วิจัยจำนวนมากได้นำคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมมาใช้ในการออกแบบแล้วใช้พารามิเตอร์หรือคุณภาพชิ้นงานเป็นข้อกำหนด เช่น เวลาในการเติม (Mathur *et al.*, 1999) แรงดันฉีด (Shen and Zhai, 2004; Lee and Kim, 2007) และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น การบิดตัว (Warpage) (Li *et al.*, 2007) การหดตัว (Shrinkage) (วัชรพงษ์, 2549) จุกดักอากาศ (Air trap) (Mathur *et al.*, 1999) และรอยประสาน (Weld line) (Wu *et al.*, 2011)

Ozcelik and Erzurumlu (2006) ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) เครือข่ายประสาทเทียม และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการฉีดขึ้นรูป ที่ทำให้เกิดการบิดตัวของชิ้นงานน้อยที่สุด โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อค้นหาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการบิดตัวของชิ้นงานมากที่สุด ได้แก่ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ อุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลว แรงดันอัด เวลาอัด และเวลาในการหล่อเย็น โดยตัดรูปแบบของทางวิ่ง และตำแหน่งของทางเข้าที่ส่งผลกระทบต่อ การบิดตัวของชิ้นงานน้อย

กว่าออกไป จากนั้นจึงใช้เครือข่ายประสาทเทียมร่วมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการหาค่าที่เหมาะสม จากการทดลองพบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการบิดตัวลดลง 51%

Zhai *et al.* (2006) ได้นำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการควบคุมให้เกิดรอยประสานในตำแหน่งที่ไม่สำคัญบนชิ้นงาน และนำเสนอวิธีการกำหนดตำแหน่งรอยประสานโดยแบ่งส่วนแม่พิมพ์เป็นส่วนใหญ่ (Sub mold) บนบริเวณที่ต้องการให้เกิดรอยประสาน และเลือกตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสมสำหรับส่วนย่อยนั้น จากนั้นประกอบแม่พิมพ์ส่วนย่อยเข้าด้วยกัน แล้ววิเคราะห์การไหล หากตำแหน่งรอยประสานไม่อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการจึงปรับเปลี่ยนขนาดของทางวิ่ง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ขั้นตอนดังกล่าวสามารถใช้ควบคุมตำแหน่งรอยประสานสำหรับชิ้นงานแบบหลายทางเข้าได้

Shen *et al.* (2007) ใช้เครือข่ายประสาทแบบแพร่กระจายย้อนกลับในการหาความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของพารามิเตอร์ต่างๆ ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ได้แก่ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ อุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลว เวลาในการฉีด เวลาเย็น และแรงดันอัด เทียบกับคุณภาพของชิ้นงาน ซึ่งใช้การหาค่าเชิงปริมาตรเป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพ จากนั้นจึงใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการหาค่าที่เหมาะสมจากฟังก์ชันที่ได้จากเครือข่ายประสาทเทียม ผลการทดลองพบว่า ค่าพารามิเตอร์กระบวนการที่ได้จากการใช้เครือข่ายประสาทเทียมร่วมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ทำให้ได้ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของชิ้นงานน้อยที่สุด และมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างทั้งหมดที่ได้เก็บข้อมูลมา

พิชญ์กร และจักรพันธ์ (2552) ทดลองหาค่าที่เหมาะสมต่อการฉีดขึ้นรูปพลาสติกในด้านการโก่งงอ และรอบเวลาในการฉีดขึ้นรูป กำหนดตำแหน่งทางเข้าและพารามิเตอร์กระบวนการตามสภาวะการฉีดจริง โดยปรับค่าอุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว ความเร็วฉีด แรงดันอัด และเวลาในการเย็นตัว แล้วนำค่าต่างๆ ที่ได้ มาหาค่าที่เหมาะสม โดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ช่วยในทางวิศวกรรม วิธีการวางแผนการทดลอง แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ผลการทดลองสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์กระบวนการภายหลังการหาค่าที่เหมาะสมแล้วสามารถลดการโก่งงอของชิ้นงานได้ 40.85% โดยไม่เพิ่มรอบเวลาในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุและสารเคมี

- 1.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) เกรด STR5L
- 1.2 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO)
- 1.3 กรดสเตียริก (Stearic acid)
- 1.4 เขม่าดำ (Carbon black)
- 1.5 กำมะถัน (Sulphur, S)
- 1.6 ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะซัลฟิनाไมด์ (Cyclohexylbenzothiazyl sulfenamide, CBS)
- 1.7 น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil)

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 2.1 เครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) ของ TECHPRO-visTECH รุ่น 123103
- 2.2 เครื่องทดสอบสมบัติการคงรูป (Moving die rheometer, MDR) ของ TECHPRO-rheoTECH รุ่น 121105
- 2.3 เครื่องชั่งน้ำหนัก ของ Metter-toledo รุ่น PM 30000-Kn
- 2.4 เครื่องบดผสมระบบปิด (Internal mixer) ของ Kneader machinery
- 2.5 เครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) ขนาด 8 นิ้ว x 20 นิ้ว ของ Kodair seisakusho รุ่น R11-3FF
- 2.6 เครื่องตัดยางระบบไฮดรอลิก (Rubber cutting machine) ของ Daina รุ่น HD-30
- 2.7 เครื่องฉีดขึ้นรูปยาง (Rubber injection machine) ของ Rep รุ่น V37/100
- 2.8 แม่พิมพ์ฉีด (Injection mold)
- 2.9 โปรแกรม Cadmould version 2.0
- 2.10 โปรแกรม Autodesk Moldflow Insight version 2010

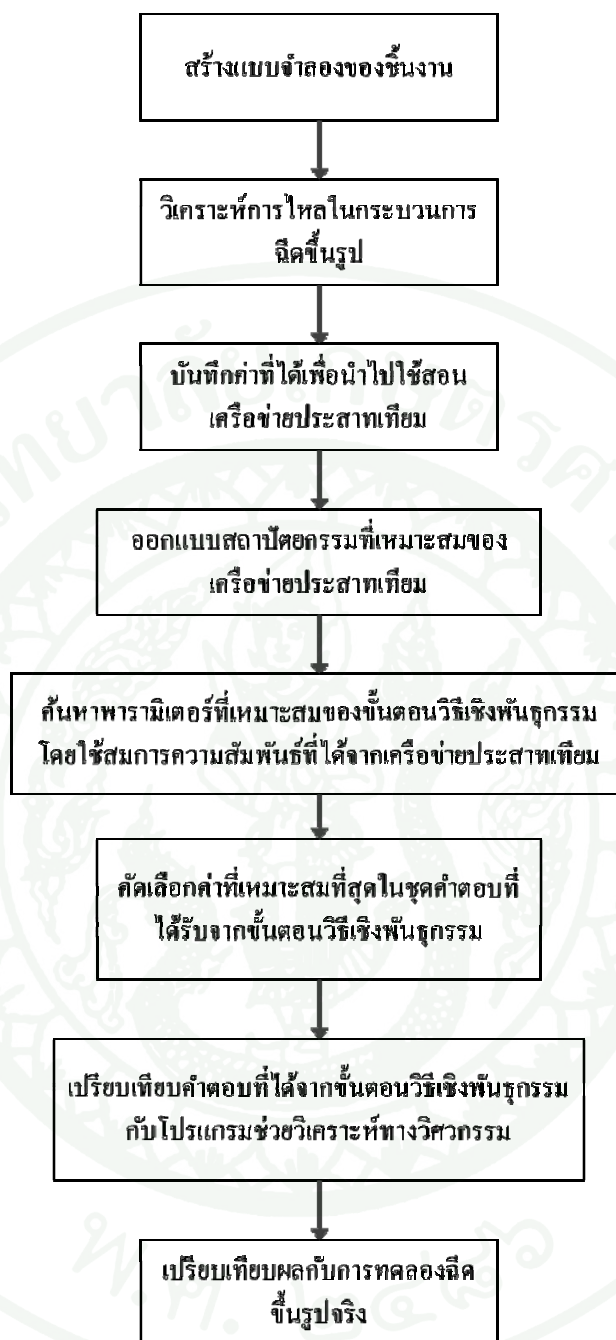
2.11 โปรแกรม MATLAB version 7.9

2.12 โปรแกรม Minitab version 14

2.13 คอมพิวเตอร์ (Intel® Core™ 2 Duo processor T5500)

วิธีการ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาแนวทางการกำหนดจำนวนและตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสม โดยใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมร่วมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการในงานวิจัย ดังแสดงในภาพที่ 43 เริ่มจากการสร้างแบบจำลองของชิ้นงานที่สามารถปรับเปลี่ยนตำแหน่งของทางเข้า เพื่อนำไปวิเคราะห์การไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ที่ตำแหน่งทางเข้าต่างๆ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม และบันทึกค่าวัตถุประสงค์ที่ศึกษา ได้แก่ ค่าแรงดันฉีดสูงสุด ค่าแรงดันฉีดที่ตำแหน่งทางเข้า และตำแหน่งของรอยประสาน จากนั้นนำค่าที่ได้ไปสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าวัตถุประสงค์และตำแหน่งของทางเข้าโดยใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม ภายหลังการหาสถาปัตยกรรมของเครือข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการทางสถิติ เช่น แผนภาพกล่อง และการวิเคราะห์ความแปรปรวนแล้ว จึงหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจากสมการที่ได้ โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ที่สามารถหาคำตอบของสมการจากเครือข่ายประสาทเทียมหรือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้อย่างแม่นยำ จากนั้นจึงนำคำตอบที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมวิเคราะห์การไหลและผลจากการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริง



ภาพที่ 43 ขั้นตอนการดำเนินการในงานวิจัย

- การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลองต้องพิจารณาถึงตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ตำแหน่งของทางเข้า แรงดันฉีด และตำแหน่งของรอยประสาน เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบกรณีศึกษาไว้สองกรณี โดยใช้ค่าแรงดันฉีดและค่าความแตกต่างของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าเป็นค่าวัตถุประสงค์สำหรับกรณีแรก และใช้ค่าแรงดันฉีดและตำแหน่งของรอยประสานเป็นค่า

วัตถุประสงค์สำหรับกรณีศึกษาที่สอง จากนั้นบันทึกค่าตำแหน่งของทางเข้า รวมถึงค่าแรงดันฉีด และตำแหน่งของรอยประสาน เพื่อนำไปเป็นข้อมูลสำหรับใช้ในการฝึกสอน และทดสอบ แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

- แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมต้องได้รับการพัฒนาให้มีความแม่นยำเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุด ซึ่งสามารถทำได้โดยการเลือกช่วงของตัวแปรให้เหมาะสม การปรับข้อมูลนำเข้า (Normalization) ให้อยู่ในช่วงของฟังก์ชันถ่ายโอนที่กำหนด และการเลือกสถาปัตยกรรมของเครือข่ายที่เหมาะสม ซึ่งได้แก่ จำนวนนิเวรอน จำนวนชั้นซ่อน ฟังก์ชันถ่ายโอน อัตราการเรียนรู้ และจำนวนรอบการฝึกสอน เป็นต้น

- โดยทั่วไปในการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแก้ปัญหาหรือหาคำตอบของสมการมักเป็นการแก้ปัญหาฟังก์ชันที่มีวัตถุประสงค์เดียว (Single objective function) แต่การกำหนดตำแหน่งของทางเข้าและช่องระบายอากาศที่เหมาะสมนั้น ประกอบด้วยหลายปัจจัย ยกตัวอย่างเช่น แรงดันฉีดควรมีค่าน้อยที่สุด และตำแหน่งของรอยประสานควรอยู่ใกล้ตำแหน่งที่กำหนดมากที่สุด ดังนั้น การแก้ปัญหาฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objectives function) จึงมีความเหมาะสมมากกว่าในการค้นหาตำแหน่งของทางเข้าและช่องระบายอากาศที่เหมาะสมที่สุด งานวิจัยนี้จึงได้ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์ในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด

1. การพัฒนาขั้นตอนวิธีกำหนดตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสมของชิ้นงานที่มี 4 ทางเข้า กรณีศึกษา: กรอบหน้าจอของคอมพิวเตอร์แบบพกพา

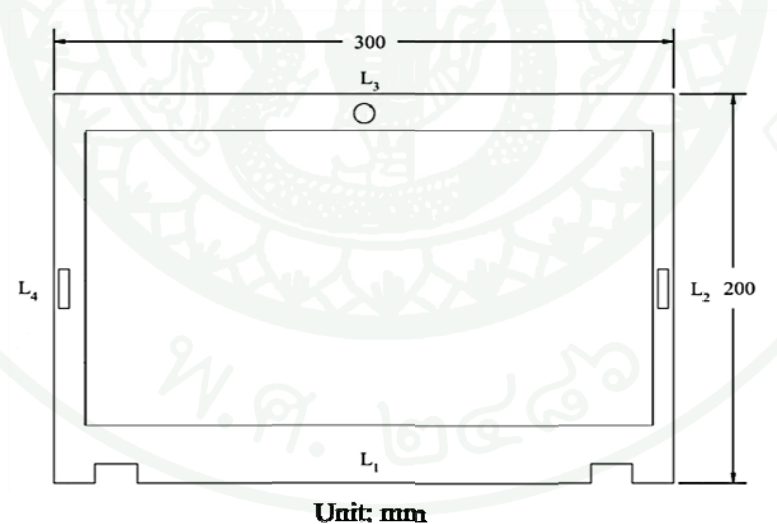
1.1 การสร้างแบบจำลองชิ้นงาน

กรณีศึกษาแรกเป็นการศึกษาถึงแนวทางในการกำหนดตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นกรอบ (Frame) หรือกลวงบริเวณตรงกลาง ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ลักษณะนี้ เช่น หน้ากากโทรศัพท์มือถือ หน้าจอโทรทัศน์ และหน้าจอของคอมพิวเตอร์แบบพกพา ดังแสดงในภาพที่ 44 ผู้วิจัยได้ใช้แบบจำลองของหน้าจอคอมพิวเตอร์แบบพกพา ซึ่งกำหนดทางเข้าจำนวน 4 ทางเข้า ดังแสดงในภาพที่ 45 เป็นกรณีศึกษา โดยเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีปัญหาในด้านการกำหนดตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสม เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความบาง ส่งผลให้ต้องใช้แรงดันฉีดสูง การกำหนดตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสมส่งผลให้ใช้แรงดันฉีดน้อยลง

ได้ นอกจากนี้การที่รูปแบบของชิ้นงานไม่สมมาตรและมีความยาวของทางวิ่งแตกต่างกัน ทำให้แรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้ามีความแตกต่างกัน ในกรณีที่มีความแตกต่างของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้ามาก อาจส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลในการไหล ชิ้นงานเกิดการบิดตัว หรือเกิดการฉีดไม่เต็มได้ ค่าแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าจึงควรมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด ในกรณีศึกษาข้างนี้จึงได้กำหนดให้ค่าแรงดันฉีดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าเป็นค่าวัตถุประสงค์



ภาพที่ 44 ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นกรอบหรือกลางบริเวณตรงกลาง



ภาพที่ 45 แบบจำลองชิ้นงานสำหรับกรณีศึกษา: หน้าจอของคอมพิวเตอร์แบบพกพา

1.2 การกำหนดสภาวะในกระบวนการฉีด

ในการกำหนดเงื่อนไขในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ได้ใช้วัสดุ Santoprene ซึ่งเป็นวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ที่มีลักษณะทางกายภาพคล้ายคลึงกับกับวัสดุยาง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุประเภทยางในลำดับถัดไปได้ ต่อมาจึงกำหนดตำแหน่งของทางเข้า และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการฉีด ได้แก่ อุณหภูมิของแม่พิมพ์เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวเท่ากับ 200°C จากนั้นวิเคราะห์และเก็บข้อมูลค่าแรงดันฉีดสูงสุดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดในแต่ละทางเข้า เพื่อนำไปใช้ในการฝึกสอนแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมต่อไป

1.3 การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล

งานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในการออกแบบสถาปัตยกรรมที่เหมาะสมเพื่อพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม ซึ่งทำให้ข้อมูลที่ได้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ ดังแสดงในตารางที่ 4 (กรณีที่มี 2 ปัจจัย) โดยแต่ละตัวแปรสามารถคำนวณได้จากสมการ 23-28 ในการทดลองได้อาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ซึ่งสามารถคำนวณเป็นค่า P-value โดยเมื่อค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรนั้นไม่มีผลต่อความแม่นยำในการทำนาย นอกจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแล้ว แผนภาพกล่อง (Boxplot) ถูกนำมาใช้ในการอธิบายรายละเอียดของข้อมูล ซึ่งสามารถอธิบายได้ทั้ง ค่าตำแหน่งค่ากลาง การกระจาย รูปแบบการแจกแจง และข้อมูลที่ผิดปกติ การกระจายของข้อมูลที่ศึกษาถูกบ่งชี้ด้วยขอบเขตของกล่อง และข้อมูลที่ผิดปกติอยู่ภายนอกขอบเขตกล่อง โดยแผนภาพกล่องนี้ ยังสามารถใช้เปรียบเทียบผลความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับของปัจจัยในการออกแบบการทดลอง หรือการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อกำหนดค่าที่เหมาะสม

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย

แหล่งที่มา	ผลบวกกำลังสอง	องศาเสรี	ผลเฉลี่ยกำลังสอง	ค่าสถิติ
วิธีปฏิบัติ A	SS_A	$a - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a - 1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
วิธีปฏิบัติ B	SS_B	$b - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b - 1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
อันตรกิริยา	SS_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
ความผิดพลาด	SS_E	$ab(n - 1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n - 1)}$	
ผลบวกกำลังสอง ทั้งหมด	SS_T	$abn - 1$		

$$\text{โดยที่ } SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2}{abn} \quad (23)$$

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_i^2 - \frac{y^2}{abn} \quad (24)$$

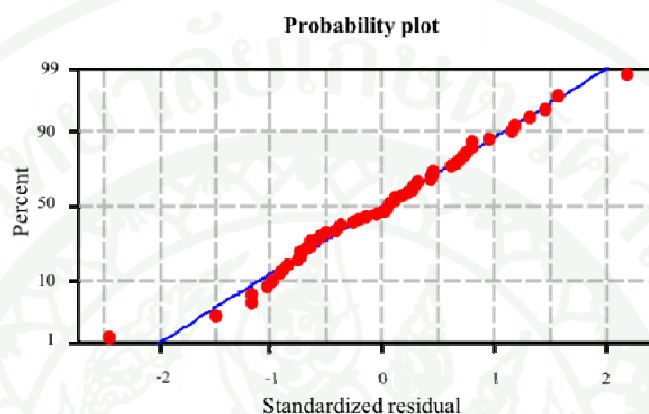
$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_j^2 - \frac{y^2}{abn} \quad (25)$$

$$SS_{Subtotal} = \frac{1}{an} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y^2}{abn} \quad (26)$$

$$SS_{AB} = SS_{Subtotal} - SS_A - SS_B \quad (27)$$

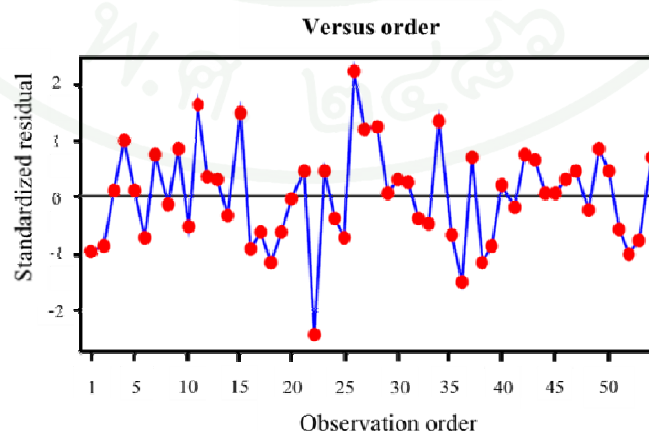
$$SS_E = SS_T - SS_{Subtotal} \quad (28)$$

- การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูล ใช้ลักษณะการแจกแจงแบบปกติโดยใช้ค่าความแม่นยำที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปมาก กับค่าความน่าจะเป็นสะสม เมื่อพิจารณาค่ากลางของภาพที่ 46 พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่ามีการกระจายแบบปกติ และข้อมูลนี้มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน (ประไพศรีและพงศ์ชนัน, 2549)



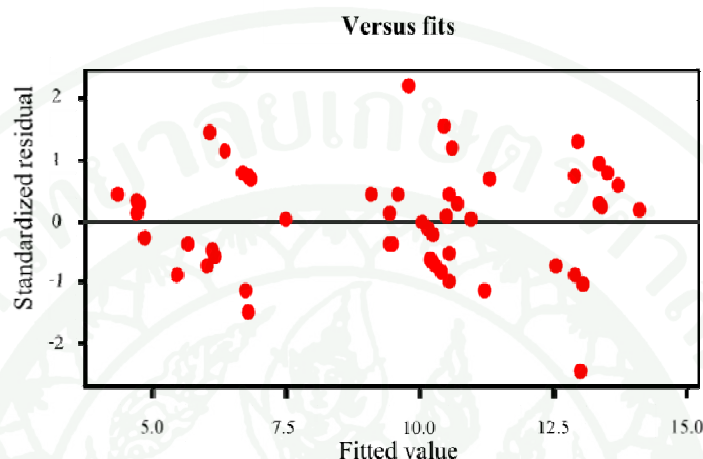
ภาพที่ 46 ความน่าจะเป็นของค่าผิดพลาดที่มีการกระจายชนิดปกติ

- การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการทดสอบถึงความสัมพันธ์ของค่าความแม่นยำ โดยใช้ค่าความแม่นยำและลำดับของเวลามาพล็อตกราฟ โดยหากพบว่าความแปรปรวนของความผิดพลาดไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในการทดลอง สามารถนำข้อมูลไปใช้วิเคราะห์ได้ ดังแสดงในภาพที่ 47 (ประไพศรีและพงศ์ชนัน, 2549)



ภาพที่ 47 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและลำดับที่ของการทดลอง

- การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล หากไม่มีรูปร่างหรือโครงสร้างใดๆ เกิดขึ้น แสดงว่าเป็นการกระจายทั่วไป ข้อมูลสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ได้ ดังแสดงในภาพที่ 48 (ประไพศรีและพงศ์นรินทร์, 2549)



ภาพที่ 48 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและค่าเฉลี่ย

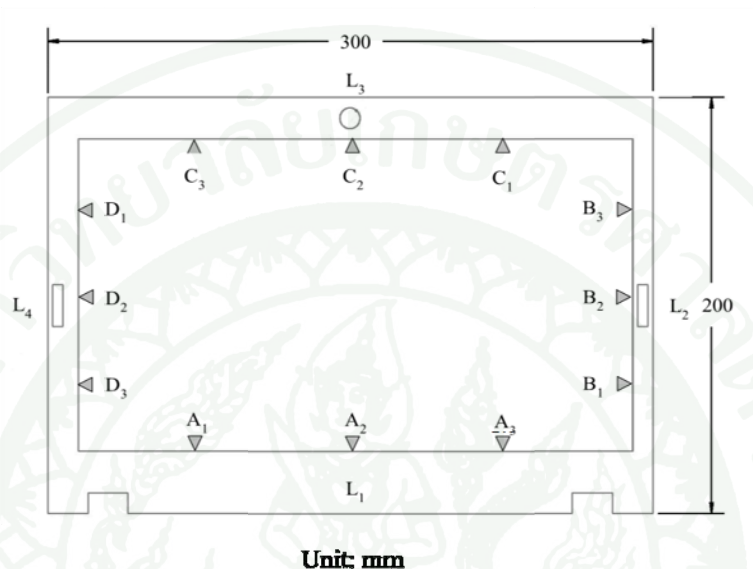
1.4 การออกแบบแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

การพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมที่สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของทางเข้ากับค่าแรงดันจืดและตำแหน่งของรอยประสานได้อย่างประสาทเทียมแม่นยำ นั้น งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการปรับเปลี่ยนสถาปัตยกรรมเครือข่าย ซึ่งได้แก่ จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน อัตราการเรียนรู้ และจำนวนรอบการฝึกสอน โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง แสดงเป็นค่าความผิดพลาด (Error) หรือค่าความแม่นยำ (Accuracy) ระหว่างข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม ในการเตรียมข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลอง ได้แบ่งข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมจำลองการไหลภายในแม่พิมพ์เป็น 2 ส่วน คือ ข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน (Training data) 80% และข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพ (Test data) 20%

1.4.1 การกำหนดตำแหน่งของทางเข้าในการฝึกสอนเครือข่ายประสาทเทียม

กำหนดให้ข้อมูลนำเข้าในเครือข่าย คือ ตำแหน่งของทางเข้า และมีข้อมูลส่งออก คือ ค่าแรงดันจืดสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันที่แต่ละทางเข้า โดยกำหนดให้

มีทางเข้าอยู่บนแต่ละด้าน L_1 , L_2 , L_3 และ L_4 ด้านละ 1 ทางเข้า ซึ่งค่า L เป็นระยะที่วัดจากปลายสุดของแต่ละด้าน และสามารถปรับเปลี่ยนตำแหน่งทางเข้าได้ 3 ตำแหน่งบนด้านนั้น รายละเอียดของแต่ละตำแหน่งทางเข้าในการฝึกสอน ดังแสดงในภาพที่ 49



ภาพที่ 49 ตำแหน่งทางเข้าต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

จากนั้นปรับค่าข้อมูลนำเข้าให้อยู่ในช่วง 0-1 โดยใช้สมการที่ 29 สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนซิกมอยด์แบบลอการิทึม (Log-sigmoid) ของแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

$$y_i = \frac{(y_{\max} - y_{\min})(x_i - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})} + y_{\min} \quad (29)$$

โดย $x_{\max}$ และ $x_{\min}$ คือ ค่าสูงสุดและต่ำสุดของข้อมูลที่ต้องการปรับค่า ส่วน $y_{\max}$ และ $y_{\min}$ คือ ค่าสูงสุดและต่ำสุด (ในกรณีของฟังก์ชันถ่ายโอนซิกมอยด์แบบลอการิทึม $y_{\max}$ เท่ากับ 1 และ $y_{\min}$ เท่ากับ 0) โดยที่ x_i และ y_i คือ ข้อมูลที่ต้องการปรับค่า และค่าของข้อมูลภายหลังการปรับค่า ตามลำดับ

1.4.2 การออกแบบสถาปัตยกรรมที่เหมาะสมของแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

- การฝึกสอนเครือข่ายประสาทเทียม ใช้วิธีการแพร่กระจายย้อนกลับ ซึ่งเป็นวิธีการเรียนรู้แบบมีผู้สอน โดยนำค่าความผิดพลาดระหว่างค่าเป้าหมายกับผลลัพธ์ที่ได้มาใช้ในการปรับค่าน้ำหนัก เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากที่สุด

- วิธีการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก (Updating weights method) ใช้วิธีของเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอท์ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความรวดเร็วในการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก และมีประสิทธิภาพสูงในการเข้าสู่ค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสม

- ฟังก์ชันถ่ายโอน สำหรับชั้นซ่อนใช้ฟังก์ชันซิกมอยด์ ซึ่งมีคุณสมบัติที่ให้ค่าข้อมูลส่งออกที่เป็นค่าต่อเนื่องอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 และสำหรับชั้นข้อมูลส่งออกใช้ฟังก์ชันเชิงเส้นตรง (Linear) ซึ่งเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้สมการเส้นตรง ส่งผลให้ผลลัพธ์ของข้อมูลสอดคล้องกับค่าข้อมูลนำเข้า

- ค่าความคลาดเคลื่อนเป้าหมาย (Goal) ใช้เป็นเกณฑ์ในการหยุดการฝึกสอนอีกทางหนึ่ง ถ้าค่าความผิดพลาดที่ได้จากการฝึกสอนเครือข่ายมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความผิดพลาดเป้าหมายที่ตั้งไว้ ส่งผลให้เครือข่ายหยุดการสอน และนำค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้ในขณะนั้นไปใช้ในการทำนาย สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดให้ค่าความผิดพลาดเป้าหมายเท่ากับ 1×10^{-5}

- ค่าอัตราการเรียนรู้ (Learning Rate) เป็นค่าที่ควบคุมความเร็วในการปรับตัวและความคงตัว (Stability) ของค่าถ่วงน้ำหนัก โดยอัตราการเรียนรู้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 หากกำหนดให้ค่าอัตราการเรียนรู้สูงเกินไป ค่าน้ำหนักอาจถูกปรับไปมา ทำให้ถึงจุดที่มีค่าถ่วงน้ำหนักที่สมดุลได้ยากหรืออาจไม่สามารถเข้าสู่สมดุลได้เลย และหากกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ต่ำเกินไป แม้สามารถหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุดได้ แต่เครือข่ายประสาทเทียมมีการเรียนรู้ช้ามาก ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยทดลองปรับค่าอัตราการเรียนรู้ 3 ค่า ได้แก่ 0.01 0.03 และ 0.05 จากนั้นจึงใช้วิธีการทางสถิติในการหาค่าอัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 5

- จำนวนรอบในการฝึกสอน (Epochs) หมายถึง จำนวนครั้งที่ทำการฝึกสอนเครือข่ายประสาทเทียมด้วยชุดข้อมูลที่ใช้สำหรับฝึกสอน หากกำหนดให้จำนวนรอบในการฝึกสอน

มีค่าสูงเกินไป นอกจากใช้เวลาในการประมวลผลนานแล้วยังไม่ส่งผลให้เครือข่ายประสาทเทียมมีการเรียนรู้มากขึ้น จึงควรประมาณจำนวนรอบในการฝึกสอนที่น้อยที่สุดเท่าที่จำเป็นที่เครือข่ายเกิดการเรียนรู้และมีความแม่นยำ สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยกำหนดให้จำนวนรอบการฝึกสอน 3 ค่า ได้แก่ 1,000 3,000 และ 5,000 รอบ ตามลำดับ จากนั้นจึงใช้วิธีการทางสถิติในการกำหนดจำนวนรอบในการฝึกสอนที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสมในเครือข่ายประสาทเทียม

1.	Output Accuracy	Indicator Maximum injection pressure Standard deviation of injection pressure at each gate		
2.	Design factors	Level		
	Learning rate	0.01	0.03	0.05
	Epochs	1,000	3,000	5,000
3.	Controllable factors	Controllable value		
	Number of hidden layers	1		
	Neurons in first hidden layer	6		
4.	Number of experimental run	27 runs		

- การหาจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่เหมาะสม เป็นการทดลองเพื่อหาจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน โดยช่วงของจำนวนนิวรอนที่เหมาะสม ดังแสดงในสมการที่ 30 และ 31 (Abu-Zahra, 2003) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์อิทธิพลของจำนวนนิวรอน 3 ถึง 9 ตัว ในชั้นซ่อนที่ 1 เนื่องจากมีข้อมูลนำเข้า 4 ข้อมูล ดังแสดงในตารางที่ 6

$$\text{Minimum neuron} = \frac{\text{Input neuron} + \text{Output neuron}}{2} \quad (30)$$

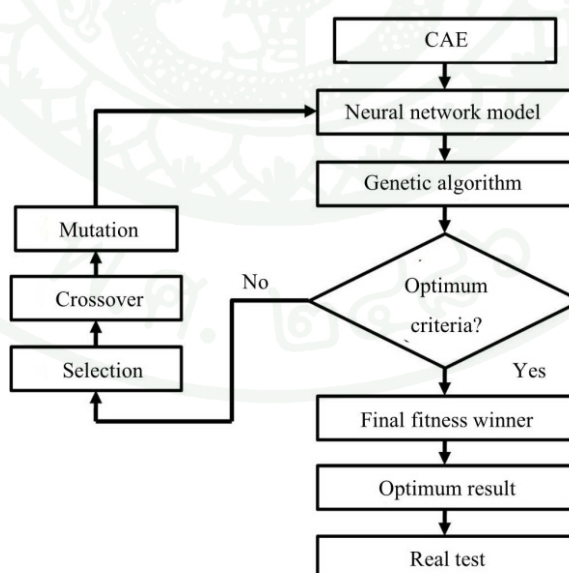
$$\text{Maximum neuron} = 2(\text{Input neuron}) + 1 \quad (31)$$

ตารางที่ 6 การออกแบบการทดลองเพื่อหาจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน

1. Output	Indicator
Accuracy	Maximum injection pressure
	Standard deviation of injection pressure at each gate
2. Design factors	Level
Neurons in the first hidden layer	3, 4, 5, ..., 9
3. Controllable factors	Controllable value
Learning rate	Result from table 5
Epochs	Result from table 5

1.5 การกำหนดพารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ภายหลังจากได้สถาปัตยกรรมเครือข่ายที่เหมาะสมแล้ว จึงนำความสัมพันธ์ที่ได้มาหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ซึ่งกระบวนการนำเครือข่ายประสาทเทียมและขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมาใช้ร่วมกัน มีวิธีการดังแสดงในภาพที่ 50



ภาพที่ 50 ขั้นตอนการใช้เครือข่ายประสาทเทียมร่วมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ในการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม สามารถทำได้โดยการปรับพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งได้แก่ ขนาดของประชากร อัตราการสลับสายพันธุ์ อัตราการกลายพันธุ์ และรอบการกำเนิดสายพันธุ์

1.5.1 ขนาดประชากร

ขนาดประชากรที่เหมาะสมส่งผลให้การกระจายตัวของประชากรสามารถครอบคลุมคำตอบแบบวงกว้างได้ อย่างไรก็ตาม หากกำหนดขนาดของประชากรมากเกินไป แม้จะมีแนวโน้มในการได้คำตอบที่ดีขึ้น แต่ส่งผลให้ใช้เวลามากในการประมวลผล หรือหากกำหนดขนาดประชากรน้อยเกินไป ทำให้การค้นหานั้นเข้าสู่คำตอบได้ช้าเกินไป (Chatterjee *et al.*, 1996) จำนวนประชากรที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 3 ระดับ ได้แก่ 10 30 และ 50 ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ถูกกำหนดให้คงที่ ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดขนาดประชากร

1.	Output	Indicator		
	The best solution	Maximum injection pressure		
		Standard deviation of injection pressure at each gate		
2.	Design factors	Level		
	Population size	10	30	50
3.	Controllable factors	Controllable value		
	Population type	Double vector		
	Selection	Tournament		
	Fitness scaling	Rank		
	Crossover rate (P_c)	0.75		
	Mutation rate (P_m)	0.03		
	Maximum generation	250		
4.	Number of experimental run	3 runs x 3 times = 9 runs		

1.5.2 อัตราการสลับสายพันธุ์

อัตราการสลับสายพันธุ์ มีค่าอยู่ในช่วง 0-100% จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า อัตราการสลับสายพันธุ์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 60-95% (Coley, 1999) หากไม่มีการสลับสายพันธุ์ ผลที่ได้ คือ การถ่ายทอดสำเนาจากพ่อแม่สายพันธุ์ แต่หากมีการสลับสายพันธุ์เกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดสายพันธุ์ และคำตอบที่หลากหลาย อัตราการสลับสายพันธุ์ที่ถูกศึกษาในขั้นตอนนี้มี 3 ระดับ ได้แก่ 0.6 0.75 และ 0.9 พารามิเตอร์อื่นๆ ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ถูกกำหนดให้คงที่ โดยปรับค่าขนาดประชากรตามค่าที่ได้จากหัวข้อ 1.5.1 การออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดอัตราการสลับสายพันธุ์ ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดอัตราการสลับสายพันธุ์

1.	Output	Indicator		
	The best solution	Maximum injection pressure		
		Standard deviation of injection pressure at each gate		
2.	Design factors	Level		
	Crossover rate	0.6	0.75	0.9
3.	Controllable factors	Controllable value		
	Population type	Double vector		
	Selection	Tournament		
	Fitness scaling	Rank		
	Population size	Result from 1.5.1		
	Mutation rate (P_m)	0.03		
	Maximum generation	250		
4.	Number of experimental run	3 runs x 3 times = 9 runs		

1.5.3 อัตราการกลายพันธุ์

อัตราการกลายพันธุ์มีค่าอยู่ในช่วง 0-100% อย่างไรก็ตาม อัตราการกลายพันธุ์ส่วนใหญ่อยู่ที่ 0-5% หากไม่มีการกลายพันธุ์ (0%) ส่งผลให้ค่าที่ได้เกิดจากการสลับสายพันธุ์เพียง

อย่างเดียว แต่หากมีอัตราการกลายพันธุ์ 100% ส่งผลให้โครโมโซมมีการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด และส่งผลให้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม กลายเป็นกระบวนการค้นหาแบบสุ่ม (Random search) (Coley, 1999) อัตราการกลายพันธุ์ที่ถูกศึกษาในขั้นตอนนี้มี 3 ระดับ ได้แก่ 0.01 0.03 และ 0.05 พารามิเตอร์อื่นๆ ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ถูกกำหนดให้คงที่ ยกเว้นค่าขนาดประชากร และอัตราการสลับสายพันธุ์ที่ได้จากหัวข้อ 1.5.1 และ 1.5.2 แล้ว การออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดอัตราการกลายพันธุ์ ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 การออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดอัตราการกลายพันธุ์

1.	Output	Indicator		
	Iteration	Maximum injection pressure		
		Standard deviation of injection pressure at each gate		
2.	Design factors	Level		
	Mutation rate	0.01	0.03	0.05
3.	Controllable factors	Controllable value		
	Population type	Double vector		
	Selection	Tournament		
	Fitness scaling	Rank		
	Population size	Result from 1.5.1		
	Crossover rate	Result from 1.5.2		
	Maximum generation	250		
4.	Number of experimental run	3 runs x 3 times = 9 runs		

1.5.4 จำนวนรอบการกำเนิดสายพันธุ์

จำนวนรอบการกำเนิดสายพันธุ์เป็นขั้นตอนวิธีแสดงเงื่อนไขการหยุดค้นหาของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ซึ่งมีการกำเนิด คัดเลือก และสร้างประชากรต้นกำเนิดใหม่ จนกระทั่งถึงเงื่อนไขการหยุด โดยทั่วไป จำนวนรอบถูกกำหนดจากการเข้าสู่ค่าตอบ โดยเป็นจำนวนรอบสูงสุดที่เพียงพอต่อการค้นหาคำตอบแบบวงกว้าง ดังนั้น หากเกิดการเข้าสู่ค่าตอบหรือหยุดการค้นหาแล้ว สามารถลดจำนวนรอบการกำเนิดสายพันธุ์ลงได้เพื่อลดเวลาในการคำนวณ

1.5.5 การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์

แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมถูกนำมาใช้เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลนำเข้า (ตำแหน่งทางเข้า) และข้อมูลส่งออก (ค่าแรงดันสูงสุดในแต่ละฟิวด์และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันลีดที่แต่ละทางเข้า) เพื่อประยุกต์ใช้กับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ซึ่งมีจำนวนตัวแปรนำเข้าและรูปแบบสมการการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ ดังแสดงในสมการที่ 32-33

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (32)$$

$$\text{Minimize } F_m(x), m = 1, 2, \dots, M \quad (33)$$

โดย x เป็นค่าของตำแหน่งทางเข้า ซึ่งมีจำนวน 4 ตำแหน่ง สำหรับกรณีศึกษาแรก และมีจำนวนวัตถุประสงค์ 2 จำนวน โดยแต่ละวัตถุประสงค์ต้องการให้เป็นค่าน้อยที่สุด แทนด้วย $F(x) = \{F_1(x), F_2(x)\}$ และมีขอบเขตของข้อมูลนำเข้า (Bounds) อยู่ระหว่าง 0-1

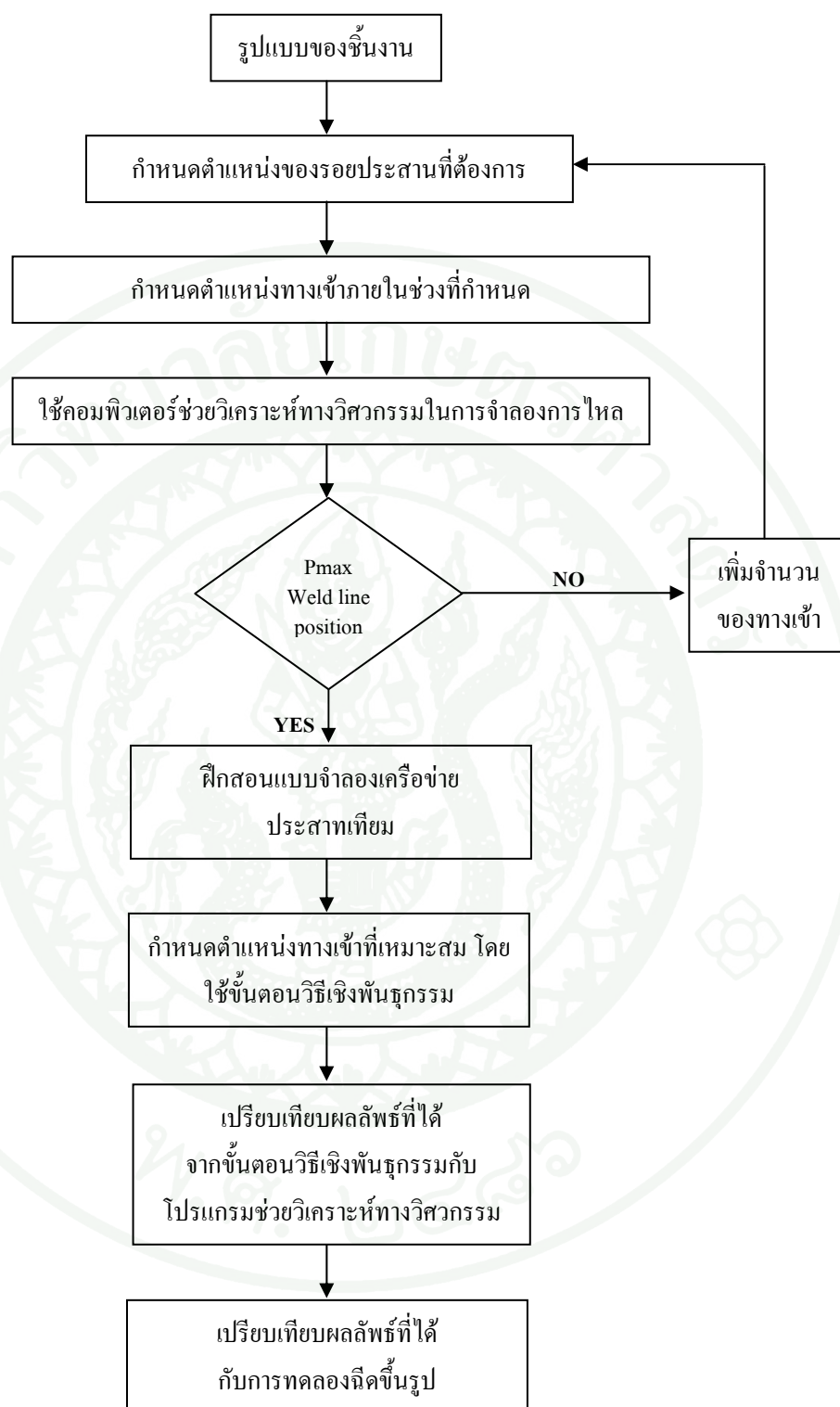
ผลลัพธ์จากการหาค่าคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ ส่งผลให้ได้ชุดของชุดคำตอบแบบพาเรโต (Pareto optimal) ซึ่งเป็นชุดคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ (Non-dominated solution) กล่าวคือ เป็นคำตอบของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์หนึ่ง ซึ่งค่าของอีกฟังก์ชันหนึ่งเป็นค่าที่ต่ำสุดหรือสูงที่สุด จากนั้นจึงเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากค่าวัตถุประสงค์ที่ได้ หรือกำหนดจากวัตถุประสงค์อื่นในการพิจารณา สำหรับกรณีศึกษานี้ ภายหลังจากได้ชุดคำตอบพาเรโตแล้ว นอกจากการพิจารณาค่าแรงดันลีดสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันลีดที่แต่ละทางเข้าแล้ว ตำแหน่งของช่องระบายอากาศก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ถูกนำมาพิจารณา เพื่อหาตำแหน่งของช่องระบายอากาศที่เหมาะสมที่สุด

2. การพัฒนาขั้นตอนวิธีกำหนดจำนวนและตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสมที่สุด กรณีศึกษา: ชั้นงานที่มีอินเสิร์ตภายในชั้นงาน

กรณีศึกษานี้เป็นการศึกษาถึงแนวทางในการกำหนดจำนวนและตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสม ซึ่งต่างจากกรณีศึกษาแรกที่กำหนดจำนวนของทางเข้าไว้แล้ว ในกรณีศึกษานี้ใช้ค่าแรงดันลีดและตำแหน่งของรอยประสานเป็นค่าวัตถุประสงค์ โดยใช้แนวทางในการออกแบบ

เครือข่ายประสาทเทียม และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ตามกรณีศึกษาแรก สำหรับแนวทางการกำหนดตำแหน่งของทางเข้าจากตำแหน่งรอยประสานนั้น สามารถลดขอบเขตในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของทางเข้าเพื่อใช้ในการฝึกสอนเครือข่ายประสาทเทียม กล่าวคือใช้จำนวนของข้อมูลนำเข้าลดลง ทำให้ลดเวลาในการเก็บข้อมูล และในกรณีที่ค่าแรงดันจลน์มีค่าสูงเกินกว่าค่าที่กำหนด จึงเพิ่มจำนวนของทางเข้า จนกระทั่งได้เงื่อนไขตามข้อกำหนดในการออกแบบ ทำให้สามารถกำหนดจำนวนของทางเข้าที่เหมาะสมได้ ดังแสดงในภาพที่ 51

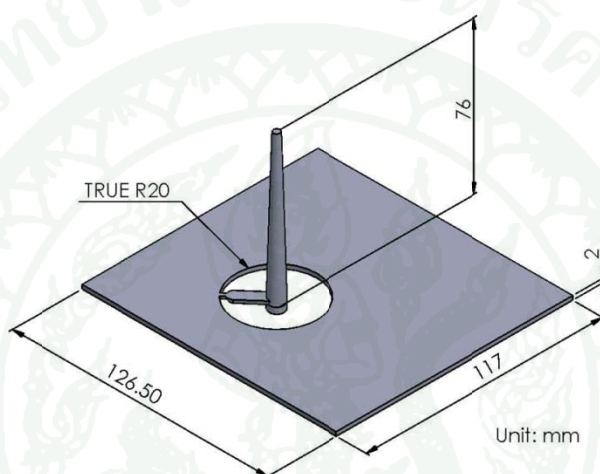




ภาพที่ 51 ขั้นตอนการกำหนดจำนวนและตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสมที่สุด เมื่อกำหนดค่าแรงดันฉีดและตำแหน่งรอยประสานเป็นค่าวัตถุประสงค์

2.1 การสร้างแบบจำลองชิ้นงาน

กำหนดให้แบบจำลองเป็นรูปแบบสี่เหลี่ยมที่ไม่สมมาตร ดังแสดงในภาพที่ 52 โดยกำหนดตำแหน่งของรอยประสานให้อยู่บนบริเวณที่มีระยะจากอินเลิร์ตถึงผนังชิ้นงานมากที่สุด เพื่อกำหนดขอบเขตของทางเข้าที่ใช้ในการฝึกสอนเครือข่ายประสาทเทียม อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ค่าแรงดันฉีดมีค่าสูงเกินกว่าที่กำหนด อาจเพิ่มจำนวนทางเข้าเป็น 2 หรือ 3 ทางเข้า ตามลำดับ



ภาพที่ 52 แบบจำลองสำหรับกรณีศึกษา: ชิ้นงานที่มีอินเลิร์ตภายในชิ้นงาน

2.2 การกำหนดสภาวะในกระบวนการฉีด

ขั้นตอนการกำหนดสมบัติของวัสดุเพื่อใช้จำลองการไหลของยางธรรมชาติ ดังแสดงในภาคผนวก ข สำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ของกระบวนการ กำหนดให้อุณหภูมิของยางเท่ากับ 80°C อุณหภูมิของแม่พิมพ์เท่ากับ 150°C และเวลาในการคงรูป 300 s จากนั้นจึงวิเคราะห์และเก็บข้อมูลค่าแรงดันฉีดสูงสุด รวมถึงตำแหน่งของรอยประสาน ที่ตำแหน่งทางเข้าต่างๆ เพื่อนำไปใช้ฝึกสอนเครือข่ายประสาทเทียม

2.3 การกำหนดตำแหน่งของทางเข้าและรอยประสานเพื่อนำไปใช้ในการฝึกสอน

ในกรณี 1 ทางเข้า กำหนดให้ตำแหน่งของทางเข้า (θ_1) เป็นข้อมูลนำเข้า และตำแหน่งของรอยประสาน (θ_2) เป็นข้อมูลส่งออกในแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม ดังแสดงในภาพที่ 53

ในกรณีที่แรงดันฉีดมีค่าสูงเกินกว่าที่กำหนด หรือต้องการลดแรงดันฉีด สามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนของทางเข้า อย่างไรก็ตาม การเพิ่มจำนวนของทางเข้าส่งผลให้มีตำแหน่งที่เกิดรอยประสานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การกำหนดบริเวณที่ต้องการให้เกิดรอยประสานยังทำได้ยาก ซึ่งบริเวณดังกล่าวคือ บริเวณที่มีระยะจากอินเล็ตถึงผนังชิ้นงานมากที่สุด โดยมีระยะดังกล่าวใกล้เคียงกันมากที่สุดในแต่ละบริเวณที่กำหนดให้เกิดรอยประสาน และเป็นตำแหน่งที่สามารถแบ่งพื้นที่ของชิ้นงานได้ขนาดเท่าๆ กัน ผู้วิจัยได้นำระเบียบวิธีการแบ่งครึ่งช่วง (Bi-section method) มาประยุกต์ใช้เพื่อกำหนดบริเวณรอยประสานให้ได้ตามเงื่อนไข

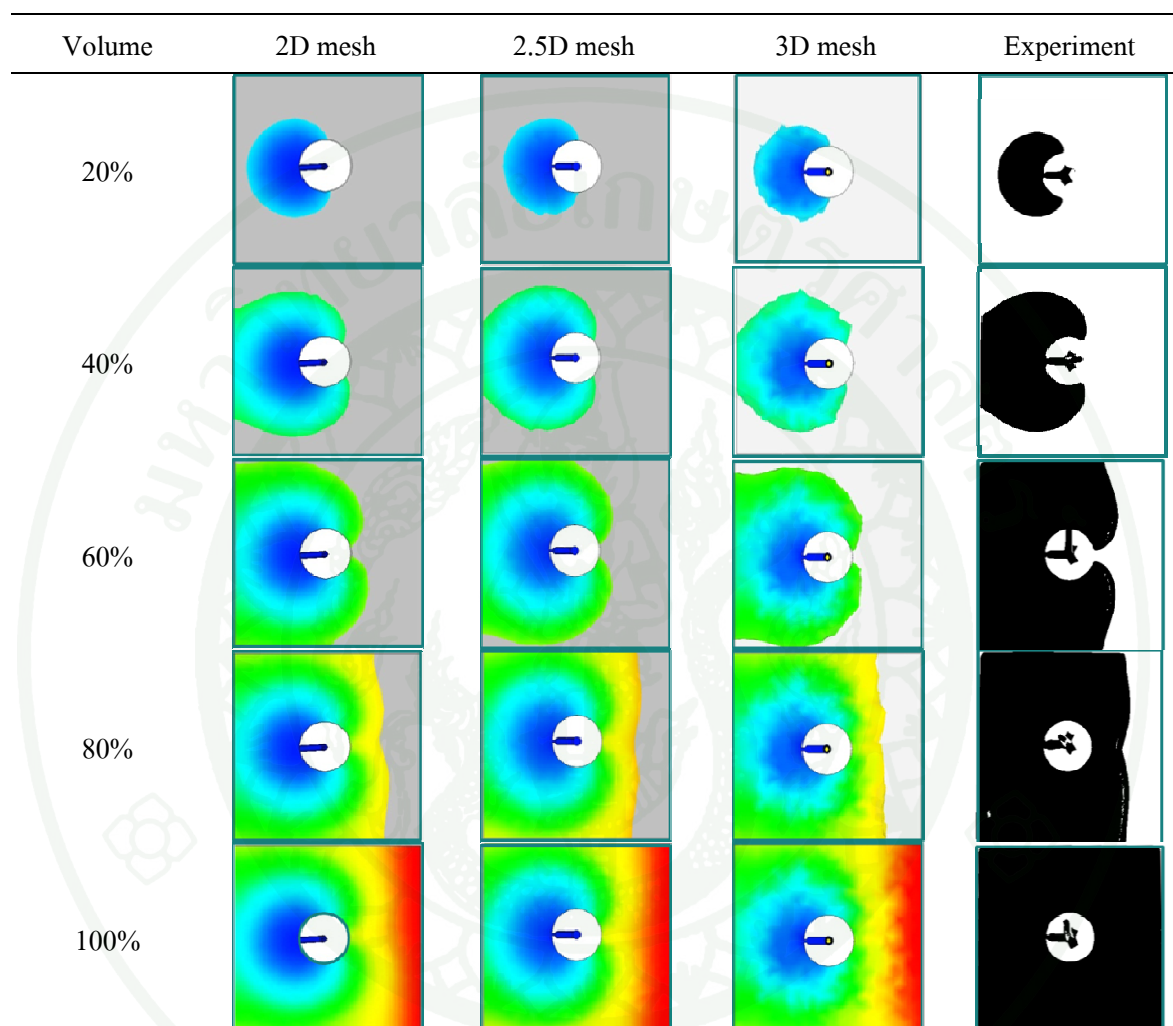
ภาพที่ 53 การกำหนดตำแหน่งของทางเข้าและรอยประสาน กรณี 1 ทางเข้า

ผลและวิจารณ์

1. ผลวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์ฉีดโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม

จากตารางที่ 10 เมื่อพิจารณารูปแบบการไหล (Flow pattern) ของผลการวิเคราะห์การไหลแบบ 2D 2.5D และ 3D และชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปจริง แสดงให้เห็นว่า ที่ปริมาตรการฉีด 20 ถึง 40% ผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาตรการฉีดเพิ่มขึ้นเป็น 60 และ 80% พบว่า ผลการวิเคราะห์การไหลแบบ 2D และ 2.5D ไม่แตกต่างกันมากนัก ในขณะที่แบบ 3D มีระยะทางการไหลที่สั้นกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการวิเคราะห์การไหลแบบ 2D และ 2.5D มีการกำหนดสมมติฐานในการคำนวณที่ไม่คำนึงถึงการนำความร้อนในแนวระนาบ ในขณะที่การวิเคราะห์การไหลแบบ 3D มีการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในทุกทิศทาง (Shoemaker, 2008) เป็นสาเหตุให้การวิเคราะห์การไหลแบบ 3D มีการคำนวณการถ่ายเทความร้อนระหว่างพอลิเมอร์หลอมเหลวกับอากาศ เกิดเป็นชั้นผิวแข็งตัว (Solidified skin layer) ที่บริเวณแนวการไหลด้านหน้า (Flow front) โดยเมื่อระยะทางการไหลหรือเวลาในการไหลเพิ่มมากขึ้น ชั้นผิวแข็งตัวมีความหนาเพิ่มขึ้น การไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ 3D จึงไหลตัวได้ยากกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์การไหล ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริง พบว่า ที่ปริมาตรการฉีดสูงๆ ชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปจริงมีระยะทางการไหลที่มากกว่าผลจากโปรแกรมวิเคราะห์การไหล ซึ่งมีสาเหตุมาจากในกระบวนการฉีดขึ้นรูปจริง พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลผ่าน รูฉีด ทางวิ่ง ทางเข้า และเข้าสู่ชิ้นงาน ซึ่งมีช่องทางการไหลขนาด 2 mm ส่งผลให้เกิดความร้อนเนื่องจากแรงเฉือน (Shear heating) ทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าความหนืดลดลง และนอกจากนี้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปจริงเกิดการเลื่อนตัวที่ผนัง (Slip at wall) ในระหว่างที่ไหลผ่านช่องทางการไหล (Sombatsompop and Wood, 1998) โดยพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานจริงนี้เป็นสมมติฐานที่โปรแกรมวิเคราะห์การไหลไม่นำมาพิจารณาในการคำนวณ ซึ่งได้แก่การกำหนดให้การถ่ายเทความร้อนของพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าคงที่ตลอดระยะทางการไหล (Isothermal flow) และกำหนดให้ความเร็วในการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ผนังเท่ากับศูนย์หรือไม่มีการเลื่อนตัวที่ผนัง (No-slip at wall) จากผลจำลองการไหลที่ได้ ทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้แบบจำลอง 2.5D สำหรับการจำลองการไหลของชิ้นงานผนังบาง เพื่อนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปใช้ในการฝึกสอนเครือข่ายประสาทเทียม

ตารางที่ 10 การวิเคราะห์รูปร่างการไหลภายในแม่พิมพ์ฉีดโดยใช้เอลิเมนต์แบบ 2D 2.5D 3D และ
ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปจริง ที่ปริมาตรการฉีดแตกต่างกัน



2. ผลการพัฒนารูปแบบวิธีกำหนดตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสมของชิ้นงานที่มี 4 ทางเข้า

กรณีศึกษา: กรอบหน้าจอของคอมพิวเตอร์แบบพกพา

2.1 ผลการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบที่เหมาะสมของ เครือข่ายประสาทเทียม

ผลของการทดลองเพื่อกำหนดอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบที่เหมาะสมในการ
ฝึกสอนเครือข่ายประสาทเทียม ดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 การทดลองเพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสมของ
เครือข่ายประสาทเทียม เมื่อค่าแรงดันฉีดสูงสุดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดัน
ฉีดที่แต่ละตำแหน่งทางเข้าเป็นข้อมูลส่งออก

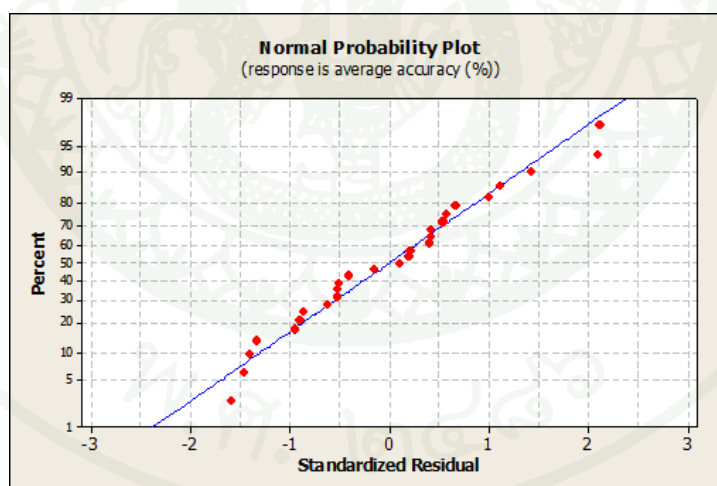
Run order	Epochs	Learning rate	Accuracy for pressure (%)	Accuracy for SD of pressure (%)
1	3,000	0.05	96.5729	93.3027
2	3,000	0.03	97.2042	94.5165
3	1,000	0.05	97.1532	91.6625
4	1,000	0.01	97.0897	90.4890
5	5,000	0.03	97.2175	94.5121
6	1,000	0.03	97.3865	89.4639
7	1,000	0.03	97.2315	91.9588
8	5,000	0.05	97.1089	95.0189
9	1,000	0.05	96.6979	91.5868
10	5,000	0.01	97.1895	88.2415
11	5,000	0.03	98.1465	86.2474
12	1,000	0.05	97.302	90.7601
13	1,000	0.01	96.7059	93.1674
14	5,000	0.01	97.4552	91.5759
15	3,000	0.01	97.3482	91.6899
16	3,000	0.05	96.5437	90.7936
17	3,000	0.03	96.6238	89.9672
18	1,000	0.01	97.3192	89.1972
19	3,000	0.03	96.7172	93.0951
20	5,000	0.05	97.3572	92.7491
21	3,000	0.05	96.2022	93.9142
22	5,000	0.01	97.5711	92.5924
23	1,000	0.03	97.4572	94.3703
24	3,000	0.01	97.1395	94.7524

ตารางที่ 11 (ต่อ)

Run order	Epochs	Learning rate	Accuracy for pressure (%)	Accuracy for SD of pressure (%)
25	5,000	0.05	97.1719	94.7380
26	5,000	0.03	97.4856	93.8941
27	3,000	0.01	98.0278	94.1754

2.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ เมื่อค่าแรงดันฉีดสูงสุดเป็นข้อมูลส่งออก

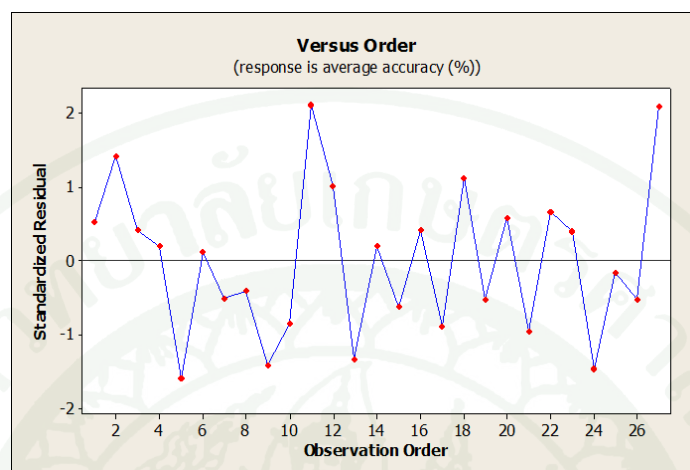
2.2.1 การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูล พิจารณาลักษณะการแจกแจงแบบปกติ โดยใช้ค่าความแม่นยำที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปมาก กับค่าความน่าจะเป็นสะสม เมื่อพิจารณาค่ากลางของภาพที่ 54 พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงถึงการกระจายแบบปกติ และข้อมูลมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน



ภาพที่ 54 การแจกแจงความน่าจะเป็นเพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อข้อมูลส่งออกคือ ค่าแรงดันฉีดสูงสุด

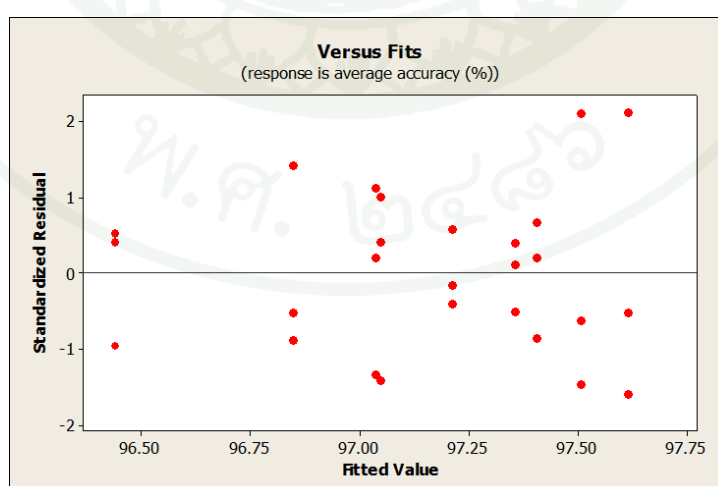
2.2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการทดสอบถึงความสัมพันธ์ของค่าความแม่นยำ โดยใช้ค่าความแม่นยำและลำดับของเวลา ดังแสดงในภาพที่ 55 พบว่า ความ

แปรปรวนของความผิดพลาดไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการทดลอง สามารถนำข้อมูลไปใช้วิเคราะห์ได้



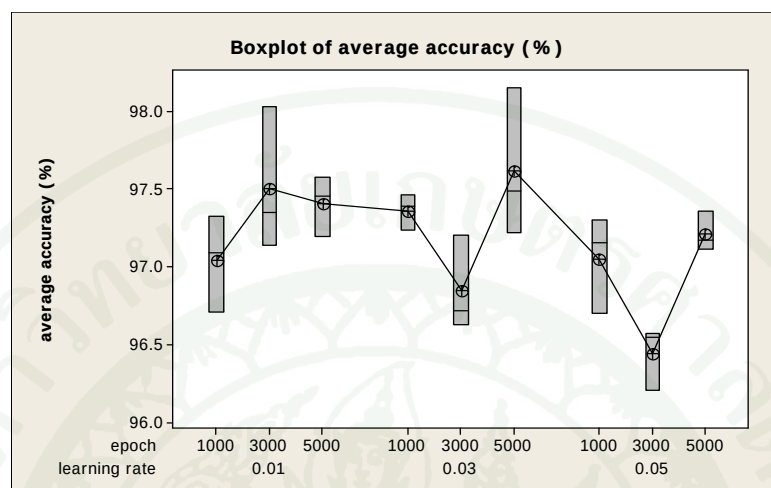
ภาพที่ 55 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อข้อมูลส่งออกคือ ค่าแรงดันฉีดสูงสุด

2.2.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน จากการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล ดังแสดงในภาพที่ 56 พบว่าเป็นการกระจายทั่วไป ไม่มีรูปร่างหรือโครงสร้างใดๆ เกิดขึ้น ข้อมูลสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ได้



ภาพที่ 56 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อข้อมูลส่งออกคือ ค่าแรงดันฉีดสูงสุด

2.2.4 การวิเคราะห์โดยแผนภาพแบบกล่อง การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองเพื่อกำหนดอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม ดังแสดงในภาพที่ 57



ภาพที่ 57 แผนภาพกล่องเพื่อกำหนดอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อข้อมูลส่งออกคือ ค่าแรงดันนิวตริโน

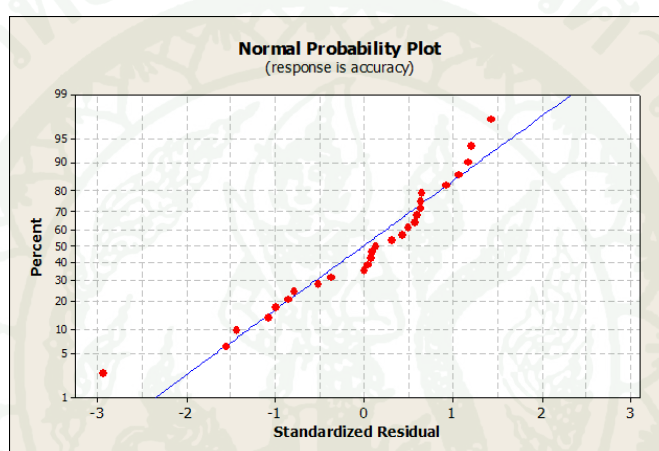
การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการแปรปรวน ดังแสดงในตารางที่ 12 เพื่อหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม ซึ่งพบว่า P-value มีค่าที่น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองทั้ง 3 แบบมีความแตกต่างกัน จึงพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งพบว่าจำนวนรอบการฝึกสอนที่ 1,000 รอบ และอัตราการเรียนรู้ที่ 0.03 ให้ค่าที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายค่าแรงดันนิวตริโน

ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อข้อมูลส่งออกคือ ค่าแรงดันนิวตริโน

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Epochs	2	1.04159	1.04159	0.52079	5.53	0.013
Learning rate	2	0.94040	0.94040	0.47020	4.99	0.019
Epochs*Learning rate	4	1.23545	1.23545	0.30886	3.28	0.035
Error	18	1.69463	1.69463	0.09415		
Total	26	4.91207				

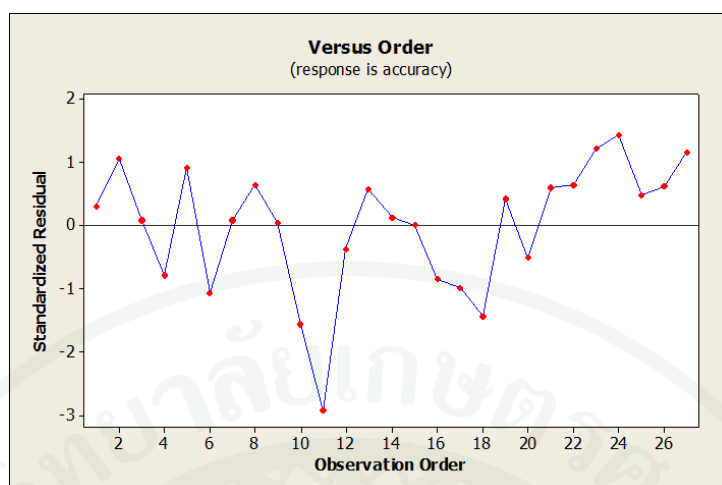
2.3 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบเมื่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละตำแหน่งทางเข้าเป็นข้อมูลส่งออก

2.3.1 การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูล ถึงลักษณะการแจกแจงแบบปกติโดยใช้ค่าความแม่นยำที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปมาก กับค่าความน่าจะเป็นสะสม เมื่อพิจารณาค่ากลาง ดังแสดงในภาพที่ 58 พบว่า มีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่ามีการกระจายแบบปกติ และข้อมูลนี้มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน



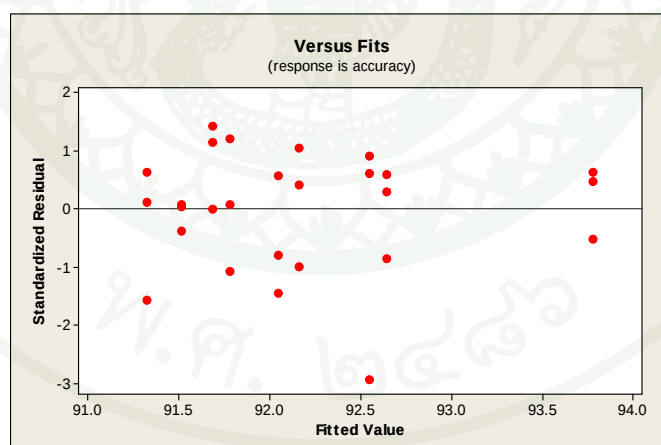
ภาพที่ 58 การแจกแจงความน่าจะเป็นเพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อมีข้อมูลส่งออกคือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า

2.3.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการทดสอบถึงความสัมพันธ์ของค่าความแม่นยำ พบว่าความแปรปรวนของความผิดพลาดไม่ได้เปลี่ยนไปตามเวลาการทดลอง สามารถนำข้อมูลไปใช้วิเคราะห์ได้ ดังแสดงในภาพที่ 59



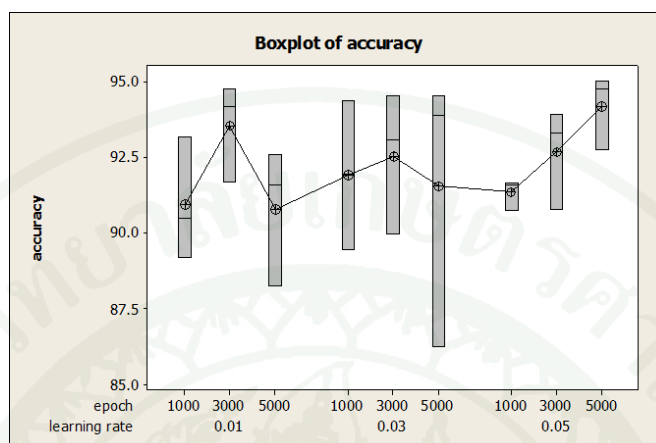
ภาพที่ 59 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อมีข้อมูลส่งออกคือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า

2.3.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน พบว่าเป็นการกระจายทั่วไป ไม่มีรูปร่างหรือโครงสร้างใดๆ เกิดขึ้น ข้อมูลสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ได้ ดังแสดงในภาพที่ 60



ภาพที่ 60 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อมีข้อมูลส่งออกคือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า

2.3.4 การวิเคราะห์โดยแผนภาพแบบกล่อง การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองเพื่อกำหนดอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม ดังแสดงในภาพที่ 61



ภาพที่ 61 แผนภาพกล่องเพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อมีข้อมูลส่งออกคือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันจิตที่แต่ละทางเข้า

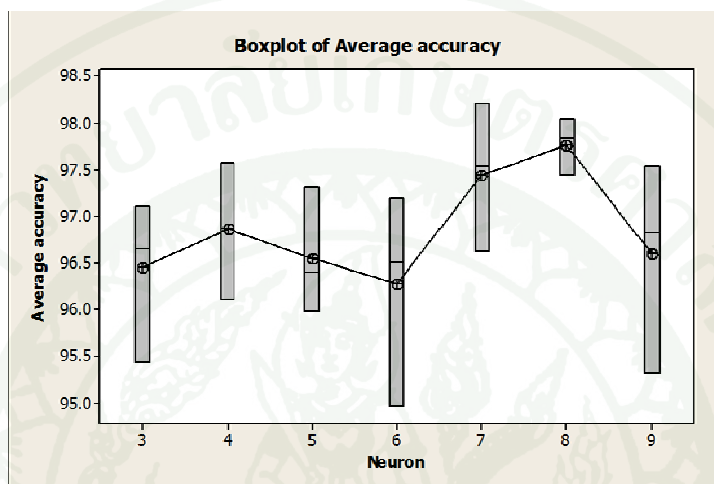
การวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังแสดงในตารางที่ 13 เพื่อหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการสอนที่เหมาะสม พบว่า P-value มีค่าที่มากกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรทั้งสองตัวให้ผลของประสิทธิภาพในการทำนายไม่แตกต่างกัน สามารถนำค่าใดค่าหนึ่งมาใช้งานวิจัยได้ จึงพิจารณาถึงค่าความแม่นยำและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่าจำนวนรอบการสอนที่ 5,000 รอบ และอัตราการเรียนรู้ที่ 0.05 ให้ค่าที่เหมาะสมในการทำนายของแรงดันจิตที่แต่ละทางเข้า

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อมีข้อมูลส่งออกคือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันจิตที่แต่ละทางเข้า

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Epochs	1	2.655	2.213	2.213	0.44	0.516
Learning rate	1	4.152	1.671	1.671	0.33	0.572
Epochs*Learning rate	1	6.661	6.661	6.661	1.31	0.264
Error	18	98.149	98.149	5.453		
Total	26	130.352				

2.4 ผลการออกแบบเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมในแต่ละจำนวนชั้นซ่อน

2.4.1 จำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 1 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าแรงดันจิตสูงสุดเป็นข้อมูลส่งออก ดังแสดงในภาพที่ 62



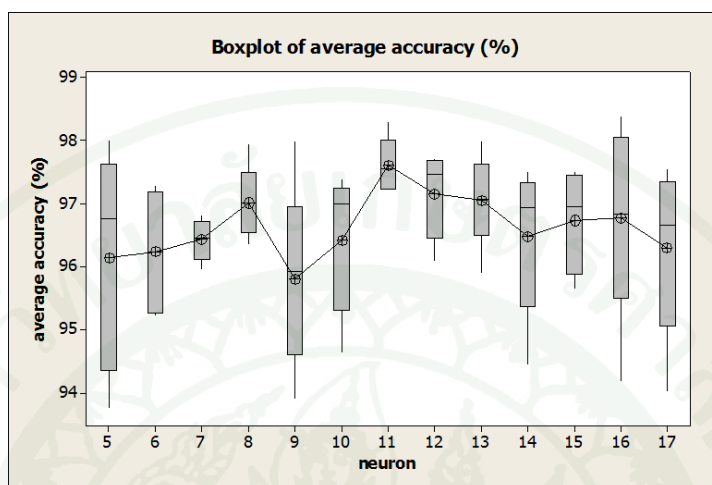
ภาพที่ 62 แผนภาพกล่องเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 1 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าแรงดันจิตสูงสุดเป็นข้อมูลส่งออก

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการแปรปรวน ดังแสดงในตารางที่ 14 เพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสม ซึ่งพบว่า P-value มีค่าที่น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าในแต่ละจำนวนนิวรอนให้ค่าความแม่นยำที่แตกต่างกัน จึงพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งพบว่า จำนวนนิวรอน 8 นิวรอน ให้ค่าที่เหมาะสมมากที่สุด

ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์การแปรปรวนเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 1 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าแรงดันจิตสูงสุดเป็นข้อมูลส่งออก

Source	DF	SS	MS	F	P
Neuron	6	11.042	1.840	3.06	0.016
Error	35	21.035	0.601		
Total	41	32.077			

2.4.2 จำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 2 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าแรงดันฉัดสูงสุดเป็นข้อมูลส่งออก ดังแสดงในภาพที่ 63



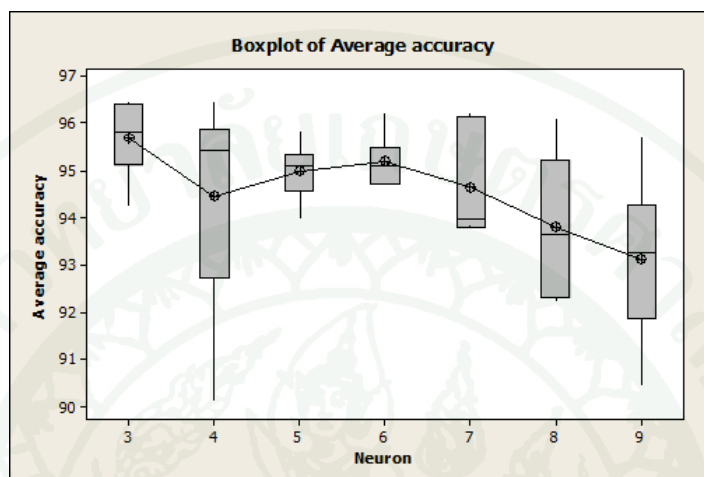
ภาพที่ 63 แผนภาพกล่องเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 2 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าแรงดันฉัดสูงสุดเป็นข้อมูลส่งออก

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการแปรปรวน ดังแสดงในตารางที่ 15 เพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสม ซึ่งพบว่า P-value มีค่าที่มากกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรทั้ง 13 ตัวให้ผลของประสิทธิภาพในการทำนายไม่แตกต่างกัน สามารถนำค่าใดค่าหนึ่งมาใช้ในการงานวิจัยได้ จึงพิจารณาถึงค่าความแม่นยำ พบว่าที่จำนวน 11 นิวรอน มีความเหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 2 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าแรงดันฉัดสูงสุดเป็นข้อมูลส่งออก

Source	DF	SS	MS	F	P
Neuron	12	14.52	1.21	0.99	0.471
Error	52	63.54	1.22		
Total	64	78.06			

2.4.3 การหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 1 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าเป็นข้อมูลส่งออก ดังแสดงในภาพที่ 64



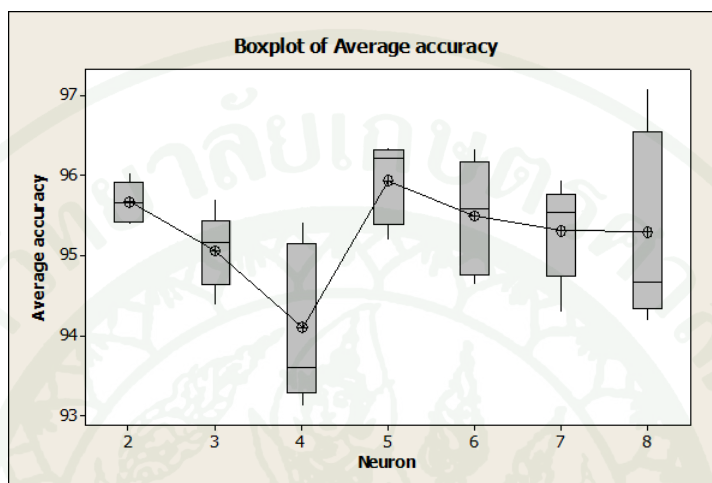
ภาพที่ 64 แผนภาพกล่องเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสม สำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 1 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าเป็นข้อมูลส่งออก

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการแปรปรวน ดังแสดงในตารางที่ 16 เพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสม ซึ่งพบว่า P-value มีค่าที่มากกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปร 7 ตัวให้ผลของประสิทธิภาพในการทำนายไม่แตกต่างกัน สามารถนำค่าใดค่าหนึ่งมาใช้ในการวิจัยได้ จึงพิจารณาถึงค่าความแม่นยำ พบว่าที่จำนวน 3 นิวรอน ให้ค่าความแม่นยำมากที่สุด

ตารางที่ 16 ผลการวิเคราะห์การแปรปรวนเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 1 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าเป็นข้อมูลส่งออก

Source	DF	SS	MS	F	P
Neuron	6	26.93	4.49	2.33	0.054
Error	35	67.54	1.93		
Total	41	94.47			

2.4.4 การหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 2 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉัดที่แต่ละทางเข้าเป็นข้อมูลส่งออก ดังแสดงในภาพที่ 65



ภาพที่ 65 แผนภาพกล่องเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 2 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉัดที่แต่ละทางเข้าเป็นข้อมูลส่งออก

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการแปรปรวน ดังแสดงในตารางที่ 17 เพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสม ซึ่งพบว่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรทั้ง 7 ตัวให้ผลของประสิทธิภาพในการทำนายแตกต่างกัน และพบว่าที่จำนวน 5 นิวรอน มีความเหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 2 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉัดที่แต่ละทางเข้าเป็นข้อมูลส่งออก

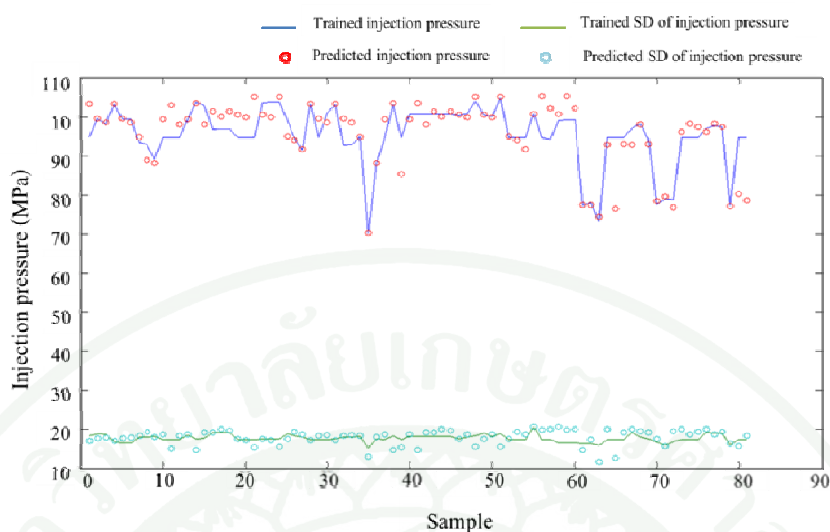
Source	DF	SS	MS	F	P
Neuron	6	10.272	1.712	3.03	0.021
Error	28	15.828	0.565		
Total	34	26.101			

2.5 ผลการออกแบบสถาปัตยกรรมที่เหมาะสมของเครือข่ายประสาทเทียม

สถาปัตยกรรมเครือข่ายที่เหมาะสม เมื่อมีค่าแรงดันฉีด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังแสดงในตารางที่ 18 โดยได้ผลจากการทำนายค่าแรงดันฉีดสูงสุดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละตำแหน่งทางเข้า ดังแสดงในภาพที่ 66

ตารางที่ 18 สถาปัตยกรรมเครือข่ายที่เหมาะสม สำหรับกรณีศึกษา: หน้าจอของคอมพิวเตอร์แบบพกพา

เครือข่ายประสาทเทียม	ค่าที่เหมาะสม	
	แรงดันฉีดสูงสุด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า
จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนแรก	8	3
จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2	11	5
อัตราการเรียนรู้	0.03	0.05
จำนวนรอบการฝึกสอน	1,000	5,000
ฟังก์ชันส่งผ่านที่ชั้นซ่อนแรก	Logsig	Logsig
ฟังก์ชันส่งผ่านที่ชั้นซ่อนที่ 2	Purelin	Purelin
สถาปัตยกรรมเครือข่าย	4-8-11-1	4-3-5-1



ภาพที่ 66 ผลการทำนายค่าแรงดันฉีดสูงสุดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า

2.6 ผลการออกแบบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

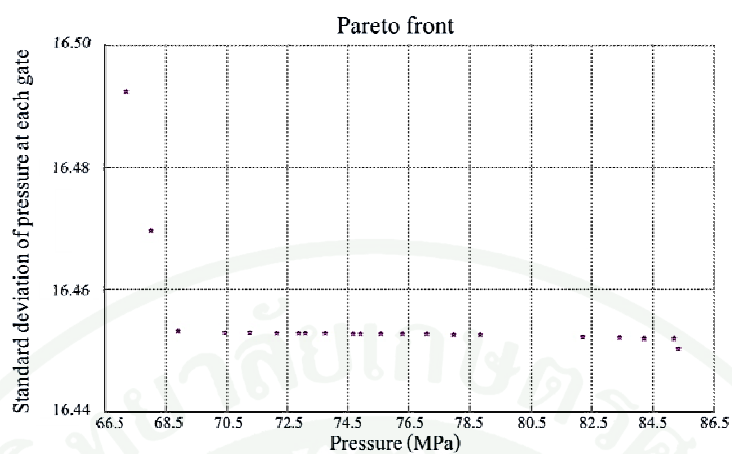
แบบจำลองของเครือข่ายประสาทเทียมที่ได้ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมโดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม อย่างไรก็ตาม เมื่อนำฟังก์ชันที่ได้ไปหาคำตอบโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม พบว่า ได้คำตอบของฟังก์ชันที่มีค่าวัตถุประสงค์ต่ำที่สุดตามที่ต้องการ แต่คำตอบนั้นส่งผลให้เกิดตำแหน่งช่องระบายอากาศที่ไม่เหมาะสม การใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์เพื่อให้พิจารณาเลือกคำตอบที่เกิดตำแหน่งช่องระบายอากาศที่เหมาะสมจากชุดคำตอบพारेโตจึงมีความเหมาะสมมากกว่า จากการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์ ดังแสดงในตารางที่ 19 ส่งผลให้ได้ชุดคำตอบพारेโต ดังแสดงในภาพที่ 67 จากนั้นจึงเลือกคำตอบที่เหมาะสมออกมาหนึ่ง โดยการพิจารณาถึงค่ากลาง (Compromised solution) ของค่าวัตถุประสงค์ที่ได้ และตำแหน่งของช่องระบายอากาศที่เหมาะสม การกำหนดตำแหน่งช่องระบายอากาศเพื่อระบายอากาศที่ถูกดักบริเวณรอยประสานนั้นส่งผลให้ความแข็งแรงของบริเวณที่เกิดรอยประสานสูงขึ้น ซึ่งตำแหน่งของช่องระบายอากาศที่เหมาะสมมีข้อพิจารณา คือ เป็นตำแหน่งที่ไม่อยู่ใกล้บริเวณอินเลอร์ หรืออยู่บนชิ้นงาน เนื่องจากในการทำช่องระบายอากาศต้องเจาะผิวแม่พิมพ์ด้านบน ซึ่งทำได้ยาก ดังนั้นการกำหนดตำแหน่งช่องระบายอากาศที่เหมาะสมโดยการพิจารณาถึงตำแหน่งรอยประสานและจุดดักอากาศที่มีการกระจายออกถึงขอบของชิ้นงานจึงมีความเหมาะสมมากกว่า จากสาเหตุดังกล่าวจึงพิจารณาเลือกตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสมที่มีค่าแรงดันฉีดสูงสุดเท่ากับ 68.72 MPa ซึ่งลดลงจากค่า

แรงดันนิจจากตำแหน่งทางเข้าก่อนหาค่าที่เหมาะสมซึ่งมีค่าแรงดันนิจสูงสุดอยู่ที่ 103.3 MPa ดังแสดงในภาพที่ 68(ก) และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันนิจที่แต่ละทางเข้า 16.45 MPa ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง $[L_1, L_2, L_3, L_4] = [187.32, 36.31, 180.49, 89.76]$ เมื่อนำไปตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ได้ค่าแรงดันนิจสูงสุดอยู่ที่ 68.51 MPa ดังแสดงในภาพที่ 68(ข) และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันนิจที่แต่ละทางเข้า 15.6 MPa โดยมีตำแหน่งของช่องระบายอากาศก่อนหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสม ดังแสดงในภาพที่ 69(ก) และภายหลังการหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมซึ่งสามารถจัดทำช่องระบายอากาศได้ที่ขอบของชิ้นงานและระบายอากาศออกทางเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 69(ข)

เมื่อพิจารณาความแม่นยำจากการใช้เครือข่ายประสาทเทียมร่วมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเทียบกับผลวิเคราะห์จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม โดยเปรียบเทียบค่าแรงดันนิจสูงสุดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันนิจที่แต่ละทางเข้าที่ได้จากตำแหน่งทางเข้าที่ได้จากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและจากตำแหน่งทางเข้าเดียวกันโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม พบว่ามีค่าความแม่นยำของค่าแรงดันนิจสูงสุดอยู่ที่ 99.69% และความแม่นยำของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันนิจที่แต่ละทางเข้าอยู่ที่ 94.55% วิธีการที่ได้แนะนำเสนอนี้จึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปหาค่าตำแหน่งของทางเข้าและช่องระบายอากาศที่เหมาะสม

ตารางที่ 19 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมกรณีศึกษา: กรอบหน้าจอของคอมพิวเตอร์แบบพกพา

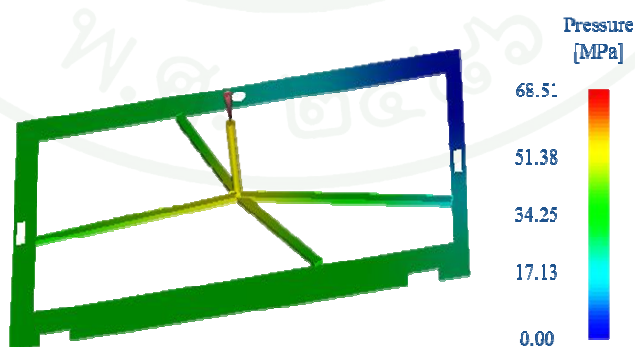
Optimal GA parameters	
Population	10
Crossover rate (P_c)	0.5
Mutation rate	0.1
Generation	250
The best solution	68.72
	16.45



ภาพที่ 67 ชุดคำตอบพารेटอระหว่างค่าแรงดันฉีดสูงสุดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า

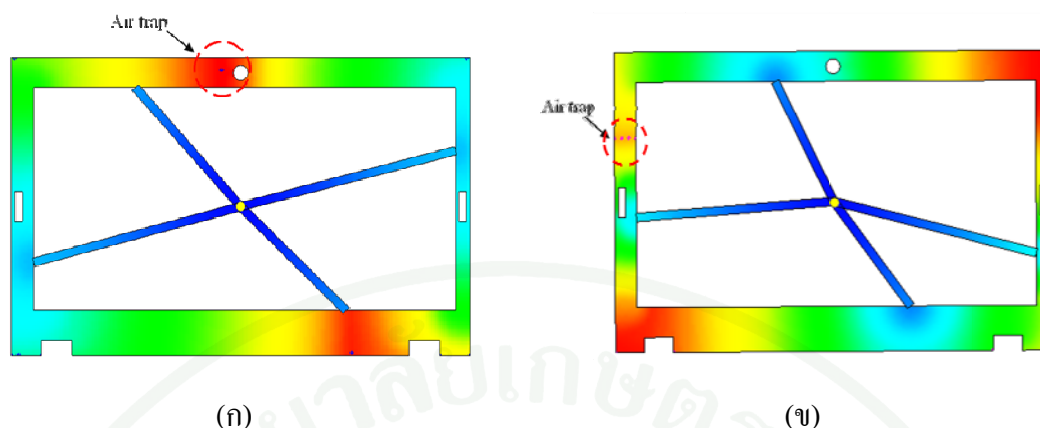


(ก)



(ข)

ภาพที่ 68 ค่าแรงดันฉีดสูงสุด (ก) ก่อนหาค่าที่เหมาะสม (ข) ภายหลังหาค่าที่เหมาะสม

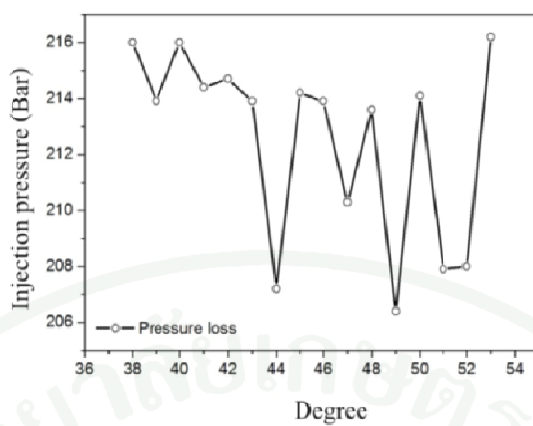


ภาพที่ 69 ตำแหน่งของช่องระบายอากาศ (ก) ตำแหน่งช่องระบายอากาศอยู่ใกล้อินเลิร์ต (ข)
ตำแหน่งช่องระบายอากาศที่เหมาะสม

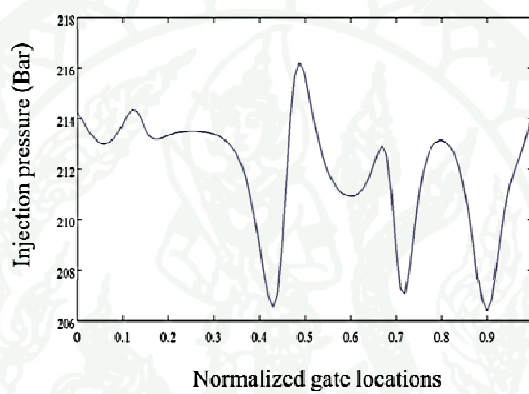
3. ผลการพัฒนาขั้นตอนวิธีกำหนดจำนวนและทางเข้าที่เหมาะสมที่สุด กรณีศึกษา: ชี้นำงานที่มีอินเลิร์ตภายในชี้นำงาน

3.1 ผลการทำนายค่าแรงดันชนิดสูงสุด และตำแหน่งของรอยประสานของแบบจำลองเครื่องช่วยประสาทเทียม กรณีหนึ่งทางเข้า

ภายหลังการดำเนินแนวทางตามกรณีศึกษาแรกในการออกแบบสถาปัตยกรรมของแบบจำลองเครื่องช่วยประสาทเทียมที่เหมาะสม พบว่า สถาปัตยกรรมที่เหมาะสมสำหรับกรณีหนึ่งทางเข้า คือ 1-10-1 สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของค่าแรงดันชนิดสูงสุด และ 1-8-1 สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของค่าตำแหน่งของรอยประสาน ที่จำนวนรอบการฝึกสอน 1,000 และอัตราการเรียนรู้ 0.01 โดยมีค่าความผิดพลาด 1.384×10^{-13} สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของค่าแรงดันชนิดสูงสุด และค่าความผิดพลาด 1.404×10^{-13} สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตำแหน่งของรอยประสาน นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างค่าวัตถุประสงค์ทำนายได้กับข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน ดังแสดงในภาพที่ 70-71

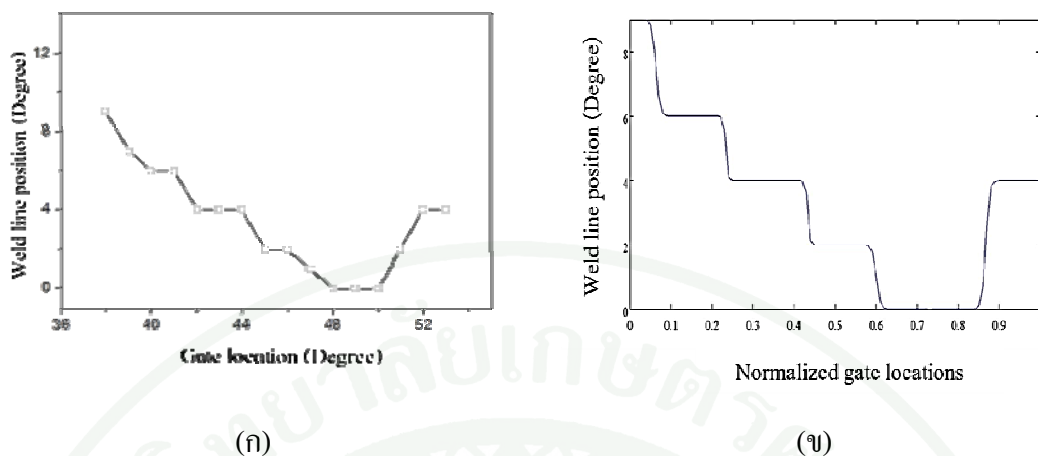


(ก)



(ข)

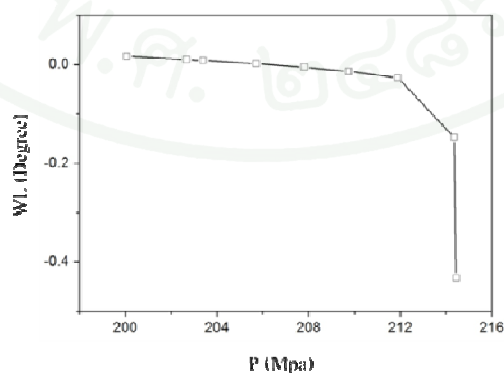
ภาพที่ 70 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันฉีดสูงสุดและตำแหน่งของทางเข้า (ก) ข้อมูลที่นำมาใช้
ฝึกสอน (ข) ค่าที่ทำนายได้โดยแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม



ภาพที่ 71 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของรอยประสานและตำแหน่งของทางเข้า (ก) ข้อมูลที่นำมาใช้ฝึกสอน (ข) ค่าที่ทำนายได้โดยแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

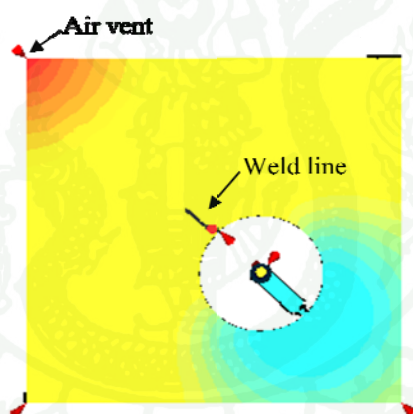
3.2 ผลการกำหนดตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสม ที่ได้จากการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์ กรณีหนึ่งทางเข้า

พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในกรณีนี้ คือ จำนวนประชากรเท่ากับ 10 อัตราการสลับสายพันธุ์ 0.75 และ อัตราการกลายพันธุ์ 0.01 ชุดคำตอบพาเรโตระหว่างตำแหน่งของรอยประสานและค่าแรงดันฉีดสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 72 โดยได้ตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสมอยู่ที่ 48.64 องศา ซึ่งได้ค่าแรงดันฉีดสูงสุด 200.04 Bar และได้ตำแหน่งของรอยประสานอยู่ที่ 0.0168 องศา



ภาพที่ 72 ชุดคำตอบพาเรโตของความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของรอยประสานและค่าแรงดันฉีดสูงสุด

เมื่อนำตำแหน่งของทางเข้าที่ได้ไปวิเคราะห์การไหลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์การไหล ดังแสดงในภาพที่ 73 พบว่า ได้ค่าแรงดันชนิดสูงสุด 202.5 Bar และตำแหน่งของรอยประสาน 0 องศา โดยเมื่อพิจารณาถึงค่าความแม่นยำระหว่างค่าที่ได้จากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม และโปรแกรมวิเคราะห์การไหล พบว่า ได้ค่าความแม่นยำในการทำนายค่าแรงดันชนิดสูงสุด 98.78% และค่าความแม่นยำของตำแหน่งของรอยประสาน 100% นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาดำเนินการของช่องระบายอากาศที่แนะนำโดยโปรแกรมวิเคราะห์การไหล พบว่า มีการแนะนำที่บริเวณสุดท้ายที่ติดไปถึงของชิ้นงาน บริเวณรูฉีด และที่บริเวณรอยประสาน ซึ่งสอดคล้องตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปมีการออกแบบช่องระบายอากาศที่บริเวณเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์อยู่แล้ว ในขณะที่การออกแบบช่องระบายอากาศที่ตำแหน่งรอยประสานมักถูกออกแบบภายหลังเกิดปัญหาข้อบกพร่องของชิ้นงาน ดังนั้นแนวทางการกำหนดตำแหน่งช่องระบายอากาศที่บริเวณรอยประสานจึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์



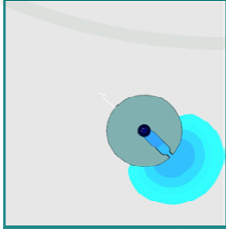
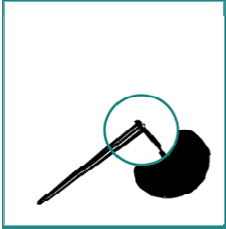
ภาพที่ 73 ตำแหน่งของรอยประสานและช่องระบายอากาศจากโปรแกรมวิเคราะห์การไหล เมื่อกำหนดตำแหน่งของทางเข้าที่ได้จากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

3.3 ผลการวิเคราะห์การไหลจากการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริง โดยใช้ตำแหน่งของทางเข้าที่ได้จากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์ กรณีหนึ่งทางเข้า

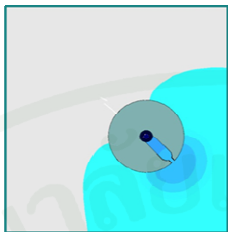
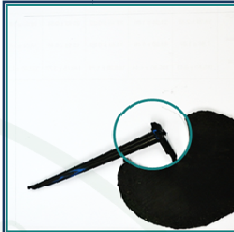
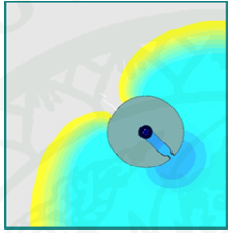
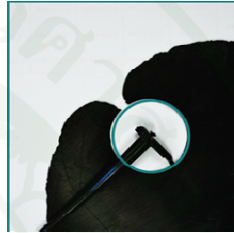
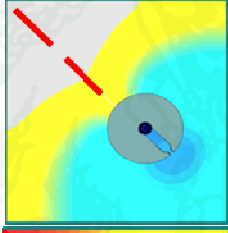
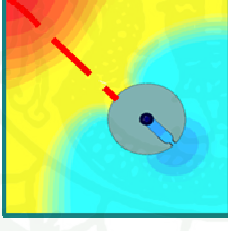
นอกเหนือจากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบระหว่างผลวิเคราะห์การไหลที่ได้จากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมแล้ว งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและเปรียบเทียบผลจากการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริง เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของผลที่ได้จาก

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม โดยออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ฉีดที่มีตำแหน่งของทางเข้าตามตำแหน่งที่ได้จากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์สำหรับชิ้นงานในกรณีศึกษาของชิ้นงานที่มีอินเล็ทภายในชิ้นงานและมีทางเข้าหนึ่งทางเข้า ดังแสดงในตารางที่ 20 โดยพบว่ามีความแตกต่างของลักษณะการไหล โดยเมื่อพิจารณาการไหลในช่วงที่ 20-40% พบว่า ความเร็วในการไหลของยางที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์การไหลมีค่าที่ต่ำกว่ากระบวนการฉีดจริง เนื่องจากในโปรแกรมวิเคราะห์การไหลกำหนดให้ของไหลไม่สามารถยุบตัวได้เมื่อได้รับแรงดัน ในขณะที่การไหลของยางในกระบวนการฉีดจริง เกิดการยุบตัวเมื่อได้รับแรงดัน อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาตรการฉีดเพิ่มขึ้นเป็น 60-100% พบว่า การไหลของยางในกระบวนการฉีดจริงมีการไหลที่เร็วกว่า ทั้งนี้เนื่องจาก โปรแกรมวิเคราะห์การไหลมีการกำหนดสมมติฐานให้อัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่ตลอดระยะทางการไหล รวมถึงกำหนดให้ไม่เกิดเลื่อนตัวที่ผนัง ในขณะที่กระบวนการฉีดจริงมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการถ่ายเทความร้อน และเกิดความร้อนเนื่องจากแรงเสียดเมื่อไหลผ่านช่องทางการไหล ทำให้ความหนืดมีค่าลดลง และยังพบการเลื่อนตัวที่ผนัง ซึ่งทำให้รูปร่างการไหลเปลี่ยนไป และมีความเร็วในการไหลที่สูงขึ้น จากสาเหตุดังกล่าว จึงทำให้ผลที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมยังคงมีความแตกต่างจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปจริง อย่างไรก็ตามตำแหน่งของรอยประสานที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์การไหลมีความสอดคล้องกับตำแหน่งรอยประสานที่เกิดขึ้นในการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริง ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมในการนำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมาประยุกต์ใช้ในการกำหนดตำแหน่งของทางเข้าและช่องระบายอากาศที่เหมาะสม

ตารางที่ 20 การวิเคราะห์รูปร่างการไหลภายในแม่พิมพ์ฉีดจากโปรแกรมวิเคราะห์การไหล และจากการฉีดขึ้นรูปยาง ที่ปริมาตรการฉีดแตกต่างกัน

Volume	Simulation	Experiment
20%		

ตารางที่ 20 (ต่อ)

Volume	Simulation	Experiment
40%		
60%		
80%		
100%		

3.3 ผลการทำนายค่าแรงดันฉีดสูงสุด และตำแหน่งของรอยประสานของแบบจำลอง
เครื่องขยายประสาทเทียม กรณีสองทางเข้า

3.3.1 ผลการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีแบ่งครึ่งช่วงในการกำหนดตำแหน่งรอยประสาน

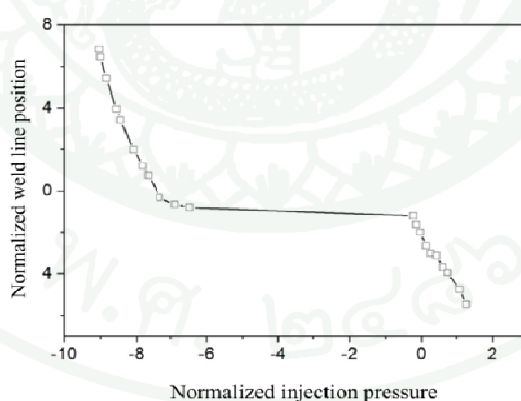
ในกรณีที่ค่าแรงดันฉีดสูงสุดมีค่าสูงเกินกว่าที่กำหนด จึงเพิ่มจำนวนของ
ทางเข้าตามแนวทางที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดงในภาพที่ 51 อย่างไรก็ตาม การเพิ่มตำแหน่งของ
ทางเข้า ส่งผลให้เกิดตำแหน่งรอยประสานเพิ่มมากขึ้น และยากในการกำหนดตำแหน่งของรอย
ประสานให้ได้ตามเงื่อนไขที่ต้องการ จากการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีแบ่งครึ่งช่วง พบว่า สามารถหา
ตำแหน่งของรอยประสานที่ได้เงื่อนไขตามต้องการ

3.3.2 ผลการออกแบบสถาปัตยกรรมที่เหมาะสมของเครือข่ายประสาทเทียม

สถาปัตยกรรมที่เหมาะสม สำหรับกรณีสองทางเข้า คือ 2-10-1 สำหรับ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของค่าแรงดันฉีดสูงสุด และตำแหน่งรอยประสาน ที่จำนวนรอบการฝึกสอน 1,000 และอัตราการเรียนรู้ 0.01 โดยมีค่าความผิดพลาด 2.37×10^{-13} สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของค่าแรงดันฉีดสูงสุด และ 4.06×10^{-4} สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตำแหน่งรอยประสาน

3.4 ผลการกำหนดตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสมที่ได้จากการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์ กรณีสองทางเข้า

เมื่อพิจารณาเลือกค่าจากชุดของคำตอบพารेटอที่มีค่าวัตถุประสงค์อยู่ใกล้ศูนย์มากที่สุด พบว่า พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในกรณีนี้ คือ จำนวนประชากรเท่ากับ 10 อัตราการสลับสายพันธุ์ 0.75 และ อัตราการกลายพันธุ์ 0.01 โดยชุดคำตอบพารेटอระหว่างตำแหน่งของรอยประสานและค่าแรงดันฉีดสูงสุด กรณีสองทางเข้า ดังแสดงในภาพที่ 74 และได้ตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสมอยู่ที่ 42.48 และ 44.20 องศา ซึ่งได้ค่าแรงดันฉีดสูงสุด 128.9 Bar และตำแหน่งของรอยประสานอยู่ที่ 0.5 และ 1 องศา จากตำแหน่งที่กำหนดทั้งสองตำแหน่ง



ภาพที่ 74 คำตอบพารेटอของความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของรอยประสานและค่าแรงดันฉีดสูงสุด กรณีสองทางเข้า

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาแนวทางการกำหนดจำนวนและตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสมภายในแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง โดยสร้างฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของทางเข้าและค่าวัตถุประสงค์ ซึ่งได้แก่ ค่าแรงดันฉีด และตำแหน่งรอยประสาน โดยใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม และหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์ ผลที่ได้จากงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์เพื่อให้สามารถฉีดได้ทั้งเทอร์โมพลาสติกและยางพบว่า ข้อควรพิจารณาที่สำคัญ ได้แก่ วิธีการยึดแม่พิมพ์กับหน้าแปลนเครื่องฉีด ขนาดของไทด์บาร์ ขนาดของหัวฉีด ปริมาตรการฉีด และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ลักษณะและจำนวนของชิ้นงานซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเลือกขนาดของแม่พิมพ์และเครื่องฉีด ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบแม่พิมพ์ที่สามารถประกอบชุดเสริมแผ่นยึดแม่พิมพ์บน-ล่าง เพื่อให้สามารถประกอบเข้ากับหน้าแปลนของเครื่องฉีดยางซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าเครื่องฉีดเทอร์โมพลาสติกได้ รวมถึงแม่พิมพ์ที่ได้ออกแบบยังสามารถปรับเปลี่ยนเข้าอินเล็ต ในกรณีที่ต้องการระบบนำปดออก เพื่อให้สามารถนำไปใช้กับเครื่องฉีดยางได้ นอกจากนี้แม่พิมพ์ที่ได้ออกแบบยังสามารถปรับเปลี่ยนแวนบั้งกับศูนย์เพื่อให้เข้ากับขนาดของหัวฉีดของเครื่องฉีดทั้งสองแบบได้

2. จากผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง 2D 2.5D 3D และการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริงพบว่า แบบจำลอง 2.5D มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นแบบจำลองวิเคราะห์การไหลสำหรับชิ้นงานผนังบาง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบที่ได้พบว่ามีความสอดคล้องกับผลจากการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริงมากที่สุด อย่างไรก็ตามยังคงพบความแตกต่างระหว่างผลที่ได้ที่ปริมาตรการฉีดสูงๆ ซึ่งชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปจริงมีระยะทางการไหลที่มากกว่าผลจากโปรแกรมวิเคราะห์การไหล ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากความแตกต่างของพฤติกรรมที่ตั้งเป็นข้อสมมติฐานในโปรแกรมวิเคราะห์การไหลกับความเป็นจริงในทางปฏิบัติ ยกตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์ที่อยู่บริเวณผนังของช่องทางการไหลไม่มีความเร็ว รูปแบบการไหลคงที่ตลอดระยะทางการไหล และของไหลมีอุณหภูมิคงที่ตลอดระยะเวลาการไหล เป็นต้น

3. การเพิ่มตำแหน่งของทางเข้า ส่งผลให้เกิดตำแหน่งรอยประสานเพิ่มมากขึ้น ซึ่งยากต่อการกำหนดหาตำแหน่งของรอยประสานให้ได้ตามเงื่อนไข ซึ่งก็คือ ตำแหน่งของรอยประสานที่สามารถแบ่งพื้นที่ได้เท่าๆ กัน โดยเส้นแบ่งมีความยาวมากที่สุด และมีขนาดใกล้เคียงกันมากที่สุดทางผู้วิจัยได้นำระเบียบวิธีการแบ่งครึ่งช่วง (Bi-section method) ซึ่งเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่นำกระบวนการทำซ้ำ (Iterations) มาประยุกต์ใช้เพื่อหาคำตอบ จากผลการใช้งาน พบว่าระเบียบวิธีที่พัฒนามีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้ค้นหาตำแหน่งรอยประสานให้ได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด

4. จากการศึกษาและประยุกต์ใช้เครือข่ายประสาทเทียมโดยใช้เครือข่ายการเรียนรู้แบบลาเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ต (Levenberg-Marquardt) ในการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของทางเข้า และค่าวัตถุประสงค์ ซึ่งได้แก่ ค่าแรงดันฉีดสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าสำหรับกรณีศึกษาแรก และใช้วิธีการทางสถิติในการกำหนดสถาปัตยกรรมเครือข่ายที่เหมาะสม พบว่า สถาปัตยกรรมที่เหมาะสม คือ 4-8-11-1 สำหรับฟังก์ชันที่มีค่าแรงดันฉีดเป็นค่าวัตถุประสงค์ และ 4-3-5-1 สำหรับฟังก์ชันที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าเป็นค่าวัตถุประสงค์ สำหรับกรณีศึกษาชิ้นงานที่มีอินเลอร์ทภายในชิ้นงานที่มีหนึ่งทางเข้า ได้สถาปัตยกรรมที่เหมาะสม คือ 1-10-1 สำหรับฟังก์ชันที่มีค่าแรงดันฉีดเป็นค่าวัตถุประสงค์ และ 1-8-1 สำหรับฟังก์ชันที่มีค่าตำแหน่งรอยประสานเป็นค่าวัตถุประสงค์ และสำหรับกรณีศึกษาชิ้นงานที่มีอินเลอร์ทภายในชิ้นงานที่มีทางเข้าสองทางเข้า พบว่า ได้สถาปัตยกรรมที่เหมาะสม คือ 2-10-1 ทั้งฟังก์ชันที่มีค่าแรงดันฉีดเป็นค่าวัตถุประสงค์ และฟังก์ชันที่มีค่าตำแหน่งรอยประสานเป็นค่าวัตถุประสงค์

5. จากผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าวัตถุประสงค์ที่ได้จากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์และโปรแกรมวิเคราะห์การไหลเมื่อกำหนดตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสม พบว่าสามารถกำหนดตำแหน่งของรอยประสานให้อยู่บนบริเวณที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ และมีค่าแรงดันฉีดที่เหมาะสม ดังนั้น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์จึงมีความเหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้กำหนดจำนวนและตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดตำแหน่งช่องระบายอากาศที่บริเวณรอยประสานในการออกแบบแม่พิมพ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบรูปแบบการไหลภายในแม่พิมพ์เมื่อใช้ตำแหน่งของทางเข้าตามที่ได้จากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์ กรณีศึกษาชิ้นงานที่มีอิน

เสิร์ทภายในชิ้นงาน ที่มีหนึ่งทางเข้า โดยเปรียบเทียบระหว่างผลจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมและการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริง พบว่า ผลที่ได้ยังคงมีความแตกต่างกัน ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากสมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์แตกต่างจากการไหลที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งได้แก่ การกำหนดให้อุณหภูมิยางหรือพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะทางในการไหล การกำหนดให้การไหลภายในแม่พิมพ์ไม่เกิดการเลื่อนตัว และกำหนดให้ค่าการนำความร้อนและการสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเป็นค่าคงที่ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาดำเนนงรอยประสานหรือแนวบรรจบของการไหลผ่านอินเสิร์ทที่ได้ พบว่ามีความสอดคล้องกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าแนวทางที่ได้ออกแบบมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ค้นหาจำนวนและตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสม

ข้อเสนอแนะ

แนวทางในการกำหนดจำนวนและตำแหน่งของทางเข้าที่ได้ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้มีจำนวนทางเข้าไม่เกิน 2 ทางเข้า เนื่องจากจำนวนวัตถุประสงค์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ใช้เวลานานขึ้นในการประมวลผล จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของพัฒนาขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์ ในกรณีที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากกว่า 2 ฟังก์ชันขึ้นไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กิตติพงศ์ บุญโล่ง. 2554. เจเนติกอัลกอริทึมสำหรับการหาค่าเหมาะที่สุดวัตถุประสงค์หลายอย่าง. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 16(1): 107-114.

ชาติ ตระการกุล. 2546. การออกแบบแม่พิมพ์ฉีด 1. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

ปรมินทร์ มณีโรจน์. 2544. การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมพันธุกรรมกับนิเวศเน็ตเวิร์กแบบย้อนกลับ เพื่อการเรียนรู้ค่าตัวแปรและสถาปัตยกรรมของเน็ตเวิร์ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. การออกแบบและการวิเคราะห์ การทดลอง, สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.

พงษ์ธร แซ่อูย. 2550. สารเคมียาง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), ปทุมธานี.

พิชญ์กร ชวนาทนุสรณ์ และ จักรพันธุ์ อร่ามพงษ์พันธุ์. 2552. การประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรม, แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม และ เจเนติกอัลกอริทึม เพื่อลดการโค้งงอของชิ้นงานฉีดขึ้นรูปพลาสติก, น. 369-376. ใน รายงานการประชุมทางวิชาการของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47 (สาขาสถาปัตยกรรมและวิศวกรรมศาสตร์). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วัชรพงษ์ ชูแก้ว. 2549. การใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมในการทำนายการหดตัว ของผลิตภัณฑ์ยางในกระบวนการอัดขึ้นรูป. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วราภรณ์ ขจรไชยกุล. 2552. ผลิตภัณฑ์ยาง: กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), กรุงเทพฯ.

อาทิตย์ ศรีแก้ว. 2552. **ปัญญาเชิงคำนวณ**. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

Abu-Zahra, N. H. 2003. Neural network approach to density control of rigid PVC foam in extrusion process. **International Polymer Processing** 18(2): 122-126.

Bagley, E.B. 1957. End corrections in the capillary flow of polyethylene. **Journal of Applied Physics** 28(5): 624-627.

Beaumont, J.P. 2004. **Runner and Gating Design Handbook: Tools for Successful Injection Molding**. Hanser Publishers, Munich, Germany.

Chatterjee, S., C. Carrera and L. Lynch. 1996. Genetic algorithms and traveling salesman problems. **European Journal of Operational Research** 93: 490-510.

Ciesielski, A. 1999. **An Introduction to Rubber Technology**. Rapra Technology, Shawbury.

Coley, D.A. 1999. **An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers**. World Scientific Publishing, Singapore.

Demuth, H., M. Beale and M. Hagan. 2008. **Neural Network Toolbox™ 6 Use's Guide**. Mathwork Inc., Natick, MA.

Funt, J.F. 2009. **Mixing of Rubber**. Rapra Technology, Shawbury.

Gupta, M.M., L. Jin and N. Homma. 2003. **Static and Dynamic Neural Networks: From Fundamentals to Advanced Theory**. John Wiley and Sons, New Jersey.

Harper, C.A. 2006. **Handbook of Plastic Processes**. John Wiley and Sons, New Jersey.

- Isayev, A.I. 1991. **Modeling of Polymer Processing**. Hanser Publisher, Munich.
- Jones, P. 2008. **The Mould Design Guide**. Rapra Technology, Shawbury.
- Kazmer, D.O. 2007. **Injection Mold Design Engineering**. Hanser Publishers, Munich, Germany.
- Kenig, S., A. Ben-David, M. Omer and A. Sadeh. 2001. Control of properties in injection molding by neural networks. **Engineering Applications of Artificial Intelligence** 14: 819-823.
- Kurtaran H., B. Ozcelik and T. Erzurumlu. 2005. Warpage optimization of a bus ceiling lamp base using neural network model and genetic algorithm. **Journal of Materials Processing Technology** 169: 314-319.
- Lee, J. and J. Kim. 2007. Micro genetic algorithm based optimal gate positioning in injection molding design. **Journal of Mechanical Science and Technology** 21: 789-798.
- Li, J.-Q., D.-Q. Li, Z.-Y. Guo and H.-Y. LV. 2007. Single gate optimization for plastic injection mold. **Journal of Zhejiang University SCIENCE A** 8(7): 1077-1083.
- Mathur, R., B.F. Fink and S.G. Advani. 1999. Use of genetic algorithms to optimize gate and vent locations for the resin transfer molding process. **Polymer Composites** 20(2): 167-178.
- Mathur, R., S.G. Advani and B.F. Fink. 1998. Optimize of gate and vent locations for resin infusion processes using genetic algorithms. **In Proceedings of the American Control Conference**. 24-26 June 1998, Philadelphia, Pennsylvania, USA.

Osswald, T.A., L.S. Turng and J. Gramann. 2008. **Injection Molding Handbook**. Hanser Publisher, Munich.

Ozcelik, B. and T. Erzurumlu. 2006. Comparison of the warpage optimization in the plastic injection molding using ANOVA, neural network model and genetic algorithm. **Journal of Materials Processing Technology** 171: 437-445.

Rauwendall, C. 1986. **Polymer Extrusion**. Hanser Publisher, Munich.

Sadeghi, B.H.M. 2000. A BP-neural network predictor model for plastic injection molding process. **Journal of Materials Processing Technology** 103: 411-416.

Samarasinghe, S. 2006. **Neural Networks for Applied Sciences and Engineering: From Fundamentals to Complex Pattern Recognition**. Auerbach Publications.

Shen, C., L. Wang and Q. Li. 2007. Optimization of injection molding process parameters using combination of artificial neural network and genetic algorithm method. **Journal of Materials Processing Technology** 183: 412-418.

Shen, C. and M. Zhai. 2004. Algorithm to optimize number of gates and locations in an injection mould. **Plastics, Rubbers and Composites** 33(8): 330-334.

Shoemaker, J. 2008. **Moldflow Design Guide: A Resource for Plastics Engineers**. Hanser Publishers, Munich.

Soltani, F. 2000. **Geometry-based modeling of the mold filling process using neural networks**. Ph.D. Dissertation, Steven Institute of Technology.

Sombatsompop, N. and A.K. Wood. 1998. Comments on some assumptions made for the determination of polymer melt flow properties. **The Journal of Scientific Research Chulalongkorn University** 23(2): 101-107.

Verbraak, C.P.J.M. and H.E.H. Meijer. 1989. Screw design in injection molding. **Polymer Engineering and Science** 29(9): 479-487.

Wu, C.-Y., C.-C. Ku and H.-Y. Pai. 2011. Injection molding optimization with weld line design constraint using distributed multi-population genetic algorithm. **Int J Adv Manuf Technol** 52:131-141.

Zhai, M., Y.C. Lam and C.K. Au. 2006. Runner sizing and weld line positioning for plastics injection moulding with multiple gates. **Engineering with Computers** 21: 218-224.





ตารางผนวกที่ 1 ค่าแรงดันน้ำและเวลาน้ำสำหรับกรณีศึกษาแบบจำลองของหน้าจอของ
คอมพิวเตอร์แบบพกพาตำแหน่งของทางเข้าเพื่อใช้ในการฝึกสอน

StdOrder	Gate locations				Max. Pressure (MPa)	SD	Fill time
1	A1	B1	C1	D1	103.30	17.0	4.138
2	A1	B1	C1	D2	99.56	17.6	3.469
3	A1	B1	C1	D3	98.6	17.8	3.711
4	A1	B1	C2	D1	103.3	16.9	4.138
5	A1	B1	C2	D2	99.54	17.6	3.468
6	A1	B1	C2	D3	98.64	17.8	3.704
7	A1	B1	C3	D1	94.88	18.3	3.408
8	A1	B1	C3	D2	88.97	19.2	3.541
9	A1	B1	C3	D3	88.06	17.9	3.401
10	A1	B2	C1	D1	99.37	18.6	3.939
11	A1	B2	C1	D2	103.1	15.0	4.217
12	A1	B2	C1	D3	98.19	18.3	4.067
13	A1	B2	C2	D1	99.37	18.6	3.939
14	A1	B2	C2	D2	103.5	14.7	4.200
15	A1	B2	C2	D3	98.19	19.1	4.067
16	A1	B2	C3	D1	101.4	19.1	3.444
17	A1	B2	C3	D2	100.1	20.0	3.443
18	A1	B2	C3	D3	101.4	19.6	3.462
19	A1	B3	C1	D1	100.5	17.4	4.075
20	A1	B3	C1	D2	100	17.2	3.759
21	A1	B3	C1	D3	105.1	15.4	4.175
22	A1	B3	C2	D1	100.5	17.4	4.075

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

StdOrder	Gate locations				Max. Pressure (MPa)	SD	Fill time
23	A1	B3	C2	D2	100	17.2	3.759
24	A1	B3	C2	D3	105.1	15.5	4.175
25	A1	B3	C3	D1	95.08	17.5	3.409
26	A1	B3	C3	D2	94.03	19.3	3.434
27	A1	B3	C3	D3	91.77	18.6	3.392
28	A2	B1	C1	D1	103.3	17.2	4.138
29	A2	B1	C1	D2	99.54	18.3	3.468
30	A2	B1	C1	D3	98.58	18.4	3.715
31	A2	B1	C2	D1	103.3	17.2	4.138
32	A2	B1	C2	D2	99.54	18.3	3.468
33	A2	B1	C2	D3	98.60	18.4	3.711
34	A2	B1	C3	D1	94.88	18.3	3.408
35	A2	B1	C3	D2	70.19	12.9	3.796
36	A2	B1	C3	D3	88.06	17.9	3.401
37	A2	B2	C1	D1	99.37	18.6	3.939
38	A2	B2	C1	D2	103.5	14.7	4.200
39	A2	B2	C1	D3	85.26	15.3	4.048
40	A2	B2	C2	D1	99.37	18.6	3.939
41	A2	B2	C2	D2	103.5	14.7	4.200
42	A2	B2	C2	D3	98.19	19.1	4.067
43	A2	B2	C3	D1	101.40	19.1	3.444
44	A2	B2	C3	D2	100.1	20.0	3.443
45	A2	B2	C3	D3	101.4	19.6	3.462
46	A2	B3	C1	D1	100.5	17.4	4.075

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

StdOrder	Gate locations				Max. Pressure (MPa)	SD	Fill time
47	A2	B3	C1	D2	100.00	18.6	3.759
48	A2	B3	C1	D3	105.1	15.5	4.175
49	A2	B3	C2	D1	100.5	17.4	4.075
50	A2	B3	C2	D2	100	18.6	3.759
51	A2	B3	C2	D3	105.1	15.5	4.175
52	A2	B3	C3	D1	95.08	17.5	3.409
53	A2	B3	C3	D2	94.03	19.3	3.434
54	A2	B3	C3	D3	91.77	18.6	3.392
55	A3	B1	C1	D1	100.8	20.6	3.083
56	A3	B1	C1	D2	105.3	19.8	3.084
57	A3	B1	C1	D3	102.2	20.0	3.060
58	A3	B1	C2	D1	100.8	20.6	3.083
59	A3	B1	C2	D2	105.3	19.8	3.084
60	A3	B1	C2	D3	102.2	20.0	3.060
61	A3	B1	C3	D1	77.51	14.7	2.981
62	A3	B1	C3	D2	77.48	17.3	2.991
63	A3	B1	C3	D3	74.4	11.6	3.085
64	A3	B2	C1	D1	92.93	20.0	3.191
65	A3	B2	C1	D2	76.51	12.6	3.259
66	A3	B2	C1	D3	93.08	19.1	3.187
67	A3	B2	C2	D1	92.94	20.0	3.185
68	A3	B2	C2	D2	98.07	19.4	3.050
69	A3	B2	C2	D3	93.03	19.1	3.185

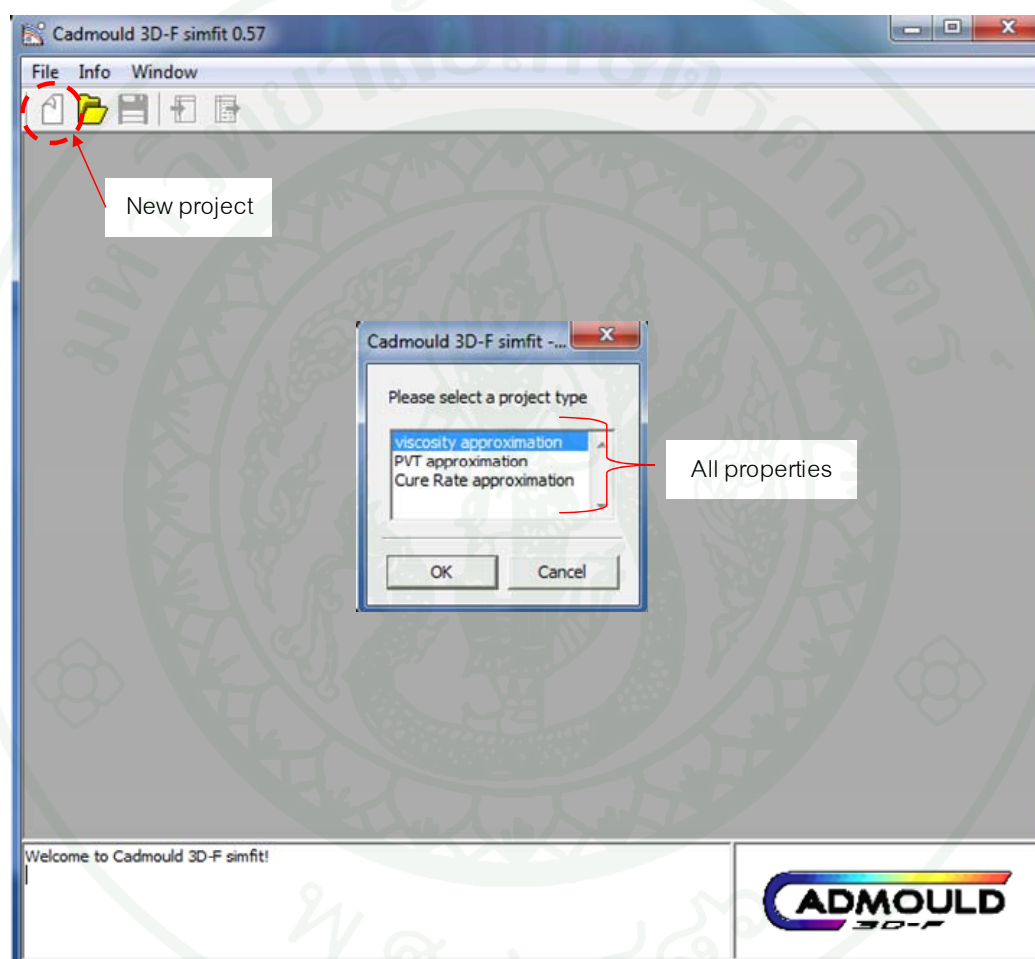
ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

StdOrder	Gate locations				Max. Pressure (MPa)	SD	Fill time
70	A3	B2	C3	D1	78.46	17.4	3.132
71	A3	B2	C3	D2	79.6	15.6	3.013
72	A3	B2	C3	D3	76.83	19.4	2.960
73	A3	B3	C1	D1	96.11	20.0	3.173
74	A3	B3	C1	D2	98.36	18.6	3.049
75	A3	B3	C1	D3	97.44	19.2	3.043
76	A3	B3	C2	D1	96.07	20.0	3.181
77	A3	B3	C2	D2	98.36	18.6	3.049
78	A3	B3	C2	D3	97.44	19.2	3.043
79	A3	B3	C3	D1	77.16	16.3	3.030
80	A3	B3	C3	D2	80.2	15.7	3.018
81	A3	B3	C3	D3	78.55	18.2	3.362



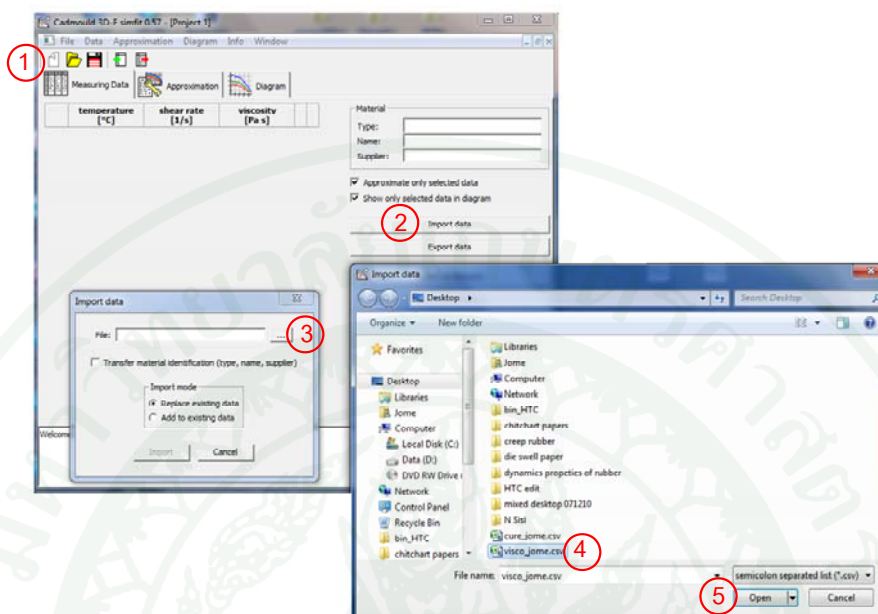
1. การกำหนดสมบัติของวัสดุเพื่อใช้ในการจำลองการไหลของยาง

1.1 ทำการ fit curve ด้วย Simfit  โดยสมบัติที่จำเป็นในการวิเคราะห์การไหลของยาง คือ ความหนืด (Viscosity) ของยางที่อุณหภูมิและอัตราครีปเค้นต่างๆ และอัตราการคงรูป (Cure rate) ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ

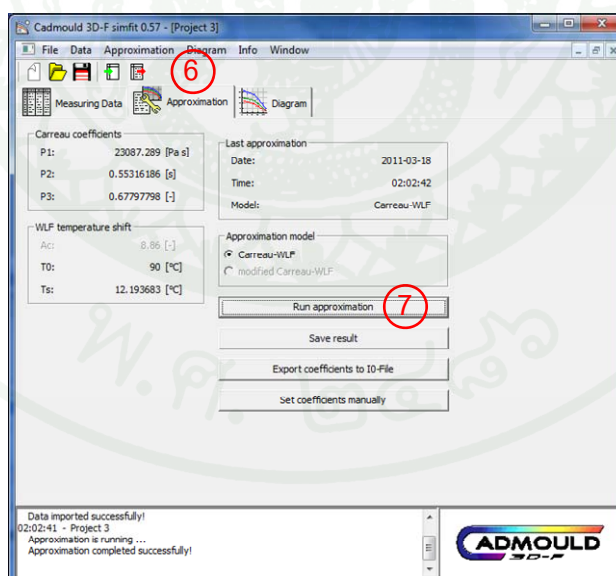


ภาพผนวกที่ 1 การกำหนดสมบัติของวัสดุ

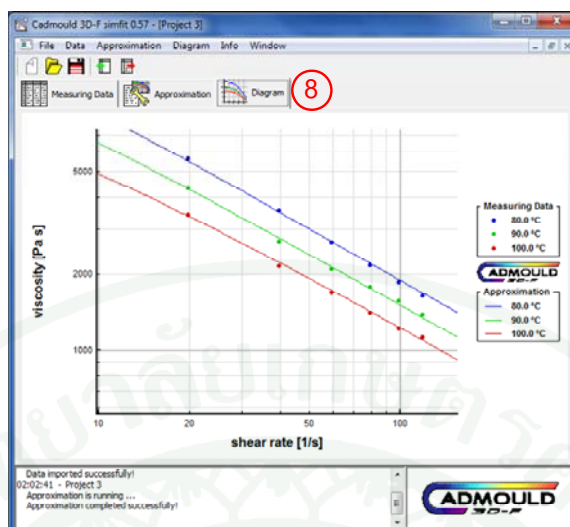
1.2 การกำหนดค่าความหนืดของยางที่อุณหภูมิและอัตราเครียดเฉือนต่างๆ



ภาพผนวกที่ 2 ขั้นตอนการป้อนข้อมูลความหนืด

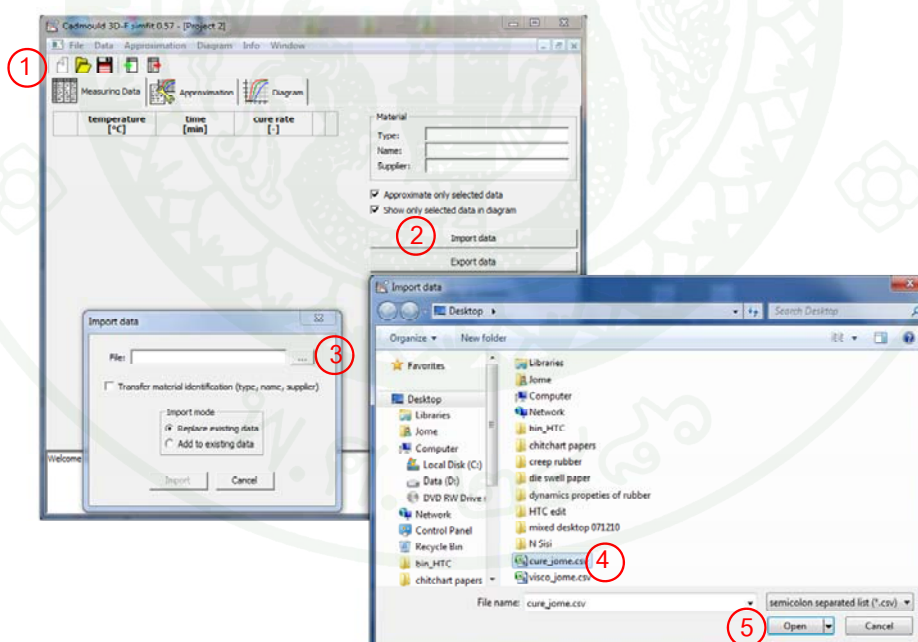


ภาพผนวกที่ 3 ขั้นตอนการหาค่าคงที่ของแบบจำลอง Carreau-WLF

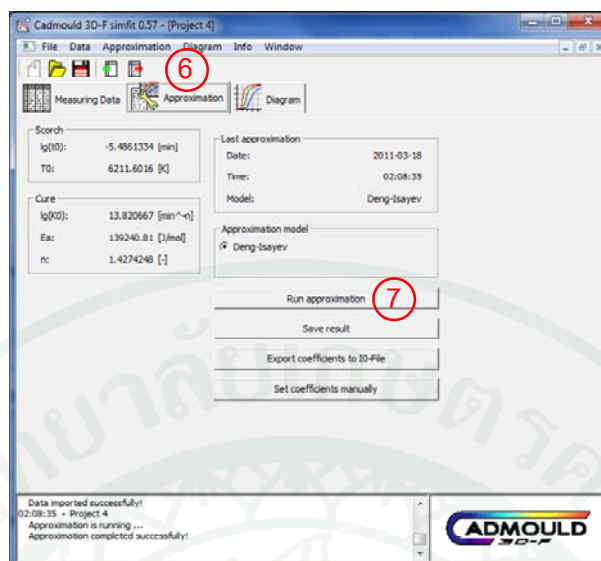


ภาพผนวกที่ 4 ขั้นตอนการพล็อตกราฟความหนืดและอัตราครีปเลื่อนที่อุณหภูมิต่างๆ

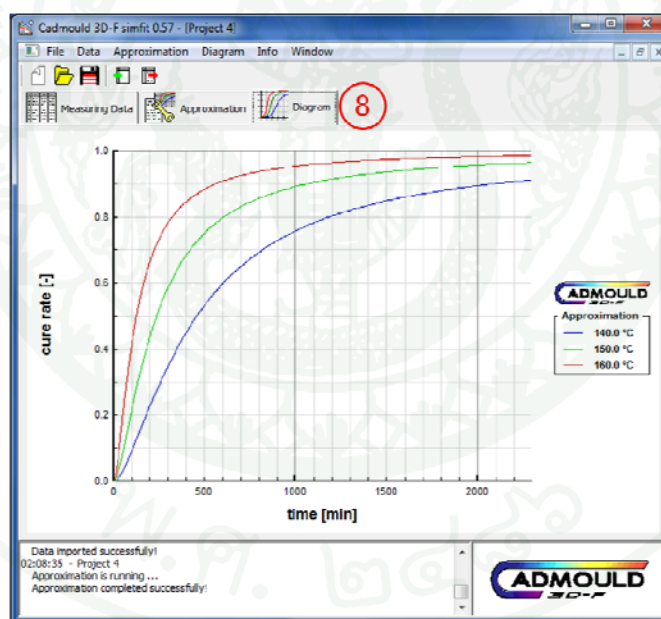
1.3 การกำหนดอัตราการคงรูปที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ



ภาพผนวกที่ 5 ขั้นตอนการป้อนข้อมูลอัตราคงรูป



ภาพผนวกที่ 6 ขั้นตอนการหาค่าคงที่ของแบบจำลอง Deng-Isayev



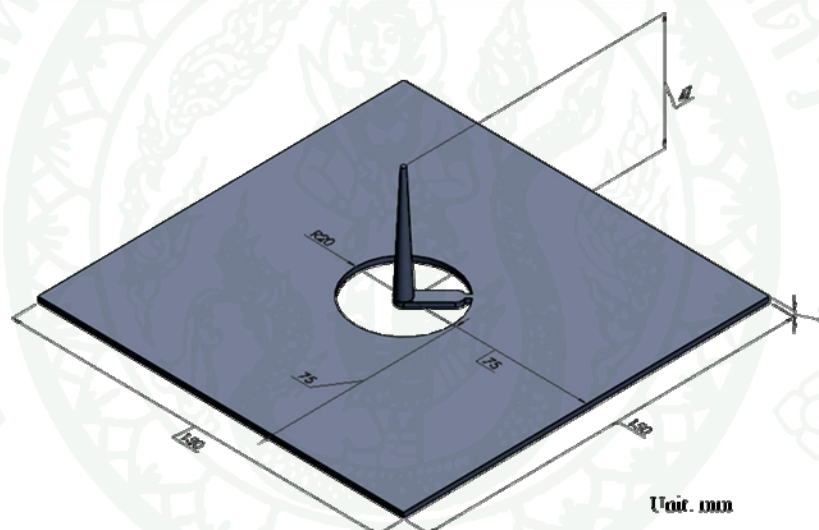
ภาพผนวกที่ 7 ขั้นตอนการพล็อตกราฟความหนืดและอัตราเคียวเค้นที่อุณหภูมิต่างๆ



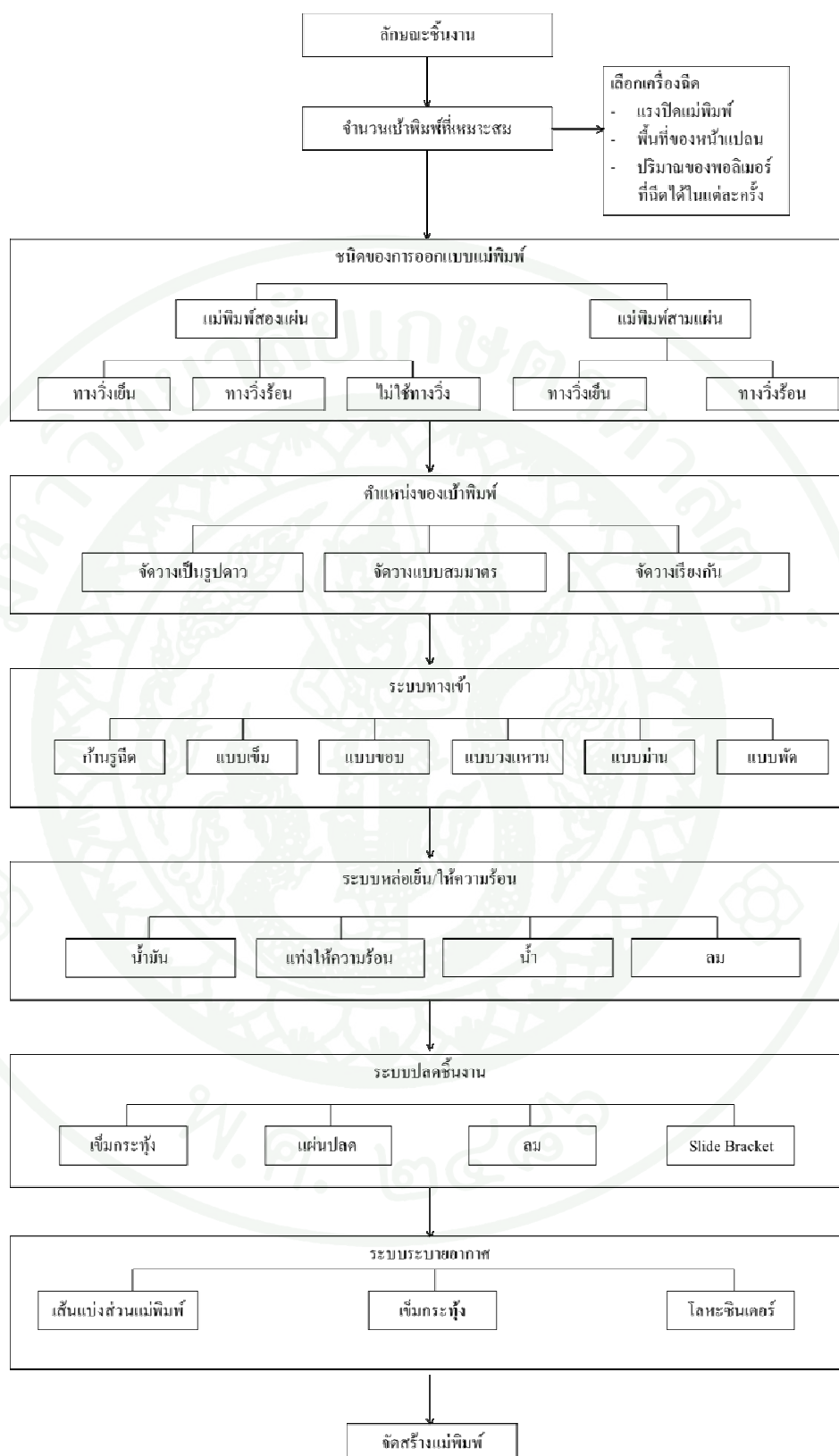
ภาคผนวก ค
ขั้นตอนการออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ฉีด

1. การออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ฉีด

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ฉีดที่สามารถนำไปใช้ได้ทั้งการฉีดเทอร์โมพลาสติกและการฉีดยาง โดยเริ่มจากการพิจารณาถึงลักษณะและจำนวนของชิ้นงานเป็นอันดับแรก เนื่องจากลักษณะและจำนวนของชิ้นงาน ส่งผลต่อการเลือกขนาดของแม่พิมพ์และขนาดของเครื่องฉีด ชิ้นงานที่ออกแบบมีความกว้างมากที่สุดเท่ากับ 150 mm ความยาวมากที่สุดเท่ากับ 150 mm และหนา 2 mm ดังแสดงในภาพผนวกที่ 8 และมีขั้นตอนในการออกแบบแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพผนวกที่ 9



ภาพผนวกที่ 8 ลักษณะของชิ้นงานที่ออกแบบเพื่อทดสอบฉีดขึ้นรูป



ภาพผนวกที่ 9 ขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด

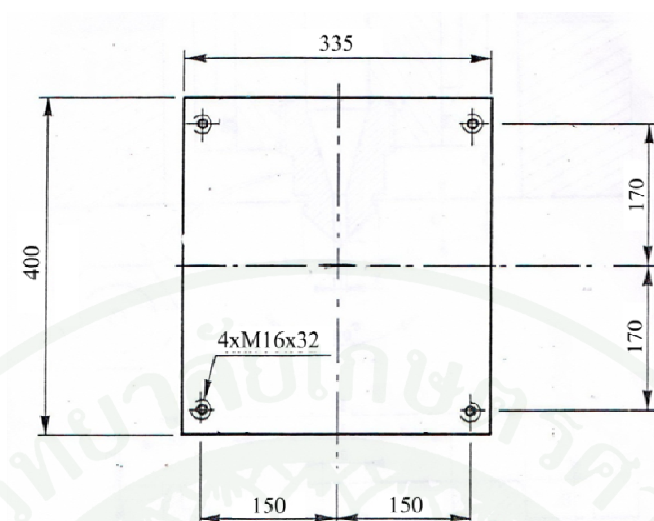
เมื่อกำหนดลักษณะและขนาดของชิ้นงานแล้ว พบว่า ปริมาตรมากที่สุดของชิ้นงานที่ได้ ออกแบบ คือ 45 cc. เครื่องฉีดจึงควรมีปริมาตรการฉีดต่อครั้งที่สูงกว่าปริมาตรมากที่สุดของชิ้นงาน โดยมีขนาดของเครื่องฉีดยาง Rep และเครื่องฉีดเทอร์โมพลาสติก Arburg ดังแสดงในตารางผนวกที่ 2

ตารางผนวกที่ 2 ขนาดของเครื่องฉีดยางและเครื่องฉีดเทอร์โมพลาสติก

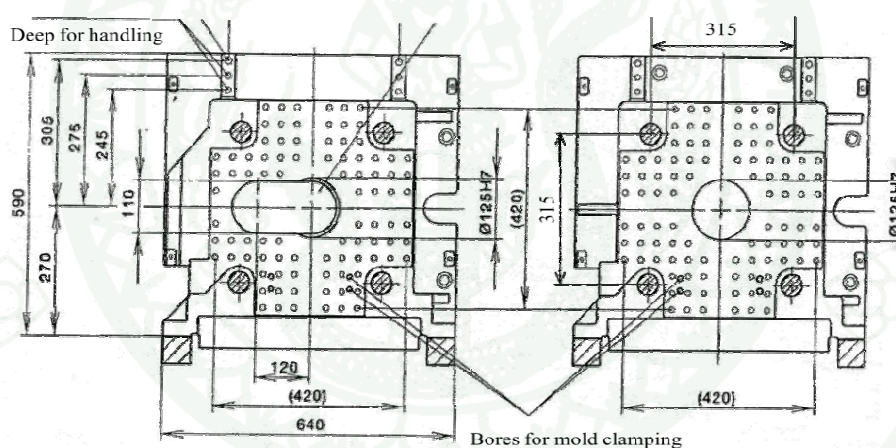
Injection machine	Nozzle sizes	Shot sizes (cc.)
Rep V37/100	SR11	550
Arburg 320C 500-250	R36	144

1.1 ขั้นตอนการออกแบบแผ่นยึดด้านบนและด้านล่าง

การยึดแม่พิมพ์เข้ากับหน้าแปลนเครื่องฉีด ทำได้ 2 วิธี คือ ขันเกลียวยึดโดยตรงกับแผ่นแม่พิมพ์ และขันเกลียวยึดทางอ้อม โดยใช้แผ่นกด (Clamp plate) แหวนรองและสกรู ระบุสกรูควรอยู่ใกล้กับจุดกดบนแม่พิมพ์มากที่สุด สำหรับเครื่องฉีดยาง ซึ่งใช้วิธีการยึดแม่พิมพ์เข้ากับหน้าแปลน จำเป็นต้องกำหนดขนาดของแผ่นยึดด้านบนให้มีตำแหน่งรูยึดนี้่อดของแผ่นยึดตรงกับรูยึดนี้่อดของเครื่องฉีด ระยะของรูยึดนี้่อดกับหน้าแปลนเครื่องฉีดยาง Rep มีขนาด 340x300 mm ดังแสดงในภาพผนวกที่ 10 ในขณะที่เครื่องฉีดเทอร์โมพลาสติก ใช้การยึดแม่พิมพ์แบบขันเกลียวยึดทางอ้อม การกำหนดขนาดแผ่นยึดด้านบนจึงควรกำหนดให้สามารถประกอบเข้าในระยະไต้บาร์ของเครื่องฉีดได้ โดยระยะไต้บาร์ของเครื่องฉีดเทอร์โมพลาสติก มีขนาด 315x315 mm ดังแสดงในภาพผนวกที่ 11 ขนาดความกว้างและความยาวของแม่พิมพ์มากที่สุด ถูกกำหนดด้วยระยะห่างของเพลานำเลื่อนในแนวระดับและแนวตั้ง รวมถึงระยะห่างของรูสกรูและขนาดของสกรูที่ใช้ยึดแม่พิมพ์ติดกับเครื่องฉีดอีกด้วย สำหรับความสูงของแม่พิมพ์ฉีด พิจารณาได้จากช่องว่างกว้างสุดในจังหวะเปิดของเครื่องฉีด และช่องว่างแคบสุดเมื่อเครื่องฉีดอยู่ในจังหวะปิด โดยช่องว่างกว้างสุดเป็นตัวกำหนดขนาดของแม่พิมพ์สูงสุด บวกกับระยะที่แม่พิมพ์เปิดออกเพื่อปลดชิ้นงาน และขนาดช่องว่างเล็กสุดเป็นตัวกำหนดขนาดความสูงของแม่พิมพ์น้อยที่สุดที่สามารถนำไปประกอบบนเครื่องฉีดได้



ภาพผนวกที่ 10 ระยะของรูยึดน็อตกับหน้าแปลนเครื่องฉีดของ Rep V37/100

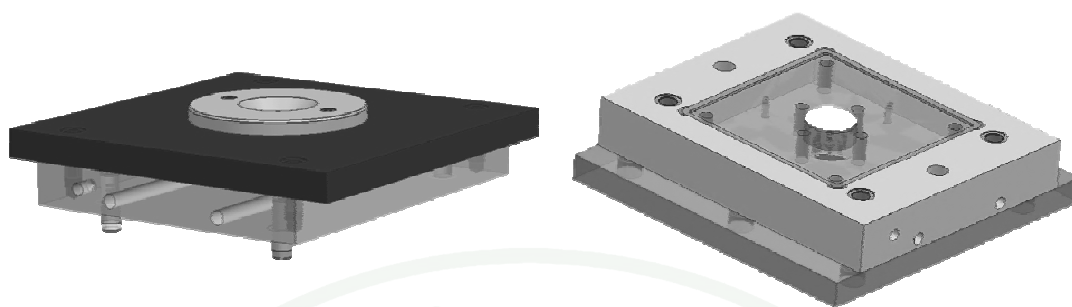


ภาพผนวกที่ 11 ระยะของรูยึดน็อตกับหน้าแปลนเครื่องฉีดเทอร์โมพลาสติก Arburg 320C 500-

250

1.2 ชนิดของแม่พิมพ์ฉีด

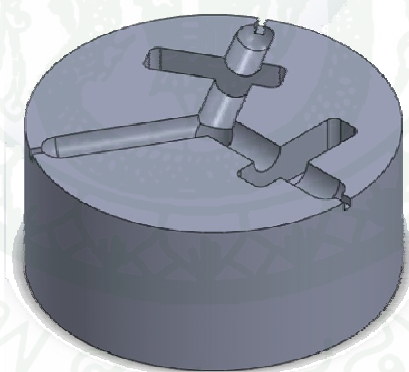
เนื่องจากชิ้นงานมีรูปร่างไม่ซับซ้อน ปราศจากร่องหรือบ่า และมีขนาดบาง จึงออกแบบแม่พิมพ์เป็นแบบ 2 แผ่น ดังแสดงในภาพผนวกที่ 12



ภาพผนวกที่ 12 แม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น

1.3 ชนิดและลักษณะของอินเลอร์

แผ่นอินเลอร์ควรทำเป็นรูปร่างทรงกระบอกหรือสี่เหลี่ยม เพื่อให้ง่ายต่อการตัดเฉือนขึ้นรูป วิธีการยึดแผ่นอินเลอร์สามารถทำได้ 2 วิธี คือ การใช้สกรูหัวฝังยึดจากทางด้านล่างหรือใช้หน้าแปลนยึด แม่พิมพ์ที่ได้ออกแบบนี้ใช้วิธีการยึดแผ่นอินเลอร์โดยใช้สกรูยึดจากด้านล่าง เพื่อให้สามารถหมุนปรับตำแหน่งทางเข้าในการทดลองได้ ดังแสดงในภาพผนวกที่ 13



ภาพผนวกที่ 13 อินเลอร์สำหรับปรับเปลี่ยนตำแหน่งทางเข้า

1.4 เพลานำและปลอกนำ (Guide pillars and bushes)

เส้นผ่านศูนย์กลางเพลานำควรมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกนำ อย่างน้อย 7 mm (ขาลี, 2546) จากตารางที่ 1 แม่พิมพ์ฉีดที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด 265x265 mm จึงเลือกใช้เพลานำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 mm และปลอกนำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm

1.5 ปลอกกรู๊ด (Sprue bush)

ในการออกแบบขนาดของปลอกกรู๊ดควรพิจารณาถึงขนาดของหัวฉีด โดยขนาดรัศมีของบารับบนปลอกกรู๊ดต้องใหญ่กว่ารัศมีของหัวฉีดเล็กน้อย และรูของปลอกกรู๊ดใหญ่กว่ารูของหัวฉีดประมาณ 0.8-1 mm รูของปลอกกรู๊ดมีมุมเรียวระหว่าง 3-5 องศา ทำให้ถอดแกนรู๊ดได้สะดวกขึ้น และใช้สลักบังคับตำแหน่งหรือสกรูยึดเพื่อป้องกันไม่ให้ปลอกกรู๊ดส่วนที่อยู่ติดกับทางวิ่งหมุนเลื่อนตำแหน่งขณะใช้งาน และทำเป็นบ่าที่ปลายและยึดด้วยแหวนบังคับศูนย์เพื่อป้องกันไม่ให้ปลอกกรู๊ดเคลื่อนที่ถอยหลัง ความยาวของปลอกกรู๊ดต้องไม่เกินความหนาของแผ่นแม่พิมพ์ส่วนที่อยู่กับที่ ขนาดของหัวฉีดของเครื่องฉีด Rep และ Arburg ดังแสดงในตารางที่ 10

1.6 แหวนบังคับศูนย์ (Locating ring)

ใช้กำหนดตำแหน่งของแม่พิมพ์ให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องบนหน้าแปลนของเครื่องฉีด และควรสวมเข้ากับรูทรงกระบอกบนหน้าแปลนส่วนที่อยู่กับที่ได้พอดี โดยมีขนาด 120 mm สำหรับเครื่องฉีดเทอร์โมพลาสติก และ 80 mm สำหรับเครื่องฉีดยาง

1.7 ทางวิ่ง (Runner)

ขนาดของทางวิ่งต้องไม่เล็กกว่าส่วนที่หนาที่สุดของชิ้นงาน ส่วนใหญ่มักใช้ 3 mm ถึง 15 mm (ชาติ, 2546) ปัจจัยที่ควรนำไปพิจารณาในการออกแบบขนาดทางวิ่งที่เหมาะสม ดังแสดงในภาพที่ 20 สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ทางวิ่งขนาด 4 mm

1.8 ทางเข้า (Gates)

ทางเข้าแบบขอบเหลี่ยม (Rectangular edge gate) ควรมีความหนาของทางเข้า 50-70% ของความหนาชิ้นงาน สำหรับแม่พิมพ์ฉีดเทอร์โมพลาสติก และ 80-90% สำหรับทางเข้าของแม่พิมพ์ฉีดยาง กล่าวคือ สำหรับชิ้นงานที่มีความหนา 2 mm ทางเข้ามีความหนา 1.4 mm สำหรับการฉีดขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน และมีความหนา 1.8 mm ในการฉีดขึ้นรูปยาง

1.9 ท่อน้ำหล่อเย็น (Cooling channel)

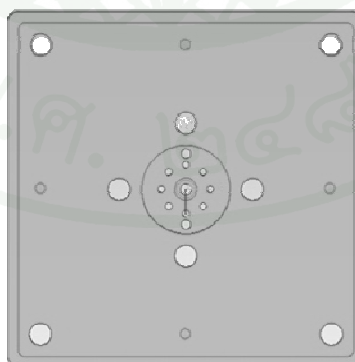
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้ำหล่อเย็นสามารถพิจารณาได้จากความหนาของชิ้นงานดังแสดงในตารางผนวกที่ 3 เมื่อชิ้นงานมีความหนา 2 mm พบว่า ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8-10 mm โดยมีระยะห่างจากชิ้นงานเท่ากับ 2.5 เท่าของขนาดท่อน้ำหล่อเย็น หรือ 25 mm เมื่อเลือกใช้ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็น 10 mm โดยที่ระยะห่างของท่อน้ำหล่อเย็นควรมีความกว้างไม่เกิน 3 เท่าของขนาดของท่อน้ำหล่อเย็น หรือ 30 mm

ตารางผนวกที่ 3 ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นที่เหมาะสมกับขนาดของชิ้นงาน

ความหนาชิ้นงาน (mm)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้ำหล่อเย็น (mm)
น้อยกว่า 2	8-10
น้อยกว่า 4	10-12
น้อยกว่า 6	12-15

1.10 ระบบนำปลดชิ้นงาน (Ejector system)

ระบบนำปลดที่เลือกใช้ในแม่พิมพ์นี้เป็นแบบก้านกระทุ้ง (Ejector pin) โดยมีการจัดวาง ดังแสดงในภาพผนวกที่ 14



ภาพผนวกที่ 14 การจัดวางตำแหน่งก้านกระทุ้งที่บริเวณชิ้นงาน

1.11 ระบบระบายอากาศ (Venting system)

กำหนดให้มีช่องระบายอากาศออกที่บริเวณเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์และบริเวณก้นกระทู้ของแม่พิมพ์ สำหรับแม่พิมพ์ฉีดเทอร์โมพลาสติก และกำหนดให้มีช่องระบายอากาศที่บริเวณเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์ สำหรับแม่พิมพ์ฉีดยาง

จากขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์ที่กล่าวมาข้างต้น แม่พิมพ์ฉีดเทอร์โมพลาสติกและแม่พิมพ์ฉีดยางที่ออกแบบและจัดสร้างมีการประกอบยึดกับเครื่องฉีด ดังแสดงในภาพผนวกที่ 15



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ 15 การประกอบยึดแม่พิมพ์กับเครื่องฉีด (ก) เทอร์โมพลาสติก (ข) ยาง

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นายทิวากร อภิรักษ์ธนากร
วัน เดือน ปี ที่เกิด	17 กรกฎาคม 2526
สถานที่เกิด	เขตปทุมวัน จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ประวัติการทำงาน	-
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-