รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การใช้เจเนติกอัลกอริทึมเพื่อกำหนดตำแหน่งทางเข้าและช่องระบายอากาศ
ที่เหมาะสมภายในแม่พิมพ์ฉีดยาง

โดย สมเจตน์ พัชรพันธ์ และคณะ

ตุลาคม 2555

สัญญาเลขที่ RDG5350059

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การใช้เจเนติกอัลกอริทึมเพื่อกำหนดตำแหน่งทางเข้าและช่องระบายอากาศที่เหมาะสมภายในแม่พิมพ์ฉีดยาง

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. ดร. สมเจตน์ พัชรพันธ์	ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2. นายทิวากร อภิรักษ์ธนากร	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
3. นายวัชรพงษ์ ชูแก้ว	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชุดโครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานความก้าวหน้าฉบับนี้ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร	1
บทคัดย่อ	4
เนื้อหา	
บทนำ	6
วัตถุประสงค์	6
ตรวจเอกสาร	7
อุปกรณ์และวิธีการ	55
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล	80
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	101
กิตติกรรมประกาศ	103
เอกสารอ้างอิง	104
ภาคผนวก	108
ตารางเปรียบเทียบ Output ที่เสนอในข้อเสนอโครงการและที่ได้จริง	139

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาและประยุกต์ใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) ร่วมกับเจเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Genetic Algorithm, MOGA) ในการวิเคราะห์หาตำแหน่งทางเข้าและช่องระบายอากาศที่เหมาะสมภายในแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง 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 การใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมร่วมกับเจเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์ สามารถทำนายตำแหน่งทางเข้าและช่องระบายอากาศที่มีความเหมาะสมที่สุดได้ โดยมีความแม่นยำเฉลี่ย 97.12% สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ผู้วิจัยได้พัฒนาแนวทางการลดจำนวนของข้อมูลในการฝึกสอน โดยใช้ชิ้นงานที่มี 1 ทางเข้า ซึ่งใช้ค่าแรงดันฉีดและตำแหน่งรอยประสานเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ พบว่า แนวทางที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำเฉลี่ย 99.39% และในกรณีศึกษาที่ 3 ผู้วิจัยได้กำหนดเงื่อนไขให้สามารถเพิ่มจำนวนทางเข้าในกรณีที่แรงดันฉีดมีค่าสูงเกินกว่าที่กำหนด โดยใช้ชิ้นงานที่มี 2 ทางเข้า และใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เช่นเดียวกับกรณีศึกษาที่ 2 ในกรณีศึกษานี้ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีแบ่งครึ่งช่วง (Bi-section method) สำหรับการกำหนดตำแหน่งรอยประสาน เพื่อลดเวลาในการกำหนดตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสม พบว่า แนวทางที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายค่าแรงดันฉีดและตำแหน่งรอยประสานมีความแม่นยำเฉลี่ย 86.39% และนอกจากนี้ผู้วิจัยได้นำผลการทดสอบของกรณีศึกษาที่ 2 ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริง ซึ่งพบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกับการทดสอบฉีดจริง ดังนั้นแนวทางที่ได้จากงานวิจัยจึงสามารถนำไปใช้ในการกำหนดตำแหน่งและจำนวนของทางเข้าและช่องระบายอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อลดปัญหารอยประสานที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน

Abstract

In this work, the Artificial Neural Network (ANN) was developed and employed with Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) in order to optimize the location of gate and air vent in rubber injection mold. The predicted results obtained from Computer Aided Engineering (CAE) program i.e. CADMOLD was utilized to construct the multi-functional objectives. The 2, 2.5, and 3D models was simulated and compared with those obtained from experiments regarding to 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 use 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 increased the number of gate used when the maximum injection pressure was reached. It was found that the developed model can predicted 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 gate and air vent in order to avoid the weld line problem in rubber injection mold.

บทนำ

ประเทศไทยสามารถผลิตและส่งออกยางธรรมชาติได้เป็นอันดับหนึ่งของโลก แต่เนื่องจากการขาดองค์ความรู้และเทคโนโลยีในการแปรรูป ส่งผลทำให้มีการนำยางธรรมชาติไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางที่มีมูลค่าสูงได้ค่อนข้างน้อย การแปรรูปผลิตภัณฑ์ยางภายในประเทศส่วนใหญ่ เป็นการใช้ประสบการณ์และการลองผิดลองถูก (Trial and error) ที่สั่งสมมาเป็นระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งเป็นองค์ความรู้ที่เกิดขึ้นเฉพาะบุคคลหรือองค์กร ทำให้อุตสาหกรรมการแปรรูปผลิตภัณฑ์ยางไม่พัฒนาเท่าที่ควร การฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางโดยใช้แม่พิมพ์เป็นกระบวนการขึ้นรูปที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนคอมพิวเตอร์ และยานยนต์ เนื่องจากให้อัตราการผลิตสูงและสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม นอกเหนือจากต้นทุนด้านเครื่องจักรและราคาของแม่พิมพ์ฉีดที่สูงกว่ากระบวนการอื่นแล้ว การออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดยังต้องอาศัยความรู้และประสบการณ์หรือใช้เทคโนโลยีจากต่างประเทศ ทั้งนี้ในภาพรวมของอุตสาหกรรมในประเทศไทย ยังคงพบปัญหาในการออกแบบส่วนประกอบของแม่พิมพ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการออกแบบทางเข้า (Gate) และช่องระบายอากาศ (Vent) ที่ไม่เหมาะสม และส่งผลให้เกิดปัญหาของเสียขึ้นในกระบวนการผลิต ยกตัวอย่างเช่น การฉีดไม่เต็มเบ้าพิมพ์ (Short shot) ซึ่งแก้ไขปัญหาได้โดยการเพิ่มขนาดและตำแหน่งของทางเข้า รวมถึงการกำหนดตำแหน่งของช่องระบายอากาศให้เหมาะสม อย่างไรก็ตาม การเพิ่มจำนวนของทางเข้าอาจทำให้เกิดรอยประสาน (Weld line) ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานที่บริเวณรอยประสานมีค่าลดลง โดยเฉพาะในยางที่ผสมสารตัวเติม (วัชรพงษ์, 2549) การแก้ไขหรือลดปัญหารอยประสานสามารถทำได้โดยการกำหนดตำแหน่งของทางเข้าให้เหมาะสม เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดรอยประสานในตำแหน่งที่สำคัญ เช่น ตำแหน่งที่รับภาระแรงกระทำ เป็นต้น รวมถึงการออกแบบช่องระบายอากาศ (Vent) ที่ตำแหน่งรอยประสาน สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงานบริเวณรอยประสาน และป้องกันการฉีดไม่เต็มเบ้าพิมพ์ได้ (Kazmer, 2007) ในปัจจุบันได้มีการนำคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) ยกตัวอย่างเช่น Moldflow Cadmould และ Moldex เป็นต้น มาช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดและการกำหนดเงื่อนไขในกระบวนการฉีดที่เหมาะสม เพื่อลดต้นทุนการผลิตในส่วนของเวลาและค่าใช้จ่ายในการออกแบบผลิตภัณฑ์และการผลิตแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ยังคงต้องอาศัยการลองผิดลองถูก และความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำเครือข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA) ซึ่งมีความสามารถในการจำลองความสัมพันธ์และหาค่าที่เหมาะสมของความสัมพันธ์นั้น นอกจากนี้ผู้ออกแบบแม่พิมพ์ยังสามารถนำแนวทางที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบตำแหน่งของทางเข้าและช่องระบายอากาศที่ตำแหน่งที่เหมาะสม เพื่อแก้ไขข้อบกพร่อง รวมถึงลดเวลาและต้นทุนในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

วัตถุประสงค์

เพื่อสร้างเจเนติกอัลกอริทึมในการกำหนดตำแหน่งทางเข้าและช่องระบายอากาศที่เหมาะสมภายในแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

การตรวจเอกสาร

1. สมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว

สมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือการเสียรูป (Deformation) ของพอลิเมอร์หลอมเหลว และความสามารถในการไหล (Flow ability) เมื่อได้รับแรงกระทำ โดยทั่วไปสมบัติการไหลของวัสดุแต่ละประเภทมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นความรู้เกี่ยวกับสมบัติการไหลของพอลิเมอร์จึงมีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกและยาง ซึ่งอาศัยหลักการให้ความร้อนและการให้แรงดันในการทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ ข้อมูลของสมบัติการไหลสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตได้ ยกตัวอย่างเช่น ความสามารถในกระบวนการผลิต (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 เนื่องจากเป็นการไหลที่เกิดขึ้นในเครื่องมือผสมและเครื่องมือขึ้นรูปชนิดต่างๆ ลักษณะการไหลที่เกิดจากแรงเฉือน สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ การไหลแบบลากดึง (Drag flow) และการไหลที่เกิดจากความแตกต่างของแรงดัน (Pressure driven flow) โดยมีรายละเอียดของแต่ละประเภทดังนี้

- การไหลแบบลากดึง เป็นการไหลที่เกิดขึ้นจากแรงที่มากระทำกับผนังหรือผิวของการไหล 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

$$\tau = \frac{F}{A} \tag{1}$$

$$\gamma = \frac{x}{h} \tag{2}$$

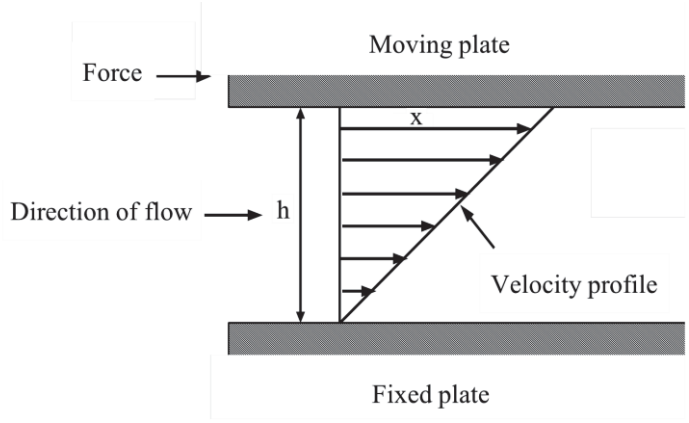
$$\dot{\gamma} = \frac{1}{h}\left(\frac{dx}{dt}\right) = \frac{v}{h} \qquad (3)$$

โดยที่ F คือ แรงเฉือน (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัด (m^2)

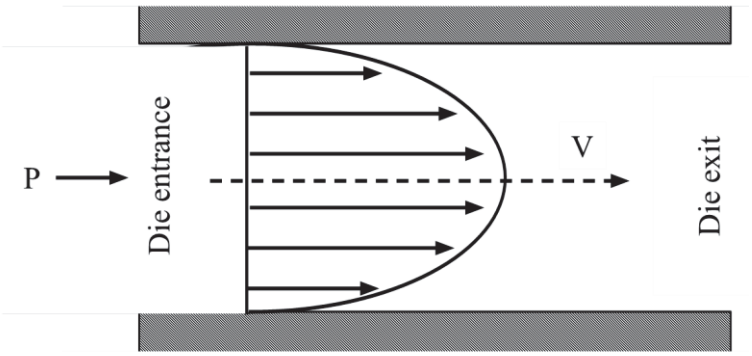
h คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นประกบ (m)

v คือ ความเร็วของแผ่นประกบ ($m.s^{-1}$)



ภาพที่ 1 การไหลที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแผ่นประกบคู่ด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน

- การไหลที่เกิดจากความแตกต่างของแรงดัน เป็นการไหลที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของแรงดัน โดยพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลจากปลายท่อด้านที่มีแรงดันสูงไปยังปลายท่อด้านที่มีแรงดันต่ำ และมีความเร็วในการไหลสูงสุดที่บริเวณกึ่งกลางของท่อและต่ำสุดที่บริเวณที่ติดกับผนัง ดังแสดงในภาพที่ 2 ตัวอย่างการไหลในลักษณะนี้ เช่น การไหลของพอลิเมอร์ในแม่พิมพ์



ภาพที่ 2 การไหลภายในท่อที่มีแรงดันแตกต่างกัน

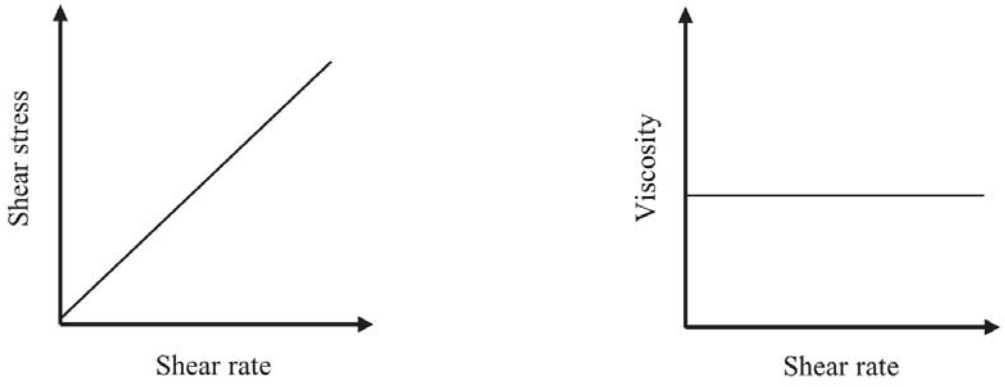
1.1 ประเภทของของไหล

โดยทั่วไปสามารถแบ่งของไหลในรูปแบบของแรงเฉือนออกเป็น 2 ประเภทหลัก ดังนี้

1.1.1 ของไหลนิวโตเนียน (Newtonian fluid)

ของไหลนิวโตเนียนเป็นกลุ่มของของไหลที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น สารละลายเจือจาง และน้ำนม เป็นต้น ของไหลประเภทนี้มีความหนืด (Viscosity, η) ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าอัตราเครียดเฉือน ในการหาค่าของความหนืดในรูปแบบของแรงเฉือนสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนต่ออัตราเครียดเฉือน ดังสมการที่ 4

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \tag{4}$$



(ก) (ข)

ภาพที่ 3 พฤติกรรมการไหลของของไหลนิวโตเนียน (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับ อัตราเครียดเฉือน (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเครียดเฉือน

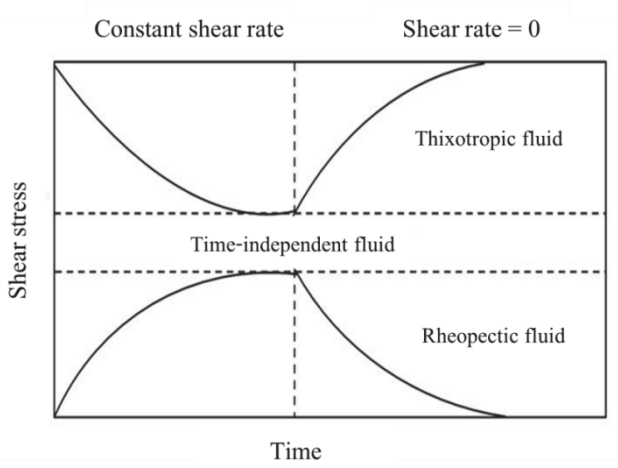
1.1.2 ของไหลนอนนิวโตเนียน (Non-newtonian fluid)

ของไหลนอนนิวโตเนียนเป็นของไหลที่ค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงตามอัตราเครียดเฉือน โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเครียดเฉือน และความหนืดกับอัตราเครียดเฉือนที่ไม่เป็นเส้นตรง ของไหลนอนนิวโตเนียนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่ ของไหลที่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time-dependent fluid) และของไหลที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time-independent fluid) โดยมีรายละเอียด ดังนี้

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

- ของไหลไทโซทรอปิก (Thixotropic) เป็นของไหลที่มีค่าความเค้นเฉือนลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น เมื่อให้อัตราเครียดเฉือนคงที่ และค่าความเค้นเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนมีค่าเท่าเดิมเมื่อหยุดให้อัตราเครียดเฉือน ตัวอย่างของของไหลที่มีพฤติกรรมเช่นนี้ ได้แก่ น้ำสลัด และโยเกิร์ต เป็นต้น

- ของไหลรีโอเพ็กติก (Rheopectic) คือ ของไหลที่มีค่าความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นตามเวลา เมื่อให้อัตราเครียดเฉือนคงที่ และค่าความเค้นเฉือนมีแนวโน้มลดลงจนมีค่าเท่าเดิมเมื่อหยุดให้อัตราเครียดเฉือน ตัวอย่างเช่น สารแขวนลอย หรือโคลน เป็นต้น



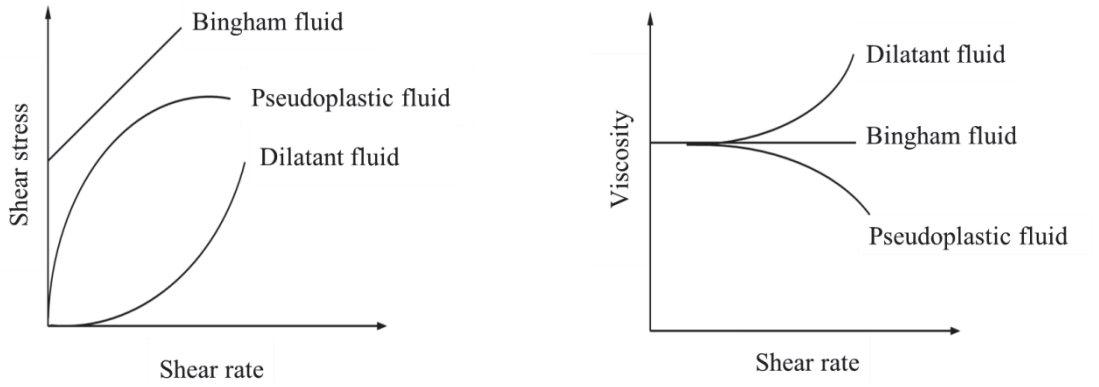
ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับเวลา

2. ของไหลที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time-independent fluid) คือ ของไหลที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความเค้นเฉือนหรือความหนืดเมื่ออัตราเครียดเฉือนเปลี่ยนแปลงไป 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 และเยลลี่ เป็นต้น

- ของไหลไดลาแทนท์ (Dilatant fluid) เป็นของไหลที่มีค่าความเค้นเฉือนหรือความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเครียดเฉือนเพิ่มขึ้น ตัวอย่างของของไหลประเภทนี้ได้แก่ น้ำแป้ง และเจลของพีวีซี เป็นต้น

- ของไหลซูโดพลาสติก (Pseudoplastic fluid) เป็นของไหลที่มีค่าความหนืดและอัตราการเพิ่มขึ้นของความเค้นเฉือนลดลง เมื่ออัตราเครียดเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการคลายตัวมากขึ้น ตัวอย่างของไหลที่มีพฤติกรรมประเภทนี้ ได้แก่ พอลิเมอร์หลอมเหลว และหมึกพิมพ์ เป็นต้น



(ก) (ข)

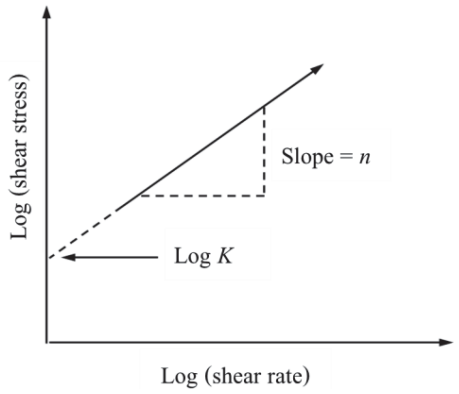
ภาพที่ 5 พฤติกรรมการไหลของของไหลนอนนิวโตเนียน (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเครียดเฉือน (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเครียดเฉือน

เนื่องจากของไหลประเภทนี้ มีค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าอัตราเครียดเฉือน ทำให้ไม่สามารถระบุค่าความหนืดรวมได้ อย่างไรก็ตาม สามารถหาค่าความหนืดที่อัตราเครียดเฉือนต่างๆ ได้ โดยใช้ค่าดัชนีการไหล (Power law index, n) จากสมการยกกำลัง (Power law equation) ดังแสดงในสมการที่ 5

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

เมื่อ K คือ ค่าคงที่การไหล (Power law consistency) ซึ่งบ่งบอกถึงความหนืดของพอลิเมอร์ที่อัตราเครียดเฉือนต่ำๆ (อัตราเครียดเฉือนเท่ากับ 1 s^{-1}) และ n คือ ค่าดัชนีการไหล ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะของของไหลได้ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อค่า n น้อยกว่า 1 ของไหลแสดงสมบัติเป็นของไหลซูโดพลาสติก เมื่อค่า n มากกว่า 1 ของไหลแสดงสมบัติเป็นของไหลไดลาแทนท์ และเมื่อค่า n เท่ากับ 1 ของไหลแสดงสมบัติเป็นของไหลประเภทนิวโตเนียน ค่า n ดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 6 หรือหาค่า n ได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Log (Shear stress) และ Log (Shear rate) ดังแสดงในภาพที่ 6 โดยที่สามารถหาค่า K ได้จากจุดตัดแกน Log (Shear stress)

$$\log \tau = \log K + n \log \dot{\gamma} \tag{6}$$



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

1.2 การทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว

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

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3} \tag{7}$$

$$\tau = \frac{\Delta PR}{2L} \tag{8}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{6Q}{WH^2} \tag{9}$$

$$\tau = \frac{H\Delta P}{2L} \tag{10}$$

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \tag{11}$$

เมื่อ R คือ รัศมีของหัวขึ้นรูปหน้าตัดกลม (m)

W คือ ความกว้างของหัวขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยม (m)

H คือ ความสูงของหัวขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยม (m)

L คือ ความยาวของหัวขึ้นรูป (m)

Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร = vA ($m^3 s^{-1}$)

ΔP คือ ความดันตกคร่อมหัวขึ้นรูป (Pa)

η คือ ความหนืดปรากฏ (Pa.s)

v คือ ความเร็วของแท่งกด ($m.s^{-1}$)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของห้องหลอมเหลวทรงกระบอก (m^2)

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า พอลิเมอร์หลอมเหลวมีสมบัติความเป็นนอนนิวโตเนียน ซึ่งมีรูปแบบการไหลที่เปลี่ยนแปลงตลอดระยะทางการไหล จึงได้มีการปรับแก้สมการที่ใช้ในการหาอัตราเครียดเฉือน โดยการระบุตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับรูปแบบการไหล คือ ค่าดัชนีการไหล เพื่อให้ได้อัตราเครียดเฉือนแท้จริง (True shear rate, $\dot{\gamma}_{true}$) ซึ่งการปรับแก้นี้เรียกว่า การปรับแก้แบบราบิโนวิทช์ (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 การปรับแก้รูปแบบการไหลหรือการปรับแก้แบบราบิโนวิทช์ (Rabinowitsch correctiions)

การปรับแก้ราบิโนวิทช์เป็นการปรับแก้ค่าอัตราเครียดเฉือน เนื่องจากพอลิเมอร์หลอมเหลวโดยทั่วไปมีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก และมีรูปแบบการไหลแบบพาราโบลา ที่มีความสัมพันธ์กับความเร็วและรูปแบบการไหลของพอลิเมอร์ โดยค่า n บ่งบอกถึงรูปแบบการไหลและความเป็นนอนนิวโตเนียนของพอลิเมอร์ จากการพิจารณาสมการที่ 12 พบว่า ค่า n ที่ลดลง ทำให้รูปแบบของพอลิเมอร์เป็นแบบปลั๊ก (Plug flow) มากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 7 และค่า n ที่ได้ สามารถนำมาใช้หาค่าอัตราเครียดเฉือนจริงของหัวขึ้นรูปแบบหน้าตัดกลมและแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมได้ ดังแสดงในสมการที่ 13 และ 14 ตามลำดับ

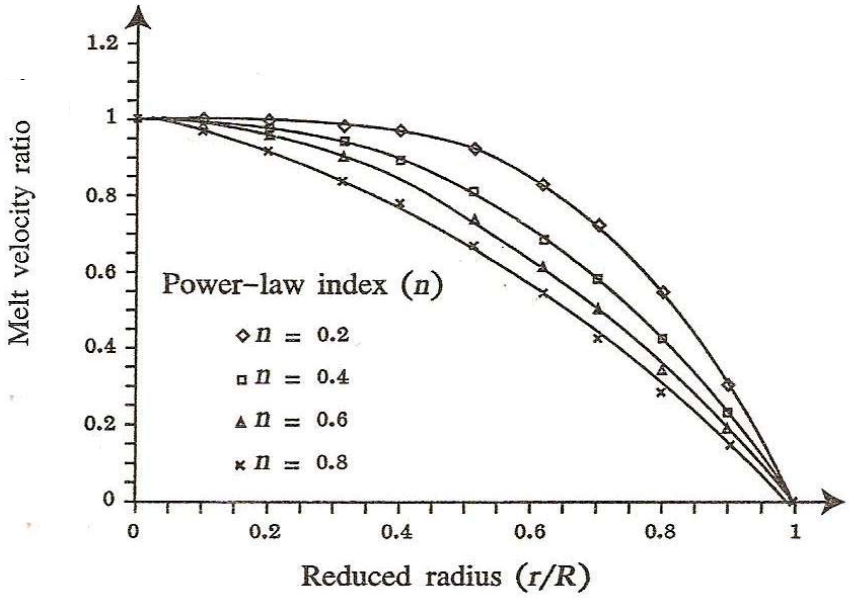
$$V(r) = \frac{3n+1}{n+1} \dot{V} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{1+\left(\frac{1}{n}\right)}\right] \quad (12)$$

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

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

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

$\dot{V}$ คือ ความเร็วเฉลี่ยการไหล ($m.s^{-1}$)



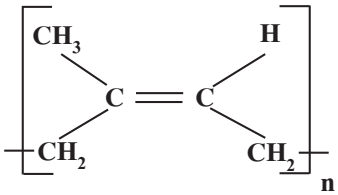
ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการไหล และรูปแบบการไหลในท่อทรงกระบอก

2. ยางธรรมชาติ (Natural rubber)

ยางธรรมชาติ เป็นยางที่ได้มาจากต้นยางพารา มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* มีต้นกำเนิดจากประเทศบราซิลในทวีปอเมริกาใต้ ก่อนกระจายตัวเข้าสู่ประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ รวมถึงประเทศไทย น้ำยางสดที่กรีดได้จากต้นยางพารามีลักษณะสีขาวข้นและมีเนื้อยางแขวนลอยอยู่ในน้ำประมาณ 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 โพแตสเซียม ฟอสฟอรัส แมงกานีส ทองแดง และเหล็ก เป็นตัวเร่งการเสื่อมสภาพของยาง (วราภรณ์, 2552)



ภาพที่ 8 โครงสร้างพื้นฐานของยางธรรมชาติ

ที่มา: พงษ์ธร (2550)

จากภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ ซึ่งว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถัน ยางธรรมชาติจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาการคงรูปโดยใช้กำมะถันได้ อย่างไรก็ตามการที่ยางธรรมชาติมีพันธะคู่ในสายโซ่โมเลกุลทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ยางธรรมชาติเกิดการเสื่อมสภาพได้ โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะสามารถเกิดผลึกได้ เช่น ที่อุณหภูมิต่ำโมเลกุลของยางบางส่วนสามารถจัดเรียงตัวได้ค่อนข้างเป็นระเบียบจึงสามารถเกิดผลึกได้ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ยางสามารถอ่อนตัวลงและกลับสู่สภาพเดิม โดยอัตราการเกิดผลึกมากที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ -26°C การเกิดผลึกนี้ทำให้ยางธรรมชาติมีความแข็งแรงและสมบัติความเป็นอีลาสติกลดลง การเกิดผลึกของยางธรรมชาติยังสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อได้รับการดึงยืด (Strain induced crystallization) ทำให้ยางบริเวณนั้นมีสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนไปอย่างชัดเจน คือเปลี่ยนสภาพจากโปร่งแสง (Transparent) ไปเป็นทึบแสง (Opaque) ซึ่งสังเกตได้ง่ายในยางคงรูปที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม และยังทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของยางเป็นระเบียบตามทิศทางที่ได้รับแรงดึง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ยกตัวอย่างเช่น เบนซีน (Benzene) เฮกเซน (Hexane) และโทลูอีน (Toluene) ทั้งนี้ยางธรรมชาติมีการละลายในตัวทำละลายดังกล่าวลดลงเมื่อยางผ่านกระบวนการคงรูป เนื่องจากการเกิดพันธะเชื่อมขวางของโมเลกุลเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ทำให้เกิดเพียงการบวมตัวเท่านั้น

2.2 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

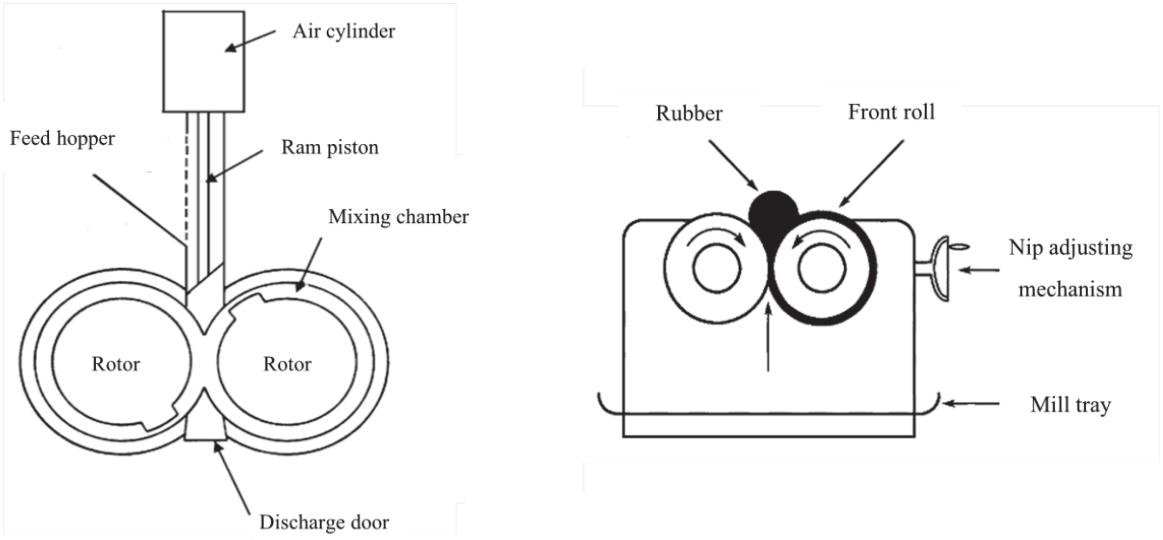
ยางธรรมชาติ เป็นยางที่มีความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง เมื่อไม่มีแรงจากภายนอกมากระทำกับยาง ยางสามารถกลับสู่ขนาดและรูปร่างเดิมได้อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อถูกดึงยืด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

3. การเตรียมยางคอมพาวนด์

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

การบดยางให้นิ่ม หรือการทำให้ยางมีความหนืดลดลง เรียกขั้นตอนนี้ว่า มาสติเคชั่น (Mastication) โดยทั่วไปแล้วจำเป็นต้องบดยางธรรมชาติให้นิ่มก่อนการเติมสารเคมีเพื่อให้สารเคมีสามารถกระจายตัวภายในเนื้อยางได้ทั่วถึง 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 แต่เครื่องบดผสมประเภทนี้มีราคาที่ค่อนข้างสูง ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดและประสิทธิภาพของเครื่อง และอีกประเภทคือเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง ดังแสดงในภาพที่ 9(ข) ซึ่งประกอบด้วยลูกกลิ้งที่ทำด้วยเหล็กหล่อผิวเรียบเรียงขนานกันในแนวนอน ลูกกลิ้งลูกหน้ามีสกรูสำหรับปรับช่องระหว่างลูกกลิ้งทั้งสองเพื่อควบคุมปริมาณการใส่ยาง การใช้เครื่องประเภทนี้ต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน



(ก) (ข)

ภาพที่ 9 เครื่องบดผสมยาง (ก) เครื่องบดผสมระบบปิด (ข) เครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง

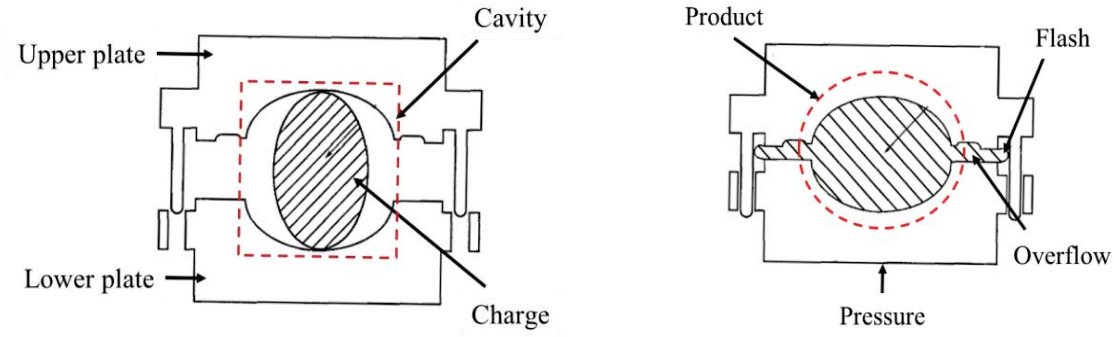
ที่มา: Funt (2009)

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) ขั้นตอนการขึ้นรูปเริ่มจากการวางยางคอมพาวนด์ลงไปในเบ้าพิมพ์ จากนั้นจึงปิดแม่พิมพ์และอัดยางคอมพาวนด์ให้ไหลจนเต็มเบ้าพิมพ์ โดยมีแท่งความร้อน (Heater rod) ให้ความร้อนกับแม่พิมพ์ เพื่อให้ยางเกิดปฏิกิริยาคงรูป นอกจากนี้ในกรณีที่ชิ้นงานมีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน สามารถใช้เทคนิคอัดและคลาย (Bumping) เพื่อไล่อากาศภายในแม่พิมพ์ออก ส่งผลให้ยางสามารถไหลเข้าแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น โดยทั่วไปแล้วควรเตรียมยางคอมพาวนด์ให้มีปริมาตรมากกว่าปริมาตรเบ้าพิมพ์ประมาณ 10% เพื่อให้ยางไหลได้เต็มแบบ และมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ ทั้งนี้ต้องมีการตัดแต่งชิ้นงานหลังนำปลดออกจากแม่พิมพ์ หากมียางไหลเกินจากเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์ (Parting line) หรือที่เรียกว่า ครีบ (Flash)



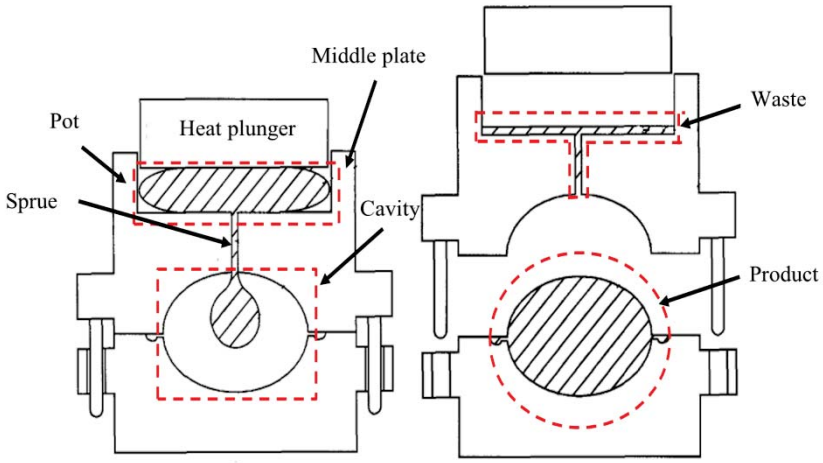
ภาพที่ 10 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป

ที่มา: Ciesielski (1999)

4.2 กระบวนการอัดส่งขึ้นรูป (Transfer molding)

กระบวนการอัดส่งขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากกระบวนการอัดขึ้นรูป เพื่อให้สามารถผลิตชิ้นงานที่ซับซ้อน และให้ความหนาแน่นของชิ้นงานมากกว่า นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมรอบเวลาการผลิตได้ดีกว่า เนื่องจากความร้อนเฉือน (Shear heating) ที่เกิดขึ้นขณะที่ยางคอมพาวนด์ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ ส่งผลให้ลดระยะเวลาในการคงรูปของยางคอมพาวนด์ภายในเบ้าพิมพ์ อย่างไรก็ตามนอกเหนือจากต้นทุนการผลิตแม่พิมพ์ที่สูงกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูปแล้ว กระบวนการอัดส่งยังมีของเสียที่เกิดจากก้านรูฉีด รวมถึงส่วนของแม่พิมพ์ด้านบนและทางวิ่ง (Runner) ที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ส่วนล่างในกรณีขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบหลายเบ้าพิมพ์ (Multiple cavities) ดังนั้นจึงเหมาะกับการผลิตในปริมาณ

มาก ส่วนประกอบของแม่พิมพ์อัดส่งขึ้นรูปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ แม่พิมพ์ส่วนบนที่มีลักษณะคล้ายแท่งกด (Plunger) แม่พิมพ์ส่วนกลาง (Middle plate) ที่มีช่องว่าง (Pot) สำหรับใส่ยางคอมพาวนด์ และเบ้าพิมพ์ส่วนล่างที่เป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในภาพที่ 11 หลักการของกระบวนการอัดส่ง คือ การใช้แม่พิมพ์แผ่นบนอัดให้ยางคอมพาวนด์ไหลผ่านรูฉีด (Sprue) เข้าสู่เบ้าพิมพ์

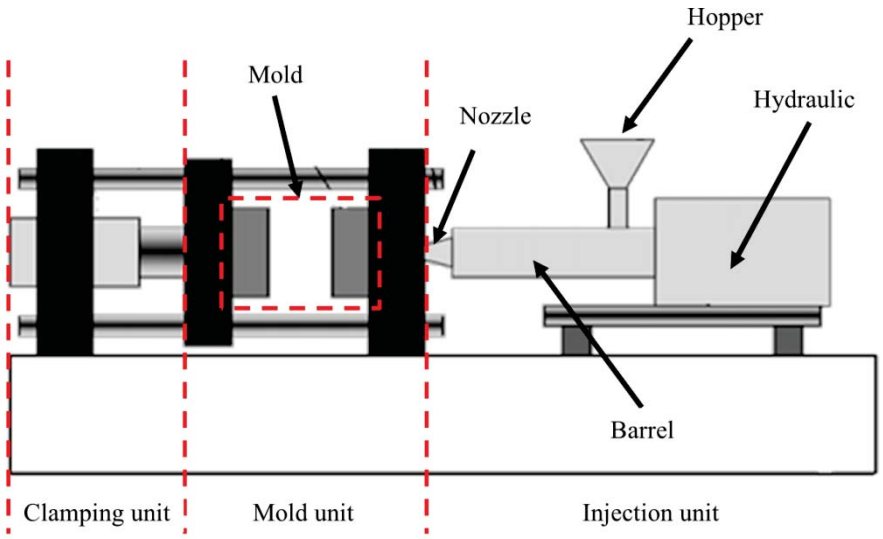


ภาพที่ 11 แม่พิมพ์อัดส่งขึ้นรูป

ที่มา: Ciesielski (1999)

4.3 กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding)

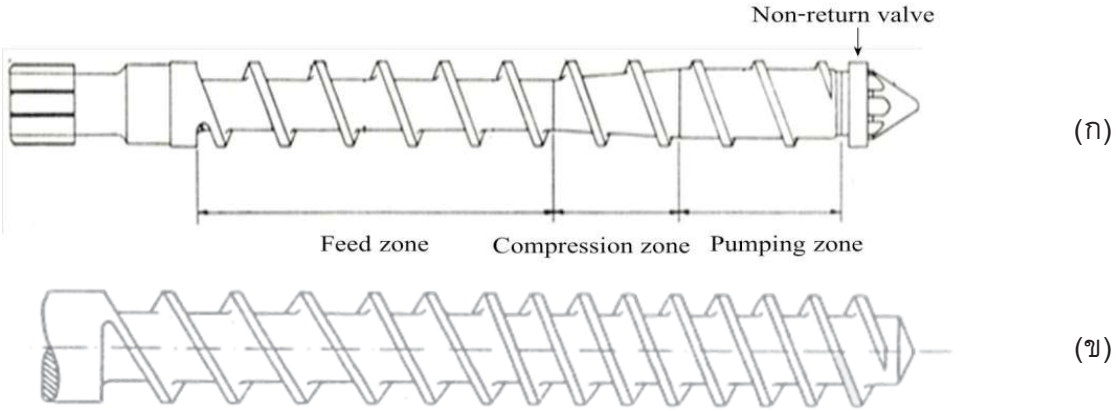
กระบวนการฉีดขึ้นรูป เป็นกระบวนการขึ้นรูปที่มีความได้เปรียบกระบวนการขึ้นรูปแบบอื่นๆ ทั้งในเรื่องของระยะเวลาการผลิต รูปร่างและความสม่ำเสมอของชิ้นงาน เนื่องจากสามารถควบคุมความเร็วและแรงดันฉีดในการฉีดขึ้นรูปได้ หลักการทั่วไปของกระบวนการฉีดขึ้นรูป คือ การใช้กระบอกสูบ (Ram) หรือสกรู (Screw) อัดเนื้อยางภายในกระบอกฉีด เนื้อยางถูกฉีดผ่านหัวฉีด (Nozzle) เข้าสู่รูฉีดของแม่พิมพ์ โดยรูฉีดเชื่อมต่อกับทางวิ่ง และทางเข้า ก่อนเข้าสู่เบ้าพิมพ์ ส่วนประกอบของเครื่องฉีดขึ้นรูป ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ดังแสดงในภาพที่ 12 ได้แก่ ชุดฉีด (Injection unit) ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ (Clamping unit) และชุดแม่พิมพ์ฉีด (Mold 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 เพื่อป้องกันการสุกตัวของยางก่อนกำหนด ในส่วนของสกรูสามารถแบ่งออกได้เป็น 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 และมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D ratio) ประมาณ 20 ถึง 25 ต่อ 1 (Verbraak and Meijer, 1989) ในขณะที่สกรูสำหรับการฉีดยางมีความลึกของร่องเกลียวเท่ากันตลอดความยาวของสกรู หรือมีอัตราส่วนการอัด เท่ากับ 1 และมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12 ถึง 16 ต่อ 1 การออกแบบดังกล่าว ส่งผลให้สามาถลดความร้อนเฉือน และระยะเวลาที่ยางคอมพาวนด์อยู่ในระบบ

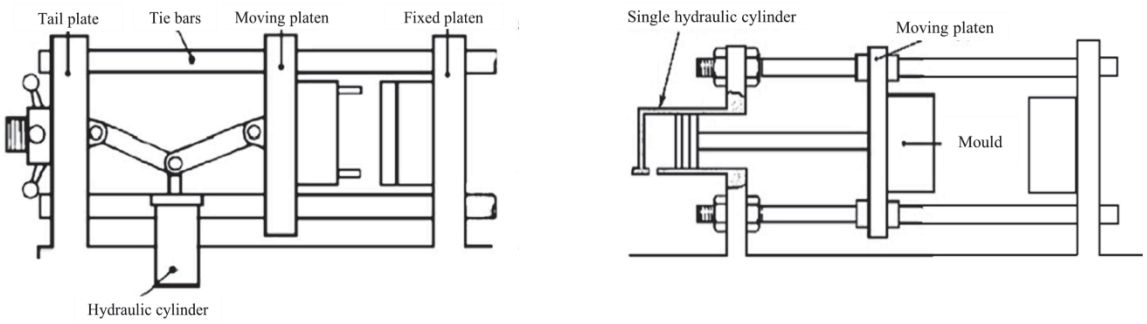
(Residence time) เพื่อป้องกันการสุกตัวก่อนกำหนด นอกจากนี้ สกรูที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปยางไม่จำเป็นต้องมีวาล์วกันไหลย้อนกลับ (Non-return valve) ที่บริเวณหัวสกรู เนื่องจากยางมีความหนืดสูงและใช้ความเร็วในการฉีดขึ้นรูปที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับการฉีดขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก



ภาพที่ 13 สกรูในเครื่องฉีดขึ้นรูป (ก) เทอร์โมพลาสติก (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 โดยใช้ระบบไฮดรอลิกหรือใช้มอเตอร์ในการขับข้อต่อเพื่อดันปิดแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 14(ก) ข้อเด่นของระบบปิด-เปิดแบบข้อพับคือมีความเร็วในการปิด-เปิดแม่พิมพ์สูง และมีระบบล็อคอัตโนมัติ (Self-locking) ทำให้ประหยัดพลังงาน อย่างไรก็ตามระบบปิด-เปิดแบบข้อพับ มีข้อจำกัดในด้านความทนทานและความแม่นยำในการใช้งาน เนื่องจากเป็นระบบทางกล จึงมีการสึกหรอสูงกว่าระบบปิด-เปิดแบบไฮดรอลิก รวมไปถึงต้องมีความหนาของแม่พิมพ์ที่เหมาะสมกับความยาวของข้อพับ เพื่อให้สามารถล็อคอัตโนมัติได้ ในขณะที่ระบบปิด-เปิดแบบไฮดรอลิก เป็นระบบที่เหมาะกับเครื่องฉีดขนาดกลางและขนาดใหญ่ มีข้อดีคือ สามารถควบคุมระยะและแรงในการปิด-เปิดได้แม่นยำ ทำให้ลดการสึกหรอ และมีความแม่นยำในการปิด-เปิดแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตามข้อด้อยของระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบไฮดรอลิก คือ มีความเร็วในการปิด-เปิดแม่พิมพ์ที่ช้าและใช้พลังงานที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบปิด-เปิดแบบข้อพับ โดยมีลักษณะในการทำงานดังแสดงในภาพที่ 14(ข)



(ก) (ข)

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

ที่มา: Jones (2008)

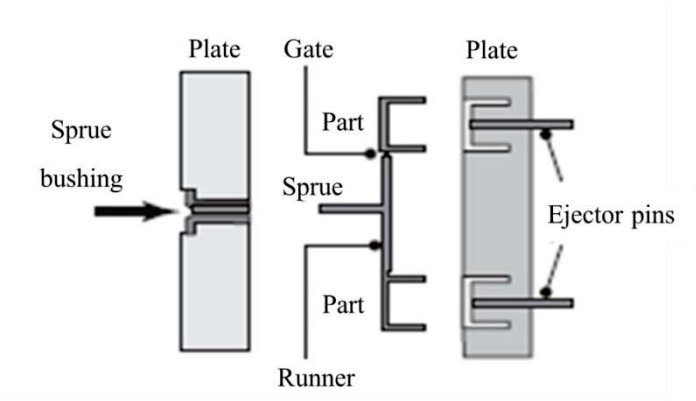
4.3.3 ชุดแม่พิมพ์ฉีด (Injection mold unit) เป็นส่วนประกอบหลักของกระบวนการฉีดขึ้นรูป ซึ่งประกอบไปด้วย รูฉีด ทางวิ่ง ทางเข้า และเบ้าพิมพ์ โดยทั่วไปการเลือกชนิดของแม่พิมพ์ฉีดขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของชิ้นงาน และเงื่อนไขต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต สำหรับแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง มีการให้ความร้อนกับแม่พิมพ์โดยการฝังแท่งความร้อน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

5. หลักการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดเบื้องต้น

ผู้ออกแบบควรพิจารณาถึงขนาดและจำนวนของชิ้นงานก่อนเป็นอันดับแรก เนื่องจากขนาดและจำนวนของชิ้นงาน ส่งผลต่อการกำหนดชนิดและขนาดของแม่พิมพ์ รวมถึงลักษณะและขนาดของเครื่องฉีด

5.1 ชนิดของแม่พิมพ์ฉีด

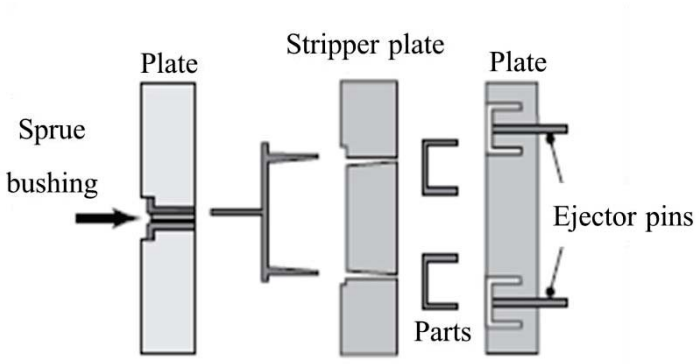
5.1.1 แม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น (Two-plate injection mold) เป็นแม่พิมพ์ที่นิยมใช้ในการผลิตชิ้นงานที่ปราศจากร่องหรือบ่า (Undercut) มีเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์ (Parting line) เพียงเส้นเดียว หรือมีตำแหน่งสำหรับปลดชิ้นงาน ทางวิ่ง และก้านรูฉีดเพียงตำแหน่งเดียว ดังแสดงในภาพที่ 15 โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีส่วนของรูฉีด ทางวิ่ง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



ภาพที่ 15 แม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น

ที่มา: Osswald *et al*. (2008)

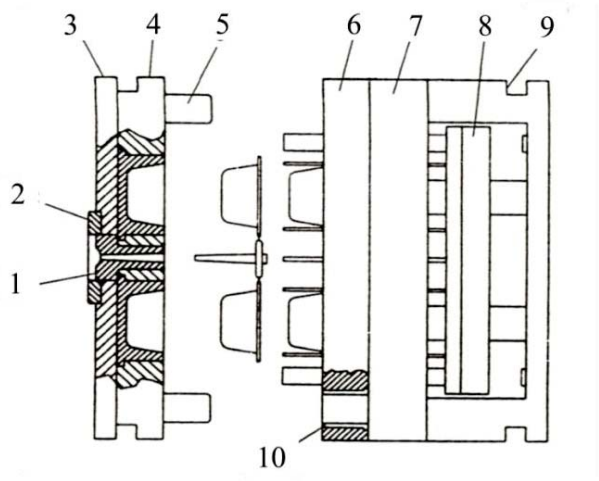
5.1.2 แม่พิมพ์แบบสามแผ่น (Three-plate injection mold) แม่พิมพ์ฉีดแบบสามแผ่นเป็นแม่พิมพ์ฉีดที่ออกแบบให้มีเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์ 2 เส้น หรือมีตำแหน่งเปิดแม่พิมพ์ 2 ตำแหน่ง ส่วนใหญ่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปที่ต้องการให้มีระบบปลดรูฉีด ทางวิ่ง และทางเข้าออกจากชิ้นงานโดยอัตโนมัติ ดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 แม่พิมพ์ฉีดแบบสามแผ่น

ที่มา: Osswald *et al.* (2008)

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น ซึ่งส่วนประกอบพื้นฐานของแม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น ดังแสดงในภาพที่ 17 โดยประกอบด้วยส่วนสำคัญ ได้แก่



ภาพที่ 17 ส่วนประกอบพื้นฐานของแม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น

ที่มา: Osswald *et al*. (2008)

1. ปลอกรูฉีด (Sprue bush) รัศมีของบ่ารับบนปลอกรูฉีดต้องมีขนาดใหญ่กว่ารัศมีของหัวฉีด และรูของปลอกรูฉีดควรมีขนาดใหญ่กว่ารูของหัวฉีดประมาณ 0.8-1 mm รูของปลอกรูฉีดมีมุมเรียวระหว่าง 3-5 องศา ทำให้ถอดแกนรูฉีดได้สะดวกขึ้น อาจใช้สลักบังคับตำแหน่งหรือสกรูยึด เพื่อป้องกันไม่ให้ปลอกรูฉีดส่วนที่อยู่ติดกับทางวิ่งหมุนเลื่อนตำแหน่งขณะใช้งานได้ รวมถึงเพื่อป้องกันไม่ให้ปลอกรูฉีดเคลื่อนที่ถอยหลัง โดยการทำเป็นบ่าที่ปลายและยึดด้วยแหวนบังคับศูนย์

2. แหวนบังคับศูนย์ (Locating ring) ทำหน้าที่กำหนดให้แม่พิมพ์วางตัวอยู่ในตำแหน่งแนวการฉีด และกำหนดตำแหน่งของแม่พิมพ์ให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องบนหน้าแปลนของเครื่องฉีด โดยควรสวมเข้ากับรูทรงกระบอกบนหน้าแปลนได้พอดี

3. แผ่นยึดด้านบน (Fixed base plate) ทำหน้าที่ยึดแม่พิมพ์ส่วนที่อยู่กับที่เข้ากับหน้าแปลนของเครื่องฉีด

4. แผ่นเบ้าพิมพ์ (Fixed cavity plate) เป็นส่วนกำหนดผิวรอบนอกของชิ้นงาน

5. เพลานำ (Guide pin) ทำหน้าที่ปรับตำแหน่งของหน้าสัมผัสแม่พิมพ์ และทำหน้าที่คล้ายสลักบังคับตำแหน่ง โดยให้เพลานำตัวหนึ่งใหญ่กว่าอีกตัวหนึ่งหรือเยื้องศูนย์ออกจากตำแหน่งปกติ ควรติดตั้งเพลานำตั้งแต่ 2-4 ตัว สำหรับแม่พิมพ์แบบสี่เหลี่ยม และ 3 ตัว สำหรับแม่พิมพ์แบบทรงกระบอกบาง เพลานำถูกออกแบบให้สวมพอดีกับปลอกนำ และขยายรูทางด้านหลังของปลอกนำให้ใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพลานำ เส้นผ่านศูนย์กลางของเพลานำควรมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของปลอกนำ อย่างน้อย 7 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลานำต่อขนาดของแม่พิมพ์แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลานำต่อขนาดของแม่พิมพ์

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลานำ (mm)	ขนาดของแม่พิมพ์ (mm)
10	125x125 – 125x156
14	156x156 – 196x396
18	246x246 – 246x496
22	296x296 – 346x594
30	396x396 – 544x594
38	594x594

ที่มา: ชาลี (2546)

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

7. แผ่นรองหลัง (Spacer block) เป็นแผ่นรองรับชิ้นส่วนของอินเสิร์ทส่วนคอร์หรือของแผ่นคอร์ ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับแม่พิมพ์

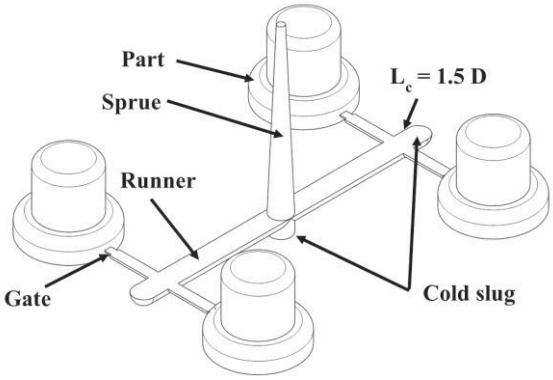
8. ระบบปลด (Ejection system) มีแผ่นตัวปลด (Ejector plate) ทำหน้าที่กำหนดและรักษาตำแหน่งของก้านกระทุ้งในแนวนอนขณะเคลื่อนที่

9. แผ่นฐานยึดล่าง (Bottom clamping plate) ทำหน้าที่ยึดแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องฉีดโดยใช้สกรูยึด มีรูบริเวณตรงกลางของแผ่นฐานยึดล่างเพื่อรับกับเพลากระทุ้งของเครื่องฉีด

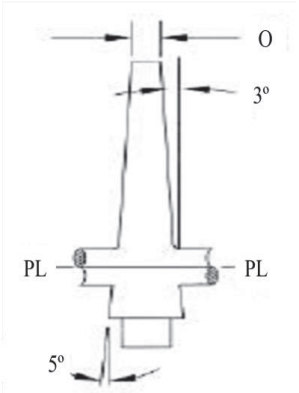
10. ปลอกนำ (Guide bushing) ทำหน้าที่สวมเข้ากับเพลานำ เพื่อช่วยในการกำหนดตำแหน่งขณะประกอบแม่พิมพ์

5.2 การออกแบบรูฉีด

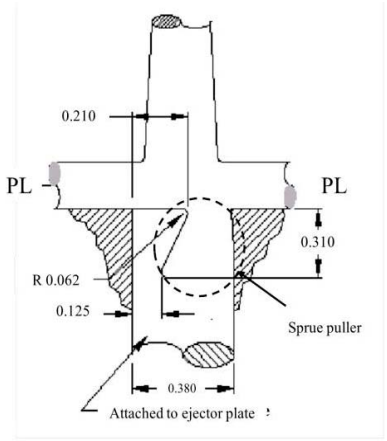
รูฉีดเป็นส่วนที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลจากหัวฉีดเข้าสู่ทางวิ่ง และมีบ่อพักเย็น (Cold slug) เพื่อป้องกันการแข็งตัวที่บริเวณด้านหน้าของพอลิเมอร์หลอมเหลว รวมถึงช่วยในการดึงก้านรูฉีดออกจากสลักรูฉีด (Sprue puller) บ่อพักเย็นควรอยู่ในตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลตั้งฉากกับทิศทางเดิม เช่น ด้านใต้ของก้านรูฉีด หรือที่ปลายของทางวิ่ง โดยมีความยาวประมาณ 1.5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางวิ่ง (Beaumont, 2004) ดังแสดงในภาพที่ 18



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 18 ก้านรูฉีดและบ่อพักเย็น (ก) ตำแหน่งของบ่อพักเย็น (ข) ขนาดของก้านรูฉีด (ค) ขนาดของสลักรูฉีดและบ่อพักเย็น

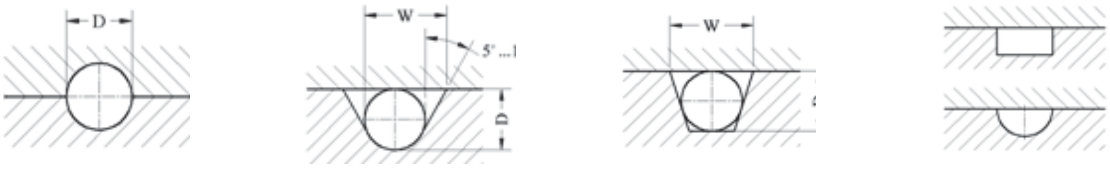
ที่มา: Harper (2006)

5.3 การออกแบบทางวิ่ง

ทางวิ่งทำหน้าที่นำพาพอลิเมอร์หลอมเหลวจากรูฉีดเข้าสู่เบ้าพิมพ์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ทางวิ่งเย็น (Cold runner) และทางวิ่งร้อน (Hot runner) โดยทางวิ่งเย็น เป็นทางวิ่งที่อยู่ในระนาบเดียวกับชิ้นงาน ทำให้ติดกับชิ้นงานเมื่อปลดออก นิยมใช้กับแม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น ข้อดีของทางวิ่งเย็น คือ มีราคาถูกและออกแบบได้ง่าย อย่างไรก็ตามต้องมีการตัดแต่งชิ้นงานภายหลังจากกระบวนการฉีดขึ้นรูป ต่างกับทางวิ่งร้อนที่ใช้ร่วมกับแม่พิมพ์แบบสามแผ่น ซึ่งให้ความร้อนเพื่อรักษาอุณหภูมิของพอลิเมอร์ให้อยู่ในช่วงของการหลอมเหลว ส่งผลให้พอลิเมอร์หลอมเหลวในทางวิ่งร้อนสามารถใช้ในรอบการฉีดถัดไปได้ โดยไม่เป็นของเสียในกระบวนการผลิต ทำให้ใช้แรงดันฉีดน้อยกว่าต้องการแรงปิดแม่พิมพ์น้อยกว่า อย่างไรก็ตามข้อด้อยของระบบทางวิ่งร้อน คือ แม่พิมพ์และอุปกรณ์ที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปมีราคาสูงกว่าระบบทางวิ่งเย็น อีกทั้งการใช้ทางเข้าแบบเข็มสำหรับทางวิ่งร้อน ซึ่งมี

ขนาดเล็ก ส่งผลให้เกิดความร้อนเฉือนสูง ทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวเกิดการเสื่อมสภาพได้ ทางวิ่งแบบร้อนจึงไม่เหมาะกับการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

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



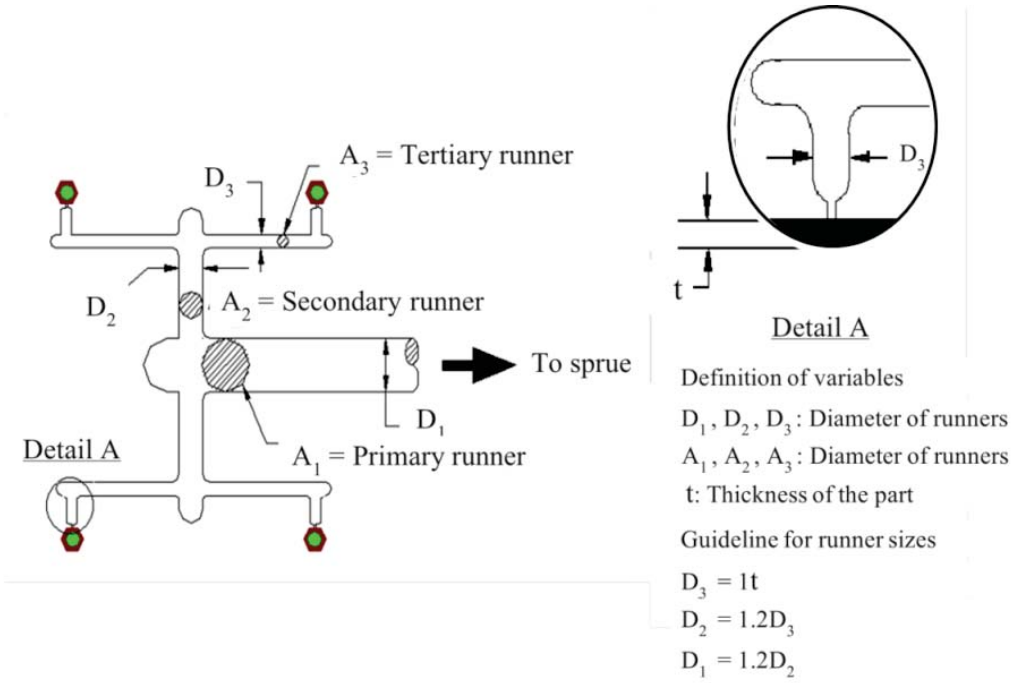
(ก) (ข) (ค) (ง)

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

ที่มา: ชาลี (2546)

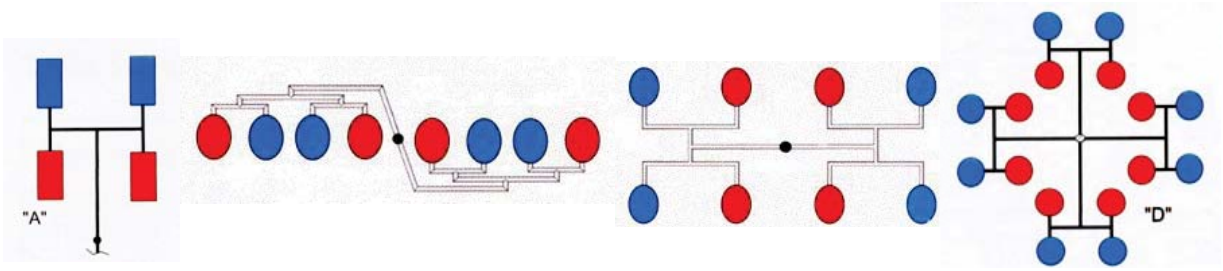
ทางวิ่งแบบกลม มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับพอลิเมอร์หลอมเหลวที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแบบอื่นๆ ส่งผลให้มีการสูญเสียความร้อนและความเสียดทานน้อย จึงมีอัตราการเย็นตัวที่ช้าที่สุด สามารถให้แรงดันฉีดและแรงดันคงค้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม รอยต่อของทางวิ่งบนแม่พิมพ์ทั้งสองด้านต้องประกบตรงกันพอดี ซึ่งอาศัยความเที่ยงตรง (Precision) มาก จึงมีค่าใช้จ่ายและเวลาในการผลิตสูง ในส่วนของทางวิ่งแบบพาราโบลิก มีลักษณะคล้ายกับหน้าตัดรูปวงกลม สามารถผลิตได้ง่ายกว่า เนื่องจากมีการกัดเซาะร่องที่แผ่นแม่พิมพ์เพียงด้านเดียว ทางวิ่งแบบนี้มีการสูญเสียความร้อนมากกว่าทางวิ่งแบบกลม เช่นเดียวกับทางวิ่งแบบสี่เหลี่ยมคางหมู ถึงแม้ว่าการกัดเซาะร่องทำได้ง่ายกว่าแบบพาราโบลิก แต่มีการสูญเสียความร้อนมากกว่า สำหรับทางวิ่งแบบสี่เหลี่ยมและครึ่งวงกลม เป็นลักษณะของทางวิ่งที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลวมาก มีการสูญเสียความร้อนและมีความเสียดทานสูง ส่งผลให้มีอัตราการเย็นตัวเร็วกว่าเมื่อเทียบกับทางวิ่งในลักษณะอื่นๆ อย่างไรก็ตาม ทางวิ่งแบบสี่เหลี่ยมและครึ่งวงกลมมีข้อเด่นในเรื่องของการกัดเซาะร่องที่ทำได้ง่าย

5.3.2 ขนาดของทางวิ่ง ผู้ออกแบบต้องพิจารณาถึงขนาดของทางวิ่งให้เหมาะสมกับขนาดของชิ้นงาน โดยทั่วไปขนาดของทางวิ่งลำดับสาม (Tertiary runner) ควรมีขนาดเท่ากับความหนาของชิ้นงาน และทางวิ่งรอง (Secondary runner) ควรมีขนาด 1.2 เท่าของทางวิ่งลำดับสาม เช่นเดียวกับทางวิ่งหลักซึ่งมีขนาดเท่ากับ 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 โดยระยะทางที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลจากรูฉีดไปยังทางเข้าของชิ้นงานในแต่ละเบ้าพิมพ์ต้องเท่ากัน เพื่อให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลเต็มเบ้าพิมพ์ได้พร้อมๆ กัน ตัวอย่างการจัดวางทางวิ่งแบบสมมาตรแสดงดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ตัวอย่างการจัดวางแบบทางวิ่งแบบสมมาตร

5.4 การออกแบบทางเข้า

การออกแบบทางเข้าต้องพิจารณาถึงชนิด (Type) จำนวน (Number) และตำแหน่ง (Location) ควรออกแบบทางเข้าให้อยู่บริเวณที่มีความหนามากที่สุดของชิ้นงาน รวมถึงควรเป็นตำแหน่งที่ส่งผลให้เกิดรอยประสานขึ้นบนบริเวณที่ไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน ทางเข้าควรมีขนาดเล็กและบาง เพื่อให้ง่ายต่อการตัดออกจากชิ้นงานภายหลังการขึ้นรูป รวมถึงเพื่อเพิ่มความเร็วในการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว ส่งผลให้ความหนืดของพอลิเมอร์ลดลงเนื่องจากความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้น และไหลเข้าสู่เบ้าพิมพ์ได้ง่ายขึ้น ในขณะที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลเต็มเบ้าพิมพ์ ทางเข้าที่บางยังทำหน้าที่ป้องกันพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลย้อนกลับเมื่อสกรูหมุนถอยหลังเพื่อเตรียมเนื้อในรอบการฉีดถัดไป เนื่องจากเป็นส่วนที่แข็งตัวเร็วที่สุด อย่างไรก็ตาม ทางเข้าที่มีขนาดเล็กและบาง ส่งผลให้เกิดอัตราเครียดเฉือนสูงขึ้น หากอัตราเครียดเฉือนมีค่าสูงเกินไป อาจส่งผลให้เกิดความร้อนสูงขึ้น เกิดการเสื่อมสภาพ หรือเกิดการคงรูปบางส่วนในกรณีของยางได้ ยกตัวอย่างเช่น อัตราเครียดเฉือนที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปยางควรมีค่าไม่เกิน 1,000 s^{-1} (Isayev, 1991) เป็นต้น ค่าอัตราเครียดเฉือนสามารถคำนวณได้จากสมการสำหรับการไหลผ่านทางเข้าที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยม (Slit die) และหน้าตัดกลม (Circular die) รวมถึงแบ่งตามสมบัติการไหลของของไหลทั้งแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid) และนอนนิวโตเนียนแบบซูโดพลาสติก (Non-newtonian pseudoplastic fluid) ดังแสดงในตารางที่ 2

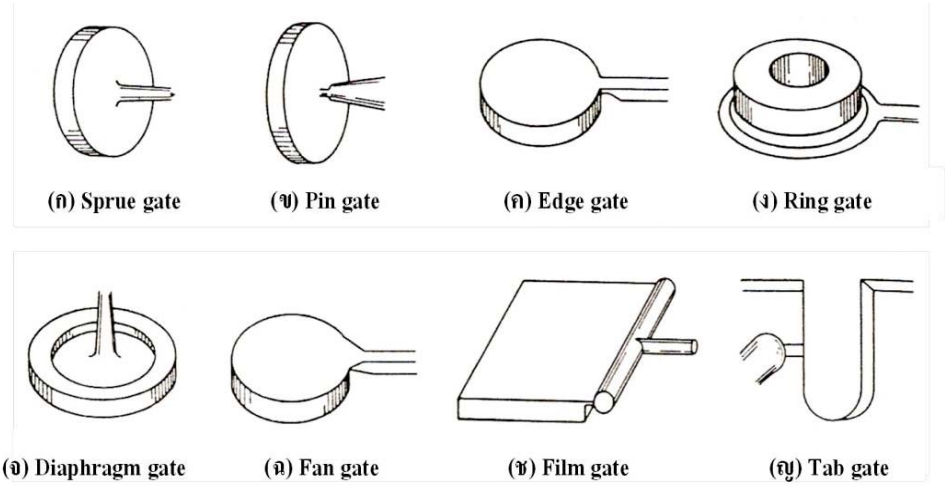
ตารางที่ 2 สมการอัตราเครียดเฉือน

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 ($m^3 s^{-1}$)
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 ดังแสดงในภาพที่ 22 ซึ่งได้แก่



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

ที่มา: Beaumont (2004)

5.4.1 ทางเข้าแบบก้านรูฉีด เป็นทางเข้าที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลเข้าสู่เบ้าพิมพ์โดยตรงจากรูฉีด เหมาะสำหรับการฉีดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ สามารถฉีดได้เพียง 1 เบ้าพิมพ์ ในกรณีของแม่พิมพ์แบบสองแผ่น และควรมีความยาวของทางเข้าสั้นที่สุดเท่าที่ทำได้

5.4.2 ทางเข้าแบบเข็ม เหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและมีลักษณะซับซ้อน โดยมีจุดเด่น คือ ตำหนิบริเวณทางเข้ามีขนาดเล็ก ขนาดของทางเข้าแบบเข็มที่เหมาะสม คือ มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 40-50% ของความหนาของผนังชิ้นงาน และมีความยาวของทางเข้าประมาณ 0.5-0.75 mm

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

5.4.4 ทางเข้าแบบวงแหวน มีลักษณะเหมือนทางเข้าแบบม่าน เหมาะกับชิ้นงานที่เป็นลักษณะท่อในแม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่นที่มีเบ้าพิมพ์มากกว่าหนึ่งชุด ทางเข้าแบบวงแหวนมีทางเข้าของพอลิเมอร์หลอมเหลวรอบๆ ผิวเส้นรอบวงด้านนอกของชิ้นงาน ทำให้ช่วยลดผลกระทบจากการไหลแบบ Hesitation

5.4.5 ทางเข้าแบบม่าน มีรูฉีดเชื่อมต่อไปจนถึงทางเข้าที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของท่อเล็กน้อย พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลจากรูฉีดออกไปรอบๆ เป็นรัศมีเข้าไปยังชิ้นงาน ความหนาของทางเข้าแบบม่านที่จุดเริ่มต้นควรมีความหนาอยู่ที่ 125% ของความหนาของผนังและมีความหนาก่อนเข้าชิ้นงาน 50-70% ของความหนาผนัง โดยมีความยาวทางเข้าประมาณ 0.5 mm

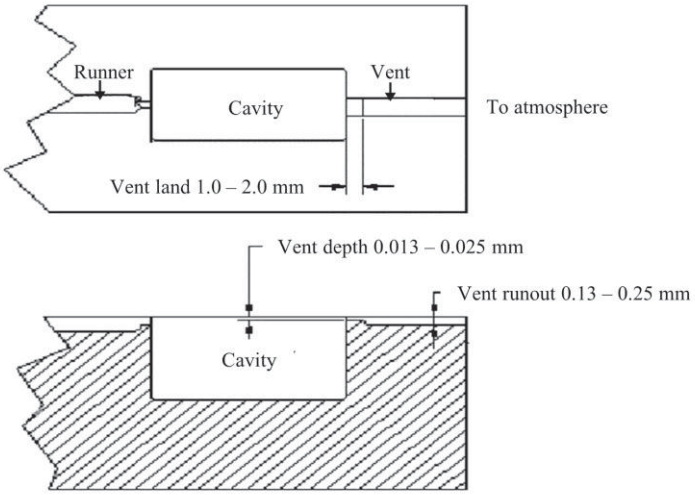
5.4.6 ทางเข้าแบบพัด เป็นทางเข้าที่อยู่บริเวณขอบของชิ้นงานเช่นเดียวกับทางเข้าแบบขอบ แต่มีขนาดความกว้างมากกว่า ทางเข้าแบบพัดเหมาะกับชิ้นงานที่กว้างและมีผนังบาง เนื่องจากทางเข้าแบบพัดมีการไหลที่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม จากความกว้างของทางเข้า ทำให้หลงเหลือรอยตำหนิขนาดใหญ่บนชิ้นงาน ทางเข้าควรมีความหนาไม่เกิน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

5.4.7 ทางเข้าแบบฟิล์ม มีลักษณะเหมือนทางเข้าแบบขอบสี่เหลี่ยมที่มีขนาดยาว โดยวางตำแหน่งทางเข้าขนานไปตลอดความกว้างของชิ้นงาน แต่อาจให้มีความหนาที่บางลงได้ ช่วยประหยัดเวลาในการตัดแต่งผิวชิ้นงานหลังการฉีด ทางเข้าแบบฟิล์มมีพื้นที่การไหลมาก ส่งผลให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลเต็มเบ้าพิมพ์ได้เร็ว แต่อาจมีข้อด้อยคือ เกิดรอยตำหนิบนผิวชิ้นงานกว้างและต้องตัดแต่งชิ้นงาน โดยทั่วไปมีความหนาของทางเข้าอยู่ที่ 0.25-1.5 mm

5.4.8 ทางเข้าแบบแถบ โดยทั่วไปใช้กับชิ้นงานที่แบนและบาง เพื่อลดความเค้นเฉือนในเบ้าพิมพ์ โดยฉีดเข้าทางด้านข้างของชิ้นงาน รอยต่อระหว่างทางวิ่งกับทางเข้าแบบแถบทำเป็นมุมฉากเพื่อป้องกันไม่ให้พลาสติกหลอมเหลวพุ่งเข้าสู่เบ้าพิมพ์และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้พอลิเมอร์ไหลเข้าเบ้าพิมพ์ได้อย่างสม่ำเสมอ ทางเข้าแบบแถบควรมีความหนาอย่างน้อย 75% ของความหนาผนังชิ้นงาน

5.5 การออกแบบช่องระบายอากาศ (Venting design)

ในขณะที่พอลิเมอร์หลอมเหลวถูกฉีด และเข้าไปแทนที่อากาศภายในเบ้าพิมพ์ อากาศบางส่วนสามารถระบายออกทางเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์และสลักปลดได้ อย่างไรก็ตาม แม่พิมพ์ยังคงต้องการการติดตั้งช่องระบายอากาศเพิ่มเติมที่บริเวณอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่น บริเวณสุดท้ายของชิ้นงานที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลไปถึง และบริเวณตำแหน่งรอยประสานเป็นต้น ช่องระบายอากาศควรมีความลึก (Vent depth) จากเส้นแบ่งส่วนของแม่พิมพ์ ในช่วงระหว่าง 0.013 ถึง 0.025 mm มีความยาว (Vent land) ประมาณ 1 ถึง 2 mm และมีความลึกจากปลายของช่องระบายอากาศออกสู่ภายนอกแม่พิมพ์ (Vent runout) ประมาณ 0.13-0.25 mm ดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ขนาดของช่องระบายอากาศ

6. การวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

ในปัจจุบันมีการนำคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม มาใช้ในการจำลองและวิเคราะห์การไหลในกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยสามารถวิเคราะห์การไหลที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ และประเมินความสำเร็จของการออกแบบชิ้นงาน รวมถึงพิจารณาข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้น ทำให้สามารถหาสาเหตุและแก้ไขชิ้นงานที่มีข้อบกพร่องได้ก่อนกระบวนการผลิตจริง ส่งผลให้สามารถลดต้นทุนในการผลิต และป้องกันการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงาน ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการจำลองการไหล ได้แก่ Moldflow Cadmould Moldex และ 3D Sigma เป็นต้น แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการจำลองการไหลมีลักษณะเป็นโครงสร้างตาข่าย (Mesh) ประเภทต่างๆ โดยโครงสร้างตาข่ายเหล่านี้ เกิดจากการแบ่งรูปทรงของชิ้นงานออกเป็นส่วนย่อยๆ 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) รวมถึงอินเสิร์ทของแม่พิมพ์ (Mold insert)

3. เอลิเมนต์ชนิด 3 มิติ หรือแบบพีระมิดฐานสามเหลี่ยม (Tetrahedron) เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างโหนดสี่โหนด สามารถใช้ในการจำลองส่วนต่างๆ ของแบบจำลองการไหล ยกตัวอย่างเช่น รูปทรงของชิ้นงาน คอร์ของแม่พิมพ์ (Cores) หรือระบบการฉีด เป็นต้น

6.1 โครงสร้างตาข่ายในการจำลองการฉีด

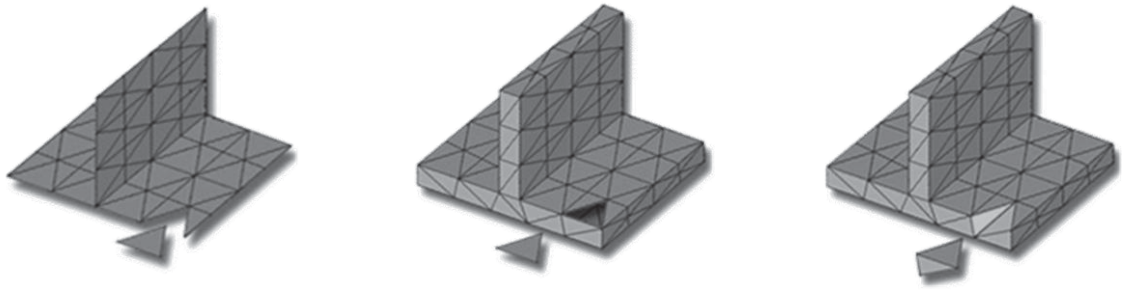
โครงสร้างตาข่ายที่ใช้ในการจำลองการฉีดสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

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 หรือชนิดคานเข้ามาผสมผสานเพื่อจำลองระบบการฉีดหรือระบบหล่อเย็นของแบบจำลองการไหลได้



(ก) (ข) (ค)

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

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

- การพาความร้อน (Heat convection) ในทิศทางความหนามีค่าน้อยมาก 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 โดยสามารถกำหนดรูปทรงและขนาดของพื้นที่หน้าตัดได้ 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 (Bagley correction) เพื่อชดเชยแรงดัน ความเค้นเฉือน และอัตราเครียดเฉือนที่เปลี่ยนแปลงไป การใช้เอลิเมนต์ชนิด 1 มิติ มีข้อด้อยอยู่ที่ไม่สามารถวิเคราะห์การเสียสมดุลจากการเหนี่ยวนำโดยแรงเฉือน (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 อย่างไรก็ตามรูปทรงของชิ้นงานที่สามารถจำลองได้ด้วยโครงสร้างเครือข่ายชนิดนี้มีข้อจำกัด โดยอัตราส่วนของความกว้างต่อความหนาในแต่ละส่วนของชิ้นงานควรมีค่าอย่างน้อยประมาณ 4 ต่อ 1 (Shoemaker, 2008) เพื่อไม่ให้ผลการวิเคราะห์เกิดความคลาดเคลื่อน (Error) มากเกินไป

- เอลิเมนต์ชนิด 2 มิติ หรือแบบแผ่นผิวสามเหลี่ยมในโครงสร้างตาข่ายแบบ 2.5 มิติ (Dual domain) สามารถนำมาใช้ในการจำลองชิ้นงาน 3 มิติ โดยกำหนดเอลิเมนต์แบบแผ่นผิว 2 มิติลงบนแผ่นผิวนอก (Surface) ของชิ้นงาน 3 มิติ อาศัยหลักการเดียวกับโครงสร้างตาข่ายแบบ 2 มิติ แต่มีข้อแตกต่างกับโครงสร้างเครือข่ายแบบ 2 มิติ ในการคำนวณความหนาของชิ้นงาน โดยโครงสร้างตาข่ายแบบ 2.5 มิติ มีการคำนวณความหนาของชิ้นงานจากระยะห่างระหว่างเอลิเมนต์ที่อยู่ตรงข้ามกันในทิศทางความหนา ดังนั้นเอลิเมนต์ในแต่ละด้านของชิ้นงานในทิศทางความหนาต้องได้รับการจัดเรียงให้ตรงกัน เพื่อให้การคำนวณความหนาเป็นไปอย่างเหมาะสม เพราะฉะนั้นความหนาแน่น และการกระจายตัวของเอลิเมนต์จึงมีผลอย่างมากต่อความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ อาจเรียกโครงสร้างตา

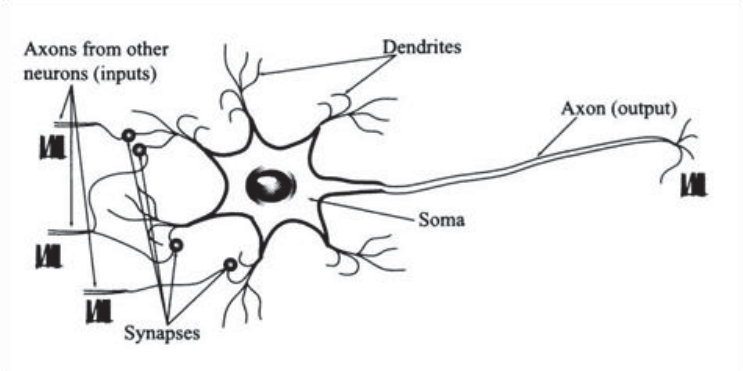
ข่ายที่ประกอบจากเอลิเมนต์ชนิดนี้ได้ว่าโครงสร้างตาข่ายแบบ 2.5 มิติ แบบปรับปรุง หรือแบบ 2.5D modified โครงสร้างเครือข่ายควรมีการจัดเรียงเอลิเมนต์ในแต่ละฝั่งตรงข้ามของทิศทางความหนาให้ตรงกันอย่างน้อย 85% โดยประมาณ

6.2.3 โครงสร้างตาข่ายแบบ 3 มิติ มีสมมติฐานในการจำลองการไหลของโครงสร้างตาข่ายแบบ 3 มิติ ได้แก่

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

7. แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

เครือข่ายประสาทเทียม เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการประมวลผลข้อมูล โดยจำลองจากการทำงานของเครือข่ายประสาทของสิ่งมีชีวิต ดังแสดงในภาพที่ 25 ซึ่งประกอบด้วยส่วนของการประมวลผลที่เรียกว่า นิวรอน (Neuron) เมื่อสัมผัสกับวัตถุชนิดหนึ่ง นิวรอนตัวแรกเป็นตัวกำหนดลักษณะของสัญญาณ โดยมีใยประสาท (Dendrites) ทำหน้าที่รับสัญญาณผ่านเส้นใยประสาท และส่งสัญญาณไปยังตัวเซลล์ (Soma) หลังจากนั้นตัวเซลล์มีการประมวลผลโดยการรวมสัญญาณ และแปลงสัญญาณออกไปเป็นสัญญาณซึ่งมีความถี่แตกต่างกับตอนแรก และส่งสัญญาณนี้ออกไปยังแกนประสาทนำออก (Axon) ในแต่ละเครือข่ายประสาทที่เชื่อมต่อกัน โดยจุดประสานประสาท (Synapse) สัญญาณนี้ส่งต่อกันไปจนกระทั่งสามารถรับรู้ได้ถึงลักษณะของวัตถุชิ้นนั้น



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) เพื่อให้เครือข่ายสามารถแยกแยะรูปแบบของข้อมูลนำเข้าแบบใหม่ๆ ที่ตัวเครือข่ายไม่รู้จักมาก่อนได้ และใช้การคำนวณเชิงนิวรอน (Neural computing) ซึ่งเป็นกระบวนการคำนวณหรือประมวลผลข้อมูล โดยใช้โครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียมในการตอบสนองเชิงปรับตัวได้กับข้อมูลนำเข้าของระบบตามกฎการเรียนรู้ของเครือข่าย แต่ละนิวรอนสามารถมีข้อมูลนำเข้าได้หลายข้อมูล แต่มีข้อมูลส่งออกเพียงข้อมูลเดียว แต่ละข้อมูลส่งออกถูกส่งแยกไปยังข้อมูลนำเข้าของนิวรอนอื่นๆ ภายในเครือข่าย ซึ่งมีค่าถ่วงน้ำหนักเป็นตัวกำหนดกำลังของการติดต่อภายในและช่วยในการตัดสินใจ การทำงานของนิวรอนในบางเครือข่ายถูกกำหนดไว้ตายตัว หรือกำหนดให้สามารถปรับเปลี่ยนได้ โดยเป็นการปรับแต่งจากภายนอกเครือข่าย หรือนิวรอนสามารถปรับได้ด้วยตัวเอง ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการเรียนรู้ และจดจำของเครือข่ายประสาทเทียม

นิวรอนเป็นหน่วยประมวลผลพื้นฐานที่สำคัญในการทำงานของเครือข่ายประสาทเทียม (ปรมินทร์, 2544) มีองค์ประกอบ 3 ส่วน คือ

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

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

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

จากความสามารถในการจำลองพฤติกรรมทางกายภาพของระบบที่มีความซับซ้อนจากข้อมูลที่ป้อนเพื่อให้มีการเรียนรู้ ทำให้มีการนำเครือข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้งานเป็นจำนวนมาก เช่น

งานการจดจำรูปแบบที่มีความไม่แน่นอน งานการประมาณค่าฟังก์ชันหรือการประมาณความสัมพันธ์ งานที่สิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอเนื่องจากวงจรเครือข่ายประสาทเทียมสามารถปรับตัวเองได้ การวิเคราะห์และออกแบบระบบที่ช่วยในการแนะนำผู้ปฏิบัติงาน การควบคุมระบบปรับอากาศของอาคารเพื่อให้ประหยัดพลังงานมากที่สุดในขณะที่ยังรักษาสมรรถนะของระบบไว้สูงสุด การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองพฤติกรรมของวัสดุที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง (Shen and Zhai *et al*., 2004) หรือใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ (Sadeghi, 2000; Kenig *et al*., 2001) เป็นต้น อย่างไรก็ตามกระบวนการพัฒนาแบบจำลองจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลที่มากพอเพื่อให้เกิดความแม่นยำ 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 เครือข่ายเพอร์เซ็พตรอนแบบชั้นเดียว (Single-layer perceptron) เครือข่ายเพอร์เซ็พตรอนแบบหลายชั้น (Multilayer perceptron) และฟังก์ชันฐานหลักรัศมี (Radial basis function) เป็นต้น เครือข่ายแบบนี้เหมาะสมกับงานทั่วไปที่มีความสัมพันธ์ของตัวแปรไม่ซับซ้อน

2. เครือข่ายย้อนกลับ (Recurrent networks) มีการเชื่อมต่อภายในระหว่างนิวรอนในรูปแบบป้อนกลับหรือวงรอบ ข้อมูลสามารถส่งผ่านไปได้อย่างอิสระทั้งในลำดับชั้นถัดไป ชั้นก่อนหน้าหรือชั้นเดียวกัน โครงสร้างลักษณะนี้ได้แก่ เครือข่ายการแข่งขัน (Competitive network) แผนผังจัดการตัวเอง (Self-Organizing Map, SOM) และเครือข่ายฮอพฟิลด์ (Hopfield) เป็นต้น เครือข่ายย้อนกลับเหมาะสำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อนมากกว่าเครือข่ายไปข้างหน้า แต่นำมาประยุกต์ใช้ได้ยากกว่า เนื่องจากความซับซ้อนของแบบจำลองที่ต้องอาศัยเวลาในการเรียนรู้นาน และใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการสร้างเครือข่ายประสาทเทียมที่มีความแม่นยำในการคำนวณ

เครือข่ายประสาทเทียมสามารถแบ่งได้อีกตามลักษณะของการเรียนรู้ ซึ่งขั้นตอนการเรียนรู้นับว่ามีความสำคัญมากในการสอนเครือข่ายให้สามารถทำงานได้ 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 ทำให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนหรือความผิดพลาดออกมา 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

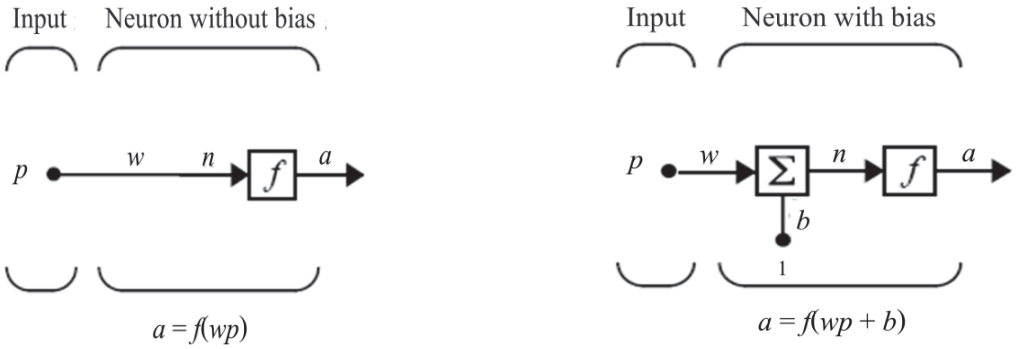
$$n = wp \tag{16}$$

$$a = f(n) = f(wp) \tag{17}$$

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

$$n = wp+b \tag{18}$$

$$a = f(n) = f(wp+b) \tag{19}$$



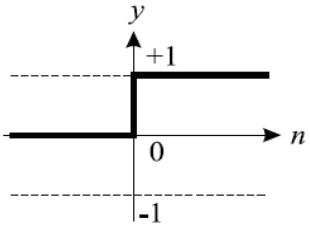
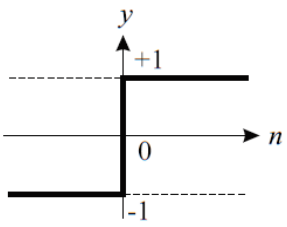
(ก) (ข)

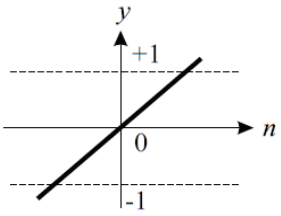
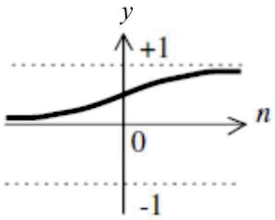
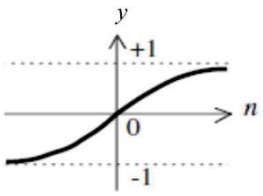
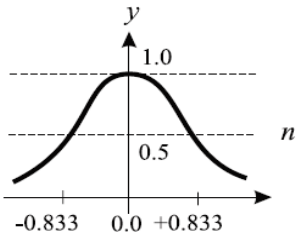
ภาพที่ 26 โครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียมหนึ่งหน่วยแบบง่าย (ก) แบบไม่มีไบแอส และ (ข) แบบมีไบแอส

ที่มา: Demuth *et al*. (2008)

ค่าข้อมูลส่งออกที่แท้จริงขึ้นอยู่กับฟังก์ชันถ่ายโอนที่เลือกใช้ ส่วนค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสสามารถปรับค่าได้จากกฎการเรียนรู้ โดยฟังก์ชันถ่ายโอนทำหน้าที่รวมค่าเชิงตัวเลขจากข้อมูลส่งออกของนิวรอน แล้วตัดสินใจเลือกรูปแบบของสัญญาณข้อมูลส่งออก การเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบที่นำเอาเครือข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้ ฟังก์ชันถ่ายโอนที่นิยมใช้ในปัจจุบันแสดงดังตารางที่ 3

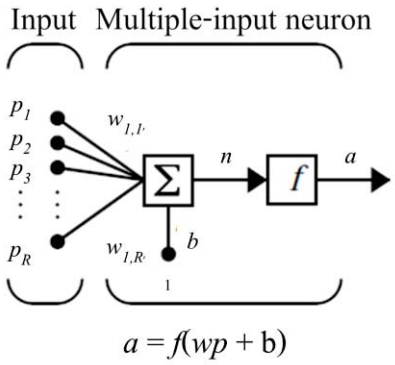
ตารางที่ 3 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบต่างๆ

ชื่อฟังก์ชัน	สมการความสัมพันธ์	กราฟความสัมพันธ์
Hard limit	$f(n) = \begin{cases} 0; & n<0 \\ 1; & n\geq 0 \end{cases}$	
Symmetrical hard limit	$f(n) = \begin{cases} -1; & n<0 \\ 1; & n\geq 0 \end{cases}$	

ชื่อฟังก์ชัน	สมการความสัมพันธ์	กราฟความสัมพันธ์
Linear	$f(n) = n$	
Log-sigmoid	$f(n) = \frac{1}{1+e^{-n}}$	
Tan-sigmoid	$f(n) = \frac{e^{n} - e^{-n}}{e^{n} + e^{-n}}$	
Radial basis function	$f(n) = e^{-n^2}$	

ที่มา: Demuth *et al*. (2008)

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

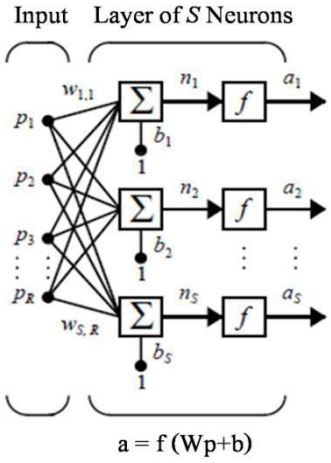


ภาพที่ 27 เครือข่ายประสาทเทียมหนึ่งหน่วยแบบหลายข้อมูลนำเข้า

ที่มา: Demuth *et al*. (2008)

7.2.2 สถาปัตยกรรมการเชื่อมต่อกันเป็นเครือข่ายของนิวรอน

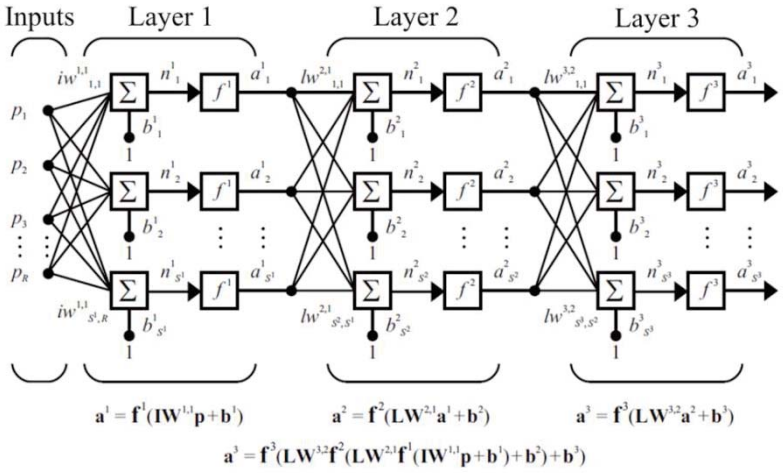
สถาปัตยกรรมของเครือข่ายที่แตกต่างกัน ส่งผลให้พฤติกรรมของเครือข่ายแตกต่างกันด้วย โดยปกติเครือข่ายประสาทเทียมที่มีเพียง 1 นิวรอน อาจไม่เพียงพอ ต้องใช้นิวรอนเพิ่มมากขึ้นและทำงานขนานกันไปหลายๆ ชั้น โครงสร้างของเครือข่ายชั้นเดียวที่มีนิวรอนหลายๆ ชั้น แสดงในภาพที่ 28



ภาพที่ 28 เครือข่ายชั้นเดียวที่มีจำนวน S นิวรอน

ที่มา: Demuth *et al*. (2008)

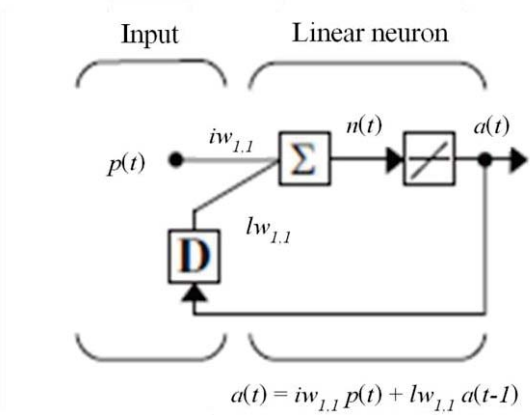
ในทางปฏิบัติ เครือข่ายประสาทเทียมมักมีโครงสร้างหลายชั้น ดังแสดงในภาพที่ 29 พบว่า ในแต่ละชั้นสามารถมีจำนวนนิวรอนที่แตกต่างกันได้ ซึ่งเครือข่ายหลายชั้นมีประสิทธิภาพเหนือกว่าเครือข่ายชั้นเดียว แต่มีจำนวนพารามิเตอร์มากกว่าเช่นกัน



ภาพที่ 29 เครือข่ายหลายชั้นในรูปของเมตริกซ์

ที่มา: Demuth *et al*. (2008)

เครือข่ายย้อนกลับ แตกต่างจากเครือข่ายไปข้างหน้าตรงที่มีการวนรอบแบบป้อนกลับ (Feedback) ภายในเครือข่าย โดยข้อมูลส่งออกของแต่ละนิวรอนถูกเชื่อมต่อและป้อนกลับไปยังข้อมูลนำเข้าของทุกๆ นิวรอน แสดงดังภาพที่ 30

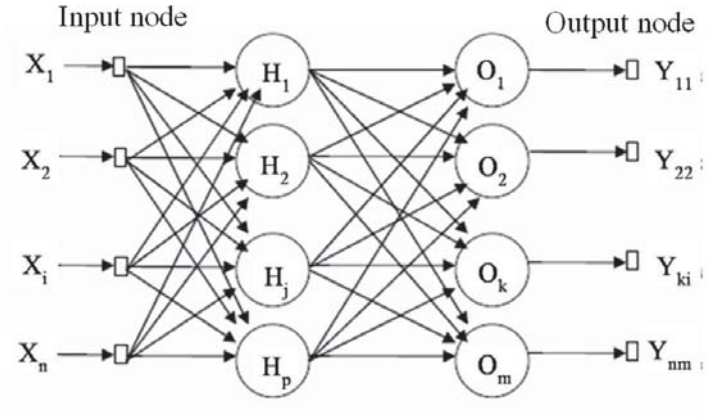


ภาพที่ 30 เครือข่ายย้อนกลับแบบง่าย

ที่มา: Demuth *et al*. (2008)

7.3 การเรียนรู้แบบแพร่กระจายย้อนกลับ

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



ภาพที่ 31 แบบจำลองเครือข่ายประสาทแบบแพร่กระจายย้อนกลับ

เครือข่ายประสาทแบบแพร่กระจายย้อนกลับ ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังนี้

1. หน่วยประมวลผล (Processing elements)
2. ค่าน้ำหนักและฟังก์ชันถ่ายโอน (Weight and transfer function)
3. ชั้นข้อมูลนำเข้า (Input layer)
4. ชั้นซ่อนเร้นของหน่วยประมวลผล (Hidden layer)
5. การเชื่อมต่อของแต่ละนิวรอน (Connections)
6. การเรียนรู้จากการปรับค่าน้ำหนัก (Adaptive learning)
7. ชั้นแสดงผลลัพธ์ (Output layer)

สำหรับขั้นตอนวิธีการเรียนรู้แบบแพร่กระจายย้อนกลับ เริ่มต้นจากสุ่มค่าถ่วงน้ำหนัก และนำข้อมูลนำเข้าที่ส่งผ่านเข้ามาในชั้นรับข้อมูล ปรับปรุงน้ำหนัก (Input weight) และเรียนรู้จนได้เป็นผลลัพธ์ออกมา จากนั้นจึงนำค่าผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ต้องการเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อน โดยใช้ค่าความผิดพลาด 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 โดยการเทียบผลจากวิธีการเคลื่อนลงตามความชัน (Steepest descent) วิธีเกาส์-นิวตัน (Gauss-Newton) และวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์คควอร์ท (Levenberg-Marquardt, LM) ซึ่ง Samarasinghe (2006) ได้เปรียบเทียบแต่ละแบบจำลองและพบว่าวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท มีข้อได้เปรียบเหนือกว่าในแง่ของความเร็ว และประสิทธิภาพในการลู่เข้าสู่ค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้ จึงได้เลือกใช้การเรียนรู้เครือข่ายแบบวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท

8. เจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA)

เจเนติกอัลกอริทึม เป็นวิธีการที่พัฒนามาจากกระบวนการทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตจากการวิวัฒนาการ หรือการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิต และใช้กระบวนการทางพันธุศาสตร์เข้ามาช่วยในกระบวนการค้นหาคำตอบของปัญหา ซึ่งถูกคิดขึ้นโดย John Holland ที่ได้ตีพิมพ์หลักการของเจเนติกอัลกอริทึมเป็นครั้งแรก ในช่วง ค.ศ. 1960 จากนั้นเจเนติกอัลกอริทึมได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง เจเนติกอัลกอริทึมมีการใช้งาน 2 แขนงหลัก คือ หาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (Optimization) และการเรียนรู้ในเครื่องจักร (Machine learning) ในแขนงการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดนั้น เจเนติกอัลกอริทึมถูกนำมาใช้ในหลายๆ งาน เช่น การหาฟังก์ชันที่ดีที่สุด การประมวลผลภาพ และการควบคุม เป็นต้น ในงานทางด้านกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ เจเนติกอัลกอริทึมถูกนำมาใช้ในการหาตัวแปรในกระบวนการผลิตที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น กระบวนการที่ทำให้เกิดการหดตัว (Shrinkage) หรือบิดตัว (Warpage) น้อยที่สุด (Kurtaran *et al*., 2005) และการหาตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสม รวมทั้งตำแหน่งช่องระบายอากาศภายในแม่พิมพ์ (Mathur *et al*., 1998) ข้อดีของเจเนติกอัลกอริทึมเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบดั้งเดิม คือ สามารถแก้ปัญหาในปริภูมิที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous search space) ได้ และไม่จำเป็นต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับอนุพันธ์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหา แต่มีข้อเสีย คือ ต้องอาศัยการคำนวณวนซ้ำหลายๆ รอบ ทำให้ต้องใช้เวลานานในการคำนวณ

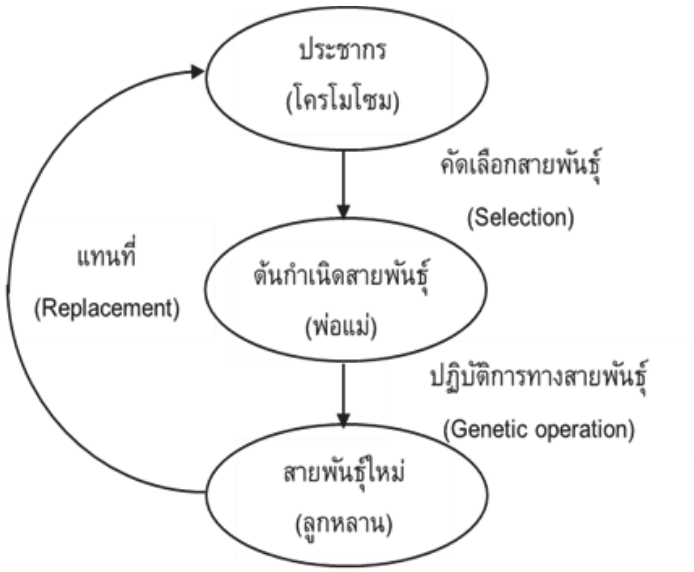
การทำงานของเจเนติกอัลกอริทึมเป็นลักษณะของการหาคำตอบแบบคู่ขนาน (Parallel search) โดยคำตอบที่ได้จากการหาคำตอบในแต่ละรุ่น (Generation) มีการเปลี่ยนรูป (Transformation) เพื่อนำไปสู่การค้นหาคำตอบที่ดีขึ้นในรุ่นถัดไป การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับคำตอบ (Solution) ในกลุ่มประชากร (Population) นั้น เป็นการสำรวจพื้นที่ในการค้นหา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

วัฏจักรของเจเนติกอัลกอริทึม 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 วัฏจักรของเจเนติกอัลกอริทึม

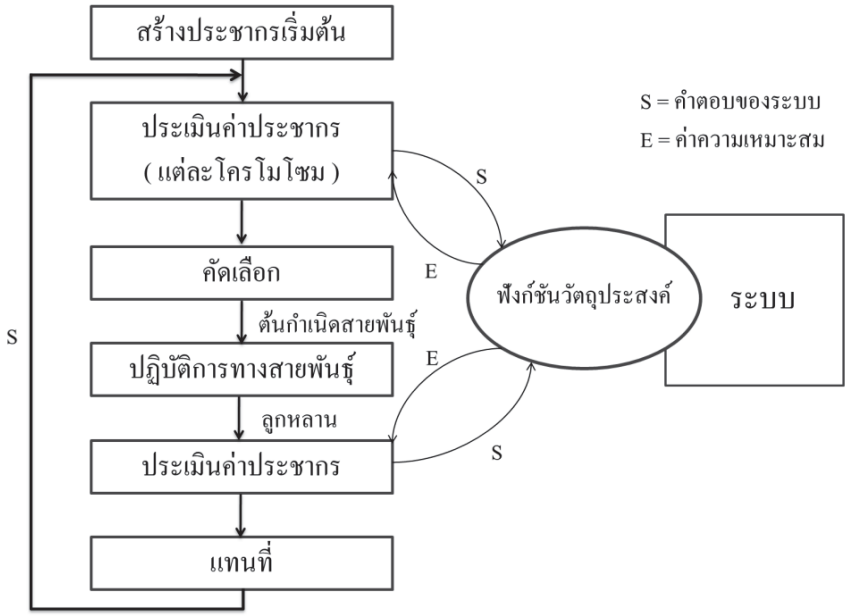
ที่มา: อาทิตย์ (2552)

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

8.1 การทำงานของเจเนติกอัลกอริทึม

ขั้นตอนทั่วไปของเจเนติกอัลกอริทึมและการเชื่อมโยงเข้ากับระบบเพื่อนำไปใช้งาน แสดงดังภาพที่ 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 ขั้นตอนทั่วไปของเจเนติกอัลกอริทึม

ที่มา: อาทิตย์ (2552)

8.2 การออกแบบเจเนติกอัลกอริทึม

ในการนำเจเนติกอัลกอริทึมมาใช้ต้องออกแบบตามขั้นตอนต่อไปนี้

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

- การเข้ารหัสแบบเลขฐานสอง (Binary Encoding) แต่ละตำแหน่งของยีนในโครโมโซมแทนด้วยค่า 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) แต่ละตำแหน่งของยีนในโครโมโซมแทนด้วยค่าต่างๆ โดยมีรูปแบบ เช่น ตัวอักษร จำนวนจริง และคำสั่งต่างๆ 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

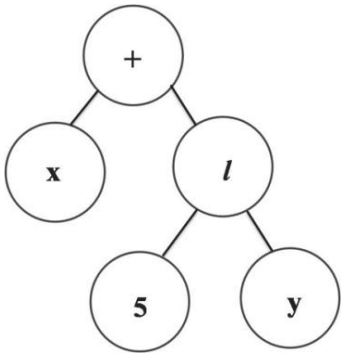
ภาพที่ 35 การเข้ารหัสแบบค่าต่างๆ

- การเข้ารหัสแบบเพอมิวเตชั่น (Permutation Encoding) ทุกตำแหน่งของยีนในโครโมโซมเป็นค่าของจำนวนนับของตำแหน่งในแต่ละลำดับ ซึ่งเหมาะในการจัดลำดับตำแหน่งของปัญหา เช่น ปัญหาของเส้นทางเดินของเซลส์แมน (Traveling salesman problem) ดังแสดงในภาพที่ 36

โครโมโซม A :	1	2	3	4	5
โครโมโซม B :	9	8	7	6	5

ภาพที่ 36 การเข้ารหัสแบบเพอมิวเตชั่น

- การเข้ารหัสแบบต้นไม้ (Tree encoding) เหมาะสมกับปัญหาที่เกี่ยวกับการพัฒนาโปรแกรมโดยทุกตำแหน่งของยีนในโครโมโซมเป็นกิ่งของต้นไม้ ดังแสดงในภาพที่ 37



ภาพที่ 37 การเข้ารหัสแบบต้นไม้

8.2.2 การประเมินค่าความเหมาะสม

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

- ฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสม (Fitness function) เป็นฟังก์ชันที่นำการประเมินที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไปเปลี่ยนเป็นค่าความเหมาะสม (Fitness value) โดยการคำนวณค่าการประเมินของโครโมโซมทั้งหมด เทียบกับโครโมโซมด้วยกันเอง 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) ค่าโอกาสในการถูกคัดเลือกของโครโมโซมแสดงดังสมการที่ 20

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

- การคัดเลือกแบบโบลต์ซมันน์ (Boltzmann selection) เป็นการแก้ปัญหาของค่าโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมเป็นลบ รวมถึงลดความแตกต่างของค่าความเหมาะสมของประชากรโดยรวม ค่าโอกาสในการถูกคัดเลือกของโครโมโซมแสดงดังสมการที่ 21

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

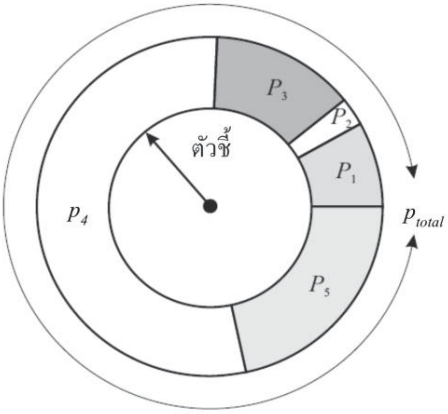
- การคัดเลือกแบบจัดอันดับ (Ranking selection) โครโมโซมถูกจัดเรียงให้มีอันดับ r ตามค่าความเหมาะสม โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมดีที่สุดอยู่ที่โครโมโซมอันดับ N ข้อดีของวิธีนี้ คือ ค่าโอกาสในการถูกคัดเลือกไม่แปรผันกับขนาดของค่าความเหมาะสม แต่ขึ้นกับอันดับของโครโมโซม ค่าโอกาสในการถูกคัดเลือกของโครโมโซมแสดงดังสมการที่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

$$P(s) = \frac{r}{\tilde{E}} \tag{22}$$

- การคัดเลือกแบบจัดการแข่งขัน (Tournament selection) ทำได้โดยการสุ่มแบ่งคัดเลือกโครโมโซม K ตัว เพื่อจัดการแข่งขันขนาด K (Tournament size) แล้วเลือกโครโมโซมที่มีค่าประเมินดีที่สุดจากการแข่งขัน ด้วยความน่าจะเป็นเท่ากับ p และเลือกโครโมโซมที่มีค่าประเมินดีเป็นอันดับรองลงมา จนถึงอันดับที่ n ด้วยความน่าจะเป็น $p\,(1-p)^n$

2. ขั้นตอนหลังจากการกำหนดค่าโอกาส P ให้กับแต่ละโครโมโซมแล้ว คือการชักตัวอย่าง โดยเป็นการนำค่าโอกาสนั้นไปแปลงให้เป็นตัวเลข ซึ่งแสดงถึงจำนวนลูกหลานที่โครโมโซมนั้นสามารถให้กำเนิดในขั้นต่อไปได้

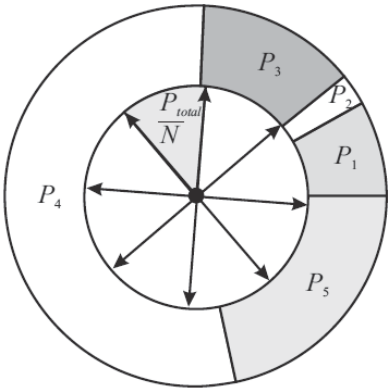
- วิธีการชักตัวอย่างแบบวงล้อรูเล็ท (Roulette wheel sampling) กำหนดให้ P_{total} คือ ผลรวมของค่าโอกาสในการถูกคัดเลือกของโครโมโซมประชากรทั้งกลุ่ม โดยมีค่าเทียบเท่ากับเส้นรอบวงของวงล้อรูเล็ท ค่าตัวชี้ถูกสุ่มระหว่าง 0-P_{total} กระบวนการนี้จึงเปรียบได้กับการหมุนวงล้อในเกมรูเล็ท ดังแสดงในภาพที่ 38



ภาพที่ 38 วงล้อรูเล็ทจากค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม

- วิธีการชักตัวอย่างแบบกระบวนการเฟ้นสุ่มสากล (Stochastic Universal Sampling, SUS) วิธีการนี้แตกต่างจากแบบวงล้อรูเล็ทตรงที่มีการใช้ตัวชี้มากกว่าหนึ่งตัว ในการคัดเลือกโครโมโซม N ตัว มีตัวชี้ทั้งหมด N ตัว แต่ละตัวมีระยะห่างเท่ากันและมีค่าเท่ากับ $\frac{P_{total}}{N}$ ดังแสดง

ในภาพที่ 39 วิธีนี้ช่วยลดความเหลื่อมล้ำในการคัดเลือกลง โดยโครโมโซมที่มีค่า *P* สูง มีโอกาสถูกชี้ด้วยจำนวนตัวชี้ในจำนวนที่มากกว่าโครโมโซมที่มีค่า *P* ที่ต่ำกว่า

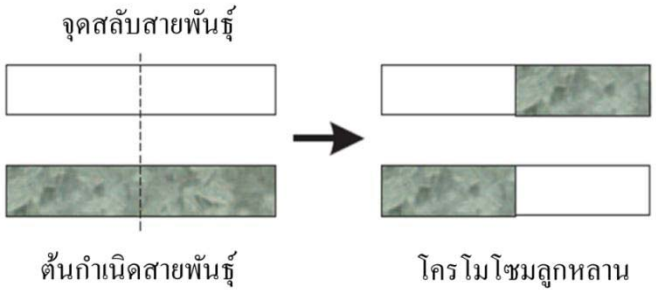


ภาพที่ 39 วงล้อรูเล็ทจากกระบวนการเฟ้นสุ่มสากล

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

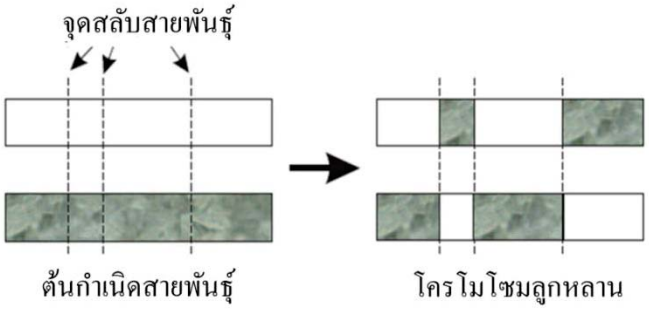
1. การสลับสายพันธุ์ เป็นวิธีการรวมตัวใหม่ของโครโมโซม โดยเป็นการรวมส่วนย่อยระหว่างโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ตั้งแต่สองโครโมโซมขึ้นไป ให้กลายเป็นโครโมโซมลูกหลาน โดยปกติมีการกำหนดอัตราการสลับสายพันธุ์โดยใช้ความน่าจะเป็น (P_C) เป็นตัวกำหนด รูปแบบของการสลับสายพันธุ์ ได้แก่

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



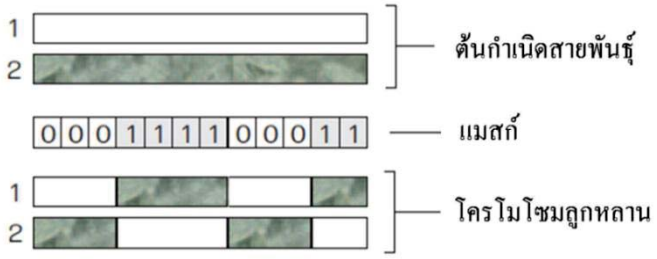
ภาพที่ 40 การสลับสายพันธุ์แบบจุดเดียว

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



ภาพที่ 41 การสลับสายพันธุ์แบบหลายจุด

- การสลับสายพันธุ์แบบสม่ำเสมอ (Uniform crossover) วิธีการนี้ถูกออกแบบให้ทุกจุดบนโครโมโซมสามารถเป็นจุดตัดได้ โดยอาจใช้ตัวพรางชนิดเลขฐานสองช่วยในการสลับสายพันธุ์ การสลับสายพันธุ์แบบสม่ำเสมอแสดง ดังแสดงในภาพที่ 42



ภาพที่ 42 การสลับสายพันธุ์แบบสม่ำเสมอ

2. การกลายพันธุ์ เป็นวิธีการแปรผันโครโมโซม เปรียบได้กับการกลายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิต ทำให้มีความหลากหลายเกิดขึ้นมากในกลุ่มประชากร และป้องกันไม่ให้เกิดการลู่เข้าสู่ค่าต่ำสุดเฉพาะถิ่นเร็วเกินไป ส่งผลให้คำตอบที่เกิดขึ้นในเจเนติกอัลกอริทึมสามารถครอบคลุมพื้นที่การค้นหาคำตอบได้ทั่วถึงยิ่งขึ้น สุภัทร (2551) รายงานว่า อัตราการกลายพันธุ์ขึ้นอยู่กับขนาดประชากร จึงควรปรับค่าให้เหมาะสมกับขนาดของประชากรเพื่อให้เกิดการสำรวจพื้นที่ในการค้นหาคำตอบอย่างทั่วถึงและป้องกันไม่ให้ประชากรมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่มีความคล้ายคลึงกันทั้งหมด

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

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

โดย x เป็นเวคเตอร์ที่มีจำนวน n ตัว กล่าวคือ มีข้อมูลนำเข้า $x = \{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$และมีจำนวนวัตถุประสงค์ M จำนวน ซึ่งแต่ละวัตถุประสงค์ต้องการให้เป็นค่าน้อยที่สุดหรือมากที่สุด แทนด้วยเวคเตอร์ $F = \{F_1(x), F_2(x), \ldots, F_M(x)\}$ โดยที่ $g_j(x)$ และ $h_k(x)$ เป็นฟังก์ชันเงื่อนไขแบบเท่ากัน (Equalities constraint) และไม่เท่ากัน (Inequalities constraint) ตามลำดับ และมีขอบเขตของข้อมูลนำเข้า (Bounds) อยู่ระหว่างขอบเขตบน x_i^u และขอบเขตล่าง x_i^l

การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์มี 2 วิธีหลักๆ คือ วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight-sum method) และวิธีพื้นฐานพาเรโต (Pareto-based approach) สำหรับวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักเป็นการนำทุกวัตถุประสงค์มารวมกัน ซึ่งแต่ละวัตถุประสงค์ถูกจัดความสำคัญโดยค่าถ่วงน้ำหนัก ส่งผลให้เหลือเพียงฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียว และได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเพียงค่าเดียว ข้อดีของวิธีนี้คือ ง่ายต่อการนำไปใช้ และได้คำตอบจากการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักโดยผู้ใช้งาน อย่างไรก็ตาม เป็นการยากที่คำตอบหรือผลเฉลยเพียงคำตอบเดียวส่งผลให้ได้ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดพร้อมกันทุกวัตถุประสงค์ ดังนั้นกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาลักษณะนี้ คือ กลุ่มของผลเฉลยพาเรโตที่เหมาะสมที่สุด (Pareto optimal solutions) ซึ่งสามารถหาได้จากหลักการครอบงำแบบพาเรโต (Pareto domination) โดยมีหลักการ คือ ไม่มีวัตถุประสงค์ใด ที่คำตอบ x แย่กว่าคำตอบ y และมีอย่างน้อย 1 วัตถุประสงค์ ที่คำตอบ x ดีกว่าคำตอบ y หรืออาจกล่าวได้ว่า คำตอบ x ใดๆ ครอบงำ หรือดีกว่าคำตอบ y จากหลักการนี้ ส่งผลให้ได้ค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดหลายคำตอบ จากนั้นอาจเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดค่าหนึ่ง โดยให้ความสำคัญที่ค่าวัตถุประสงค์ใดวัตถุประสงค์หนึ่ง หรืออาจใช้ค่าวัตถุประสงค์อื่นเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ

9. การประยุกต์ใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม และเจเนติกอัลกอริทึม ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยแม่พิมพ์

มีผู้วิจัยจำนวนมากได้นำคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมมาใช้ในการออกแบบ แล้วใช้พารามิเตอร์หรือคุณภาพชิ้นงานเป็นข้อกำหนด 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) จุดดักอากาศ (Air trap) (Mathur *et al*., 1999) และรอยประสาน (Weld line) (Wu *et al*., 2011)

Ozcelik and Erzurumlu (2006) ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) เครือข่ายประสาทเทียม และเจเนติกอัลกอริทึม ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการฉีดขึ้นรูป ที่ส่งผลให้เกิดการบิดตัวของชิ้นงานน้อยที่สุด โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อค้นหาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการบิดตัวของชิ้นงาน ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ อุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลว แรงดันย้ำ เวลาย้ำ และเวลาในการหล่อเย็น โดยตัดรูปแบบของทางวิ่ง และตำแหน่งของทางเข้าที่ส่งผลกระทบต่อการบิดตัวของชิ้นงานน้อยกว่าออกไป จากนั้นจึงใช้เครือข่ายประสาทเทียมร่วมกับเจเนติกอัลกอริทึมในการหาค่าที่เหมาะสม จากการทดลองพบว่า เมื่อปรับค่าพารามิเตอร์กระบวนการที่เหมาะสม ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการบิดตัวลดลง 51%

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

Shen *et al*. (2007) ใช้เครือข่ายประสาทแบบแพร่กระจายย้อนกลับในการหาความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของพารามิเตอร์ต่างๆ ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ได้แก่ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ อุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลว เวลาในการฉีด เวลาย้ำ และแรงดันย้ำ เทียบกับคุณภาพของชิ้นงาน ซึ่งใช้การหดตัวเชิงปริมาตรเป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพ จากนั้นจึงใช้เจเนติกอัลกอริทึมในการหาค่าที่เหมาะสมจากฟังก์ชันที่ได้จากเครือข่ายประสาทเทียม ผลการทดลองพบว่า ค่าพารามิเตอร์กระบวนการที่ได้จากการใช้เครือข่ายประสาทเทียมร่วมกับเจเนติกอัลกอริทึม ทำให้ได้ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของชิ้นงานน้อยที่สุดและมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างทั้งหมดที่ได้เก็บข้อมูลมา

พิชญ์กร และ จักรพันธ์ (2552) ทดลองหาค่าที่เหมาะสมต่อการฉีดขึ้นรูปหลังคาพลาสติกในด้านการโก่งงอ และรอบเวลาในการฉีดขึ้นรูป กำหนดตำแหน่งทางเข้าและพารามิเตอร์กระบวนการตามสภาวะการฉีดจริง โดยปรับค่าอุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว ความเร็วฉีด แรงดันย้ำ และเวลาในการเย็นตัว แล้วนำค่าต่างๆ ที่ได้ มาหาค่าที่เหมาะสม โดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ช่วยในทางวิศวกรรม วิธีการวางแผนการทดลอง แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม และเจเนติกอัลกอริทึม ผลการทดลอง

สรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์กระบวนการภายหลังการหาค่าที่เหมาะสมแล้ว สามารถลดการโก่งงอของชิ้นงานได้ 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 ไซโคลเฮกซีลเบนโซไทอะซีลซัลฟินาไมล์ (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

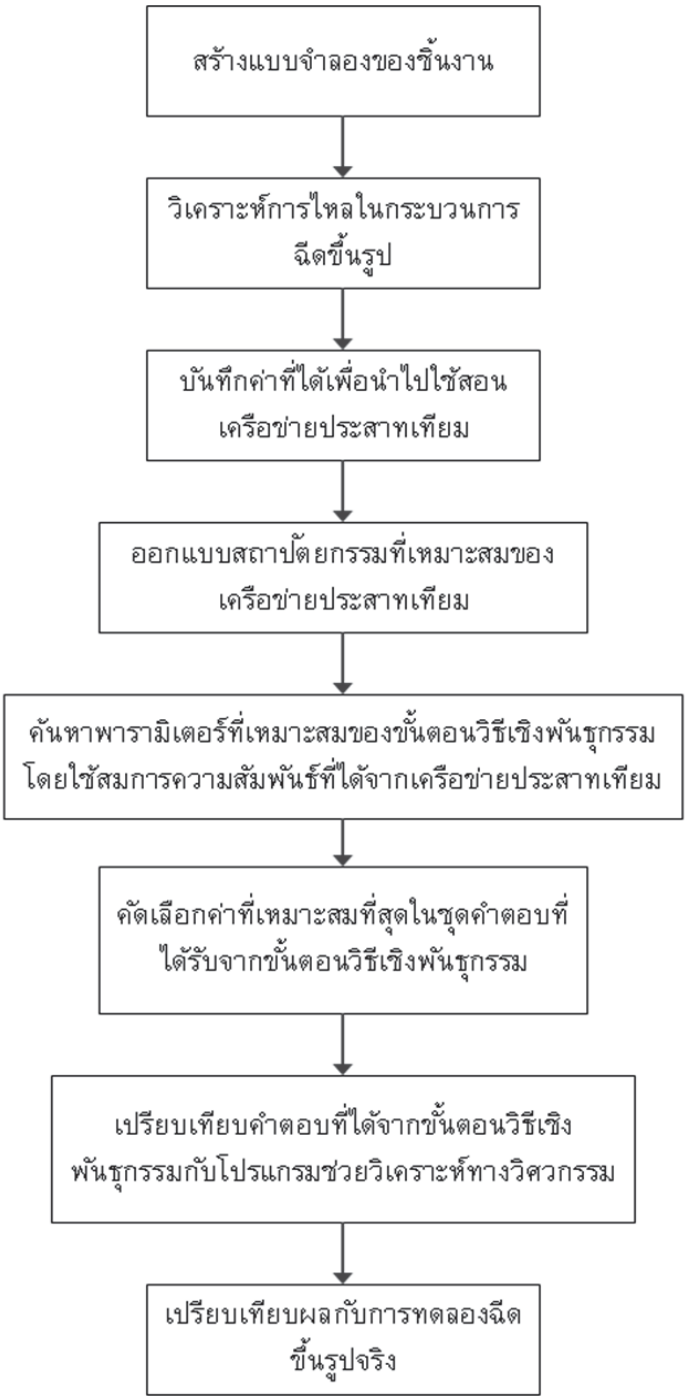
2.11 โปรแกรม MATLAB version 7.9

2.12 โปรแกรม Minitab version 14

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

วิธีการ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาแนวทางการกำหนดตำแหน่งของทางเข้าและช่องระบายอากาศที่เหมาะสม โดยใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมร่วมกับเจเนติกอัลกอริทึม ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการในงานวิจัย ดังแสดงในภาพที่ 43 เริ่มจากการสร้างแบบจำลองของชิ้นงานที่สามารถปรับเปลี่ยนตำแหน่งของทางเข้า เพื่อนำไปวิเคราะห์การไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ที่ตำแหน่งทางเข้าต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม และบันทึกค่าวัตถุประสงค์ที่ศึกษา ได้แก่ ค่าแรงดันฉีดสูงสุด ค่าแรงดันฉีดที่ตำแหน่งทางเข้า และตำแหน่งของรอยประสาน จากนั้นนำค่าที่ได้ไปสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าวัตถุประสงค์และตำแหน่งของทางเข้าโดยใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม ภายหลังการหาสถาปัตยกรรมของเครือข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการทางสถิติ เช่น แผนภาพกล่อง และการวิเคราะห์ความแปรปรวนแล้ว จึงหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจากสมการที่ได้ โดยใช้เจเนติกอัลกอริทึม ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเจเนติกอัลกอริทึมที่สามารถหาคำตอบของสมการจากเครือข่ายประสาทเทียมหรือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้อย่างแม่นยำ จากนั้นจึงนำคำตอบที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมวิเคราะห์การไหลและผลจากการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริง



ภาพที่ 43 ขั้นตอนการดำเนินการในงานวิจัย

- การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลองต้องพิจารณาถึงตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ตำแหน่งของทางเข้า แรงดันฉีด และตำแหน่งของรอยประสาน เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบกรณีศึกษาไว้สองกรณี โดยใช้ค่าแรงดันฉีดและค่าความแตกต่างของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าเป็นค่าวัตถุประสงค์สำหรับกรณีแรก และใช้ค่าแรงดันฉีดและตำแหน่งของรอยประสานเป็นค่าวัตถุประสงค์สำหรับกรณีศึกษาที่สอง จากนั้นบันทึกค่าตำแหน่งของทางเข้า รวมถึงค่าแรงดันฉีด และตำแหน่งของ

รอยประสาน เพื่อนำไปเป็นข้อมูลสำหรับใช้ในการฝึกสอน และทดสอบแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

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

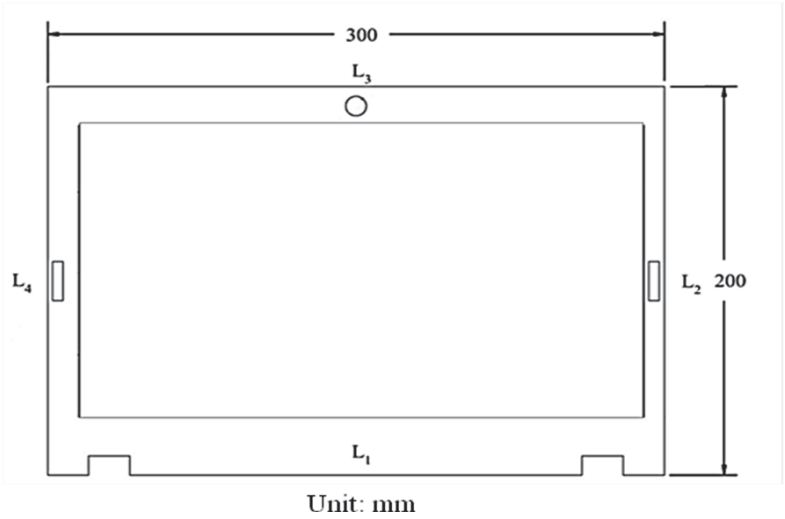
- โดยทั่วไปในการใช้เจเนติกอัลกอริทึมแก้ปัญหาหรือหาคำตอบของสมการมักเป็นการแก้ปัญหาฟังก์ชันที่มีวัตถุประสงค์เดียว (Single objective function) แต่การกำหนดตำแหน่งของทางเข้าและช่องระบายอากาศที่เหมาะสมนั้น ประกอบด้วยหลายปัจจัย ยกตัวอย่างเช่น แรงดันฉีดควรมีค่าน้อยที่สุด และตำแหน่งของรอยประสานควรอยู่ใกล้ตำแหน่งที่กำหนดมากที่สุด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

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 การกำหนดตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสมส่งผลให้ใช้แรงดันฉีดน้อยลงได้ นอกจากนี้การที่รูปแบบของชิ้นงานไม่สมมาตรและมีความยาวของทางวิ่งแตกต่างกัน ทำให้แรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้ามีความแตกต่างกัน ในกรณีที่มีความแตกต่างของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้ามาก อาจส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลในการไหลชิ้นงานเกิดการบิดตัว หรือเกิดการฉีดไม่เต็มได้ ค่าแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าจึงควรมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด ในกรณีศึกษานี้จึงได้กำหนดให้ค่าแรงดันฉีดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าเป็นค่าวัตถุประสงค์

ภาพที่ 44 ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นกรอบหรือกลวงบริเวณตรงกลาง



ภาพที่ 45 แบบจำลองชิ้นงานสำหรับกรณีศึกษา: หน้าจอของคอมพิวเตอร์แบบพกพา

1.2 การกำหนดสภาวะในกระบวนการฉีด

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

1.3 การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล

งานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในการออกแบบสถาปัตยกรรมที่เหมาะสมเพื่อพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม ซึ่งทำให้ข้อมูลที่ได้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ ดังแสดงในตารางที่ 4 (กรณีที่มี 2 ปัจจัย) โดยแต่ละตัวแปรสามารถคำนวณได้จากสมการ 23-28 ในการ

ทดลองได้อาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ซึ่งสามารถคำนวณเป็นค่า P-value โดยเมื่อค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรนั้นไม่มีผลต่อความแม่นยำในการทำนาย นอกจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแล้ว แผนภาพกล่อง (Boxplot) ถูกนำมาใช้ในการอธิบายรายละเอียดของข้อมูล ซึ่งสามารถอธิบายได้ทั้ง ค่าตำแหน่งค่ากลาง การกระจาย รูปแบบการแจกแจง และข้อมูลที่ผิดปกติ การกระจายของข้อมูลที่ศึกษาถูกบ่งชี้ด้วยขอบเขตของกล่อง และข้อมูลที่ผิดปกติอยู่ภายนอกขอบเขตกล่อง โดยแผนภาพกล่องนี้ ยังสามารถใช้เปรียบเทียบผลความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับของปัจจัยในการออกแบบการทดลอง หรือการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อการกำหนดค่าที่เหมาะสม

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	$ab(n - 1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n - 1)}$	
ผลบวกกำลังสองทั้งหมด	SS_T	$abn - 1$		

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

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

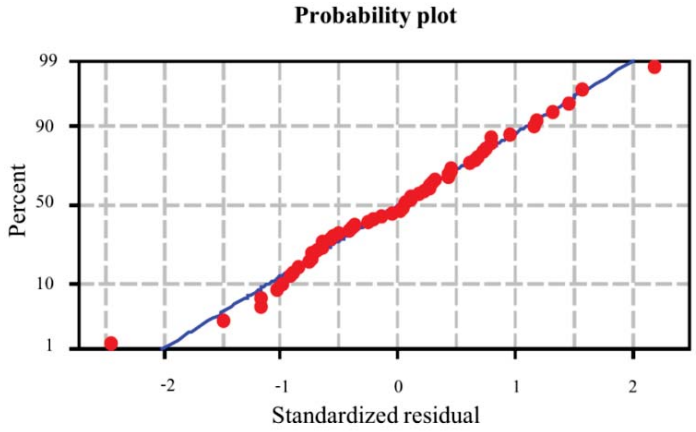
$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^{b} y^2 - \frac{y^2}{abn} \quad (25)$$

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

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

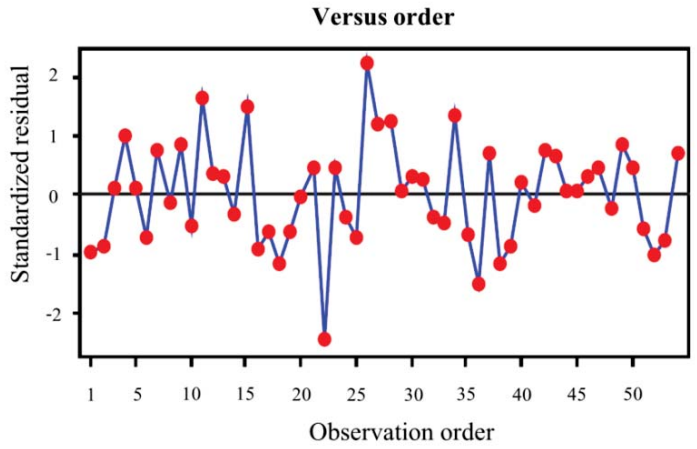
$$SS_E = SS_T - SS_{Subtotal} \quad (28)$$

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



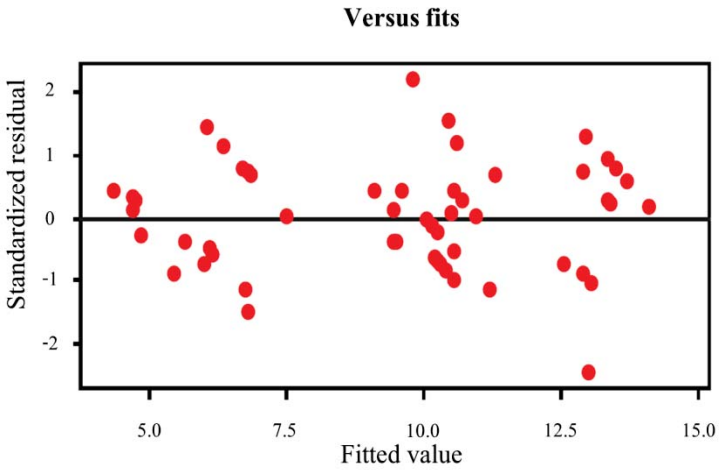
ภาพที่ 46 ความน่าจะเป็นของค่าผิดพลาดที่มีการกระจายชนิดปกติ

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



ภาพที่ 47 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและลำดับที่ของการทดลอง

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



ภาพที่ 48 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและค่าเฉลี่ย

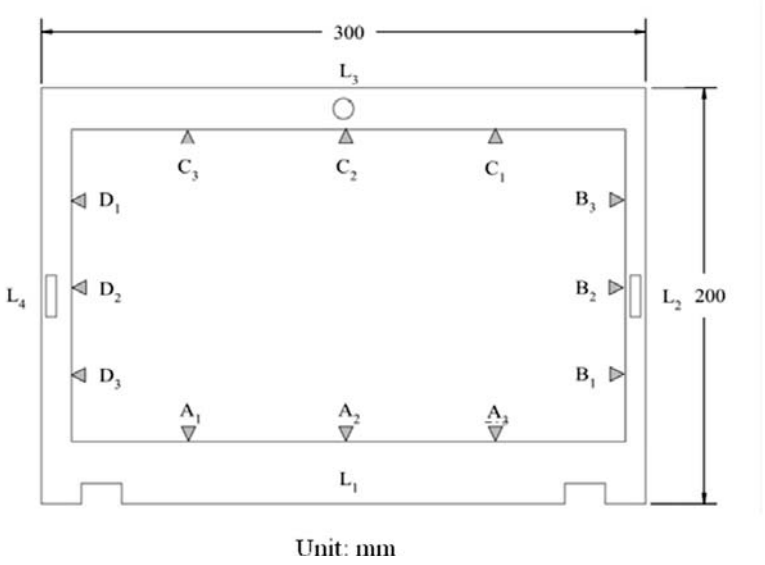
1.4 การออกแบบแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

การพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมที่สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของทางเข้ากับค่าแรงดันฉีดและตำแหน่งของรอยประสานได้อย่างประสาทเทียมแม่นยำนั้น งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการปรับเปลี่ยนสถาปัตยกรรมเครือข่าย ซึ่งได้แก่ จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน อัตราการเรียนรู้ และจำนวนรอบการฝึกสอน โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองแสดงเป็นค่าความผิดพลาด (Error) หรือค่าความแม่นยำ (Accuracy) ระหว่างข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง

เครือข่ายประสาทเทียม ในการเตรียมข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลอง ได้แบ่งข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมจำลองการไหลภายในแม่พิมพ์เป็น 2 ส่วน คือ ข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน (Training data) 80% และข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพ (Test data) 20%

1.4.1 การกำหนดตำแหน่งของทางเข้าในการฝึกสอนเครือข่ายประสาทเทียม

กำหนดให้ข้อมูลนำเข้าในเครือข่าย คือ ตำแหน่งของทางเข้า และมีข้อมูลส่งออก คือ ค่าแรงดันฉีดสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันที่แต่ละทางเข้า โดยกำหนดให้มีทางเข้าอยู่บนแต่ละด้าน 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

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

โดย xmax และ xmin คือ ค่าสูงสุดและต่ำสุดของข้อมูลที่ต้องการปรับค่า ส่วน ymax และ y_{min} คือ ค่าสูงสุดและต่ำสุด (ในกรณีของฟังก์ชันถ่ายโอนซิกมอยด์แบบลอการิทึม y_{max} เท่ากับ 1 และ y_{min} เท่ากับ 0) โดยที่ x_i และ y_i คือ ข้อมูลที่ต้องการปรับค่า และค่าของข้อมูลภายหลังการปรับค่าตามลำดับ

1.4.2 การออกแบบสถาปัตยกรรมที่เหมาะสมของแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

- การฝึกสอนเครือข่ายประสาทเทียม ใช้วิธีการแพร่กระจายย้อนกลับ ซึ่งเป็นวิธีการเรียนรู้แบบมีผู้สอน โดยนำค่าความผิดพลาดระหว่างค่าเป้าหมายกับผลลัพธ์ที่ได้มาใช้ในการปรับค่าน้ำหนัก เพื่อให้ได้ค่าผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากที่สุด

- วิธีการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก (Updating weights method) ใช้วิธีของเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ทในการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความรวดเร็วในการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก และมีประสิทธิภาพสูงในการลู่เข้าสู่ค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสม

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

- ค่าความคลาดเคลื่อนเป้าหมาย (Goal) ใช้เป็นเกณฑ์ในการหยุดการฝึกสอนอีกทางหนึ่ง ถ้าค่าความผิดพลาดที่ได้จากการฝึกสอนเครือข่ายมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความผิดพลาดเป้าหมายที่ตั้งไว้ ส่งผลให้เครือข่ายหยุดการสอน และนำค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้ในขณะนั้นไปใช้ในการทำนาย สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดให้ค่าความผิดพลาดเป้าหมายเท่ากับ $1x10^{-5}$

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

ตารางที่ 5 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสมในเครือข่ายประสาทเทียม

1.	Output		Indicator	
	Accuracy		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

$$Minimum\ neuron = \frac{Input\ neuron + Output\ neuron}{2} \tag{30}$$

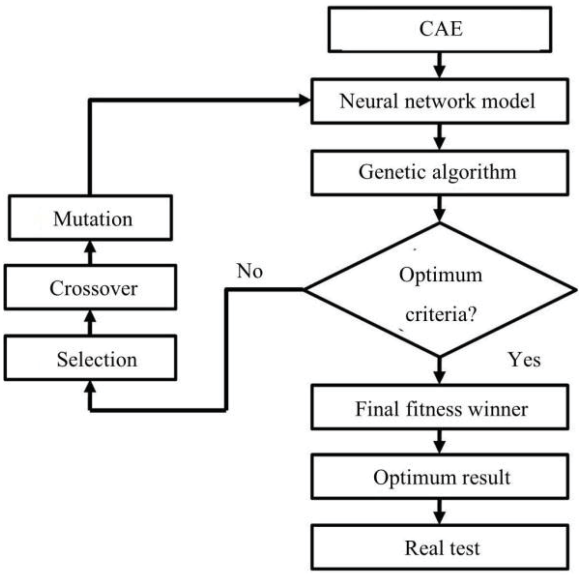
$$Maximum\ neuron = 2(Input\ neuron) + 1 \tag{31}$$

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 การกำหนดพารามิเตอร์ของเจเนติกอัลกอริทึม

ภายหลังที่ได้สถาปัตยกรรมเครือข่ายที่เหมาะสมแล้ว จึงนำความสัมพันธ์ที่ได้มาหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้เจเนติกอัลกอริทึม กระบวนการนำเครือข่ายประสาทเทียมและเจเนติกอัลกอริทึมมาใช้ร่วมกัน ดังแสดงในภาพที่ 50



ภาพที่ 50 ขั้นตอนการใช้เครือข่ายประสาทเทียมร่วมกับเจเนติกอัลกอริทึม

ในการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเจเนติกอัลกอริทึม สามารถทำได้โดยการปรับพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งได้แก่ ขนาดของประชากร อัตราการสลับสายพันธุ์ อัตราการกลายพันธุ์ และรอบการกำเนิดสายพันธุ์

1.5.1 ขนาดประชากร

ขนาดประชากรที่เหมาะสมส่งผลให้การกระจายตัวของประชากรสามารถครอบคลุมคำตอบแบบวงกว้างได้ อย่างไรก็ตาม หากกำหนดขนาดของประชากรมากเกินไป แม้ว่ามีแนวโน้มในการได้คำตอบที่ดีขึ้น แต่ส่งผลให้ใช้เวลามากในการประมวลผล หรือหากกำหนดขนาดประชากรน้อยเกินไป ทำให้การค้นหานั้นลู่เข้าสู่คำตอบได้ช้าเกินไป (Chatterjee *et al*., 1996) จำนวนประชากรที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 3 ระดับ ได้แก่ 10 30 และ 50 ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ของเจเนติกอัลกอริทึมถูกกำหนดให้คงที่ 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 ผลที่ได้คือ การถ่ายทอดสำเนาจากพ่อแม่สายพันธุ์ แต่หากมีการสลับสายพันธุ์เกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดสายพันธุ์และคำตอบที่หลากหลาย อัตราการสลับสายพันธุ์ที่ถูกศึกษาในขั้นตอนนี้มี 3 ระดับ ได้แก่ 0.6 0.75 และ 0.9 พารามิเตอร์อื่นๆ ของเจเนติกอัลกอริทึมถูกกำหนดให้คงที่ 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%) ส่งผลให้ค่าที่ได้เกิดจากการสลับสายพันธุ์เพียงอย่างเดียว แต่หากมีอัตราการกลายพันธุ์ 100% ส่งผลให้โครโมโซมมีการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด และส่งผลให้เจเนติกอัลกอริทึมกลายเป็นกระบวนการค้นหาแบบสุ่ม (Random search) (Coley, 1999) อัตราการกลายพันธุ์ที่ถูกศึกษาในขั้นตอนนี้มี 3 ระดับ ได้แก่ 0.01 0.03 และ 0.05 พารามิเตอร์อื่นๆ ของเจเนติกอัลกอริทึมถูกกำหนดให้คงที่ 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

จำนวนรอบการกำเนิดสายพันธุ์เป็นขั้นตอนวิธีแสดงเงื่อนไขการหยุดค้นหาของเจเนติกอัลกอริทึมซึ่งมีการกำเนิด คัดเลือก และสร้างประชากรต้นกำเนิดใหม่ จนกระทั่งถึงเงื่อนไขการหยุด โดยทั่วไป จำนวนรอบถูกกำหนดจากการลู่เข้าสู่คำตอบ โดยเป็นจำนวนรอบสูงสุดที่เพียงพอต่อการค้นหาคำตอบแบบวงกว้าง ดังนั้น หากเกิดการลู่เข้าสู่คำตอบหรือหยุดการค้นหาแล้ว สามารถลดจำนวนรอบการกำเนิดสายพันธุ์ลงได้เพื่อลดเวลาในการคำนวณ

1.5.5 การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์

แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมถูกนำมาใช้เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลนำเข้า (ตำแหน่งทางเข้า) และข้อมูลส่งออก (ค่าแรงดันสูงสุดในแม่พิมพ์และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า) เพื่อประยุกต์ใช้กับเจเนติกอัลกอริทึม ซึ่งมีจำนวนตัวแปรนำเข้าและรูปแบบสมการการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ ดังแสดงในสมการที่ 32-33

$$x = (x_1, x_2, \ldots, x_N) \tag{32}$$

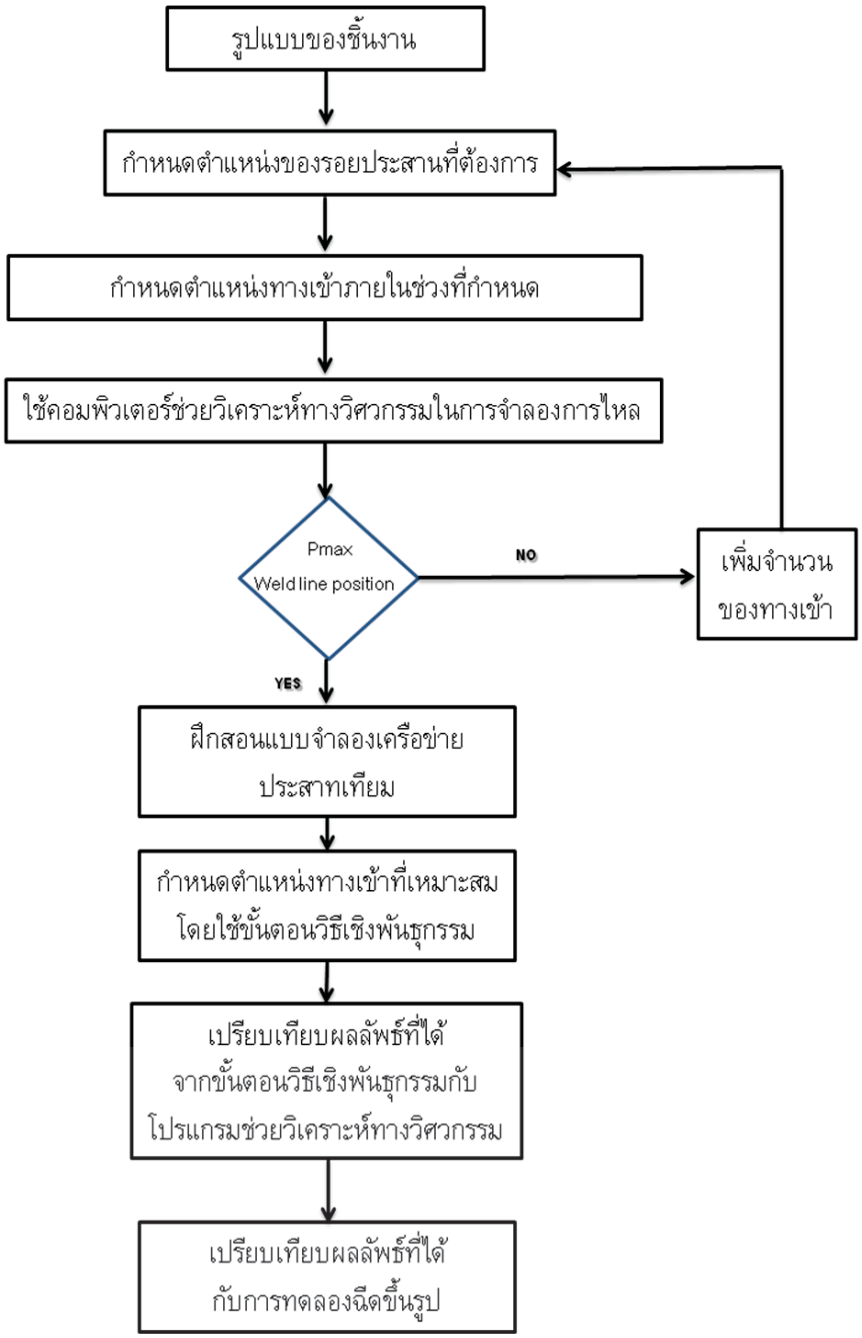
$$\text{Minimize } F_m(x),\ m = 1, 2, \ldots, M \tag{33}$$

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 ส่งผลให้ได้เซตของชุดคำตอบแบบพาเรโต (Pareto optimal) ซึ่งเป็นชุดคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated solution) กล่าวคือเป็นคำตอบของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์หนึ่ง ซึ่งค่าของอีกฟังก์ชันหนึ่งเป็นค่าที่ต่ำสุดหรือสูงที่สุด จากนั้นจึงเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากค่าวัตถุประสงค์ที่ได้ หรือกำหนดจากวัตถุประสงค์อื่นในการพิจารณา สำหรับกรณีศึกษานี้ ภายหลังจากได้ชุดคำตอบพาเรโตแล้ว นอกจากการพิจารณาค่าแรงดันฉีดสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าแล้ว ตำแหน่งของช่องระบายอากาศก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ถูกนำมาพิจารณา เพื่อหาตำแหน่งของช่องระบายอากาศที่เหมาะสมที่สุด

2. การพัฒนาขั้นตอนวิธีกำหนดจำนวนและตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสมที่สุด กรณีศึกษา: ชิ้นงานที่มีอินเสิร์ทภายในชิ้นงาน

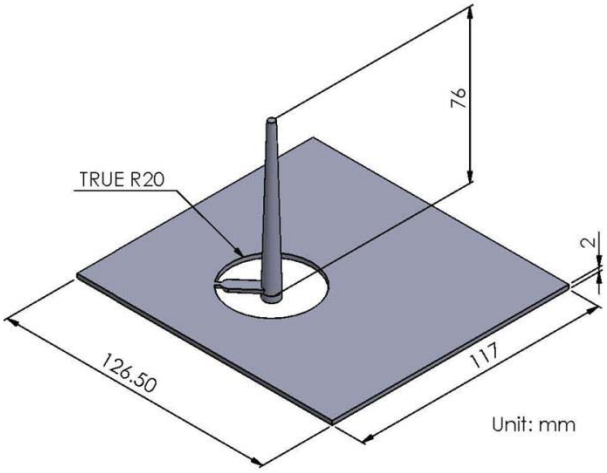
กรณีศึกษานี้เป็นการศึกษาถึงแนวทางในการกำหนดจำนวนและตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสม ซึ่งต่างจากกรณีศึกษาแรกที่กำหนดจำนวนของทางเข้าไว้แล้ว ในกรณีศึกษานี้ใช้ค่าแรงดันฉีดและตำแหน่งของรอยประสานเป็นค่าวัตถุประสงค์ โดยใช้แนวทางในการออกแบบเครือข่ายประสาทเทียมและเจเนติกอัลกอริทึมตามกรณีศึกษาแรก สำหรับแนวทางการกำหนดตำแหน่งของทางเข้าจากตำแหน่งรอยประสานนั้น สามารถลดขอบเขตในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของทางเข้าเพื่อใช้ในการฝึกสอนเครือข่ายประสาทเทียม กล่าวคือใช้จำนวนของข้อมูลนำเข้าลดลง ทำให้ลดเวลาในการเก็บข้อมูล และในกรณีที่ค่าแรงดันฉีดมีค่าสูงเกินกว่าค่าที่กำหนด จึงเพิ่มจำนวนของทางเข้า จนกระทั่งได้เงื่อนไขตามข้อกำหนดในการออกแบบ ทำให้สามารถกำหนดจำนวนของทางเข้าที่เหมาะสมได้ ดังแสดงในภาพที่ 51



ภาพที่ 51 ขั้นตอนการกำหนดจำนวนและตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสมที่สุด เมื่อกำหนดค่าแรงดันฉีดและตำแหน่งรอยประสานเป็นค่าวัตถุประสงค์

2.1 การสร้างแบบจำลองชิ้นงาน

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



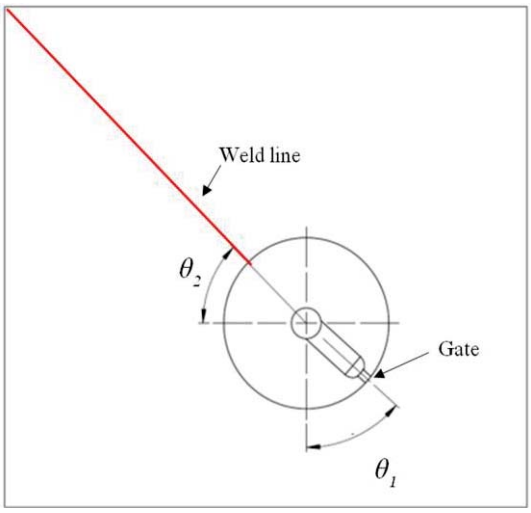
ภาพที่ 52 แบบจำลองสำหรับกรณีศึกษา: ชิ้นงานที่มีอินเสิร์ทภายในชิ้นงาน

2.2 การกำหนดสภาวะในกระบวนการฉีด

ขั้นตอนการกำหนดสมบัติของวัสดุเพื่อใช้จำลองการไหลของยางธรรมชาติ แสดงดังในภาคผนวก ข สำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ของกระบวนการ กำหนดให้อุณหภูมิของยางเท่ากับ 80ºC อุณหภูมิของแม่พิมพ์เท่ากับ 150ºC และเวลาในการคงรูป 300 s จากนั้นจึงวิเคราะห์และเก็บข้อมูลค่าแรงดันฉีดสูงสุด รวมถึงตำแหน่งของรอยประสาน ที่ตำแหน่งทางเข้าต่างๆ เพื่อนำไปใช้ฝึกสอนเครือข่ายประสาทเทียม

2.3 การกำหนดตำแหน่งของทางเข้าและรอยประสานเพื่อนำไปใช้ในการฝึกสอน

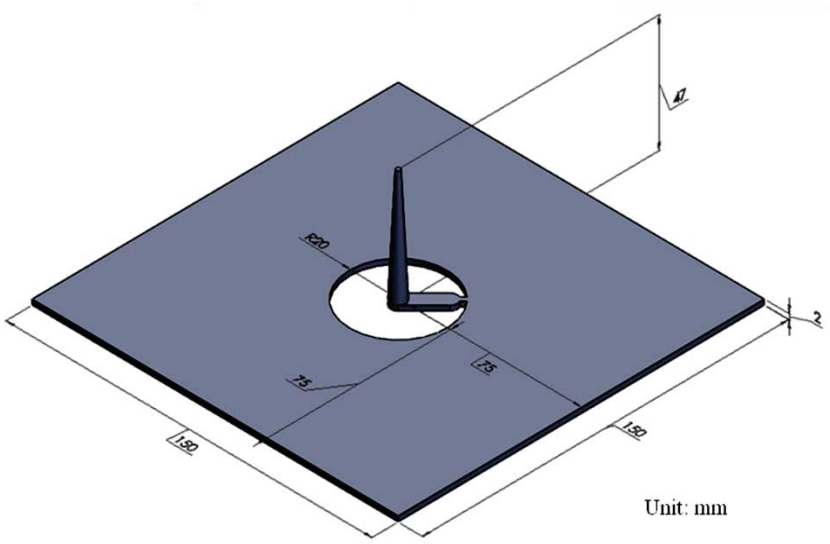
ในกรณี 1 ทางเข้า กำหนดให้ตำแหน่งของทางเข้า (θ_1) เป็นข้อมูลนำเข้า และตำแหน่งของรอยประสาน (θ_2) เป็นข้อมูลส่งออกในแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม ดังแสดงในภาพที่ 53 ในกรณีที่แรงดันฉีดมีค่าสูงเกินกว่าที่กำหนด หรือต้องการลดแรงดันฉีด สามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนของทางเข้า อย่างไรก็ตาม การเพิ่มจำนวนของทางเข้าส่งผลให้มีตำแหน่งที่เกิดรอยประสานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การกำหนดบริเวณที่ต้องการให้เกิดรอยประสานยังทำได้ยาก ซึ่งบริเวณดังกล่าวคือ บริเวณที่มีระยะจากอินเสิร์ทถึงผนังชิ้นงานมากที่สุด โดยมีระยะดังกล่าวใกล้เคียงกันมากที่สุดในแต่ละบริเวณที่กำหนดให้เกิดรอยประสาน และเป็นตำแหน่งที่สามารถแบ่งพื้นที่ของชิ้นงานได้ขนาดเท่าๆ กัน ผู้วิจัยได้นำระเบียบวิธีการแบ่งครึ่งช่วง (Bi-section method) มาประยุกต์ใช้เพื่อกำหนดบริเวณรอยประสานให้ได้ตามเงื่อนไข



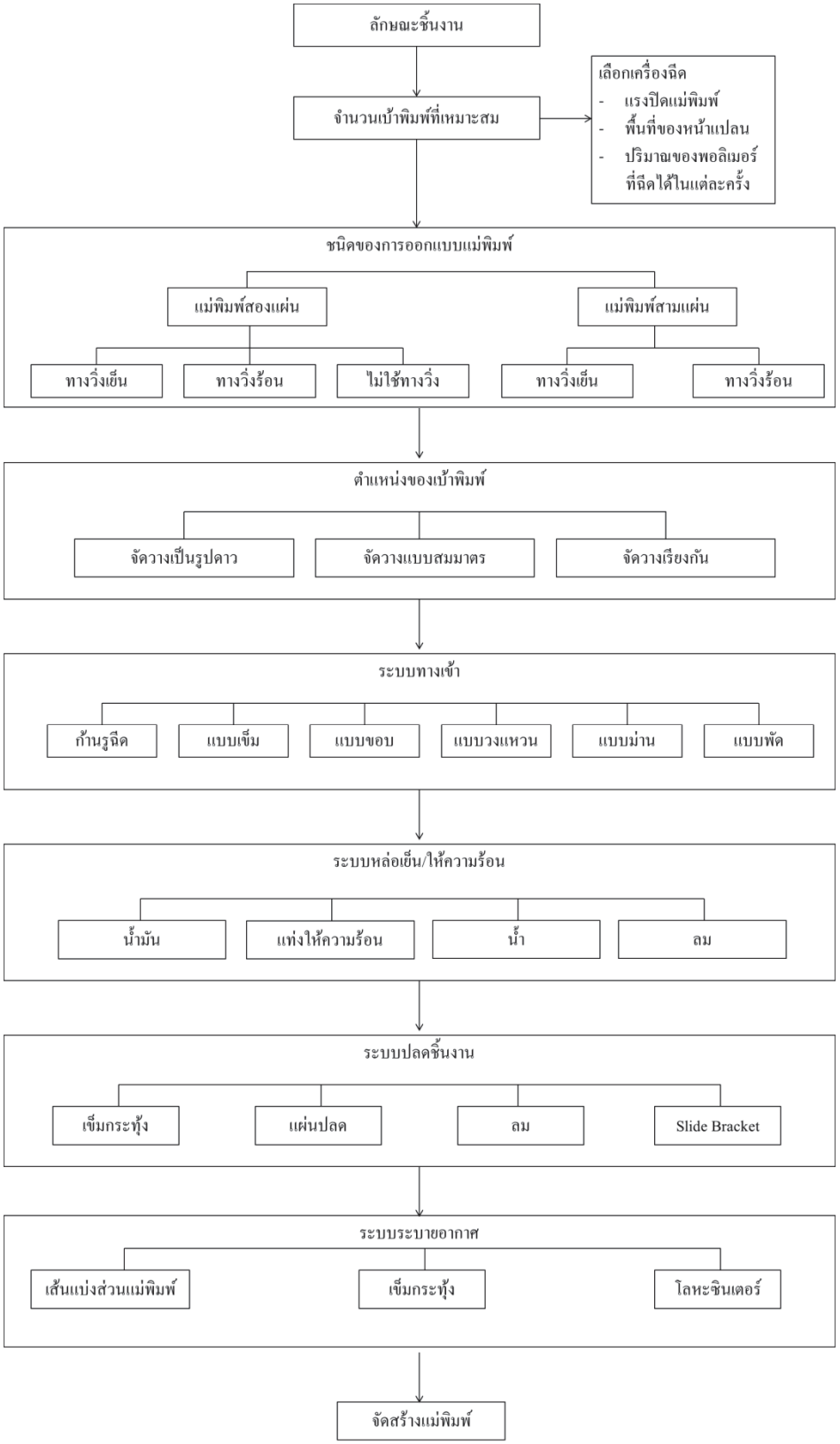
ภาพที่ 53 การกำหนดตำแหน่งของทางเข้าและรอยประสาน กรณี 1 ทางเข้า

3. การออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ฉีด

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ฉีดที่สามารถนำไปใช้ได้ทั้งการฉีดเทอร์โมพลาสติกและการฉีดยาง โดยเริ่มจากการพิจารณาถึงลักษณะและจำนวนของชิ้นงานเป็นอันดับแรก เนื่องจากลักษณะและจำนวนของชิ้นงาน ส่งผลต่อการเลือกขนาดของแม่พิมพ์และขนาดของเครื่องฉีด ชิ้นงานที่ออกแบบมีความกว้างมากสุดเท่ากับ 150 mm ความยาวมากสุดเท่ากับ 150 mm และหนา 2 mm ดังแสดงในภาพที่ 54 และมีขั้นตอนในการออกแบบแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 55



ภาพที่ 54 ลักษณะของชิ้นงานที่ออกแบบเพื่อทดสอบฉีดขึ้นรูป



ภาพที่ 55 ขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด

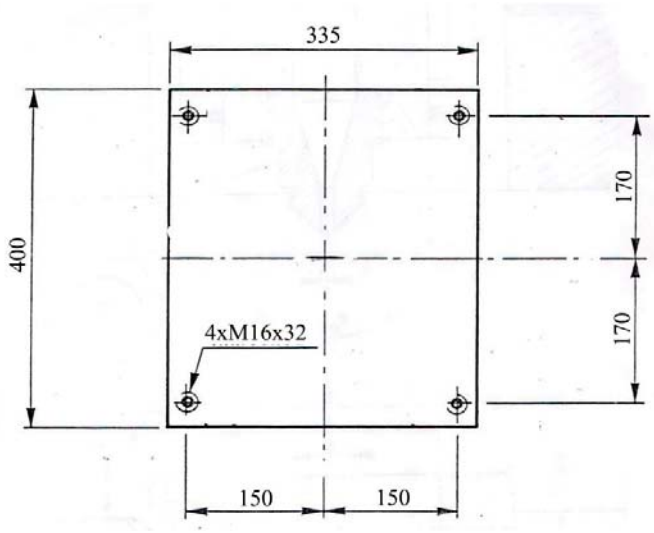
เมื่อกำหนดลักษณะและขนาดของชิ้นงานแล้ว พบว่า ปริมาตรมากสุดของชิ้นงานที่ได้ออกแบบคือ 45 cc. เครื่องฉีดจึงควรมีปริมาตรการฉีดต่อครั้งที่สูงกว่าปริมาตรมากสุดของชิ้นงาน โดยมีขนาดของเครื่องฉีดยาง Rep และเครื่องฉีดเทอร์โมพลาสติก Arburg ดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ขนาดของเครื่องฉีดยางและเครื่องฉีดเทอร์โมพลาสติก

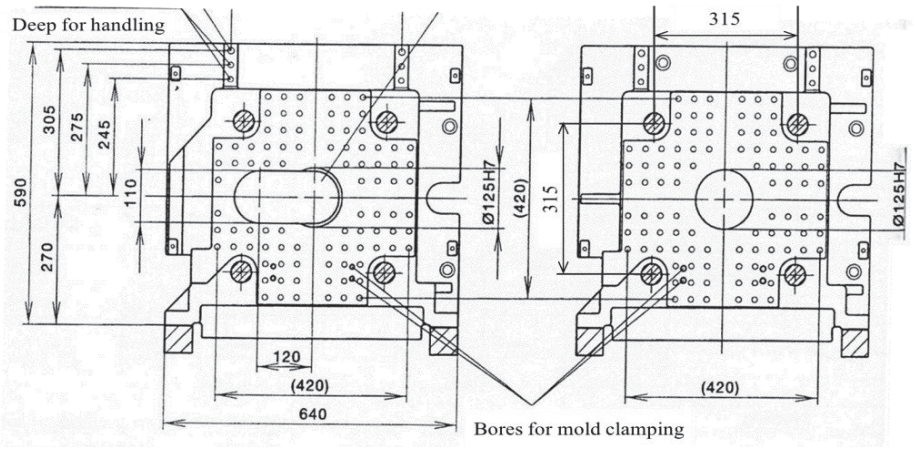
Injection machine	Nozzle sizes	Shot sizes (cc.)
Rep V37/100	SR11	550
Arburg 320C 500-250	R36	144

3.1 ขั้นตอนการออกแบบแผ่นยึดด้านบนและด้านล่าง

การยึดแม่พิมพ์เข้ากับหน้าแปลนเครื่องฉีด ทำได้ 2 วิธี คือ ขันเกลียวยึดโดยตรงกับแผ่นแม่พิมพ์ และขันเกลียวยึดทางอ้อม โดยใช้แผ่นกด (Clamp plate) แหวนรองและสกรู ระยะสกรูควรอยู่ใกล้กับจุดกดบนแม่พิมพ์มากที่สุด สำหรับเครื่องฉีดยาง ซึ่งใช้วิธีการยึดแม่พิมพ์เข้ากับหน้าแปลนจำเป็นต้องกำหนดขนาดของแผ่นยึดด้านบนให้มีตำแหน่งรูยึดน็อตของแผ่นยึดตรงกับรูยึดน็อตของเครื่องฉีด ระยะของรูยึดน็อตกับหน้าแปลนเครื่องฉีดยาง Rep มีขนาด 340x300 mm ดังแสดงในภาพที่ 56 ในขณะที่เครื่องฉีดเทอร์โมพลาสติก ใช้การยึดแม่พิมพ์แบบขันเกลียวยึดทางอ้อม การกำหนดขนาดแผ่นยึดด้านบนจึงควรกำหนดให้สามารถประกอบเข้าในระยะไทด์บาร์ของเครื่องฉีดได้ โดยระยะไทด์บาร์ของเครื่องฉีดเทอร์โมพลาสติก มีขนาด 315x315 mm ดังแสดงในภาพที่ 57 ขนาดความกว้างและความยาวของแม่พิมพ์มากสุด ถูกกำหนดด้วยระยะห่างของเพลานำเลื่อนในแนวระดับและแนวตั้ง รวมถึงระยะห่างของรูสกรูและขนาดของสกรูที่ใช้ยึดแม่พิมพ์ฉีดกับเครื่องฉีดอีกด้วย สำหรับความสูงของแม่พิมพ์ฉีด พิจารณาได้จากช่องว่างกว้างสุดในจังหวะเปิดของเครื่องฉีด และช่องว่างแคบสุดเมื่อเครื่องฉีดอยู่ในจังหวะปิด โดยช่องว่างกว้างสุดเป็นตัวกำหนดขนาดของแม่พิมพ์สูงสุด บวกกับระยะที่แม่พิมพ์เปิดออกเพื่อปลดชิ้นงาน และขนาดช่องว่างเล็กสุดเป็นตัวกำหนดขนาดความสูงของแม่พิมพ์น้อยที่สุดที่สามารถนำไปประกอบบนเครื่องฉีดได้



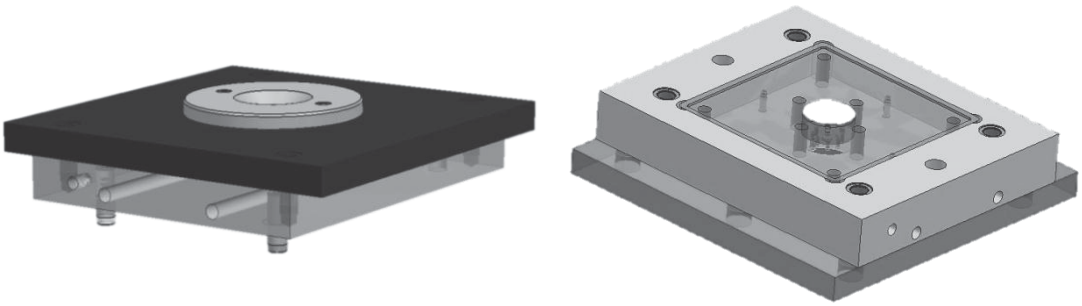
ภาพที่ 56 ระยะของรูยึดน็อตกับหน้าแปลนเครื่องฉีดของ Rep V37/100



ภาพที่ 57 ระยะของรูยึดน็อตกับหน้าแปลนเครื่องฉีดเทอร์โมพลาสติก Arburg 320C 500-250

3.2 ชนิดของแม่พิมพ์ฉีด

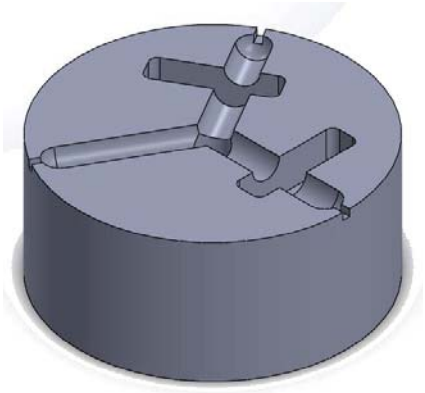
เนื่องจากชิ้นงานมีรูปร่างไม่ซับซ้อน ปราศจากร่องหรือบ่า และมีขนาดบาง จึงออกแบบแม่พิมพ์เป็นแบบ 2 แผ่น ดังแสดงในภาพที่ 58



ภาพที่ 58 แม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น

3.3 ชนิดและลักษณะของอินเสิร์ท

แผ่นอินเสิร์ทควรทำเป็นรูปร่างทรงกระบอกหรือสี่เหลี่ยม เพื่อให้ง่ายต่อการตัดเฉือนขึ้นรูป วิธีการยึดแผ่นอินเสิร์ทสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การใช้สกรูหัวฝังยึดจากทางด้านล่างหรือใช้หน้าแปลนยึด แม่พิมพ์ที่ได้ออกแบบนี้ใช้วิธีการยึดแผ่นอินเสิร์ทโดยใช้สกรูยึดจากด้านล่าง เพื่อให้สามารถหมุนปรับตำแหน่งทางเข้าในการทดลองได้ ดังแสดงในภาพที่ 59



ภาพที่ 59 อินเสิร์ทสำหรับปรับเปลี่ยนตำแหน่งทางเข้า

3.4 เพลานำและปลอกนำ (Guide pillars and bushes)

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

3.5 ปลอกรูฉีด (Sprue bush)

ในการออกแบบขนาดของปลอกรูฉีดควรพิจารณาถึงขนาดของหัวฉีด โดยขนาดรัศมีของบ่ารับบนปลอกรูฉีดต้องใหญ่กว่ารัศมีของหัวฉีดเล็กน้อย และรูของปลอกรูฉีดใหญ่กว่ารูของหัวฉีดประมาณ 0.8-1 mm รูของปลอกรูฉีดมีมุมเรียวระหว่าง 3-5 องศา ทำให้ถอดแกนรูฉีดได้สะดวกขึ้น และใช้สลักบังคับตำแหน่งหรือสกรูยึดเพื่อป้องกันไม่ให้ปลอกรูฉีดส่วนที่อยู่ติดกับทางวิ่งหมุนเลื่อนตำแหน่ง

ขณะใช้งาน และทำเป็นบ่าที่ปลายและยึดด้วยแหวนบังคับศูนย์เพื่อป้องกันไม่ให้ปลอกรูฉีดเคลื่อนที่ถอยหลัง ความยาวของปลอกรูฉีดต้องไม่เกินความหนาของแผ่นแม่พิมพ์ส่วนที่อยู่กับที่ ขนาดของหัวฉีดของเครื่องฉีด Rep และ Arburg แสดงดังตารางที่ 10

3.6 แหวนบังคับศูนย์ (Locating ring)

ใช้กำหนดตำแหน่งของแม่พิมพ์ให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องบนหน้าแปลนของเครื่องฉีด และควรสวมเข้ากับรูทรงกระบอกบนหน้าแปลนส่วนที่อยู่กับที่ได้พอดี โดยมีขนาด 120 mm สำหรับเครื่องฉีดเทอร์โมพลาสติก และ 80 mm สำหรับเครื่องฉีดยาง

3.7 ทางวิ่ง (Runner)

ขนาดของทางวิ่งต้องไม่เล็กกว่าส่วนที่หนาที่สุดของชิ้นงาน ส่วนใหญ่มักใช้ 3 mm ถึง 15 mm (ชาลี, 2546) ปัจจัยที่ควรนำไปพิจารณาในการออกแบบขนาดทางวิ่งที่เหมาะสมแสดงดังภาพที่ 20 สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ทางวิ่งขนาด 4 mm

3.8 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

3.9 ท่อน้ำหล่อเย็น (Cooling channel)

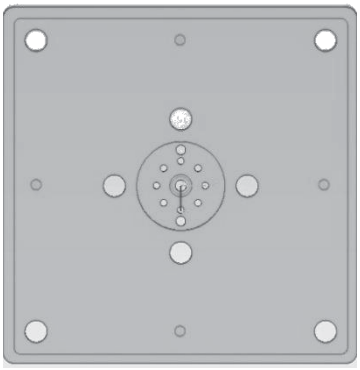
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้ำหล่อเย็นสามารถพิจารณาได้จากความหนาของชิ้นงาน ดังแสดงในตารางที่ 11 เมื่อชิ้นงานมีความหนา 2 mm พบว่า ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8-10 mm โดยมีระยะห่างจากชิ้นงานเท่ากับ 2.5 เท่าของขนาดท่อน้ำหล่อเย็น หรือ 25 mm เมื่อเลือกใช้ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็น 10 mm โดยที่ระยะห่างของท่อน้ำหล่อเย็นควรมีความกว้างไม่เกิน 3 เท่าของขนาดของท่อน้ำหล่อเย็น หรือ 30 mm

ตารางที่ 11 ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นที่เหมาะสมกับขนาดของชิ้นงาน

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

3.10 ระบบนำปลดชิ้นงาน (Ejector system)

ระบบนำปลดที่เลือกใช้ในแม่พิมพ์นี้เป็นแบบก้านกระทุ้ง (Ejector pin) โดยมีการจัดวางดังแสดงในภาพที่ 60

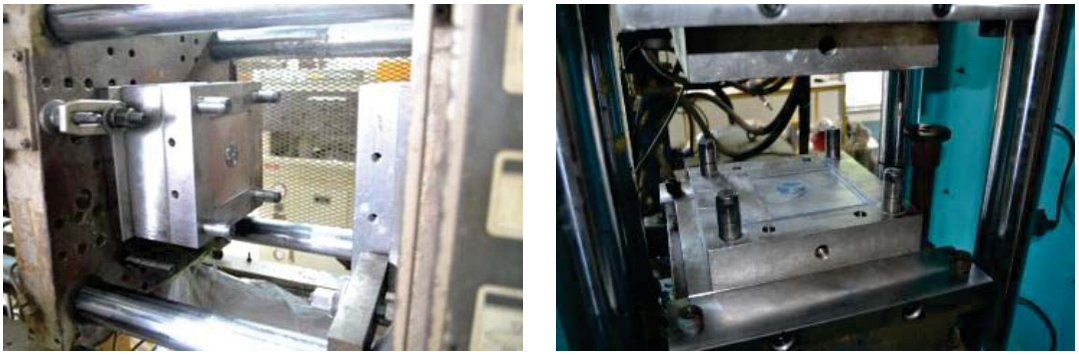


ภาพที่ 60 การจัดวางตำแหน่งก้านกระทุ้งที่บริเวณชิ้นงาน

3.11 ระบบระบายอากาศ (Venting system)

กำหนดให้มีช่องระบายอากาศออกที่บริเวณเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์และบริเวณก้านกระทุ้งของแม่พิมพ์ สำหรับแม่พิมพ์ฉีดเทอร์โมพลาสติก และกำหนดให้มีช่องระบายอากาศที่บริเวณเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์ สำหรับแม่พิมพ์ฉีดยาง

จากขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์ที่กล่าวมาข้างต้น แม่พิมพ์ฉีดเทอร์โมพลาสติกและแม่พิมพ์ฉีดยางที่ออกแบบและจัดสร้างมีการประกอบยึดกับเครื่องฉีด ดังแสดงในภาพที่ 61



(ก) (ข)

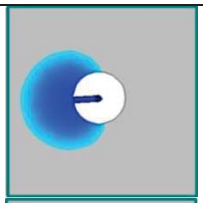
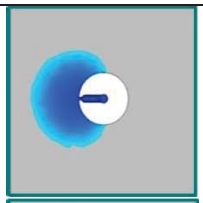
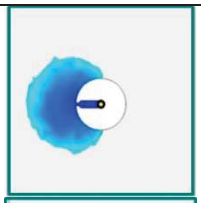
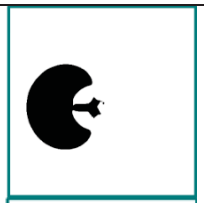
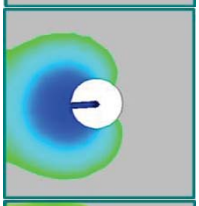
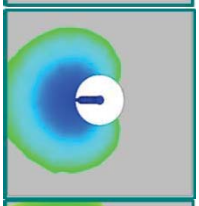
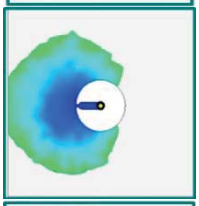
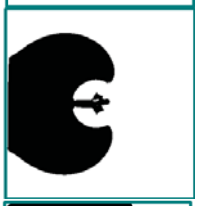
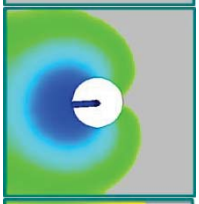
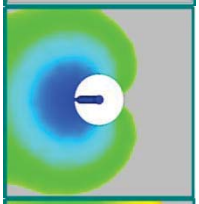
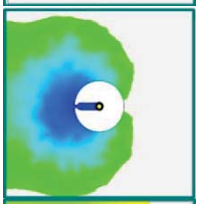
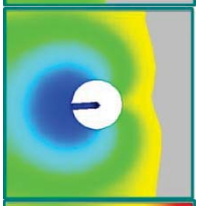
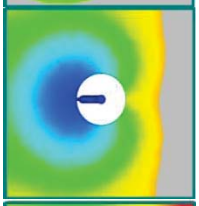
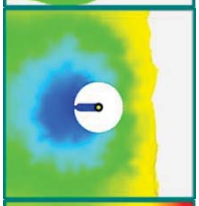
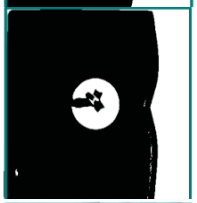
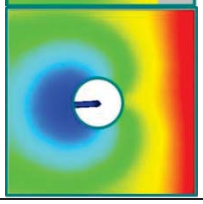
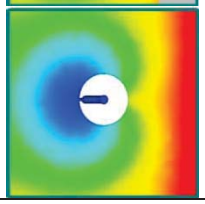
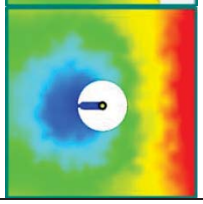
ภาพที่ 61 การประกอบยึดแม่พิมพ์กับเครื่องฉีด (ก) เทอร์โมพลาสติก (ข) ยาง

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์ฉีดโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม

จากตารางที่ 12 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) โดยพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานจริงนี้ เป็นสมมติฐานที่โปรแกรมวิเคราะห์การไหลไม่นำมาพิจารณาในการคำนวณ ซึ่งได้แก่ การกำหนดให้การถ่ายเทความร้อนของพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าคงที่ตลอดระยะทางการไหล (Isothermal flow) และกำหนดให้ความเร็วในการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ผนังเท่ากับศูนย์หรือไม่มีการเลื่อนตัวที่ผนัง (No-slip at wall) จากผลจำลองการไหลที่ได้ ทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้แบบจำลอง 2.5D สำหรับการจำลองการไหลของชิ้นงานผนังบาง เพื่อนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปใช้ในการฝึกสอนเครือข่ายประสาทเทียม

ตารางที่ 12 การวิเคราะห์รูปร่างการไหลภายในแม่พิมพ์ฉีดโดยใช้เอลิเมนต์แบบ 2D 2.5D 3D และชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปจริง ที่ปริมาตรการฉีดแตกต่างกัน

Volume	2D mesh	2.5D mesh	3D mesh	Experiment
20%				
40%				
60%				
80%				
100%				

2. ผลการพัฒนาขั้นตอนวิธีกำหนดตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสมของชิ้นงานที่มี 4 ทางเข้า กรณีศึกษา: กรอบหน้าจอของคอมพิวเตอร์แบบพกพา

2.1 ผลการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบที่เหมาะสมของเครือข่ายประสาทเทียม

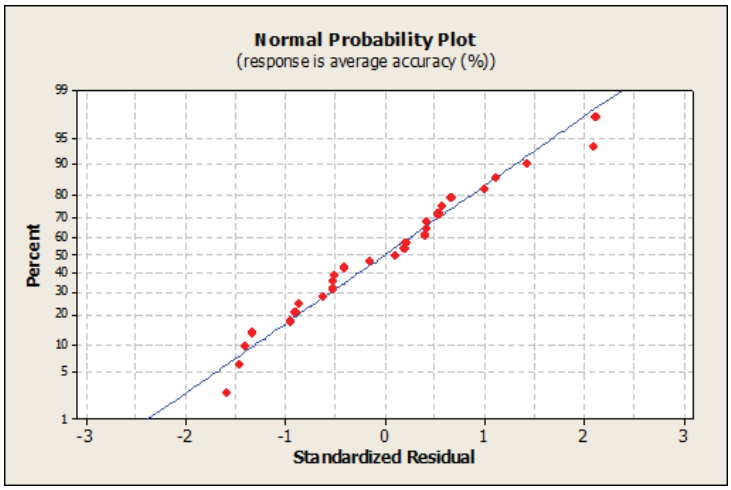
ผลของการทดลองเพื่อกำหนดอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบที่เหมาะสมในการฝึกสอนเครือข่ายประสาทเทียม ดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 การทดลองเพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสมของเครือข่ายประสาทเทียม เมื่อค่าแรงดันฉีดสูงสุดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละตำแหน่งทางเข้าเป็นข้อมูลส่งออก

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
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

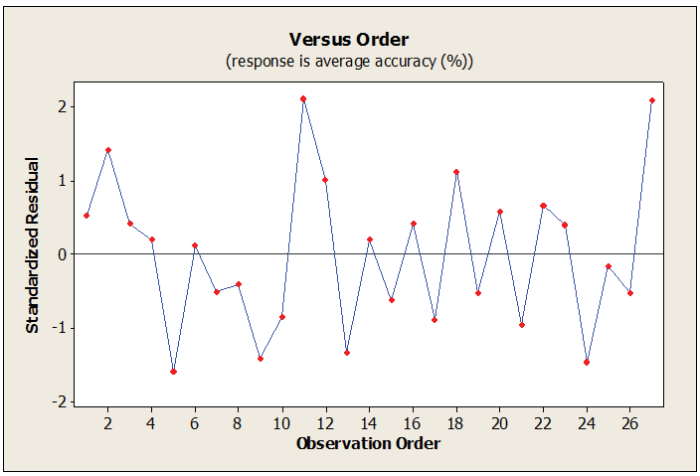
2.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ เมื่อค่าแรงดันฉีดสูงสุดเป็นข้อมูลส่งออก

2.2.1 การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูล พิจารณาลักษณะการแจกแจงแบบปกติโดยใช้ค่าความแม่นยำที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปมาก กับค่าความน่าจะเป็นสะสม เมื่อพิจารณาค่ากลางของภาพที่ 62 พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงถึงการกระจายแบบปกติ และข้อมูลมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน



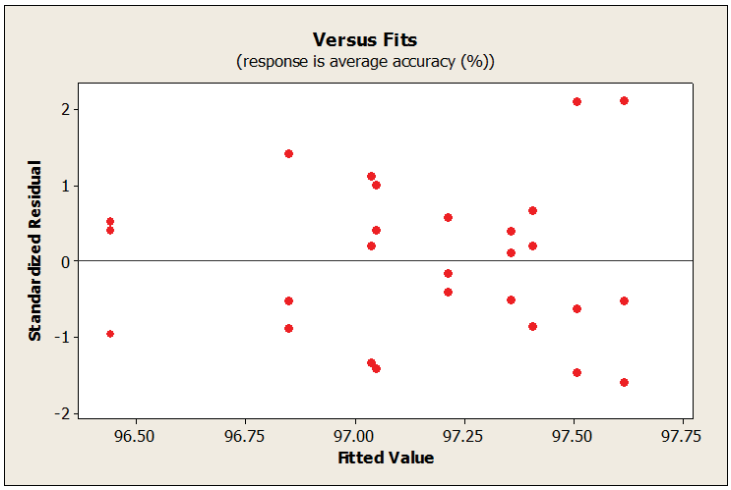
ภาพที่ 62 การแจกแจงความน่าจะเป็นเพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อข้อมูลส่งออกคือ ค่าแรงดันฉีดสูงสุด

2.2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการทดสอบถึงความสัมพันธ์ของค่าความแม่นยำ โดยใช้ค่าความแม่นยำและลำดับของเวลา ดังแสดงในภาพที่ 63 พบว่า ความแปรปรวนของความผิดพลาดไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการทดลอง สามารถนำข้อมูลไปใช้วิเคราะห์ได้



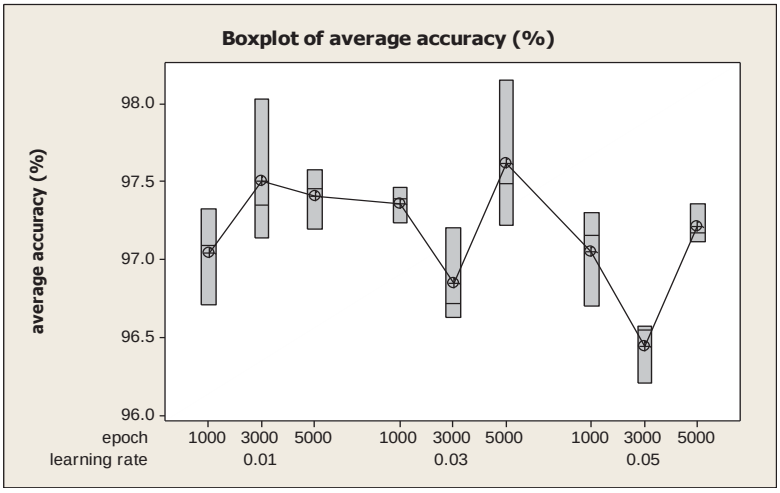
ภาพที่ 63 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อข้อมูลส่งออกคือ ค่าแรงดันฉีดสูงสุด

2.2.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน จากการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล ดังแสดงในภาพที่ 64 พบว่าเป็นการกระจายทั่วไป ไม่มีรูปร่างหรือโครงสร้างใดๆ เกิดขึ้น ข้อมูลสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ได้



ภาพที่ 64 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อข้อมูลส่งออกคือ ค่าแรงดันฉีดสูงสุด

2.2.4 การวิเคราะห์โดยแผนภาพแบบกล่อง การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองเพื่อกำหนดอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม ดังแสดงในภาพที่ 65



ภาพที่ 65 แผนภาพกล่องเพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อข้อมูลส่งออกคือ ค่าแรงดันฉีดสูงสุด

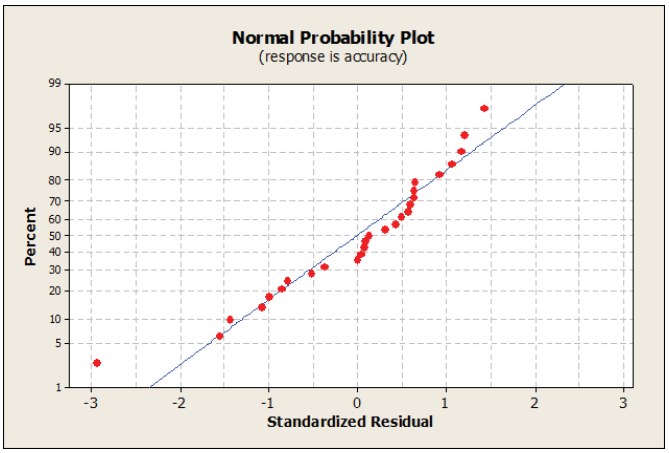
การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของความแปรปรวน ดังแสดงในตารางที่ 14 เพื่อหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการสอนที่เหมาะสม ซึ่งพบว่า P-value มีค่าที่น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองทั้ง 3 แบบมีความแตกต่างกัน จึงพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งพบว่า จำนวนรอบการสอนที่ 1,000 รอบ และอัตราการเรียนรู้ที่ 0.03 ให้ค่าที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายค่าแรงดันฉีดสูงสุด

ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองเพื่อหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อข้อมูลส่งออกคือ ค่าแรงดันฉีดสูงสุด

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				

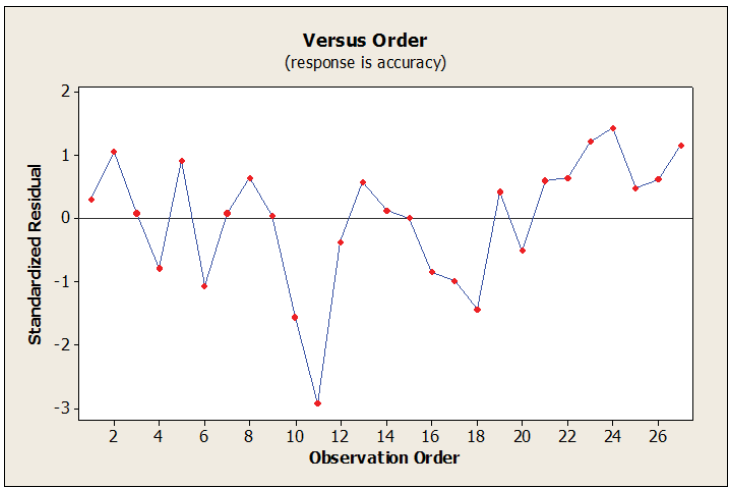
2.3 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบเมื่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละตำแหน่งทางเข้าเป็นข้อมูลส่งออก

2.3.1 การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูล ถึงลักษณะการแจกแจงแบบปกติโดยใช้ค่าความแม่นยำที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปมาก กับค่าความน่าจะเป็นสะสม เมื่อพิจารณาค่ากลาง ดังแสดงในภาพที่ 66 พบว่า มีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่ามีการกระจายแบบปกติ และข้อมูลนี้มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน



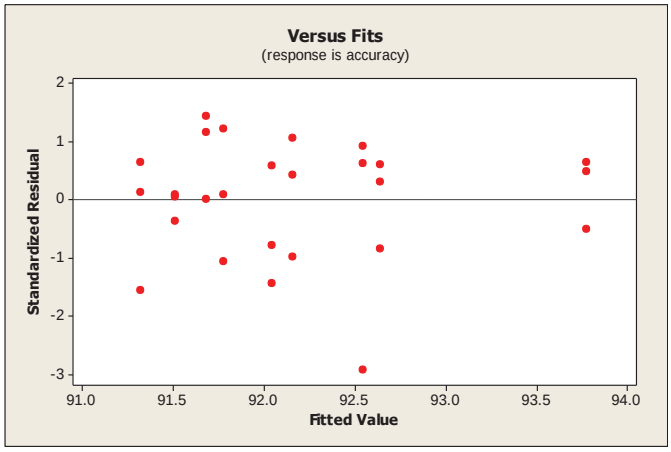
ภาพที่ 66 การแจกแจงความน่าจะเป็นเพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อมีข้อมูลส่งออกคือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า

2.3.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการทดสอบถึงความสัมพันธ์ของค่าความแม่นยำ พบว่าความแปรปรวนของความผิดพลาดไม่ได้เปลี่ยนไปตามเวลาการทดลอง สามารถนำข้อมูลไปใช้วิเคราะห์ได้ ดังแสดงในภาพที่ 67



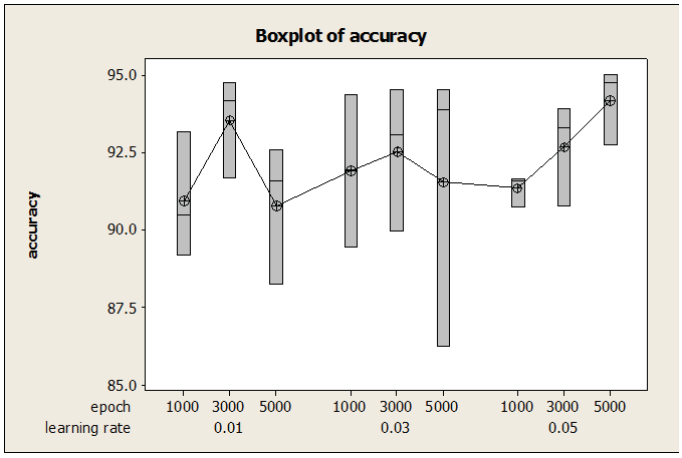
ภาพที่ 67 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อมีข้อมูลส่งออกคือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า

2.3.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน พบว่าเป็นการกระจายทั่วไป ไม่มีรูปร่างหรือโครงสร้างใดๆ เกิดขึ้น ข้อมูลสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ได้ ดังแสดงในภาพที่ 68



ภาพที่ 68 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อมีข้อมูลส่งออกคือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า

2.3.4 การวิเคราะห์โดยแผนภาพแบบกล่อง การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองเพื่อกำหนดอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม ดังแสดงในภาพที่ 69



ภาพที่ 69 แผนภาพกล่องเพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อมีข้อมูลส่งออกคือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า

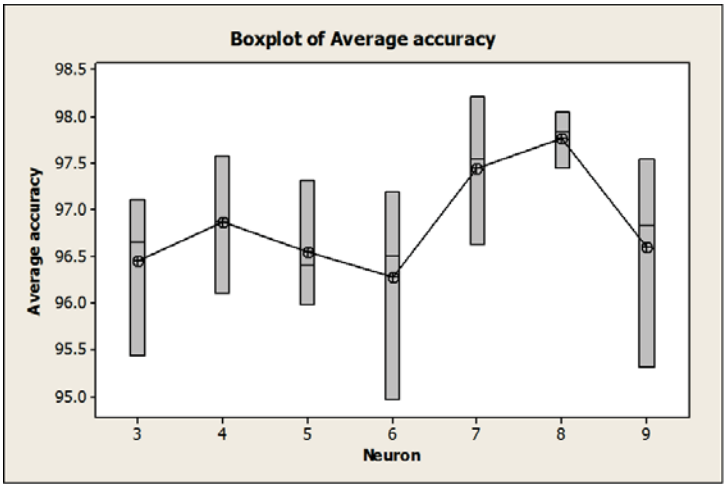
การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของความแปรปรวน ดังแสดงในตารางที่ 15 เพื่อหาอัตราการเรียนรู้ และจำนวนรอบการสอนที่เหมาะสม ซึ่งพบว่า P-value มีค่าที่มากกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรทั้งสองตัวให้ผลของประสิทธิภาพในการทำนายไม่แตกต่างกัน สามารถนำค่าใดค่าหนึ่งมาใช้ในงานวิจัยได้ จึงพิจารณาถึงค่าความแม่นยำและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่าจำนวนรอบการสอนที่ 5,000 รอบ และอัตราการเรียนรู้ที่ 0.05 ให้ค่าที่เหมาะสมในการทำนายค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองเพื่อหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกสอนที่เหมาะสม เมื่อมีข้อมูลส่งออกคือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า

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 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าแรงดันฉีดสูงสุดเป็นข้อมูลส่งออก ดังแสดงในภาพที่ 70



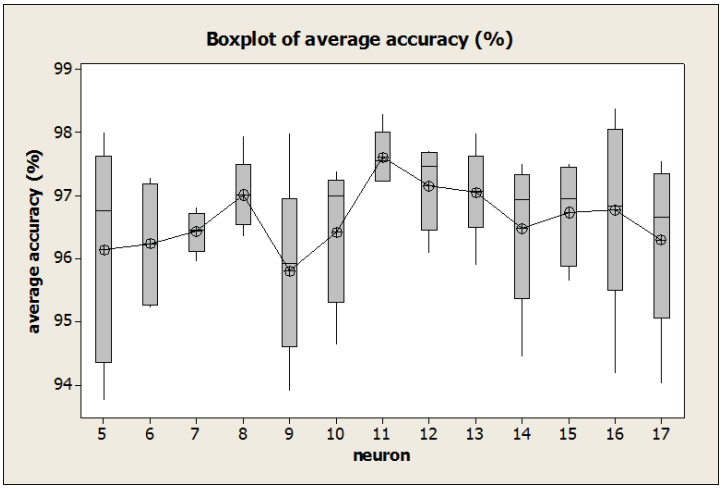
ภาพที่ 70 แผนภาพกล่องเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 1 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าแรงดันฉีดสูงสุดเป็นข้อมูลส่งออก

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของความแปรปรวน ดังแสดงในตารางที่ 16 เพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสม ซึ่งพบว่า P-value มีค่าที่น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าในแต่ละจำนวนนิวรอนให้ค่าความแม่นยำที่แตกต่างกัน จึงพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งพบว่า จำนวนนิวรอน 8 นิวรอน ให้ค่าที่เหมาะสมมากที่สุด

ตารางที่ 16 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 1 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าแรงดันฉีดสูงสุดเป็นข้อมูลส่งออก

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 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าแรงดันฉีดสูงสุดเป็นข้อมูลส่งออก ดังแสดงในภาพที่ 71



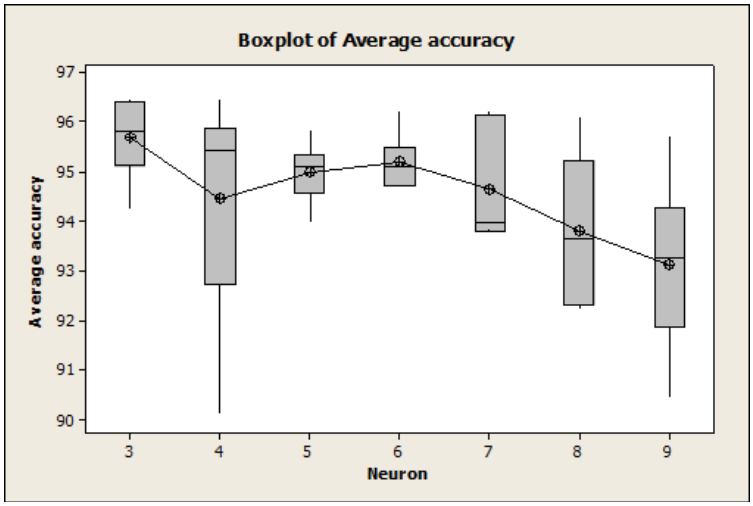
ภาพที่ 71 แผนภาพกล่องเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 2 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าแรงดันฉีดสูงสุดเป็นข้อมูลส่งออก

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของความแปรปรวน ดังแสดงในตารางที่ 17 เพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสม ซึ่งพบว่า P-value มีค่าที่มากกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรทั้ง 13 ตัวให้ผลของประสิทธิภาพในการทำนายไม่แตกต่างกัน สามารถนำค่าใดค่าหนึ่งมาใช้ในงานวิจัยได้ จึงพิจารณาถึงค่าความแม่นยำ พบว่าที่จำนวน 11 นิวรอน มีความเหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 2 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าแรงดันฉีดสูงสุดเป็นข้อมูลส่งออก

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 72



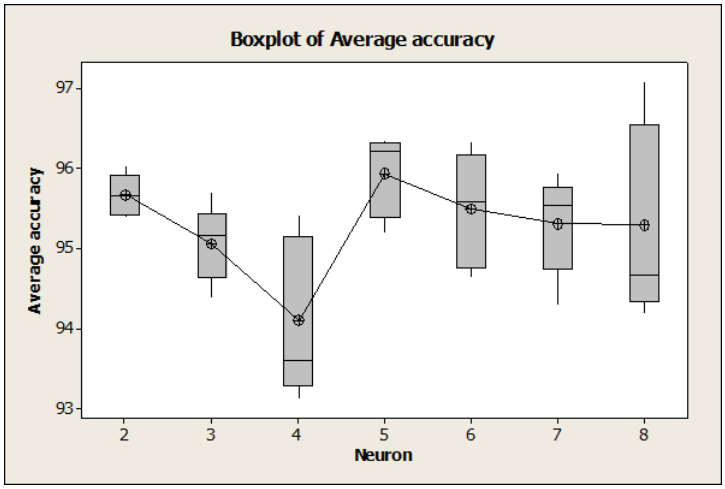
ภาพที่ 72 แผนภาพกล่องเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 1 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าเป็นข้อมูลส่งออก

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของความแปรปรวน ดังแสดงในตารางที่ 18 เพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสม ซึ่งพบว่า P-value มีค่าที่มากกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปร 7 ตัวให้ผลของประสิทธิภาพในการทำนายไม่แตกต่างกัน สามารถนำค่าใดค่าหนึ่งมาใช้ในงานวิจัยได้ จึงพิจารณาถึงค่าความแม่นยำ พบว่าที่จำนวน 3 นิวรอน ให้ค่าความแม่นยำมากที่สุด

ตารางที่ 18 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 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 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าเป็นข้อมูลส่งออก ดังแสดงในภาพที่ 73



ภาพที่ 73 แผนภาพกล่องเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 2 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าเป็นข้อมูลส่งออก

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของความแปรปรวน ดังแสดงในตารางที่ 19 เพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสม ซึ่งพบว่า P-value มีค่าที่น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรทั้ง 7 ตัวให้ผลของประสิทธิภาพในการทำนายแตกต่างกัน และพบว่าที่จำนวน 5 นิวรอน มีความเหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองเพื่อหาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมสำหรับจำนวนชั้นซ่อนที่ 2 สำหรับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าเป็นข้อมูลส่งออก

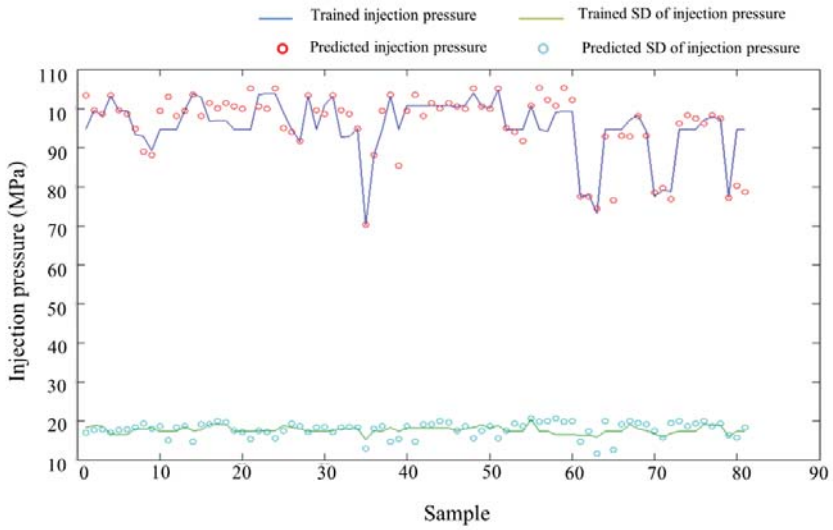
Source	DF	SS	MS	F	P
Neuron	6	10.272	1.712	3.03	0.021
Error	28	15.828	0.565		
Total	34	26.101			

2.5 ผลการออกแบบสถาปัตยกรรมที่เหมาะสมของเครือข่ายประสาทเทียม

สถาปัตยกรรมเครือข่ายที่เหมาะสม เมื่อมีค่าแรงดันฉีด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังแสดงในตารางที่ 20 โดยได้ผลจากการทำนายค่าแรงดันฉีดสูงสุดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละตำแหน่งทางเข้า ดังแสดงในภาพที่ 74

ตารางที่ 20 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 74 ผลการทำนายค่าแรงดันฉีดสูงสุดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า

2.6 ผลการออกแบบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเจเนติกอัลกอริทึม

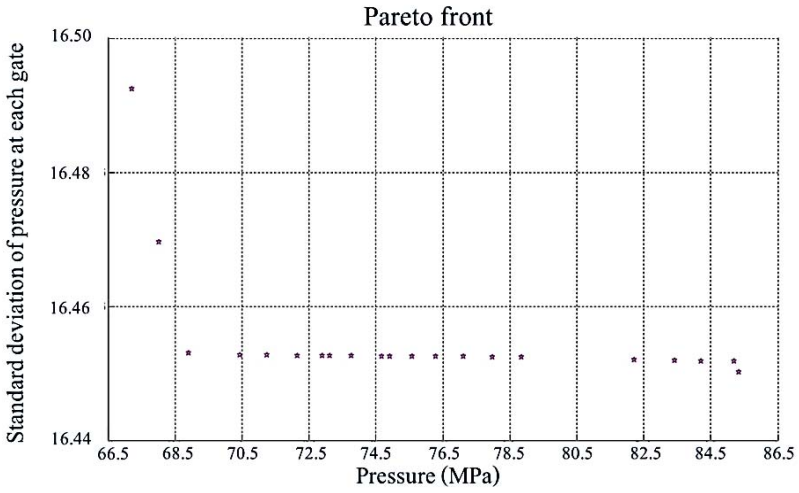
แบบจำลองของเครือข่ายประสาทเทียมที่ได้ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมโดยเจเนติกอัลกอริทึม อย่างไรก็ตาม เมื่อนำฟังก์ชันที่ได้ไปหาคำตอบโดยใช้เจเนติกอัลกอริทึม พบว่า ได้คำตอบของฟังก์ชันที่มีค่าวัตถุประสงค์ต่ำที่สุดตามที่ต้องการ แต่คำตอบนั้นส่งผลให้เกิดตำแหน่งช่องระบายอากาศที่ไม่เหมาะสม การใช้เจเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์เพื่อให้พิจารณาเลือกคำตอบที่เกิดตำแหน่งช่องระบายอากาศที่เหมาะสมจากชุดคำตอบพาเรโตจึงมีความเหมาะสมมากกว่า จากการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเจเนติกอัลกอริทึมแบบหลาย

วัตถุประสงค์ โดยการปรับเปลี่ยนขนาดประชากร อัตราการสลับสายพันธุ์ และอัตราการกลายพันธุ์ จนได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 21 ส่งผลให้ได้ชุดคำตอบพาเรโต ดังแสดงในภาพที่ 75 จากนั้นจึงเลือกคำตอบที่เหมาะสมออกมาค่าหนึ่ง โดยการพิจารณาถึงค่ากลาง (Compromised solution) ของค่าวัตถุประสงค์ที่ได้ และตำแหน่งของช่องระบายอากาศที่เหมาะสม โดยตำแหน่งของทางเข้าส่งผลต่อตำแหน่งของรอยประสานที่เกิดขึ้น การกำหนดตำแหน่งช่องระบายอากาศเพื่อระบายอากาศที่ถูกดักบริเวณรอยประสานนั้นส่งผลให้ความแข็งแรงของบริเวณที่เกิดรอยประสานสูงขึ้น ซึ่งตำแหน่งของช่องระบายอากาศที่เหมาะสมมีข้อพิจารณา คือ เป็นตำแหน่งที่ไม่อยู่ใกล้บริเวณอินเสิร์ทหรืออยู่กลางชิ้นงาน เนื่องจากในการทำช่องระบายอากาศต้องเจาะผิวแม่พิมพ์ด้านบน ซึ่งทำได้ยาก ทั้งนี้เห็นได้ว่าหากไม่พิจารณาถึงตำแหน่งของช่องระบายอากาศที่เหมาะสม ตำแหน่งจุดดักอากาศอาจอยู่ใกล้บริเวณอินเสิร์ท ซึ่งเป็นส่วนที่บางและจัดทำช่องระบายอากาศได้ยาก ดังนั้นการกำหนดตำแหน่งช่องระบายอากาศที่เหมาะสมโดยการพิจารณาถึงตำแหน่งรอยประสานและจุดดักอากาศที่มีการกระจายออกถึงขอบของชิ้นงานจึงมีความเหมาะสมมากกว่า จากสาเหตุดังกล่าวจึงพิจารณาเลือกค่าตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสมที่มีค่าแรงดันฉีดสูงสุดเท่ากับ 68.72 MPa ซึ่งลดลงจากค่าแรงดันฉีดจากตำแหน่งทางเข้าก่อนหาค่าที่เหมาะสมซึ่งมีค่าแรงดันฉีดสูงสุดอยู่ที่ 103.3 MPa ดังแสดงในภาพที่ 76(ก) และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า 16.45 MPa ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง $[L_1, L_2, L_3, L_4]$ = [187.32, 36.31, 180.49, 89.76] เมื่อนำไปตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ได้ค่าแรงดันฉีดสูงสุดอยู่ที่ 68.51 MPa ดังแสดงในภาพที่ 76(ข) และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า 15.6 MPa โดยมีตำแหน่งของช่องระบายอากาศก่อนหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสม ดังแสดงในภาพที่ 77(ก) และภายหลังการหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมซึ่งสามารถจัดทำช่องระบายอากาศได้ที่ขอบของชิ้นงานและระบายอากาศออกทางเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 77(ข)

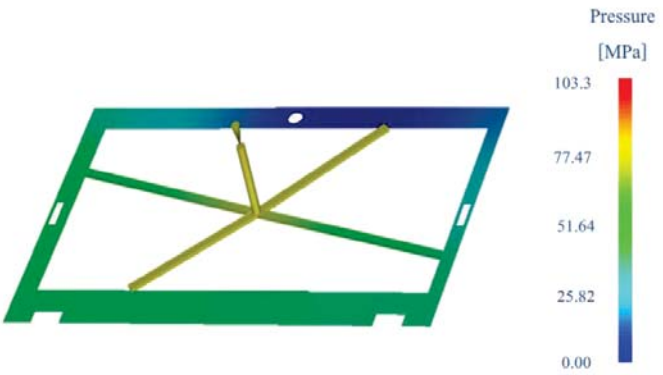
เมื่อพิจารณาถึงความแม่นยำจากการใช้เครือข่ายประสาทเทียมร่วมกับเจเนติกอัลกอริทึมเทียบกับผลวิเคราะห์จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม โดยเปรียบเทียบค่าแรงดันฉีดสูงสุดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าที่ได้จากตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสมจากเจเนติกอัลกอริทึมและจากตำแหน่งทางเข้าเดียวกันโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม พบว่ามีค่าความแม่นยำของค่าแรงดันฉีดสูงสุดอยู่ที่ 99.69% และความแม่นยำของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าอยู่ที่ 94.55% วิธีการที่ได้นำเสนอนี้จึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปหาตำแหน่งของทางเข้าและช่องระบายอากาศที่เหมาะสม

ตารางที่ 21 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเจเนติกอัลกอริทึมกรณีศึกษา: กรอบหน้าจอของคอมพิวเตอร์แบบพกพา

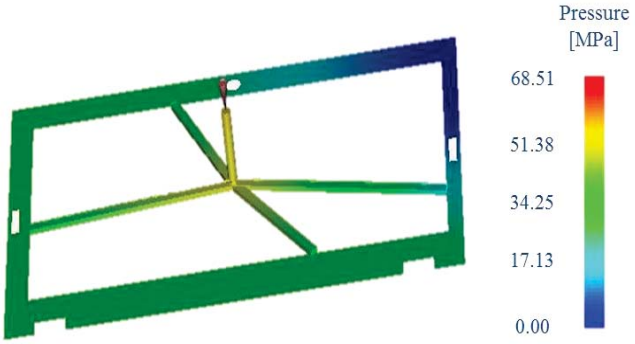
Optimal GA parameters	
Population	10
Crossover rate (P_c)	0.5
Mutation rate	0.1
Generation	250
The best solution	68.72 16.45



ภาพที่ 75 ชุดคำตอบพาเรโตระหว่างค่าแรงดันฉีดสูงสุดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้า

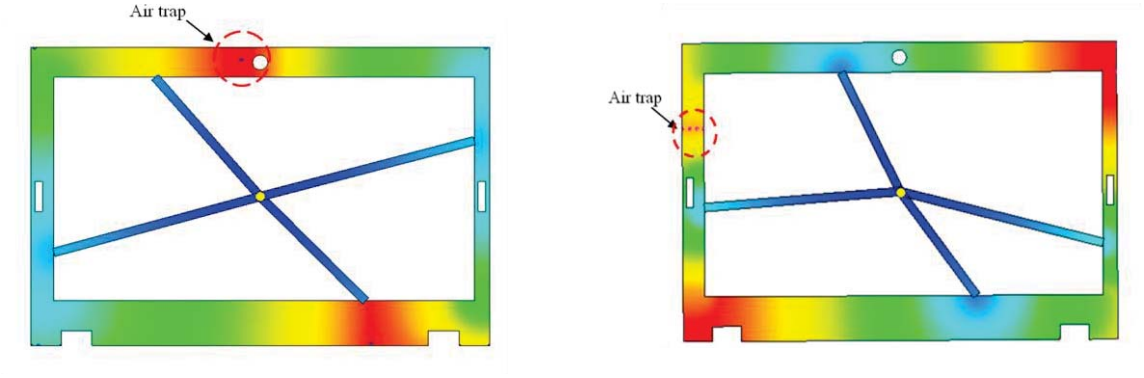


(ก)



(ข)

ภาพที่ 76 ค่าแรงดันฉีดสูงสุด (ก) ก่อนหาค่าที่เหมาะสม (ข) ภายหลังหาค่าที่เหมาะสม



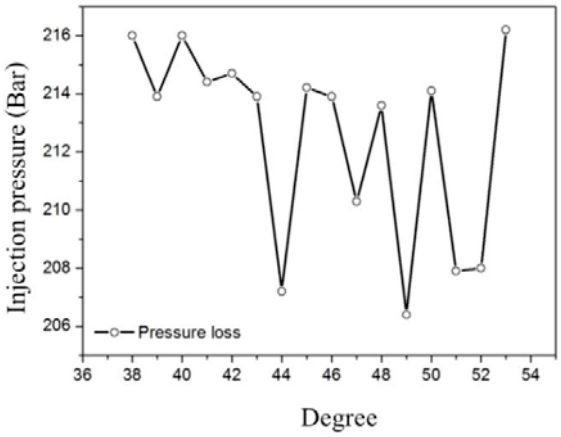
(ก) (ข)

ภาพที่ 77 ตำแหน่งของช่องระบายอากาศ (ก) ตำแหน่งช่องระบายอากาศอยู่ใกล้อินเสิร์ท (ข) ตำแหน่งช่องระบายอากาศที่เหมาะสม

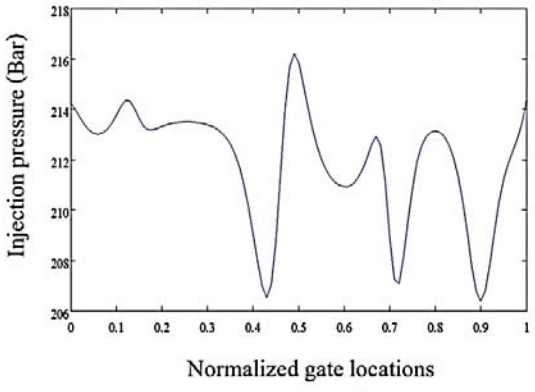
3. ผลการพัฒนาขั้นตอนวิธีกำหนดจำนวนและทางเข้าที่เหมาะสมที่สุด กรณีศึกษา: ชิ้นงานที่มีอินเสิร์ทภายในชิ้นงาน

3.1 ผลการทำนายค่าแรงดันฉีดสูงสุด และตำแหน่งของรอยประสานของแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม กรณีหนึ่งทางเข้า

ภายหลังการดำเนินแนวทางตามกรณีศึกษาแรกในการออกแบบสถาปัตยกรรมของแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม พบว่า สถาปัตยกรรมที่เหมาะสมสำหรับกรณีหนึ่งทางเข้า คือ 1-10-1 สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของค่าแรงดันฉีดสูงสุด และ 1-8-1 สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของค่าตำแหน่งของรอยประสาน ที่จำนวนรอบการฝึกสอน 1,000 และอัตราการเรียนรู้ 0.01 โดยมีค่าความผิดพลาด 1.384×10^{-13} สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของค่าแรงดันฉีดสูงสุด และค่าความผิดพลาด 1.404×10^{-13} สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตำแหน่งของรอยประสาน นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างค่าวัตถุประสงค์ทำนายได้กับข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน ดังแสดงในภาพที่ 78-79

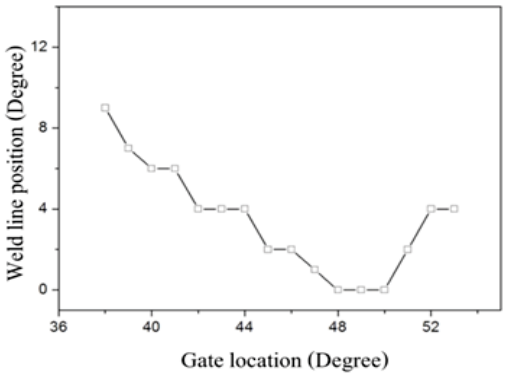


(ก)

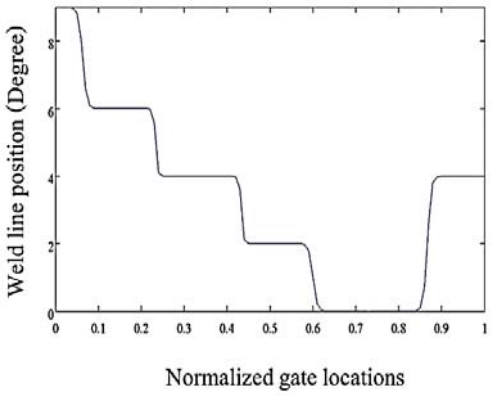


(ข)

ภาพที่ 78 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันฉีดสูงสุดและตำแหน่งของทางเข้า (ก) ข้อมูลที่นำมาใช้ฝึกสอน (ข) ค่าที่ทำนายได้โดยแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม



(ก)

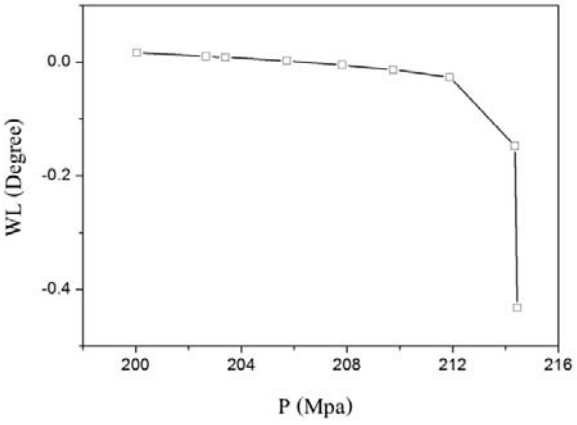


(ข)

ภาพที่ 79 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของรอยประสานและตำแหน่งของทางเข้า (ก) ข้อมูลที่นำมาใช้ฝึกสอน (ข) ค่าที่ทำนายได้โดยแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

3.2 ผลการกำหนดตำแหน่งของทางเข้าและช่องระบายอากาศที่เหมาะสม ที่ได้จากการใช้เจเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์ กรณีหนึ่งทางเข้า

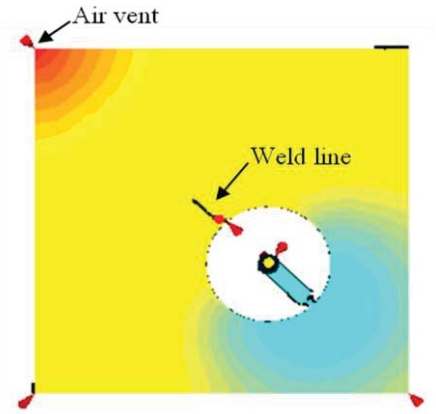
พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเจเนติกอัลกอริทึมในกรณีนี้ คือ จำนวนประชากรเท่ากับ 10 อัตราการสลับสายพันธุ์ 0.75 และ อัตราการกลายพันธุ์ 0.01 ชุดคำตอบพาเรโตระหว่างตำแหน่งของรอยประสานและค่าแรงดันฉีดสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 80 โดยได้ตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสมอยู่ที่ 48.64 องศา ซึ่งได้ค่าแรงดันฉีดสูงสุด 200.04 Bar และได้ตำแหน่งของรอยประสานอยู่ที่ 0.0168 องศา



ภาพที่ 80 ชุดคำตอบพาเรโตของความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของรอยประสานและค่าแรงดันฉีดสูงสุด

เมื่อนำตำแหน่งของทางเข้าที่ได้ไปวิเคราะห์การไหลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์การไหล ดังแสดงในภาพที่ 81 พบว่า ได้ค่าแรงดันฉีดสูงสุด 202.5 Bar และตำแหน่งของรอยประสาน 0 องศา โดยเมื่อพิจารณาถึงค่าความแม่นยำระหว่างค่าที่ได้จากเจเนติกอัลกอริทึม และ

โปรแกรมวิเคราะห์การไหล พบว่า ได้ค่าความแม่นยำในการทำนายค่าแรงดันฉีดสูงสุด 98.78% และค่าความแม่นยำของตำแหน่งของรอยประสาน 100% นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาตำแหน่งของช่องระบายอากาศที่แนะนำโดยโปรแกรมวิเคราะห์การไหล พบว่า มีการแนะนำที่บริเวณสุดท้ายที่ฉีดไปถึงของชิ้นงาน บริเวณสปรู และที่บริเวณรอยประสาน ซึ่งสอดคล้องตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปมีการออกแบบช่องระบายอากาศที่บริเวณเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์อยู่แล้ว ในขณะที่การออกแบบช่องระบายอากาศที่ตำแหน่งรอยประสานมักถูกออกแบบภายหลังเกิดปัญหาข้อบกพร่องของชิ้นงาน ดังนั้นแนวทางการกำหนดตำแหน่งช่องระบายอากาศที่บริเวณรอยประสานจึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์



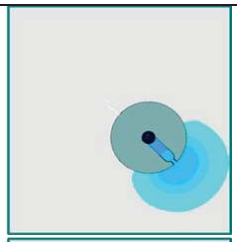
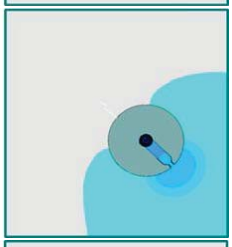
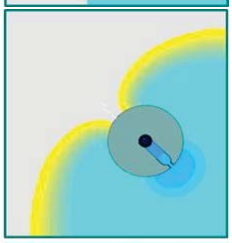
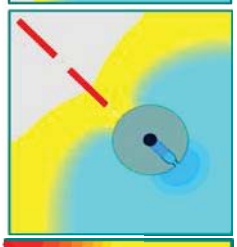
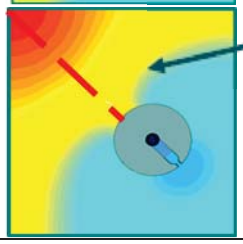
ภาพที่ 81 ตำแหน่งของรอยประสานและช่องระบายอากาศจากโปรแกรมวิเคราะห์การไหล เมื่อกำหนดตำแหน่งของทางเข้าที่ได้จากเจเนติกอัลกอริทึม

3.3 ผลการวิเคราะห์การไหลจากการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริง โดยใช้ตำแหน่งของทางเข้าที่ได้จากเจเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์ กรณีหนึ่งทางเข้า

นอกเหนือจากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบระหว่างผลวิเคราะห์การไหลที่ได้จากเจเนติกอัลกอริทึมและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมแล้ว งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและเปรียบเทียบผลจากการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริง เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของผลที่ได้จากเจเนติกอัลกอริทึม โดยออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ฉีดที่มีตำแหน่งของทางเข้าตามตำแหน่งที่ได้จากเจเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์สำหรับชิ้นงานในกรณีศึกษาของชิ้นงานที่มีอินเสิร์ทภายในชิ้นงานและมีทางเข้าหนึ่งทางเข้า ดังแสดงในตารางที่ 22 โดยพบว่า มีความแตกต่างของลักษณะการไหล โดยเมื่อพิจารณาการไหลในช่วงที่ 20-40% พบว่า ความเร็วในการไหลของยางที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์การไหลมีค่าที่ช้ากว่ากระบวนการฉีดจริง เนื่องจากในโปรแกรมวิเคราะห์การไหลกำหนดให้ของไหลไม่สามารถยุบตัวได้เมื่อได้รับแรงดัน ในขณะที่การไหลของยางในกระบวนการฉีดจริง เกิดการยุบตัวเมื่อได้รับแรงดัน อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาตรการฉีดเพิ่มขึ้นเป็น 60-100% พบว่า การไหลของยางในกระบวนการฉีดจริงมีการไหลที่เร็วกว่า ทั้งนี้เนื่องจาก โปรแกรมวิเคราะห์การไหลมีการกำหนด

สมมติฐานให้อัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่ตลอดระยะทางการไหล รวมถึงกำหนดให้ไม่เกิดเลื่อนตัวที่ผนัง ในขณะที่กระบวนการฉีดจริงมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการถ่ายเทความร้อน และเกิดความร้อนเนื่องจากแรงเฉือนเมื่อไหลผ่านช่องทางการไหล ทำให้ความหนืดมีค่าลดลง และยังพบการเลื่อนตัวที่ผนัง ซึ่งทำให้รูปร่างการไหลเปลี่ยนไป และมีความเร็วในการไหลที่สูงขึ้น จากสาเหตุดังกล่าว จึงทำให้ผลที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมยังคงมีความแตกต่างจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปจริง อย่างไรก็ตามตำแหน่งของรอยประสานที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์การไหลมีความสอดคล้องกับตำแหน่งรอยประสานที่เกิดขึ้นในการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริง ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมในการนำเจเนติกอัลกอริทึมมาประยุกต์ใช้ในการกำหนดตำแหน่งของทางเข้าและช่องระบายอากาศที่เหมาะสม

ตารางที่ 22 การวิเคราะห์รูปร่างการไหลภายในแม่พิมพ์ฉีดจากโปรแกรมวิเคราะห์การไหล และจากการฉีดขึ้นรูปยาง ที่ปริมาตรการฉีดแตกต่างกัน

Volume	Simulation	Experiment
20%		
40%		
60%		
80%		
100%		

3.3 ผลการทำนายค่าแรงดันฉีดสูงสุด และตำแหน่งของรอยประสานของแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม กรณีสองทางเข้า

3.3.1 ผลการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีแบ่งครึ่งช่วงในการกำหนดตำแหน่งรอยประสาน

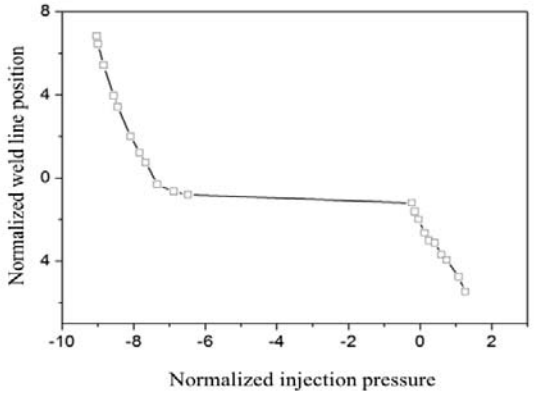
ในกรณีที่ค่าแรงดันฉีดสูงสุดมีค่าสูงเกินกว่าที่กำหนด จึงเพิ่มจำนวนของทางเข้าตามแนวทางที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดงในภาพที่ 51 อย่างไรก็ตาม การเพิ่มตำแหน่งของทางเข้า ส่งผลให้เกิดตำแหน่งรอยประสานเพิ่มมากขึ้น และยากในการกำหนดตำแหน่งของรอยประสานให้ได้ตามเงื่อนไขที่ต้องการ จากการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีแบ่งครึ่งช่วง พบว่า สามารถหาตำแหน่งของรอยประสานที่ได้เงื่อนไขตามต้องการ และจากการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในภาคผนวก ค ส่งผลให้มีความรวดเร็วในการค้นหามากขึ้น

3.3.2 ผลการออกแบบสถาปัตยกรรมที่เหมาะสมของเครือข่ายประสาทเทียม

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

3.4 ผลการกำหนดตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสมที่ได้จากการใช้เจเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์ กรณีสองทางเข้า

เมื่อพิจารณาเลือกค่าจากชุดของคำตอบพาเรโตที่มีค่าวัตถุประสงค์อยู่ใกล้ศูนย์มากที่สุด พบว่า พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในกรณีนี้ คือ จำนวนประชากรเท่ากับ 10 อัตราการสลับสายพันธุ์ 0.75 และ อัตราการกลายพันธุ์ 0.01 โดยชุดคำตอบพาเรโตระหว่างตำแหน่งของรอยประสานและค่าแรงดันฉีดสูงสุด กรณีสองทางเข้า ดังแสดงในภาพที่ 82 และได้ตำแหน่งของทางเข้าที่เหมาะสมอยู่ที่ 42.48 และ 44.20 องศา ซึ่งได้ค่าแรงดันฉีดสูงสุด 128.9 Bar และตำแหน่งของรอยประสานอยู่ที่ 0.5 และ 1 องศา จากตำแหน่งที่กำหนดทั้งสองตำแหน่ง



ภาพที่ 82 คำตอบพาเรโตของความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของรอยประสานและค่าแรงดันฉีดสูงสุด กรณีสองทางเข้า

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาแนวทางการกำหนดตำแหน่งของทางเข้าและช่องระบายอากาศที่เหมาะสมภายในแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง โดยสร้างฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของทางเข้าและค่าวัตถุประสงค์ ซึ่งได้แก่ ค่าแรงดันฉีด และตำแหน่งรอยประสาน โดยใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม และหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้เจเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์ ผลที่ได้จากงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์เพื่อให้สามารถฉีดได้ทั้งเทอร์โมพลาสติกและยาง พบว่า ข้อควรพิจารณาที่สำคัญ ได้แก่ วิธีการยึดแม่พิมพ์กับหน้าแปลนเครื่องฉีด ขนาดของไทด์บาร์ ขนาดของหัวฉีด ปริมาตรการฉีด และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ลักษณะและจำนวนของชิ้นงานซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเลือกขนาดของแม่พิมพ์และเครื่องฉีด ในงานวิจัยนี้ ได้ออกแบบแม่พิมพ์ที่สามารถประกอบชุดเสริมแผ่นยึดแม่พิมพ์บน-ล่าง เพื่อให้สามารถประกอบเข้ากับหน้าแปลนของเครื่องฉีดยางซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าเครื่องฉีดเทอร์โมพลาสติกได้ รวมถึงแม่พิมพ์ที่ได้ออกแบบยังสามารถปรับเปลี่ยนเบ้าอินเสิร์ท ในกรณีที่ถอดชุดระบบนำปลดออก เพื่อให้สามารถนำไปใช้กับเครื่องฉีดยางได้ นอกจากนี้แม่พิมพ์ที่ได้ออกแบบยังสามารถปรับเปลี่ยนแหวนบังคับศูนย์เพื่อให้เข้ากับขนาดของหัวฉีดของเครื่องฉีดทั้งสองแบบได้

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

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

4. จากการศึกษาและประยุกต์ใช้เครือข่ายประสาทเทียมโดยใช้เครือข่ายการเรียนรู้แบบลาเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ท (Levenberg–Marquardt) ในการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของทางเข้าและค่าวัตถุประสงค์ ซึ่งได้แก่ ค่าแรงดันฉีดสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าสำหรับกรณีศึกษาแรก และใช้วิธีการทางสถิติในการกำหนดสถาปัตยกรรมเครือข่ายที่เหมาะสม พบว่า สถาปัตยกรรมที่เหมาะสม คือ 4-8-11-1 สำหรับฟังก์ชันที่มีค่าแรงดันฉีดเป็นค่าวัตถุประสงค์ และ 4-3-5-1 สำหรับฟังก์ชันที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าเป็นค่าวัตถุประสงค์ สำหรับกรณีศึกษาชิ้นงานที่มีอินเสิร์ทภายในชิ้นงานที่มีหนึ่งทางเข้า ได้สถาปัตยกรรมที่เหมาะสม คือ 1-10-1 สำหรับฟังก์ชันที่มีค่าแรงดันฉีดเป็นค่าวัตถุประสงค์ และ 1-8-1 สำหรับฟังก์ชันที่มีค่าตำแหน่งรอยประสานเป็นค่าวัตถุประสงค์ และสำหรับกรณีศึกษาชิ้นงานที่มีอินเสิร์ทภายในชิ้นงานที่มีทางเข้าสองทางเข้า พบว่า ได้สถาปัตยกรรมที่เหมาะสม คือ 2-10-1 ทั้งฟังก์ชันที่มีค่าแรงดันฉีดเป็นค่าวัตถุประสงค์และฟังก์ชันที่มีค่าตำแหน่งรอยประสานเป็นค่าวัตถุประสงค์

5. จากผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าวัตถุประสงค์ที่ได้จากเจเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์และโปรแกรมวิเคราะห์การไหลเมื่อกำหนดตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสม พบว่า สามารถกำหนดตำแหน่งของรอยประสานให้อยู่บนบริเวณที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ และมีค่าแรงดันฉีดที่เหมาะสม ดังนั้น เจเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์จึงมีความเหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้กำหนดตำแหน่งของทางเข้าและช่องระบายอากาศที่บริเวณรอยประสานในการออกแบบแม่พิมพ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบรูปแบบการไหลภายในแม่พิมพ์เมื่อใช้ตำแหน่งของทางเข้าตามที่ได้จากเจเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์ กรณีศึกษาชิ้นงานที่มีอินเสิร์ทภายในชิ้นงาน ที่มีหนึ่งทางเข้า โดยเปรียบเทียบระหว่างผลจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมและการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริง พบว่า ผลที่ได้ยังคงมีความแตกต่างกัน ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากสมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์แตกต่างจากการไหลที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งได้แก่ การกำหนดให้อุณหภูมิยางหรือพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะทางในการไหล การกำหนดให้การไหลภายในแม่พิมพ์ไม่เกิดการเลื่อนตัว และกำหนดให้ค่าการนำความร้อนและการสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเป็นค่าคงที่ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาตำแหน่งรอยประสานหรือแนวบรรจบของการไหลผ่านอินเสิร์ทที่ได้ พบว่ามีความสอดคล้องกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าแนวทางที่ได้ออกแบบมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ค้นหาตำแหน่งของทางเข้าและช่องระบายอากาศที่เหมาะสม

ข้อเสนอแนะ

แนวทางในการกำหนดจำนวนและตำแหน่งของทางเข้าที่ได้ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้มีจำนวนทางเข้าไม่เกิน 2 ทางเข้า เนื่องจากจำนวนวัตถุประสงค์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ใช้เวลานานขึ้นในการประมวลผล จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการพัฒนาเจเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์ในกรณีที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากกว่า 2 ฟังก์ชันขึ้นไป

กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ฝ่ายอุตสาหกรรม (ฝ่าย 5) สำหรับทุนอุดหนุนในการทำวิจัยครั้งนี้ และสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเตรียมสารประกอบยางและใช้เครื่องฉีดขึ้นรูปยาง รวมถึงกลุ่มวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตพลาสติกและยาง (Plastic and Rubber Processing Research Group, PaRP-Group) ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับการเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

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

ชาลี ตระการกูล. 2546. **การออกแบบแม่พิมพ์ฉีด 1.** สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

ปรมินทร์ มณีโรจน์. 2544. **การประยุกต์ใช้อัลกอริธึมพันธุกรรมกับนิวรัลเน็ตเวิร์กแบบย้อนกลับเพื่อการเรียนรู้ค่าตัวแปรและสถาปัตยกรรมของเน็ตเวิร์ก**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. **การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง**, สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด.

พงษ์ธร แซ่อุย. 2550. **สารเคมียาง**. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะแห่งและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), ปทุมธานี.

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

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

วราภรณ์ ขจรไชยกูล. 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 thedetermination 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.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ค่าแรงดันฉีด และเวลาฉีดที่ได้จาก

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

ตารางผนวกที่ 1 ค่าแรงดันฉีดและเวลาฉีดสำหรับกรณีศึกษาแบบจำลองของหน้าจอของคอมพิวเตอร์แบบพกพา โดยตำแหน่งของทางเข้าเพื่อใช้ในการฝึกสอน ดังแสดงในภาพที่ 49

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
70	A3	B2	C3	D1	78.46	17.4	3.132

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

StdOrder	Gate locations				Max. Pressure (MPa)	SD	Fill time
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

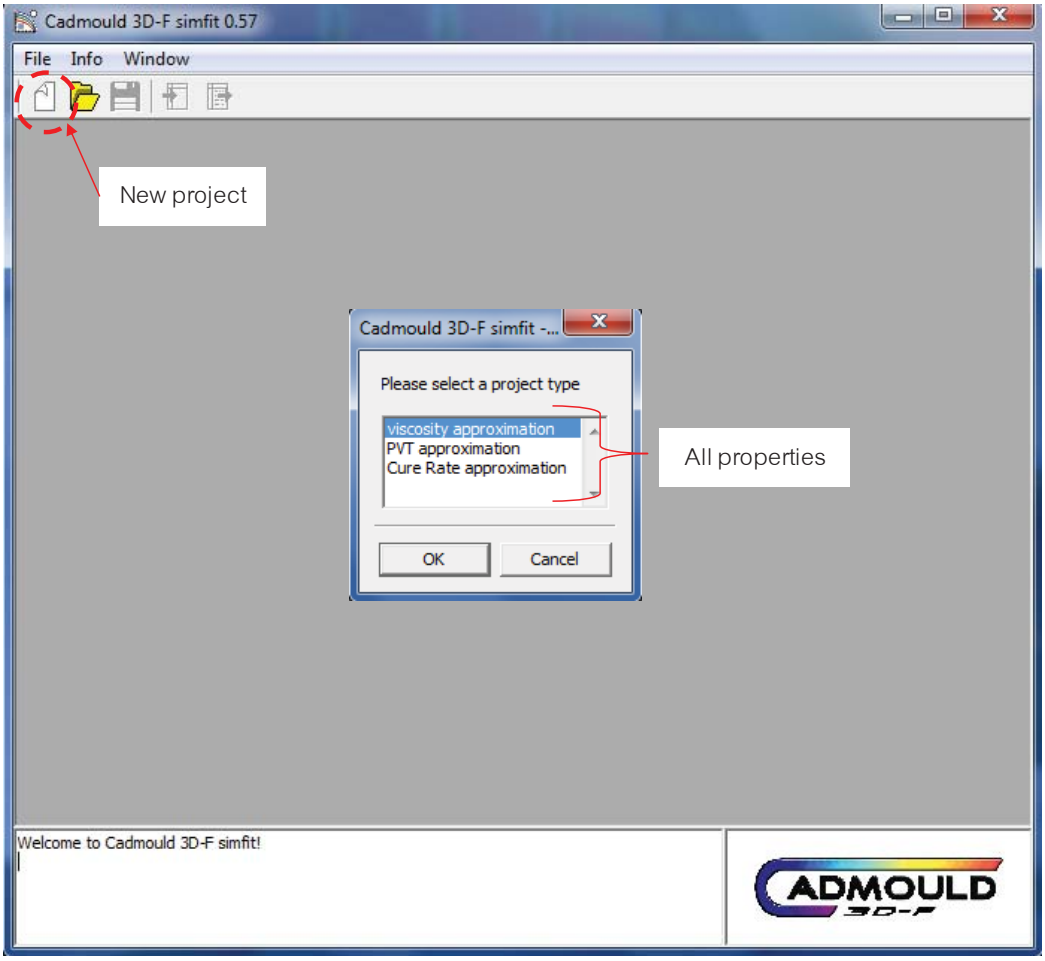
ภาคผนวก ข

การกำหนดสมบัติของวัสดุ

ภาคผนวก ข1. การกำหนดสมบัติของวัสดุเพื่อใช้ในการจำลองการไหลของยาง

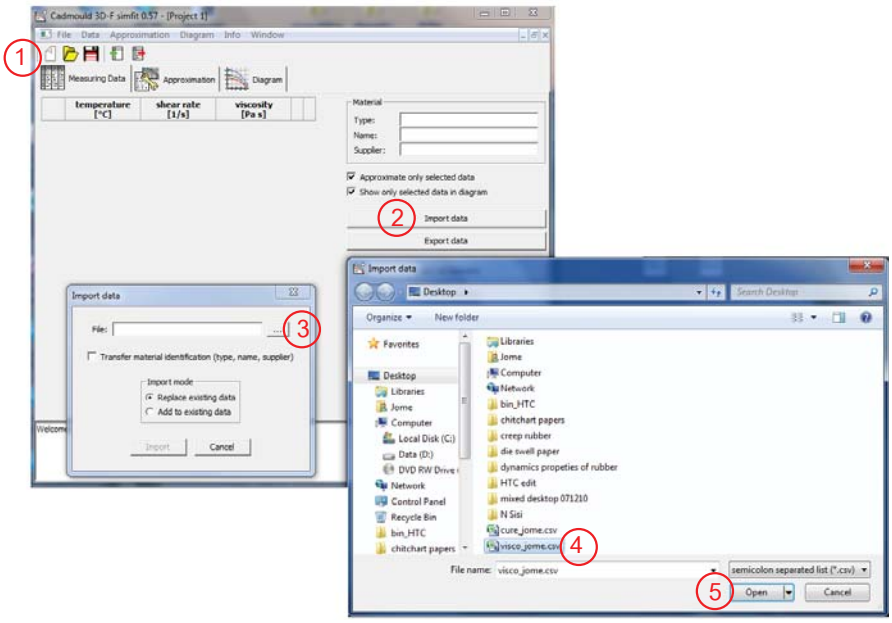
1. ทำการ fit curve ด้วย Simfit

โดยสมบัติที่จำเป็นในการวิเคราะห์การไหลของยาง คือ ความหนืด (Viscosity) ของยางที่อุณหภูมิและอัตราเครียดเฉือนต่างๆ และอัตราการคงรูป (Cure rate) ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ

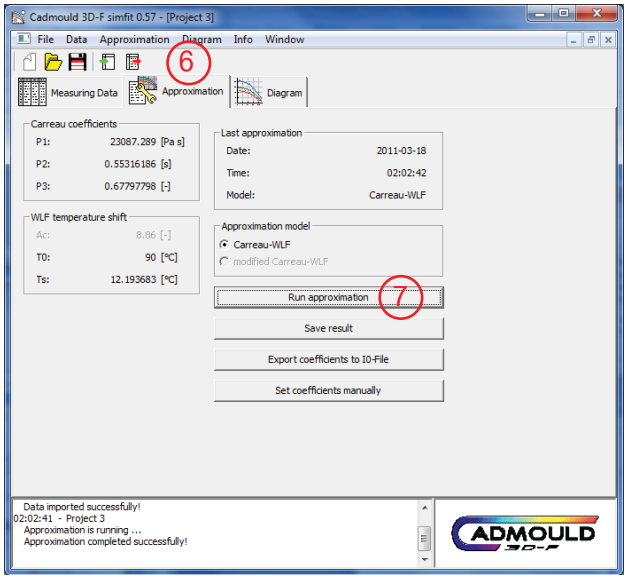


ภาพผนวกที่ 1 การกำหนดสมบัติวัสดุ

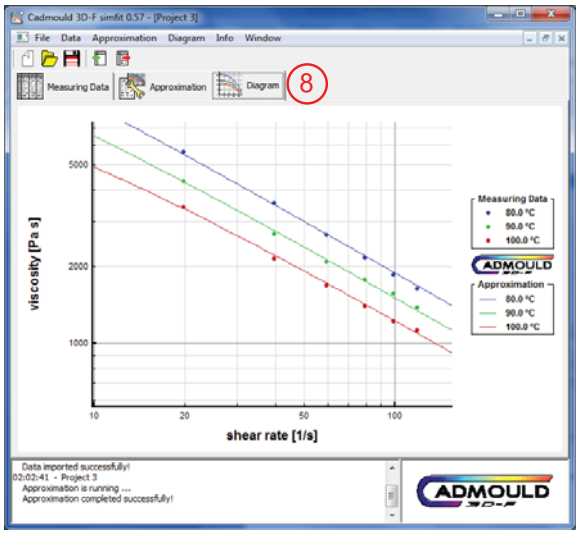
2. การกำหนดค่าความหนืดของยางที่อุณหภูมิและอัตราเครียดเฉือนต่างๆ



ภาพผนวกที่ 2 ขั้นตอนป้อนข้อมูลความหนืด

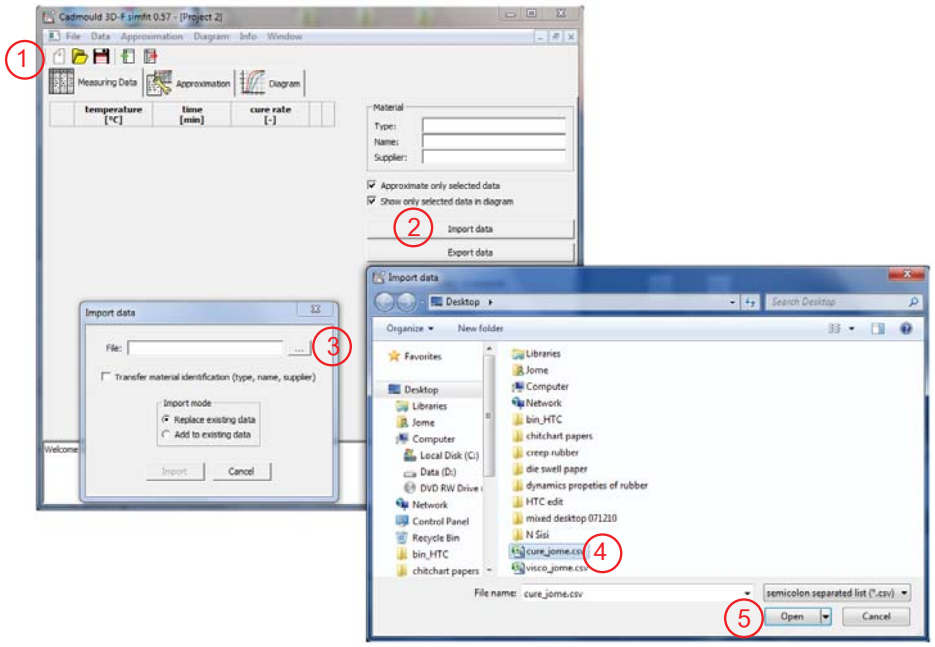


ภาพผนวกที่ 3 ขั้นตอนการหาค่าคงที่ของแบบจำลอง Careau-WLF

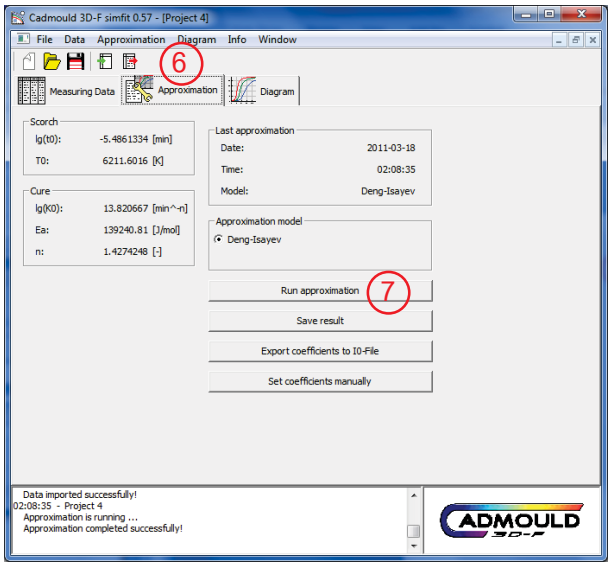


ภาพผนวกที่ 4 ขั้นตอนการพล็อตกราฟความหนืดและอัตราเครียดเฉือนที่อุณหภูมิต่างๆ

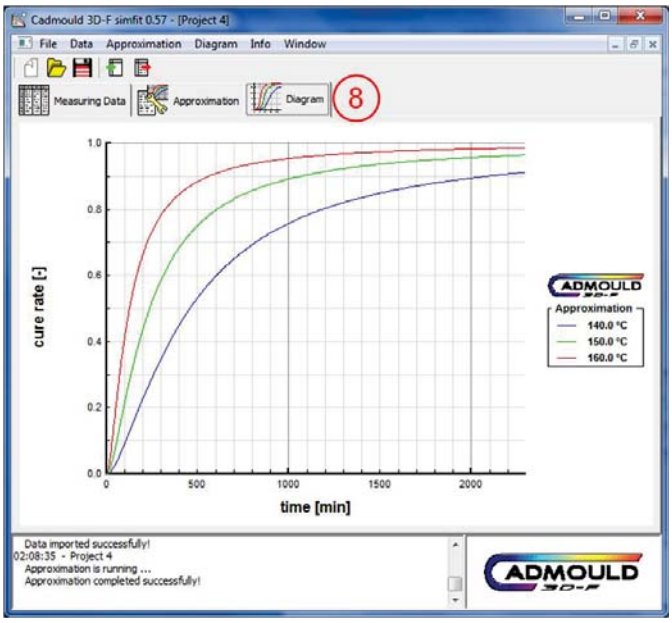
3. การกำหนดอัตราการคงรูปที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ



ภาพผนวกที่ 5 ขั้นตอนการป้อนข้อมูลอัตราคงรูป



ภาพผนวกที่ 6 ขั้นตอนการหาค่าคงที่ของแบบจำลอง Deng-Isayev



ภาพผนวกที่ 7 ขั้นตอนการพล๊อตกราฟความหนืดและอัตราเครียดเฉือนที่อุณหภูมิต่างๆ

ภาคผนวก ค

ผลงานวิจัยที่นำเสนอในงานประชุมวิชาการ

ภาคผนวก ค1 ผลงานที่นำเสนอในการประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 22

การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 22

O-E&T068

การหาตำแหน่งทางเข้าและช่องระบายอากาศที่เหมาะสมสำหรับแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปชิ้นงานผนังบาง

Optimization of Gate and Air Vent Locations for Thin-Walled Injection Mold

ทิวากร อภิรักษ์ธนากร[1], วัชรพงษ์ ชูแก้ว[1] และ สมเจตน์ พัชรพันธ์[*2]

Thiwakorn Aphirakthanakorn[1], Watcharapong Chookaew[1] andSomjatePatcharaphun[*2]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[2*]ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เลขที่ 50 ถ.งามวงศ์วาน เขต จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

* ติดต่อ: โทรศัพท์: 0 2942 8555, โทรสาร: 0 2955 1851

*อีเมลล์: fengsjpc@ku.ac.th

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

[2*]Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

50 Ngam Wong Wan Rd., Chatuchak, Bangkok 10900

*E-mail: fengsjpc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ ทำการพัฒนาแบบจำลอง เครือข่ายประสาทเทียม (Neural Network, NN) ร่วมกับโปรแกรมจำลองการไหลที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ฉีด (Moldflow) และใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective Genetic Algorithm, MOGA) ในการวิเคราะห์หาตำแหน่งทางเข้าและช่องระบายอากาศที่เหมาะสมภายในแม่พิมพ์ฉีดสำหรับชิ้นงานผนังบาง (Thin-walled product) โดยพิจารณาจาก ค่าแรงดันฉีดสูงสุด (Maximum injection pressure) และค่าแรงดันที่เกิดขึ้นในแ ต่ละทางเข้า จากผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลอง เครือข่ายประสาทเทียมและขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาให้อยู่ในชุดของผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated solutions) โดยวิธีการนี้สามารถนำไปใช้กำหนดตำแหน่งทางเข้าและช่องระบายอากาศที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานผนังบาง

คำสำคัญ:กระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานผนังบางตำแหน่งทางเข้า และช่องระบายอากาศแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์

ABSTRACT

In this work, a Neural Network (NN) model has been developed and integrated with the commercial simulation software (Moldflow) in order to construct the solution models during thin-walled injection molding process. The maximum injection pressure and the pressure difference among the gates are analyzed by using theMulti-Objective Genetic Algorithm (MOGA) to justify the optimal gate and air vent locations. The analytical results obtained in this work indicated thatthe Neural Network model as well as Multi-objective Genetic Algorithm is an efficient method for tackling a set of non-dominated solutions, which can also be employed to identify the optimal gate and air vent locations for thin-walled injection molding.

Keywords: Thin-walled injection molding process, Gate and air vent locations, Neural Network Model, Multi-objective Genetic Algorithm.

บทนำ

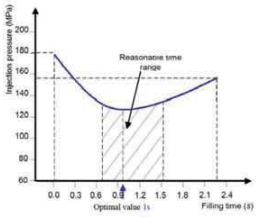
การฉีดขึ้นรูปชิ้นงานผนังบางด้วยแม่พิมพ์ได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ การสื่อสารและอิเล็กทรอนิกส์ (Xu, 2004) ชิ้นงานเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นชิ้นงานที่บาง มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาอย่างไรก็ตามก ารขึ้นรูปวิธีนี้มีความต้านทานการไหลสูง เนื่องจากช่องทางการไหลมีขนาดเล็ก ส่งผลให้ต้องมีการ เพิ่มอุณหภูมิความเร็วฉีด หรือแรงดันฉีดในการขึ้นรูป หากเกิดความร้อนสูงมากเกินไปจะเป็นสาเหตุให้เกิดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ได้และต้องใช้เวลาในการเย็นตัวนานขึ้น ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานผนังบางด้วยแม่พิมพ์ ความเร็วและแรงดันฉีดเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน ความหนาของชิ้นงานมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงดัน อุณหภูมิ และเวลาในการขึ้นรูป โดยความเร็วและแรงดันฉีดที่ต้องใช้สูงกว่าการขึ้นรูปชิ้นงานที่ผนังหนาทำให้มีโอกาสสูงในการเกิดรอยพ่น(Jetting) การฉีดไม่เต็ม(Short shot) หรือเกิดรอยไหม้(Burn mark)ได้ แม่พิมพ์สำหรับการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานผนังบางจึงจำเป็นต้องมีความแข็งแรงสูงเพื่อต้านทานแรงดันนั้น Lee and Kim (2007) พบว่าทางเข้ามีอิทธิพลอย่างมากต่อแรงดันฉีดที่ต้องใช้ในการเติมแม่พิมพ์การวางตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสม จะสามารถช่วยลดแรงดันฉีดที่ต้องใช้ในระบบได้ อีกทั้งทางเข้ามักถูกออกแบบเป็นแบบหลายทางเข้า (Multi gates) เพื่อให้ง่ายและเพิ่มประสิทธิภาพในขั้นตอนการเติม (Filling stage) รวมถึงการระบายอากาศในตำแหน่งที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงที่รอยเชื่อมประสาน และป้องกันการฉีดไม่เต็มหรือการเผาไหม้ของก๊าซจากการถูกอัดได้

การตรวจเอกสาร

กระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานผนังบางด้วยแม่พิมพ์เป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน ด้วยความสามารถในการให้อัตราการผลิตสูง ประหยัดต้นทุนและสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างหลากหลาย แม่พิมพ์นับเป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญมากต่อกระบวนการขึ้นรูปและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ แม่พิมพ์จะถูกออกแบบและสร้างให้มีคุณภาพมากที่สุดด้วยเวลาและต้นทุนที่น้อยที่สุดในการพัฒนาออกแบบ วิธีการในการออกแบบแม่พิมพ์ให้เหมาะสมได้ถูกคิดค้นและพัฒนากันอย่างต่อเนื่อง มีผู้วิจัยจำนวนมากได้นำคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์มาช่วยในการวิเคราะห์ออกแบบ แล้วใช้พารามิเตอร์หรือคุณภาพชิ้นงานเป็นข้อกำหนดในการออกแบบ เช่น เวลาในการเติม (Fill time) (Mathur*et al.*, 1999) แรงดันฉีด (Shen and Zhai, 2010; Lee and Kim, 2010) และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น การบิดตัว (Warpage) (Li *et al.*, 2007) การหดตัว (Shrinkage) จุดดักอากาศ (Air trap) (Mathur*et al.*, 1999) และรอยเชื่อมประสาน (Weld line) เครื่องมือที่มักถูกนำมาใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมของกระบวนการเหล่านี้เช่น การออกแบบการทดลอง (Design Of Experiment, DOE) ขั้นตอนวิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated annealing algorithm) ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle swarm

optimization algorithm) และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม วิธีที่กล่าวมานี้ มักใช้กับปัญหาที่มีวัตถุประสงค์เดียว แต่ในการหาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบมักมีมากกว่าหนึ่งวัตถุประสงค์ ดังนั้นขั้นตอนวิธีการแก้ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ เช่น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์จึงมีบทบาทสำคัญต่อการแก้ปัญหาในลักษณะนี้

การวางตำแหน่งทางเข้าในกระบวนการฉีดพอลิเมอร์ มีข้อพิจารณาอยู่หลายด้าน ไม่ว่าจะเป็นพฤติกรรมการเติม ขนาดของชิ้นงานสำเร็จ พฤติกรรมการหดตัว คุณสมบัติเชิงกล และ คุณภาพผิวของชิ้นงาน โดยทั่วไปแล้วการวางตำแหน่งทางเข้ามักวางตามความต้องการพื้นฐานคือ พอลิเมอร์สามารถไหลเข้าแม่พิมพ์ได้อย่างรวดเร็วด้วยเส้นทางการไหลที่สั้นโดยมีการสูญเสียความร้อนและแรงดันน้อยที่สุด อีกทั้งควรไหลไปถึงปลายทางทุกแห่งของเบ้าพิมพ์ในเวลาไล่เลี่ยกันจากผลกระทบของอัตราการเติมต่อแรงดันฉีด แรงดันที่ถูกใช้เพื่อผลักดันพอลิเมอร์หลอมเหลวนั้น แปรผันโดยตรงกับความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวและอัตราเร็วของพอลิเมอร์ในช่องทางการไหล ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันในการเติมกับอัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวได้อ้างอิงบนกฎของ Hagen-Poiseuille (Beaumont, 2004)โดยเมื่ออัตราการไหลลดลง ค่าแรงดันฉีดสำหรับวัสดุเทอร์โมพลาสติกมีค่าจะลดลงด้วย แรงดันที่ต้องการเพื่อให้เกิดการไหลผ่านช่องทางการไหลแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งแสดงพฤติกรรมของของไหลนิวทอเนียนและวัสดุเทอร์โมพลาสติกระหว่างการขึ้นรูปแบบฉีดด้วยแม่พิมพ์



รูปที่ 1เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฉีดกับเวลาเติม

ที่มา: Beaumont, 2004

เมื่อการไหลถูกทำให้ช้าลง มีการลดลงของแรงดันในลักษณะเช่นเดียวกันทั้งของไหลนิวทอเนียนและวัสดุเทอร์ โมพลาสติก ความหนืดของพอลิเมอร์ประเภทเทอร์ โมพลาสติกจะเริ่มสูงขึ้นเนื่องจากอัตราเฉือนลดลง และความร้อนจากแรงเสียดทานที่อัตราการไหลสูงๆ จะสูญเสียมากขึ้น การสูญเสียความร้อนจากแรงเสียดทานนี้จะเป็นผลให้มีการเพิ่มขึ้นทั้งความหนืดและความหนาของชั้นแข็งตัว เมื่อการต้านทานการไหลเพิ่มขึ้นจากการที่วัสดุมีความหนืดมากขึ้นและช่องทางการไหลมีขนาดเล็กลงจากความหนาที่เพิ่มขึ้นของชั้นแข็งตัว แรงดันที่ต้องใช้จึงมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นค่าแรงดันฉีดจึงถูกนำมาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และหากความแตกต่างของแรงดันแต่ละหัวฉีด

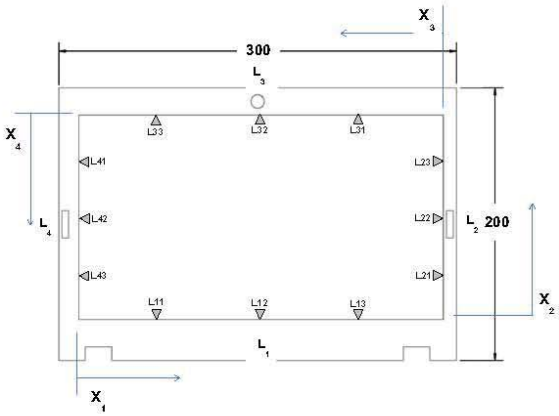
มีค่าสูง จะเป็นผลให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของการไหลขึ้น ค่าความแตกต่างของแรงดันที่แต่ละหัวฉีดจึงเป็นอีกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ด้วย

เครือข่ายประสาทเทียมมีรูปแบบและการประมวลผลเลียนแบบจากระบบของสิ่งมีชีวิต ซึ่งสามารถปรับตัวต่อผลตอบสนองของข้อมูลนำเข้า (Inputs) ได้ พารามิเตอร์ต่างๆ ของเครือข่าย เช่น จำนวนนิวรอน (Neural) จำนวนชั้นซ่อน (Hidden layer) จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน (Neural in hidden layer) อัตราการเรียนรู้ (Learning rate) และจำนวนรอบการฝึก (Epochs) จะนำไปสู่ผลและลักษณะการทำงานที่ต่างกันออกไปดังนั้น การออกแบบสถาปัตยกรรมที่เหมาะสมจึงมีผลอย่างมากต่อความแม่นยำของแบบจำลอง เมื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะการลู่เข้า โดยการเทียบผลจากการค้นหาเส้นทางบนพื้นผิวความผิดพลาดของวิธีแพร่กระจายย้อนกลับ (Back-Propagation, BP) วิธีการเคลื่อนลงตามความชัน (Steepest descent) วิธีเกาส์-นิวตัน (Gauss-Newton) และวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์คควอร์ท (Levenberg–Marquardt, LM) Samarasinghe (2006) ได้ทำการทดลองและพบว่าวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์คควอร์ท มีข้อได้เปรียบเหนือกว่าอีก 3 วิธี ในแง่ของความเร็ว และประสิทธิภาพในการลู่เข้าสู่ค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสม ในการทดลองนี้จึงเลือกใช้ วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์คควอร์ท ในการสอน

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เป็นวิธีการค้นหาคำตอบโดยเลียนแบบวิธีการคัดเลือกทางธรรมชาติและการวิวัฒนาการทางสายพันธุ์ ในงานทางด้านกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมถูกนำมาใช้ในการหาตัวแปรในกระบวนการผลิตที่เหมาะสมการกำหนดฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness function) และช่วงของตัวแปรที่ไม่เหมาะสม อาจทำให้เกิดการลู่เข้าคำตอบก่อนถึงคำตอบที่เหมาะสม การกำหนดขอบเขตของค่าตัวแปรและความถูกต้องของข้อมูลจึงมีผลกระทบต่อการกำหนดฟังก์ชันเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการพัฒนาขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เช่น ขนาดประชากร (Population size) อัตราการแลกเปลี่ยนสายอักษร (Crossover rate) และอัตราการกลายพันธุ์ (Mutation rate) ยังเป็นตัวกำหนดถึงการลู่เข้าคำตอบของระบบ จึงจำเป็นต้องกำหนดให้มีความเหมาะสม

วิธีดำเนินการวิจัย

ชิ้นงานแสดงในรูปที่ 2 ถูกนำมาใช้เป็นกรณีศึกษาเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนำเข้าคือ ตำแหน่งของทางเข้า กับตัวแปรส่งออกคือแรงดัน สูงสุด ที่ใช้ในการฉีดและค่าความแตกต่างของแรงดันที่ ในแต่ละตำแหน่งทางเข้า ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม สำหรับข้อมูลที่ได้นั้น ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ข้อมูลสำหรับ การสอน (Training data) 72 ข้อมูล และข้อมูลสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพ (Test data) 9 ข้อมูล



รูปที่ 2 ตำแหน่งทางเข้าต่างๆ บนชิ้นงานที่ใช้เป็นกรณีศึกษา (หน่วย: มิลลิเมตร)

จากนั้นปรับข้อมูลตัวแปรนำเข้า ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยใช้สมการที่ 1 เพื่อให้เข้ากับฟังก์ชันส่งผ่านซิกมอยด์แบบลอการิทึม (Log-sigmoid) ของเครือข่ายประสาทเทียม

$$y_i = \frac{(y_{max} - y_{min})(x_i - x_{min})}{(x_{max} - x_{min}) + y_{min}} \quad (1)$$

1. การหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบที่เหมาะสมในเครือข่ายประสาทเทียม

เป็นการทดลองเพื่อหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกหัดที่เหมาะสมในการฝึกเครือข่ายประสาทเทียมที่มีข้อมูลส่งออก 2 ตัวแปร มีระดับของอัตราการเรียนรู้ 3 ระดับ และจำนวนรอบการสอน 3 ระดับ ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง รวม 54 การทดลอง จำนวนรอบการฝึกถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ 1,000 3,000 และ 5,000 รอบ ในขณะที่อัตราการเรียนรู้ได้แบ่งออกเป็น 3 ระดับเช่นกัน คือ 0.01 0.03 และ 0.05 ส่วนค่าตัวแปรอื่นๆ ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่

2. การหาจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่เหมาะสม

จำนวนนิวรอนที่เหมาะสมในแต่ละชั้นซ่อน สามารถพิจารณาได้จำนวนนิวรอน ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2) และ (3)

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

$$Maximum\ neuron = 2(Input\ neuron) + 1 \quad (3)$$

3. ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Genetic Algorithm, MOGA)

แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมถูกนำมาใช้เพื่อหาฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนำเข้า (ตำแหน่งทางเข้า) และตัวแปรส่งออก (ค่าแรงดันสูงสุดในแม่พิมพ์และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันแตกต่างสูงสุดที่หัวฉีด) เพื่อประยุกต์ใช้กับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมดังสมการที่ (4)

$$x=\{x_1, x_2, ..., x_N\} \tag{4}$$

เพื่อหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

$$F(x)= af_1(x)+bf_2(x) \tag{5}$$

โดยที่ xเป็นตัวแปรนำเข้า อยู่ในรูปของระยะทาง (L)$f_1(x)$ เป็นฟังก์ชันของค่าแรงดันสูงสุดของแม่พิมพ์ และ$f_2(x)$ เป็นฟังก์ชันของค่าความแตกต่างสูงสุดของแรงดันที่ตำแหน่งทางเข้า aและb เป็นค่าถ่วงน้ำหนักโดยที่ $a+b = 1$

เมื่อได้เซตของชุดคำตอบด้วยวิธีถ่วงน้ำหนักค่าฟังก์ชันเป้าหมาย (Weight sum method)แล้ว ทำการเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดที่จุดดักอากาศอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม เช่น ที่มุมหรือเส้นรอบนอกของชิ้นงาน ซึ่งง่ายต่อการติดตั้งช่องระบายอากาศ

ผลของการวิจัย

1. สถาปัตยกรรมที่เหมาะสมของแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

เกณฑ์ในการเลือกตัวแปรเพื่อใช้พัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมนี้ ได้ใช้หลักการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา เพื่อทำให้ข้อมูลที่ได้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANalysis Of VAriance, ANOVA)ในการทดลองได้อาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ซึ่งสามารถคำนวณเป็นค่าP-value เพื่อเปรียบเทียบกับค่านัยสำคัญ จากการทดลองได้โครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียมดังแสดงในตารางที่ 1

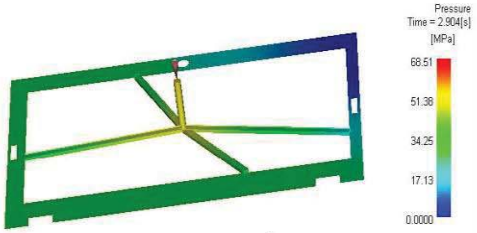
ตารางที่1 โครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม

เครือข่ายประสาทเทียม	ค่าที่เหมาะสม	
	แรงดันสูงสุด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุด
จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนแรก	8	3
จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2	11	5

อัตราการเรียนรู้	0.03	0.05
จำนวนรอบการฝึกสอน	1000	5000
ฟังก์ชันส่งผ่านที่ชั้นซ่อนแรก	Logsig	Logsig
ฟังก์ชันส่งผ่านที่ชั้นซ่อนที่ 2	Purelin	Purelin
สถาปัตยกรรมเครือข่าย	4-8-11-1	4-3-5-1

2. ค่าเหมาะสมที่สุดจากการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์

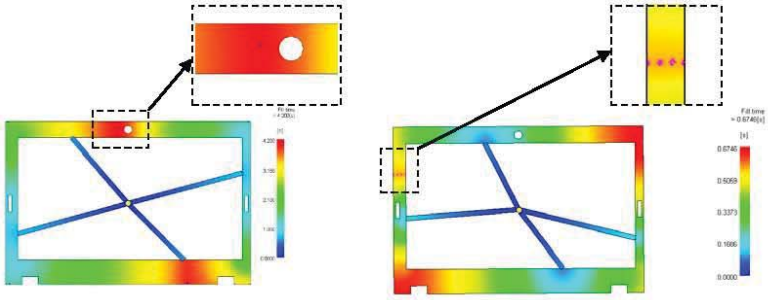
เมื่อนำโครงสร้างที่ดีที่สุดของเครือข่ายประสาทเทียมไปใช้ในการหาค่าด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมได้ค่าที่เหมาะสมอยู่ที่ตำแหน่ง $[L_1, L_2, L_3, L_4] = [187.32, 36.31, 180.49, 89.76]$ ได้ค่าน้อยที่สุดของแรงดันสูงสุดของแม่พิมพ์เท่ากับ 68.72 MPa และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันสูงสุดที่หัวฉีดเท่ากับ 16.44 MPa เมื่อนำไปตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ได้ค่าแรงดันสูงสุดอยู่ที่ 68.51 MPa ดังแสดงในรูปที่ 3และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันสูงสุดที่หัวฉีด 15.6 MPa เห็นได้ว่าความแม่นยำจากการใช้เครือข่ายประสาทเทียมร่วมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเทียบกับผลวิเคราะห์จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม ของค่าแรงดันสูงสุดมีค่าอยู่ที่ 99.69% และของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันสูงสุดจากแต่ละหัวฉีดอยู่ที่ 94.61% วิธีการนี้จึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมในการออกแบบทางเข้าของแม่พิมพ์ได้



รูปที่ 3ค่าแรงดันสูงสุดที่ได้จากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

เมื่อนำแบบชิ้นงานที่มีการกำหนดตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสมตามค่าที่ได้จากการทดลองไปหาตำแหน่งช่องระบายอากาศที่เหมาะสม พบว่าเกิดจุดดักอากาศ (Airtrap)ในบริเวณที่มีการบรรจบกันของพอลิเมอร์หลอมเหลว และบริเวณเส้นรอบนอกของพื้นผิวชิ้นงานที่จุดสุดท้ายของการไหล อย่างไรก็ดี บริเวณเหล่านี้สามารถสร้างช่องระบายอากาศเพื่อให้อากาศตกค้างสามารถระบายออกไปได้(Kasmer, 2007) ดังแสดงในรูปที่ 4(a)ซึ่งแตกต่างจากรูปที่ 4(b) ที่จุดดักอากาศ

เกิดขึ้นด้านหลังของอินเสิร์ทและอยู่บนพื้นผิวชิ้นงานอีกด้วย ทำให้ไม่สามารถสร้างช่องระบายอากาศที่บริเวณนี้ได้



(b) (b)

รูปที่ 4 ตำแหน่งช่องระบายอากาศจากการกำหนดตำแหน่งทางเข้า (a) ก่อนการหาค่าที่เหมาะสม แรงดันฉีด 103.5 MPa(b)ที่ตำแหน่งเหมาะสมที่สุด แรงดันฉีด 68.72 MPa

บทสรุป วิจารณ์ และข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบและวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยโปรแกรมจำลองการไหล (Moldflow)และสร้างฟังก์ชันความสัมพันธ์ด้วยแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม โดยใช้เครือข่ายการเรียนรู้แบบลาเวนเบิร์ก-มาร์คควอร์ท (Levenberg–Marquardt) พบว่าสถาปัตยกรรมเครือข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับฟังก์ชันของแรงดันฉีดสูงสุดคือ 4-8-11-1 และ4-3-5-1 สำหรับฟังก์ชันค่าแรงดันแตกต่างที่หัวฉีด ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม แบบหลายวัตถุประสงค์สามารถนำมาใช้ในการหาพาเรโตฟร้อนท์(Pareto front) ของทั้งสองฟังก์ชันเพื่อนำไปใช้ในการตัดสินใจหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของชุดคำตอบด้วยวิธีถ่วงน้ำหนักค่าฟังก์ชันเป้าหมาย (Weight sum method)ในการหาตำแหน่งช่องระบายอากาศที่เหมาะสมบนเซตของชุดคำตอบนั้น ผลของวิธีการที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมร่วมกับ เครือข่ายประสาทเทียม และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถ นำไปใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปชิ้นงานผนังบาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการออกแบบทางเข้าและช่องระบายอากาศได้อย่างเหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการวิจัยขนาดกลางเรื่องยางพารา (MPR) ประจำปี 2553 สัญญาเลขที่ RDG5350059

เอกสารอ้างอิง

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

Kazmer, D.O. 2007. **Injection Mold Design Engineering**. Hanser Publishers, Munich, Germany.

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.

Samarasighe, S. 2006. **Neural Network for Applied Sciences and Engineering: From Fundamentals to Complex Pattern Recognition**. 1st ed. Auerbach Publications, New York.

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.

Xu, G. 2004. **Study of thin-wall injection molding**. Ph.D. Dissertation, the Ohio State University.

ภาคผนวก ค2. ผลงานที่นำเสนอในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25

ME-NETT 25
The 25th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand

AMM75

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25
19-21 ตุลาคม 2554 จังหวัดกระบี่

การกำหนดทางเข้าที่เหมาะสมสำหรับแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมและขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

Determination of optimum gate for injection mold using neural network and genetic algorithm

ทิวากร อภิรักษ์ธนากร[1], วัชรพงษ์ ชูแก้ว[1], อัญชนา วงษ์โต[1] และ สมเจตน์ พัชรพันธ์[*2]
Thiwakorn Aphirakthanakorn[1], Watcharapong Chookaew[1], Anchana Wongsto[1] and Somjate Patcharaphun[*2]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
[2] ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เลขที่ 50 ถ.งามวงศ์วาน เขต จตุจักร กรุงเทพฯ 10900
* ติดต่อ: โทรศัพท์: 0 2942 8555, โทรสาร: 0 2955 1851
E-mail: fengsjpc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ปัญหาของเสียที่เกิดจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ เช่น การฉีดไม่เต็ม การเกิดรอยพ่น และรอยเชื่อมประสาน มีสาเหตุมาจากการออกแบบแม่พิมพ์และการกำหนดสภาวะในกระบวนการผลิตที่ไม่เหมาะสม การออกแบบทางเข้าชิ้นงานภายในแม่พิมพ์เป็นปัจจัยสำคัญในการป้องกันการเกิดขึ้นของปัญหาเหล่านี้ อย่างไรก็ตาม การออกแบบทางเข้ามักขึ้นอยู่กับทักษะและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานมากกว่าการวิเคราะห์ทางทฤษฎี แม้ว่าปัจจุบันคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมสามารถช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์ได้ แต่ยังคงสิ้นเปลืองเวลาสำหรับการลองผิดลองถูก งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบผสมโครงข่ายประสาทเทียมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าความดันฉีดมีค่าน้อยที่สุด คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมถูกนำมาใช้เพื่อสร้างและจำลองรูปแบบพฤติกรรมการไหลในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ค่าตัวแปรนำเข้าของโครงข่ายประสาทเทียม ได้แก่ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในกระบวนการฉีด รูปแบบของแม่พิมพ์ และตำแหน่งของทางเข้า จากตัวแปรเหล่านี้สามารถนำไปพัฒนาโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดของโครงข่ายประสาทเทียม ส่วนขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมถูกประยุกต์ใช้กับโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตอบสนองที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้ค้นหาการออกแบบทางเข้าที่ดีที่สุด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโครงข่ายประสาทเทียมเชิงวิวัฒนาการมีความเหมาะสม ต่อการนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการค้นหาค่าการออกแบบทางเข้าที่เหมาะสมที่สุดภายในแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

คำสำคัญ: การฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง, โครงข่ายประสาทเทียม, ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ME-NETT 25
The 25th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand

AMM75

Abstract

Defects in the injection molded parts, such as short shot, jetting and weld line, are usually caused by inappropriate mold design and processing conditions. Determination of proper gate designation is one of the most important factors in preventing these problems. However, it is usually based on operator's experience and skill rather than theoretical analysis. Although the present-day of Computer-aid engineering (CAE) software is valuable for helping in molding design, but it is still wasting time on trial and error. In this paper, a hybrid neural network and genetic algorithm method was developed and validated to find the optimized value of multi-response system leading to minimize the maximum injection pressure and maximum standard deviation of pressure at each gate. The CAE software was applied to simulate and construct the model of the flow behavior in the injection molding process. The model inputs were the values of various process parameters, mold geometry and gate locations. These inputs can be used to develop the proper neural network model. The genetic algorithm is applied to the network model for searching the parameter settings with an optimal response and has been successfully employed for optimizing the gate location. The results revealed that the evolutionary neural network was considerably capable of searching tool to the proper gate designation of rubber injection molding.

Keywords: rubber injection molding, neural network, genetic algorithm

1. บทนำ

กระบวนการเติมเข้าสู่แม่พิมพ์ (Mold filling process) นับเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ซึ่งจะส่งผลต่อทั้งลักษณะภายนอกและสมบัติทางกลของชิ้นงาน กระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบแม่พิมพ์เป็นหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การวางตำแหน่งทางเข้า (Gate location) Zhai and Chen (2005) ได้อธิบายถึงผลจากการเลือกตำแหน่งทางเข้าที่ไม่เหมาะสม ทำให้เกิดการไหลที่ไม่สมดุลอันเป็นสาเหตุทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่มีคุณภาพ เช่น การเกิดรอยพ่น การบิดตัวของชิ้นงาน ดังนั้นการกำหนดขนาดและการวางตำแหน่งทางเข้าควรคำนึงถึงการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ โดยมีเส้นทางการไหลที่สั้น การสูญเสียความร้อนและแรงดันน้อยที่สุด รวมถึงไหลไปถึงทุกคาวิตี้ในเวลาใกล้เคียงกันที่สุด การกำหนดตำแหน่งของทางเข้าโดยปกติจะขึ้นอยู่กับประสบการณ์และความชำนาญของผู้ออกแบบ ตำแหน่งของทางเข้าจะมีผลต่อทั้งระยะทางและรูปแบบการไหลของเนื้อวัสดุ ตำแหน่งที่เหมาะสมจะทำให้เนื้อวัสดุถูกเติมเข้าไปเบ้าพิมพ์อย่างสม่ำเสมอและมีการกระจายตัวไปยังส่วนต่างๆ ของเบ้าพิมพ์ได้ในเวลาใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยไม่เกิดรอยเชื่อมประสาน ที่ทำให้ชิ้นงานมีสมบัติทางกลลดลง ปัจจุบันได้มีการนำคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) มาช่วยในการกำหนดตำแหน่งทางเข้า เพื่อลดต้นทุนการผลิตในส่วนของเวลาในออกแบบชิ้นงาน รวมทั้งการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ นอกจากนั้นการพัฒนาและประยุกต์ใช้เครือข่ายประสาทเทียม (Neural Network, ANN) ร่วมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) เพื่อกำหนดตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ยังมีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน เนื่องจากมีราคาถูก ใช้เวลาในการประมวลผลรวดเร็ว และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ยังสามารถจำลองพฤติกรรมของวัสดุที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linearity) ได้เป็นอย่างดีอีกด้วย

2. การสร้างแบบจำลอง

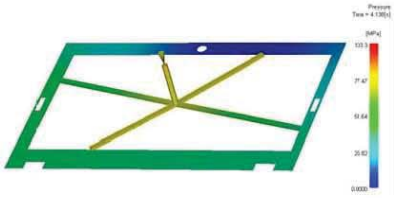
ผลิตภัณฑ์ตัวอย่างถูกนำมาใช้เป็นกรณีศึกษาในการทดลองเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างโครงข่ายประสาทเทียมและวิธีขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ให้สามารถทำนายการออกแบบทางเข้าของผลิตภัณฑ์ให้มีความเหมาะสม โดยผลิตภัณฑ์ที่นำมาเป็นกรณีศึกษามีปัญหาในด้านการกำหนดทางเข้าที่เหมาะสม เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความบาง จึงไม่สามารถฉีดขึ้นรูปโดยใช้ตำแหน่งทางเข้าเพียงตำแหน่งเดียวได้ จึงต้องอาศัยการกำหนดทางเข้าให้มีการไหลที่สมดุลภายในแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพ โดยตัวแปรที่ใช้ในการสอน คือ ตำแหน่งของทางเข้า โดยมีผลลัพธ์คือ ค่าความดันฉีดสูงสุดและค่าความแตกต่างสูงสุดของความดันที่แต่ละตำแหน่งทางเข้า การเก็บข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนำเข้าและข้อมูลส่งออกเริ่มจากการแบ่งเอลิเมนต์ของผลิตภัณฑ์ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลทางสถิติของเอลิเมนต์

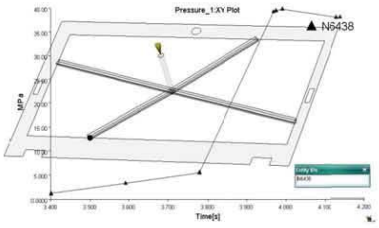
Entity counts	
Surface triangles	5,780
Nodes	3,340
Beams	50
Connectivity regions	1
Mesh volume	54.225 cm^3
Runner volume	9.8107 cm^3
Mesh area	180.75 cm^2
Edge details	
Free edges	808
Manifold edges	8266
Non-manifold edges	0
Orientation details	
Element not oriented	0
Intersection details	
Element intersections	6
Fully overlapping elements	0
Duplicate beams	0

Surface triangle aspect ratio	
Minimum aspect ratio	1.159
Maximum aspect ratio	2.284
Average aspect ratio	1.348

วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ที่มีพฤติกรรมการไหลคล้ายคลึงกับวัสดุยาง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุประเภทยางได้ งานวิจัยนี้กำหนดใช้กับแม่พิมพ์แบบ 2 แผ่น จึงกำหนดตำแหน่งทางเข้าแม่พิมพ์ทางด้านข้าง แล้ววิเคราะห์และเก็บข้อมูลค่าความดันฉีดสูงสุดและค่าความแตกต่างของความดันในแต่ละทางเข้า ดังแสดงในรูปที่ 1 เพื่อนำไปใช้ในการสอนโครงข่ายประสาทเทียมต่อไป



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 ค่าความดันสูงสุด (ก) ในแม่พิมพ์ (ข) ที่ตำแหน่งทางเข้า

3. แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network, NN)

โครงข่ายประสาทเทียมมีรูปแบบและการประมวลผลเลียนแบบจากสมองของสิ่งมีชีวิต ซึ่งสามารถปรับตัวต่อผลตอบสนองของข้อมูลนำเข้า

(Inputs) ได้ แต่ละพารามิเตอร์ต่างๆ ของโครงข่าย จำนวนนิวรอน (Neural) จำนวนชั้นซ่อน (Hidden layer) จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน (Neural in hidden layer) อัตราการเรียนรู้ (Learning rate) และจำนวนรอบการฝึก (Epochs) จะนำไปสู่ผลและลักษณะการทำงานที่ต่างกันออกไป

นิวรอนเป็นหน่วยประมวลผลพื้นฐานที่สำคัญในการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม มีองค์ประกอบ 3 ส่วน คือ [1]

1. กลุ่มของการเชื่อมโยงหรือไซแนปส์ ค่าการเชื่อมโยงจะเป็นตัวกำหนดการเชื่อมโยงระหว่างนิวรอน
2. ตัวบวก (Summation หรือ adder) สำหรับรวมข้อมูลป้อนเข้าที่คูณด้วยค่าการเชื่อมโยงแล้ว อาจเรียกได้ว่าเป็นการรวมเชิงเส้น (Linear combination)
3. ฟังก์ชันแอคทิเวชัน เพื่อจำกัดช่วงข้อมูลป้อนออกให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ ดังแสดงในสมการที่ 1

$$y_i(t+1) = f\left(\sum w_{ij} x_j(t) - \theta_i\right) \qquad (1)$$

โดยที่ w_{ij} คือ ค่าน้ำหนักที่เชื่อมต่อ
x_j คือ ค่าข้อมูลป้อนเข้า
θ_i คือ ค่าเทรสโฮลด์
y_i คือ ค่าข้อมูลป้อนออก
f คือ ฟังก์ชันแอคทิเวชัน

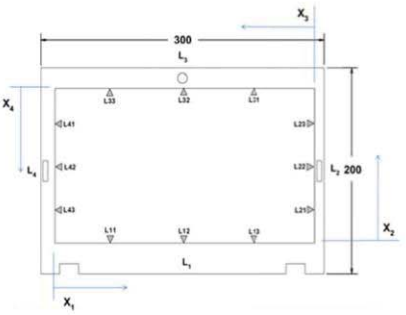
3.1 การออกแบบสถาปัตยกรรมที่เหมาะสมของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

รูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียม จัดเป็นสิ่งสำคัญประการแรกที่ต้องพิจารณา ซึ่งประกอบไปด้วยสองส่วนหลักคือ แบบจำลองของนิวรอน และสถาปัตยกรรมของโครงข่าย งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการปรับเปลี่ยนสถาปัตยกรรมโครงข่าย ซึ่งได้แก่ จำนวนชั้นซ่อน (Hidden layer) จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน (Neural) อัตราการเรียนรู้ (Learning rate) จำนวนรอบการฝึก (Epochs) และใช้การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแปรต่างๆ บอกเป็นค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Mean square error) หรือค่าความแม่นยำ (Accuracy) ระหว่างข้อมูลของตัวแปรตามที่ใช้สอนและข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเป็นตัวบอกความแม่นยำของการนำโครงข่ายประสาทเทียมไปใช้งาน [2] การเตรียมข้อมูลในการสร้างแบบจำลอง แบ่งข้อมูลที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกใช้ในการสอน (Training data) 72 ข้อมูล และ ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพ (Test data) 9 ข้อมูล

การกำหนดตัวแปรต้นและตัวแปรตามในโครงข่ายประสาทเทียม ตัวแปรนำเข้าในโครงข่าย คือ ตำแหน่งของทางเข้า ซึ่งกำหนดเป็น L1, L2, L3 และ L4 โดยมีรายละเอียดของแต่ละตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 3 และค่าตัวแปรนำเข้าเหล่านี้ถูกนำไปปรับค่าให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 เพื่อให้เข้ากับฟังก์ชันส่งผ่านโดยใช้สมการตามสมการที่ (2)

$$y_i = \frac{(y_{max}-y_{min})\,(x_i-x_{min})}{(x_{max}-x_{min}) + y_{min}} \qquad (2)$$

ตัวแปรตามที่ใช้ในการสอนโครงข่ายประสาทเทียม คือ ค่าความดันสูงสุด (Maximum pressure) ในแม่พิมพ์และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความดันในแต่ละตำแหน่งทางเข้า (Standard deviation of maximum pressure at each gate)



รูปที่ 2 ตำแหน่งทางเข้าต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง (หน่วย: มิลลิเมตร)

3.1.1 การหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบที่เหมาะสมในโครงข่ายประสาทเทียม

การทดลองเพื่อหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกหัดที่เหมาะสมในการฝึกโครงข่ายประสาทเทียม 2 ตัวแปรตาม โดยใช้ระดับของอัตราการเรียนรู้ 3 ระดับ ระดับของจำนวนรอบการสอน 3 ระดับ ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง รวม 54 การทดลอง จำนวนรอบการฝึกถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ 1,000 3,000 และ 5,000 รอบ ในขณะที่อัตราการเรียนรู้ได้แบ่งออกเป็น 3 ระดับเช่นกัน คือ 0.01 0.03 และ 0.05 ส่วนค่าตัวแปรอื่นๆ ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่

การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบที่เหมาะสมในโครงข่ายประสาทเทียม เมื่อมีค่าความดันสูงสุดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความดันที่แต่ละตำแหน่งทางเข้าเป็นตัวแปรตามแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกที่เหมาะสมในโครงข่ายประสาทเทียม

ออกแบบตัวแปร	ระดับตัวแปร		
อัตราการเรียนรู้	0.01	0.03	0.05
จำนวนรอบการฝึก	1000	3000	5000

3.1.2 การหาจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่เหมาะสม

เป็นการทดลองเพื่อหาจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน โดยช่วงของจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมแสดงดังสมการที่ 1 และ 2 ซึ่งงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์อิทธิพลของจำนวนนิวรอนจากสมการที่ (3) และ (4) และได้จำนวนนิวรอน 3 ถึง 9 ตัว ในชั้นซ่อนที่ 1 โดยทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง

$$Minimum\ neuron = \frac{Input\ neuron + Output\ neuron}{2} \quad (3)$$

$$Maximum\ neuron = 2(Input\ neuron) + 1 \quad (4)$$

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองเพื่อหาจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน

ออกแบบตัวแปร	ระดับตัวแปร
จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนแรก	3, 4, 5, ..., 9

3.1.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

เกณฑ์ในการเลือกตัวแปรเพื่อใช้พัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมนี้ ได้ใช้หลักการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ เพื่อทำให้ข้อมูลที่ได้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANalysis Of VAriance, ANOVA) ในการทดลองได้อาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ซึ่งสามารถคำนวณเป็นค่า P-value เพื่อเปรียบเทียบกับค่านัยสำคัญ ซึ่งหลักทางสถิติส่วนใหญ่กำหนดให้มีค่า 0.05 โดยเมื่อค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรนั้นไม่มีผลต่อความแม่นยำในการทำนาย นอกจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแล้ว แผนภาพกล่อง (Boxplot) ถูกนำมาใช้ในการอธิบายรายละเอียดของข้อมูล ซึ่งสามารถอธิบายได้ทั้ง ค่าตำแหน่งค่ากลาง การกระจาย รูปแบบการแจกแจง และข้อมูลที่ผิดปกติ ค่าตำแหน่งควอไทล์ที่ 2 เป็นค่าที่ชี้ถึงค่ากลางของระบบและรูปแบบการแจกแจงของระบบ การกระจายหรือความแตกต่างของข้อมูลที่ศึกษาถูกชี้ด้วยขอบเขตของกล่อง และข้อมูลที่ผิดปกติ จะอยู่จากจุดที่อยู่นอกขอบเขตกล่อง โดยแผนภาพกล่องนี้ ยังสามารถใช้เปรียบเทียบผลความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับของปัจจัยในการออกแบบการทดลอง หรือการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อการกำหนดค่าที่เหมาะสม จากการทดลองได้โครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียมดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม

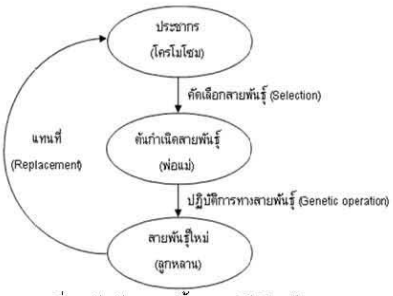
โครงข่ายประสาทเทียม	ค่าที่เหมาะสม	
	ความดันสูงสุด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุด
จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนแรก	8	3
จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2	11	5
อัตราการเรียนรู้	0.03	0.05
จำนวนรอบการฝึกสอน	1000	5000
ฟังก์ชันส่งผ่านที่ชั้นซ่อนแรก	Logsig	Logsig
ฟังก์ชันส่งผ่านที่ชั้นซ่อนที่ 2	Purelin	Purelin
สถาปัตยกรรมโครงข่าย	4-8-11-1	4-3-5-1

4. การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

4.1 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA)

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เป็นวิธีการค้นหาคำตอบโดยเลียนแบบวิธีการคัดเลือกทางธรรมชาติและการวิวัฒนาการทางสายพันธุ์ ถูกคิดขึ้นโดย John Holland ซึ่งได้ตีพิมพ์หลักการของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นครั้งแรก เค้าโครงทางคณิตศาสตร์ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมถูกพัฒนาขึ้นในช่วงทศวรรษ ค.ศ. 1960 โดยมีการใช้งานหลักของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม 2 แขนงคือ หาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (Optimization) และการเรียนรู้ในเครื่องจักร (Machine learning) ในแขนงการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดนั้น อัลกอริทึมการถ่ายทอดทางพันธุกรรมถูกนำมาใช้ในหลายๆ งาน เช่น การหาฟังก์ชันที่ดีที่สุด การประมวลผลภาพ และการควบคุม เป็นต้น ในงานทางด้านกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมถูกนำมาใช้ในการหาตัวแปรในกระบวนการผลิตที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น กระบวนการที่ทำให้เกิดการหดตัว (Shrinkage) หรือบิดตัว (Warpage) น้อยที่สุด [4] การหาตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสม รวมทั้งตำแหน่งช่องระบายอากาศภายในแม่พิมพ์ [5] ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นวิธีการที่สามารถใช้งานกับปัญหาต่างๆ ได้

จากวัฏจักรของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ดังรูปที่ 4 แม้ว่าขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่หากมีการกำหนดฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness function) และช่วงของตัวแปรที่ไม่เหมาะสม อาจทำให้เกิดการลู่เข้าคำตอบก่อนถึงคำตอบที่เหมาะสม การกำหนดขอบเขตของค่าตัวแปรและความถูกต้องของข้อมูลจึงมีผลกระทบต่อการกำหนดฟังก์ชันเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการพัฒนาขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เช่น ขนาดประชากร (Population size) อัตราการแลกเปลี่ยนสายอักษร (Crossover rate) และอัตราการกลายพันธุ์ (Mutation rate) จำเป็นต้องกำหนดให้มีความเหมาะสม

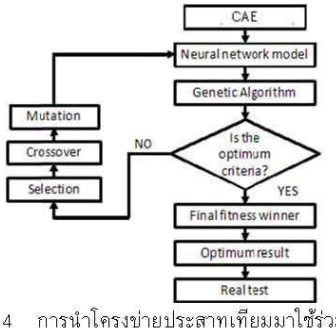


รูปที่ 3 วัฏจักรของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

4.2 การประยุกต์ใช้ NN/GA เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

ในปัจจุบันโครงข่ายประสาทเทียมได้เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพ ในการจำลองระบบที่มีความซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นสูง (Highly nonlinear) [7] เช่นเดียวกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ก็ถูกนำมา

ประยุกต์ใช้ในงานวิจัยที่หลากหลายเพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสม [3] สองเทคนิคนี้มีความเหมาะสมในการหาตัวแปรในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกและการหาตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสม ซึ่งมีนักวิจัยจำนวนหนึ่งได้พัฒนาโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในกระบวนการฉีดขึ้นรูป [3,4,6] มีการนำเสนอแผนผังการหาตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสมโดยใช้ค่าความต้านทานการไหล (Flow Resistance search scheme, FR) [8] เพื่อหาตำแหน่งทางเข้าที่ใช้เวลาในการเติมที่ต่ำกว่าเป็นเกณฑ์ในการหาตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสม การย้ายตำแหน่งทางเข้าตามทิศทางที่เกิดความต้านทานการไหลสูงสุด ทำให้เวลาที่ใช้ในการเติมลดลง และมีรูปแบบการไหลที่ดีขึ้น วิธีการนี้มีประสิทธิภาพเหมือนวิธีการค้นหาตามความชัน แต่มีข้อได้เปรียบที่สามารถประยุกต์ใช้กับชิ้นงานที่รูปร่างซับซ้อนได้ดีกว่า การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม กับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ร่วมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ในงานวิจัยนี้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมถูกนำมาใช้เพื่อหาฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนำเข้า (ตำแหน่งทางเข้า) และตัวแปรส่งออก (ค่าความดันสูงสุดในแม่พิมพ์และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความดันสูงสุดที่หัวฉีด) เพื่อประยุกต์ใช้กับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมตามสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์

Find

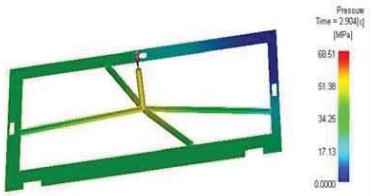
$$x = \{x_1, x_2, \ldots, x_N\} \quad (5)$$

To minimize

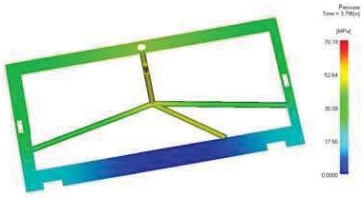
$$F(x) = af_1(x) + bf_2(x) \quad (6)$$

โดยที่ x เป็นตัวแปรนำเข้า อยู่ในรูปของระยะทาง (L) N คือจำนวนทางเข้าในแม่พิมพ์ $f_1(x)$ เป็นฟังก์ชันของค่าความดันสูงสุดของแม่พิมพ์ และ $f_2(x)$ เป็นฟังก์ชันของค่าความแตกต่างสูงสุดของความดันที่ตำแหน่งทางเข้า โดยผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก a และ b เท่ากับ 1

เมื่อนำโครงสร้างที่ดีที่สุดของโครงข่ายประสาทเทียมไปใช้ในการหาค่าด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์พบว่า จะได้ชุดของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมมาชุดหนึ่ง และทำการเลือกค่าคำตอบที่เหมาะสมโดยพิจารณาถึงค่าอื่นๆ เช่น การเกิดจุดดักอากาศ หรือ รอยเชื่อมประสาน ดังแสดงในรูปที่ 5 จากการทดลองนี้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ตำแหน่ง $[x_1, x_2, x_3, x_4]$ = [187.32, 36.31, 180.49, 89.76] ได้ค่าน้อยที่สุดของความดันสูงสุดของแม่พิมพ์เท่ากับ 68.72 MPa และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความดันสูงสุดที่หัวฉีดเท่ากับ 16.44 MPa เมื่อนำไปทดลองโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมได้ค่าความดันสูงสุดอยู่ที่ 68.51 MPa และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความดันสูงสุดที่หัวฉีด 15.6 MPa เห็นได้ว่าความแม่นยำจากการใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเทียบกับผลวิเคราะห์จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม ของค่าความดันสูงสุดมีค่าอยู่ที่ 99.69% และของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความดันสูงสุดที่หัวฉีดอยู่ที่ 94.61% ค่าวิธีการนี้จึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมในการออกแบบทางเข้าของแม่พิมพ์ได้



(ก) 68.51 MPa



(ข) 70.91 MPa

รูปที่ 5 ค่าความดันสูงสุดที่ได้จากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์
(ก) คำตอบที่ 1 (ข) คำตอบที่ 2

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีการกำหนดตำแหน่งทางเข้าเบ้าพิมพ์ที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยใช้ผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แล้วสร้างฟังก์ชันความสัมพันธ์ด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม จากนั้นใช้ขั้นตอนเชิงพันธุกรรมสำหรับการกำหนดทางเข้าที่เหมาะสม และใช้ความดันสูงสุดกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความดันในแต่ละทางเข้า เป็นเกณฑ์กำหนดความเหมาะสม โดยทั้งสองค่านี้แปรผันแบบผกผันกัน ซึ่งเหมาะกับการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์เพื่อหาชุดคำตอบพาเรโต (Pareto solutions) และสามารถหาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้โดยใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักค่าฟังก์ชันเป้าหมาย (Weight sum method) ผลของวิธีการที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถหาตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสมได้เป็นอย่างดี รวมทั้งสามารถนำมาพัฒนาและประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งทางเข้าในแม่พิมพ์ฉีดได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการวิจัยขนาดกลางเรื่องยางพารา (MPR) ประจำปี 2553 สัญญาเลขที่ RDG5350059

7. เอกสารอ้างอิง

[1] ปรมินทร์ มณีโรจน์. 2544. **การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมพันธุกรรมกับนิวรัลเน็ตเวิร์กแบบย้อนกลับเพื่อการเรียนรู้ค่าตัวแปรและสถาปัตยกรรมของเน็ตเวิร์ก**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[2] Ahmed, O., M. Nordin, S. Sulaiman and W. Fatimah. 2009. Study of genetic algorithm to fully-automate the design and training of artificial neural network. **International Journal of Computer Science and Network Security** 9(1): 217-226.

[3] Alam K. and M. R. Kamal. 2005. A robust optimization of injection molding runner balancing. **Computers & Chemical Engineering** 29: 1934-1944.

[4] Kurtaran H., B. Ozcelik, 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.

[5] Mathur R., S. G. Advani and B.K. Fink. 1998. Optimization 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] Zhai, M. and C. Shen. 2005. An optimization scheme based on flow resistance to locate optimum gate of complex part. **Journal of Reinforced Plastics and Composites** 24(15): 1559-1566.

ตารางเปรียบเทียบ output ที่เสนอในข้อเสนอโครงการและที่ได้จริง

Output		**สาเหตุและการแก้ไขที่ดำเนินการ** (ผลสำเร็จไม่ถึง 100%)
กิจกรรมในข้อเสนอโครงการ	**ผลสำเร็จ (%)**	
1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่นำแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้กับเจเนติกอัลกอริทึม	100%	
2. ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์เพื่อเก็บข้อมูลทางเข้าและช่องระบายอากาศ	100%	
3. สร้างแบบจำลองของความสัมพันธ์ตัวแปรที่ใช้เป็นเกณฑ์	100%	
4. สร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม	100%	
5. ใช้เจเนติกอัลกอริทึมในการทำนายตำแหน่งทางเข้าและช่องระบายอากาศ	100%	
6. ออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดที่สามารถเปลี่ยนตำแหน่งทางเข้า ช่องระบายอากาศ รวมถึงอินเสิร์ทภายในแม่พิมพ์ได้	100%	
7. พัฒนาเป็นโปรแกรมทำนายตำแหน่งทางเข้าและช่องระบายอากาศที่สามารถใช้งานได้ง่าย	100%	
8. สรุปผลการวิจัยและจัดทำเป็นรายงานฉบับสมบูรณ์	100%	

ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ แก่ สกว. *-ขณะนี้ยังไม่มี-*

ลงนาม .....

(หัวหน้าโครงการ)

วันที่ .....

การใช้เจเนติกอัลกอริทึมเพื่อกำหนดตำแหน่งทางเข้าและช่องระบายอากาศที่เหมาะสมภายในแม่พิมพ์ฉีดยาง

Optimization of Gate and Air Vent Locations in Rubber Injection Molding by Genetic Algorithms

ดร. สมเจตน์ พัชรพันธ์

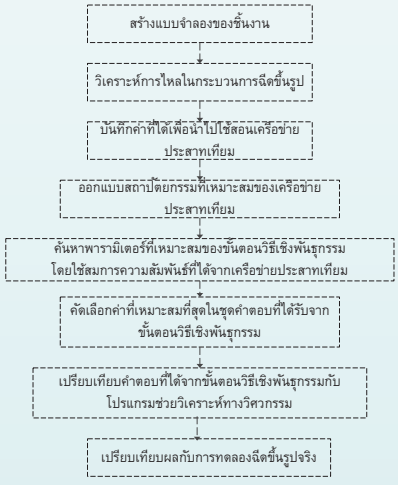
(ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.))

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาและประยุกต์ใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม ร่วมกับเจเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์ ในการวิเคราะห์หาตำแหน่งทางเข้าและช่องระบายอากาศที่เหมาะสมภายในแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง โดยใช้ผลการวิเคราะห์จากคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ในการสร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งจากผลการพิจารณารูปแบบการไหล และตำแหน่งรอยประสานของแบบจำลอง 2D 2.5D และ 3D เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริง พบว่า แบบจำลอง 2.5D มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้วิเคราะห์การไหลสำหรับชิ้นงานผนังบาง เนื่องจากมีรูปแบบการไหลที่สอดคล้องกับการทดสอบฉีดจริงมากที่สุด โดยในกรณีศึกษาที่ 1 ศึกษาชิ้นงานกรอบหน้าจอของคอมพิวเตอร์แบบพกพา ที่มี 4 ทางเข้า ซึ่งกำหนดค่าแรงดันฉีดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดในแต่ละทางเข้าเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ผลการทดสอบที่ได้สามารถนำไปกำหนดตำแหน่งช่องระบายอากาศที่มีความเหมาะสมที่สุดได้ กรณีศึกษาที่ 2 พัฒนาแนวทางการลดจำนวนของข้อมูลในการฝึกสอนโดยใช้ชิ้นงานที่มี 1 ทางเข้า ซึ่งใช้ค่าแรงดันฉีดและตำแหน่งรอยประสานเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ นำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริง พบว่า ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับการทดสอบฉีดจริง ดังนั้นแนวทางที่ได้จากงานวิจัยจึงสามารถนำไปใช้ในการกำหนดตำแหน่งทางเข้าและช่องระบายอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ที่มาของปัญหาและความสำคัญ

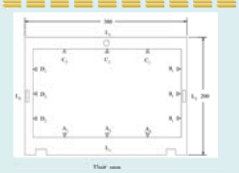
ทางเข้าและช่องระบายอากาศเป็นส่วนประกอบสำคัญของแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูป ซึ่งส่งผลต่อรูปแบบการไหล พลังงานที่ใช้ในการฉีด จนถึงปัญหาข้อบกพร่องของชิ้นงาน อย่างไรก็ตามองค์ความรู้ในการออกแบบทางเข้าและช่องระบายอากาศยังคงเป็นองค์ความรู้ที่เกิดขึ้นเฉพาะกับบุคคลหรือองค์กร แม้ว่าคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมสามารถช่วยให้การออกแบบทำได้ง่ายขึ้น แต่ยังคงต้องอาศัยการลองผิดลองถูกในการหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด งานวิจัยนี้ได้นำเครือข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการจำลองความสัมพันธ์ และประยุกต์ใช้ร่วมกับเจเนติกอัลกอริทึมในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสำหรับการประยุกต์ใช้เครือข่ายประสาทเทียมให้สามารถทำนายความสัมพันธ์ได้อย่างแม่นยำ จำเป็นต้องออกแบบสถาปัตยกรรมเครือข่ายที่เหมาะสม เช่นเดียวกับพารามิเตอร์ของเจเนติกอัลกอริทึมซึ่งส่งผลต่อการค้นหาและการลู่เข้าสู่คำตอบ โดยผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการกำหนดตำแหน่งทางเข้าและช่องระบายอากาศที่เหมาะสม สำหรับชิ้นงานที่มีลักษณะกลวงบริเวณตรงกลางหรือเป็นกรอบ รวมทั้งสามารถนำไปใช้ในการกำหนดจำนวนของทางเข้าที่เหมาะสมได้

ขั้นตอนการดำเนินงาน



ผลการวิจัยและวิจารณ์

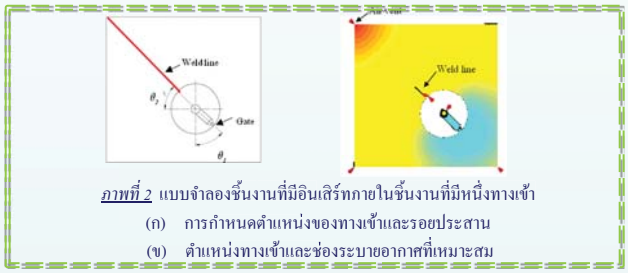
1. ผลการกำหนดตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสมของชิ้นงาน



ภาพที่ 1(ก) ตำแหน่งทางเข้าที่ใช้ในการฝึกสอนบนแบบจำลองกรอบหน้าจอคอมพิวเตอร์แบบพกพา

จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมร่วมกับเจเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์ สามารถทำนายตำแหน่งทางเข้าที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าต่ำที่สุด (Minimization of objectives) และให้ผลเฉลยออกมาในรูปของกลุ่มคำตอบ (Optimal solution set) จากกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมนี้สามารถนำไปกำหนดตำแหน่งช่องระบายอากาศที่มีความเหมาะสมที่สุดได้ ดังแสดงในภาพที่ 1 และ 2 เมื่อนำตำแหน่งทางเข้าที่ได้ไปทดสอบความแม่นยำในการทำนายสำหรับแบบจำลองกรอบหน้าจอคอมพิวเตอร์แบบพกพา พบว่ามีความแม่นยำเฉลี่ย 97.12% สำหรับแนวทางการทดลองกำหนดขอบเขตของตำแหน่งทางเข้าจากการกำหนดบริเวณที่ต้องการให้เกิดรอยประสาน โดยใช้แบบจำลองชิ้นงานที่มีอินเสิร์ทภายในชิ้นงานที่มีหนึ่งทางเข้า พบว่าสามารถลดจำนวนของข้อมูลในการฝึกสอนได้และมีความแม่นยำเฉลี่ย 99.39%

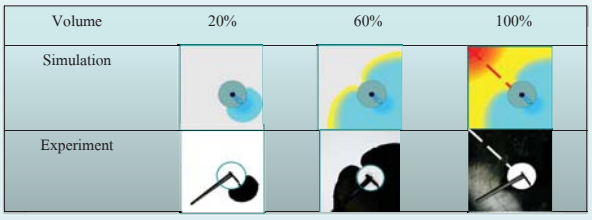
ภาพที่ 1(ข) ตำแหน่งของทางเข้าและช่องระบายอากาศที่เหมาะสม



ภาพที่ 2 แบบจำลองชิ้นงานที่มีอินเสิร์ทภายในชิ้นงานที่มีหนึ่งทางเข้า
(ก) การกำหนดตำแหน่งของทางเข้าและรอยประสาน
(ข) ตำแหน่งทางเข้าและช่องระบายอากาศที่เหมาะสม

2. ผลการวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์ฉีดโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมและการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริงโดยใช้ตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสม

จากผลการวิเคราะห์รูปแบบการไหลภายในแม่พิมพ์เมื่อใช้ตำแหน่งของทางเข้าตามที่ได้จากเจเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยเปรียบเทียบระหว่างผลจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมและการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริง พบว่า รูปแบบการไหลมีความสอดคล้องกัน แต่ยังคงมีความแตกต่างกันบางส่วน ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากสมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์แตกต่างจากการไหลที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งได้แก่ การกำหนดให้อุณหภูมิยางมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะทางในการไหล การกำหนดให้การไหลภายในแม่พิมพ์ไม่เกิดการเลื่อนตัว และกำหนดให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นค่าคงที่ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาตำแหน่งรอยประสานหรือแนวบรรจบของการไหลผ่านอินเสิร์ทที่ได้ พบว่ามีความสอดคล้องกัน ดังแสดงในตารางด้านล่าง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกับการทดสอบฉีดจริง ดังนั้นแนวทางที่ได้จากงานวิจัยจึงสามารถนำไปใช้ในการกำหนดตำแหน่งทางเข้าและช่องระบายอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ



สรุปผลการทดลอง

กรณีศึกษากรอบหน้าจอของคอมพิวเตอร์แบบพกพา โดยใช้เจเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์ พบว่าได้สถาปัตยกรรมที่เหมาะสม คือ 4-8-11-1 สำหรับฟังก์ชันที่มีค่าแรงดันฉีดเป็นค่าวัตถุประสงค์ และ 4-3-5-1 สำหรับฟังก์ชันที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันฉีดที่แต่ละทางเข้าเป็นค่าวัตถุประสงค์ สำหรับกรณีศึกษาชิ้นงานที่มีอินเสิร์ทภายในชิ้นงานที่มีหนึ่งทางเข้า สถาปัตยกรรมที่เหมาะสม คือ 1-10-1 สำหรับฟังก์ชันที่มีค่าแรงดันฉีดเป็นค่าวัตถุประสงค์ และ 1-8-1 สำหรับฟังก์ชันที่มีค่าตำแหน่งรอยประสานเป็นค่าวัตถุประสงค์ จากผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าวัตถุประสงค์ที่ได้จากเจเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์และโปรแกรมวิเคราะห์การไหลเมื่อกำหนดตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสม พบว่า สามารถกำหนดตำแหน่งของรอยประสานให้อยู่บนบริเวณที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ และมีค่าแรงดันฉีดที่เหมาะสม ดังนั้น เจเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์จึงมีความเหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้กำหนดตำแหน่งของทางเข้าและช่องระบายอากาศที่บริเวณรอยประสานในการออกแบบแม่พิมพ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

References

1. Harper, C.A. 2006. **Handbook of Plastic Processes**. John Wiley and Sons, New Jersey.
2. Samarasinghe, S. 2006. **Neural Networks for Applied Sciences and Engineering: FromFundamentals to Complex Pattern Recognition.** Auerbach Publications.
3. Jones, P. 2008. **The Mould Design Guide**. Rapra Technology, Shawbury.

Contact address :

Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering Kasetsart University
50 Ngamwongwan Rd. Ladyao, Chatuchak, BANGKOK 10900
Tel: 02-942-8555 ext. 2121 Fax: 02-955-1811 E-mail: fengsjpc@ku.ac.th