

## บทที่ 2

### หลักการพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 หลักการพื้นฐานเกี่ยวกับโพลีเมอร์

##### 2.1.1 โพลีโพรพิลีน (Polypropylene : PP)

โพลีโพรพิลีน (Polypropylene : PP) จัดเป็น โพลีโอเลฟินอีกชนิดหนึ่งที่สำคัญจัดอยู่ในโพลีเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก(Thermoplastic) มีคุณสมบัติหลายอย่างทั้ง chemical resistance ที่ดีเยี่ยม ความหนาแน่นต่ำ และมีจุดหลอมเหลวสูงที่สุดในบรรดาเทอร์โมพลาสติก รวมทั้งมีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับคุณสมบัติ

โพลีโพรพิลีนแตกต่างจากโพลีเอทิลีนตรงที่มีกลุ่มเมทิลติดกับอะตอมของคาร์บอนรวมทั้งยังมีจุดหลอมเหลวและความแข็งแรงของวัสดุภายใต้แรงดึง (tensile strength) สูงกว่า แต่มีความเป็นผลึกน้อยกว่าโพลีเอทิลีน โพลีโพรพิลีนสามารถจัดได้ 3 กลุ่ม คือ

1. PP Homopolymer เป็น โพลีเมอร์พื้นฐานของโพลีโพรพิลีน ไม่ใส่สารเติมแต่ง
2. PP impact copolymers เป็น โพลีโพรพิลีนที่ใส่สารเติมแต่ง (Modifier) ด้านการกันกระแทกเพิ่มเข้าไป โดยทั่วไปจะใช้อีลาสโตเมอร์ เช่น ethylene/ propylene rubber (EPR) การเพิ่ม impact modifier ด้วยการทำให้ blending
3. PP random copolymers เป็น โพลีโพรพิลีนที่ถูกเติมแต่งด้วย โมนอเมอร์ที่ต่างกัน เอทิลีนเป็น โค โมนอเมอร์ที่ใช้เติมมากที่สุด ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพคือ optimal property และ impact resistance ที่ดีขึ้น Flexibility ที่สูงขึ้น และลดจุดหลอมเหลวลง โพลีโพรพิลีนชนิดนี้ใช้ใน blow molding, injection molding และ extrusion

## ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของโพลีโพรพิลีน

| Property                  | Unit               | Polypropylene(Homopolymer) |
|---------------------------|--------------------|----------------------------|
| Density                   | g/cm <sup>2</sup>  | 0.90                       |
| Crystalline melting point | °C                 | 176                        |
| Tensile strength          | MPa                | 28                         |
|                           | lb/in <sup>2</sup> | 4000                       |
| Elongation at break       | %                  | 200                        |
| Hardness                  | Shore D            | 75                         |
| Softening point, Vicat    | °C                 | 150                        |

(ที่มา : หนังสือ Organics Polymer Chemistry หน้า 56)

### 2.1.2. โพลีเอไมด์ (Polyamides : PA)

โพลีเอไมด์ (Polyamides : PA) จัดอยู่ในประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และยังนับว่าเป็น Engineering Plastic ซึ่งรู้จักกันในชื่อ ไนลอน (Nylon) เป็นโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักเบา มีความทนทานต่อการเสียดสีสูง รับแรงดึงและแรงอัดได้ดี ทนความร้อน ทนการขีดข่วน เป็นฉนวน ไฟฟ้าแต่ไม่เหมาะสำหรับไฟฟ้าแรงสูง ทนกรดชนิดอ่อน ทนด่างได้ทั้งชนิดอ่อนและเข้มข้น เช่น น้ำมัน แอลกอฮอล์ ไขมัน ดูดซับน้ำได้บ้าง ไม่เหมาะกับการใช้ทำเป็นถ้วยชาหรือกาแฟ เพราะจะเป็นคราบติด โดยทั่วไปเนื้อของไนลอนมีความโปร่งแสงในรูปของเส้นใยจะโปร่งใส สามารถทำเป็นสีต่างๆ

ไนลอนสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. ไนลอนที่เกิดจาก condensation ของ dibasic acid และ diamine acid เช่น ไนลอน 6/6 ซึ่งเกิดจาก adipic acid (6 carbons) และยังมีไนลอน -6/9, -6/10 และ -6/12
2. ไนลอนที่ถูกโพลีเมอร์ไรซ์จากการเพิ่มปฏิกิริยาของ ring compound ซึ่งประกอบด้วย acid group และ amine group เช่น ไนลอน 6, -11, -12

ไนลอนส่วนมากเป็นโพลีเมอร์ชนิด semi-crystalline ความเป็นผลึกสามารถควบคุมได้ด้วยนิวคลิชั่น นิวคลิชั่นผลิตไนลอนให้มี tensile yield strength, flexural modulus, creep resistance และ hardness ที่สูง แต่จะสูญเสียด้าน elongation และ impact resistance ไนลอนทุกชนิดจะดูดซับความชื้นจากสิ่งแวดล้อมจนถึงระดับในบรรยากาศ คุณสมบัติการดูดซับนี้จะช่วยเพิ่ม flexibility และ impact resistance เกรดของไนลอนที่ใช้ทางการค้ามีหลายเกรดขึ้นอยู่กับความต้องการ การปรับปรุงไนลอนสามารถทำได้หลายทาง เช่น

1. การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลและ โครงสร้าง
2. เติมสารเติมแต่ง
3. การใช้ filler
4. การผสมไนลอนเข้ากับโพลีเมอร์อื่น (Polymer blend)

ไนลอนสามารถจัดเป็นกลุ่มๆ ได้ดังนี้

1. โฮโมโพลีเมอร์ เป็นไนลอนพื้นฐานซึ่งไม่มีการปรุงแต่ง
  2. โคโพลีเมอร์ บางที่เรียกว่า impact-modified grade ซึ่งเพิ่มความเหนียว (Toughness) และ Flexibility เช่น ไนลอน-6
    3. Reinforces grade มีค่า strength, stiffness และ creep resistance สูง ซึ่งได้จากระบบ filler ต่างๆ คือ chopped glass, การรวมตัวของแก้วและแร่ธาตุ
    4. Rotational molding เป็นเกรดพิเศษของ ไนลอน-6
    5. Blends and alloy ของไนลอน-6 หรือ -6/6 กับโพลีเมอร์อื่น เช่น Nylon/PPE blend มี heat resistance และ dimensional stability ที่ดีเยี่ยม(จาก PPE) และมีความเหนียวกับ processability (จากไนลอน)
    6. Amorphous nylon ทำได้โดยการทำให้เย็นอย่างรวดเร็วในการหลอมเหลว
- กระบวนการขึ้นรูปไนลอนประกอบด้วย Injection molding, Extrusion, Blow molding, Rotational molding และ Thermoforming การนำไนลอนไปใช้งานมีอย่างกว้างขวาง ทั้งในงานอุตสาหกรรมและตลาดทั่วไป เช่น
- ด้าน automotive เช่น wheel hubs, fluid reservoirs, fuel system component
  - ด้านอิเล็กทรอนิกส์ เช่น coil bobbins, wire ties, building wire jacket
  - ด้าน consumer เช่น ล้อจักรยาน, หวี
  - ด้านการบรรจุ เช่น ฟิล์มห่ออาหาร, ถุงสำหรับไมโครเวฟ

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของโพลีเอมีด โดยแบ่งตามเกรด

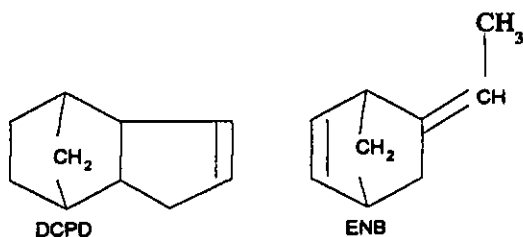
| Property   | Unit               | 6/6     | 6       | 6/9  | 6/10    | 6/12    |
|--|--------------------|---------|---------|------|---------|---------|
| Specific gravity   | g/cm <sup>3</sup>  | 1.14    | 1.13    | 1.09 | 1.09    | 1.07    |
| Crystalline melting point  | °C                 | 264     | 215     | 205  | 215     | 210     |
| Tensile strength   | MPa                | 79      | 76      | 59   | 59      | 59      |
|  | lb/in <sup>2</sup> | 11500   | 11000   | 8500 | 8500    | 8500    |
| Elongation at break  | %                  | 80-100  | 100-200 | -    | 100-150 | 150-300 |
| Impact strength, Izod  | J/m                | 27-53   | 32-53   | 59   | 85-107  | 53-101  |
|  | ft - lb/in         | 0.5-1.0 | 0.6-1.0 | 1.1  | 1.6-2.0 | 1.0-1.9 |
| Heat, distortion temperature at 1.86 MPa (264 lb/in <sup>2</sup> ) | °C                 | 75      | 60      | 60   | 55      | 65      |
| Water absorption saturation  | %                  | 8.0     | 9.0     | -    | 2.4     | 3       |

(ที่มา : หนังสือ ORGANICS POLYMER CHEMISTRY หน้า 203)

### 2.1.3 เอทิลีน-โพรพิลีน-ไดอีน โคลิโพลิเมอร์

(Ethylene-Propylene-Diene Copolymer : EPDM)

การผลิตยางชนิด โพลีเอทิลีนสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ Saturated copolymer (EPM) และ Unsaturated terpolymer (EPDM) ยางเอทิลีนประเภท EPDM สามารถทำวอลคาไนเซชันซัลเฟอร์ได้ และมีไดอีนที่ไม่ชอบรวมเป็นโมโนเมอร์ที่ 3 ทำให้ความเร็วของขบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน ควรจะขึ้นอยู่กับเอทิลีนและโพรพิลีน ที่นิยมใช้มาก 3 อันดับแรกคือ 5-ethylidene-2-norbornene (ENB) 1,4-hexadiene และ dicyclopentadiene (DCPD) ปริมาณของโมโนเมอร์ที่ 3 ในเทอร์โพลิเมอร์จะมีตั้งแต่ 1-2 mol% สิ่งที่น่าสังเกตคือ ความไม่อึดตัวของ EPDM จะอยู่ตรงกลุ่มที่ห้อยลงมา จะไม่อยู่ในแนวกระดูกสัน หลังของตัวมันเอง ดังรูป



รูปที่ 2.1 โมโนเมอร์ที่ให้ความไม่อ่อนตัวในยาง EPDM

ในทางตรงกันข้ามกับ EPM กิ่งก้านถูกใช้ที่ยาวนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของปฏิกิริยา และชนิด ของตัวเร่ง alkylaluminium halide ที่ใช้ ในกรณีของ DCPD ที่เป็น โมโนเมอร์ที่ 3 จะเด่นชัด กว่าในกรณี ของ ENB และ hexadiene โมโนเมอร์ที่ 3 และระบบตัวเร่งที่ใช้จะส่งผลกระทบต่อ การกระจายน้ำหนักโมเลกุลและอื่นๆ

แนวทางการค้าที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุดคือ ethylene-propylene copolymer ซึ่งทำมาจากขบวนการ โพลิเมอร์ไรเซชันของ Ziegler-Natta ตัวอย่างของ a nonconjugated diene terpolymer คือ 1,4-hexadiene ethylidene norbornene หรือ dicyclopentadiene (DCPD) ซึ่งอาจจะถูกนำไปใช้ EPDM มีจำนวนของ double-bond cure sites อยู่ภายนอกกระดูก ถันหลังเล็กน้อย อัตราส่วนของเอทิลีนต่อโพรพิลีนมีค่าตั้งแต่ 50:50 จนถึง 75:25 และ glass transition temperature ( $T_g$ ) โดยทั่วไปคือ  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  EPRs และ EPDM มีความต้านทานต่อ อากาศที่ดีเยี่ยมและทนต่อความร้อนได้ดี ดังนั้นทั้ง EPRs และ EPDM สามารถนำไปทำ เป็นผลึก (crystalline) ที่ให้ green strength สูง แต่มีความสามารถในการติดตรงกับอากาศด้วยตะปูที่ไม่ดีนัก

#### 2.1.4 โพลิเมอร์ผสม (Polymer Blend)

Polymer Blend (PB) เป็นการผสมกันระหว่างโพลิเมอร์หรือ โคโพลิเมอร์อย่างน้อย สองชนิดเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้วัสดุชนิดใหม่ขึ้นมา เหตุผลหลักที่มีการทำโพลิเมอร์ผสมขึ้นมา ก็คือ ด้านเศรษฐศาสตร์ ถ้าวัสดุสามารถมีราคาถูกได้โดยมีคุณสมบัติตามที่กำหนดไว้จะทำให้ผู้ผลิตหันมา ใช้วัสดุประเภท นี้เพื่อการแข่งขันทางการค้า โดยทั่วไปจะมีเหตุผลดังนี้

1. เพิ่มประสิทธิภาพของเรซินทางวิศวกรรมด้วยการเติมโพลิเมอร์ที่มีราคาถูก
2. พัฒนาวัสดุให้มีคุณสมบัติครบตามต้องการ

3. สามารถขึ้นรูปการผสมประสิทธิภาพสูงจากการมีปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่าง โพลีเมอร์

4. ปรับแต่งส่วนประกอบของการผสมให้ได้ตามที่ลูกค้าต้องการ
5. ไร้ขีดขยะพลาสติกทางอุตสาหกรรม

วิธีเลือกส่วนประกอบในการผสมสามารถทำได้โดยเลือกข้อได้เปรียบของโพลีเมอร์ตัวแรกที่สามารถไปลดแรงยึดเหนี่ยวของโพลีเมอร์ตัวที่สองได้ วิธีการผสม(Method of blending) มีทั้งหมด 6 วิธี คือ

1. Mechanical mixing
2. การละลายใน co-solvent แล้วหล่อเป็นแผ่นฟิล์ม, ทำให้แข็ง หรือ spray drying
3. Latex blending เช่น SAN + AB  $\rightarrow$  ABS
4. Fine powders mixing
5. ใช้โมโนเมอร์เป็นสารละลายสำหรับส่วนผสมอื่นแล้วจึงทำโพลีเมอร์ไวเซชัน
6. วิธีอื่นๆของ Interpenetrating polymer network (IPN)

#### 2.1.5 การผสมกลมกลืนกัน (Compatibilization)

การนำโพลีเมอร์มาผสมกันนั้นอาจจะเข้ากันได้หรืออาจจะเข้ากันไม่ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของโพลีเมอร์นั้นๆ ถ้าไม่สามารถเข้ากันได้จะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของชิ้นงานที่ได้ นอกจากคุณสมบัติจะไม่ตรงตามต้องการแล้วยังอาจได้คุณสมบัติที่ต่ำกว่าโพลีเมอร์เดิม ดังนั้นในการทำโพลีเมอร์ผสม (Polymer blend) จึงจำเป็นต้องมีการเติมสารบางชนิดเพื่อช่วยในการผสมซึ่งเรียกว่า Compatibilizer หรือตัวช่วยผสม ด้วยกระบวนการ compatibilization วิธีการทำให้โพลีเมอร์ผสมกลมกลืนกันสามารถทำได้ดังนี้

##### 2.1.5.1 Thermodynamic miscibility

ความเข้ากันได้ระหว่างโพลีเมอร์ที่ผสมจะถูกกำหนดโดยความสมดุลระหว่างเอนทัลปี และเอนโทรปี ซึ่งมีส่วนสนับสนุนต่อพลังงานอิสระของการผสม โมเลกุลที่มีขนาดเล็กจะมีเอนโทรปีสูงพอที่จะแน่ใจว่าสามารถเข้ากันได้ สำหรับโพลีเมอร์ที่มีเอนโทรปีเกือบเป็นศูนย์



เอนทัลปีจะเป็นตัว กำหนดความเข้ากันได้ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการผสม ( $\Delta G$ ) เขียนได้เป็น

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

โดยที่ H คือ เอนทัลปี S คือ เอนโทรปี และ T คือ อุณหภูมิ

สำหรับการเข้ากันได้โดยธรรมชาติ  $\Delta G$  จะเป็นลบ หรือ  $\Delta H - T\Delta S < 0$  หมายความว่า ถ้าเอนทัลปีมีค่าน้อยกว่าศูนย์จะทำให้โพลิเมอร์สามารถเข้ากันได้โดยธรรมชาติ แต่ถ้ามีค่ามากกว่าศูนย์จะทำให้สามารถเข้ากันได้เฉพาะที่อุณหภูมิสูงในการผสมโพลิเมอร์เข้าด้วยกัน ในการผสมสองส่วนเข้าด้วยกันสามารถสร้างเฟสโคอะแกรมที่แสดงให้เห็น lower หรือ upper critical solution temperature (LCST หรือ UCST) การแยกเฟสจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเพราะแรงดึงดูดระหว่าง โมเลกุลมีผลต่อพฤติกรรม การเข้ากันได้จะไม่ปรากฏขณะที่พลังงานภายในของโมเลกุลเริ่มสูงขึ้นเพียงพอจนชนะแรงดึงดูด โดยหลักการแล้วสามารถปรับปรุงโครงสร้างของโพลิเมอร์ในบางกรณี เพื่อปรับปรุงเฟสโคอะแกรมในการผสมและจะสามารถเข้ากันได้ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มส่วนประกอบที่สามเข้าไปก็จะทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงจากสองเฟสไปเป็นเฟสเดียวได้

#### 2.1.5.2 การเพิ่มบล็อกหรือกราฟโคโพลิเมอร์ (Addition of block and graft copolymer)

การเพิ่มบล็อกหรือกราฟโคโพลิเมอร์เป็นที่นิยมน้อยมากที่สุดใน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบล็อกโคโพลิเมอร์ บล็อกโคโพลิเมอร์ประกอบด้วยบล็อกที่มีส่วนประกอบทางเคมีที่เหมือนกับโพลิเมอร์ที่จะผสม ซึ่งไม่ใช่เรื่องแปลกที่จะนำบล็อกที่มีส่วนประกอบทางเคมีบางส่วนเหมือนกับโพลิเมอร์ผสมมาเป็นตัวช่วยผสม (compatibilizer) ความสามารถเข้ากันได้ของโคโพลิเมอร์และการตรงกันของส่วนประกอบที่นำมาผสมจะถูกทำให้แน่ใจ โคลิโพลิเมอร์ควรมีโครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลตามต้องการและอยู่ที่รอยเชื่อมต่อของการผสม โครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลของโคโพลิเมอร์มีผลสำคัญต่อประสิทธิภาพของตัวช่วยผสม ความต้องการที่โคโพลิเมอร์ควรรู้อยู่ที่รอยเชื่อมต่อของการผสมนั้นหมายถึง น้ำหนักโมเลกุลของตัวช่วยผสมทั้ง driving force และ resistive force ที่มีต่อการแพร่กระจายที่เพิ่มขึ้นได้ด้วยน้ำหนักโมเลกุล ดังนั้น โคลิโพลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆ จะถูกนำมาใช้ถ้าเวลาในกระบวนการยาวนาน แต่ที่น้ำหนักโมเลกุลต่ำจะนำมาใช้ถ้าเวลาในการแพร่กระจายมีน้อย

ในขณะที่โคโพลิเมอร์ที่มีส่วนประกอบทางเคมีเหมือนกันกับสารที่นำมาผสมเป็นเทคนิคที่ดีที่สุดสำหรับการผสมกลมกลืนกัน แต่จะมีข้อเสียเปรียบก็คือ หายาก หรือสามารถหาได้แต่มีราคาแพง และถูกจำกัดด้านความยืดหยุ่น เนื่องจากเหตุผลทางการค้าจึงทำให้ตัวช่วยผสมเป็น multicomponent material และบ่อยครั้งที่อาศัยความเข้ากันได้หรือการมีปฏิสัมพันธ์อื่นๆ เพื่อให้ได้ความผสมกลมกลืน กันด้วยส่วนประกอบที่ผสมหนึ่งตัวหรือมากกว่า อย่างเช่น การใช้ styrene-ethylene/butene-styrene (SEBS) triblock copolymer ซึ่งถูกพิสูจน์แล้วว่าทำให้ความผสมกลมกลืนกันของ HDPE กับ PET มีประสิทธิภาพ

#### 2.1.5.3 การเพิ่ม functional polymers

โดยปกติแล้ว โพลิเมอร์ที่มีส่วนประกอบทางเคมีเหมือนกับโพลิเมอร์ผสมตัวหนึ่ง จะถูกปรับปรุงเพื่อให้ได้ functional unit ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับโพลิเมอร์ตัวที่สองในโพลิเมอร์ผสมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี การปรับปรุงด้าน function สามารถทำให้สำเร็จได้ใน reactor หรือ via an extruder-modification process เช่น การรวมเอา grafting ของ maleic anhydride หรือ ส่วนประกอบอื่นที่เหมือนกันเข้ากับโพลิโอเลฟินผลที่ได้คือกลุ่ม carboxyl สามารถฟอร์มตัวเข้ากับ โพลิเอมีด โดยผ่านทาง กลุ่มอะมิโน

#### 2.1.5.4 Reactive blending

วิธีใหม่ของการผสมเทอร์โมพลาสติกให้เข้ากันได้ คือ การผสมแบบมีปฏิกิริยาที่อาศัยการฟอร์มตัวเป็น in situ ของโคโพลิเมอร์หรือการมีปฏิสัมพันธ์กันของโพลิเมอร์ ซึ่งแตกต่างจากวิธีอื่น คือ ส่วนประกอบในการผสมจะถูกเลือกหรือปรับปรุงตัวเอง ดังนั้นปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นระหว่างการทำ melt blending โดยไม่ต้องเพิ่มส่วนประกอบอื่นเข้าไป ถึงแม้ว่า batch-type melt mixer อาจจะใช้ reactive blending แต่ continuous processing equipment เช่น single - และ twin-screw extruder จะนิยมใช้มากกว่าเนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิที่ดีกว่า



## 2.1.6 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการควบคุมการฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection Moulding)

จากการศึกษาค้นคว้าจากหนังสือและงานวิจัยต่างๆ ตัวแปรการฉีดขึ้นรูปที่มีอิทธิพลต่อการฉีดขึ้นรูปมีดังนี้

1. แรงดันในช่อง (Cavity pressure)
2. แรงดันที่รักษาให้ชิ้นงานอยู่ในแม่พิมพ์ (Holding pressure)
3. อุณหภูมิของน้ำมันไฮดรอลิก (Temperature of hydraulic oil)
4. อุณหภูมิในการหลอม (Melt temperature)
5. อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Mold temperature)
6. แรงดันการฉีด (Injection pressure)
7. ความเร็วการฉีด (Injection speed)
8. เวลาที่รักษาให้ชิ้นงานอยู่ในแม่พิมพ์ (Holding time)
9. ความเร็วรอบการหมุนของสกรู (Screw speed)
10. แรงดันดันกลับ (Back pressure)
11. อุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle temperature)
12. เวลาการเย็นตัว (Cooling time)

และจากการศึกษาลักษณะการทำงาน และตัวแปรของเครื่องฉีดขึ้นรูปที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบกับการศึกษาค้นคว้าจากหนังสือและงานวิจัยต่างๆ จึงทำให้ได้ตัวแปรการฉีดขึ้นรูปที่มีความสำคัญ และมีอิทธิพลต่อชิ้นงาน ดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิในการหลอม (Melt temperature) เป็นตัวแปรพื้นฐานในกระบวนการฉีดขึ้นรูปและยังเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดใน Plastication phase โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการหลอม นี้จะส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของ melt flow rate , nozzle pressure และ cavity pressure รวมทั้งคุณสมบัติด้านเทอร์โมไดนามิก เช่น viscosity , enthalpy และ specific volume ก็จะเปลี่ยนแปลงด้วย จากการศึกษาของ C.Y.W Ma (SPE ANTEC Tech. Papers, 18, 85 (1972) ) ได้ให้แบบจำลองของ อุณหภูมิการหลอม ดังนี้

$$T_m^b = \phi_1(N, P_m, T_b, \delta_1) \quad (1)$$

$T_m^b$  คือ อุณหภูมิในการหลอม

$N$  คือ ความเร็วรอบของการหมุนสกรู

$P_m$  คือ แรงดันการไหล

$T_c$  คือ อุณหภูมิของบารเรล

$O_1$  คือ การกระทบเนื่องจากความแปรปรวนของคุณสมบัติวัสดุ และ/หรือ ลักษณะของสกรู

2. ความเร็วการฉีด (Injection speed) เป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานด้านคุณสมบัติเชิงกล รูปที่ 2.2

3. ความเร็วรอบการหมุนของสกรู (Screw speed) มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิการไหลตามสมการที่ 1 และยังมีความสำคัญระหว่างขั้นตอนการฉีด

4. แรงดันที่รักษาให้ชิ้นงานอยู่ในแม่พิมพ์ (Holding pressure) เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อความถูกต้องด้านขนาด และคุณภาพของชิ้นงานด้านคุณสมบัติเชิงกล

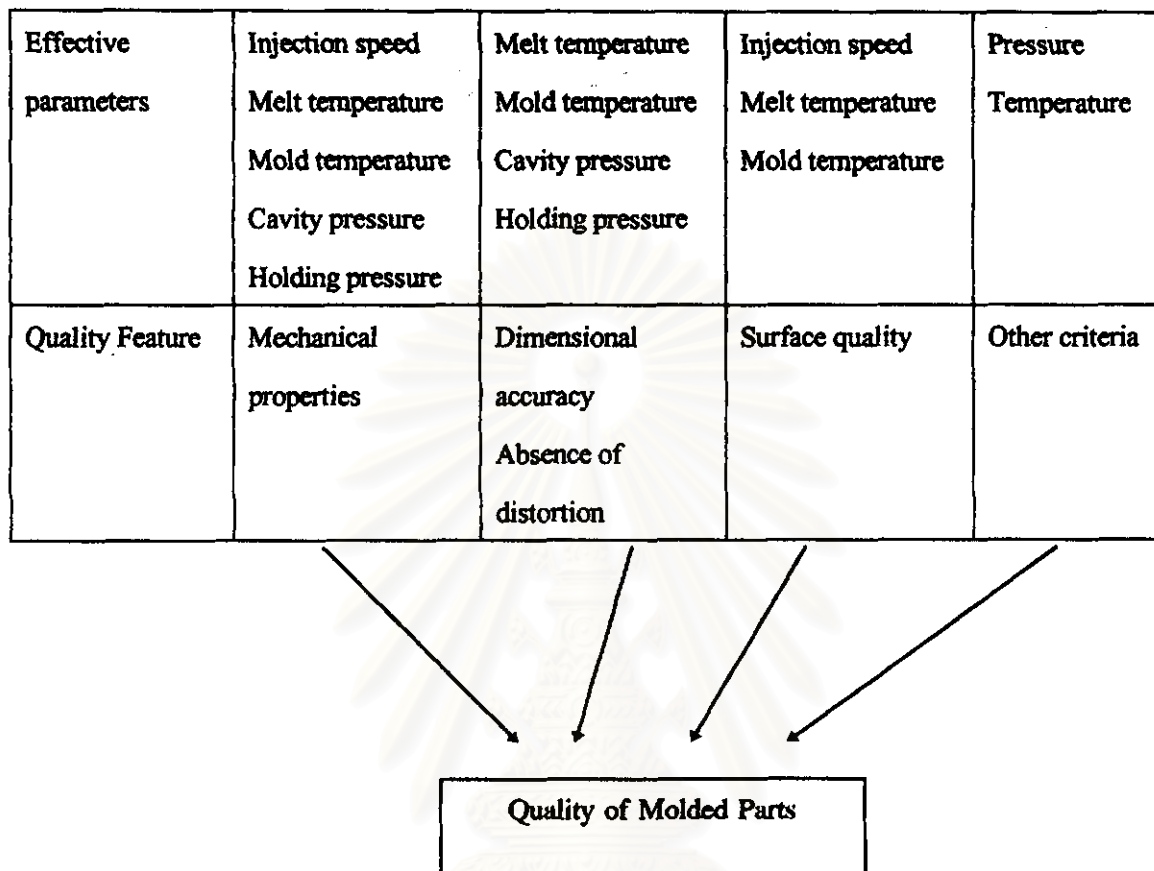
5. แรงดันการฉีด (Injection pressure) ตัวแปรนี้เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญ of หน่วยการฉีด (Injection unit) ซึ่งเป็นแรงดันที่เกิดข้างหน้าบริเวณหัวสกรูระหว่างขั้นตอนการฉีด โดยจะส่งผลกระทบต่อความเร็วของสกรู และกระบวนการเติมวัสดุภายในแม่พิมพ์

6. แรงดันดันกลับ (Back pressure) เป็นตัวแปรหนึ่งที่ได้รับผลจากการเปลี่ยนแปลง cavity pressure

7. เวลาการเย็นตัว (Cooling time) เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญต่อชิ้นงาน

8. เวลาที่รักษาให้ชิ้นงานอยู่ในแม่พิมพ์ (Holding time) เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญต่อความถูกต้องด้านขนาด และคุณภาพของชิ้นงานด้านคุณสมบัติเชิงกล

รูปที่ 2.2 แสดงผลของพารามิเตอร์ที่สามารถควบคุมได้ที่มีต่อคุณภาพของชิ้นงานที่ขึ้นรูป



(ที่มา : หนังสือ Injection molding machine หน้า 169)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.1.7 ความสำคัญของการไหล

ความหมายของ Rheology สามารถให้คำจำกัดความว่าเป็นวิทยาศาสตร์การไหล และการเปลี่ยนรูปของวัตถุ อย่างไรก็ตามความหมายของ rheology โดยทั่วไปจะกำหนดว่าเป็น fluid rheology สำหรับของเหลวทั่วไปการศึกษา rheology จะเกี่ยวข้องกับ การวัดความหนืด ซึ่งขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิและความดันไฮดรอลิก rheology ของโพลิเมอร์มีความซับซ้อนมากกว่า เพราะของเหลวทาง โพลิเมอร์จะแสดงพฤติกรรมที่ไม่มีรูปแบบ อีกทั้งยังความหนืดด้านแรงเฉือนที่ซับซ้อน คุณสมบัติ ด้านความยืดหยุ่น ปรากฏการณ์ความเค้นปกติ และความหนืดด้านแรงดึง คุณสมบัติที่เกี่ยวกับ rheology ขึ้นอยู่กับอัตราของแรงเฉือน น้ำหนักโมเลกุล และโครงสร้างของโพลิเมอร์ ลักษณะผสม ของสารเติมแต่งต่างๆ รวมทั้งอุณหภูมิด้วย

การศึกษา rheology เป็นสิ่งสำคัญที่สุดสำหรับโพลิเมอร์ โดยทั่วไปคุณสมบัติเชิงกล จะเป็นสิ่งสำคัญ อย่างไรก็ตามพฤติกรรมเชิงกลยังเป็นที่น่าสนใจเพียงเล็กน้อยถ้ายังไม่สามารถ ผลิตได้อย่างรวดเร็ว และมีราคาถูก การไหลจะเกี่ยวข้องกับขบวนการผลิตและประกอบของวัสดุ ที่จะใช้เพื่อทำสิ่งใดสิ่งหนึ่งขึ้นมา พฤติกรรมการไหลเป็นสิ่งสำคัญในขบวนการ injection molding, compression molding, blow molding, calendering, cold-forming และ spinning of fibers ดังนั้น Rheology จึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับขบวนการขึ้นรูปโพลิเมอร์

Rheology เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์โพลิเมอร์ในหลายแง่มุม อย่างเช่น โพลิเมอร์ หลายชนิดถูกนำมาจากขบวนการอิมัลชัน โมโนเมอร์หลายตัวในถังปฏิกริยาพลาสติกซอล ซึ่งก็คือ การ ถอยตัวของโพลิเมอร์ในของเหลวจะถูกทำให้เป็นสิ่งที่มิใช่ไฮดรอลิกด้วยขบวนการต่างๆ เช่น rotation molding โพลิเมอร์แบบผงหรือเม็ดเล็กๆจะไหลจากถังและต้องใช้ขบวนการผลิตที่เหมาะสม เช่น rotation molding และ powder coating ดังนั้น Rheology ของโพลิเมอร์แบบผงจึงเป็นสิ่งสำคัญ ในส่วนของ extruder เป็นอันดับแรก และเครื่องฉีดขึ้นรูปต่อมาก่อนที่โพลิเมอร์จะถูกทำให้เป็น ของเหลว

## 2.1.8 การเสื่อมของ โพลีเมอร์ (Polymer Degradation)

### 2.1.8.1 ความหมายของการเสื่อมของ โพลีเมอร์

การเสื่อมของ โพลีเมอร์ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ ซึ่งมี สาเหตุมาจากปฏิกิริยาทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับพันธะที่กระดูกสันหลังของ โมเลกุล ใน โพลีเมอร์ แบบเส้น ปฏิกิริยาเคมีจะนำไปสู่การลดน้ำหนัก โมเลกุล

เมื่อพิจารณาถึง biopolymer การเสื่อมของ โพลีเมอร์จะมีความหมาย เพิ่มขึ้นมากกว่า การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพนั้น ไม่ได้มีสาเหตุมาจากปฏิกิริยาเคมีอย่างเดียว แต่มี สาเหตุมาจาก ปฏิกิริยาทางกายภาพ ซึ่งเกี่ยวกับการแตกหักของ โครงสร้างที่สูงกว่าลำดับ

ในแง่ทางเคมี การเสื่อมของ โพลีเมอร์จะแสดงให้เห็นทางเลือกของ คุณสมบัติทางกายภาพที่ควรจะเป็น แน่นนอน ไม่ได้มีสาเหตุจากการแตกของพันธะในกระดูกสันหลังของ โพลีเมอร์อย่างเดียว แต่ยังเกิดจากปฏิกิริยาเคมีในกลุ่ม pendent หรือ side-chain โดยในกลุ่ม pendent ของโพลีเมอร์แบบเส้น จะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพเฉพาะ ส่วนข้างน้อยที่สัมพันธ์กับ ปฏิกิริยาในกระดูกสันหลัง

crosslink ระหว่าง โมเลกุลอาจจะถูกพิจารณาตรงกันข้ามกับการเสื่อม คือ จะทำให้ขนาด โมเลกุลใหญ่ขึ้นและการปรับเปลี่ยนสูงกว่าซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพ

### 2.1.8.2 รูปแบบของการเสื่อม (Modes of Polymer Degradation)

โดยส่วนใหญ่การเสื่อมของ โพลีเมอร์มีสาเหตุมาจากปฏิกิริยาการแตกพันธะ ทางเคมีใน โมเลกุลขนาดใหญ่ รูปแบบการเสื่อมของ โพลีเมอร์สามารถจัด ได้ดังนี้

1. Chemical degradation เป็นขบวนการที่เกิดขึ้นภายใต้อิทธิพลทางเคมีที่นำไปสู่การสัมผัสกับโพลีเมอร์ อย่างไรก็ตามจะมีเพียงอุณหภูมิที่สูงขึ้นเท่านั้นที่เป็นสาเหตุให้เกิดพลังงาน กระตุ้นสูงพอสำหรับการเกิดการเสื่อมทางเคมี

2. Thermal degradation เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้โพลิเมอร์เริ่มเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยปราศจากการเกี่ยวข้องกับส่วนประกอบอื่นๆ บ่อยครั้งที่ยากต่อการแยกแยะระหว่าง Thermal degradation และ Thermal - Chemical degradation เพราะโพลิเมอร์ยังมีสารอื่นปนอยู่ซึ่งสารเหล่านั้นอาจทำปฏิกิริยากับเมตริกซ์โพลิเมอร์ได้ถ้าอุณหภูมิสูงพอ

3. Biologically degradation มีความเกี่ยวข้องกับ chemical degradation เป็นอย่างมาก ไมโครออกาไนส์ซึ่งจะผลิตเอนไซม์หลายชนิดซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับโพลิเมอร์ธรรมชาติและโพลิเมอร์สังเคราะห์ได้ การทำลายเอนไซม์ของโพลิเมอร์เป็นขบวนการเคมีที่ถูกทำให้เกิดได้โดยไมโครออกาไนส์ซึ่งมีอยู่ในอาหาร การทำลายจุดพันธะของโพลิเมอร์จะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิกว้างๆ อุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 60 หรือ 70 °C ซึ่งไม่ธรรมดา

4. Mechanically degradation จะกล่าวอ้างถึงผลทางไมโครสโคปภายใต้อิทธิพลของแรงเฉือน นอกจากสภาพปกติที่สำคัญของการแตกหักของโพลิเมอร์ต่อการประยุกต์ใช้งานแล้ว ควรชี้ให้เห็นถึงขบวนการเกิดความเค้นในโพลิเมอร์ที่ติดตามมาด้วยการแตกหักของพันธะในสายโซ่หลัก ความจริงนี้เป็นประโยชน์สำหรับการริเริ่มทางเคมีกลของขบวนการโพลิเมอร์ไรเซชันกับการเกิดโคโพลิเมอร์แบบบล็อกและกราฟที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมา

5. Light induce polymer degradation หรือ photodegradation เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพ โดยมีสาเหตุมาจากการฉายรังสีโพลิเมอร์ด้วยแสงอุลตราไวโอเลตหรือแสงที่สามารถมองเห็นได้

6. High energy radiation หรือ รังสีพลังงานสูง อย่างเช่น electromagnetic radiation (X-rays,  $\gamma$ -rays) หรือรังสีแบบ particle ( $\alpha$ -rays, อิเล็กตรอนแบบเร็ว, ผลิตภัณฑ์ทางนิวเคลียร์) ซึ่งไม่เฉพาะเจาะจงด้านการดูดซับจำนวนที่มีอยู่ของกลุ่ม chromophoric เป็นสิ่งที่ไม่จำเป็นเหมือนกับในกรณีของ photodegradation เนื่องจากทุกส่วนของโมเลกุลสามารถตอบสนองกับรังสีได้ ขนาดและคุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุที่ ฉายแสงและธรรมชาติของรังสี

## 2.2 การวิเคราะห์การถดถอย

การถดถอยเป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการหาสมการเส้นตรงหรือเส้นโค้ง สมการเหล่านี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองประเภท คือ ตัวแปรตาม(Dependent Variable) หนึ่งตัวและตัวแปรอิสระ (Independent Variable) อีกตัวหนึ่งหรือมากกว่า สมการที่ได้จากเทคนิคดังกล่าวจะแสดงว่าตัวแปรตาม จะมีการผันแปรตามตัวอิสระอย่างไร



## 2.2.1 ประเภทการวิเคราะห์การถดถอย

การวิเคราะห์การถดถอยแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

### 1. การถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression)

การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระหนึ่งตัว โดยที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองเป็นเส้นตรง โดยให้  $x$  เป็นตัวแปรอิสระและ  $y$  เป็นตัวแปรตาม ซึ่งอาจเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้เป็น

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + e$$

$\beta_0$  คือ ค่าที่เท่ากับจุดตัดบนแกน  $y$  เมื่อกำหนดให้  $x = 0$

$\beta_1$  คือ ความชันของเส้นตรง

$e$  คือ ค่าความแตกต่างของ  $y$  ที่เกิดขึ้นจริงกับ  $y$  บนเส้นถดถอย

### 2. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงซ้อน (Multiple Regression Analysis)

ในหลายๆกรณี ตัวแปรตามอาจมีความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัวขึ้นไป ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + e \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$\beta_0$  คือ ค่าที่เท่ากับค่าของ  $y$  เมื่อกำหนดให้  $x_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n$

$\beta_i$  คือ ค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง  $y$  กับ  $x_i$  และอัตรา

การเปลี่ยนแปลงใน  $y$  เมื่อ  $x_i$  เปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วย

$e$  คือ ค่าความแตกต่างของ  $y$  ที่เกิดขึ้นจริงกับ  $y$  บนเส้นถดถอย

$i$  คือ ลำดับที่ของตัวแปรอิสระในสมการ

### 3. การถดถอยสำหรับสองตัวแปรที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นโค้ง

การพยากรณ์โดยใช้เทคนิคของการถดถอยนั้น ปกติใช้ในกรณีที่มีความสัมพันธ์ของตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระเป็นเส้นตรง โดยที่ลักษณะของความสัมพันธ์ของตัวแปรมักจะอยู่ในลักษณะที่ไม่ใช่เส้นตรง ในกรณีที่สงสัยว่าลักษณะของความสัมพันธ์จะมีรูปแบบที่แน่นอน เช่น เป็นเส้นโค้งแบบ Exponential ก็อาจจะนำเอาวิธีการถดถอยมาใช้ในการวิเคราะห์หาสมการถดถอยได้ โดยการแปลงลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรให้อยู่ในรูปของเส้นตรงก่อน หลังจากวิเคราะห์หาสมการถดถอยในเชิงเส้นตรงได้แล้วจึงเปลี่ยนรูปความสัมพันธ์ของตัวแปรกลับไปสู่รูปเดิมอย่างเช่น ข้อมูลมีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นโค้ง แบบ Exponential ซึ่งเขียนเป็นสมการดังนี้

$$y = e^{a+bx}$$

$a$  = ค่าที่เท่ากับจุดตัดบนแกน  $y$  เมื่อกำหนดให้  $x = 0$

$b$  = คือ ความชันของเส้นตรง

จากสมการข้างบนใส่  $\ln$  ทั้งสองข้าง จึงได้เป็น

$$\ln(y) = a + bx$$

$$\ln(y) = y$$

ดังนั้น จึงแปลงให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ได้ดังนี้

$$y = a + bx$$

#### 2.2.2 การเลือกรูปแบบของสมการถดถอยที่เหมาะสม

สมมติว่า ต้องการที่จะหาสมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างตัวแปรตาม  $y$  กับกลุ่มตัวแปรอิสระกลุ่มหนึ่งซึ่งคาดว่าจะมีความสัมพันธ์ดังกล่าวกับ  $y$  คือ  $x_1, x_2, \dots, x_p$  สิ่งที่ต้องการก็คือ

1. สมการที่สามารถพยากรณ์ค่าตัวแปรตามได้แม่นยำที่สุด ซึ่งต้องการที่จะมีตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อ  $y$  ให้มากที่สุด ในสมการ เพื่อให้สมการมีความเชื่อถือได้มากที่สุด และ
2. ไม่ต้องการที่ใช้ตัวแปรอิสระในสมการมากเกินไปจนความจำเป็น

วิธีทางสถิติเพื่อช่วยในการเลือกรูปแบบของสมการถดถอยที่เหมาะสมคือ

1. Stepwise Regression
2. Backward Elimination
3. Forward Elimination
4. All Possible Regression
5. Minimum Cp Method
6. Ridge Analysis

โดยวิธีการแรกคือ Stepwise Regression เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดและใช้กันโดยแพร่หลาย และในโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปด้านการพยากรณ์มักมีโปรแกรมสำหรับที่ใช้วิธีนี้ในการหารูปแบบสมการถดถอยอยู่ด้วยเสมอ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Blom-HP *et al.* (1996) ศึกษาเกี่ยวกับโพลิเมอร์ผสมระหว่างโพลิโพรพิลีนและโพลิเอทิลีน ความหนาแน่นสูง ผลการศึกษาพบว่า การเติมโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงลงไปในโพลิโพรพิลีน ทำให้เกิดการตกลงของเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นและความแข็งแรงภายใต้แรงกระแทก และได้ศึกษา การเติม EPDM หรือ EVA ลงไปในโพลิเมอร์ผสมพบว่า EPDM มีผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติ ความแข็งแรงภายใต้แรงกระแทก และ EVA มีผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติความแข็งแรงภายใต้แรง กระแทกและเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของโพลิเมอร์ผสมดีขึ้น นอกจากนี้พบว่า EVA ช่วยปรับปรุง คุณสมบัติด้านความแข็งแรงภายใต้แรงกระแทกได้ดีกว่า EPDM

Putte, Allen and Van (1974) นำเสนอผลงานการศึกษาถึงผลของตัวแปรอันได้แก่ อุณหภูมิ ในการหลอม เวลาการฉีด และแรงดันในการฉีด ที่มีต่อคุณสมบัติของพลาสติกสองชนิดคือ โพลิโพรพิลีน และ โพลิสไตรีน และคำนวณหา correlation coefficient ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางสถิติ ที่ชี้ให้เห็นถึง degree of correlation ระหว่างตัวแปรสองตัว โดยมีค่ามากที่สุดคือ +1 ซึ่งชี้ให้เห็นถึง ความสัมพันธ์เชิงบวก อย่างสมบูรณ์ ค่าน้อยที่สุดคือ -1 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงลบ อย่างสมบูรณ์ และเท่ากับศูนย์เมื่อไม่มีความสัมพันธ์กัน สำหรับโพลิสไตรีนเป็น amorphous material เมื่ออุณหภูมิการหลอมเพิ่มขึ้น จะทำให้ Tensile strength, Flexural strength และ Izod impact strength ลดลงซึ่งสอดคล้องกับค่า correlation coefficient ที่เป็นลบระหว่าง -0.8 ถึง -0.9 ส่วนโพลิ โพรพิลีนเป็น crystalline material เมื่ออุณหภูมิการหลอมเพิ่มขึ้นจะมีผลเพียงเล็กน้อยต่อ Izod impact strength ซึ่งมีค่า correlation coefficient เท่ากับ -0.58 เมื่อแรงดันในการฉีดเพิ่มขึ้นจะมีผลอย่างมากต่อ strength และ stiffness

Holsti-Miettinen, R. *et al.* (1992) ศึกษาถึงผลของ compatibilizer ที่มีต่อคุณสมบัติของโพลิ เมอร์ผสมระหว่างโพลิเอทิลีนกับโพลิโพรพิลีน โดยใช้ compatibilizer 4 ชนิด คือ E-BA-g-FA, PP-g-MAH, SEBS-g-MAH และ E-EA - GMA และศึกษาถึงการมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกล, Morphology, Thermal and Thermo-mechanical behavior และ rheological property สัดส่วนการ ผสมของ PA : PP คือ 80:20, 60:40, 40:60 และ 20:80 ส่วน compatibilizer จะอยู่ที่ 5% หรือ 10% ของน้ำหนักการผสม จากการศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงกลได้ว่า คุณสมบัติทนต่อแรงกระแทกขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการผสมและ ประเภทของ compatibilizer E-BA-g-FA, PP-g-MAH และ E-EA-GMA จะมีพฤติกรรมเชิงคุณภาพที่

เหมือนกัน และให้คุณสมบัติทนต่อแรงกระแทกที่ดี เมื่อมีอัตราส่วนของ PA ที่สูงขึ้น ส่วน SEBS-g-MAH จะมีพฤติกรรมที่ต่างออกไปโดยจะให้ความเหนียวที่เพิ่มขึ้นทั้งที่ PA มี อัตราส่วนต่ำและสูง โดยที่ PA = 0.8 และใช้ SEBS-g-MAH จะให้ค่าคุณสมบัติทนต่อแรงกระแทกสูงสุด

Holsti - Miettinen, R.M. *et al* (1995) เป็นการศึกษาถึงผลของสัดส่วนของการผสม, compatibility และวิธีการผสมที่มีต่อคุณสมบัติด้าน Oxygen Barrier, คุณสมบัติเชิงกล และ blend morphology ของโพลี เมอร์ผสมระหว่างโพลีไพโรลีนกับโพลีเอมีค-6 โดยใช้กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection moulding) ผลของอัตราส่วน PP/PA-6 เป็นเครื่องแสดงที่สำคัญของการผสมที่มีการกระจายเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากเฟสอินเวอร์สแล้ว PA-6 จะกลายเป็นเฟสต่อเนื่องคุณสมบัติด้าน Oxygen Barrier จะถูกปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มขึ้นของ compatibilizer ทำให้ permeability ของการผสมเพิ่มขึ้น วิธีการผสมมีผลสำคัญต่อ permeability ของการผสม ในการผสม PA-6 และ compatibilizer จะกระทำด้วย twin-screw extruder ส่วน PP จะถูกใส่เข้าไปภายหลัง และจะทำให้แห้งก่อนการฉีด PA-6 จะฟอร์มตัวเป็นแผ่นบางๆ และยาวอยู่ในแมตริกของ PP การกระทำเช่นนี้มีส่วนสำคัญต่อการปรับปรุงคุณสมบัติด้าน Oxygen Barrier รวมทั้งยังทำให้ค่า Tensile strength และ Impact strength ดีเป็นพิเศษ คุณสมบัติเชิงกลของสัดส่วนผสม ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติเชิงกลของสัดส่วนผสมโดยน้ำหนักที่แตกต่างกัน

| PP wt% | PA-6 wt% | Compatibilizer wt% | Tensile Modulus MPa | Tensile Strength MPa | Notched Izod Impact Strength kJ/m <sup>2</sup> |
|--------|----------|--------------------|---------------------|----------------------|--|
| 89     | 10       | 1                  | 1840                | 37                   | 2.3  |
| 78     | 20       | 2                  | 1980                | 38                   | 2.6  |
| 67     | 30       | 3                  | 2100                | 40                   | 2.4  |
| 56     | 40       | 4                  | 2250                | 46                   | 3.0  |
| 34     | 60       | 6                  | 2390                | 58                   | 4.7  |
| 12     | 80       | 8                  | 2520                | 66                   | 4.9  |

Hsiung, C.M. and Cakmak, M. ( 1993 ) นำเสนอผลงานที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพในการฉีดขึ้นรูปที่มีต่อ Crystallinity, Orientation Gradients และคุณสมบัติเชิงกลของ Poly (arylether ketone) : PAEK ในการฉีดจะมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรสองตัวคือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold tem-

perature) และความเร็วในการฉีด (Injection speed) ซึ่งงานที่ได้เป็นรูปคัมเบตขนาดใหญ่ โดยจะทำการศึกษาค้น Optical observation, Differential Scanning Calorimetry, Wide-angle X-ray Ploe Figures และคุณสมบัติเชิงกลซึ่งจะได้ว่า แรงดันการฉีดมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อ elongation และความแข็งแรงด้านแรงดึง ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น โดยแรงดันการฉีดที่ระดับต่ำจะให้ ค่าที่สูงกว่า ส่วน Impact strength จะเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์อยู่ที่ 150 - 160 °C และจะลดลงสู่ค่าที่อุณหภูมิห้องเมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์อยู่ที่ 200 °C โดยแรงดันในการฉีดที่ระดับต่ำจะให้ค่าที่สูงกว่า

Zhu-W *et al.* (1995) ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของโพลิเมอร์ผสมระหว่างโพลิโพรพิลีนและโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ส่วนผสมต่างๆ ที่มี ethylene-propylene copolymer (EPC) เป็นตัวที่ทำให้เข้ากัน พบว่า EPC ช่วยให้ภาวะการเกาะติดในโพลิเมอร์ดีขึ้น และค่าความทนต่อแรงดึงและความยืดหยุ่น ณ จุดแตกหักดีขึ้นเมื่อมีส่วนผสมของ EPC 5% โดยน้ำหนัก สรุปว่าค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดึง และความยืดหยุ่น ณ จุดแตกหักที่ดีขึ้นนั้นมีผลมาจากการทำให้ PP และ HDPE เข้ากันได้ดีโดยใช้ EPC

Zhu-W *et al.* (1995) ศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติทางกลของโพลิเมอร์ผสมระหว่างโพลิโพรพิลีนและโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ส่วนผสมต่างๆ โดยใช้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเกิดโพลิเมอร์ไรเซชันแบบซีเกลอร์ แนตต้า (Ziegler Natta) คือ โพลิโพรพิลีน-โพลิเอทิลีน, ethylene-propylene copolymer (EPC) และโพลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูงเป็นตัวปรับปรุง คุณสมบัติ PP-PE ไม่เพียงแต่ทำให้โพลิเมอร์ผสมมีความทนต่อแรงดึงดีขึ้น แต่ยังช่วยให้ค่าความยืดหยุ่น ณ จุดแตกหักเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรง ขณะที่ค่าโมดูลัสค่อนข้างคงที่ นอกจากนี้ยังพบว่า PP-PE เป็นตัวที่ทำให้เข้ากันที่มีประสิทธิภาพมากกว่า EPC ด้วยเหตุผลนี้สรุปว่าความทนต่อแรงดึงของโพลิเมอร์ผสมขึ้นกับภาวะการเกาะติดระหว่างสองเฟส เป็นอย่างมาก และค่าความยืดหยุ่น ณ จุดแตกหักขึ้นอยู่กับขนาดของ Domain ที่กระจายอยู่บนเนื้อ โพลิเมอร์ผสมเป็นอย่างมาก

อภินันทนา อุดมศักดิ์กุล (2541) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของโพลิเมอร์ผสมระหว่างโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับโพลิโพรพิลีน โดยมีเอทิลีน-โพรพิลีน-ไดอีน เทอร์โพลิเมอร์ เป็นตัวที่ทำให้เข้ากัน พบว่าควมฉีดขึ้นรูปโพลิเมอร์ผสม HDPE/PP/EPDM ที่อุณหภูมิ 210°C คุณสมบัติของโพลิเมอร์ผสมจะแปรไปตามโพลิเมอร์ที่มีปริมาณมากกว่า แต่เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของโพลิเมอร์ ผสม HDPE/PP(75/25) จะมีค่ามากที่สุดคือ 428.37% เมื่อเติม EPDM



เข้าไปทำให้อัตราการไหล ความถ่วง จำเพาะ ความทนต่อแรงดึง 100% โมดูลัสความยืดหยุ่น และความแข็งแรงลดลง แต่จะทำให้ความทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น โครงสร้างจุลภาคของโพลีเมอร์ผสม HDPE/PP จะมีลักษณะแยกออกเป็นสองเฟสชัดเจน โดยมีเฟสหนึ่งกระจายอยู่บนอีกเฟสหนึ่ง เมื่อเติม EPDM เข้าไปจะทำให้โพลีเมอร์ทั้งสองเข้ากันได้ดีขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย