

บทที่ 2

กรอบแนวคิดทางทฤษฎี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาและผลงานวิจัยมากมายที่เกี่ยวกับการพัฒนาวิธีการฉีดพลาสติก การประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง และวิธีการทดสอบเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ โดยมีเอกสารที่เกี่ยวข้องในหัวข้อต่อไปนี้

2.1.1 กระบวนการฉีดพลาสติก

2.1.2 การประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง

2.1.1 กระบวนการฉีดพลาสติก

การศึกษางานฉีดพลาสติกเพื่อการพัฒนางานอุตสาหกรรมให้มีคุณภาพสูงขึ้นและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำลง การฉีดพลาสติกให้งานที่ได้มีคุณภาพนั้นเกี่ยวข้องโดยตรงกับการควบคุมเครื่องฉีดพลาสติกให้มีความสัมพันธ์กันกับตัวแปรต่างๆในกระบวนการฉีด (Patterson and Kamal , 1998) และจากการศึกษากระบวนการฉีดพลาสติกร่วมกับอิทธิพลที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานนั้นพบว่าสิ่งที่มีผลโดยตรงคือ ตัวแปรจากกระบวนการฉีดพลาสติก และชนิดของพลาสติกเอง (Gao and Yang , 1997) นอกจากนั้นยังมีงานวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับเทคโนโลยีพื้นฐานของการฉีดพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกที่ต้นทุนต่ำและมีความแม่นยำสูง (Lui and Manzione, 1997)

การศึกษานวัตกรรมใหม่การพัฒนาโมดูลการฉีดขึ้นรูปแบบไมโครชนิดภายนอกสำหรับพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติก (Chang, Pei-Chi., *et al.*, 2007) ระบบการออกแบบแยกตามโมดูลการฉีดขึ้นรูปแบบรันเนอร์ร้อน (Hot runner plunger) และประยุกต์ใช้กับการตอบสนองสกรูไฮดรอลิกขนาดเล็ก (30–100 tons) หรือเครื่องฉีดขึ้นรูปแบบไฟฟ้า (Fully electric) โมดูลการฉีดขึ้นรูปขนาดไมโครถูกวางตำแหน่งไว้ระหว่างแท่นที่อยู่กับที่และโมดูลของสกรูเครื่องฉีดขึ้นรูป หน้าที่ของความเร็วสกรูเครื่องฉีดเพื่อใช้ในการอัดรีดพลาสติกออกมา โมดูลการฉีดขึ้นรูปนี้สามารถปรับปรุงให้มีความเที่ยงตรงสูงขึ้นได้ 2 ขั้นตอนของเครื่องฉีดขึ้นรูป และสามารถปรับให้เหมาะสม

การออกแบบสำหรับตัวอย่างทดสอบการผลิตวาร์ปเพจ (Tang, H.S., *et al.*, 2006) และแสดงการวิเคราะห์ด้านความร้อนสำหรับการขึ้นรูปที่มีผลต่อความเค้นตกค้างในแม่พิมพ์ เทคนิค วิธีการที่นำมาออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกโดยใช้ซอฟต์แวร์ยูนิกราฟิก เวอร์ชัน 13.0 (Unigraphics, Version 13.0) แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์แรงเค้นตกค้างจากความร้อนขึ้นอยู่กับการทำให้เย็นแบบไม่เป็นคู่ (Uneven cooling) ของตัวอย่างซึ่งถูกพัฒนาและแก้ไขโดยใช้ซอฟต์แวร์ลูซัส อะนาไลส์ เวอร์ชัน 13.5 สำหรับการวิเคราะห์ (LUSAS Analyst, Version 13.5) ซอฟต์แวร์แบ่งคอนทัวร์พล็อตของการกระจายอุณหภูมิสำหรับแบบจำลอง และความหลากหลายของช่วงอุณหภูมิการขึ้นรูปโดยการพล็อตเส้นโค้งตอบสนองด้านเวลา (Plotting Time Response Curves) ผลปรากฏว่าการหดตัวที่เกิดขึ้นคล้ายคลึงกับในบริเวณใกล้เคียงทางทำให้เย็น เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่นการทำให้เย็นแบบไม่เป็นคู่มีผลช่วยให้วาร์ปเพจในแต่ละบริเวณของแม่พิมพ์แตกต่างกัน

การประยุกต์ใช้ตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ (Grey-Fuzzy Logic) ด้วยกระบวนการที่เหมาะสมของชิ้นส่วนการขึ้นรูปเปลือกที่มีลักษณะบาง (Chiang Ko-Ta. and Chang Fu-Ping., 2006) งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรเครื่องจักรต่อชิ้นส่วนที่ขึ้นรูปที่มีลักษณะเปลือกบาง (ยกตัวอย่างเช่น เปลือกของเซลล์โฟม ประกอบด้วย วัสดุ PC/ABS) มาจากการเรียงลำดับเชิงตั้งฉากกับการวิเคราะห์เชิงสัมพันธ์และตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ ตัวแปรเกี่ยวกับเครื่องจักร ได้แก่ อุณหภูมิโมล อุณหภูมิการละลาย แรงดันการเติมเต็ม และระยะเวลาในการเติมถูกนำมาหาค่าที่เหมาะสม เพื่อหาคุณลักษณะที่มีประสิทธิภาพรวมถึงแนวเชื่อมรับแรง การหดตัวและความแตกต่างของการกระจายอุณหภูมิขึ้นรูป ทำให้กระบวนการขึ้นรูปได้รับการปรับปรุงอย่างมีประสิทธิภาพ

การศึกษาวิธีการวัดคุณภาพของชิ้นส่วนการขึ้นรูป (Min, 2003) ชิ้นส่วนที่มีคุณภาพขึ้นอยู่กับกระบวนการออกแบบแม่พิมพ์ และสภาวะของกระบวนการ การหดตัวที่เหมาะสมควรใช้เพื่อชดเชยการหดตัวของชิ้นส่วนขึ้นรูป สภาวะของกระบวนการที่เหมาะสมคือความเร็วในการฉีด เท่ากับ 53.56 มิลลิเมตรต่อวินาที และแรงดันคงค้างเท่ากับ 41.89 บาร์ ช่วงของค่าตัวแปรควบคุมทางอ้อม เช่น การวัดแรงดันโพรงที่มากที่สุด หรือชิ้นส่วนแม่พิมพ์ ณ สภาวะกระบวนการที่เหมาะสม ใช้เพื่อวัดคุณภาพของชิ้นส่วนแม่พิมพ์

ในการศึกษาถึงเครื่องมือการจำลองเชิงคำนวณสำหรับการออกแบบที่เหมาะสมของกระบวนการขึ้นรูป (Bikas, *et al.*, 2002) รหัสเนสเพลน (NASPLAN) ถูกนำเสนอสำหรับการออกแบบกระบวนการขึ้นรูปอย่างชาญฉลาดในแม่พิมพ์ที่มีหลายโพรง นอกจากนี้รหัสเนสเพลน (NASPLAN) ได้ควบคุมกับวิธีการหาความแตกต่างเชิงตัวเลขที่เหมาะสม เพื่อออกแบบการละลายโดยการปรับแต่งเชิงเรขาคณิตของเกต (Gate) โดยหาระดับสัญญาณที่

เหมาะสมสำหรับบริเวณเฉพาะ ขั้นตอนนี้นำไปสู่ความสมดุลของการไหลและปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงานโดยลดของเสียที่เกิดจากการไหล (Flow-Generated Defects) เช่น วาร์ปเพจ การหดตัวแบบไม่เป็นรูป ตำแหน่งส่วนรีดลดทอน (Sink Marks) เป็นต้น นอกจากนี้การใช้สูญญากาศให้ผลในขั้นตอนการเติมที่เร็วกว่าด้วยความต้องการแรงฉีดที่ต่ำกว่า

งานวิจัยศึกษาถึง ผลกระทบของตัวแปรกระบวนการฉีดต่อกระบวนการขึ้นรูปสำหรับชิ้นส่วนพลาสติกผนังบางมาก (Ultra-thin wall plastic parts) (Song, C.M., et al., 2007). แม้พิมพ์การฉีดพลาสติกผนังบางมีข้อดีอย่างเห็นได้ชัด เช่น ประหยัดวัสดุ ลดต้นทุนการผลิต ลดน้ำหนักและขนาดรูปร่าง เป็นต้น การพัฒนาอย่างรวดเร็วของการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เช่น โทรศัพท์มือถือโดยเฉพาะชิ้นส่วนพลาสติกผนังบางมากมีการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง อย่างไรก็ตามกระบวนการฉีดขึ้นรูปกลายมาเป็นความยากและซับซ้อนมากกว่าการลดความหนาของชิ้นส่วน การตรวจสอบเชิงระบบกำลังขาดคุณลักษณะการขึ้นรูปสำหรับชิ้นส่วนพลาสติกผนังบางมาก แม้พิมพ์ฉีดขึ้นรูปสามารถออกแบบและผลิตโดยใช้วิธีการทดลองของทางทฤษฎี และการจำลองเชิงตัวเลข ผลของตัวแปรกระบวนการที่แตกต่างกัน (อัตราการผลิต แรงดันการฉีด อุณหภูมิการละลาย การปรับขนาดให้เหมาะสม และความหนาของชิ้นส่วน) ต่อกระบวนการขึ้นรูป ผลที่ได้คือความหนาของชิ้นงานเป็นตัวแปรในการตัดสินใจสำหรับการขึ้นรูป การปรับขนาด และอัตราการผลิต เป็นปัจจัยหลักในกระบวนการขึ้นรูป อัตราการผลิตแบบเร่ง สามารถนำมาเพื่อรักษาอัตราการผลิต อุณหภูมิการหลอมเหลว และแรงดันฉีดเป็นปัจจัยรอง แต่อุณหภูมิการหลอมเหลวและแรงดันการฉีดจะสูงกว่ากระบวนการขึ้นรูปแบบปกติ

จะเห็นได้ว่า มีการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับกระบวนการพลาสติกมากมาย ทั้งการศึกษาเพื่อพัฒนาและปรับปรุงชิ้นส่วน เพื่อลดของเสีย ลดต้นทุน เพิ่มผลผลิต ประสิทธิภาพการผลิตสูงขึ้น คุณภาพผลิตภัณฑ์ดีขึ้น เป็นต้น

2.1.2 การประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีทางทฤษฎีเพื่อลดวาร์ปเพจ (War Page) ในการฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Tang, et al., 2007) ซึ่งวาร์ปเพจเป็นหนึ่งในประเภทของเสียที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร ในงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตแม่พิมพ์แผ่นบาง ขนาด $120 \times 50 \times 1$ มิลลิเมตร เพื่อใช้สำหรับการทดสอบวาร์ปเพจ แม่พิมพ์จะถูกยึดไว้บนเครื่องฉีด ผลิตภัณฑ์จะใช้เพื่อทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาการเกิดวาร์ปเพจโดยประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบของทางทฤษฎี จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีผลต่อวาร์ปเพจมาก คือ อุณหภูมิการละลาย ระยะเวลาในการ

เต็ม (Filling Time) มีผลกระทบต่อวาร์ปเพียงเล็กน้อย พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดของเสียดจวาร์ปเพนน้อยที่สุด คือ อุณหภูมิการละลาย 240 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการเต็ม 0.5 วินาที แรงดันสำหรับการบรรจุ (Packing Pressure) 90 บาร์เซ็นต์ และระยะเวลาในการบรรจุ (Packing Time) 0.6 วินาที

การเปรียบเทียบค่าวาร์ปเพนที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นงานพลาสติก โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ระหว่างแบบจำลองเครือข่ายประสาท (Neural Network Model) และแบบจินตคณิตอัลกอริทึม (Genetic Algorithm) (Ozcelik and Erzurumlu, 2006.) งานวิจัยนี้ศึกษาหา ที่ตั้งปากแม่แบบ การเต็ม และการไหลที่ดีที่สุด เพื่อประยุกต์ใช้กับการหาสภาวะที่ทำให้เกิดวาร์ปเพนน้อยที่สุดในชิ้นส่วนพลาสติก พารามิเตอร์ด้านกระบวนการเพื่อพิจารณาตัวแปรของแบบจำลอง ปัจจัยที่มีผลต่อพารามิเตอร์ของกระบวนการในชิ้นส่วนเปลือกพลาสติกชนิดบางสามารถหาได้โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment; DOE) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พารามิเตอร์ด้านอุณหภูมิของแม่พิมพ์ อุณหภูมิการละลาย แรงดันการบรรจุ ระยะเวลาบรรจุ ระยะเวลาในการทำให้เย็น ประเภทรันเนอร์ (Runner) และที่ตั้งปากแม่แบบที่ส่งผลต่อวาร์ปเพน มีค่าเท่ากับ 33.7, 21.6, 20.5, 16.1, 5.1, 1.5 และ 1.3 บาร์เซ็นต์ ตามลำดับ การใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทจะลดต้นทุนทางคอมพิวเตอร์ในการกระบวนการหาค่าที่เหมาะสม ส่วนจินตคณิตอัลกอริทึมสามารถลดวาร์ปเพนของแบบจำลองเริ่มต้นได้อย่างมีนัยสำคัญ วาร์ปเพนปรับปรุงขึ้น 51 บาร์เซ็นต์

การออกแบบและการหาค่าที่เหมาะสมของโพรงที่ทำให้เย็นที่คงที่ในการฉีดขึ้นรูป (Dimla, *et al.*, 2005.) เป็นการศึกษาถึงอายุขัยที่เพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น โทรศัพท์มือถือ การฉีดขึ้นรูปยังคงเป็นวิธีการที่นิยมสำหรับการผลิตชิ้นส่วนพลาสติก วัตถุประสงค์หลักของการศึกษาคือการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับช่องทางการทำให้เย็น/ร้อนที่คงที่ในโครงสร้างของเครื่องมือการฉีด โดยใช้การวิเคราะห์ การส่งผ่านความร้อนหาขนาดที่เหมาะสมของแบบจำลอง 3 มิติ (3D CAD model) ของแกนและโพรงด้วยเครื่องมือที่ต้องการสร้างขึ้นรูป ซึ่งวิธีนี้มีผลต่อการลดช่วงเวลาอย่างมีนัยสำคัญ การวิเคราะห์แบบจำลองเสมือนแสดงให้เห็นว่าโพรงที่ทำให้เย็นแบบคงที่สามารถทำนายการลดช่วงเวลาได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

การศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงสภาวะของกระบวนการฉีดพลาสติกขึ้นงานที่มีการหดตัว (Postawa and Koszkuł, 2005) การทดลองโฟกัสไปที่การประเมินวิธีการฉีดพลาสติกที่มีผลต่อตัวแปรอิสระ (ตัวแปรป้อนเข้า) ต่อตัวแปรตาม: การหดตัวตามแนวยาว (Longitudinal Shrinkage; $\bar{S}_w$), การหดตัวตามแนวตั้งฉาก (Perpendicular Shrinkage; $\bar{S}_p$) และน้ำหนัก (m) ของวัตถุดิบซึ่งทำจากโพลีออกซีเมทิลีนแบบกิ่งผลึก (polyoxymethylene; POM) หรือโพลีสไตรีนอสถฐาน

(Polystyrene; PS) สภาวะของการฉีดขึ้นรูปเป็นผลมาจากหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องกัน ทั้งเกี่ยวกับการฉีดขึ้นรูป การออกแบบแม่พิมพ์ และการแปรรูปโพลิเมอร์ที่มีผลด้านกายภาพสำหรับการฉีดพลาสติก จากการใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิ การขึ้นรูป อุณหภูมิการฉีด ระยะเวลาในการทำให้เย็น แรงดันกักค้ำ และความเร็วในการฉีด ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

การลดวาร์ปเพจและดัชนีการจมในการฉีดขึ้นรูปชิ้นส่วนเทอร์โมพลาสติก โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมของทาคุชิ (Erzurumlu and Ozcelik, 2006) โดยพิจารณาพารามิเตอร์กระบวนการ เช่น อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิการละลาย แรงดันการบรรจุ นอกจากนั้น ได้แก่ พารามิเตอร์ ประเภทสันตามแนวตัดขวาง (Rib cross-section types) และสันมุมฝัง (Rib Layout Angle) ซึ่งเป็นชุดของการวิเคราะห์การขึ้นรูปที่แสดงถึงข้อมูลวาร์ปเพจและดัชนีการจม วัสดุโพลิเมอร์ที่เลือกมาทำการทดสอบ คือ PC/ABS, POM และ PA66. วิธีการหาค่าที่เหมาะสมของทาคุชิเพื่อวิเคราะห์การขึ้นรูปโดยตั้งสมมติฐานจากการออกแบบแบบแฟคทอเรียล 3 ระดับ การจัดเรียงเชิงตั้งฉากของทาคุชิ อัตราส่วนสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise; S/N) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าที่เหมาะสม และผลของพารามิเตอร์ด้านกระบวนการที่มีต่อวาร์ปเพจและดัชนีการจม การทดสอบยืนยันเกี่ยวกับระดับที่เหมาะสมของพารามิเตอร์โดยวิธีทาคุชิเหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างมีคุณภาพในการฉีดพลาสติก

การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูปสามารถหาได้โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Park and Ahn, 2004) เทคนิคการออกแบบการทดลองถูกนำมาออกแบบ เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์แบบสองทาง และได้ประยุกต์อย่างก้าวหน้าสำหรับแม่พิมพ์และกระบวนการออกแบบ ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ คุณลักษณะของรันเนอร์ (Runner Specifications) และ โครงแบบโพรงทำให้เย็น (Cooling Channel Configurations) เพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสม ผลที่ได้คือ ผลิตภัณฑ์ได้ปรับปรุงคุณภาพและกระบวนการฉีดขึ้นรูป ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์มีความแม่นยำมากขึ้น

การหาผลกระทบของตัวแปรเชิงมิติที่มีต่อวาร์ปเพจของชิ้นส่วนพลาสติกเปลือกบาง โดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบ และจินตคณิตที่ร่วมกัน (Ozcelik and Erzurumlu, 2005) การลดวาร์ปเพจมีผลต่อการปรับปรุงชิ้นงานฉีดพลาสติกอย่างมีนัยสำคัญ การคงสภาพเชิงมิติเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการลดวาร์ปเพจให้เหลือน้อยที่สุด ตัวแปรอื่นๆ ที่มีผล เช่น อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิการละลาย ระยะเวลาในการฉีด แรงดันการฉีด เป็นต้น การวิเคราะห์ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลแบบเต็ม 3 ระดับ การทำนายแบบจำลองสำหรับวาร์ปเพจถูก

สร้างขึ้นเพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์ผลชิ้นส่วนประกอบที่มีค่าจำกัด แบบจำลองพื้นผิวผลตอบ สัมพันธ์กับจินตคณิตที่มียุทธวิธีที่มีประสิทธิภาพ เพื่อหาค่าตัวแปรของกระบวนการที่เหมาะสม

จากงานวิจัยข้างต้นพบว่าการเทคนิคการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ ข้อมูลทางด้านสถิติตัวอย่างเช่น วิธีการทดลองของทากูชิ การออกแบบแบบแฟคทอเรียล การ ออกแบบพื้นผิวผลตอบ การวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นต้น เพื่อให้ทราบถึงค่าตัวแปรของ กระบวนการผลิตที่มีค่าเหมาะสม หรือเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตนั่นเอง

2.2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยมีหลักการและเนื้อหาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับพลาสติก

2.2.2 งานฉีดพลาสติก

2.2.3 การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

2.2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับพลาสติก

พลาสติกหรือพอลิเมอร์เป็นสารสังเคราะห์ที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีของสารอินทรีย์ ซึ่ง ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยคาร์บอน และไฮโดรเจน เป็นหลักนอกจากนั้นยังมีส่วนประกอบของ ออกซิเจน และไนโตรเจน และมีพลาสติกบางชนิดที่มีส่วนประกอบของ กำมะถัน คลอรีน ฟลูออรีน และซิลิกอน อยู่ด้วย

1) สารตั้งต้นในการสังเคราะห์พลาสติก

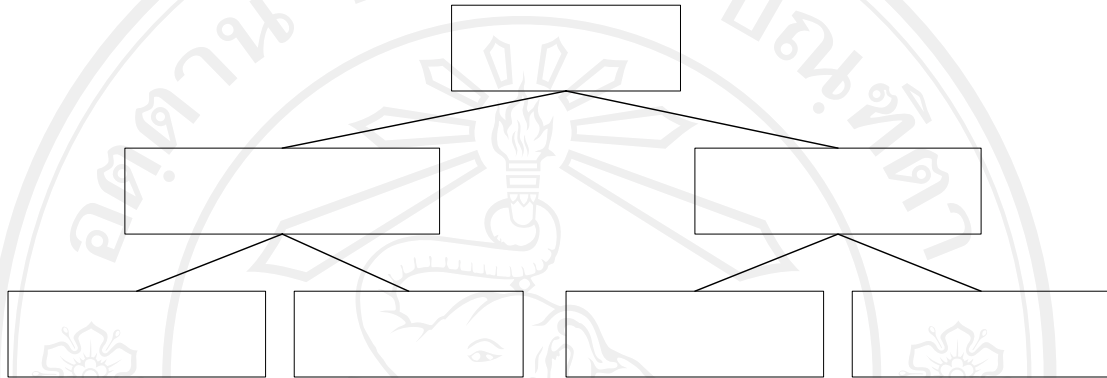
สารตั้งต้นในการสังเคราะห์พลาสติกหรือพอลิเมอร์จะเป็นสาร โมเลกุลเดี่ยว (Monomer) ส่วนใหญ่จะได้อาจมาจากน้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน ตัวอย่างสารตั้งต้นที่ใช้กัน มากได้แก่ เอทิลีน (Ethylene) ไวนิลคลอไรด์ (Vinyl chloride) และสไตรีน (Styrene) เป็นต้น

2) ปฏิกิริยาเชิงซ้อน (Poly Reaction)

เป็นการนำเอาโมเลกุลเดี่ยว (Monomer) จำนวนมากมาทำปฏิกิริยาเชิงซ้อน รวมตัวกันเป็นโมเลกุลใหญ่ (Macromolecules) ซึ่งเรียกว่าพอลิเมอร์หรือพลาสติก ซึ่งมีโครงสร้าง โมเลกุลอยู่สองลักษณะ คือ การเกาะกันเป็นตาข่าย (Crosslink) และไม่มีการเกาะตัวระหว่าง โมเลกุลใหญ่ (Non-Crosslink)

พลาสติกมีโครงสร้างเป็นตาข่าย (Crosslink) แยกออกเป็นสองลักษณะ คือ แบบตาข่ายแคบ (Narrow-Meshed Crosslink) กับแบบตาข่ายตาห่าง (Wide-Meshed Crosslink)

พลาสติกที่มีโครงสร้างที่ไม่มีการเกาะตัวระหว่างโมเลกุลใหญ่ (Non-Crosslink) แยกเป็นสองลักษณะ คือ แบบเป็นเส้น (Linear) และแบบแยกแขนง (Branching) ดังรูปที่ 2.1



รูป 2.1 แผนภูมิการแบ่งโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์

3) กระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization)

ในกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน เป็นการนำเอาโมเลกุลของสารชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดมาทำปฏิกิริยาเกาะตัวกันเป็นโมเลกุลใหญ่ (Macromolecules) เริ่มต้นจากโมเลกุลที่มีการเกาะตัวกันแบบสองแขน (Double Bond) จะถูกความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ทำให้แตกตัวแยกแขนออกจับยึดติดกับแขนของโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงต่อกันเป็นลูกโซ่ (Chain)

กระบวนการพอลิเมอไรเซชัน มี 3 ขั้นตอน คือ

- ปฏิกิริยาเริ่มต้น พลาสติกชนิดโมเลกุลไม่เกาะตัว
- ปฏิกิริยาเกาะตัวเป็นโซ่ เป็นตาข่าย (Non-crosslink)
- ปฏิกิริยาช่วงสุดท้ายของโมเลกุลใหญ่

ในช่วงปฏิกิริยาเริ่มต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเริ่มทำให้แขนของโมเลกุลแยกออก ต่อมาแขนของโมเลกุลจะเกาะตัวเป็นโซ่ต่อ ๆ ไป ที่ปลายของโซ่โมเลกุลจะมีการอึดตัวของวาเลนซ์อิสระ (Free Valiancy) โดยจะมีการจัดเป็นแขนคู่หรือแขนเดี่ยวโซ่ เป็นการสิ้นสุดของปฏิกิริยา

โมเลกุล

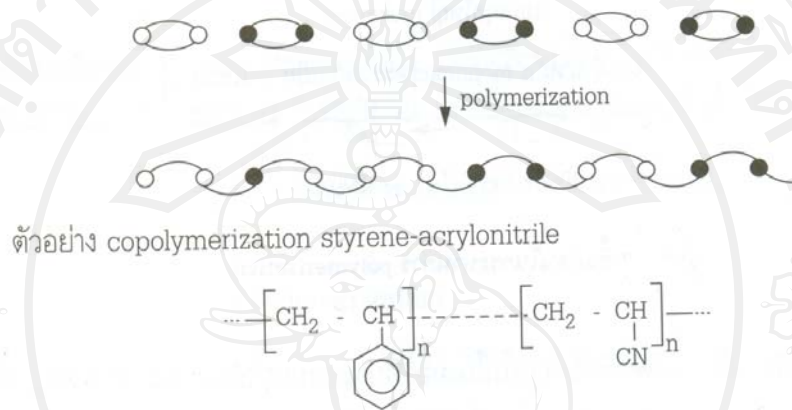
เป็นเส้น (Linear-chain)

แตกแขนง (Branching)

4) กระบวนการโคพอลิเมอไรเซชัน (Copolymerization)

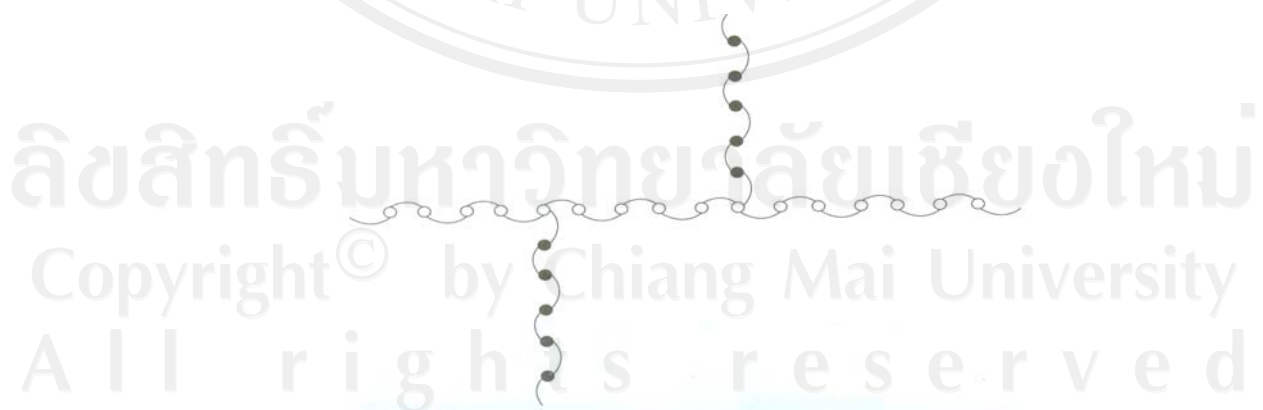
กระบวนการโคพอลิเมอไรเซชัน เป็นการนำโมเลกุลต่างกันสองหรือสามชนิด มาทำปฏิกิริยาให้เกาะตัวอยู่ในโซ่เดียวกัน เรียกผลิตภัณฑ์จากกระบวนการนี้ว่าโคพอลิเมอร์

ตัวอย่างกระบวนการโคพอลิเมอไรเซชัน ดังรูปที่ 2.2



รูป 2.2 กระบวนการโคพอลิเมอไรเซชัน

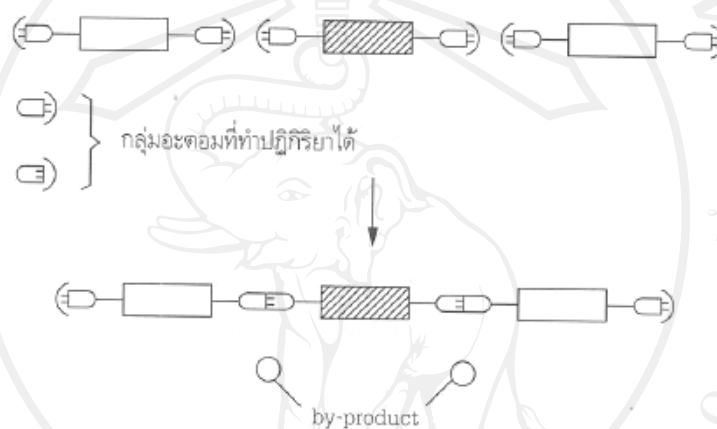
รวมทั้งการนำเอาโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ตัวหนึ่งไปเกาะติดกับโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์อีกตัวหนึ่ง ซึ่งเรียกว่ากราฟพอลิเมอไรเซชัน (Graft Polymerization)



รูป 2.3 กราฟพอลิเมอไรเซชัน

5) กระบวนการพอลิคอนเดนเซชัน (Poly Condensations)

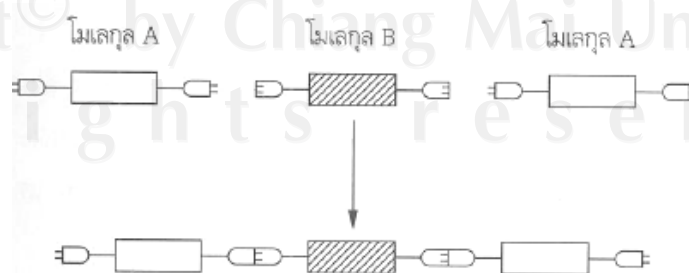
กระบวนการพอลิคอนเดนเซชันเป็นปฏิกิริยารวมตัวกันระหว่างโมเลกุลของสารต่างชนิดกันซึ่งโมเลกุลเหล่านี้ตรงปลายจะมีกลุ่มอะตอมที่สามารถทำปฏิกิริยาได้อยู่หนึ่งกลุ่มโดยพร้อมจะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกันในการทำปฏิกิริยาจะมีการแยกตัวของสารประกอบ (By Product) ออกมาส่วนมากจะเป็นน้ำ ดังรูปที่ 2.4



รูป 2.4 กระบวนการพอลิคอนเดนเซชัน

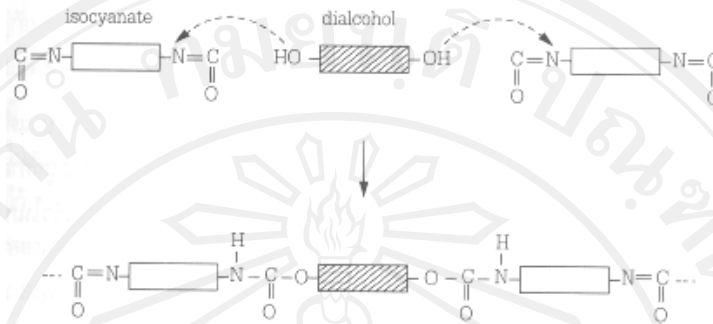
6) กระบวนการพอลิแอดดิชัน

ในกระบวนการพอลิแอดดิชัน เป็นการนำเอาโมเลกุลของสารสองชนิดที่ต่างกัน A และ B มาทำปฏิกิริยากัน เช่นเดียวกับกระบวนการโคพอลิคอนเดนเซชัน แต่ในการทำปฏิกิริยาไม่มีสารแยกตัวออกมา ดังรูปที่ 2.5



รูป 2.5 ลักษณะของการเกาะตัวของโมเลกุลในกระบวนการพอลิแอดดิชัน

ตัวอย่างกระบวนการพอลิแอดดิชัน ในการผลิต โพลียูรีเทน (Polyurethane: PUR) ดังรูปที่ 2.6 เป็นการนำเอาไอโซไซยานต (Isocyanate) มาทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ผลที่ได้ ออกมาคือจะได้พอลียูรีเทน

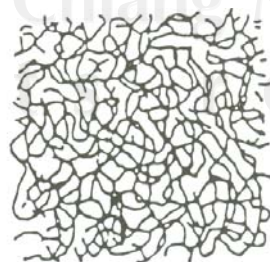


รูป 2.6 กระบวนการพอลิแอดดิชันในการผลิตพอลียูรีเทน

ปฏิกิริยาเกิดจากการย้ายอะตอมไฮโดรเจนของกลุ่มแอลกอฮอล์ไปยังกลุ่มไอโซไซยานต ซึ่งทำให้แขนข้างหนึ่งของแต่ละกลุ่มเป็นอิสระที่จะให้โมเลกุลเกาะตัวต่อ ๆ ไปได้เป็นมาโครโมเลกุล การเกาะตัวโมเลกุลของพอลียูรีเทนจะมีทั้งแบบลูกโซ่ดังตัวอย่างและแบบเป็นตาข่าย (Crosslink) โดยขึ้นอยู่กับ การเลือกวัสดุตั้งต้นส่วนใหญ่แล้วพอลียูรีเทนจะอยู่ในรูปของพลาสติกอ่อนยืดหยุ่น (Elastomer) หรือพลาสติกแข็ง (Thermosetting Plastic หรือ Durometer) ขึ้นกับความแข็งของพอลียูรีเทนมีมาก ขึ้นอยู่กับ โครงสร้างของแอลกอฮอล์ ที่นำมาทำปฏิกิริยา

7) ลักษณะของโซ่โมเลกุลในโครงสร้างของพอลิเมอร์

โดยทั่วไปการแบ่งโครงสร้างของพอลิเมอร์เป็น 3 ชนิดคือโครงสร้างแบบไม่เป็นระเบียบ และไม่มีการเกาะตัวกันระหว่างโซ่แต่ละเส้น (Amorphous Thermoplastics) โครงสร้างแบบไม่เป็นระเบียบแต่มีการเกาะตัวกันด้วยพันธะเคมี (Partial Crystalline) และโครงสร้างเป็นผลึกหรือเกาะตัวเป็นตาข่าย (Cross linked)



รูป 2.7 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลแบบไม่เป็นระเบียบ

ในโครงสร้างแบบไม่เป็นระเบียบแต่มีการเกาะตัวกันด้วยพันธะเคมี (Partial Crystalline) เมื่อได้รับความร้อนพันธะจะถูกทำลายได้แต่เมื่อตัวเย็นก็จะกลับมาเกาะตัวกันเป็นผลึกได้อีกจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเร็วการเย็นตัวถ้าค่อย ๆ เย็นตัวอย่างช้า ๆ การเกาะตัวเป็นผลึกก็จะมากขึ้น



รูป 2.8 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลแบบมีการเกาะตัวกันด้วยพันธะเคมี

สำหรับโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่เป็นผลึกหรือเกาะตัวเป็นตามข่าย (Cross linked) โขโมเลกุลจะเกาะตัวกันเป็นตาข่าย เหนียวแน่น ดังนั้นเมื่อได้รับความร้อนจะไม่อ่อนตัวและไม่หลอมละลาย จะมีอยู่สองลักษณะคือ แบบตาข่ายชิดกัน ซึ่งจะมีความแข็งแรงเปราะ เรียกว่าเทอร์โมเซต (Thermo Set) ดังรูปที่ 2.9 (ก) และแบบตาข่ายห่าง ซึ่งจะมีความยืดหยุ่นคล้ายยาง ดังรูปที่ 2.9 (ข) เรียกว่าอีลาสโตเมอร์ (Elastomer)



ก) เป็นแบบตาข่ายชิดกัน



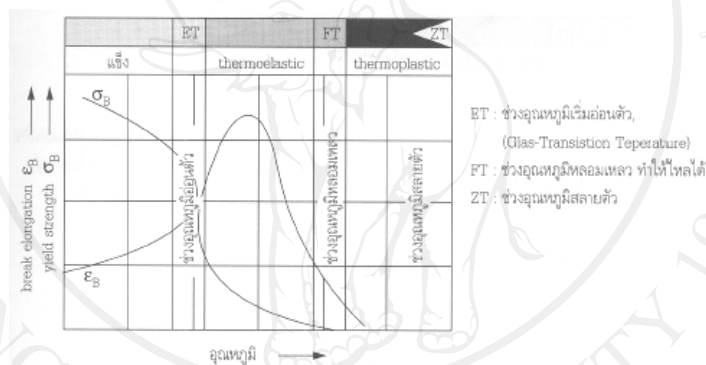
ข) เป็นแบบตาข่ายตาห่าง

รูป 2.9 โครงสร้างโมเลกุลของแบบตาข่าย (Cross linked Polymers)

7.1) คุณสมบัติของโครงสร้างแบบไม่เป็นระเบียบ และไม่มีการเกาะตัวกันระหว่างโซ่แต่ละเส้น (Amorphous Thermoplastics)

พลาสติกแต่ละชนิดจะแสดงคุณสมบัติแตกต่างกันไปเมื่อได้รับความร้อน โครงสร้างชนิดนี้ประกอบด้วยโซ่โมเลกุลแบบเส้น และยึดเหนี่ยวกันอยู่ด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและระยะห่างระหว่างโซ่และมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกลทางความร้อน และทางเคมีด้วย รูปที่ 2.10 แสดงคุณสมบัติ ความทนต่อแรงดึงและอัตราการยืดตัวที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ ในตารางรูปที่ 2.10 ได้แสดงสถานะโครงสร้างโมเลกุลและวิธีการแปรรูปของพลาสติกในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ เอาไว้

พลาสติกที่สำคัญในกลุ่มนี้คือโพลีสไตรีน (Polystyrene PS), สไตรีนโบทาดีน (Styrene-Butadien SB), อโคโรไนไตร โบทาดีน สไตรีน (Acrylonitrile-Butadien Styrene ABS), สไตรีน อโคโรไนไตร (Styrene-Acrylonitrile SA), โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride PVC-Hard), โพลีคาร์บอนเนต (Polycarbonate PC)



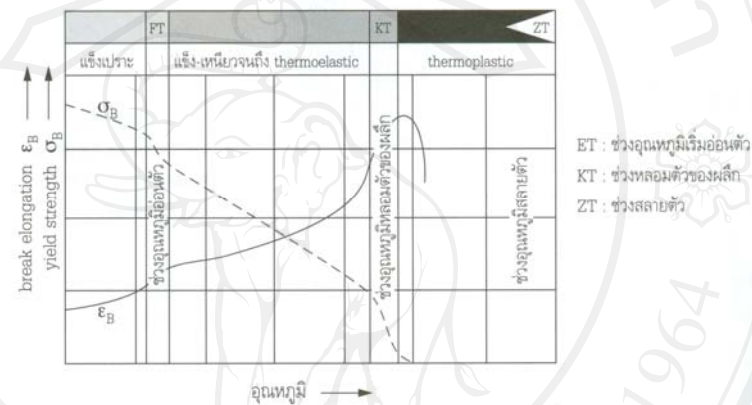
รูป 2.10 แผนภูมิแสดงคุณสมบัติเทอร์โมพลาสติกเมื่อได้รับความร้อน

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติเทอร์โมพลาสติกเมื่อได้รับความร้อน

สถานะของพลาสติก	ช่วงแข็ง เปราะเหมือนแก้ว	ช่วงยืดหยุ่นเหมือนยาง	ช่วงเหนียวหนืด	ช่วงสลายตัว
โครงสร้างโมเลกุล	มาโครโมเลกุลเกาะแน่นมาก แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมาก	มาโครโมเลกุลยังเกาะกันเหนียวแน่นอยู่พอประมาณ แต่เคลื่อนไหวได้มากขึ้น	มาโครโมเลกุลจะเคลื่อนไปมาเสียดสีกันได้ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้อยมาก	โมเลกุลจะสลายตัว
การทำงานขึ้นรูป	ตัดโดยเสียเศษ และไม่เสียเศษ การประสานแบบถาวรโดยการติดกาว ประสานแบบแยกโดยใช้สกรู หมุด และขันเกลียว ปรับปรุงผิวได้	การขึ้นรูปโดยการตัด, อัด, ดึง และโดยการดึงและอัดเข้าแบบ	จากผงหรือเม็ด - นิดเข้าแบบ - อัด - ทำโฟม - รีด - หล่อหมุน - การประสานเชื่อม	ไม่มี

7.2) คุณสมบัติโครงสร้างแบบไม่เป็นระเบียบแต่มีการเกาะตัวกันด้วยพันธะเคมี (Partial Crystalline)

โครงสร้างชนิดนี้แตกต่างจากแบบแรกตรงที่โครงสร้างของโซ่โมเลกุลบางส่วนเป็นระเบียบ เกาะตัวกันเป็นผลึกเมื่อได้รับความร้อน แต่พลาสติกจะยังมีความเหนียวแน่นและยืดหยุ่นได้ เพราะยังมีส่วนที่เป็นผลึกเกาะตัวกันเหนียวแน่น และจะหลอมละลายได้หลังจากพันธะที่เกาะตัวกันเป็นผลึกถูกทำลายหลังจากช่วงเคที (KT) ดังรูปที่ 2.11 พลาสติกที่สำคัญในกลุ่มนี้ได้แก่โพลิเอทิลีน (Polyethylene PE), โพลิพรอมโพลีน (Polypropylene PP), โพลิเอไมด์ (Polyamide PA)



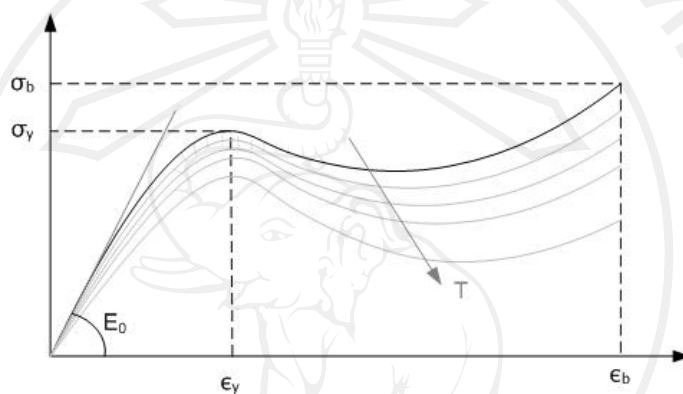
รูป 2.11 แผนภูมิแสดงคุณสมบัติโครงสร้างแบบไม่เป็นระเบียบแต่มีการเกาะตัวกันด้วยพันธะเคมีเมื่อได้รับความร้อน

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติโครงสร้างแบบไม่เป็นระเบียบแต่มีการเกาะตัวกันด้วยพันธะเคมี

สถานะของพลาสติก	ช่วงแข็งเปราะเหมือนแก้ว	ช่วงยืดหยุ่นเหมือนยาง	ช่วงเหนียวหนืด	ช่วงสลายตัว
โครงสร้างโมเลกุล	แข็งแรงและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูง	ส่วนที่เป็น โมเลกุลเคลื่อนไหวได้บ้าง ส่วนที่เป็นผลึกยังแข็งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลในช่วงที่เป็นผลึกสูง	ส่วนที่เป็นผลึกจะหลอมละลาย	โมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกสลายตัว
การทำงานขึ้นรูป	ตัดโดยเลื่อย และ ไม่เลื่อย เศษ การประสานแบบถาวรโดยการติดกาวประสานแบบแยกโดยใช้สกรู หมุด และขันเกลียวปรับปรุงผิวได้	การขึ้นรูปโดยการตัด, อัด, ดึงอัดเข้าแบบ	การขึ้นรูป - งานอัด อัด ดึง และแปรรูปโดยการดึง-อัดเข้าแบบ	ไม่มีการทำงานขึ้นรูป

7.3) คุณสมบัติของเทอร์โมเซตติ้งพลาสติก (Thermosetting Plastics)

โซโมเลกุลของเทอร์โมเซตติ้งพลาสติกเชื่อมกันด้วยแรง ระหว่างโซโมเลกุลมีลักษณะเป็นตาข่ายเหนียวแน่น (Cross Linked) ขัดขวางการเคลื่อนไหวของโมเลกุลจนกว่าจะถึงจุดสลายตัว พลาสติกที่สำคัญในกลุ่มนี้ ได้แก่ ฟีนอลิก (Phenolic), เมอร์ราไมด์ (Melamine), อันไฮดริด์พอลีเอสเตอร์ (Unsaturated Polyester), อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) และ โพลียูรีเทน (Polyurethane)



รูป 2.12 แผนภาพสถานะของเทอร์โมเซตติ้งเมื่อได้รับความร้อน

ตารางที่ 2.3 แสดงสถานะเทอร์โมเซตติ้ง เมื่อได้รับความร้อน

สถานะของพลาสติก	ช่วงแข็งเปราะเหมือนแก้ว	ช่วงสลายตัว
โครงสร้างโมเลกุล	โมเลกุลเกาะกันเป็นตาข่าย	โมเลกุลของเทอร์โมเซตติ้งสลายตัว
การทำงานขึ้นรูป	ตัดเฉือนโดยเสียเศษการประสานแบบแยกได้และถาวรปรับปรุงผิวได้	ไม่มี

การทำงานจากผง : ในการทำงานจากผง เช่น งานอัด นีดอัด ทำโฟม หล่อเคลือบ ฯลฯ จะทำให้ มาโครโมเลกุล (Macromolecule) เกาะกันเป็นแบบฝังบตาข่าย (Cross Linked)

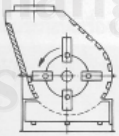
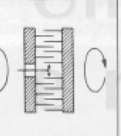
การแปรรูป : การแปรรูปโดยใช้ความร้อนทำไม่ได้ เนื่องจากโซโมเลกุลเกาะกันเป็นตาข่ายถี่มาก จะไม่อ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน จะทำได้โดยการตัดเฉือนเท่านั้น

8) การเตรียมพลาสติกเพื่อนำเข้ากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์

การเตรียมในเทคนิคการทำงานพลาสติก หมายถึง ขั้นตอนที่สำคัญในการเตรียมพลาสติก ซึ่งอยู่ในลักษณะวัตถุดิบให้พร้อมที่จะนำมาผลิตเป็นชิ้นงานได้ ซึ่งประกอบด้วยการทำเป็นเม็ดผสม (Compound) ซึ่งทำในขณะที่เป็นของแข็ง หรือผสมขณะที่เป็นของเหลว น้อยครั้งที่มีการนำเอาพลาสติกที่ออกมาจากถังปฏิกิริยามาทำงานหรือนำมาใช้ได้ทันที โดยปกติต้องนำมาผสมกับสารเสริมคุณสมบัติต่าง ๆ ด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุทางเทคนิคที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ มีกรรมวิธีเตรียมพลาสติกหลายอย่างที่รวมกันอยู่กับกระบวนการผลิตสารพลาสติกโดยตรง การผลิตเทอร์โมพลาสติกโดยกรรมวิธีโพลิเมอร์ไรท์เซชัน (Polymerization) ผลผลิตที่ออกมาส่วนใหญ่เป็นผงซึ่งยากแก่การนำไปผลิตได้ทันที จึงทำให้เป็นเม็ดเพื่อสามารถนำไปเข้ากระบวนการผลิตชิ้นงานได้ง่าย โดยปกติบริษัทผู้ผลิตพลาสติกจะเตรียมการขึ้นนี้ออกจำหน่าย ส่วนพลาสติกประเภทพีวีซีนั้นมีข้อยกเว้น เพราะสามารถปรับปรุงให้มีคุณสมบัติแตกต่างกันได้มากโดยการเติมส่วนผสมต่างๆ และวัสดุเสริมเข้าไปซึ่งเป็นการประหยัด

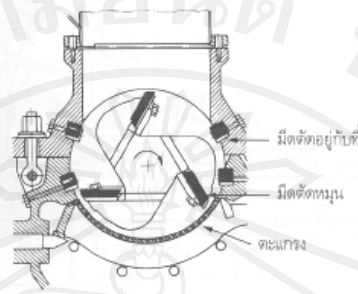
9) การย่อย

การย่อย หมายถึง การลดขนาดของพลาสติกแข็งโดยวิธีกล การย่อยทำให้พลาสติกมีขนาดเล็กแตกต่างกันตามต้องการ ถ้าต้องการแยกพลาสติกเม็ดหยาบออกจากเม็ดเพื่อขึ้นต่อไปได้สะดวกยิ่งขึ้น จึงต้องมีการกรองประกอบเข้าไป เหตุผลจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องย่อยพลาสติกมีหลายประการเช่น เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการสัมผัสเมื่อทำการผสม ทำให้อบแห้งได้ดี ป้อนเข้าเครื่องได้อย่างสม่ำเสมอ หลอมละลายได้เร็ว เป็นต้น เครื่องย่อยพลาสติกมีหลายชนิด สร้างมาให้เหมาะสมกับชนิดของพลาสติก ตัวอย่างเครื่องย่อยที่ควรรู้จัก คือ เครื่องรีดย่อย โม่ตี โม่กวน โม่ตัด โม่แท่งตี และโม่รีด สำหรับการย่อยจะต้องใช้โม่บด ในการที่จะเลือกใช้โม่ชนิดใดขึ้นอยู่กับว่าต้องการความละเอียด หรือความสม่ำเสมอของเม็ดพลาสติกขนาดไหน ดังรูปที่ 2.13

เครื่อง	เครื่องรีดย่อย	โม่ตี	โม่ตัด	โม่แท่งตี
สภาพของพลาสติก				
เปราะ				
เหนียว				
elastic				
เหมาะสำหรับ	PS, PF	PS, PF, PMMA	PVC, PE, PP, PA	PVC, PE, PF

รูป 2.13 เครื่องย่อยพลาสติกแบบต่าง ๆ

ลักษณะการทำงานของเครื่องยอด้งรูปที่ 2.13 แตกต่างกันเช่นเครื่องรีดย่อยใช้แรงอัด ไม่ตัดใช้การตัดเฉือน และเครื่องโมแท่งดีใช้การตีให้กระจายและการเสียดสี เนื่องจากโมตัดนิยมใช้ในการย่อยพลาสติกโดยใช้ย่อยเศษพลาสติกหรือชิ้นงานที่เสียเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่



รูป 2.14 โมตัด

จากรูปที่ 2.14 เป็นโมตัดซึ่งประกอบด้วยเรือนเหล็กหล่อที่มั่นคงมีคมตัดติดอยู่กับเรือนจำนวน 4 คม ตอนล่างจะมีตะแกรงประกอบอยู่วัสดุที่จะตัดส่งเข้าทางปล่องข้างบน ตรงกลางจะมีเพลาลูกกลิ้งที่มีมีดตัดติดอยู่ 3 เล่ม เศษพลาสติกที่ใส่ลงไปจะถูกมีดหมุนจับและนำไปตัดกับมีดซึ่งติดอยู่กับเรือนเครื่องโดยเครื่องจะทำงานช้า ๆ ไปจนกว่าพลาสติกจะละเอียดพอที่จะลอดตะแกรงได้ ความเร็วตัดจะอยู่ระหว่าง 12 – 14 มิลลิเมตรต่อวินาที ระยะห่างระหว่างมีดหมุนและมีดอยู่กับที่ประมาณ 0.25 – 0.5 มิลลิเมตร โมตัดมีขนาดทำงานได้ตั้งแต่ 20 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จนถึง 2,500 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

10) การผสม

การผสม คือการนำวัสดุต่างชนิดมารวมกันและเกลี่ยให้เข้ากันโดยการให้วัสดุเคลื่อนที่คลุกเคล้ากันจนได้สภาพการผสมที่ต้องการ โดยการหมุนใบกวนในถังเปิดหรือปิดจะทำให้เกิดการกระแทกและเสียดสีกันเมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งจะผสมเข้ากันดีมีเครื่องผสมแบบต่าง ๆ ที่เหมาะสมสำหรับชนิดและขนาดของพลาสติก (ดังรูปที่ 2.15)

ในการผลิตพลาสติกเหลวหรือเหนียว เช่นพีวีซีเหลว ต้องใช้เครื่องกวนปกติแล้วเครื่องผสมแบบนี้จะเป็นถังทรงกระบอกและใบพัดกวนที่ยกขึ้นลงได้ในแนวตั้งซึ่งถ้านี้อาจจะเป็นสองชั้นใช้สำหรับให้ความร้อนหรือหล่อเย็นได้ตามต้องการบางครั้งมีความจำเป็นที่ต้องผสมพลาสติกเหลวที่มีความหนืดสูงที่ยอมให้มีอากาศผสมอยู่ได้เพียงเล็กน้อยและต้องมีการดูดอากาศออก ลักษณะแบบนี้จะเป็นเครื่องผสมแบบปิดที่มีเกจวัดความดันและข้อต่อสำหรับปั๊มสุญญากาศติดเอาไว้

กรรมวิธี ของเครื่องผสม	ทำงานไม่ต่อเนื่อง						ต่อเนื่อง
	ถังกวน	ถังหมุน แรงสูง	โบลผสม	แปรง กรวย	หลอดผสม	ชุดผสม	
สภาพ ของวัสดุ							
▲ วัสดุดิบ ● สารเติม							
ผง	▲	●	●	●	●	●	●
เหนียวเหนียวมาก	▲	●	●	●	●	●	●
เหนียว	▲	●	●	●	●	●	●
เหมาะสำหรับ	PVC-Paste UP	PS, PE, PP, PMMA	PVC แข็ง และอ่อน	PVC แข็ง และอ่อน	PVC	PE, PVC	เทอร์โม พลาสติกทั้งหมด

รูป 2.15 เครื่องผสมและนวด

เครื่องผสมที่เหมาะสมเป็นพิเศษสำหรับการผสมพลาสติกที่มีขนาดต่าง ๆ กันเช่น เม็ดพลาสติกที่ผสมกับผง (สารหล่อลื่น สี สารนำร่อง) ก็คือ เครื่องผสมแบบตกรวดอิสระ ในระหว่างที่ เม็ดพลาสติกเสียดสีกันจะมีประจุไฟฟ้าสถิตเกิดขึ้น ทำให้ฝุ่นของสารผสมติดที่ผิวของเม็ดได้ดี เพื่อให้ได้การผสมที่ดีจะใช้ความเร็วรอบระหว่าง 15 – 35 รอบต่อนาที เครื่องผสมแบบทรงกรวยคู่ และแบบถังเอียงเอียงศูนย์ เป็นที่รู้จักกันมากที่สุด การย้อมสีเม็ดพลาสติกในปัจจุบันหันมาใช้เครื่องผสมสี ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งทำเป็นกรวยต่อไว้กับเครื่องผลิตชิ้นงานพลาสติกโดยตรง เครื่องนี้ ประกอบด้วยอุปกรณ์กะปริมาณและเครื่องผสม เนื่องจากการทำงานตามจังหวะเวลา เช่นการ ส่งเข้าไปในห้องผสม ทำการผสมและปล่อยออกจากห้องผสมเป็นต้น เครื่องผสมประเภทนี้สามารถใช้กับเครื่องผลิตชิ้นงานได้ทุกชนิดโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับเครื่องฉีดและเครื่องอัดพลาสติก



รูป 2.16 เครื่องผสมสี

11) สารเติมแต่ง (Additives)

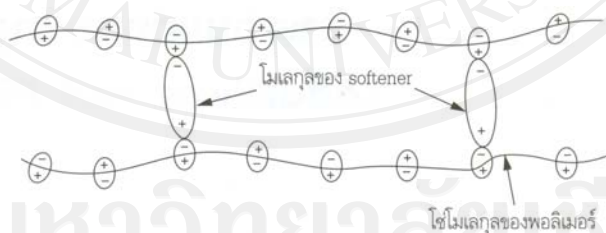
พลาสติกที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ส่วนใหญ่ไม่สามารถใช้ได้ทันที จะต้องทำการเติมสารเติมแต่ง (Additives) เข้าไปจึงจะมีคุณสมบัติที่สามารถนำเข้ากระบวนการขึ้นรูปได้ ซึ่งเรียกว่า เม็ดพลาสติกผสม (Compound) เนื่องจากสารเติมแต่งมีเป็นจำนวนมาก จึงเลือกกล่าวถึงเฉพาะที่สำคัญ ๆ และที่มีใช้กันมาก คุณสมบัติที่สำคัญของสารเติมแต่งและสารเสริม ก็คือ

- ทนต่อความร้อนและสารตัวอื่นๆ ได้สูง
- ไม่ระเหย
- ไม่แยกตัว
- ไม่ทำให้คุณสมบัติของพลาสติกเปลี่ยนไป
- มีรส ไม่มีกลิ่น เป็นต้น

พลาสติกที่ผลิตออกมาจำหน่ายส่วนใหญ่จะมีการผสมสารเติมแต่งและสารเสริมไว้แล้ว ยกเว้นพลาสติก ชนิดที่จะมีการเติมสารเติมแต่งและสารเสริมหน้างานขึ้นรูป ต่อไปนี้จะกล่าวถึงสารเติมแต่งที่สำคัญบางตัว

11.1) สารทำให้อ่อนตัว (Softener)

เทอร์โมพลาสติกที่มีคุณสมบัติเฉพาะ เช่น พีวีซี สามารถใช้เอสเทอร์ ซึ่งมีอยู่ในโมเลกุลทำให้อ่อนได้ โดยโมเลกุลของสารทำให้อ่อนตัวจะให้แรงวาล์วเลนซ์ปฐมภูมิของโมเลกุลพลาสติกลดลงดังรูปที่ 2.17



รูป 2.17 ลักษณะการแทรกตัวของสารทำให้อ่อนตัว

สารทำให้อ่อนตัว แบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือ

- กลุ่มความหนืดต่ำ (Low Viscosity-Monomer Softener)
- กลุ่มความหนืดสูง (High Viscosity-Polymer Softener)

กลุ่มแรกจะมีคุณสมบัติทำให้อ่อนเป็นหลัก ถ้าต้องการคุณสมบัติพิเศษ เช่น ทนต่อน้ำมันเบนซิน ไขมัน หรือคงทนต่อการเคลื่อนย้าย สารทำให้อ่อนตัวที่ควรเลือกใช้คือ

กลุ่มที่สอง สารทำให้อ่อนตัวความหนืดต่ำที่รู้จักกันมาก ได้แก่ ไดโอctrเฟทาเลท (Diocetylphthalate; DOP) ซึ่งเป็นสารอ่อนตัวที่สามารถแยกออกจากเนื้อพลาสติกได้ด้วยสารละลาย สารทำให้อ่อนตัวแบบความหนืดสูงได้จากการรวมตัวกันของโมเลกุลของโมโนเมอร์ หลายๆ ตัว โดยมีพอลิเอสเทอร์เป็นฐาน แต่การเกาะตัวกันจะมีขนาดเล็กกว่าพอลิเมอร์ เนื่องจากเป็นโมเลกุลใหญ่จึงทำให้มีคุณสมบัติด้านอื่น ๆ คีขึ้น แต่ผลในการทำให้อ่อนตัวจะต่ำลง

11.2) สารทำให้เสถียร (Stabilizer)

ความร้อน รังสี ที่มีพลังงานสูง เช่น แสงยูวี ออกซิเจน รวมทั้งความชื้นมีส่วนทำให้พลาสติกเสื่อมสภาพ โดยจะทำให้เกิดการสลายตัวของพันธะของโซ่โมเลกุล ทำให้คุณสมบัติทางกลพลาสติกเสื่อมลง เพื่อเป็นการป้องกันเหตุการณ์ดังกล่าวข้างต้น จำเป็นจะต้องผสมสารทำให้เสถียรลงในพลาสติก เช่นพีวีซี ถ้าไม่มีสารทำให้เสถียรจะไม่สามารถหลอมเหลวเพื่อการขึ้นรูปได้ เนื่องจากอุณหภูมิสูงจะทำให้กรดไฮโดรคลอริก ถูกแยกออกทำให้โซ่โมเลกุลถูกทำลาย โดยจะกลับมาทำปฏิกิริยาเป็นพันธะคู่ ซึ่งจะทำให้พีวีซี มีสีเหลือง ไปจนถึงน้ำตาล และในที่สุดการเกาะตัวกันแบบพันธะคู่ จะถูกทำลายด้วยออกซิเจนได้ ซึ่งจะทำให้โซ่โมเลกุลสลายตัวได้

พลาสติกตัวอื่นก็คล้าย กัน ถ้าไม่ใช้สารทำให้เสถียร แต่จะไม่รุนแรงเหมือนพีวีซี ส่วนใหญ่จะใช้สารทำให้เสถียรหลายตัวควบคู่กัน เช่น ใช้ป้องกันความร้อนและป้องกันแสงควบคู่ไปด้วย

ตัวอย่างกลุ่มสารทำให้เสถียรที่สำคัญได้แก่

- สารประกอบตะกั่ว
- สบู่โลหะ (Metal Soap)
- สารประกอบออร์แกนิก ของดีบุก
- สารประกอบออร์แกนิก ของไนโตรเจน
- สารประกอบอีพอกซี
- สารแอนติออกซิแดนท์
- สาร ป้องกันการดูดซับแสงยูวี

11.3) สารหล่อลื่น (Lubricant)

การหล่อลื่นแบ่งออกเป็นการหล่อลื่นภายในและหล่อลื่นภายนอก การหล่อลื่นภายในมีหน้าที่ทำให้โซ่โมเลกุลเสียดสีกันน้อยลง ซึ่งจะทำให้ความหนืดของพลาสติกเหลว (Melt Viscosity) ลดลง ตามหลักแล้ว ต้องใช้สารประกอบโพลี สบู่โลหะ (Metal Soap)

สารหล่อลื่นภายนอกจะไม่รวมตัวกับพลาสติก โดยจะแยกตัวออกเป็นเหงื่อ ที่อุณหภูมิทำงานสูงและสร้างชั้นฟิล์มหล่อลื่นระหว่างพลาสติกเหลวกับผนังเครื่องจักรที่สัมผัส สารหล่อลื่นภายนอกส่วนใหญ่จะเป็นขี้ผึ้ง (Wax) และกรดไขมัน (Fatty Acid)

11.4) สารสี (Colorant)

สีที่ละลายจะเรียกว่าสารสี (Colorant) ส่วนสีที่ไม่ละลายเรียกว่าสีฝุ่น (Pigment) สีฝุ่นจะมีขนาดความละเอียดของเม็ดสีอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 1 ไมโครเมตร การแบ่งกลุ่มสียังแบ่งออกเป็น สีฝุ่นออร์แกนิก (Organic Pigment) และ สีฝุ่นไม่เป็นออร์แกนิก (Inorganic Pigment) สีในกลุ่มหลัง จะมีข้อบกพร่องในการใช้งานบางลักษณะเนื่องจากมีความแรงของสี (Color Intensity) ไม่สูง โดยปกติจะทนต่อแสงและความร้อนได้ดี

ตัวอย่างสี และ สีฝุ่นไม่เป็นออร์แกนิก (Inorganic Pigment)

- ขาว : Titanium White, Zinc White
- เหลือง : Chromium Yellow, Nickel-Titanium Yellow
- น้ำเงิน : Ultramarine Blue, Cobalt Blue, Manganese Violets
- แดง : Molybdenum Red, Iron Red
- เขียว : Chromium Green, Cobalt Green
- น้ำตาล : Iron Oxide Brown
- ดำ : Carbon Black, Iron Oxide Black

สีฝุ่นออร์แกนิก (Organic Pigment) จะมีความแรงของสีสูง แต่ไม่มีความคงทน ด้วยเหตุผลนี้จึงมีการผสมกับสีฝุ่นไม่เป็นออร์แกนิก (Inorganic Pigment) ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 15 ในทางการค้าจึงมีการกำหนดดัชนีสี (Color Index) เพื่อให้รู้ว่ามีส่วนผสมอะไรบ้าง

11.5) สารป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ (Antistatic)

สาร ป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ เป็นสารประกอบทางเคมีที่สามารถแยกตัวออกจากเนื้อพลาสติกไปอยู่ที่ผิวและดูดซับความชื้นจากอากาศ ความชื้นที่ผิวพลาสติกจะเป็นตัวป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิตย์ ตัวอย่างสารป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ ที่ใช้กับพลาสติกชนิดต่าง ๆ รวมทั้งความเข้มข้นที่ใช้แสดงไว้ในตาราง

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างสารป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ ที่ใช้กับพลาสติกแต่ละชนิด

พลาสติก	สาร Antistatic ที่ใช้ส่วนใหญ่	ขนาดความเข้มข้น
PE-LD/ LLD	Ethoxylated Alkylamines	0.05 – 0.15
	Fatty Acid Esters	1.00 – 2.00
PP	Ethoxylated Alkylamines	0.10 – 0.20
	Fatty Acid Esters	1.00 – 2.00
Plasticized PVC	Fatty Acid Esters	0.50 – 2.00
	Alkylsulfonates	0.50 – 1.50
PS	Ethoxylated Alkylamines	0.50 – 1.00
	Alkylsulfonates	1.50 – 2.00
	Fatty Acid Esters	1.00 – 2.00
ABS	Ethoxylated Alkylamines	0.50 – 1.00
	Alkylsulfonates	1.00 – 2.00

11.6) สารทำให้เกิดโฟม (Foaming Agent)

สารทำให้เกิดโฟมจะเกิดเป็นไอที่อุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งเมื่อเติมลงในพลาสติก จะทำให้เกิดฟองก๊าซ ในขณะที่พลาสติกอ่อนตัวหรือหลอมเหลว (Physical Foaming Agent) หลังจากพลาสติกแข็งตัว โครงสร้างของโฟมจะยังคงฝังอยู่ในเนื้อพลาสติกตัวอย่างสารทำให้เกิดโฟมทางฟิสิกส์มีดังนี้ คือ

เพนเทน (Pentane)	อุณหภูมิกลายเป็นไอ	30 – 38 องศาเซลเซียส
เฮกเซน (Hexane)	อุณหภูมิกลายเป็นไอ	60 – 70 องศาเซลเซียส
ไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอน	อุณหภูมิกลายเป็นไอ	23 – 47 องศาเซลเซียส

สารทำให้เกิดโฟมในทางเคมีจะสลายตัวที่อุณหภูมิหนึ่งที่อุณหภูมิหนึ่ง โดยจะทำให้เกิดก๊าซขึ้น เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือก๊าซไนโตรเจน ทำให้สามารถปรับอุณหภูมิและความเร็วในการสลายตัวอย่างกว้างขวาง

11.7) สารต้านการติดไฟ (Flame Retardant)

ด้านโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกสามารถติดไฟได้ แต่จะติดได้มีมากน้อยต่างกันขึ้นอยู่กับขอบข่ายการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานก่อสร้าง และในการสร้างรถยนต์ จะมีข้อกำหนดเกี่ยวกับพลาสติกที่เชื่อว่าจะต้องเป็นชนิดไม่ติดไฟโดยการเติมสารเฉพาะบางชนิดลงไป ในพลาสติกเพื่อให้ได้ผลที่ต้องการคือ

- ปกคลุมป้องกันออกซิเจนเข้าไปในตำแหน่งที่ไฟไหม้
- ทำให้เกิดการสลายตัวของพลาสติก
- มีผลต่อกลไกการเผาไหม้

สารประกอบฮาโลเจนของคลอรีน และโบรมีน แสดงให้เห็นถึงผลดังกล่าว โดยสารประกอบที่มีโบรมีนอยู่ด้วยจะมีผลดีกว่ามาก นอกจากนี้ยังมีการใช้สารประกอบฟอสฟอรัส และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสารประกอบ อีกด้วย

12) สารเสริมประเภทเพิ่มเนื้อ(Fillers)และสารเสริมความแข็งแรง (Reinforcements)

สารเพิ่มเนื้อ หมายถึง สารเสริมที่อยู่ในรูปของของแข็งซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างจากพลาสติก ซึ่งโดยปกติจะเป็นสารอนินทรีย์ สารเพิ่มเนื้อที่เฉื่อย (Insert Fillers) จะช่วยเพิ่มปริมาณ และลดต้นทุนส่วนสารเพิ่มเนื้อที่แอคทีฟ (Active Fillers) จะช่วยทำให้คุณสมบัติทางกลหรือทางกายภาพดีขึ้นจึงเรียกว่าสารเสริมแรง (Reinforcing Fillers) นั่นคือ จะช่วยเพิ่มการทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) และแรงคด (Flexural Strength)

12.1) คุณสมบัติของสารเพิ่มเนื้อและสารเสริมแรง

ข้อแตกต่างที่สำคัญของสารเพิ่มเนื้อและสารเสริมแรงก็คือ สารเสริมแรงมีส่วนทำให้ ความหนาแน่นของโมเลกุลสูงขึ้น แต่สารเพิ่มเนื้อมีผลในปัจจัยนี้น้อยมาก การใช้สารเพิ่มเนื้อไม่ว่าจะเป็นแบบเม็ดกลม เช่น ขอล็กหรือเม็ดแก้ว ไม่สามารถจะทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นได้เหมือนกับแบบเส้นใยเสริมแรง (Fiber Reinforcement) การใช้สารเพิ่มเนื้อจะทำให้คุณสมบัติของเทอร์โมพลาสติกเปลี่ยนไปดังนี้ คือ

- เพิ่มความหนาแน่น การหดตัวลดลง
- เพิ่มความแข็งแรงและทำให้คุณภาพของผิวดีขึ้น
- ลดคุณสมบัติทางกลเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทว่าไปแล้วจะไม่ทำให้คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อพลาสติกบริสุทธิ์
- ลดต้นทุน
- เพิ่มความสามารถในการยืดหยุ่น แข็งแรง และเหนียว
- ลดค่าคุณสมบัติทางกล เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ลดปัญหาการหดตัว
- ช่วยแก้ไข ปัญหาการโค้งงอ เพิ่มความแข็งแรงตัวได้ดีบางส่วน

12.2) ข้อพิจารณาในการใช้สารเพิ่มเนื้อและสารเสริมแรงในเทอร์โมพลาสติก

การพิจารณาจะต้องคิดถึงองค์ประกอบหลายด้านเช่นข้อพิจารณาที่สำคัญของการใช้สารเพิ่มเนื้อสารจะกระทำเมื่อต้องการเพิ่มคุณสมบัติทางกล หรือต้องการลดต้นทุน

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของสารเพิ่มเนื้อและสารเสริมแรงสำหรับใช้งาน

คุณสมบัติที่ต้องการในการผสม	คุณสมบัติที่ต้องการจากสารเพิ่มเนื้อ/ สารเสริมแรง
ผลต่อกระบวนการผสม: - การเก็บสารเพิ่มเนื้อไว้โดยการทำเม็ดผสมได้ดี - สามารถทำเม็ดผสมได้ดี - มีความหนืดต่ำระหว่างทำการผสม - ใช้ความเร็วในการผสมสูงได้	- มีการดูดความชื้นน้อย และมีความหนาแน่นของผงสูง (High Bulk Density) - มีขนาดของผงใกล้เคียงกัน สามารถจับยึดกับโครงสร้างของพลาสติกได้ดีไม่มีการชาร์จไฟฟ้าสถิต มีพฤติกรรมในการกระจายตัวดี ไม่มีการหักหรือบดให้เส้นเสริมแรงสั้นลง - เม็ดผงจะต้องกลมที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ มีสัมประสิทธิ์ผิวจำเพาะต่ำและมีการดูดความชื้นน้อย มีพลังงานที่ผิวต่ำ - มีความร้อนจำเพาะต่ำ - มีการนำความร้อนได้ดี
ผลต่อกระบวนการผลิต: - การหดตัวน้อย - ไม่ร้าว - ถอดออกจากพิมพ์ได้ง่าย - ไม่มีปัญหาการเสียดสีกับเครื่องจักร	- ต้องมีความร้อนจำเพาะต่ำ เป็นตัวนำความร้อนที่ดี ขยายตัวเนื่องจากความร้อนน้อย มีการกระจายตัวในเนื้อพลาสติกดี มีการจับยึดกับพลาสติกดี - มีความแข็งต่ำ ขนาดเล็ก เม็ดผงกลม มีความคงทนต่อความร้อนที่เกิดจากสารปรับผิวที่ใช้
คุณสมบัติของพลาสติกผสม: คุณสมบัติทางกล: - มี ความแข็งแรงและยืดหยุ่นสูง - มีความคงทนต่อแรงกระแทก	- มีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับเนื้อพลาสติกและมีการจับยึดกับพลาสติกดี ในกรณีของใยเสริมแรงมีการกระจายตัวในเนื้อพลาสติกดี - มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับวัตถุที่รับแรงกระแทกได้ดี

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของสารเพิ่มเนื้อและสารเสริมแรงสำหรับใช้งาน (ต่อ)

คุณสมบัติที่ต้องการในการผสม	คุณสมบัติที่ต้องการจากสารเพิ่มเนื้อ/ สารเสริมแรง
คุณสมบัติของพลาสติกผสม: คุณสมบัติทางกล: - มีความคงรูปสูง - มี อัตราความหนาแน่นสูง - ทนแรงกระแทกได้ดี - ทนต่อการรับภาระกรรมในระยะเวลานาน - มีความแข็งแรงมาก - มีการขัดสีต่ำและมีคุณสมบัติในการลื่นตัวดี - มีความหนาแน่นสูง	- มีการยุบตัวน้อยเมื่อถูกอัด ขนาดเล็ก เม็ดผงกลม - มีอัตราส่วนสูงเมื่อเทียบกับเนื้อพลาสติก จับยึดดีกับเนื้อพลาสติก - เส้นใยยาว ต้องไม่จับยึดกับโครงสร้างของพลาสติกอย่างสมบูรณ์ - มีการจับยึดกับโครงสร้างของพลาสติกถาวร ไม่มีสารกัดกร่อนปะปนอยู่ในสารเสริมเติมเนื้อ มีขนาดเล็ก เม็ดกลมจะช่วยขึ้นงานมีผิวเรียบ - มีความแข็งแรงมาก มีการกระจายตัวของสารเหมาะกับ ความหนาแน่นในการอัด - ความแข็งต่ำ มีคุณสมบัติในการลื่นตัว - ความหนาแน่นสูง และมีคุณสมบัติในการอัดตัวดี

เป็นที่แน่ชัดว่าการใช้สารเสริมแรง และสารเพิ่มเนื้อพลาสติกมีความสำคัญมากขึ้นทุกวัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นการนำพลาสติกมาใช้งานด้านเทคนิควิศวกรรม มีการขยายตัวอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งก็เป็นส่วนที่ได้กำไรไปในตัว เมื่อใช้พลาสติกจำนวนมาก เทอร์โมพลาสติกกลุ่มที่ใช้สารเสริมแรงมากตามลำดับก็คือ

- โพลีเอไมด์ (Polyamide)
- โพลีโอเลฟิน (Polyolefins)
- โพลีสไตรีน (Polystyrenes)
- โพลีอัคราไรล (Polyacrylates)
- โพลีเอ็กทอล (Polyacetal)

งานที่ใช้พลาสติกเสริมแรงมากตามลำดับเวลา คืออุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรมของใช้สำนักงานและเครื่องเรือน และอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า

2.2.2 งานฉีดพลาสติก

พลาสติกหรือพอลิเมอร์เป็นสารสังเคราะห์ที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีของสารอินทรีย์ ซึ่งมีส่วนประกอบไปด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นหลัก นอกจากนั้นยังมีส่วนประกอบของออกซิเจน และไนโตรเจน มีพลาสติกบางส่วนที่อาจมีส่วนผสมของกำมะถัน คลอรีน ฟลูออรีน และซิลิกอนอยู่ด้วย สารตั้งต้นในการสังเคราะห์พลาสติกจะเป็นสารโมเลกุลเดี่ยว (Monomer) ที่ได้มาจากน้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน ตัวอย่างสารที่ตั้งต้นที่ใช้กันมาก ได้แก่ เอทิลีน ไวนิลคลอไรด์ และสไตรีน เป็นต้น (พสุ และคณะ, 2534)

การฉีดขึ้นรูปพลาสติกนั้นจะใช้พลาสติกที่เป็นเม็ดหรือผง (บรรเลง, 2548) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการออกแบบเครื่องฉีดที่จะดัดแปลงให้เหมาะสมกับพลาสติกชนิดต่างๆ สำหรับเทอร์โมพลาสติกนั้น เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัวและเหลวสามารถที่จะนำไปแปรรูปได้หลายครั้ง ที่ผลิตออกมามีทั้งสีธรรมชาติและแบบผสมสีพร้อมทั้งเติมสารเติมแต่ง (Additives) เนื่องจากคุณสมบัติของพลาสติกขึ้นอยู่กับสิ่งเกี่ยวข้องหลายอย่าง เช่น ความแข็งแรงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิลักษณะการรับภาระ และระยะเวลาในการรับภาระ นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลจากสารเคมี ความชื้น รังสียูวี และอิทธิพลจากวิธีการผลิต

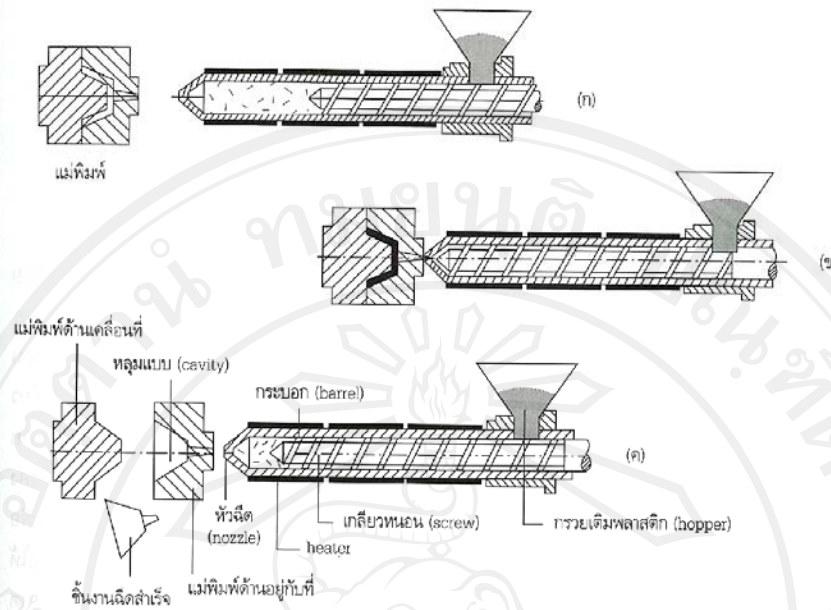
คุณสมบัติที่ดีของพลาสติกคือมีน้ำหนักเบา เป็นฉนวนไฟฟ้าและทนความร้อน ทนต่อสารเคมี ขึ้นรูปง่าย ส่วนข้อเสีย คือ มีความแข็งแรงต่ำ ใช้ได้ขนาดจำกัด ขยายตัวได้มากเมื่อได้รับความร้อน วิธีการเพื่อให้พลาสติกมีความแข็งแรงสูงขึ้น คงตัวมากยิ่งขึ้นจะต้องผสมสารเสริมความแข็งแรงเข้าไป เช่น ใยแก้ว เม็ดแก้ว หรือแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

1) กรรมวิธีการฉีดพลาสติก มีขั้นตอนดังรูปที่ 2.18

1.1) พลาสติกซึ่งอาจจะเป็นเม็ดหรือเป็นผงในกรวยเติม จะถูกเกลียวหนอนหมุนส่งไปยังด้านหน้าของกระบอกสูบ ซึ่งมีแผ่นความร้อนหรือน้ำมันร้อนหุ้มอยู่ จะทำให้พลาสติกหลอมเหลว ดังรูป ก

1.2) หลังจากนั้นจะเคลื่อนเกลียวหนอนให้ดันพลาสติกผ่านหัวฉีดไปเข้าแม่พิมพ์ซึ่งปิดอยู่ ดังรูป ข

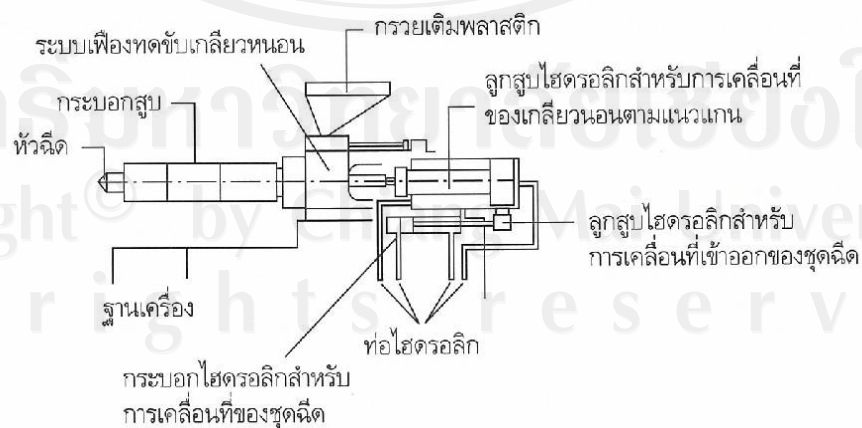
1.3) แม่พิมพ์ซึ่งหล่อเย็นอย่างดี จะทำให้ชิ้นงานเย็นและแข็งตัว สามารถถอดออกจากแบบได้ในระยะเวลาอันสั้น ดังรูป ก ซึ่งขณะที่พลาสติกแข็งตัวก่อนเปิดแม่พิมพ์จะทำการหมุนเกลียวหนอนพร้อมทั้งถอยหลังเพื่อหลอมพลาสติกไว้สำหรับการฉีดครั้งต่อไป



รูป 2.18 การขึ้นรูปพลาสติกโดยการฉีด

2) เครื่องฉีดพลาสติกประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ

2.1) ชุดฉีด (Injection Unit) จังหวะการทำงานของชุดฉีดพลาสติกก็คือ การพาพลาสติกจากกรวยเติมเข้าหลอมในกระบอกเครื่องที่เข้าฉีด ทำการอัดพลาสติกเหลวเข้าแม่พิมพ์ทำการอัดย่ำ หลังจากชิ้นงานในแม่พิมพ์เย็นจนปลดออกจากแม่พิมพ์ได้แล้ว ก็จะทำการหลอมพลาสติกใหม่เพื่อรอจังหวะฉีดต่อไปแล้วถอยชุดฉีดกลับ



รูป 2.19 ชุดฉีด (Injection Unit)

2.2) หน่วยเปิด – ปิดแม่พิมพ์ (Clamping Unit) ทำหน้าที่เคลื่อนที่เปิดและปิดแม่พิมพ์ในจังหวะการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก แม่พิมพ์โดยปกติจะมีสองฝาประกบกันโดยด้านที่ฉีดพลาสติกเข้าจะเป็นด้านที่อยู่กับที่ และอีกด้านหนึ่งจะทำหน้าที่เคลื่อนที่เปิด – ปิด ฝาประกบทั้งสองของแม่พิมพ์จะประกบอยู่กับแผ่นติดแม่พิมพ์ที่ติดมากับเครื่องฉีดพลาสติก

หน่วยเปิด – ปิดแม่พิมพ์ แบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ ระบบปิดด้วยแรง (Actuated by Force) โดยอาศัยแรงสูบไฮดรอลิกทำหน้าที่ปิด และระบบปิดด้วยกลไกร่วม (Interlocking) ซึ่งจะปิดแน่นด้วยระบบกลไก แต่การเคลื่อนที่เปิด – ปิดจะใช้แรงขับเคลื่อนจากไฮดรอลิกหรือมอเตอร์ไฟฟ้าทั้งสองระบบจะทำหน้าที่อัดแม่พิมพ์ให้ประกบกันแน่นด้านความดันภายในแม่พิมพ์ โดยแรงที่เกิดขึ้นจากแรงดันภายในแม่พิมพ์จะต้องน้อยกว่าแรงดันด้านการเปิด - ปิดแบบพิมพ์

3) ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของการฉีดขึ้นงานพลาสติก มีดังต่อไปนี้

3.1) กำลังในการฉีด ผลกระทบที่เกิดจากกำลังในการฉีดที่ไม่พอจะทำให้ชิ้นงานไม่ได้รูปทรงตามแบบที่ต้องการ งานที่ได้จะเป็นลักษณะฉีดออกมาแล้วชิ้นงานไม่เต็มเป็นรอยบุ๋มหรือเกิดลายคลื่นบนผิวชิ้นงาน แต่หากว่ากำลังในการฉีดมีมากเกินไปจะส่งผลให้ชิ้นงานเกิดครีบหรือเกิดรอยร้าว รอยปริเนื่องจากปริมาณพลาสติกที่มากเกินไปทำให้มีการจับตัวแน่นจนล้นออกมาจากแม่พิมพ์ สำหรับกำลังในการฉีดจะขึ้นอยู่กับลักษณะประเภทของพลาสติกซึ่งแตกต่างกันออกไป

สำหรับชิ้นงานไนลอนจะเป็นพลาสติกประเภทโพลีเอไมด์ (Polyamide, PA) ซึ่งในการปฏิบัติงานจริงแม่พิมพ์ฉีดชิ้นงานไนลอนจะติดตั้งเข้ากับเครื่องฉีดพลาสติกที่มีกำลังในการฉีดสูงสุดได้ที่ 800 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ดังนั้นการคำนวณหากำลังในการฉีดที่นำมาใช้งานสามารถคำนวณได้จากสูตร คือ

$$P = \frac{D^2}{d^2} p \quad (2.1)$$

เมื่อ P คือกำลังในการฉีด มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (Kg/cm^2)

D คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกไฮดรอลิก มีหน่วยเป็นเซนติเมตร (Cm)

d คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสกรู มีหน่วยเป็นเซนติเมตร (Cm)

p คือกำลังการฉีดของเครื่อง มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (Kg/cm^2)

3.2) ความเร็วในการฉีด เป็นการปรับอัตราการเคลื่อนที่ของพลาสติกเหลวที่ไหลเข้าไปสู่แม่พิมพ์มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อวินาที ผลกระทบที่เกิดจากความเร็วในการฉีดน้อยไป

จะทำให้ชิ้นงานที่ฉีดออกมาไม่เต็ม เกิดรอยเป็นเส้นที่ผิวงาน ในทางกลับกันถ้าหากความเร็วในการฉีดเร็วเกินไปจะทำให้เกิดรอยมันในชิ้นงานหรือฟองอากาศ รอยไหม้หรือสีเพี้ยน ประสิทธิภาพของเครื่องฉีดที่นำมาทดลองสามารถฉีดได้เร็วที่สุดที่อัตรา 150 มิลลิเมตรต่อวินาที แต่เนื่องจากการปรับความเร็วในการฉีดสำหรับทดลองฉีดครั้งแรกไม่ควรที่จะใช้ความเร็วในการฉีดที่สูงมากทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่อาจจะเกิดกับแม่พิมพ์ขึ้นได้ (คำแนะนำจากเอกสารประกอบการอบรมเรื่องเทคโนโลยีการฉีดพลาสติกของสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-เยอรมัน) การคำนวณความเร็วในการฉีดสามารถหาได้จากสูตรคือ

$$V = \frac{v}{S} \quad (2.2)$$

เมื่อ V คือความเร็วในการฉีด มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อวินาที (mm/sec)

v คืออัตราการฉีด มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที (Cm³/sec)

S คือพื้นที่หน้าตัดของสกรู มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร (Cm²)

3.3) ระยะเวลาการฉีด หมายถึงเวลาที่ใช้นฉีดพลาสติกเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์รวมกับเวลาหยุดรอเพื่อรักษาสภาพแรงดันในขณะฉีดเพื่อให้พลาสติกเหลวไหลเข้าไปสู่แม่พิมพ์และไม่ย้อนกลับออกมา ผลที่เกิดจากเวลาการฉีดไม่พอจะทำให้ชิ้นงานไม่เต็มเป็นรอยบวม หรือรูปทรงที่ได้ผิดเพี้ยนไป แต่หากเวลาในการฉีดเข้มมากเกินไปจะส่งผลให้ชิ้นงานเกิดครีบหรือเกิดรอยร้าว รอยปริ เนื่องจากปริมาณพลาสติกที่แน่นจนดันออกมาจากแม่พิมพ์ ระยะเวลาการฉีดสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{ระยะเวลาการฉีดรวม} = \text{เวลาในการป้อนวัตถุดิบ} + \text{เวลาในการรักษาสภาพแรงดัน} \quad (2.3)$$

เวลาในการป้อนวัตถุดิบ หมายถึง เวลาที่พลาสติกเหลวเคลื่อนที่ไปตามแนวเกลียวหนอนเข้าไปสู่ในแม่พิมพ์จนหมดระยะการฉีด

3.4) ระยะเวลาหล่อเย็น เมื่อพลาสติกเหลวถูกฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์จะต้องอาศัยเวลาเพื่อรอให้พลาสติกเหลวเย็นตัวและเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง พร้อมทั้งจะเปิดแม่พิมพ์และปลดชิ้นงานออกมาได้อย่างรวดเร็ว โดยปกติแล้วจะต้องมีระบบหล่อเย็นเพื่อช่วยในการเย็นตัวของพลาสติกเหลวเย็นตัวได้เร็วยิ่งขึ้น ผลกระทบที่เกิดจากเวลาหล่อเย็นไม่พอจะทำให้ชิ้นงานเกิดรอยร้าว รอยปริ หรือเป็นรอยสีขาว เกิดการโค้งงอ บิดเบี้ยวผิดรูป แต่ถ้าระยะเวลาหล่อเย็นนานเกินไปจะทำให้รอบการทำงานในแต่ละครั้งใช้เวลานาน ระยะเวลาหล่อเย็นนี้จะขึ้นอยู่กับรูปทรงความหนาและชนิดของเม็ดพลาสติก รายละเอียดดังตารางที่ 2.6

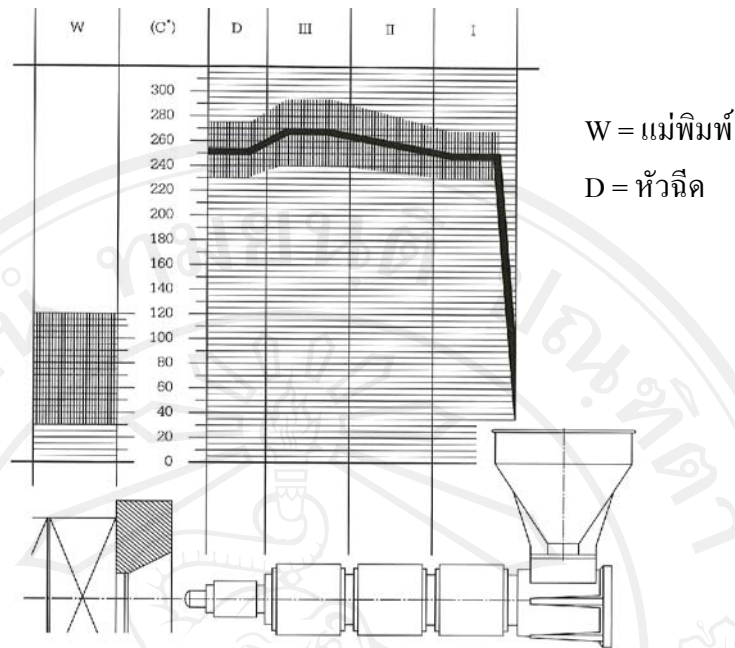
ตารางที่ 2.6 ระยะเวลาหล่อเย็นเฉลี่ยของพลาสติกแต่ละชนิด

ความหนาชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	เวลาหล่อเย็นเฉลี่ย (วินาที)						
	ABS	PA	HDPE	LDPE	PP	PS	PVC
0.50-0.85	2.0	2.5	3.0	2.3	2.0	1.8	2.1
1.00-1.20	4.2	5.3	6.3	4.8	6.2	4.1	4.6
1.50-1.75	7.4	9.7	10.2	8.4	10.0	7.4	8.2
2.00-2.30	11.5	13.5	14.8	12.8	14.5	11.5	12.3
2.50-2.75	13.8	16.2	17.5	15.2	17.4	13.6	14.8

3.5) อุณหภูมิในการฉีด ในการฉีดเทอร์โมพลาสติกนั้นช่วงการหลอมตัวของพลาสติกค่อนข้างแคบ นั่นคือถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปพลาสติกจะสลายตัว ถ้าต่ำเกินไปพลาสติกจะมีความหนืดมาก ไหลเข้าแบบได้ไม่สะดวก ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิในช่วงต่าง ๆ ระหว่างทำการหลอมและฉีดพลาสติกจึงมีความสำคัญมาก การปรับอุณหภูมิในการฉีดจะขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกที่นำมาฉีดเนื่องจากอุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติกแต่ละชนิดนั้นจะไม่เท่ากัน ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในการฉีดต่ำไปจะทำให้พลาสติกเมื่อฉีดออกมาแล้วชิ้นงานจะไม่เต็ม เกิดลายคลื่นบนผิวชิ้นงาน แต่ถ้าอุณหภูมิในการฉีดสูงเกินไปจะทำให้ชิ้นงานมีรอยไหม้ รอยดำ เกิดสีเพี้ยน อุณหภูมิสำหรับการฉีดและอัดรีดขึ้นรูปพลาสติก เซลเซียส รายละเอียดได้ดังตารางที่ 2.7 สำหรับพลาสติกชนิดโพลิเอไมด์ (Polyamide: PA) คืออยู่ระหว่าง 220-260 องศา ดังรูปที่ 2.20

ตารางที่ 2.7 อุณหภูมิสำหรับฉีดและอัดรีดขึ้นรูปพลาสติก

ชนิดของพลาสติก		อุณหภูมิฉีดพลาสติก (°C)				อุณหภูมิอัดรีด (°C)	
		พลาสติก		แม่พิมพ์		พลาสติก	
		ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
Celluloseacetate	CA	120	190	10	50	160	200
Polystyrene	PS	170	270	15	70	170	210
Styrene Acrylnitrile Polymer	SAN	160	250	20	65	170	220
Acrylnitrile Butadien Styrene	ABS	160	250	15	70	170	220
Polymethyl methacrylate	PWMA	170	240	40	100	160	190
Polycarbonate	PC	280	320	85	120	300	340
Polyvinylchloride	PVC	140	215	10	60	150	190
Polyamide	PA	220	260	30	60	260	300
High Density Polyethylene	HDPE	190	320	10	80	120	220
Low Density Polyethylene	LDPE	180	270	10	60	130	200
Polypropylene	PP	200	300	20	80	180	260



รูป 2.20 อุณหภูมิช่วงต่าง ๆ สำหรับการฉีดโพลีเอไมด์ (Polyamide: PA)

3.6) อุณหภูมิของแม่พิมพ์ การรักษาอุณหภูมิของแม่พิมพ์ไว้เพื่อให้สามารถลดความร้อนแก่พลาสติกทั้งความร้อนการเปลี่ยนแปลง (Sensible Heat) และความร้อนแฝง (Latent Heat) ของพลาสติกได้อย่างรวดเร็ว ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิของแม่พิมพ์ต่ำไปจะทำให้ฉีดออกมาแล้วชิ้นงานไม่เต็ม เกิดลายคลื่นบนผิวชิ้นงาน หรือเกิดรอยร้าว แต่ถ้าอุณหภูมิของแม่พิมพ์สูงเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเป็นรอยครีบก การประสานตัวของเม็ดพลาสติกไม่ดี ชิ้นงานเกิดการโค้งงอ เบี้ยวผิดรูป อุณหภูมิของแม่พิมพ์จะขึ้นอยู่กับชนิดของเม็ดพลาสติกที่ใช้ในการผลิตสำหรับพลาสติกชนิดโพลีเอไมด์ อุณหภูมิแม่พิมพ์ควรควบคุมให้อยู่ระหว่าง 30 – 60 องศาเซลเซียส

4) สรุปเงื่อนไขการฉีดพลาสติก หลักสำคัญ 6 ข้อ ของเงื่อนไขการฉีดพลาสติกมีดังนี้

4.1) เงื่อนไขเกี่ยวกับกำลัง

- กำลังฉีด (Injection Pressure)
- กำลังอัด (Holding Pressure)
- กำลังแรงอัดเวลาถอยสกรู (Back Pressure)
- กำลังปิดปากกา
- กำลังเปิดแม่พิมพ์

4.2) เงื่อนไขเกี่ยวกับความเร็ว

- ความเร็วการฉีด
- ความเร็วรอบหมุนของสกรู
- ความเร็วการกระทุ้งขึ้นงาน
- ความเร็วการเปิดแม่พิมพ์
- ความเร็วการปิดแม่พิมพ์

4.3) เงื่อนไขเกี่ยวกับเวลา

- ระยะเวลาการฉีด
- เวลาเกตเย็นตัว (Gate Seal)
- เวลาหล่อเย็น (Cooling Time)
- รอบเวลาการผลิต (Cycle Time)
- เวลาอบเม็ดพลาสติก
- ระยะเวลาหลอมพลาสติกในท่อฉีด

4.4) เงื่อนไขเกี่ยวกับตั้ง และปริมาตร

- ตำแหน่งตั้งระยะป้อนเม็ดพลาสติก
- ตำแหน่งเปลี่ยนกำลังแรงฉีด
- ตำแหน่งเปลี่ยนความเร็วฉีด
- ปริมาตรพลาสติกที่ฉีดเหลือค้างในท่อ

4.5) เงื่อนไขเกี่ยวกับอุณหภูมิ

- อุณหภูมิตั้งหัวฉีด
- อุณหภูมิของแม่พิมพ์
- อุณหภูมิของสินค้าเมื่อออกจากแม่พิมพ์
- อุณหภูมิของน้ำมันไฮดรอลิกของเครื่องฉีดพลาสติก
- อุณหภูมิการอบเม็ดพลาสติก
- อุณหภูมิของห้องทำงาน
- อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นของเครื่องฉีดพลาสติก
- อุณหภูมิของเครื่องควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Mold Temperature Controller)

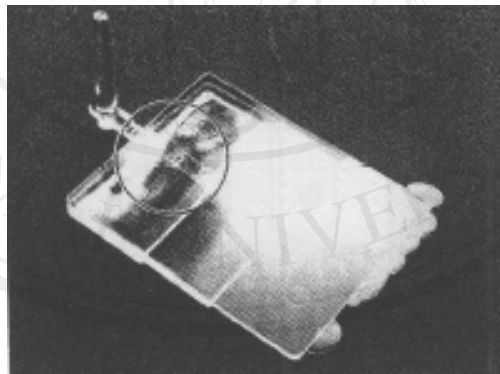
4.6) เงื่อนไขเกี่ยวกับเรื่องอื่น ๆ

- รูปร่าง และขนาดของสกรู
- หัวจรวด (Screw Chip, Ring Value, Seat Ring)
- ขนาดรูปของหัวฉีด
- ส่วนผสมพลาสติกระหว่างเม็ดใหม่ และเม็ดที่นำมาใช้ใหม่ (Scrap)
- ลักษณะเม็ดพลาสติก
- การผสมสี

5) ลักษณะและสาเหตุของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน

ปัญหาที่พบได้บ่อยครั้งจากกระบวนการฉีดพลาสติกและทำให้มีผลกระทบในเรื่องของคุณภาพชิ้นงานมีหลายประการดังนี้

5.1) รอยฟ่นบนชิ้นงาน (Jetting) ข้อบกพร่องนี้จะเกิดที่ส่วนหน้าของชิ้นงานฉีด ดังรูปที่ 2.21 เมื่อพลาสติกเหลวไหลเข้าแม่พิมพ์ผ่านรูเข้า (Gate) ด้วยความเร็วสูงเกินไป ลักษณะฟ่นเข้า เมื่อชิ้นงานเย็นตัวลงจะเห็นรอยฟ่นที่ผิวของชิ้นงาน



รูป 2.21 ลักษณะของรอยฟ่นบนชิ้นงานฉีด

สาเหตุของการเกิดรอยฟ่นบนชิ้นงาน

- ในช่วงการไหลของเรซิน มีการแปรปรวน
- ตั้งความเร็วของการฉีดเร็วเกินไปทำให้การประสานตัวของเรซินไม่ดี

เงื่อนไข/ สภาพเครื่อง

- ชนิดแรงดันที่ส่วนโน้ตวาล์ว
- ทำให้รูโน้ตวาล์วใหญ่ขึ้น

- อบพลาสติกไม่ถูกต้อง หรือใช้เวลาน้อยเกินไป
- ตั้งอุณหภูมิแม่พิมพ์สูงเกินไป
- ความเร็วในการฉีดเร็วเกินไป

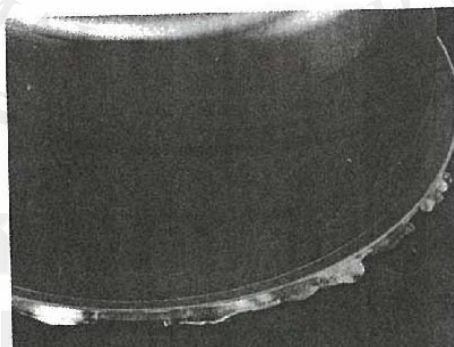
การออกแบบ/ แม่พิมพ์ของผลิตภัณฑ์

- ปรับปริมาณพลาสติกคงค้าง (Cold Slug Well) ให้มากขึ้น
- ปรับเกตให้ใหญ่ขึ้น
- เปลี่ยนที่ตั้งของเกต
- เกตไม่เหมาะสมกับสินค้าผลิตภัณฑ์

วัตถุดิบ

- ปรับสภาพการไหลของเรซิน
- ลดสาร เพิ่มความหล่อลื่นของเรซิน
- อบเรซินให้แห้งพอ

5.2) ชี้นงานเป็นครีป (Flashing) โดยมากเกิดจากการปรับระดับกำลังในการฉีดหรืออุณหภูมิในการฉีดไม่เหมาะสม ความหนืดของเม็ดพลาสติกต่ำไปหรือสูงเกินไป ทำให้แม่พิมพ์แยกตามแนวประกบ (Parting Line) ทำให้พลาสติกเหลวไหลแทรกออกมา เกิดเป็นครีปรอบ ๆ ชี้นงานดังรูปที่ 2.22



รูป 2.22 ลักษณะการเกิดครีปที่ชี้นงานฉีด

สาเหตุของชี้นงานเป็นครีป

- ครีปออกมา (Parting Line) จากแม่พิมพ์ที่ประกอบ
- กรณีที่แรงปิดปากกา (เล็กกว่า) พื้นที่ก่อรูปแรงฉีด

- ความผิดพลาดในโครงสร้างแม่พิมพ์
- ความหนืดของเรซินต่ำเกินไป

เงื่อนไข/ สภาพเครื่อง

- ปรับปริมาณการฉีดพลาสติกให้พอกับความต้องการของสินค้า
- เพิ่มแรงปิดแม่พิมพ์
- ลดอัตราแรงฉีด
- ลดอุณหภูมิที่ฉีด
- ลดอุณหภูมิแม่พิมพ์
- ลดความเร็วการฉีด
- ตั้งตำแหน่งโอดิงเพลสเซอร์ ไม่ถูกต้อง

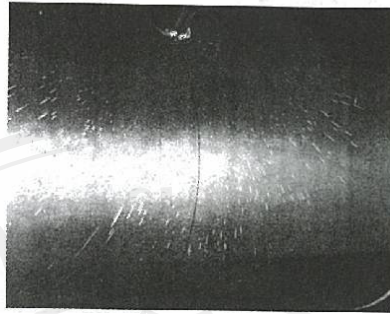
การออกแบบ/ แม่พิมพ์ของผลิตภัณฑ์

- ขจัดรอยและสิ่งแปลกปลอมบนผิวหน้าของแม่พิมพ์และประกอบแม่พิมพ์ให้ดี
- ทำร่องระบายอากาศในแม่พิมพ์ให้ดีและทำการประกบให้แน่นขึ้น
- ปรับตั้งช่องทางเข้าของเกทให้เหมาะสม
- ทำพื้นที่ก่อรูปให้เล็กลง
- ใช้วัสดุที่แข็งแรงขึ้นทำแม่พิมพ์ หรือเพิ่มความแกร่งของแม่พิมพ์

วัตถุดิบ

- ทำสภาพการไหลให้เหลวลง (MI ลดลง)
- เพิ่มความหนืดของเม็ด

5.3) ประกายเงิน (Silver Streak) ขอบกพร่องนี้เกิดจากพลาสติกมีความชื้นหรือเกิดก๊าซขึ้นเนื่องจากความร้อนจากการเสียดสี (Friction Heat) หรือมีวัสดุอื่นแปลกปลอมในเนื้อพลาสติก หรือมีหยดน้ำที่แม่พิมพ์ โดยจะเกิดเป็นประกายสีเงินกระจายที่ผิวของชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.23



รูป 2.23 ลักษณะประกายเงินที่ขึ้นงานฉีด

สาเหตุประกายเงินที่ขึ้นงาน

- มีน้ำปนเข้าไป
- มีอากาศและก๊าซ
- มีสิ่งปลอมปน
- ชิ้นงานมีขนาดหนาหรือบางเกินไป

เงื่อนไข/ สภาพเครื่อง

- ลดอุณหภูมิเรซินลง จนถึงระดับไม่ทำให้เกิดก๊าซระเหย
- เพิ่มกำลังต้านกลับ (Back Pressure) ของสกรูให้สูงขึ้น
- เพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์
- ลดความเร็วของการฉีด
- เพิ่มปริมาณการฉีดและการหลอมละลายเรซินให้ดีขึ้น
- ลดช่วงเวลาที่อยู่ในไซลินเดอร์ความร้อนให้สั้นลง
- ลดจำนวนหมุนรอบของสกรู
- เพิ่มกำลังฉีดของสกรู

การออกแบบ/ แม่พิมพ์ของผลิตภัณฑ์

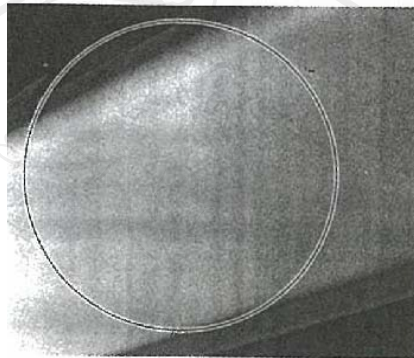
- ปรับการระบายแก๊สให้ดีขึ้น
- ปรับสปรู๊นเนอร์เกต ให้ใหญ่ขึ้น
- ปรับหรือเปลี่ยนหัวฉีดให้พอดีกับสปรู๊นเนอร์แม่พิมพ์
- ลดความเร็วของการฉีด

วัตถุดิบ

- ทำการอบให้แห้งอย่างเพียงพอ
- ลดการระเหยในเรซินให้น้อยลง
- ใช้สารรักษาเสถียรภาพความร้อนให้มากขึ้น

- ระวังความสามารถในการดูดความชื้นของสารที่จะใส่เข้าไป
- ระวังการปลอมปนของสิ่งอื่น ๆ และเรซินผิดชนิดกัน

5.4) ชีงงานมีรอยดำ (Black Streak and Burning) เกิดจากพลาสติกเหลวมีอุณหภูมิสูงเกินไป หรือฉีดด้วยความเร็วสูงเกินไป ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีจะเกิดขึ้นที่รูเข้า (Gate) ทำให้เกิดรอยไหม้ หรืออาจเกิดจากการฉีดด้วยความเร็วสูงเกินไป ในขณะที่มีอากาศขังอยู่ในแม่พิมพ์อากาศในแม่พิมพ์จะถูกอัดตัวในลักษณะแรงดันแบบอะเดียบาติก (Adiabatic Compression) ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้เกิดรอยไหม้ขึ้น สังเกตได้จากสีที่เปลี่ยนไปหรือไหม้เกรียม ดังรูปที่ 2.24



รูป 2.24 ลักษณะของรอยไหม้ที่ชีงงานฉีด

สาเหตุของชีงงานมีรอยดำหรือสีเพี้ยน

- การแยกตัวของเรซินเพราะความร้อน
 - การแยกตัวของสารเคมีที่ใส่เข้าไป
 - เกิดการอัดตัวของแก๊สในแม่พิมพ์หรือการระบายแก๊สออกจากพิมพ์ไม่ดีพอ
 - เกิดการเสียดสีของโลหะหรือส่งปลอมปน
- เงื่อนไข/ สภาพเครื่อง
- ลดอุณหภูมิของท่อนฉีด และแม่พิมพ์
 - ลดความเร็วของการฉีด
 - ลดจำนวนการหมุนรอบของสกรู
 - เรซินค้างค้างอยู่ในไซลินเดอร์นานเกินไปเนื่องจากใช้เครื่องฉีดที่ใหญ่เกินไป

- การใส่เรซินที่ตกค้างอยู่ในไซลินเดอร์ไม่ดีพอ
- ลดแรงดันด้านการย้อนกลับ (Back Pressure)
- แก๊รอยและการสึกกร่อนของสกรู

การออกแบบ/ แม่พิมพ์ของผลิตภัณฑ์

- ปรับการระบายอากาศที่ส่วนปลายของการไหลของเรซินให้ดีขึ้น
- ปรับการระบายอากาศ ณ ตำแหน่งที่เรซินไหลมาบรรจบกัน
- ให้สปรู้นเนอร์ เกท ใหญ่ขึ้น
- ขจัดยาป้องกันสนิมออกให้หมด
- ปรับหรือเปลี่ยนหัวฉีดของแม่พิมพ์ให้พอดี

วัตถุดิบ

- ลดสารช่วยความลื่นของเรซิน
- เพิ่มสารรักษาเสถียรภาพความร้อน
- ลดการระเหยของเรซิน
- อบแห้งให้เพียงพอ

5.5) สีเพี้ยน มัว ไม่แวว เปราะ

สาเหตุสีเพี้ยน มัว ไม่แวว เปราะ

- ความเร็วของการไหลไม่คงที่
- การสร้างแม่พิมพ์ไม่ดี
- เป็นผลจากการระเหยของแก๊สและเม็ดสี (ผสม)
- การหลอมละลายตัวของเรซินไม่สม่ำเสมอ
- การหลอมละลายของเรซินไม่ดี
- การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงภายนอก

เงื่อนไข/ สภาพเครื่อง

- ปรับอุณหภูมิเรซิน อุณหภูมิแม่พิมพ์ให้เหมาะสม
- ปรับอัตราความเร็วของการฉีดให้พอดี
- ขจัดน้ำ น้ำมัน คราบแก๊ส
- อบแห้งให้เพียงพอ
- ลดแรงดันทานที่หัวฉีด
- เพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์และเรซิน

- ลดแรงบิดและเพิ่มอัตราความเร็วของการฉีด

การออกแบบ/ แม่พิมพ์ของผลิตภัณฑ์

- จัดเงาแม่พิมพ์ให้ดี

- ปรับระบบระบายอากาศให้ดี

- แก้ไขการออกแบบให้ความหนาสม่ำเสมอ(โดยเฉพาะส่วนที่เนื้องาง)

วัตถุดิบ

- ลดการดูดซึมความชื้น

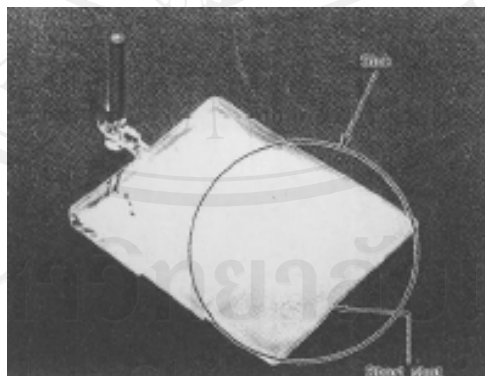
- ลดการระเหยของเรซิน

- เปลี่ยนชนิดของเม็ดพลาสติกหรือสีพลาสติก

- เพิ่มสภาพการไหลของเรซิน

- ระงับการปลอมปนของสิ่งแปลกปลอม

5.6) รอยแห้ว (Short Shot) เป็นปัญหาที่พบได้บ่อยในการผลิตชิ้นงานในครั้งแรก ซึ่งเกิดจากการลดความเร็วในการฉีดลง เพื่อป้องกันการเกิดรอยฟันทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานลดลง ระหว่างการไหลเติมแม่พิมพ์ความหนืดของพลาสติกเหลวเพิ่มขึ้น จนทำให้ไม่สามารถไหลเติมแม่พิมพ์ให้เต็มได้ ทำให้เกิดรอยแห้วและนอกจากนั้นยังเกิดรอยยุบ เนื่องจากลดความดันอัดยาลง เพื่อป้องกันการเกิดครีบ จนทำให้เกิดรอยยุบขึ้น ดังรูปที่ 2.25



รูป 2.25 ลักษณะของรอยยุบและรอยแห้วที่ชิ้นงานฉีด

สาเหตุของการเกิดรอยแห้ว

- ปริมาณการฉีดไม่พอ

- เครื่องฉีดมีข้อจำกัดในการฉีดประมาณพลาสติก

- วัตถุดิบที่ใช้ไม่เหมาะสมเช่น เอาวัตถุดิบที่ใช้ในการเป่ามาฉีด เป็นต้น
- การออกแบบแม่พิมพ์ไม่เหมาะสม

เงื่อนไข/ สภาพเครื่อง

- ปรับปริมาตรการฉีดพลาสติกให้พอกับความต้องการของสินค้า
- เพิ่มอุณหภูมิที่ฉีด
- เพิ่มอัตราแรงฉีดขึ้น
- เพิ่มระยะเวลาฉีด
- ตั้งตำแหน่งโฮลดิ้ง เพลสเซอร์ไม่ถูกต้อง
- เปลี่ยนหัวโน้ตชีสขยายรูให้ใหญ่ขึ้น
- เพิ่มความเร็วของการฉีดขึ้น
- เพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ขึ้น

การออกแบบ/ แม่พิมพ์ของผลิตภัณฑ์

- ทำสกรูรีนเนอร์ เกท ให้ใหญ่ขึ้น
- ปรับช่องระบายอากาศ แก๊สให้ดีขึ้น
- เปลี่ยนหรือเพิ่มตำแหน่งของเกท
- เกทไม่เหมาะสมกับสินค้าตัวผลิตภัณฑ์

วัตถุดิบ

- เพิ่มสภาพการไหลของวัตถุดิบ
- ปรับสภาพการหล่อลื่นให้ดีขึ้น

5.7) รอยบุ๋ม (Sink Mark) ตามด ฟองอากาศในพลาสติก มักจะเกิดกับสินค้าที่

มีความหนา บาง ของพลาสติกที่แตกต่างกันมาก

สาเหตุของการเกิดรอยบุ๋ม

- ความแตกต่างระหว่างปริมาตรการหดตัวของเรซิน
- ความเร็วในการเย็นตัวไม่เท่ากัน
- ปรับตั้งประสิทธิภาพของการฉีดไม่เหมาะสม
- ความผิดพลาดในการออกแบบผลิตภัณฑ์

เงื่อนไข/ สภาพเครื่อง

- เพิ่มกำลังในการฉีดขึ้น
- เพิ่มระยะเวลาฉีด

- ปรับปริมาณน้ำเข้าแม่พิมพ์ เพื่อระบายความร้อนอุณหภูมิ
- ปรับปริมาณการฉีดพลาสติกให้เหมาะสม
- ความเร็วในการฉีดไม่เหมาะสม
- ปรับอุณหภูมิที่ฉีดไม่เหมาะสม

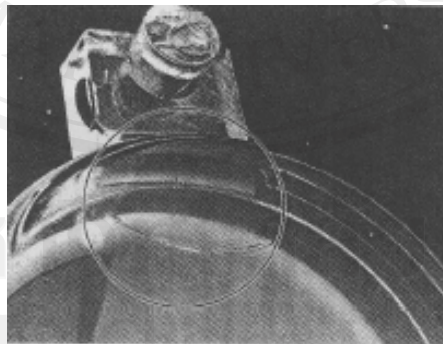
การออกแบบ/ แม่พิมพ์ของผลิตภัณฑ์

- ทำสกรู รันเนอร์ เกท ให้ใหญ่ขึ้น
- ออกแบบให้ความหนาของชิ้นงานสม่ำเสมอ
- คัดแปลงร่องน้ำเย็น เพื่อให้ส่วนกลางผิวหน้าของส่วนที่หนากับส่วนที่บาง เย็นตัวได้พร้อมกัน

วัตถุดิบ

- ทำสภาพการไหลของวัตถุดิบให้ไหลลง
- เลือกตัวที่มีอัตราหดตัวต่ำ
- ใส่วัสดุประเภทกราสไฟเบอร์ ฯลฯ

5.8) ร่องรอยการไหล (Flow Mark) ลักษณะของร่องรอยการไหลจะเป็นรูปคลื่น (Wave form) เกิดขึ้นเนื่องจากใช้ความเร็วในการฉีดต่ำเกินไป หรืออุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำเกินไป เมื่อพลาสติกเย็นตัวจะยังเห็นร่องรอยการไหลที่ผิวงาน ดังรูปที่ 2.26



รูป 2.26 ลักษณะของร่องรอยการไหลที่ชิ้นงานฉีด

สาเหตุของการเกิดร่องรอยการไหล

- อุณหภูมิของเรซินหลอมเหลวในแม่พิมพ์ต่ำเกินไป หรือความหนืดสูงเกินไป
- ปรับตั้งประสิทธิภาพของการฉีดไม่ดี

เงื่อนไข/ สภาพเครื่อง

- เพิ่มอุณหภูมิของท่อฉีดพลาสติก
- เพิ่มอุณหภูมิของแม่พิมพ์
- เพิ่มอัตราแรงฉีด
- เพิ่มปริมาณพลาสติกมากขึ้น
- เพิ่มความเร็วฉีดพลาสติกมากขึ้น
- ปรับปริมาณน้ำเย็น อุณหภูมิ และวิธีการวางท่อ เพื่อให้อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ณ ส่วนปลายมีการไหลสูงขึ้น
- ทำรูปของโน้ตตัวสูงขึ้น

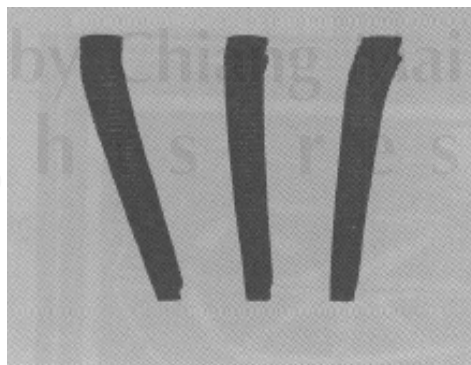
การออกแบบ/ แม่พิมพ์ของผลิตภัณฑ์

- ทำสปรู รันเนอร์ เกทให้ใหญ่ขึ้น
- ปรับโครงสร้างระบายความร้อนเพื่อช่วยให้อุณหภูมิส่วนปลายของแม่พิมพ์ดีขึ้น
- เกทไม่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์
- ปรับช่องระบายอากาศ ก๊าซในแม่พิมพ์

วัตถุดิบ

- เพิ่มสภาพการไหลของเรซิน
- ลดการระเหยของวัตถุดิบ (Volatile Matter) ให้น้อยลง

5.9) การโก่งงอ (Warpage) เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้ความดันฉีดย้ำ (Holding Pressure) สูงเกินไป เพื่อป้องกันการเกิดรอยยุบ จึงทำให้เกิดความเค้นตกค้าง (Residual Stress) อยู่ในชิ้นงานมากทำให้เกิดการโก่งงอขึ้นภายหลัง โดยเฉพาะชิ้นงานรูปทรงเรียวยาวจะเกิดขึ้นได้ง่าย ดังรูปที่ 2.27



รูป 2.27 ลักษณะการ โก่งงอของชิ้นงานฉีด

สาเหตุของการโค้งงอ

- ความผิดพลาดจากการออกแบบ
- อิทธิพลจากแรงอัดหลงเหลืออยู่
- อัตราการหดตัวของแต่ละส่วนไม่เท่ากัน

เงื่อนไข/ สภาพเครื่อง

- เพิ่มอุณหภูมิเรซิน ลดแรงกด
- ลดอุณหภูมิแม่พิมพ์
- เพิ่มความเร็วของการฉีด
- เพิ่มเวลาทำความเย็น
- ใช้อุปกรณ์ตัดที่แข็งแรง

การออกแบบ/ แม่พิมพ์ของผลิตภัณฑ์

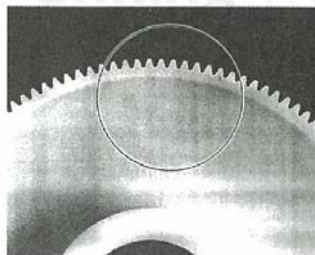
- การออกแบบให้มีความสามารถในการเชิงทางกลไก
- ออกแบบให้การหันเหและกลับตัว (Orientation) น้อยลง
- เปลี่ยนวิธีการทำงานออก
- ทำโครงสร้างทำความเย็นที่ทำให้ความเร็วในการเย็นตัวเป็นอย่างสม่ำเสมอ

วัตถุดิบ

- เพิ่มสภาพการไหลของเรซิน
- ใช้ตัวที่มีอัตราการหดตัวน้อย
- ใช้เรซินที่มีความแข็งแรงขึ้น

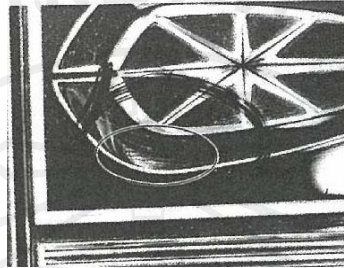
5.10) ขนาดคลาดเคลื่อน (Dimensional Defect) เกิดจากการใช้ความเร็วในการฉีด ทำให้อุณหภูมิของพลาสติกเหลวที่มาถึงยอดฟันเฟืองต่ำ และความหนืดเพิ่มขึ้นจนความดันไม่พอเพียงในการดันพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ได้เต็มที่เช่นในกรณีนี้จะทำให้ฟันเฟืองผิดขนาด ดังรูปที่

2.28



รูป 2.28 ลักษณะการเกิดขนาดคลาดเคลื่อนที่ขึ้นงานฉีด

5.11) แนวประสานไม่แข็งแรง (Weld Mark) เกิดจากการใช้ความเร็วในการฉีดต่ำ เพื่อป้องกันการเกิดรอยย่น ซึ่งทำให้อุณหภูมิของพลาสติกเหลวลดลงมากส่งผลให้ตำแหน่งที่พลาสติกไหลมาบรรจบกัน ยึดติดกันไม่แข็งแรง และยังทำให้เห็นร่องรอยของแนวประสาน (Weld Mark) อย่างชัดเจน ดังรูปที่ 2.29



รูป 2.29 ลักษณะของแนวประสานที่ไม่สมบูรณ์ของชิ้นงานฉีด

สาเหตุของแนวประสานไม่แข็งแรง

- สิ่งที่ไม่ไหลแยกออกมากกว่า 2 ทาง เมื่อมาบรรจบกันขณะอุณหภูมิต่ำเกินไป

- ปรับประสิทธิภาพของการฉีดไม่ดี

เงื่อนไข/ สภาพเครื่อง

- เพิ่มอุณหภูมิท่อฉีด
- เพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์
- เพิ่มอัตราความเร็วการฉีด
- เพิ่มแรงฉีดและเวลาฉีด

- เพิ่มปริมาณฉีด

การออกแบบ/ แม่พิมพ์ของผลิตภัณฑ์

- ทำสปรู รันเนอร์เกต ให้ใหญ่ขึ้น
- ปรับโครงสร้างของทางเดินระบายความร้อนของแม่พิมพ์ เพื่อให้แม่พิมพ์มีอุณหภูมิสูงขึ้น
- เพิ่มดิ่งสำหรับกักเรซินในตำแหน่งที่เรซินไหลมาบรรจบกัน
- ปรับการระบายอากาศในส่วนที่วัสดุบีบไหลมาบรรจบกันให้เหมาะสม
- เกท บาลานท์ ไม่ถูกต้อง

วัตถุดิบ

- เพิ่มสภาพการไหลของเรซิน
- ลดการระเหยของวัตถุดิบ
- ใช้วัสดุที่มีอัตราหดเล็กน้อย
- ทำการอบแห้งให้เพียงพอ

5.12) รอยร้าว (Crack) รอยปริ (Crazing) รอยขาว (Blushing)

สาเหตุของรอยร้าว รอยปริ และรอยขาว

- การออกแบบแม่พิมพ์ไม่ดี
- การออกแบบชิ้นงานและเทเปอร์ถอดแบบไม่เหมาะสม
- การเปลี่ยนรูปและการสีกกร่อนของแม่พิมพ์
- การกระทุ้งและการแยกแม่พิมพ์เป็นไปอย่างฝืนตัว
- การตั้งกำลังการฉีดมากเกินไป ทำให้มีการจับตัวแน่น
- ความสัมพันธ์ของหัวฉีดและสปริงของแม่พิมพ์ไม่ดี

เงื่อนไข/ สภาพเครื่อง

- ลดความดันของกำลังฉีด
- ปรับปริมาณการฉีดให้พอดี
- ตั้งกระทุ้งเร็วเกินไป
- เปิดแม่พิมพ์เร็วเกินไป
- อุณหภูมิของแม่พิมพ์เย็นไป
- อุณหภูมิของท่อฉีดร้อนหรือเย็นไป

การออกแบบ/ แม่พิมพ์ของผลิตภัณฑ์

- เพิ่มเทเปอร์ ถอดแบบของชิ้นงาน
- ขจัดรอยขีด รอยตะไคร่ในขณะการสร้างแม่พิมพ์
- แก้ไข การบิดเบี้ยว และการสีกกร่อนของผิวหน้าประกบของแม่พิมพ์
- ทำการชุบแม่พิมพ์ใหม่
- เปลี่ยนวิธีการกระทุ้งใหม่

วัตถุดิบ

- เพิ่มความลื่นของเรซินให้มากขึ้น

5.13) การฝังตัวไม่ดี (Insert)

สาเหตุของการฝังตัวไม่ดี

- การประกบไม่สนิท
- การเลือกใช้วัสดุไม่ดี

เงื่อนไข/ สภาพเครื่อง

- ลดกำลังแรงฉีด
- เพิ่มอุณหภูมิของเรซิน และแม่พิมพ์

การออกแบบ/ แม่พิมพ์ของผลิตภัณฑ์

- ระวังความแตกต่างในความสูง (ความยาว) และเส้นผ่านศูนย์กลาง
- ออกแบบในลักษณะที่เลี่ยงการกระจุกตัวของแรงตอบโต้ บริเวณรอบตัวอินเลท
- ลดการขยายตัวจากความร้อน

วัตถุดิบ

- ใช้เม็ดพลาสติกที่อัตราการหดตัวน้อย

2.2.3 การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment) หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลอง เพื่อจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสม และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งที่จำเป็น ถ้าหากต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่เรามีอยู่ และถ้ายังปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experiment Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลองก็คือ การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่นำมาประยุกต์ใช้ (ปารเมศ, 2545)

การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความเข้าใจอย่างแท้จริงว่า เรากำลังศึกษาอะไร จะเก็บข้อมูลได้อย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้นั้นอย่างไร

ขั้นตอนในการดำเนินการทดลอง อาจทำได้ดังต่อไปนี้ (ปารเมศ, 2545)

1. ทำความเข้าใจถึงปัญหา
2. เลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต
3. เลือกตัวแปรผลตอบ ซึ่งในการทดลองหนึ่งอาจมีผลตอบหลายตัว และจำเป็นมากที่จะต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรผลตอบ และจะวัดตัวแปรเหล่านั้นได้อย่างไร ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง
4. เลือกการออกแบบการทดลอง ซึ่งจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง อยู่ตลอดเวลา ซึ่งเราอาจทราบตั้งแต่เริ่มต้นแล้วว่า ปัจจัยใดที่มีผลต่อผลตอบที่เกิดขึ้น ดังนั้นควรหาว่าปัจจัยใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณถึงขนาดความแตกต่างที่เกิดขึ้น
5. ดำเนินการทดลอง
6. วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติเพื่อให้ผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นเป็นไปตาม วัตถุประสงค์ของการทดลอง ทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุน และมีความน่าเชื่อถือ
7. สรุปและข้อเสนอแนะของผลการทดลองที่เกิดขึ้น เพื่อนำเสนอผลงานให้หน่วยงานหรือผู้ที่เกี่ยวข้องทราบ นอกจากนี้แล้วควรทำการทดลองเพื่อยืนยันผล เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้น

หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลองมีหลักพื้นฐานที่สำคัญอยู่ 3 ประการ (Montgomery, 2001) เกี่ยวข้องกับการทดลองและเป็นหลักการเพื่อช่วยให้ผลการทดลอง มีดังนี้

1. การทดลองซ้ำ (Replication) คือการทดลองภายใต้เงื่อนไขเดียวกันมากกว่า 1 ครั้ง เพื่อให้ได้ข้อมูลของการทดลองเพิ่มมากขึ้นช่วยให้ความผิดพลาดในการเก็บข้อมูลของการทดลองลดน้อยลง

2. การสุ่ม (Randomization) คือการจัดลำดับของการทดลองหรือวิธีการเลือกวัสดุอุปกรณ์โดยกำหนดให้เป็นแบบสุ่ม ทั้งนี้ตัวแปรของข้อมูลจะต้องเป็นตัวแปรที่มีการกระจายแบบอิสระ ประโยชน์ของการสุ่มคือช่วยลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจส่งผลกระทบต่อผลการทดลองโดยการกระจายความผิดพลาดในการทดลอง

3. การควบคุม (Blocking) คือการควบคุมสภาพในการทดลองให้มีความใกล้เคียงกันมากที่สุด ประโยชน์ของการควบคุมก็คือป้องกันการรบกวนจากปัจจัยภายนอกและเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทดลอง (Breyfogle, 1992)

1) สมมติฐานทางสถิติ (Statistics Hypothesis)

เป็นสมมติฐานที่กำหนดขึ้น เพื่อใช้ในการทดสอบทางสถิติ โดยมีการกำหนดระดับนัยสำคัญ (Level of Significance) คือ การที่ผู้วิจัยกำหนดขอบเขตของความคลาดเคลื่อน ที่จะยอมให้เกิดขึ้นได้ในการทดสอบสมมติฐาน การกำหนดความคลาดเคลื่อน จะใช้ความน่าจะเป็น (Probability) ในการทดสอบสมมติฐานนั้น ถ้าเกิดความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าที่กำหนดก็จะยอมรับสมมติฐานไร้นัยสำคัญ (H_0) ในทางตรงข้าม หากเกิดความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าที่กำหนด จะไม่ยอมรับ H_0 ในการวิจัยอาจกำหนดนัยสำคัญเพื่อทดสอบสมมติฐานเป็น 0.001 หรือ 0.01 หรือ 0.05 ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัญหาและเรื่องในการวิจัย (ยุทธ, 2536)

สมมติฐานทางสถิติ แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

1. สมมติฐานไร้นัยสำคัญ (Null Hypothesis) เขียนแทนด้วย H_0 สมมติฐานแบบนี้เป็นสมมติฐานที่ไม่แสดงความแตกต่างระหว่างกลุ่มต่าง ๆ ที่ทำการทดสอบ เช่น

H_0 : การทดสอบรอยตำหนิของชิ้นงาน มีค่า เท่ากับ 0

หรือ $H_0 : \mu = 0$

เมื่อ μ แทน ผลการทดสอบรอยตำหนิ

H_0 : การทดสอบรอยตำหนิของชิ้นงานการทดลองที่ 1 และ 2 ไม่แตกต่างกัน

$H_0 : \mu_1 = \mu_2$

เมื่อ μ_1 แทน ผลการทดสอบรอยตำหนิ ครั้งที่ 1

μ_2 แทน ผลการทดสอบรอยตำหนิ ครั้งที่ 2

2. สมมติฐานทางเลือก (Alternative Hypothesis) เป็นสมมติฐานที่มีลักษณะตรงข้ามกับสมมติฐานไร้นัยสำคัญ สัญลักษณ์ที่ใช้ คือ H_1 มักจะเขียนในรูปความแตกต่าง หรือความไม่เท่ากันของค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่นำมาศึกษา โดยสมมติฐานทางเลือกจะต้องอยู่คู่กับสมมติฐานไร้นัยสำคัญเสมอ เพื่อให้เกิดความชัดเจนในการทดสอบทางสถิติ (ยุทธ, 2546) เช่น

$H_0 : \mu_1 = \mu_2$ เราอาจตั้งสมมติฐานทางเลือกได้ว่า

$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$ หรือ

$H_1 : \mu_1 > \mu_2$

$H_1 : \mu_1 < \mu_2$

ระดับนัยสำคัญ (Level of Significance) คือ การที่ผู้วิจัยกำหนดขอบเขตของความคลาดเคลื่อน ที่จะยอมให้เกิดขึ้นได้ในการทดสอบสมมติฐาน การกำหนดความคลาดเคลื่อน จะใช้ความน่าจะเป็น (Probability) ในการทดสอบสมมติฐานนั้น ถ้าเกิดความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าที่กำหนดก็จะยอมรับ สมมติฐานไร้นัยสำคัญ (H_0) ในทางตรงข้าม หากเกิดความคลาดเคลื่อนน้อย

กว่าที่กำหนด จะไม่ยอมรับ H_0 ในการวิจัยอาจจะกำหนดนัยสำคัญเพื่อทดสอบสมมติฐานเป็น 0.001 หรือ 0.01 หรือ 0.05 ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัญหาและเรื่องในการวิจัย

ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ (สายชล, 2547) ควรดำเนินการตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. ตั้งสมมติฐาน H_0 และ H_1 โดยต้องพิจารณาด้วยว่า การตั้ง H_1 จะตั้งเพื่อทดสอบทางเดียวหรือสองทาง เช่น

$$\begin{array}{llll} H_0 & : & \mu_1 & = \mu_2 \\ H_1 & : & \mu_1 & < \mu_2 \\ \text{หรือ} & & & \\ H_1 & : & \mu_1 & > \mu_2 \\ \text{หรือ} & & & \\ H_1 & : & \mu_1 & \neq \mu_2 \end{array}$$

2. กำหนดระดับนัยสำคัญ หรือระดับความเชื่อมั่น

3. เลือกสถิติที่เหมาะสมในการทดสอบสมมติฐาน

4. หาค่าวิกฤติ (Critical Value)

5. คำนวณค่าสถิติจากกลุ่มตัวอย่าง

6. พิจารณาผลการทดสอบสมมติฐาน หากตัวเลขที่คำนวณตกอยู่ใน

ขอบเขตวิกฤติ จะปฏิเสธ H_0 และถ้าหากตัวเลขที่คำนวณตกอยู่ในขอบเขตการยอมรับ ก็จะสรุปว่ายอมรับ H_0

2) การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design)

เป็นการทดลองที่สามารถศึกษาผลของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ประโยชน์คือทำให้สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากปัจจัยที่ส่งผลกระทบทำให้เกิดข้อสรุปที่ผิดพลาดและช่วยให้ได้ข้อสรุปที่สมเหตุสมผลในตลอดช่วงการทดลอง สำหรับการทดลองจะเลือกใช้การออกแบบทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เป็นการออกแบบการทดลองที่ใช้ปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำนวน k ปัจจัย และแต่ละปัจจัยประกอบด้วยสองระดับ แทนด้วยระดับสูงและระดับต่ำ โดยในการออกแบบจะแทนระดับสูงด้วยเครื่องหมาย “+” และแทนระดับต่ำด้วยเครื่องหมาย “-”

ตารางที่ 2.8 แสดงการกำหนดเงื่อนไขในแต่ละปัจจัยการทดลองแบบแฟกทอเรียล

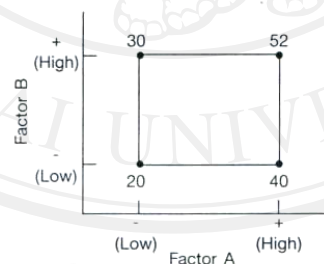
เงื่อนไขการทดลอง	ปัจจัยที่ 1	ปัจจัยที่ 2	ปัจจัยที่ n
1	-	-	
2	+	-	
3	-	+	
4	+	+	
n			

โดยรูปที่ 2.30 เป็นการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ คือ ระดับ ต่ำ และสูง แทนด้วยเครื่องหมายลบ และบวก ตามลำดับ ผลหลักของปัจจัย A ในการทดลองนี้คือ ผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลตอบที่ระดับต่ำและระดับสูงของปัจจัย A ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$A = \frac{(40 + 52)}{2} - \frac{(20 + 30)}{2} = 21 \quad (2.4)$$

หมายความว่า การเพิ่มขึ้นของปัจจัย A จากระดับต่ำไปสู่ระดับสูง จะทำให้ผลตอบเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 21 หน่วย ในทำนองเดียวกัน จะสามารถคำนวณหาค่าผลหลักของปัจจัย B ได้คือ

$$B = \frac{(30 + 52)}{2} - \frac{(20 + 40)}{2} = 11 \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.30 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย

3) การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลใช้มากในการทดลองที่มีปัจจัยหลายปัจจัยที่ต้องการศึกษาถึงผลรวมที่มีต่อผลตอบซึ่งเกิดจากปัจจัยเหล่านั้น กรณีพิเศษของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรืออาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับ ในที่นี้ จะ

แทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่งๆหรือการ “มี” หรือ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้น ๆ ก็ได้ ใน 1 เรพลิเคต ที่ปริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล และเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

- ปัจจัยทั้งหมดมีค่าตายตัว
- การออกแบบเป็นแบบเชิงสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized)
- สมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นปกติเป็นที่ยอมรับได้

การออกแบบ 2^k มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากต้องการตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างปริบูรณ์ โดยใช้การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล

3.1) การออกแบบ 2^k

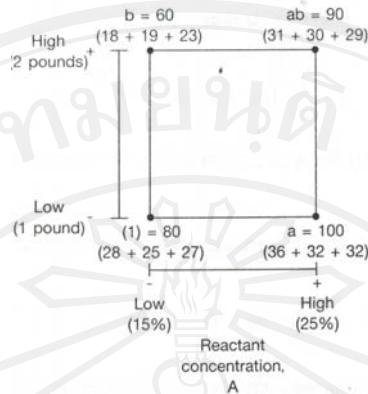
เป็นการออกแบบที่ประกอบด้วย 2 ปัจจัย (A และ B) แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ การออกแบบชนิดนี้เรียกว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^2 ระดับของปัจจัยแต่ละตัวอยู่ที่ “ต่ำ” และ “สูง” ตัวอย่างเช่น พิจารณาการศึกษาผลของความเข้มข้นสารเคมีและจำนวนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อผลผลิตในกระบวนการทางเคมีอย่างหนึ่ง กำหนดให้ความเข้มข้นของสารเคมีเป็นปัจจัย A ประกอบด้วยสองระดับ คือ 15 เปอร์เซ็นต์ และ 25 เปอร์เซ็นต์ และให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัจจัย B ซึ่งมีอยู่ที่ 1 และ 2 ปอนด์ ตามลำดับ ทำการทดลองนี้จำนวน 2 ครั้ง ข้อมูลดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ข้อมูลการทดลองของปัจจัย A และ B

ปัจจัย		Treatment	จำนวนเรพลิเคต			รวม
A	B	Combination	1	2	3	
-	-	A ต่ำ, B ต่ำ	28	25	27	80
+	-	A สูง, B ต่ำ	36	32	32	100
-	+	A ต่ำ, B สูง	18	19	223	60
+	+	A สูง, B สูง	31	30	29	90

การทดลองร่วมปัจจัยสำหรับการออกแบบนี้แสดงในรูปของกราฟดังรูปที่ 2.31 โดย A แทนผลของปัจจัย A, B แทนผลของปัจจัย B และ AB แทนอันตรกิริยาของปัจจัย AB ในการออกแบบ 2^2 ระดับต่ำ และสูง จะแทนด้วยเครื่องหมาย “-” และ “+” บนแกน A และ B ตามลำดับ ดังนั้น เครื่องหมาย - บนแกน A แทนระดับความเข้มข้นต่ำ คือ 15 เปอร์เซ็นต์ และ +

แทนระดับสูง คือ 25 เปอร์เซ็นต์ และบนแกน B เครื่องหมาย – แทนด้วยระดับต่ำของตัวเร่งปฏิกิริยา และ + แทนด้วยระดับสูงตามลำดับ



รูป 2.31 การทดลองร่วมปัจจัยของการออกแบบ 2^k

สำหรับการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ระดับ กำหนดว่า ผลเฉลี่ยของปัจจัยหนึ่งคือความเปลี่ยนแปลงของผลตอบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้น ๆ ที่ถูกนำมาเฉลี่ยกับระดับของปัจจัยอื่น สัญลักษณ์ (1), a, b และ ab แทนผลรวมของ n เรพลีเคตของการทดลองร่วมปัจจัยนั้นๆ ผลของ A ที่ระดับต่ำของ B คือ $[a - (1)]/n$ และผลของ A ที่ระดับสูงของ B คือ $[ab - b]/n$ นำค่านี้มาเฉลี่ยจะได้ผลหลักของปัจจัย A คือ

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2n} \{[ab - b] - [a - (1)]\} \\ &= \frac{1}{2n} [ab + a - b - (1)] \end{aligned} \quad (2.6)$$

ค่าเฉลี่ยของผลหลักของปัจจัย B หาได้จากผลของ B ที่ A ระดับต่ำ คือ $[b - (1)]/n$ และที่ A ระดับสูง คือ $[ab - a]/n$ ซึ่งเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} B &= \frac{1}{2n} \{[ab - a] - [b - (1)]\} \\ &= \frac{1}{2n} [ab + b - a - (1)] \end{aligned} \quad (2.7)$$

ผลของอันตรกิริยาของ AB คือ ค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างผลของ A ที่ B ระดับสูง กับผลของ A ที่ B ระดับต่ำ ซึ่งก็คือ

$$\begin{aligned} AB &= \frac{1}{2n} \{[ab - b] - [a - (1)]\} \\ &= \frac{1}{2n} [ab + (1) - a - b] \end{aligned} \quad (2.8)$$

ในทางกลับกัน อาจหาค่าของ AB ได้จากค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างผลของ B ที่ A ระดับสูง กับผลของ B ที่ A ระดับต่ำ ซึ่งจะให้ผลออกมาเช่นเดียวกับสมการที่ 2.8

สมการของผลของ A, B และ AB อาจหาได้โดยวิธีอื่นอีก เช่น ผลของ A สามารถหาได้จากความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลตอบของการทดลองร่วมปัจจัยทั้งสองบนด้านขวามือของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสในรูปที่ 2.31 (เรียกว่า $\bar{y}_{A+}$ เนื่องจากมันคือค่าเฉลี่ยของผลตอบของการทดลองร่วมปัจจัยที่ A มีค่าสูง) กับการทดลองร่วมปัจจัยทั้งสองที่อยู่ทางด้านซ้ายมือ (เรียกว่า $\bar{y}_{A-}$) นั่นคือ

$$\begin{aligned} A &= \bar{y}_{A+} - \bar{y}_{A-} \\ &= \frac{ab+a}{2n} - \frac{b+(1)}{2n} \\ &= \frac{1}{2n} [ab+a-b-(1)] \end{aligned}$$

ผลที่ได้มีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากสมการ 2.6 ทุกประการผลของ B ดังแสดงในสมการ 2.7 หาได้จากผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลตอบของการทดลองร่วมปัจจัยทั้งสองบนด้านบนของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (เรียกว่า $\bar{y}_{B+}$) กับค่าเฉลี่ยของการทดลองร่วมปัจจัยทั้งสองที่อยู่ด้านล่าง (เรียกว่า $\bar{y}_{B-}$) นั่นคือ

$$\begin{aligned} B &= \bar{y}_{B+} - \bar{y}_{B-} \\ &= \frac{ab+a}{2n} - \frac{a+(1)}{2n} \\ &= \frac{1}{2n} [ab+b-a-(1)] \end{aligned}$$

สุดท้ายผลของอันตรกิริยาของ AB หาได้จากค่าเฉลี่ยของการทดลองร่วมปัจจัยจากขวาไปซ้ายตามแนวโน้มทแยงมุมของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ab และ (1)) ลบด้วยค่าเฉลี่ยของการทดลองร่วมปัจจัยจากซ้ายไปขวาตามแนวเส้นทแยงมุมของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (a และ b) หรือ

$$\begin{aligned} AB &= \frac{ab+(1)}{2n} - \frac{a+b}{2n} \\ &= \frac{1}{2n} [ab+(1)-a-b] \end{aligned}$$

โดยค่าที่ได้มีค่าเช่นเดียวกันกับสมการ 2.8 ทุกประการ ดังนั้นสามารถประมาณผลเฉลี่ยต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

$$A = \frac{1}{2(3)} (90 + 100 - 60 - 80) = 8.33$$

$$B = \frac{1}{2(3)}(90 + 60 - 100 - 80) = -5.00$$

$$AB = \frac{1}{2(3)}(90 + 80 - 100 - 60) = 1.67$$

ผลของ A (ความเข้มข้นของสารเคมี) มีค่าเป็นบวก ซึ่งหมายความว่า การเพิ่มขึ้นของ A จากระดับต่ำ (15 เปอร์เซ็นต์) ไปสู่ระดับสูง (25 เปอร์เซ็นต์) จะทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น ผลของ B (ตัวเร่งปฏิกิริยา) มีค่าเป็นลบ หมายความว่า การเพิ่มขึ้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เดิมเข้าไปในกระบวนการจะทำให้ผลผลิตต่ำลง และผลของอันตรกิริยา มีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับผลหลักทั้งสอง

ในการทดลองที่เกี่ยวกับการออกแบบ 2^k จะต้องตรวจสอบทั้งขนาดและทิศทางของปัจจัยที่มีผลเพื่อที่จะหาว่า ตัวแปรตัวใดที่น่าจะเป็นตัวการสำคัญที่ก่อให้เกิดผลขึ้น และใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนมาเป็นตัวยืนยันข้อสรุปนั้น

พิจารณาผลรวมของกำลังสองของ A, B และ AB กำหนดให้ว่าคอนเทรสต์ที่จะใช้ในการประมาณผลของ A คือ

$$Contrast_A = ab + a - b - (1) \quad (2.9)$$

เรียกคอนเทรสต์นี้ว่า ผลทั้งหมด (Total Effect) ของ A จากสมการ 2.7 และ 2.8 พบว่าคอนเทรสต์นี้ยังสามารถใช้ในการประมาณผลของ B และ AB ได้อีกด้วย ยิ่งกว่านั้น คอนเทรสต์เหล่านี้ยังมีรูปแบบในเชิงตั้งฉาก (Orthogonal) และผลรวมของกำลังสองของคอนเทรสต์ใด ๆ จะหาได้จากคอนเทรสต์ยกกำลังสอง หากด้วยผลคูณของจำนวนของข้อมูลทั้งหมดที่อยู่ในคอนเทรสต์นั้น กับผลรวมกำลังสองของสัมประสิทธิ์ของคอนเทรสต์ ดังนั้น ผลรวมของกำลังสองของ A, B และ AB สามารถเขียนได้ดังนี้

$$SS_A = \frac{[ab + a - b - (1)]^2}{4n} \quad (2.10)$$

$$SS_B = \frac{[ab + b - a - (1)]^2}{4n} \quad (2.11)$$

$$SS_{AB} = \frac{[ab + (1) - a - b]^2}{4n} \quad (2.12)$$

ใช้ข้อมูลจากรูปที่ 2.30 สามารถหาค่าผลรวมของกำลังสองต่าง ๆ ได้จากสมการ 2.10 – 2.12 ดังต่อไปนี้

$$SS_A = \frac{(50)^2}{4(3)} = 208.33$$

$$SS_B = \frac{(-30)^2}{4(3)} = 75.00$$

$$SS_{AB} = \frac{(10)^2}{4(3)} = 8.33$$

และผลรวมทั้งหมดของกำลังสองสามารถหาได้จาก

$$SS_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2}{4n} \quad (2.13)$$

ปกติแล้ว SS_T จะมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ $4n - 1$ และค่าผิดพลาดของผลรวมของกำลังสองซึ่งมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ $4(n - 1)$ สามารถคำนวณได้จาก

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \quad (2.14)$$

จากการทดลองในรูปที่ 2.30 จะได้ว่า

$$SS_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^3 y_{ijk}^2 - \frac{y^2}{4(3)}$$

$$= 9398.00 - 9075.00 = 323.00$$

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}$$

$$= 323.00 - 208.33 - 75.00 - 8.33$$

$$= 31.34$$

การใช้ SS_A , SS_B และ SS_{AB} ผลสรุปของการวิเคราะห์ความแปรปรวนปรากฏดังตารางที่ 2.10 เมื่อพิจารณาค่า P ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ผลหลักทั้งคู่มิพลงอย่างมีนัยสำคัญและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A และ B ไม่มีผล ซึ่งตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจะช่วยยืนยันการตีความหมายของข้อมูลจากขนาดของผลปัจจัยดังได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว

ตารางที่ 2.10 ตารางวิเคราะห์ผลความแปรปรวนของตัวอย่างในรูปที่ 2.30

แหล่งความแปรปรวน	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	F_0	P - Value
A	208.33	1	208.33	53.15	0.0001
B	75.00	1	75.00	19.13	0.0024
AB	8.33	1	8.33	2.13	0.1826
Error	31.34	8	3.92		
Total	323.00	11			

ค่า สัมประสิทธิ์ของคอนแทรกสต์ที่ใช้สำหรับประมาณผลของอันตรกิริยาก็คือ ผลคูณระหว่างสัมประสิทธิ์ของปัจจัยหลักทั้งสองนั่นเอง สัมประสิทธิ์ของคอนแทรกสต์จะมีค่าเป็น +1 หรือ -1 เท่านั้น ตารางของเครื่องหมายบวกและลบดังเช่นตารางที่ 2.11 สามารถนำมาใช้ใน

การหาเครื่องหมายที่เหมาะสมสำหรับการทดลองร่วมปัจจัยแต่ละตัวได้ ตามแนวคอลัมน์ของตารางที่ 2.11 คือ ผลหลัก (A และ B) อันตรกิริยา (AB) และ 1 ซึ่งหมายถึง ผลรวมหรือค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้งหมด สังเกตดูจะเห็นว่าคอลัมน์ 1 นั้นจะมีเครื่องหมายบวกเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ตามแนวแถวของตารางที่ 2.11 คือการทดลองว่าร่วมปัจจัยที่ได้มีการเรียงลำดับมาตรฐานเรียบร้อยแล้วนั่นเอง เพื่อที่จะหาคอนแทรสต์สำหรับประมาณผลต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น เพียงแต่นำเอาเครื่องหมายที่อยู่ในคอลัมน์ที่ต้องการในตารางมาคูณกับการทดลองร่วมปัจจัยที่เกี่ยวข้องแล้วนำทั้งหมดมาบวกกัน ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการประมาณค่าของ A จะหาคอนแทรสต์ได้จาก $-(1) + a - b + ab$ ซึ่งก็มีค่าเช่นเดียวกันกับในสมการ 2.6

ตารางที่ 2.11 เครื่องหมายทางพีชคณิตสำหรับการคำนวณผลในการออกแบบ 2^2

Treatment Combination	Factorial Effect			
	1	A	B	AB
(1)	+	-	-	+
a	+	+	-	-
b	+	-	+	-
ab	+	+	+	+

3.2) ส่วนตกค้างและความเพียงพอของแบบจำลอง

แบบจำลองของการถดถอยสามารถใช้ในการหาค่าที่ถูกทำนาย

(Predicted) หรือค่าที่ฟิต (Fitted) ของ y ที่จุดทั้ง 4 ของการออกแบบ ส่วนตกค้างคือ ผลต่างระหว่างข้อมูลที่ไดมากับค่าที่ฟิตของ y ตัวอย่างเช่น เมื่อความเข้มข้นของสารเคมีอยู่ที่ระดับต่ำ ($x_1 = -1$) และตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ที่ระดับต่ำ ($x_2 = -1$) ค่า y ที่ได้จากการทำนายคือ

$$\hat{y} = 27.5 + \left(\frac{8.33}{2}\right)(-1) + \left(\frac{-5.00}{2}\right)(-1) = 25.835$$

มีข้อมูล 3 ตัวสำหรับการทดลองร่วมปัจจัยนี้ ดังนั้นส่วนตกค้างคือ

$$e_1 = 28 - 25.835 = 2.165$$

$$e_2 = 25 - 25.835 = -0.835$$

$$e_3 = 27 - 25.835 = 1.165$$

ค่าที่ถูกทำนายตัวที่เหลือและส่วนตกค้างจะคำนวณได้ตามวิธีเดียวกันกับ

ที่กล่าวมา สำหรับความเข้มข้นของสารเคมีที่ระดับสูงและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระดับต่ำ

$$\hat{y} = 27.5 + \left(\frac{8.33}{2}\right)(+1) + \left(\frac{-5.00}{2}\right)(-1) = 34.165$$

$$e_1 = 36 - 34.165 = 1.835$$

$$e_2 = 32 - 34.165 = -2.165$$

$$e_3 = 32 - 34.165 = -2.165$$

สำหรับความเข้มข้นของสารเคมีที่ระดับต่ำและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระดับสูง

$$\hat{y} = 27.5 + \left(\frac{8.33}{2}\right)(-1) + \left(\frac{-5.00}{2}\right)(+1) = 20.835$$

$$e_1 = 18 - 20.835 = -2.835$$

$$e_2 = 19 - 20.835 = -1.835$$

$$e_3 = 20 - 20.835 = 2.165$$

สำหรับความเข้มข้นของสารเคมีที่ระดับสูงและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระดับสูง

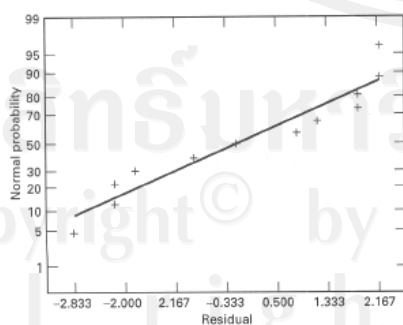
$$\hat{y} = 27.5 + \left(\frac{8.33}{2}\right)(+1) + \left(\frac{-5.00}{2}\right)(+1) = 29.165$$

$$e_1 = 31 - 29.165 = 1.835$$

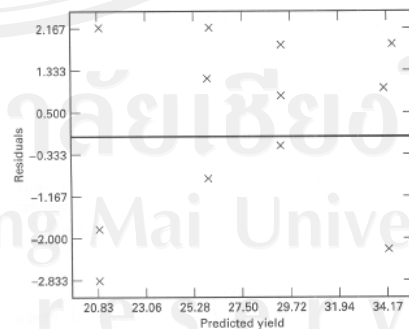
$$e_2 = 30 - 29.165 = 0.835$$

$$e_3 = 29 - 29.165 = -0.165$$

รูป 2.32 แสดงการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างเหล่านี้ และกราฟของส่วนตกค้างกับค่าผลที่ถูกต้องทำนาย พิจารณาจากรูปแล้วไม่พบสิ่งผิดปกติอันใด ดังนั้นข้อสรุปที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ในครั้งนี้สมเหตุสมผล



ก) Normal probability Plot



ข) Residuals versus Predicted yield

รูป 2.32 กราฟของส่วนตกค้างสำหรับการทดสอบเกี่ยวกับกระบวนการเคมี

3.3) รูปแบบทั่วไปของการออกแบบ 2^k

การออกแบบที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ แบบจำลองทางสถิติสำหรับการออกแบบ 2^k จะประกอบด้วยผลหลัก k ชนิด, $\binom{k}{2}$ อันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย, $\binom{k}{3}$ อันตรกิริยาของ 3 ปัจจัย, ... และ 1 อันตรกิริยาของ k ปัจจัย นั่นคือ แบบจำลองบริบูรณ์สำหรับการออกแบบ 2^k ประกอบด้วยผลทั้งสิ้น $2^k - 1$ ชนิด เครื่องหมายสำหรับการทดลองร่วมปัจจัยที่กำหนดให้ก่อนหน้านี้ยังใช้ในรูปแบบทั่วไปได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น abd ในการออกแบบ 2^5 หมายถึง การทดลองร่วมปัจจัยที่ A, B และ D อยู่ในระดับสูง และ C และ E อยู่ในระดับต่ำ การทดลองร่วมปัจจัยสามารถเขียนให้อยู่ในลำดับมาตรฐานได้โดยการเพิ่มปัจจัยเข้าไปทีละตัว และให้ปัจจัยใหม่ที่เกิดขึ้นมารวมกับปัจจัยที่อยู่ก่อนหน้า ตัวอย่างเช่น ลำดับมาตรฐานของการออกแบบ 2^4 คือ (1), a, b, ab, c, ac, bc, abc, d, ad, bd, abd, cd, acd, bcd และ abcd ตามลำดับ วิธีการทั่วไปในการวิเคราะห์เชิงสถิติของการออกแบบ 2^k ในขั้นแรกจะต้องประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยต่าง ๆ และตรวจสอบเครื่องหมายและขนาดของผลที่เกิดขึ้น ข้อมูลเช่นนี้จะทำให้ผู้ทดลองทราบโดยเบื้องต้นว่า ปัจจัยและอันตรกิริยาตัวใดที่มีความสำคัญ และปัจจัยเหล่านี้ควรจะถูกรับให้อยู่ในทิศทางใดเพื่อที่จะปรับปรุงผลตอบ ในการสร้างแบบจำลองเริ่มต้น ควรจะเลือกแบบจำลองแบบเต็มรูปแบบซึ่งประกอบด้วยผลหลักและอันตรกิริยาทั้งหมด ในขั้นตอนที่สามจะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อที่จะทดสอบความมีนัยสำคัญของผลหลักและอันตรกิริยา ตารางที่ 2.12 แสดงรูปแบบทั่วไปของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ที่มี n เรพลิต ขั้นตอนที่จะเป็นการจัดเกลาแบบจำลอง ขั้นตอนนี้เป็น การดึงเอาตัวแปรที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกจากแบบจำลองเต็มรูปแบบ ขั้นตอนที่จะเป็นการวิเคราะห์ส่วนตกค้างเพื่อที่จะตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้น มีบางครั้งเช่นกันที่การจัดเกลาแบบจำลองเกิดขึ้นหลังจากการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง ทั้งนี้ เนื่องจากพบว่าแบบจำลองเกิดความไม่เพียงพอ หรือสมมติฐานที่กำหนดให้มันไม่ถูกต้องอย่างรุนแรง ในขั้นตอนสุดท้ายจะทำการวิเคราะห์ด้วยกราฟ โดยจะสร้างกราฟและผลหลักและอันตรกิริยาขึ้นเพื่อที่จะประมาณค่าของผล หรือค่าผลรวมของกำลังสองของผล ซึ่งจะต้องคำนวณหาค่าคอนแทรสต์ที่เกี่ยวข้องกับผลตัวนั้นก่อน ทำได้โดยการใช้ตารางของเครื่องหมายบวกและลบ เช่น ตารางที่ 2.9 และ 2.11 เป็นต้น อย่างไรก็ตามสำหรับ k ที่มีค่ามาก วิธีการเช่นนี้จะทำให้เกิดความล่าช้าในการใช้งาน ดังนั้นควรใช้วิธีการหนึ่งคือ ขยายทางด้านขวามือของสมการคอนแทรสต์

ตารางที่ 2.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบ 2^k

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom
k main effects		
A	SS_A	1
B	SS_B	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
K	SS_K	1
$\binom{k}{2}$ two-factor interactions		
AB	SS_{AB}	1
AC	SS_{AC}	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
JK	SS_{JK}	1
$\binom{k}{3}$ three-factor interactions		
ABC	SS_{ABC}	1
ABD	SS_{ABD}	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
LJK	SS_{LJK}	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$\binom{k}{k}$ 1 k-factor interactions		
ABC...K	$SS_{ABC...K}$	1
Error	SS_E	$2^k(n-1)$
Total	SS_T	$n2^k - 1$

$$Contrast_{AB...K} = (a \pm 1)(b \pm 1) \dots (k \pm 1) \quad (2.15)$$

ในการขยายสมการ 2.19 จะใช้พีชคณิตเบื้องต้นเข้ามาช่วย และแทนค่า 1 ในสูตรที่คำนวณได้ครั้งสุดท้ายด้วย (1) สัญลักษณ์ในวงเล็บแต่ละชุดจะเป็นค่าลบ ถ้าปัจจัยนั้นได้ถูกรวมไว้ในคอนแทรสต์และเป็นค่าบวก ถ้าปัจจัยนั้นไม่ได้ถูกรวมเอาไว้

เพื่อเป็นการแสดงให้เห็นถึงการใช้อย่างสมการ 2.19 พิจารณาการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 ค่าคอนแทรสต์ของ AB หาได้จาก

$$\begin{aligned} Contrast_{AB} &= (a-1)(b-1)(c+1) \\ &= abc + ab + c + (1) - ac - bc - a - b \end{aligned}$$

ตัวอย่างถัดมา ในการออกแบบ 2^5 ค่าคอนแทรสต์ของ ABCD คือ

$$\begin{aligned} \text{Contrast}_{ABCD} &= (a-1)(b-1)(c-1)(d-1)(e+1) \\ &= abcde + cde + bde + ade + bce + ace + abe + e \\ &\quad + abcd + cd + bd + ad + bc + ac + ab + (1) - a - b \\ &\quad - c - abc - d - abd - acd - bcd - ae - be - ce \\ &\quad - abce - de - abde - acde - bcde \end{aligned}$$

เมื่อคำนวณค่าคอนแทรสต์สำหรับผลต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว สามารถที่จะประมาณค่าผลต่าง ๆ และคำนวณค่าของผลรวมของกำลังสองได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$AB \dots K = \frac{2}{n2^k} (\text{Contrast}_{AB \dots K}) \quad (2.16)$$

$$SS_{AB \dots K} = \frac{2}{n2^k} (\text{Contrast}_{AB \dots K})^2 \quad (2.17)$$

ตามลำดับ โดยที่ n แทนจำนวนของเรพลีเคต

3.4) การออกแบบ 2^k แบบ 1 เรพลีเคต

สำหรับการทดลองที่จำนวนของปัจจัยที่อยู่ในความสนใจมีปานกลาง จำนวนทั้งหมดของการทดลองร่วมปัจจัยของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k จะมีขนาดใหญ่ ตัวอย่างเช่น การออกแบบ 2^7 จะประกอบไปด้วย 32 การทดลองร่วมปัจจัย และเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ เนื่องจากความจำกัดของทรัพยากร ทำให้จำนวนของเรพลีเคตที่จะเกิดขึ้นในการทดลองนั้น ๆ อาจจะมีค่าจำกัด มีบ่อยครั้งที่สามารถทำการทดลองได้เพียงเรพลีเคตเดียวเท่านั้น หรือมีจนนั้นแล้ว ผู้ทำการทดลองจะต้องตัดปัจจัยเริ่มต้นบางตัวทิ้ง สำหรับกรณีเช่นนี้ ผู้ทำการทดลองจะต้องตั้งสมมติฐานไว้ก่อนหน้านี้อย่างไรก็ตาม ความผิดพลาดแบบสุ่มหรือสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลองนั้นมีค่าน้อย

บางครั้งเรียก การทดลอง 2^k แบบ 1 เรพลีเคต ว่าแฟกทอเรียลแบบไม่มีเรพลีเคต เมื่อทำการทดลองเพียง 1 เรพลีเคต จะไม่สามารถหาค่าประมาณสำหรับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ วิธีการหนึ่งที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์แฟกทอเรียลแบบไม่มีเรพลีเคตนี้คือ การสมมุติให้อันตรกิริยาที่อยู่ในขั้นสูง (High Order) มีค่าน้อยลงและตัดทิ้งได้และรวมค่ากำลังสองเฉลี่ยของพวกอันตรกิริยาพวกนี้เข้าด้วยกัน เพื่อใช้ประมาณค่าความผิดพลาดแนวความคิดนี้มาจากหลักการของผลที่มีนัยสำคัญเกิดจากปัจจัยจำนวนน้อย (Scarcity of effects) กล่าวคือผลที่มีต่อระบบส่วนมากจะเป็นผลที่มาจากผลหลักและอันตรกิริยาที่อยู่ในขั้นต่ำ และอันตรกิริยาที่อยู่ในขั้นสูงจะมีค่าน้อยและสามารถตัดทิ้งได้

ในบางครั้งเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลจากการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบไม่มีเรพลิเคต อาจพบว่าอันตรกิริยาที่อยู่ในขั้นสูงมีผล การใช้วิธีการดังกล่าวข้างต้นจะไม่เหมาะสมสำหรับกรณีเช่นนี้ ดังนั้น จะใช้วิธีการตรวจสอบกราฟ การพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าประมาณของผลแทนที่สามารถตัดทิ้งได้จะมีการกระจายแบบปกติ ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และความแปรปรวน σ^2 และค่าเหล่านี้จะเรียงตัวอยู่บนเส้นตรงของกราฟที่สร้างขึ้นมา และในแบบจำลองเบื้องต้นที่สร้างขึ้นมาก็ควรจะประกอบด้วยปัจจัยที่มีค่าเฉลี่ยไม่เท่ากับศูนย์ โดยดูจากกราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติและผลที่ไม่มีผลจะถูกนำมารวมกันเพื่อใช้เป็นตัวแทนค่าของความผิดพลาด

3.5) การเพิ่มจุดศูนย์กลางให้แก่การออกแบบ 2^k

การใช้งานการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ คือ สมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ของผลที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่าง ๆ ถ้าพจน์ของอันตรกิริยาถูกเติมเข้าไปในผลหลักหรือแบบจำลองขั้นแรก (First-Order Model) นั่นคือ

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.18)$$

ดังนั้นมีแบบจำลองที่สามารถแสดงส่วนโค้งบางประการในฟังก์ชันของผลตอบส่วนโค้งนี้เกิดจากการบิดเบี้ยวของระนาบ (Plane) ที่ถูกทำให้เกิดขึ้นจากผลของอันตรกิริยา $\beta_{ij} x_i x_j$ นั่นเอง มีบางกรณีเช่นกันที่ส่วนโค้งในฟังก์ชันผลตอบไม่เพียงพอที่จะสร้างสมการของแบบจำลองตามแบบข้างบนนี้ได้ ในกรณีเช่นนี้แบบจำลองที่เหมาะสมกว่าก็คือ

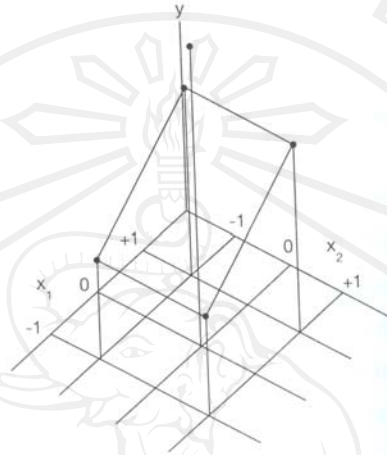
$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \varepsilon \quad (2.19)$$

โดยที่ β_{ij} จะแสดงถึงผลขั้นที่สอง (Second-Order Effect) หรือผลแบบควอดราติก (Quadratic Effect) และสมการ 2.23 นี้เรียกว่า แบบจำลองพื้นผิวของผลตอบขั้นที่สอง (Second-Order Response Surface Model)

ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ จะใช้สมการของแบบจำลองขั้นแรกมากกว่า แต่ก็เป็นไปได้เช่นกันที่บางครั้งพบว่าแบบจำลองขั้นที่สองดูจะเหมาะสมกว่า ในกรณีเช่นนี้มีวิธีการเรพลิเคตการทดลองบางจุดในแฟกทอเรียล 2^k ที่จะทำให้การป้องกันส่วนโค้งที่เกิดจากผลขั้นที่สองนี้ และนอกจากนั้นยังทำให้เราสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดได้อย่างอิสระอีกด้วย วิธีการเช่นนี้เกิดจากการเติมจุดศูนย์กลางให้แก่การออกแบบ 2^k และจะทำการทดลองจำนวน n เรพลิเคต ที่จุดส่งผลต่อการประมาณค่าผลตามปกติของการ

ออกแบบ 2^k แต่ประการใด เมื่อเติมจุดศูนย์กลางเข้าไปเช่นนี้ จะสมมติให้ปัจจัยทั้ง k ตัวนี้เป็นข้อมูลเชิงปริมาณ

เพื่อแสดงวิธีการดังกล่าว พิจารณาการออกแบบ 2^2 ที่มีข้อมูล 1 ตัวที่แต่ละจุดของแฟกทอเรียล $(-, -)$, $(+, -)$, $(-, +)$ และ $(+, +)$ และมีข้อมูลที่จุดศูนย์กลาง $(0, 0)$ อยู่ n_c ตัว ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 2.33



รูป 2.33 การออกแบบ 2^2 ที่มีจุดศูนย์กลาง

กำหนดให้ $\bar{y}_F$ เป็นค่าเฉลี่ยของการทดลอง 4 ค่าที่จุดทั้ง 4 ของแฟกทอเรียล และกำหนดให้ $\bar{y}_C$ เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูล n ที่จุดกึ่งกลาง ถ้าผลต่างระหว่าง $\bar{y}_F - \bar{y}_C$ มีค่าน้อย จุดศูนย์กลางนี้จะอยู่บนหรือใกล้กับระนาบที่ผ่านจุดแฟกทอเรียล และจะไม่มีส่วนโค้งแบบควอดราติก ค่าผลรวมของกำลังสองสำหรับส่วนโค้งแบบควอดราติกบริสุทธิ์ (Pure Quadratic Curvature) ซึ่งมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 1 หาได้จาก

$$SS_{\text{Pure-quadratic}} = \frac{n_F n_C (\bar{y}_F - \bar{y}_C)^2}{n_F + n_C} \quad (2.20)$$

โดยที่ n_F คือจำนวนของจุดในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล คำนี้อาจจะถูกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบกับค่าผิดพลาดของกำลังสองเฉลี่ย เพื่อที่จะทดสอบความเป็นส่วนโค้งแบบบริสุทธิ์ เมื่อเติมจุดเข้าไปที่จุดศูนย์กลางของการออกแบบ 2^k การทดสอบส่วนโค้งดังสมการที่ 2.24 ก็คือการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับ

$$H_0 : \sum_{j=1}^k \beta_{jj} = 0$$

$$H_1 : \sum_{j=1}^k \beta_{jj} \neq 0$$

และถ้าจุดของแฟกทอเรียลในการออกแบบเป็นแบบไม่มีเรฟลิคต สามารถใช้จุดศูนย์กลาง n_c นี้ในการสร้างตัวประมาณของความผิดพลาด ซึ่งมีระดับชั้นความเสรีเท่ากับ $n_c - 1$ ขึ้นได้อีกด้วย

4) การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ

การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลถูกนำมาใช้มากในการกรองเพื่อหาปัจจัยที่มีผล กล่าวคือ ในการทดลองหนึ่งอาจจะมีปัจจัยมากมายที่กำลังอยู่ในความสนใจในการออกแบบ เช่นนี้ เพื่อค้นหาว่าปัจจัยตัวใดบ้างเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ การทดลองเพื่อกรองปัจจัยนี้ ส่วนมากใช้ในตอนเริ่มต้นโครงการ เนื่องจากโดยมากแล้วในขณะนั้นจะมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะเป็นปัจจัยที่มีผลน้อยหรือไม่มีผลต่อผลตอบที่กำลังพิจารณาอยู่ หลังจากทำการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเสร็จสิ้นแล้ว ปัจจัยที่มีผลจะถูกนำไปทำการทดลองอย่างละเอียดในการทดลองต่อ ๆ ไป ที่จะตามมาในอนาคต

ความสำเร็จของการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลขึ้นอยู่กับแนวคิดที่สำคัญ

3 ประการ คือ

- หลักการที่ว่าปัจจัยจำนวนน้อยที่มีผล เมื่อมีตัวแปรหลายตัว การดำเนินการต่าง ๆ ของระบบหรือกระบวนการมีแนวโน้มที่จะถูกกำหนด โดยปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระดับต่ำเพียงบางตัวเท่านั้น

- คุณสมบัติการฉายการออกแบบ การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลสามารถถูกฉายไปสู่การออกแบบที่ดีกว่าในเซตย่อยของปัจจัยที่มีผล

- การทดลองต่อเนื่อง เป็นไปได้ที่จะรวมการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล 2 การทดลองหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน เพื่อที่จะทำให้เกิดการทดลองอย่างต่อเนื่องที่มีการออกแบบที่ใหญ่กว่า และสามารถประมาณผลของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่อยู่ในความสนใจได้ดียิ่งขึ้น

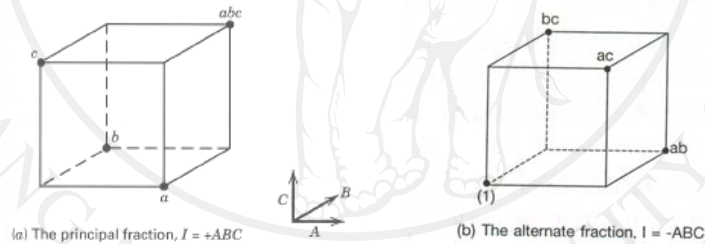
4.1) ครึ่งจำนวนของการออกแบบ 2^k

เมื่อทดสอบผลของ 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ แต่ปรากฏว่าไม่สามารถทำการทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด $2^3 = 8$ การทดลองได้ ทรัพยากรที่มีอยู่ยอมให้ทดลองได้เพียง 4 การทดลองเท่านั้น เพราะว่าการออกแบบประกอบด้วยทำการทดลองร่วมปัจจัย จำนวน $2^{3-1} = 4$ การทดลอง ซึ่งก็คือ ครึ่งจำนวนของการออกแบบ 2^3 หรืออาจเรียกว่าเป็นการออกแบบ 2^{3-1}

สมมติว่าการทดลองร่วมปัจจัย a, b, c และ abc เป็นเศษส่วนครึ่งหนึ่ง ซึ่งการทดลองเหล่านี้แสดงอยู่ในตารางที่ 2.13 และรูปที่ 2.34

ตารางที่ 2.13 เครื่องหมายบวกและลบสำหรับการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3

Treatment	Factorial Effect							
	1	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
a	+	+	-	-	-	-	+	+
b	+	-	+	-	-	+	-	+
c	+	-	-	+	+	-	-	+
abc	+	+	+	+	+	+	+	+
ab	+	+	+	-	+	-	-	-
ac	+	+	-	+	-	+	-	-
bc	+	-	+	+	-	-	+	-
(1)	+	-	-	-	+	+	+	-



รูป 2.34 ครึ่งจำนวนของการออกแบบ 2^3

สังเกตว่าการออกแบบ 2^{3-1} ถูกสร้างขึ้นมาโดยเลือกจากการทดลองร่วมปัจจัยที่มีค่าในคอลัมน์ ABC เป็นบวก ดังนั้นเรียก ABC ว่า “ตัวก่อกำเนิด” (Generator) ของเศษส่วนนี้ นอกจากนั้นคอลัมน์เอกลักษณ์ I จะมีค่าเป็นบวกเสมอ ดังนั้นเราจะเรียก $I = ABC$ ว่าเป็นตัวกำหนดความสัมพันธ์ของการออกแบบ โดยปกติแล้วตัวกำหนดความสัมพันธ์สำหรับการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลจะหมายถึง เซตของคอลัมน์ทั้งหมดที่เท่ากับคอลัมน์เอกลักษณ์ I

การทดลองร่วมปัจจัยในการออกแบบ 2^{3-1} จะมีระดับขั้นความเสรีที่สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่าของผลหลักได้เท่ากับ 3 เมื่อย้อนไปดูตารางที่ 2.14 จะพบว่าผลรวมเชิงเส้นของข้อมูลที่จะนำมาประมาณค่าของผลหลัก A, B และ C คือ

$$I_A = \frac{1}{2}(a - b - c + abc)$$

$$I_B = \frac{1}{2}(-a + b - c + abc)$$

$$I_C = \frac{1}{2}(-a - b + c + abc)$$

นอกจากนั้นแล้วผลรวมเส้นที่ใช้สำหรับประมาณอันตรกิริยาแบบสองปัจจัยหาได้จาก

$$I_{BC} = \frac{1}{2}(a - b - c + abc)$$

$$I_{AC} = \frac{1}{2}(-a + b - c + abc)$$

$$I_{AB} = \frac{1}{2}(-a - b + c + abc)$$

ดังนั้นเมื่อ $I_A = I_{BC}$, $I_B = I_{AC}$ และ $I_C = I_{AB}$ ซึ่งหมายความว่าไม่สามารถที่จะแยกความแตกต่างระหว่าง A และ B, B และ AC, และ C และ AB ได้ในความเป็นจริงแล้ว เมื่อเราประมาณค่าของ A, B และ C จะประมาณค่าของ A + BC, B + AC, และ C + AB ด้วยเรานิยามผลของสองปัจจัยหรือมากกว่าที่มีคุณสมบัติเช่นนี้ว่า “คู่แฝดแฝง” (Alias) ในตัวอย่างนี้ A และ BC เป็นคู่แฝดแฝงซึ่งกันและกัน, B และ AC เป็นคู่แฝดแฝงซึ่งกันและกัน, และ C และ AB เป็นคู่แฝดแฝงซึ่งกันและกัน โดยบ่งชี้ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ด้วยสัญลักษณ์ $I_A \rightarrow A + BC$, $I_B \rightarrow B + AC$ และ $I_C \rightarrow C + AB$

โครงสร้างของคู่แฝดแฝงสำหรับการออกแบบนี้สามารถหาได้โดยใช้ตัวกำหนดความสัมพันธ์ $I = ABC$ โดยคุณคอด้านใด ๆ ด้วยตัวกำหนดความสัมพันธ์จะได้คู่แฝดแฝงสำหรับผลตัวนั้น ตัวอย่างเช่น ต้องการหาคู่แฝดแฝงของ A ทำได้โดย

$$A \cdot I = A \cdot ABC = A^2 BC$$

เนื่องจากว่ากำลังสองของคอด้านใด ๆ จะมีค่าเท่ากับ I ดังนั้น $A = BC$ ในทำนองเดียวกัน เราจะหาคู่แฝดแฝงของ B และ C ได้จาก

$$B \cdot I = B \cdot ABC$$

$$B = AB^2 C = AC$$

$$C \cdot I = C \cdot ABC$$

$$C = ABC^2 = AB$$

เราเรียกเศษส่วนครึ่งหนึ่งที่มี $I = ABC$ ว่า “เศษส่วนหลัก” (Principal Fraction) สมมติว่าเราเลือกเศษส่วนอีกครั้งหนึ่งแทน (เรียกว่า Alternate หรือ Complementary $\frac{1}{2}$ Fraction) นั่นคือ เลือกการทดลองร่วมปัจจัยในตารางที่ 2.14 ที่มีเครื่องหมายของคอด้าน ABC เป็นลบ เศษส่วนอีกครั้งหนึ่ง (ประกอบไปด้วย (1), ab, ac, และ bc) แสดงดังรูปที่ 2.33b ตัวกำหนด

ความสัมพันธ์ของการออกแบบนี้คือ ผลรวมเชิงเส้นสำหรับข้อมูลจากเศษส่วนอีกครั้งหนึ่งจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$I'_A \rightarrow A - BC$$

$$I'_B \rightarrow B - AC$$

$$I'_C \rightarrow C - AB$$

เมื่อเราประมาณค่า A, B และ C โดยใช้เศษส่วนชุดนี้ เราจะประมาณค่าของ A - BC, B - AC และ C - AB ในทางปฏิบัติสามารถใช้ได้ทั้งเศษส่วนชุดที่อยู่ในครั้งแรกหรือครั้งหลังก็ได้ ทั้งนี้เพราะเศษส่วนทั้งสองจะอยู่ในกรอบคร่าวเดียวกันนั่นคือเศษส่วนทั้งสองครั้งนี้จะทำให้เกิดเป็นการออกแบบ 2^3 แบบบริบูรณ์ ซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 2.33a และ 2.33b

สมมุติว่าหลังจากที่ทดลองกับครั้งแรกของการออกแบบ 2^3 เรียบร้อยแล้ว เราตัดสินใจที่จะทดลองกับอีกครั้งหนึ่งด้วย ดังนั้นในที่นี้การทดลองร่วมปัจจัยทั้ง 8 ของการออกแบบ 2^3 แบบบริบูรณ์ได้ถูกดำเนินการขึ้น จะได้ตัวประมาณ De-Aliased ของผลทั้งหมดโดยการวิเคราะห์การทดลองร่วมปัจจัยทั้งแปดเหมือนกับการออกแบบ 2^3 แบบบริบูรณ์ที่ประกอบด้วย 2 บล็อก และมี 4 การทดลองในแต่ละบล็อก ซึ่งสามารถทำได้โดยการบวกและลบผลรวมเชิงเส้นของปัจจัยที่เกิดจากเศษส่วนทั้งสอง ตัวอย่างเช่น $I_A \rightarrow A + BC$ และ $I'_A \rightarrow A - BC$ ซึ่งหมายความว่า

$$\frac{1}{2}(I_A - I'_A) = \frac{1}{2}(A + BC - A + BC) \rightarrow A \text{ และ}$$

$$\frac{1}{2}(I_A + I'_A) = \frac{1}{2}(A + BC + A - BC) \rightarrow BC$$

ดังนั้น สำหรับผลรวมเชิงเส้นทั้ง 3 คู่ เราจะได้ดังตาราง 2.14

ตารางที่ 2.14 ผลรวมเชิงเส้นทั้ง 3 คู่ ของปัจจัย A, B และ C

i	From $\frac{1}{2}(I_i + I'_i)$	From $\frac{1}{2}(I_i - I'_i)$
A	A	BC
B	B	AC
C	C	AB

4.2) การสร้างการออกแบบครั้งจำนวน

เศษส่วนครั้งจำนวนของการออกแบบ 2^k ที่มีมิติสูงสุดสร้างได้จากการออกแบบเบื้องต้น (Basic Design) ซึ่งประกอบไปด้วย แฟกทอเรียลแบบบริบูรณ์ 2^{k-1} แล้วเติมปัจจัยตัวที่ k ลงไป โดยกำหนดให้เครื่องหมายบวกและลบของปัจจัยที่ k นี้มีค่าเหมือนกันกับ

เครื่องหมายของ อันตรกิริยาขั้นสูงสุด $ABC...(K-1)$ ดังนั้น เศษส่วนแฟกทอเรียลแบบ 2_{III}^{k-1} หาได้จากการเขียนแฟกทอเรียลแบบ 2^2 ให้เป็นการออกแบบเบื้องต้น และหาค่า C จากอันตรกิริยา AB เศษส่วนอีกชุดหนึ่งหาได้โดยให้ C เท่ากับ $-AB$ วิธีการนี้แสดงไว้ดังตารางที่ 2.15 สังเกตว่าการออกแบบเบื้องต้นจะมีจำนวนการทดลองรวมปัจจัย (แถว) ที่ครบถูกต้อง แต่จะขาดอยู่ 1 คอลัมน์ จะใช้ $I = ABC...K$ ในการหาคอลัมน์ที่ K ขาดหายไป ดังนั้นใช้ค่า $K = ABC...(K-1)$ ในการกำหนดเครื่องหมายบวกและลบที่จะใช้กับปัจจัยตัวที่ k

ตามความเป็นสามารถนำผลของอันตรกิริยาตัวใดๆมาใช้ในการสร้างคอลัมน์ สำหรับปัจจัยตัวที่ k ก็ได้แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าใช้ผลของอันตรกิริยาตัวอื่น ๆ นอกเหนือจาก $ABC...(K-1)$ แล้ว การออกแบบนี้จะก่อให้เกิดการออกแบบที่มีมิติสูงสุดที่เป็นไปได้

อีกวิธีหนึ่งในการสร้างการออกแบบเศษส่วนครึ่งจำนวนคือ แบ่งการทดลองทั้งหมดออกเป็น 2 บล็อกโดยใช้ $ABC...K$ เป็นตัวคอนฟาวด์ ซึ่งในแต่ละบล็อกคือการออกแบบเศษส่วนแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-1} ซึ่งมีมิติสูง

ตารางที่ 2.15 เศษส่วนครึ่งจำนวนของการออกแบบ 2^3 ทั้งสองแบบ

Run	Full 2^2 Factorial (Basic Design)		$2_{III}^{3-1} = ABC$			$2_{III}^{3-1} = -ABC$		
	A	B	A	B	C = AB	A	B	C = -AB
1	-	-	-	-	+	-	-	-
2	+	-	+	-	-	+	-	+
3	-	+	-	+	-	-	+	+
4	+	+	+	+	+	+	+	-

4.3) ลำดับของเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล

การใช้การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลจะนำไปสู่การทดลองที่มีประสิทธิภาพและประหยัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อการทดลองสามารถกระทำได้อย่างเป็นลำดับ ตัวอย่างเช่น สมมติว่าต้องการตรวจสอบปัจจัย $k = 4$ ($2^4 = 16$ การทดลองควรเริ่มต้นด้วยการออกแบบเศษส่วน 2_{IV}^{4-1} (8 การทดลอง) ทำการวิเคราะห์ผล และตัดสินใจว่าอะไรเป็นเขตของการทดลองที่เหมาะสมที่จะทำต่อไป ถ้าเราต้องการที่จะแก้ปัญหาที่ยังค้างคามอยู่ยังสามารถที่จะทำการทดลองกับการออกแบบเศษส่วนอีกครั้งหนึ่งได้ ซึ่งจะทำให้ได้การออกแบบ 2^4 แบบบริบูรณ์ เมื่อวิธีการเช่นนี้ถูกใช้สำหรับการออกแบบบริบูรณ์ ทั้งสองครั้งของการออกแบบเศษส่วนจะเป็นบล็อก

ของการออกแบบบริบูรณ์ซึ่งอันตรกิริยาขั้นสูงสุดถูกคอนฟาวด์อยู่ภายในบล็อก (ABCD ถูกคอนฟาวด์) ดังนั้นการทดลองอย่างเป็นลำดับนี้ทำให้เราสูญเสียข่าวเกี่ยวกับอันตรกิริยาขั้นสูงสุดเท่านั้น ประโยชน์คือมีหลายกรณีที่เราสามารถเรียนรู้สิ่งต่าง ๆ ได้อย่างพอเพียงจากการทดลองกับการออกแบบเศษส่วนนี้ เพื่อที่จะนำไปสู่การทดลองที่เหมาะสมที่จะตามมา ซึ่งการทดลองที่ตามมาเกี่ยวข้องกับการเพิ่มหรือลดปัจจัย เปลี่ยนผลตอบหรือเปลี่ยนค่าของปัจจัยให้อยู่ในช่วงใหม่

5) การหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) (สุจินดา, 2548)

เป็นกระบวนการสำหรับพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เป็นไปได้ที่ดีที่สุดในกลุ่มหรือประเภทของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ค่าที่เหมาะสมจะต้องตอบสนองหรือบรรลุถึงวัตถุประสงค์ 3 ประการ ดังนี้

1. ค่าที่เหมาะสมจะต้องเป็นค่าที่ได้รับการยอมรับสูงสุดโดยเป็นค่าที่เป็นไปได้ที่ดีที่สุด เมื่อมีการกำหนดกลุ่มของค่าตัวแปร

2. ค่าที่เหมาะสมจะต้องอยู่ในภายใต้ข้อจำกัดทางด้านต้นทุนที่สมเหตุสมผล

3. ค่าที่เหมาะสมควรมีคุณลักษณะอยู่ในระดับมาตรฐานของบริษัท

ข้อดีของการเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) มีดังนี้ คือ

1. เป็นวิธีการที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพในด้านต้นทุนหลักเกี่ยวกับการทดลองซ้ำ

2. เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพทางสถิติเพราะอิทธิพลร่วมระหว่างตัวแปรอิสระและอิทธิพล หรือความสัมพันธ์แบบหุ่นกำลังสอง ที่มีต่อค่าผลตอบสามารถคาดคะเนได้

3. วิธีการหาค่าที่เหมาะสม ให้ฐานข้อมูลที่ตอบคำถามหลายประการ เช่น ถ้าที่สภาวะ A มีต้นทุนการผลิตสูง การจะหาสภาวะใหม่ที่ต้นทุนลดลง ไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบเต็มรูปแบบอีกครั้ง เนื่องจากฐานข้อมูลที่มีสามารถจะให้คำตอบที่ต้องการได้ อย่างไรก็ตาม การตรวจสอบยืนยันสมการนั้นว่ามีความจำเป็น

อย่างไรก็ตามการหาค่าที่เหมาะสมอาจคลาดเคลื่อนได้หากไม่มีความระมัดระวังในระหว่างขั้นการวางแผนศึกษา ในเรื่องดังนี้

- ไม่ได้มีการระบุปัจจัยหรือตัวแปรที่มีผลต่อค่าตอบสนองอย่างถูกต้อง
- การระบุระดับต่ำหรือระดับสูงของปัจจัยอาจไม่ถูกต้อง ดังนั้นการทดลองเบื้องต้นจึงเป็นสิ่งจำเป็น หากไม่สามารถหาข้อมูลได้
- การใช้พื้นที่การตอบสนองเกินกว่าปกติโดยไม่มีการตรวจสอบจุดที่เหมาะสม

- การเลือกใช้แบบการทดลองและการเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่

ถูกต้อง

6) การแจกแจงแบบปัวส์ซอง (Poisson Distribution)

การแจกแจงแบบปัวส์ซอง (Poisson Distribution) เป็นรูปแบบการนับจำนวนข้อบกพร่องหรือจำนวนรอยตำหนิที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ โดยมีสมการการแจกแจงดังนี้

$$p(x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!} \quad x = 0, 1, \dots \quad (2.21)$$

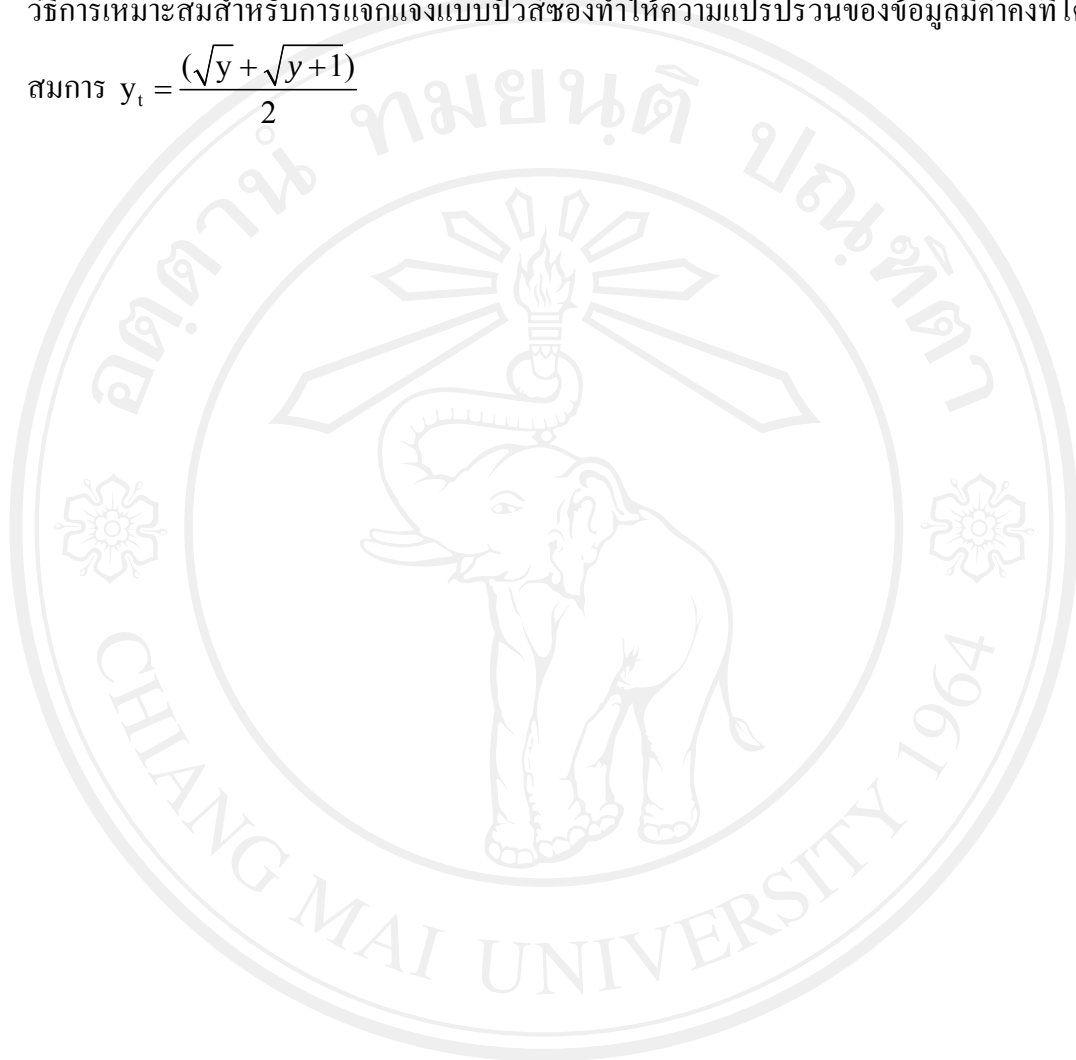
โดย $\lambda > 0, \mu = 1$ และ $\sigma^2 = 1$

ผลตอบของการแจกแจงแบบปัวส์ซอง คือ ความแปรปรวนของข้อมูลจะไม่คงที่ขึ้นอยู่กับผลค่าเฉลี่ยของข้อมูล การพิจารณาความแปรปรวนที่ไม่คงที่สามารถพิจารณาได้จากกราฟของการแจกแจงแบบปกติ (Normal probability plot) โดยที่ข้อกำหนดสำคัญของการแจกแจงแบบปกติคือจะมีค่า $\mu = 0$ และ $\sigma^2 = 1$, $y \sim N(0,1)$ ซึ่งถ้าไม่มีการแจกแจงแบบปกติแสดงว่าค่าความแปรปรวนของข้อมูลไม่เท่ากับ 1 ($\sigma^2 \neq 1$) หรือมีค่าไม่คงที่

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงแฟกทอเรียลกับจำนวนรอยตำหนิหรือของเสียที่เป็นผลตอบ Bisgaard and Fuller (1992) ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตวัดจากจำนวนรอยตำหนิหรือจำนวนของเสีย การลดจำนวนรอยตำหนิของเสียเป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการ การออกแบบการทดลองที่ความแปรปรวนของข้อมูลไม่คงที่มีผลต่อการวิเคราะห์ข้อมูล วิธีการในการจัดการเกี่ยวกับความแปรปรวนที่ไม่คงที่คือ การแปลงข้อมูลก่อนการวิเคราะห์ มีวิธีการหลายวิธีที่สามารถนำมาใช้เพื่อให้ได้ค่าความแปรปรวนที่คงที่ของการนับจำนวนรอยและจำนวนของเสีย ในกรณีที่ผลตอบคือการนับจำนวนของเสียการผลิตชิ้นงาน n ชิ้นและทำการตรวจสอบว่าชิ้นงานนั้นดีหรือเสียเช่นการตรวจสอบว่ามีรอยรอยตำหนิหรือไม่และนับจำนวนชิ้นงานที่เสียพบ y ชิ้น โดยจำนวนที่นับได้ถือเป็นของเสีย หรือเป็นการใช้จำนวนของเสียเป็นผลตอบของเสียที่นับได้อาจจะเป็นได้ตั้งแต่ 0,1,2,3 ถึง n

การนับจำนวนรอยตำหนิใช้สัญลักษณ์ y หรือ y_i สำหรับจำนวนรอยตำหนิที่ถูกประมาณจากกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งจำนวนรอยตำหนิต่อหน่วยแทนด้วย λ โดยข้อมูลจำนวนรอยตำหนิบนชิ้นงานมีการแจกแจงแบบปัวส์ซอง จากลักษณะข้อมูลของการแจกแจงชนิดนี้ ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวน ของข้อมูลมีค่าเท่ากัน ($\mu = \sigma^2 = \lambda$) หรือขนาดความแปรปรวนขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยอย่างไรก็ตามเมื่อต้องการค่าความแปรปรวนที่คงที่สำหรับจำนวนรอยตำหนิที่นับได้ต้องแปลงข้อมูลโดยใช้ $\sqrt{y}$

บางกลุ่มตัวอย่างหรือบางชิ้นงานจำนวนรอยตำหนิที่นับได้อาจมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งทำให้ความแปรปรวนไม่คงที่ การแปลงค่าข้อมูลด้วยวิธีการของ Freeman and Turkey เป็นวิธีการเหมาะสมสำหรับการแจกแจงแบบปัวส์ซองทำให้ความแปรปรวนของข้อมูลมีค่าคงที่โดยใช้สมการ $y_t = \frac{(\sqrt{y} + \sqrt{y+1})}{2}$



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved