

## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 พอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีน เป็นพลาสติกสังเคราะห์ประเภทเทอร์โมพลาสติก ที่ประกอบด้วยโครงสร้างโมเลกุลอย่างง่าย ๆ สูตรโมเลกุล คือ  $(CH_2)_n$  จัดเป็นพลาสติกที่มีการใช้งานมากที่สุด เพราะมีสมบัติเด่นหลายประการ ได้แก่ ราคาถูก มีสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าดีเยี่ยม มีความทนทานต่อสารเคมีได้ดี ขึ้นรูปง่าย มีความเหนียว ความยืดหยุ่น และเมื่อทำเป็นฟิล์มจะมีความโปร่งใส

พอลิเอทิลีนในทางการค้า ส่วนใหญ่ได้จากการพอลิเมอไรซ์เอทิลีนโมโนเมอร์ด้วยกระบวนการแบบรวมตัว ( addition polymerization ) เกิดเป็นพอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นได้ทั้งแบบเชิงเส้น ( linear ) และแบบกิ่งก้านสาขา ( branched ) ขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ใช้ในการผลิต

พอลิเอทิลีนแบบเชิงเส้น สามารถจัดเรียงโมเลกุลให้เป็นระเบียบได้มากกว่าพอลิเอทิลีนแบบมีกิ่งก้านสาขา จึงเกิดมีโครงสร้างที่เป็นผลึกได้มากกว่า ทำให้มีความหนาแน่น จุดหลอมเหลว จุดอ่อนตัว และความแข็งตึง ( stiffness ) สูงกว่า แต่ยอมให้แก๊สหรือน้ำซึมผ่านได้น้อยกว่า จะเห็นว่าสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ขึ้นอยู่กับกรรมมีกิ่งก้านสาขาของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีน ส่วนสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ ยังต้องคำนึงถึง ค่าน้ำหนักโมเลกุล และการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลอีกด้วย

หากจะแบ่งประเภทของพอลิเอทิลีนตามความหนาแน่น อาจแบ่งได้เป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ( low density polyethylene , LDPE ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ( high density polyethylene , HDPE ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง ( medium - density polyethylene , MDPE ) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ( linear low - density polyethylene , LLDPE ) เป็นต้น ซึ่งมาตรฐาน ASTM ได้จำแนกพอลิเอทิลีนตามความหนาแน่นได้ 4 ชนิด ( Maraschin, 1986 ) ดังนี้

ชนิดที่ 1	ความหนาแน่น	0.910 - 0.925	กรัม/ลบ.ซม.
ชนิดที่ 2	ความหนาแน่น	0.926 - 0.940	กรัม/ลบ.ซม.

ชนิดที่ 3 ความหนาแน่น 0.941 - 0.959 กรัม/ลบ.ซม.

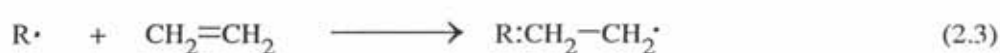
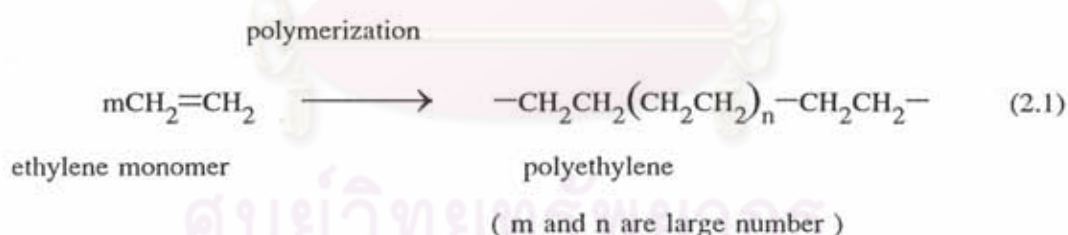
ชนิดที่ 4 ความหนาแน่น มากกว่า 0.960 กรัม/ลบ.ซม.

ซึ่งในเวลาต่อมา บริษัท ดาวเคมีคัล ได้ร่วมมือกับ บริษัท ยูเนียนคาร์ไบด์ ผลิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมาก ( very low density polyethylene , VLDPE ) ที่มีความหนาแน่น 0.900 - 0.905 กรัม/ลบ.ซม.

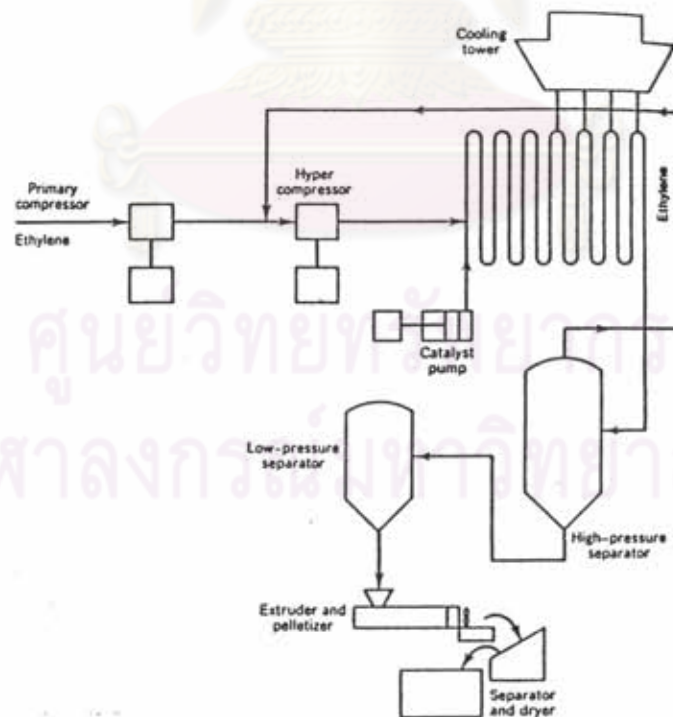
## 2.1.1 กระบวนการผลิต

### 2.1.1.1 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ( LDPE )

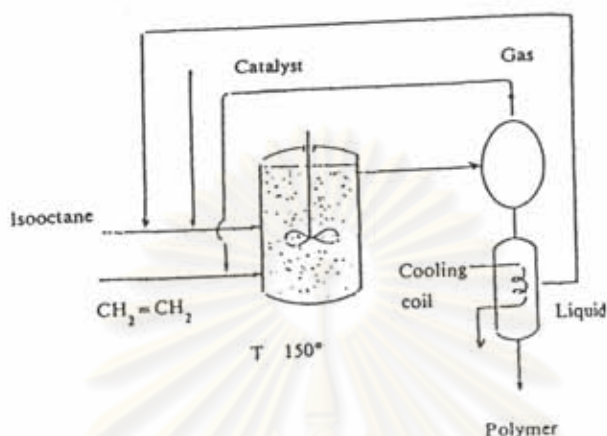
LDPE เป็นพอลิเอทิลีนชนิดแรกที่ถูกผลิตขึ้นในทางการค้า เริ่มผลิตในปี ค.ศ. 1943 ด้วยกระบวนการผลิตแบบความดันสูง ( high pressure process ) ซึ่งการผลิตในทางการค้าจะใช้ความดัน 150 - 350 เมกะปาสกาล ( 1500 - 3500 บรรยากาศ ) และอุณหภูมิ 80 - 300 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบรวมตัว ( Solomons , 1988 ) ดังสมการที่ 2.1 ปฏิกิริยาจะถูกกระตุ้นด้วยสารที่ให้ฟรีแรดิคัล ได้แก่ อะโซไดโซบิวทิไนด์ไนไตรล์ ( azodiisobutyronitrile ) เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ ( benzoyl peroxide ) หรือออกซิเจน ซึ่งขั้นตอนต่าง ๆ ของปฏิกิริยา แสดงไว้ในสมการที่ 2.2 - 2.4



การเลือกใช้สารเริ่มต้นนี้ขึ้นอยู่กับภาวะของปฏิกิริยา ถ้าใช้ออกซิเจน ( 0.3 - 1 เปอร์เซ็นต์ ) จะใช้ความดันประมาณ 150 เมกะปาสกาล อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส โดยทั่วไป จะเป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง ภายในเตาปฏิกรณ์( reactor ) ที่มีทั้งแบบที่เป็นท่อแคบ ๆ ( tubular reactor ) ( Rosen , 1993 ) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 จะได้พอลิเอทิลีนที่มีกิ่งก้านสาขาจำนวนมาก โดยจะนำไปใช้ในงานที่ต้องการความใสมาก ๆ และแบบหม้อความดันสูง ( autoclave ) พร้อมเครื่องกวน ( จรัญญา พิชิตกุล, 2532 ) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จะได้พอลิเอทิลีนที่มีกิ่งก้านสาขาก็น้อยกว่า เหมาะที่จะนำไปใช้งานประเภทฟิล์มที่ต้องการความเหนียวและงานอัดเคลือบ( extrusion coating ) ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ LDPE ด้วยกระบวนการความดันสูงนี้จะคายความร้อนออกมาสูงมาก จึงจำเป็นต้องมีระบบระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพ โดยการหล่อเย็นอยู่ตลอดเวลา ( ให้อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรสูงมาก ) และพอลิเมอร์ที่ได้จะถูกลำเลียงไปอย่างรวดเร็ว เพื่อไม่ให้ความร้อนสูงเกินไป ในบางกระบวนการอาจเติมสารเจือจาง เช่น เบนซีนหรือน้ำ เพื่อเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน และช่วยในการเคลื่อนย้ายพอลิเมอร์ออกจากเตาปฏิกรณ์ด้วย

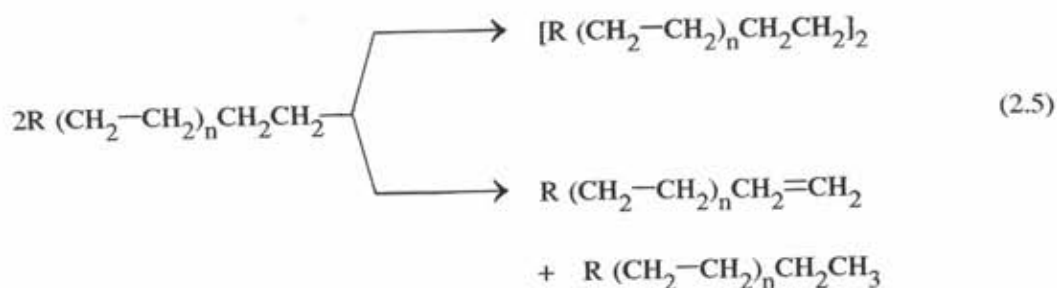


รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิต LDPE แบบ Tubular



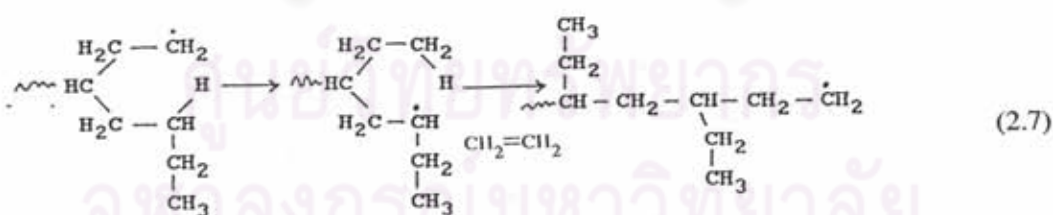
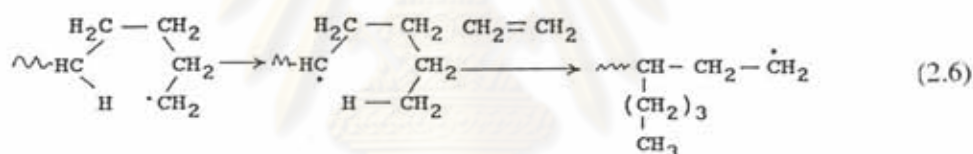
รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิต LDPE แบบใช้หม้อความดันสูง

การจับปฏิกิริยาอาจเป็นแบบ combination หรือ disproportionation ดังแสดงในสมการที่ 2.5 ในกระบวนการผลิตแต่ละครั้งนั้นโมโนเมอร์ 10-30 เปอร์เซ็นต์ จะถูกเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ การใช้โมโนเมอร์ความเข้มข้นและความดันสูง จะทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีกิ่งก้านสาขา ภายหลังจากที่ปล่อยให้ความดันลดลง พอลิเมอร์จะถูกแยกออกมาจากเอทิลีนโมโนเมอร์และสารทำให้เจือจาง ( ซึ่งจะสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้อีก ) แล้วนำไปอัดรีดออกมาเป็นแถบเล็ก ๆ ซึ่งจะถูกทำให้เป็นเม็ดต่อไป





การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนด้วยกระบวนการความดันสูงนี้ ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านสาขาจำนวนมาก จากการตรวจสอบด้วยวิธีอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ( Infrared - spectroscopy, IR ) จะพบหมู่เมทิล ( CH<sub>3</sub> ) อยู่ประมาณ 20 - 30 หมู่ ต่อ คาร์บอน 1000 อะตอม ภายในสายโซ่โมเลกุล ซึ่งปกติจะอยู่ที่ส่วนปลายของโมเลกุลเท่านั้น แสดงว่าโมเลกุลมีกิ่งก้านสาขาเกิดขึ้นมาก ซึ่งเชื่อว่าจะเกิดจากการย้ายฟรีแรดิคัลภายในโมเลกุลเองหรือเรียกว่า “backbiting” กิ่งก้านสาขานี้มีทั้งแบบสั้นและยาว แบบสั้นจะเกิดเป็นหมู่เอทิลและบิวทิล ถ้าเป็นการทรานซิชั่นของวงแหวนหกเหลี่ยมจะได้หมู่บิวทิล และอาจเกิด backbiting ต่อไปอีก กลายเป็นหมู่เอทิล ดังแสดงในสมการที่ 2.6 และ 2.7 สำหรับกิ่งก้านสาขาแบบยาวจะมีอยู่ประมาณ 3 หมู่ ต่อ คาร์บอน 1000 อะตอม



การเกิดกิ่งก้านสาขาเหล่านี้ ทำให้ LDPE มีโครงสร้างโมเลกุลไม่เป็นระเบียบมีลักษณะเป็นอสัณฐาน มีความยืดหยุ่น และอ่อนตัวง่าย นอกจากนี้ยังมีจุดอ่อนตัวและอุณหภูมิการหลอมเหลวต่ำ

#### 2.1.1.2 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ( HDPE )

HDPE เป็นพอลิเอทิลีนที่มีการใช้งานกันมานานแล้ว แต่เกิดภายหลัง LDPE

มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นสายโซ่ยาว ๆ แทนไม่กิ่งก้านสาขาอยู่เลย โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบจึงทำให้ได้โครงสร้างเป็นผลึกที่มากกว่า LDPE และมีความหนาแน่นสูงกว่าด้วย เมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจะทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรง ความเหนียว ความทนต่อแรงดึง ความแข็ง ความคงทนต่อความร้อนและสารเคมีเพิ่มขึ้นด้วย อีกทั้งยังมีสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม HDPE มีจุดหลอมเหลวประมาณ 135 องศาเซลเซียส และจุดอ่อนตัวประมาณ 125 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่า LDPE

การสังเคราะห์ HDPE ต่างจาก LDPE ตรงที่ใช้กระบวนการผลิตที่มีความดันและอุณหภูมิต่ำกว่ามาก กระบวนการผลิตมี 4 วิธี ดังนี้

1. กระบวนการซีเกลอร์ (Ziegler Process) กระบวนการซีเกลอร์ ในทางการค้า จะกระทำภายใต้ความดันที่สูงกว่าบรรยากาศเล็กน้อย คือ 0.2 - 0.4 เมกะปาสกาล ที่อุณหภูมิประมาณ 50 - 75 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจะดำเนินไปได้ โดยใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์-แนตตา (Ziegler-Natta catalyst) ซึ่งประกอบด้วย สารทิตานเนียมเตตระคลอไรด์และอะลูมิเนียมอัลคิล (เช่น ไดเอทิลอะลูมิเนียมคลอไรด์ ไตรเอทิลอะลูมิเนียม) ส่วนสารเจือจางที่ใช้ได้แก่ น้ำมันดีเซล (diesel oil) เฮปเทน (heptane) หรือ โทลูอีน (Toluene) ปฏิกิริยาจะเกิดภายใต้บรรยากาศเฉื่อย (ปกติภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน) โดยไม่มีความชื้นและออกซิเจนอยู่ด้วยเพราะจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง หรืออาจทำให้เกิดการระเบิดขึ้นได้ โดยเอทิลีน ตัวเร่งปฏิกิริยา และสารเจือจาง จะถูกป้อนอย่างต่อเนื่องเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ พอลิเมอร์ที่ได้จะละลายในสารเจือจางได้เล็กน้อย โดยอยู่ในรูปของสารขุ่นหนืด (slurry) และถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วด้วยการเติมแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล หรือ เอทานอล ส่วนโลหะจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกแยกออกโดยใช้กรดเกลือ ถ้าต้องการใช้งานเกี่ยวกับฉนวนไฟฟ้าต้องทำให้บริสุทธิ์หลาย ๆ ครั้ง แล้วจึงเซนตริฟิวจ์ ทำให้แห้ง อัดรีด และตัดให้เป็นเม็ด HDPE ที่ได้มีความหนาแน่นประมาณ 0.945 กรัม/ลบ.ซม.

2. กระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips Process) กระบวนการผลิตวิธีนี้ใช้ความดันประมาณ 3 - 4 เมกะปาสกาล อุณหภูมิ 90 - 160 องศาเซลเซียส และใช้โครเมียมออกไซด์ ( $\text{CrO}_3$ ) เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา เอทิลีนจะถูกลำเลียงเข้าไปในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน เช่น ไซโคลเฮกเซน ซึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยาแขวนลอยอยู่ พอลิเอทิลีนที่ได้อาจอยู่ในรูปของสารละลาย (solution) หรือสารขุ่นหนืด (slurry) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ ถ้าเป็น solution process จะทำที่อุณหภูมิ 120 - 160 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่พอลิเมอร์ละลายได้ในสารเจือจางและสารละลายพอลิเมอร์ที่ร้อนจะถูกดึงออกมาจากเตาปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง เอทิลีนที่ไม่ได้เข้าทำปฏิกิริยาจะถูกล้างออก ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกกำจัดออกด้วยการกรอง หรือเซนตริฟิวจ์สำหรับ



slurry process จะทำที่อุณหภูมิ 90 -100 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมินี้พอลิเมอร์จะละลายในสารเจือจางได้เล็กน้อย พอลิเมอร์ที่ได้จะมีความหนาแน่นสูงที่สุด คือ ประมาณ 0.96 กรัม/ลบ.ซม. โมเลกุลที่ได้ค่อนข้างจะเป็นเส้นตรงอย่างสมบูรณ์

3. กระบวนการสแตนดาร์ดออยล์ (Standard Oil Process) จะคล้ายกับกระบวนการฟิลลิปส์ โดยใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ประกอบด้วยโลหะออกไซด์ เช่น โมลิบดีนัมไดออกไซด์ บนอะลูมินา ซึ่งเตรียมได้โดยการเผาอะลูมินากับแอมโมเนียมโมลิบเดต ประมาณ 500 - 600 องศาเซลเซียส และผสมกับสารที่เป็นตัวช่วยรีดิวซ์ เช่น โลหะหมู่ IA IIA หรือพวกไฮโดรด์เป็นตัวช่วยกระตุ้นให้วงไวต์ต่อปฏิกิริยา โดยใช้ความดัน 4 - 10 เมกะปาสกาล อุณหภูมิ 200 - 300 องศาเซลเซียส และใช้ตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน พอลิเอทิลีนที่ได้มีความหนาแน่นประมาณ 0.960 กรัม/ลบ.ซม. ซึ่งเท่ากับที่ได้จากกระบวนการฟิลลิปส์ อีกทั้งยังมีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกันอีกด้วย

4. กระบวนการยูเนียนคาร์ไบด์ ( Union Carbide Process ) ในกระบวนการนี้เอทิลีนจะถูกพอลิเมอไรซ์ในเฟสที่เป็นแก๊ส ( gas phase ) ภายใต้ความดัน 0.7 - 2.0 เมกะปาสกาล และอุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส สารตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย organochromium compound เช่น chromacene [ $C_5H_5$ ]<sub>2</sub>Cr กระบวนการนี้จะใช้ fluidized bed ที่มีเอทิลีนเป็น fluidizing gas ( รวมทั้งเป็นตัวทำปฏิกิริยาคด้วย ) พอลิเมอร์ที่ได้มีลักษณะเป็นเม็ด ( ซึ่งสารตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้ถูกกำจัดออกไป ) และสามารถใช้ได้โดยตรง เนื่องจากไม่มีตัวทำละลายมาเกี่ยวข้อง จึงทำให้ gas phase process ควบคุมได้ง่ายและใช้พลังงานน้อยกว่ากระบวนการอื่น ๆ ( เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร, ม.ป.ป. )

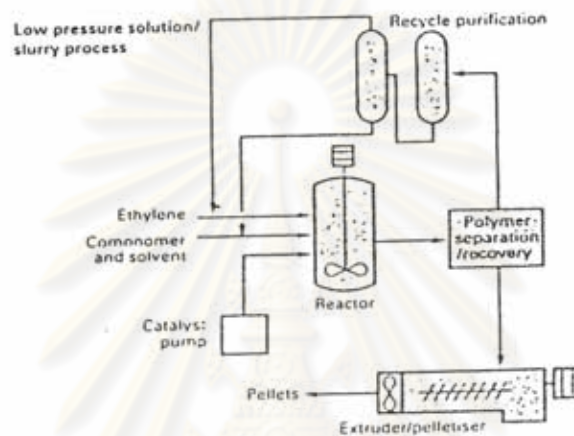
#### 2.1.1.3 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ( LLDPE )

LLDPE ผลิตจากโคพอลิเมอร์ของเอทิลีนกับ โคอโมโนเมอร์ประเภทแอลฟา-โอเลฟินส์ ( alpha olefins ,  $\alpha$ -olefins) อุณหภูมิและความดันที่ใช้ต่ำกว่ากระบวนการผลิต LDPE กระบวนการผลิต LLDPE มีอยู่ 3 วิธี ดังต่อไปนี้

1. กระบวนการผลิตแบบสารละลาย ( solution process ) กระบวนการนี้ปฏิกิริยาจะดำเนินไปภายใต้ความดัน 2.5 - 10 เมกะปาสกาล ที่อุณหภูมิ 25 - 300 องศาเซลเซียส โดยใช้โลหะทรานซิชันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ข้อเสียของวิธีนี้คือ ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวต่ำ จึงต้องขจัดตัวเร่งปฏิกิริยาและแยกเอาตัวทำละลายที่ตกค้างอยู่ ออก ทำให้ต้นทุนการผลิตสูง

2. กระบวนการผลิตแบบสารแขวนลอย ( slurry process ) วิธีนี้อุณหภูมิของ

เม็ดพอลิเมอร์จะแขวนลอยอยู่ในตัวทำละลายที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ในกระบวนการผลิตเม็ด LLDPE จะไม่นิยมใช้วิธีนี้เพราะผงพอลิเอทิลีนจะละลายในตัวทำละลาย ( Maraschin , 1986 ) รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการผลิต LLDPE แบบสารแขวนลอย

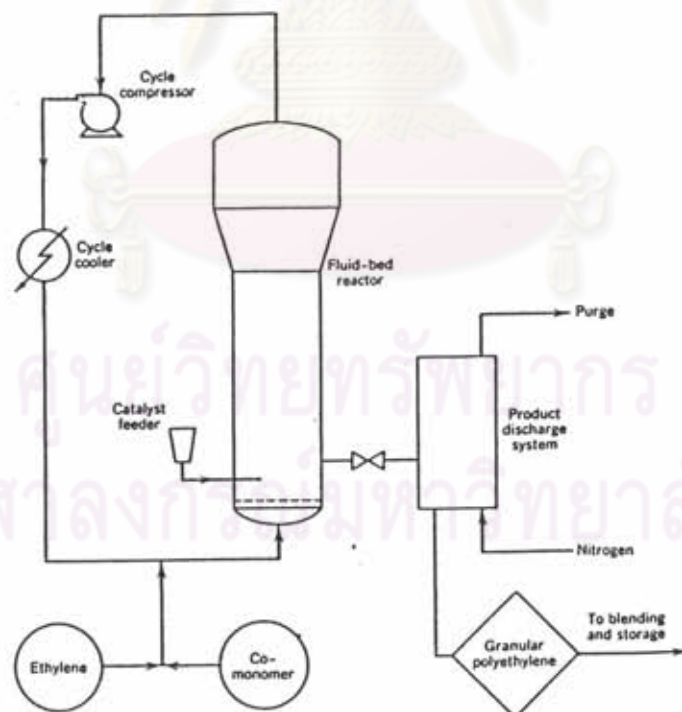


รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิต LLDPE แบบสารแขวนลอย  
( Better and Bell , 1982 )

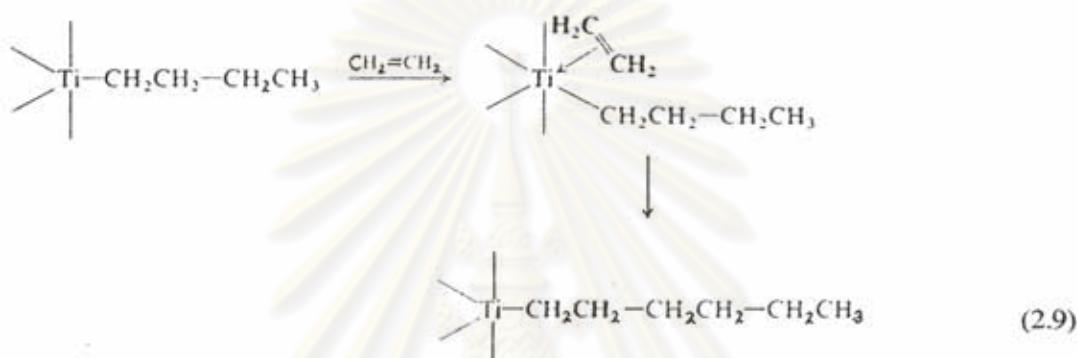
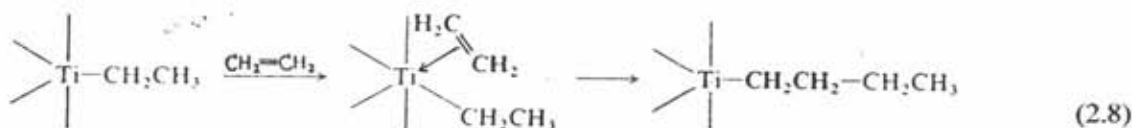
3. กระบวนการผลิตแบบสถานะแก๊ส ( gas phase process ) การผลิต LLDPE ด้วยวิธีนี้เป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด เริ่มต้นโดยบริษัทคูปองค์ ประเทศแคนาดา และต่อมาร่วมมือกับบริษัทฟิลลิปส์ในปลาย ค.ศ. 1950 ปัจจุบันนี้ บริษัทยูนิยอนคาร์ไบด์ ได้พัฒนากระบวนการผลิตแบบสถานะแก๊ส ดังแสดงในรูปที่ 2.4 พรทิมล มฤคทัต , บรรณาธิการ ( 2533 ) ได้กล่าวถึงกระบวนการผลิต LLDPE ในประเทศไทยว่า ได้นำเทคโนโลยีของ บริษัท บีพีเคมิคัล ประเทศอังกฤษมาผลิต การพอลิเมอไรซ์เป็นแบบโคออร์ดิเนต ( coordinate polymerization ) ดังแสดงในสมการที่ 2.8 - 2.9 Morrison และ Boyd ( 1987 ) ได้อธิบายไว้ว่า ปฏิกริยานี้ค้นพบโดยซีเกลอร์ ( Karl Zeigler ) และแนตตา ( Giulio Natta ) โดยใช้สารตัวเร่งปฏิกริยา ซีเกลอร์ -แนตตา ซึ่งประกอบด้วยสารทิตานเนียมเตตระคลอไรด์และโลหะอัลกิล เช่น ไตรเอทิลอะลูมิเนียม ในกระบวนการผลิตจะใช้โมโนเมอร์ สารร่วมปฏิกริยา และแก๊สไฮโดรเจนผสมกัน ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์บริเวณใต้แผ่นตะแกรง ภายใต้อุณหภูมิ 0.7 ถึง 1.0 เมกะปาสกาล ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า ปฏิกริยารวมตัวจะเกิดขึ้นเหนือแผ่นตะแกรง โดยทิตานเนียมจะจับ



กลุ่มกับหมู่เอทิลกลายเป็นสารเชิงซ้อนทิตาเนียม ( titanium-complex ) ทิตาเนียมที่มีออร์บิทัลว่างอยู่จะ overlap กับพันธะพาย (  $\pi$ - bond ) ของเอทิลีนโมเลกุลต่อไป หลังจากนั้น เอทิลีนจะเข้าแทรกระหว่างทิตาเนียมกับหมู่เอทิลที่มีอยู่ กลายเป็นหมู่บิวทิล ( n - butyl ) และเฮกซิล ( n - hexyl ) ปฏิกริยาจะเกิดขึ้นต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ จนสายโซ่โมเลกุลยาวมากและสิ้นสุดปฏิกิริยาโดยการจับกับไฮโดรเจนอะตอม ในที่สุดสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนจะแยกออกมาจากโลหะ ผงพอลิเอทิลีนที่ได้จะฟุ้งกระจายอยู่ในถังปฏิกรณ์ และมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ ผงเหล่านี้เมื่อฟุ้งขึ้นไปถึงส่วนบนของถังปฏิกรณ์ จะตกกลับลงมาใหม่ เนื่องจากแก๊สบริเวณนี้มีความเร็วต่ำ ส่วนแก๊สที่ผ่านขึ้นไปถึงส่วนบนของถังปฏิกรณ์จะถูกหล่อเย็น เพื่อขจัดความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยารวมตัว และวนกลับมาใช้ใหม่ พอลิเอทิลีนจะถูกพ่นออกมาเป็นระยะ ๆ และนำไปอัดรีดเป็นเม็ดต่อไป



รูปที่ 2.4 กระบวนการผลิต LLDPE แบบสถานะแก๊ส ( Rosen , 1993 )



กระบวนการผลิตแบบใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์-นัตตา มีข้อดีคือ สามารถผลิตพอลิเอทิลีนที่มีลักษณะเชิงเส้นได้ดี และบางครั้งสามารถควบคุมสเตอริโอเคมีก็ได้ กระบวนการผลิต LLDPE แบบสถานะแก๊สนี้ใช้อุณหภูมิและความดันต่ำ ขั้นตอนการผลิตจึงไม่ยุ่งยากซับซ้อน สามารถประหยัดพลังงานและต้นทุนการผลิต นอกจากนี้สารตัวเร่งปฏิกิริยาของบริษัท บีพี เคมีคัล ยังเป็นแบบนอน-อาร์เรเนียส ( Non-Arrhenius ) ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างสม่ำเสมอ เม็ด LLDPE ที่ได้จึงมีคุณภาพสูง ไม่มีตาปลา และมีความใสดี

2.1.1.4 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมาก ( very low density polyethylene , VLDPE ) VLDPE เป็นพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า 0.915 กรัม/ลบ.ซม. ในทางการค้าจะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.890 - 0.915 กรัม/ลบ.ซม. โดยมีกระบวนการผลิตแบบสถานะแก๊สคล้ายกับ LLDPE และใช้เอทิลีนและโคโมโนเมอร์ประเภทแอลฟา - โอลิฟินส์ ถ้าต้องการผลิตพอลิเมอร์ให้มีความหนาแน่นต่ำลง จะต้องใช้โคโมโนเมอร์เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดอื่น VLDPE จะมีความยืดหยุ่นมากกว่า นิยมใช้ทำฟิล์ม หลอดพลาสติก และขวดชนิดบีบได้ ( squeeze bottles )

### 2.1.1.5 พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง ( high molecular weight polyethylene , HMWPE )

พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง ในทางการค้ามี 2 ชนิด ดังนี้

1. High Molecular Weight High Density Polyethylene ( HMW-HDPE )  
มีกระบวนการผลิตคล้ายกับ HDPE พอลิเมอร์ในทางการค้าน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 500,000 นิยมใช้ในการผลิตฟิล์ม ท่อ และภาชนะบรรจุของ

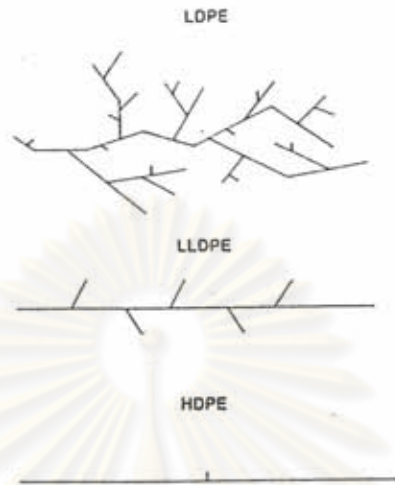
2. Ultra High Molecular Weight Polyethylene ( UHMWPE ) เตรียมได้  
จากกระบวนการผลิตแบบซีเกลอร์ชนิดพิเศษ พอลิเมอร์ที่ได้จะไม่อยู่ในรูปของเม็ด เพราะการ  
อัดรีด ( extrusion ) จะทำให้สายโซ่โมเลกุลขาดออก ( chain scission ) และมีน้ำหนักโมเลกุล  
ลดลง พอลิเมอร์ในทางการค้าจะมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 3,000,000 ขึ้นไป นิยมใช้ในการทำ  
พวกเครื่องใช้ต่าง ๆ และท่อขนส่งผลิตภัณฑ์

เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดอื่นแล้ว พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีความ  
ทนต่อแรงกระแทก ทนต่อการกัดกร่อนและทนต่อความเค้นที่ถูกกระทำจากสภาพแวดล้อมได้  
ดีกว่า

### 2.1.2 ลักษณะโครงสร้างและสมบัติเฉพาะตัวของ LDPE

Butler ( 1992b ) ได้กล่าวไว้ว่า LDPE เป็นพอลิเอทิลีนชนิดแรกที่ถูกผลิตขึ้นใน  
ทางการค้า โดยมีความหนาแน่นต่ำทั้งนี้เนื่องจากเป็นมีโครงสร้างที่มีกิ่งก้านสาขาแยกออกจาก  
ลำตัวมากมาย ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยจะมีทั้งกิ่งสั้น ( short chain branch , SCB ) และกิ่งยาว  
( long chain branch , LCB ) กระจายปะปนกันอย่างไม่เป็นระเบียบตลอดความยาวของสายโซ่  
โมเลกุล จึงทำให้โมเลกุลจัดเรียงตัวอย่างหลวม ๆ และไม่สม่ำเสมอ พอลิเอทิลีนที่ได้จะมีความ  
หนาแน่นต่ำ มีลักษณะค่อนข้างใส มีความเหนียวพอสมควร และมีคว้าน้ำมันคล้ายขี้ผึ้งหรือ  
เทียนไข ซึ่งสมบัติต่าง ๆ ของ LDPE จะขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ( average molecular weight )  
ปริมาณการเกิดผลึก ( crystallinity ) และการกระจายของน้ำหนักโมเลกุล ( molecular weight  
distribution , MWD ) หากใช้กระบวนการสังเคราะห์ที่เหมาะสม จะได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนัก  
โมเลกุล ความหนาแน่น และ MWD ตามต้องการ





รูปที่ 2.5 ลักษณะกิ่งก้านของ LDPE LLDPE และ HDPE

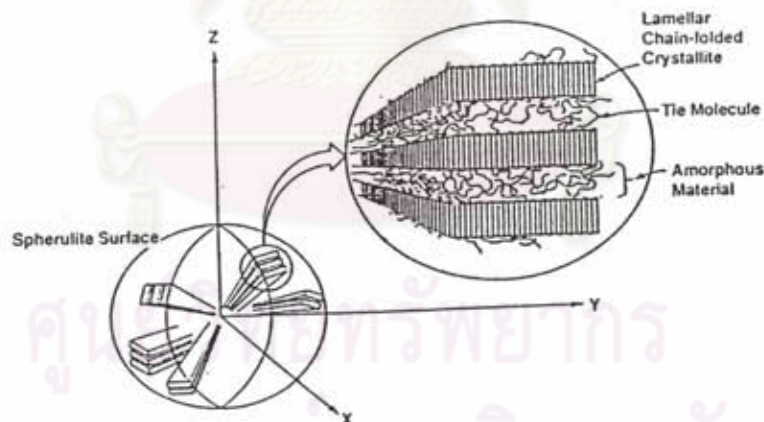
LDPE เกรดที่ใช้ในการผลิตฟิล์ม จะมีค่าครรชนีการไหล ( Melt index, MI ) อยู่ใน ช่วง 20 ถึง 0.1 กรัม/10 นาที ถ้าพอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ( MI ต่ำ ) จะได้ฟิล์มที่มีความ ทนแรงดึงและความทนแรงกระแทกสูง แต่สมบัติทางแสงจะลดลง อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ที่มี น้ำหนักโมเลกุลสูงจะขึ้นรูปได้ยาก เนื่องจากมีความหนืดและจุดหลอมเหลวสูง ซึ่งอิทธิพลของ น้ำหนักโมเลกุลต่อสมบัติของ LDPE เมื่อเป็นของแข็งและหลอมเหลว แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงอิทธิพลของน้ำหนักโมเลกุลต่อสมบัติของ LDPE เมื่อเป็นของ และหลอมเหลว

Melt index effects ( at constant density and MWD )	
Decreasing MI ( increasing molecular weight )	
Melt properties	Solid state properties
- Melt strength improve	- Optics decrease
- Processability decrease	- Tensile strength increase
- Drawdown decrease	- Impact strength increase
- Die swell increase	- Heat - seal strength increase

เมื่อ LDPE อยู่ในสถานะที่เป็นของแข็งจะมีโครงสร้างเป็นสเฟียรูไลต์ ( spherulite ) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งโมเลกุลของพอลิเมอร์จะพับไปพับมาในบริเวณที่เกิดผลึกมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ ( platelet ) ซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ( lamellar ) ส่วนบริเวณที่เป็นอสัณฐาน เกิดจากกิ่งก้านสาขาสั้น ๆ ( SCB ) ไปขัดขวางการพับไปพับมาของโมเลกุล นอกจากนี้ขนาดและการกระจายขนาดของสเฟียรูไลต์ ยังมีผลต่อสมบัติทางแสงและสมบัติเชิงกลของฟิล์มอีกด้วย

LDPE ที่มีความหนาแน่นต่ำ จะมีจุดหลอมเหลว ความแข็งดึง และอุณหภูมิตั้งใช้ในการปิดผนึกด้วยความร้อนต่ำ แต่ความทนแรงดึงและแรงกระแทกจะสูงขึ้น LDPE จะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.910 ถึง 0.925 กรัม/ลบ.ซม. ในขณะที่ MDPE มีความหนาแน่น 0.926 ถึง 0.940 กรัม/ลบ.ซม. และ HDPE มีความหนาแน่นมากกว่า 0.941 กรัม/ลบ.ซม. ตารางที่ 2.2 แสดงอิทธิพลของความหนาแน่นต่อสมบัติของพอลิเมอร์



รูปที่ 2.6 แสดงรายละเอียดโครงสร้างของสเฟียรูไลต์

ตารางที่ 2.2 แสดงอิทธิพลของความหนาแน่นต่อสมบัติของพอลิเมอร์

Density effects ( at constant MW and MWD )	
Density decreasing	
Melt properties	Solid state properties
-Insignificant effects	-Stiffness decrease -Impact strength increase -Permeability increase -Heat sealability increase -Melting point decrease -Optics increase

กิ่งยาว ๆ ( LCB ) ของ LDPE มีอิทธิพลต่อการเกิดผลึกและความหนาแน่นน้อยมาก แต่จะมีผลทำให้ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์หลอมเหลวมากขึ้น ทั้งนี้เพราะ LCB จะเพิ่มการพันกันของสายโซ่โมเลกุล ( entanglement ) มีผลทำให้เสถียรภาพของลูกโป่ง ( bubble stability ) เพิ่มมากขึ้น ไม่แตกง่ายในขณะเป่าฟิล์ม

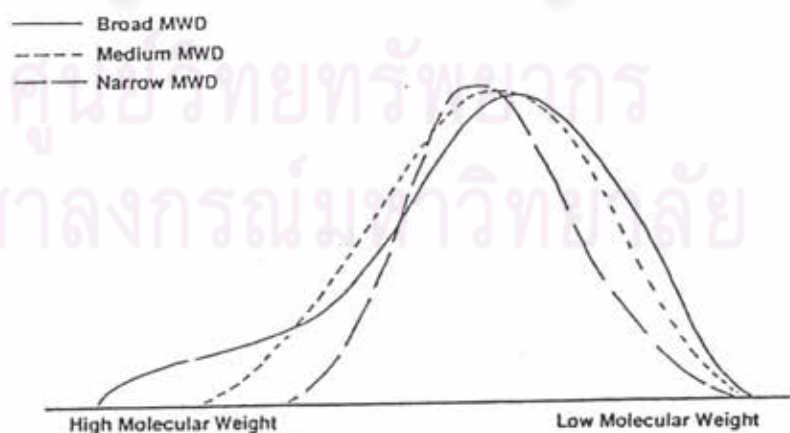
LDPE ประกอบด้วยสายโซ่โมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลจากต่ำไปจนถึงสูงมาก ซึ่ง MWD จะเป็นการวัดการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่โมเลกุลเหล่านี้ ซึ่งจะมีทั้งการกระจายที่กว้างมาก ( broad ) กว้างปานกลาง ( medium ) หรือแคบ ( narrow ) กระจายอย่างสมมาตร ( symmetrical distribution ) หรืออสมมาตร ( asymmetrical distribution ) ซึ่งอิทธิพลของ MWD แสดงไว้ในตารางที่ 2.3



ตารางที่ 2.3 แสดงอิทธิพลของ MWD ต่อสมบัติของ LDPE เมื่อเป็นของแข็ง และหลอมเหลว

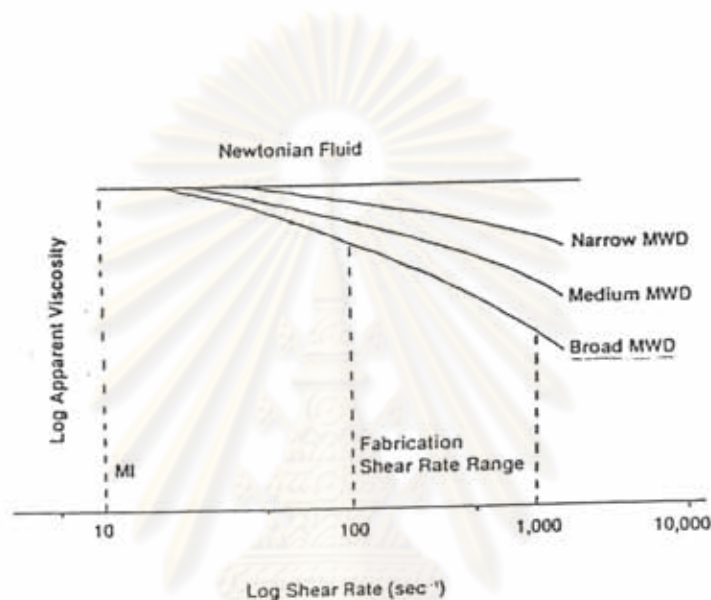
Molecular weight distribution effect ( at constant MI and density )	
Narrow molecular weight distribution	
Melt properties	Solid state properties
- Extruder amps increase	- Stress crack increase
- Extruder pressure increase	- Impact strength increase
- Melt strength decrease	- Tensile strength increase
- Die swell decrease	- Tear strength increase

LDPE สามารถมี MI และความหนาแน่นเท่ากันได้ แต่จะมี MWD ที่แตกต่างกัน รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นความแตกต่างของ MWD ของพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากันที่หาได้จาก GPC ซึ่งพอลิเมอร์ทั้ง 3 ของ LDPE เมื่อนำไปเป่าเป็นฟิล์ม จะมีลักษณะที่แตกต่างกัน รวมทั้งสมบัติของฟิล์มที่ได้จะต่างกันด้วย



รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบความแตกต่างของ MWD ของ LDPE ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากัน

รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบสมบัติการไหลหรือความหนืดของ LDPE 3 ชนิดที่มี MI เท่ากัน แต่มี MWD ต่างกัน จะเห็นว่าพอลิเมอร์ที่มี MWD กว้าง จะไวต่ออัตราการเฉือน (shear rate) มากกว่า ดังนั้นเมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้น ความหนืดจะลดลงมากกว่าพอลิเมอร์ที่มี MWD แคบ



รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบสมบัติการไหลหรือความหนืดของ LDPE 3 ชนิด ที่มี MI เท่ากัน แต่มี MWD ต่างกัน

สมบัติทางกายภาพของฟิล์ม LDPE ไม่ได้ขึ้นกับสมบัติเฉพาะตัวของพอลิเมอร์เท่านั้น แต่ยังขึ้นกับภาวะของกระบวนการขึ้นรูปอีกด้วย สมบัติทางกายภาพของ LDPE จะเปลี่ยนแปลงไปตาม MI ความหนาแน่น และ MWD ตารางที่ 2.4 แสดงรายละเอียดสมบัติของ LDPE ตารางที่ 2.5 แสดงรายละเอียดของฟิล์ม LDPE จะเห็นว่ากระบวนการผลิตฟิล์ม 2 วิธี คือ การเป่า และการอัดรีดผ่านลูกกลิ้งที่เย็น (cast film) จะได้ฟิล์มที่มีสมบัติต่างกันเล็กน้อย

ตารางที่ 2.4 แสดงรายละเอียดสมบัติของ LDPE

Property	Typical LDPE	ASTM method
Melt index ,g/10 min	2.0	D-1238
Density , g/cc	0.920	D-792
Melting point ( DSC ) , °C	107	D-3418
Vicat softening point , °C	93	D-1525
Ultimate tensile , psi	1600	D-638
Yield strength , psi	1600	D638
Ultimate elongation , %	600	D638
MVTR , g-mil/100 sq in/day at 100 °F , 90 % RH	1.2	E-96
02TR ,cc-mil/100 sq in/day/atms at 23 °C	450	D-1434

ตารางที่ 2.5 แสดงรายละเอียดสมบัติของฟิล์ม LDPE ที่มีกระบวนการผลิตต่างกัน

Comparison	Blown film	Cast film
Die shape	Annular	Flat
Quenching method	Chilled air	Chill rolls
Cooling temperature , ° F	50 - 90	80 - 120
Melting temperature , ° F	30 - 500	450 - 600
Specific output , lb/hr/in	7 - 25	20 - 40
Line speed , fpm	30 - 500	300 - 1500
Gauge uniformity , ± %	5 - 25	2 - 15
Limitations	Cooling Melt stability Lower optics	Lower pressure Fixed layflat Little TD orientation



ฟิล์มที่ขึ้นรูปโดยการอัดรีดผ่านลูกกลิ้งที่เย็น จะเย็นตัวเร็วกว่าการขึ้นรูปด้วยการเป่า ซึ่งฟิล์มจะถูกทำให้เย็นตัวด้วยอากาศ ดังนั้นฟิล์มที่ได้จากการอัดรีดผ่านลูกกลิ้งที่เย็น จึงมีความหนาแน่นต่ำกว่า มีสมบัติทางแสงที่ต่ำกว่า ความมัว (haze) ของฟิล์มลดลง รวมทั้งความเงามันเพิ่มขึ้น สำหรับฟิล์มที่ได้จากกระบวนการเป่าฟิล์ม จะมีการจัดเรียงตัวตามแนวขวางมากขึ้น ในขณะที่ลูกโป่งขยายออก ฟิล์มที่ได้จึงมีความทนแรงกระแทกมากขึ้น และมีสมบัติการหดตัวที่สมดุล ความแตกต่างระหว่างกระบวนการผลิตฟิล์มแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ความแตกต่างระหว่างการเป่าฟิล์ม และการอัดรีดผ่านลูกกลิ้งที่เย็น

การเป่าฟิล์ม	การอัดรีดผ่านลูกกลิ้งที่เย็น
- อุณหภูมิการหลอมเหลวต่ำกว่า	- อุณหภูมิการหลอมเหลวสูงกว่า
- อัตราการเย็นตัวช้ากว่า	- อัตราการเย็นตัวเร็วกว่า
- ผลึกมีขนาดใหญ่กว่า	- ผลึกมีขนาดเล็กกว่า
- ฟิล์มที่ได้มีความหนาแน่นและความใสมากกว่า	- ฟิล์มที่ได้มีความหนาแน่นและความใสน้อยกว่า
- ฟิล์มมีความแข็งแรงทั้งสองทิศทาง	- ฟิล์มมีความแข็งแรงในแนวขวางน้อย

ในงานขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ทั่ว ๆ ไป จะใช้ค่า MI ของพอลิเมอร์ มาพิจารณาเพื่อเลือกใช้กระบวนการผลิตให้เหมาะสม พอลิเมอร์ที่มีค่า MI สูง ๆ จะนิยมใช้ในงานฉีด เพราะพอลิเมอร์หลอมเหลวสามารถไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ได้ง่าย ค่า MI ต่ำ ๆ จะใช้ในงานเป่า นอกจากนี้งานในแต่ละประเภทยังมีการนำไปทำผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันไปอีก จึงจำเป็นต้องพิจารณาสมบัติอื่น ๆ ประกอบไปด้วย สมบัติเฉพาะตัวของ LDPE แสดงไว้ในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติเฉพาะตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ  
และความหนาแน่นสูง ( Daniels, 1989b )

สมบัติเฉพาะตัวของพอลิเอทิลีน	LDPE	HDPE
glass transition temperature	-90 C°	-110 C°
heat distortion temperation	40 C°	60 C°
maximum service temperature	60 - 75 C°	70 - 80 C°
minimum service temperature	-50 C°	- 50 C°
melting temperature	115 C°	135 C°
decomposition temperature	340 - 440 C°	340 - 440 C°
reflective index	1.51	1.53
transmission of light	high , milky, white in color	haze, milky , white in color 21
moisture - vapor transmission	21 g/mil/100 in <sup>2</sup> 24 hr	g/mil/100 in <sup>2</sup> 24 hr
water absorption	0.01 % of volume	0.01 % of volume
combustion product	no smoke ; CO , CO <sub>2</sub>	no smoke ; CO , CO <sub>2</sub>
chemical stability ; resistance to		
-acids	excellent	excellent
-bases	excellent	excellent
-solvents	poor to moderate	good to excellent
-oils and fats	good	excellent
-sun light	poor	poor , crazes
toxicity	most grades approved for food use	most grades approved for food use

ในการผลิตฟิล์ม LDPE จะมี LDPE หลายเกรดให้เลือกใช้ ดังแสดงในตารางที่ 2.8  
LDPE สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ง่าย การเลือกกระบวนการที่ใช้ผลิตจึงขึ้นกับการใช้งานของ  
ฟิล์มเป็นสำคัญ

ตาราง 2.8 แสดงสมบัติและการใช้งานของ LDPE

ชนิดของ LDPE	homopolymer	homopolymer	homopolymer	homopolymer
melt Index(g/10min)	0.2 - 0.8	1.5 - 2.0	1.2 - 2.0	5.0 - 10.0
density ( g/cm <sup>3</sup> )	0.919 - 0.923	0.922 - 0.925	0.918 - 0.924	0.917 - 0.930
MWD	broad	broad	broad	broad
process	blown	blown	blown	cast
applications	shipping sack; heavy-duty applications	bread and bakery; general-purpose packing	bread and bakery; general-purpose packing	extrusion coating
critical properties	toughness	clarity	extrudability; toughness	drawdown adhesion pinhole resistance

### 2.1.3 ลักษณะโครงสร้างและสมบัติเฉพาะของ LLDPE

Butler ( 1992a ) ได้กล่าวไว้ว่า LLDPE ถูกผลิตโดยการโคพอลิเมอไรส์เอทิลีนกับแอลฟา-โอเลฟินส์ โคลโมโนเมอร์ที่ใช้โดยทั่วไปมีอยู่หลายชนิด เช่น บิวทีน เฮกซีน 4-เมทิลเพนทีน และ ออกทีน เป็นต้น กระบวนการผลิตจะใช้ความดันและอุณหภูมิต่ำกว่าการผลิต LDPE ทั่ว ๆ ไป ปัจจุบันมีอยู่หลายกระบวนการด้วยกันในการผลิต LLDPE ได้แก่ gas - phase fluidized bed , gas - phase stirred bed , liquid - phase slurry และ liquid - phase solution

LLDPE มีโครงสร้างอยู่ระหว่าง LDPE และ HDPE มีลักษณะเป็นสายโซ่ยาว ๆ และมีกิ่งสั้น ๆ แยกออกจากลำตัวอันเนื่องมาจากโคลโมโนเมอร์ที่ใช้ ไปตลอดความยาวของโมเลกุล แต่จะไม่มีกิ่งก้านรุงรังเหมือน LDPE ดังแสดงในรูปที่ 2.5 LLDPE จึงเป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่มีคุณภาพสูง ( ความหนาแน่น 0.920 - 0.940 กรัม/ลบ.ซม. ) ซึ่งมีการใช้งานหนักไปในการผลิตฟิล์ม เช่นเดียวกับ LDPE เพราะจะมีลักษณะเด่น คือ ความเหนียว ความต้านทานแรงเจาะทะลุ ( puncture resistance ) ความใส และสามารถเป่าเป็นฟิล์มที่บางมากได้ สมบัติทางกายภาพ เช่น MI และความหนาแน่นจะขึ้นกับชนิดของโคลโมโนเมอร์ที่ใช้ การใช้แอลฟา-โอเลฟินส์ลำดับสูงจะทำให้สมบัติทางกายภาพของฟิล์มดีขึ้น

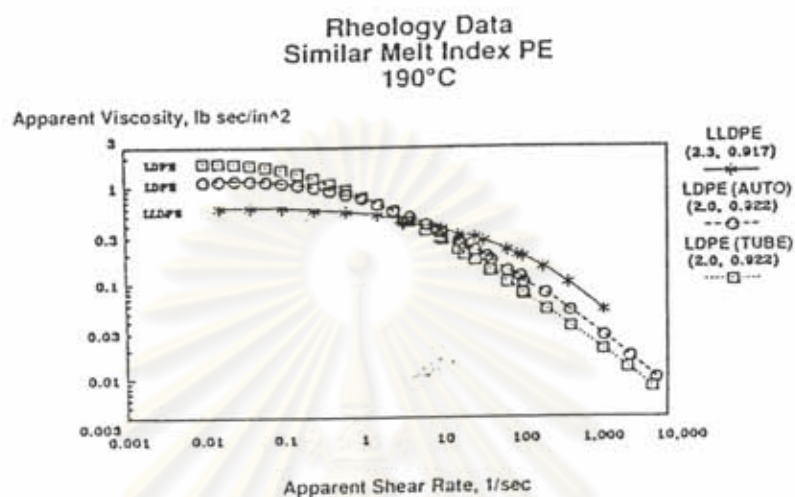


การไม่มีกิ่งก้านสาขาขาว ๆ ทำให้ LLDPE แตกต่างจาก LDPE ซึ่งความยาวของกิ่ง ขึ้นกับชนิดของโคโมโนเมอร์ที่ใช้ บิวทีนจะให้กิ่งเป็นเอทิล ( มีคาร์บอน 2 อะตอม ) และออกทีนให้กิ่งที่เป็นเฮกซิล ( มีคาร์บอน 6 อะตอม ) และจำนวนของกิ่งใน LLDPE ขึ้นกับปริมาณของโคโมโนเมอร์ที่ใส่เข้าไป ซึ่งมีผลต่อความหนาแน่น ตารางที่ 2.9 แสดงชนิดของโคโมโนเมอร์ และความยาวของกิ่งใน LLDPE

ตารางที่ 2.9 แสดงชนิดของโคโมโนเมอร์และความยาวของกิ่งใน LLDPE

Comonomer type and LLDPE branch length		
Butene	Hexene	Octene
<pre> C   C   C-C-C   C   C </pre>	<pre> C   C   C-C-C-C-C   C   C </pre>	<pre> C   C   C-C-C-C-C-C-C   C   C </pre>

LLDPE จะมีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลที่แคบ และมีความหนืดที่เกิดจากแรงเฉือน ( shear viscosity ) สูงกว่า LDPE รูปที่ 2.9 แสดงการเปรียบเทียบความหนืดของ LDPE และ LLDPE ที่มีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกัน จะเห็นว่าในช่วงแรกที่อัตราการเฉือนต่ำ ๆ ความหนืดเฉือนของ LLDPE จะต่ำกว่าของ LDPE ทั้งนี้เพราะไม่มีการพันกันของกิ่งก้านสาขา ทำให้เกิดการไหลได้ง่าย แต่เมื่ออัตราการเฉือนสูงขึ้นความหนืดของ LDPE จะลดลงเร็วกว่า LLDPE ( เรียกว่าเกิด shear thinning ) ทั้งนี้เพราะกิ่งก้านสาขาของ LDPE ที่พันกันจะคลายออก ทำให้การไหลเกิดง่ายขึ้น ระบบของการอัดรีดฟิล์ม ส่วนใหญ่จะมีอัตราการเฉือน 100 - 5000  $\text{sec}^{-1}$  ( Thurlow , 1985 ) ซึ่งที่อัตราการเฉือนมาก LLDPE จะมีความหนืดมากกว่า LDPE จึงต้องใช้พลังงานหรือแรงบิด ( torque ) สูงกว่า รวมทั้งกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิและความดันที่มากกว่าด้วย



รูปที่ 2.9 แสดงการเปรียบเทียบความหนืดของ LDPE และ LLDPE ที่มีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกัน

สมบัติทางกายภาพของ LLDPE จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่า MI ความหนาแน่นและชนิดของโคโมโนเมอร์ที่ใช้ ตารางที่ 2.10 แสดงสมบัติของฟิล์ม LLDPE ทั่ว ๆ ไปที่ได้จากการเป่าฟิล์ม ซึ่งสมบัติของฟิล์มจะขึ้นกับสมบัติของพอลิเมอร์ โคโมโนเมอร์ที่ใช้ และภาวะของกระบวนการผลิต

ตารางที่ 2.10 แสดงสมบัติของฟิล์ม LLDPE ทั่ว ๆ ไปที่ได้จากการเป่าฟิล์ม

Properties	Typical LLDPE	ASTM method
Melt index ,g/10 min	1.0	D-1238
Density , g/cc	0.920	D-792
Melting point ( DSC ) , °C	118 - 125	D-3418
Vicat softening point , °C	108 - 112	D-1525
Ultimate tensile, psi	3500 - 2000	D-638
Yield strength , psi	1500 - 2000	D-638
Ultimate elongation , %	500 - 1000	D-638

LLDPE สามารถจัดจำแนกเป็น 2 พวก คือ บิวทีนและแอลฟา-โอเลฟินส์ที่สูงกว่า ซึ่งจะมีสมบัติแตกต่างกัน โดยความทนแรงดึงของฟิล์ม LLDPE จะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น และโคโมโนเมอร์ที่เป็นแอลฟา-โอเลฟินส์ที่สูงกว่า จะมีความทนแรงดึงสูงกว่า บิวทีนโคพอลิเมอร์ 30 - 35 เปอร์เซ็นต์ และมีความทนแรงดึงมากกว่า LDPE ถึง 150 - 200 เปอร์เซ็นต์ ส่วนความทนต่อแรงกระแทกจะขึ้นกับแฟคเตอร์หลายอย่าง ซึ่งรวมถึงความหนาแน่น ชนิดของโคโมโนเมอร์ น้ำหนักโมเลกุล และภาวะของการขึ้นรูปฟิล์ม ที่ความหนาแน่น 0.920 กรัม/ลบ.ซม. บิวทีนโคพอลิเมอร์จะมีความทนแรงกระแทกเพียงครึ่งหนึ่งของโคพอลิเมอร์ของออกทีนและแอลฟา-โอเลฟินส์ที่สูงกว่า ดังแสดงในตารางที่ 2.11 นอกจากนี้ความต้านทานต่อการฉีกขาด ( Elmendorf tear resistance ) ในทิศทางของเครื่องจักร ( machine direction , MD ) ของแอลฟา - โอเลฟินส์ที่สูงกว่า จะสูงกว่าบิวทีนโคพอลิเมอร์ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ตารางที่ 2.12 แสดงสมบัติและการใช้งานของ LLDPE ที่มีโคโมโนเมอร์ต่างชนิดกัน



ตารางที่ 2.11 แสดงสมบัติของฟิล์ม LLDPE ที่ผลิตจากโคโมโนเมอร์ต่างชนิดกัน

Film property	Butene LLDPE	Octene LLDPE	LDPE
Melt index ,g/10 min.	1.0	1.0	0.25
Density , g/cc	0.920	0.920	0.920
Thickness , mils <sup>0</sup>	1.5	1.5	1.5
Ultimate tensile , psi ( MD )	5880	6590	4780
( TD )	4660	5115	3180
Ultimate elongation , % ( MD )	620	630	215
( TD )	760	810	645
Dart impact , g	145	240	170
Elmendorf tear , g ( MD )	180	371	110
( TD )	510	816	205

ตารางที่ 2.12 แสดงสมบัติและการใช้งานของ LLDPE ที่มีโคโมโนเมอร์ต่างชนิดกัน

ชนิดของ โคโมโนเมอร์	LLDPE butene	LLDPE hexene ; octene	LLDPE hexene ; octene	LLDPE hexene ; octene
melt Index	0.8 - 2.5	2.0 - 5.0	0.7 - 1.5	0.8 - 1.5
density ( g/cm <sup>3</sup> )	0.917-0.922	0.928-0.935	0.924-0.928	0.917-0.923
MWD	narrow	narrow	narrow	narrow
process	blown	cast	blown	blown
applications	general-purpose packaging	bread and bakery;overwrap	grocery sack	blending ice bags
critical properties	extrudability toughness	stiffness ; tear resistance	stiffness; tear resistance	excellent toughness low temperature properties

#### 2.1.4 การเปรียบเทียบสมบัติและการใช้งานของฟิล์ม LDPE และ LLDPE

ถึงแม้ว่า LDPE และ LLDPE จะเป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเหมือนกัน แต่กระบวนการผลิตต่างกัน จึงทำให้มีสมบัติที่เด่นต่างกันไป โดย LDPE จะมีสมบัติทางกายภาพค่อนข้างดี แต่มีสมบัติเชิงกลด้อยกว่า LLDPE ดังแสดงในตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.13 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์ม LLDPE และ LDPE

( Hamielec , 1986 )

สมบัติของฟิล์ม	LLDPE เปรียบเทียบกับ LDPE
<b>สมบัติเชิงกล</b> - ความทนต่อการเจาะทะลุ ( Puncture resistance ) - ความทนต่อแรงกระแทก - ความทนต่อแรงดึง - มอดุลัสเซคเคนท์ ( Secant modulus ) - ความทนต่อความเค้นจากสภาพแวดล้อม ( Stress crack resistance ) - ความต้านทานแรงดันระเบิด ( Bursting strength ) - การยืดออกที่จุดขาด - การทรงรูป ( Rigidity ) - ความแข็งแรงต่อรอยเชื่อม ( Seal strength )	มากกว่า มากกว่า มากกว่า มากกว่า มากกว่า มากกว่า มากกว่า มากกว่า มากกว่า
<b>สมบัติทางแสง ( Optical Properties )</b> - ความเงามัน ( Gloss ) - ความฝ้า ( Haze )	น้อยกว่า มากกว่า
<b>สมบัติในการขึ้นรูป</b> - ความต้องการพลังงานในการขึ้นรูป - ความสามารถในการดึงขณะหลอมเหลว ( Melt drawability )	มากกว่า ง่ายกว่า
<b>สมบัติในการใช้งาน</b>	ใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำและสูงได้ในช่วงกว้างกว่า

ฟิล์มที่ใช้งานทั่วไปจะมีรูปแบบของการผลิตฟิล์มที่แตกต่างกัน ดังนี้

1. ฟิล์มชั้นเดียว ( single layer ) สามารถผลิตได้โดยวิธีการเป่าฟิล์ม หรือการหล่อฟิล์ม ส่วนใหญ่แล้วมักผลิตจาก LDPE และ LLDPE โดยมักทำเป็นถุงบรรจุสิ่งของที่มีน้ำหนักสูง

เช่น ผลผลิตทางการเกษตร ขยะ สิ้นค้าในร้านขายปลีก สิ้นค้าประเภทเสื้อผ้าและอาหารทั้ง อาหารสดและอาหารแช่แข็ง น้ำแข็ง ตลอดจนผลิตเป็นฟิล์มหดและฟิล์มยืดที่ใช้หุ้มรัดสินค้าบน แท่นรองรับสินค้า ( palletization )

2. ฟิล์มหลายชั้น ( multi-layer ) ที่ได้จากกระบวนการอัดเคลือบ ( extrusion coating ) การรีดร่วม( coextrusion ) การลามิเนต( lamination ) และ การเคลือบด้วยโลหะ( metallization ) พอลิเอทิลีนสามารถเคลือบกับวัสดุได้หลายชนิดด้วยกัน เช่น กระดาษ แผ่นพลาสติกอะลูมิเนียมและ กระดาษถูกฟูก เป็นต้น บรรจุภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตแบบต่าง ๆ จะนิยมนำมาบรรจุ ผลิตภัณฑ์ประเภทอาหาร เช่น เนื้อ นม เนย และอาหารว่าง เป็นต้น เพราะฟิล์มที่ได้ นอกจากจะมีความแข็งแรงแล้วยังสามารถป้องกันไอน้ำ ความชื้น กลิ่น และแก๊สออกซิเจนที่จะเข้ามาทำลายผลิตภัณฑ์ภายในได้

จากรูปแบบของฟิล์มที่กล่าวมาแล้ว จะได้ว่าทั้งฟิล์ม LDPE และ LLDPE นอกจาก จะใช้ผลิตฟิล์มชั้นเดียวแล้ว ยังสามารถใช้กระบวนการผลิตแบบเคลือบผิว การลามิเนต การรีดร่วม ได้เช่นเดียวกัน

สีที่ใช้เติมแต่งสามารถใช้ร่วมกันได้ทั้งกับ LDPE และ LLDPE แต่ LLDPE จะใช้ อุณหภูมิในกระบวนการผลิตสูงกว่า จึงควรใช้สีที่ทนความร้อนได้ดีกว่า

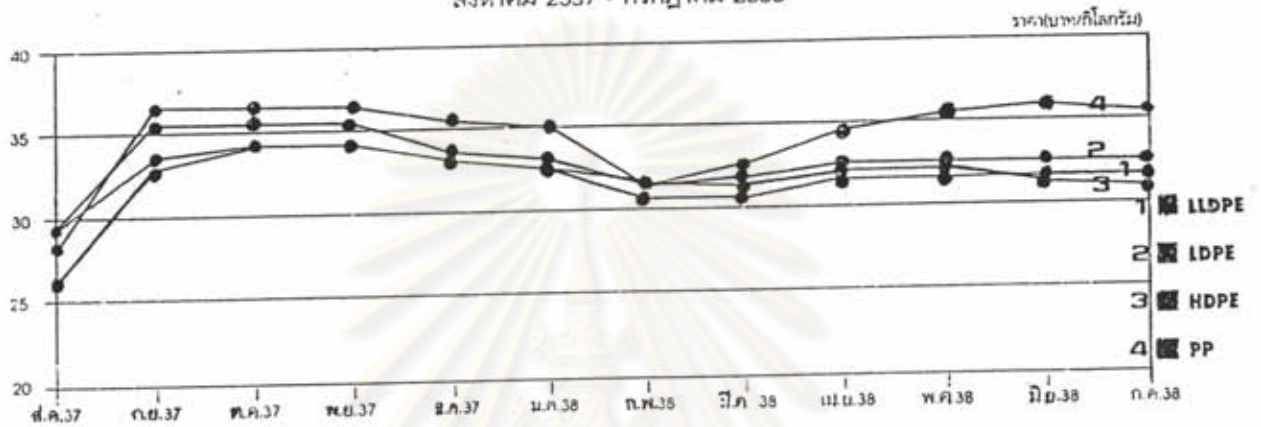
การปิดผนึกขณะร้อนด้วยเส้นลวดร้อนและแถบโลหะร้อนสามารถทำได้ดีกับ LLDPE แต่จะใช้อุณหภูมิสูงกว่า LDPE ประมาณ 10 - 15 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ตะเข็บของถุงยัง แข็งแรงกว่าจึงมีการรั่วซึมได้ยาก

LLDPE มีอายุการใช้งานนาน จึงนิยมใช้ในการบรรจุอาหารประเภทนมสด นอกจากนี้ ฟิล์ม LLDPE ยังสามารถป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี อีกด้วย

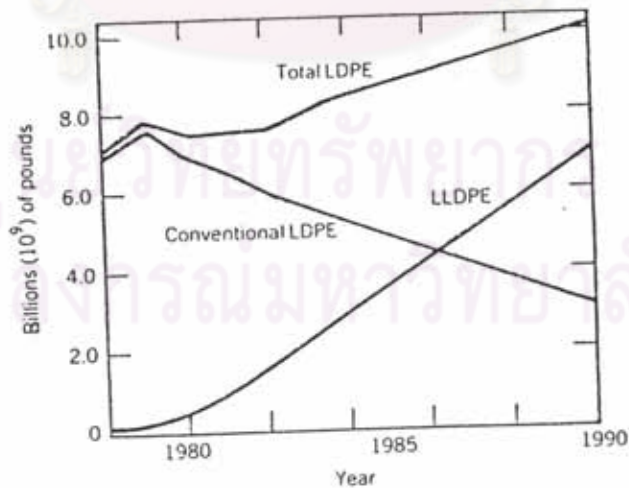
ต้นทุนการผลิตฟิล์มทั้งสองชนิดค่อนข้างต่ำ พรพิมล มฤกษัต, บรรณาธิการ( 2538 ) ได้กล่าวไว้ว่า LDPE และ LLDPE มีราคาใกล้เคียงกัน ในบางช่วงเวลาอาจมีราคาสูงแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งสมบัติโดยรวมแล้ว LLDPE จะเหนือกว่า LDPE ทำให้แนวโน้ม การใช้งาน LLDPE เพิ่มขึ้น ขณะที่ LDPE มีความต้องการลดน้อยลงตามลำดับ ดังแสดง ในรูปที่ 2.11 ( Maraschin, 1986 )



**กราฟแสดงความเคลื่อนไหวของ ราคาเม็ดพลาสติกในประเทศไทย**  
สิงหาคม 2537 - กรกฎาคม 2538



**รูปที่ 2.10** กราฟแสดงความเคลื่อนไหวของราคาเม็ด LDPE และ LLDPE



**รูปที่ 2.11** กราฟแสดงการคาดการณ์การใช้ LDPE และ LLDPE

นอกจากนี้ พลาสติกที่ผลิตจาก LLDPE ยังสามารถผลิตได้บางกว่า โดยมีความแข็งแรงเท่ากัน การเปรียบเทียบความหนาของฟิล์ม แสดงไว้ในตารางที่ 2.14 สำหรับประเภทของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจาก LDPE และ LLDPE แสดงไว้ในตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.14 ความหนาของฟิล์ม LDPE และ LLDPE ที่ให้สมบัติเชิงกลเท่ากัน

การใช้งาน	LDPE ( mil )	LLDPE ( mil )
- ถุงบรรจุสินค้าหนัก	4 - 5	3
- ถุงบรรจุน้ำแข็ง	2 ( EVA )	1.5
- ถุงชั้นในของถุงบรรจุสินค้าอุตสาหกรรม	1.5	1.25
- ถุงบรรจุผลิตผลสด	0.9	0.75
- ถุงขยะ	1.5	1.3
- ฟิล์มหด	1.25	1.0

ตารางที่ 2.15 แสดงประเภทของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจาก LDPE และ LLDPE

LDPE	LLDPE
- ถุงขยะ	- ถุงขยะ
- ถุง shopping	- ฟิล์มยืด (stretch cling )
- ถุงขนมปัง	- ถุงบรรจุอาหารแช่แข็ง
- ถุงเบเกอร์รี่	- ถุงใส่ผักและผลไม้
- ถุงใส่ผักและผลไม้	- ถุงใช้งานหนัก เช่นถุงข้าวสาร
- ถุงชั้นใน ( liner bag )	- ถุงน้ำแข็ง
- ถุงบรรจุเสื้อผ้า	- ถุงใส่นม
- ถุงบรรจุสินค้าอุตสาหกรรม	- ถุงตลาด ( general purpose bag )
- ถุงบรรจุสินค้าทางการเกษตร	- ถุงพิมพ์ ( printed bag )
- ฟิล์มหด	- ถุงชั้นใน
- ฟิล์มยืดใช้หุ้มรัดสินค้า	- ฟิล์ม laminate
- ฟิล์ม laminate	

จากสมบัติที่ได้อธิบายมาแล้ว ทำให้เม็ดพลาสติก LLDPE มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับทำเป็นฟิล์มเพื่อการใช้งานในลักษณะต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ถุงบรรจุผลิตผลในการเกษตร ( agriculture product ) และถุงใช้งานหนัก ( heavy duty bag ) เช่นถุงข้าวสาร ถุงน้ำตาล และถุงแป้ง เป็นต้น เนื่องจากถุง LLDPE มีความเหนียวในการรับแรงกระแทกและแรงดึงได้สูง สามารถป้องกันการฉีกขาดในระหว่างการลำเลียงและขนส่ง ซึ่งมีทั้งการสั้นสะเทือน การกดทับ และการกระแทกเกิดขึ้น ผลผลิตจากการเกษตรส่วนใหญ่มีรูปทรงไม่สม่ำเสมอ ทำให้ถุงถูกทิ่มทะลุได้ง่าย การใช้ LLDPE จะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ดี

2. ถุงบรรจุอาหารสัตว์ เช่น กระสอบปุย ส่วนใหญ่นิยมใช้พอลิโพรพิลีน ( PP ) แต่ถ้าใช้ LLDPE แทน นอกจากจะไม่ยุ่งยาก และต้นทุนการผลิตต่ำแล้ว ยังมีความเหนียว การรับน้ำหนัก และการป้องกันไอน้ำได้ดีอีกด้วย

3. ถุงบรรจุสินค้าในร้านค้าปลีก พลาสติกที่นิยมใช้คือ HDPE และ LDPE ถุงเหล่านี้ต้องการความทนต่อแรงดึงและความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูง การใช้ LLDPE ทดแทน จะช่วยให้สามารถผลิตฟิล์มได้บางลง โดยความแข็งแรงยังคงเดิม

4. ถุงขยะ เป็นถุงที่มีสีดำใช้กันอยู่ทั่วไปตามโรงพยาบาล สำนักงาน และที่อยู่อาศัยต่าง ๆ ส่วนใหญ่ทำมาจาก LDPE หรือ LDPE ผสมกับ LLDPE การใช้ LLDPE จะช่วยให้สามารถผลิตเป็นถุงบางลงได้

5. ถุงแช่แข็ง เช่น ถุงบรรจุสินค้าแช่แข็ง ถุงน้ำแข็ง และถุงนม เป็นต้น การที่พอลิเอทิลีนมีสมบัติในการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ดี จึงนิยมใช้ LLDPE เพราะสามารถทำเป็นฟิล์มที่บางได้ สำหรับอาหารสำเร็จรูปนิยมใช้ LLDPE เพราะสามารถปิดผนึกผ่านสิ่งปนเปื้อนที่อยู่บริเวณปากถุงได้ จะช่วยลดปัญหาการเชื่อมติดและการรั่วของรอยตะเข็บ ทำให้การผลิตอาหารสำเร็จรูปทำได้เร็วขึ้น และรักษาคุณภาพของอาหารไว้ได้

6. ถุงใส่เสื้อผ้าสำเร็จรูป แต่เดิมใช้ พอลิโพรพิลีน ( PP ) และ พีวีซี ( PVC ) ซึ่งมีข้อเสีย คือ ฟิล์มมีความกระด้างเมื่อสัมผัส และเกิดรอยยับง่าย ทำให้เสื้อผ้าดูเหมือนเก่า การใช้ LLDPE มีข้อดีทั้งในด้านความใส การทรงรูป ไม่ยับง่าย และไม่แข็งกระด้าง

7. ฟิล์มหด ( shrink film ) การใช้ฟิล์มหด มีทั้งที่ใช้กับสินค้าขายปลีกที่ต้องการบรรจุเป็นชุด และสินค้าบนแท่นรองรับสินค้าสำหรับขนถ่ายหน่วยใหญ่ ปรกตินิยมใช้ LDPE การใช้ LLDPE จะไม่ค่อยได้ผลเท่าที่ควรเพราะมีโครงสร้างโมเลกุลค่อนข้างเป็นเชิงเส้นมากกว่า LDPE จึงนิยมผสม LDPE กับ LLDPE เพื่อให้การหดตัวของฟิล์มดีขึ้น และสามารถทำเป็นฟิล์มได้บางกว่า LDPE

8. ฟิล์มยืด ( stretch film ) ฟิล์มชนิดนี้มีวัตถุประสงค์การใช้งานเช่นเดียวกับฟิล์มหด



แต่มีข้อดีกว่า คือประหยัดพลังงาน เพราะไม่ต้องใช้ความร้อนในการขึ้นรูป สามารถใช้กับสินค้าขนาดใดก็ได้ เพราะมีหน้ากว้างของฟิล์มให้เลือกได้ตามต้องการ ปัจจุบันฟิล์มชนิดนี้ส่วนใหญ่ผลิตจาก LDPE แต่ถ้าใช้ LLDPE ทดแทน จะช่วยลดต้นทุนการผลิต และช่วยเพิ่มสมบัติความทนต่อแรงดึงและการยืดตัวที่สูงกว่าได้

9. ฟิล์มเกษตรกรรม เนื่องจาก LLDPE มีสมบัติเชิงกลดีเด่น และทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดี ประกอบกับประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม จึงนิยมนำมาทำเป็นฟิล์มต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- ฟิล์มคลุมหน้าดิน ( mulch film ) ใช้คลุมหน้าดิน โดยการเจาะช่องเฉพาะจุดที่ปลูกพืช ฟิล์มที่ใช้หนาประมาณ 20 - 30 ไมครอน ซึ่งฟิล์มด้านหนึ่งจะเป็นสีดำ อีกด้านหนึ่งเป็นสีเงิน และจะคลุมให้ด้านสีดำลงดิน เพื่อป้องกันวัชพืช เก็บความชื้น รักษาอุณหภูมิ ส่วนด้านที่เป็นสีเงินซึ่งอยู่ด้านบนจะสะท้อนแสงเพื่อเพิ่มความเข้มของแสง ให้พืชสังเคราะห์แสงได้ดี ทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดี ผลผลิตสูง อีกทั้งแมลงที่เป็นศัตรูพืชส่วนใหญ่ไม่ชอบความสว่างจ้าของแสง ตัวอย่างพืชที่ใช้ฟิล์มพวกนี้ เช่น แคนตาลูป ซึ่งใช้มากในประเทศได้หวัน และญี่ปุ่น ในบ้านเราก็เริ่มใช้ในภาคเหนือ

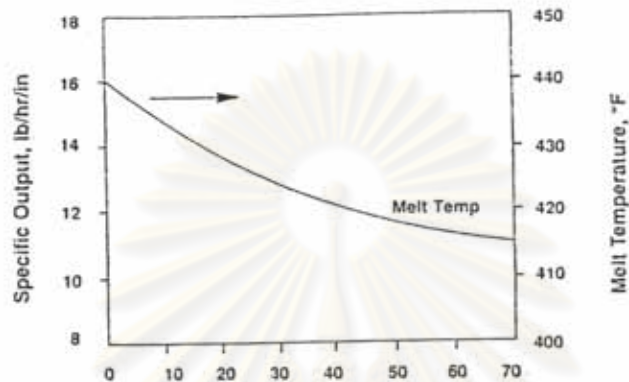
- ฟิล์มคลุมเรือนเพาะชำ ( green house ) เพื่อป้องกันพายุฝน ลูกเห็บ และลมที่อาจทำให้ต้นพืชได้รับความเสียหาย นอกจากนั้นยังป้องกันแมลงที่เป็นศัตรูพืชและช่วยลดปริมาณของแสงอาทิตย์ที่อาจแรงเกินไปในเวลากลางวัน ฟิล์มที่ใช้คลุมเรือนเพาะชำนี้มักใช้กับพืชล้มลุก ไม้ดอก ต้นกล้าต่าง ๆ ปัจจุบันเริ่มมีการใช้ในภาคเหนือ ฟิล์มประเภทนี้จะค่อนข้างหนา ความหนาประมาณ 100 - 250 ไมครอน

- ฟิล์มสำหรับปูพื้นบ่อน้ำ เพื่อไม่ให้น้ำซึมผ่านลงสู่ดินเร็วเกินไป การปูพื้นบ่อน้ำ จะช่วยให้สามารถกักเก็บน้ำเพื่อการเพาะปลูกได้นาน

### 2.1.5 การผสม LDPE กับ LLDPE

Butler ( 1992a ) ได้อธิบายไว้ว่า การผสม LDPE เข้ากับ LLDPE จะทำให้สามารถลดความดัน กำลังขับของเครื่อง อัดรีด และอุณหภูมิการหลอมเหลวระหว่างกระบวนการขึ้นรูปได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 นอกจากนี้ยังช่วยลดรอยร้าว ( sharkskin melt fracture ) บนผิวฟิล์มได้อีกด้วย ตารางที่ 2.16 แสดงสมบัติบางอย่างของฟิล์มที่ได้จากการผสม LDPE และ LLDPE จะเห็นว่าความทนแรงดึงของฟิล์ม LLDPE ผสม จะลดต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม LLDPE 100 เปอร์เซ็นต์ รวมทั้งความต้านทานต่อการฉีกขาดตามแนวเครื่องจักรก็จะลดลงด้วย แต่อย่างไรก็ตามสมบัติทางแสงจะได้รับการปรับปรุง ดังแสดงในรูปที่ 2.13 เมื่อผสม

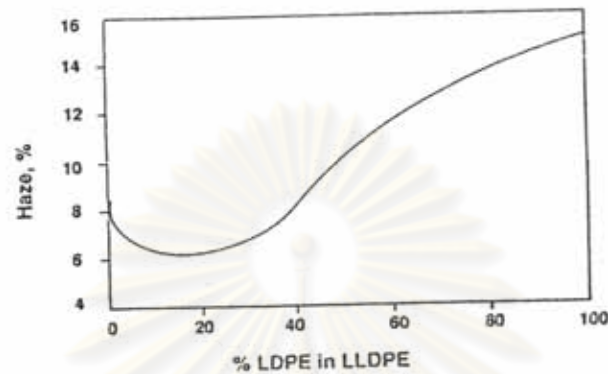
LDPE ลงใน LLDPE ในปริมาณ 15 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้สมบัติทางแสงได้รับการปรับปรุงมากที่สุด ดังนั้นในการผสม LDPE เข้าไปใน LLDPE ต้องคำนึงถึงการปรับปรุงในด้านกระบวนการผลิต โดยทำให้สมบัติของฟิล์ม LLDPE ที่ต้องการลดลงน้อยที่สุด และหากเป็นไปได้อาจทำให้สมบัติบางอย่างดีขึ้น



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ LLDPE

ตารางที่ 2.16 สมบัติของฟิล์ม ที่ได้จากการผสมระหว่าง LDPE กับ LLDPE

Film properties of LLDPE and LDPE blends	Ratio					
	100	90	80	70	50	30
% LLDPE (1.0 MI , 0.920)	100	90	80	70	50	30
% LLDPE (2.0 MI , 0.922)	0	10	20	30	50	70
Specific output , lb/hr/in	9.7	10.7	11.4	12.8	14.6	16.0
Thickness , mils	1.65	1.75	1.5	1.5	1.8	1.8
Tensile , psi ( MD )	8130	7165	6830	6835	5255	5395
( TD )	4920	4892	4225	4234	4035	3575
Yield , psi ( MD )	1690	1570	1515	1585	1700	1965
( TD )	1765	1575	1555	1605	1745	1710
Elongation , % ( MD )	595	660	675	675	460	215
( TD )	775	780	652	691	588	275
Elmendorf tear , g ( MD )	360	268	147	121	96	172
( TD )	771	780	652	691	588	275
Haze , %	17.9	10.0	7.5	4.6	7.4	8.6
20 ° Gloss , %	22.2	53.9	78.5	68.5	30.1	31.4

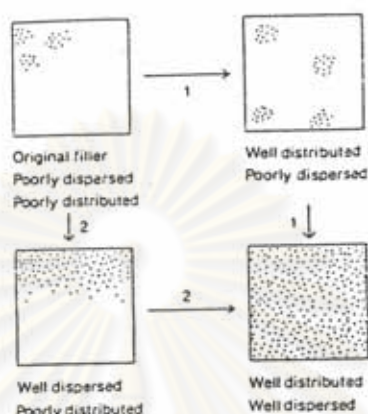


รูปที่ 2.13 สมบัติทางแสงของฟิล์มที่ได้จากการผสมระหว่าง LDPE กับ LLDPE

## 2.2 เทคนิคการผสม (compounding)

การผสม เป็นกระบวนการที่สำคัญกระบวนการหนึ่ง ไม่ว่าจะเป็นการผสมระหว่างพอลิเมอร์ด้วยกัน หรือการผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารเติมแต่งหรือสี สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือ การกระจายตัวของสารเติมแต่งภายในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์อย่างทั่วถึง และสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 หลังจากการผสมเม็ดพอลิเมอร์ที่ได้ควรมีองค์ประกอบเป็นแบบเดียวกัน เครื่องจักรที่ใช้สำหรับการผสมพอลิเมอร์มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ได้แก่ เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single screw extruder) เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) และเครื่องอัดรีดแบบหลายสกรู (multi screw extruder) ก่อนที่จะผสมโดยเครื่องอัดรีดดังกล่าวข้างต้น ของผสมควรผ่านการคลุกเคล้าให้ดีก่อน เพื่อให้ของผสมมีการกระจายตัวอย่างทั่วถึงกัน การผสมมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียงบางชนิด ดังต่อไปนี้

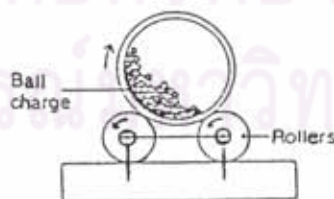




รูปที่ 2.14 ลักษณะการกระจายตัวของของผสม ( Morton , 1989 )

### 2.2.1 การผสมด้วยเครื่อง ball mill

การผสมด้วยเครื่อง ball mill เป็นการผสมทางกายภาพแบบง่าย ๆ โดยอาศัยหลักการคลุกเคล้ากันของสารเติมแต่งกับพอลิเมอร์ ลูกบอลจำนวนมากที่อยู่ภายในถังรูปทรงกระบอก จะทำหน้าที่บดผงของสารเติมแต่งที่มีขนาดใหญ่ให้ละเอียดและเรียบขึ้น ดังจะหมุนตามแนวแกน ดังรูปที่ 2.15 กระบวนการผสมจะเป็นไปอย่างช้า ๆ ใช้เวลาหลายชั่วโมง ( Morton, 1989 )



รูปที่ 2.15 การผสมด้วยเครื่อง Ball mill

### 2.2.2 การผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ( single screw extruder ) ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. กรวยเติม ( hopper ) เป็นช่องสำหรับป้อนเม็ดพลาสติกเข้าเครื่องอัดรีด

2. เรือนสกรู ( barrel ) หรือช่องรูปทรงกระบอก ผลิตจากเหล็กกล้าผสม ความยาวของเรือนสกรู หมายถึง ผลคูณระหว่างความยาว ( L ) กับเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู ( D ) โดยจะบอกให้ทราบในรูปของอัตราส่วนระหว่าง L/D สกรูและเรือนสกรู รวมกันเรียกว่า ชุดหลอมพลาสติก ( plasticising unit ) เรือนสกรูมีชั้นเดียวต่ออยู่กับระบบเฟืองขับ ตอนที่ขยับมีช่องนำพลาสติกต่อเข้ากับกรวยเติม ระหว่างสกรูกับเรือนสกรูจะมีช่องว่างเล็ก ๆ เพื่อไม่ให้สกรูเกิดการเสียดสีกัน นอกจากนี้ ยังมีปลอกนำเข้าซึ่งภายในจะมีช่องขนาดประมาณ 3 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู ส่วนใหญ่จะเป็นช่องสี่เหลี่ยม ทำหน้าที่นำพอลิเมอร์เข้าช่วยให้การหมุนของฟันเกลียวและสกรูมีประสิทธิภาพเต็มที่ในการส่งพลาสติก ปลอกนำเข้าจะมีฉนวนกันไฟแยกจากเรือนสกรู และมีระบบหล่อเย็นอย่างดี ปลอกนำเข้าที่ดีจะทำให้การอัดพอลิเมอร์ทำได้เร็วขึ้น

3. สกรู ( screw ) นับว่าเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของเครื่อง การออกแบบสกรูจึงต้องทำด้วยความละเอียดรอบคอบ บริเวณรอบ ๆ เกลียวสกรูจะมีร่องเกลียวแคบ ๆ เมื่อสกรูหมุนสกรูจะทำหน้าที่อัดหลอม คลุกเคล้า ผสม และลำเลียงพอลิเมอร์ไปข้างหน้าเข้าสู่หัวคาย ( die-head ) กำลังความสามารถของเครื่องอัดรีดจะพิจารณาจาก อัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู ( L/D ) ส่วนใหญ่นิยมใช้อัตราส่วนระหว่าง 15 - 30 โดยมีความลึกของฟันเกลียวเป็นตัวกำหนดอัตราส่วนการอัดของเกลียวสกรู และมีความสำคัญต่อการหลอมตัวของพอลิเมอร์ อากาศที่เข้าไปพร้อมกับวัตถุดิบที่ป้อนนั้น จะถูกอัดออกมาตามร่องเกลียวย้อนกลับออกมาทางกรวยเติมหรืออาจถูกระบายออกที่ช่องทางออก

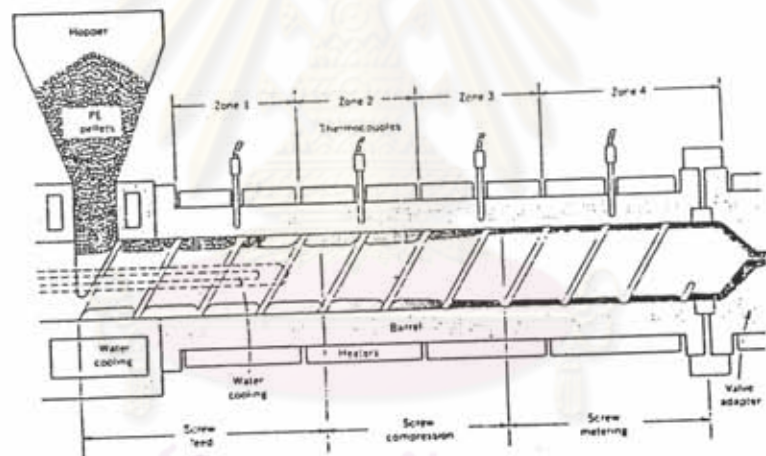
4. แผ่นให้ความร้อนไฟฟ้า ( electrical heater ) จะอยู่ในแต่ละ โชนของเรือนสกรู โดยต่ออยู่กับเทอร์โมคัปเปิล ( thermocouple ) ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามต้องการ ให้ความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นต้องใช้ในการหลอมพอลิเมอร์ โดยเริ่มตั้งแต่ บริเวณเรือนสกรูตรงส่วนที่อยู่ใกล้กับกรวยเติม รอบ ๆ แผ่นให้ความร้อน จะมีระบบหล่อเย็นเช่นเดียวกัน เพื่อช่วยควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมได้ทันที่

5. Head ที่ส่วนหัวเป็นส่วนที่รับแรงอัด เนื่องจากการหมุนของสกรูภายในเรือนสกรู และเป็นส่วนที่พอลิเมอร์ถูกขับออกจากคาย การควบคุมอุณหภูมิที่ส่วนหัวเป็นสิ่งจำเป็นมาก การออกแบบส่วนหัวจึงเป็นสิ่งสำคัญมาก พอลิเมอร์จะถูกลำเลียงอย่างสม่ำเสมอ ออกไปทางคาย ด้วยแรงอัด และความเร็วสม่ำเสมอ

6. มอเตอร์ไฟฟ้า ในการส่งกำลังขับ จำเป็นต้องใช้มอเตอร์ที่มีกำลังขับพอที่จะขับพอลิเมอร์เหลวเหนียว มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้นี้สามารถปรับความเร็วได้ นิยมใช้ commutator motor และ DC - motor

### หลักการทํางาน

เมื่อพอลิเมอร์ถูกป้อนลงสู่กรวยเดิม จะถูกให้ความร้อนด้วยแผ่นให้ความร้อนไฟฟ้า แล้วลำเลียงไปข้างหน้า ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ส่วนที่ถูกหลอมเหลวก่อนจะถูกลำเลียงไปข้างหน้าก่อน ส่วนที่เหลือจะค่อย ๆ ถูกลำเลียงไป ขณะเดียวกันก็ถูกหลอมและหมุนเวียนไปตามเกลียวสกรู จากโซนป้อนเม็ด (feed zone) เข้าสู่โซนอัด (compression zone) และโซนหลอม (metering zone) ตามลำดับ หลังจากผสมกันดีแล้วพอลิเมอร์เหลวเหนียวจะถูกขับออกมาทางคายในลักษณะเป็นเส้นลงสู่อ่างน้ำ เพื่อทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวแข็งตัวและส่งเข้าสู่เครื่องตัดที่มีลมร้อนคอยเป่าไล่ความชื้นและทำให้เม็ดพลาสติกแห้ง ( บรรณเลข ศรีนิล , 2535 )



รูปที่ 2.16 เครื่องอัดรีด แบบสกรูเดี่ยว

### 2.2.3 การผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่มีอยู่สองชนิดด้วยกัน สกรูคู่จะทำหน้าที่ลำเลียงพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวไปข้างหน้า ดังนั้น อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูจึงไม่มีความสำคัญเหมือนกับเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว การออกแบบโซนที่พอลิเมอร์ผสมกัน (metering zone) จึงอยู่ในช่วงสั้น ๆ แต่ต้องเพียงพอที่จะให้พอลิเมอร์หลอมเหลวจนหมด หลักการทํางานอื่น ๆ จะเหมือนกับเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ป้อนหลักทำหน้าที่ควบคุมอัตรา

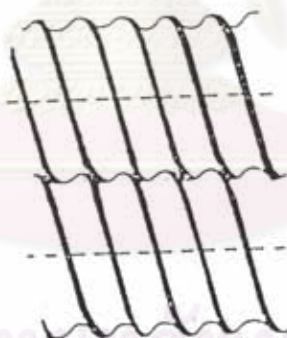


การส่งพอลิเมอร์ไปข้างหน้าด้วยความดันคงที่ จึงไม่เกิด drag flow ขึ้น เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่นิยมใช้มีอยู่ 2 ชนิด ดังนี้

2.2.3.1 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ชนิดหมุนทางเดียวกัน ( co - rotating twin screw-extruder ) อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Closely intermeshing co-rotating ( CICO )

#### หลักการทำงาน

สกรูคู่ จะทำหน้าที่หมุนและลำเลียงของผสมไปในทิศทางเดียวกัน มีลักษณะคล้ายเลขแปด ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ของผสมจะถูกผสมและลำเลียงผ่านสกรูไปตามแนวแกนที่ขนานกับแกนของสกรู สำหรับการผสมตามแนวขวาง จะเกิดขึ้นตรงบริเวณช่องของสกรู ( channels ) ขณะที่สกรูหมุนยอดสกรูที่ทำมุมเอียงกับแกนสกรู จะทำหน้าที่พาของผสมไปด้วยความเร็วสูงกว่าความเร็วของสกรู จึงเกิดความเร็วเฉือนสูงในการพาชั้นของของผสมไป ทำให้ของผสมไม่ติดค้างอยู่กับสกรู เพราะอาจเกิดการสลายตัวได้ ( Dreibratt and Eise , 1991 )



รูปที่ 2.17 ลักษณะสกรูของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ชนิดหมุนทางเดียวกัน

#### ข้อดีของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ชนิดหมุนทางเดียวกัน

1. สามารถผสมของผสมได้ในปริมาณมาก ( high loading ) เพราะมีระยะพิตช์กว้าง ( large pitch ) ถ้าจะให้ได้ผลดีของผสมควรมีความหนืดใกล้เคียงกัน
2. สามารถผสมสารได้หลายประเภท เช่น สาร masterbatch ของสี หรือสารเติมแต่งสาร reactive processing และพอลิเมอร์ต่างชนิดกันได้ดี
3. สามารถปรับความดันให้มีค่าเพิ่มขึ้นได้ โดยการควบคุมอัตราการหมุนของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าไป

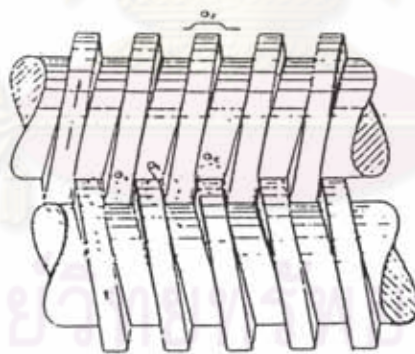
4. มีกลไกการวนและคลุกเคล้าที่ดี ทำให้ของผสม มีการเรียงตัวใหม่ และมีการกระจายทั่วถึงกัน

5. สามารถควบคุมเวลาที่ของผสมหลอมอยู่ในเครื่องได้ดี จึงมีการกระจายของเวลาที่อยู่ในเครื่องแคบ ( narrow residence time )

2.2.3.2 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ชนิดหมุนสวนทางกัน ( counter - rotating twin screw-extruder ) หรืออาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า closely intermeshing counter - rotating ( CICT )

#### หลักการทำงาน

สกรูคู่ จะทำหน้าที่หมุนและลำเลียงของผสมไปในทิศทางเข้าหากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.18 สกรูทั้งสองมีลักษณะล้อคกันอยู่ จึงมีความใกล้ชิดกัน พอลิเมอร์จะถูกลำเลียงผ่านจากสกรูหนึ่งไปยังอีกสกรูหนึ่งได้ค่อนข้างดี แต่อาจมีของผสมบางส่วนหลุดออกมาทางช่องเล็กรูปสี่เหลี่ยม ( tetrahedron leakage ) ตรงรอยแยกระหว่างสกรูทั้งสอง ( Nichols , 1991 )



รูปที่ 2.18 ลักษณะสกรูของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ชนิดหมุนสวนทางกัน

#### ข้อดีของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ชนิดหมุนสวนทาง

1. ของผสมมีการกระจายตัวดี ( dispersing mixing ) เมื่อมีค่าเฉลี่ยของความเครียดต่ำ
2. เมื่ออัตราการไหลสูงและอัตราการป้อนเม็ดต่ำ ของผสมจะมีการกระจายอย่างทั่วถึง ( distribution mixing ) เพราะของผสมมีการจัดเรียงตัวกันใหม่ ( rearrangement ) ในระหว่างการลำเลียงของผสมไปข้างหน้า

3. การผสม จะประกอบด้วยบริเวณที่มีแรงเฉือนอยู่สองส่วนด้วยกัน ส่วนแรก คือ บริเวณที่มีแรงเฉือนต่ำ เป็นส่วนที่มีการผสมกันอยู่ในห้องรูปตัว C ( C-chamber ) เวลาส่วนใหญ่ จะอยู่ที่ส่วนนี้ ส่วนที่สอง คือบริเวณที่มีแรงเฉือนสูงจะเกิดในช่วงเวลาสั้น ๆ ระหว่างรอยแยกของสกรูดังนั้นการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบนี้ จึงเหมาะสมสำหรับของผสมที่ไม่มีการรวมตัวกันใหม่ ( reaggregate ) ภายหลังจากการกระจายตัว เพื่อให้มีการผสมดี จึงต้องมีช่วงของการผสมที่ยาวเพียงพอ และมีความดันที่คายสูงประกอบกันไป วัตถุประสงค์ที่นำมาผสมด้วยวิธีนี้ควรมีความหนืดใกล้เคียงกันและเหมาะสำหรับการผสมแบบ laminar mixing

### 2.3 การผลิตฟิล์ม

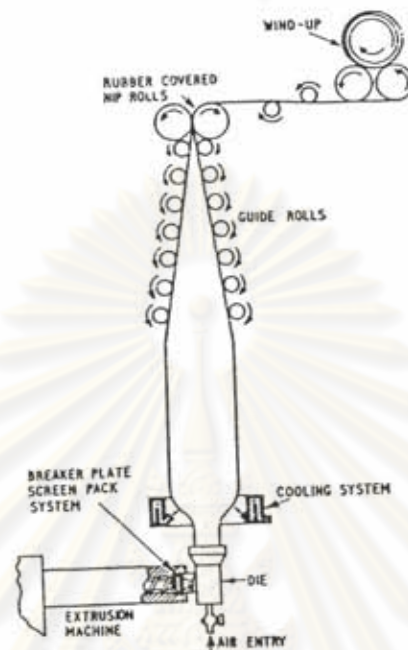
ฟิล์ม หมายถึงแผ่นพอลิเมอร์ที่มีความหนาน้อยกว่า 254 ไมครอน ( 10 มิล ) ถ้าความหนามากกว่านี้จะเรียกว่า แผ่น ( sheet ) การผลิตฟิล์มจะใช้วัตถุดิบในกลุ่มเทอร์โมพลาสติก ซึ่งมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน เช่น พอลิโอลิฟินส์ ไนลอน และ พอลิไวนิลิดีนคลอไรด์ เป็นต้น พอลิเมอร์ที่ใช้ต้องสามารถเกิดความหนืดขณะหลอมเหลว และทนต่อการออกซิเดชันที่อุณหภูมิการใช้งานได้

#### 2.3.1 กระบวนการเป่าฟิล์ม

เครื่องจักรที่ใช้ในงานเป่าฟิล์ม ได้แก่ เครื่องเป่าฟิล์มชนิดสกรูเดี่ยว ( single screw-blown film extruder ) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. เครื่องอัดรีด จะเหมือนกับเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว
2. คาย หรือหัวเป่าฟิล์ม มีอยู่ 3 ชนิดด้วยกัน คือ side - fed dies , spider - type dies และ spiral mandrel dies แต่ละชนิดจะมีการลำเลียงเนื้อพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวออกมาในลักษณะที่แตกต่างกันไป เมื่อออกมาจากคายเป็นหลอดเย็นด้วยลมโดยการหล่อเย็นภายนอก ลูกโป่ง ( external bubble cooling ) หรือบางเครื่องอาจจะมีระบบหล่อเย็นภายใน ( internal bubble cooling ) อยู่ด้วย จะช่วยให้การหล่อเย็นมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น
3. guide rolls สามารถปรับระดับความสูงได้ทำหน้าที่ควบคุมเสถียรภาพของลูกโป่ง
4. nip roll จะอยู่ส่วนบนเหนือ guide rolls ทำหน้าที่รีดให้ลูกโป่งประกบกันเป็นแผ่นฟิล์ม
5. tension roll จะทำหน้าที่ม้วนดึงฟิล์มเพื่อให้โมเลกุลของพอลิเมอร์มีการเรียงตัวกันดี และเพิ่มความแข็งแรงของฟิล์ม





รูปที่ 2.19 เครื่องเป่าฟิล์ม

### หลักการทํางาน

หลักการทํางานของเครื่องอัดรีดสำหรับเป่าฟิล์ม จะคล้ายกับเครื่องอัดรีดเม็ดพลาสติก เมื่อป้อนเม็ดพลาสติกเข้าสู่เครื่องอัดรีดทางกรวยเดิม เม็ดพลาสติกจะถูกลำเลียงไปข้างหน้าจนออกจากคายน ซึ่งมีระบบการเป่าด้วยลมคํออยู่ด้วย พลาสติกที่หลอมเหลวออกมาจากคายน เมื่อถูกเป่าจะพองออกเป็นลูกโป่ง ภายในจะเป็นสูญญากาศ รอบนอกลูกโป่งจะมีลมเป่าเพื่อทําหน้าที่หล่อเย็นฟิล์ม ลูกโป่งจะถูกส่งผ่าน guide rolls ไปยัง nip roll ซึ่งทําจากยาง เพื่อประกบลูกโป่งเข้าหากันให้เป็นแผ่นฟิล์ม หลังจากนั้น ฟิล์มจะถูกส่งไปยังลูกกลิ้งสำหรับดึง และถูกส่งเข้าสู่ที่ม้วนเก็บ (wind-up) หรือถูกส่งไปยังเครื่องปิดผนึกและตัด ตามลำดับ การเป่าฟิล์ม LDPE และ LLDPE จะต้องคํานึงถึงสิ่งต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. เครื่องอัดรีด สำหรับเป่าฟิล์ม LDPE ควรมืช่วงอัตราส่วนระหว่าง L/D ประมาณ 18:1 ถึง 32:1 โดยทั่วไปนิยมใช้อัตราส่วน 24:1 และ LLDPE ควรมือัตราส่วนประมาณ 24:1 ถึง

32:1 การเลือกใช้อัตราส่วนต่าง ๆ กันนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น กำลังการผลิตของเครื่องว่ามากหรือน้อย การควบคุมการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ ความสม่ำเสมอของพอลิเมอร์ขณะหลอมเหลว และการกระจายตัวของสารเติมแต่ง เช่น สี เป็นต้น

2. อัตราส่วนการอัดของสกรู ( screw compression ratio ) สำหรับ LDPE ควรมีค่าประมาณ 2.5:1- 4.5:1 และ LLDPE ควรมีอัตราส่วนประมาณ 2.5:1 ถึง 3.0:1 ในงานเป่าฟิล์มจะนิยมค่านี้ต่ำ ๆ แต่ถ้าเป็นฟิล์มที่ต้องการความใสมาก ๆ และมีการกระจายตัวของพอลิเมอร์ดี จะเลือกค่านี้สูง

3. ในการเป่าฟิล์ม ถ้าอัตราการผลิตสูงและอุณหภูมิการหลอมเหลวต่ำ จะทำให้ barrier screw ทำงานดีขึ้น เนื่องจากมีการลดลงของการเฉือนภายในเครื่องอัดรีด

4. บริเวณการผสม ( mixing section ) ที่ดี barrier screw ควรพาพอลิเมอร์ที่ยังไม่ได้หลอมเหลวไปได้ตลอด และมีการกระจายตัวของสารเติมแต่งหรือพอลิเมอร์ผสมอย่างทั่วถึง

5. ช่องคาย ( die gap ) ควรออกแบบให้เหมาะสมกับความหนืดของพอลิเมอร์ที่ใช้เป่าฟิล์ม และต้องเหมาะสมที่จะยอมให้พอลิเมอร์ผ่านไปได้อย่างไม่ติดค้าง เพราะอาจทำให้เกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์ได้ นอกจากนี้บริเวณคายนควรออกแบบให้สามารถรับแรงดันได้ในระดับสูง ( high - pressure die ) เพราะเมื่อใช้อัตราการผลิตสูงฟิล์มที่ได้จะมีความเรียบและสม่ำเสมอ แต่ถ้าเป็นช่องคายที่สามารถรับแรงดันได้ในระดับปานกลาง ( moderate - pressure die ) และระดับต่ำ ( low-pressure die ) เมื่อใช้อัตราการผลิตสูงอาจทำให้ฟิล์มที่ได้ไม่สม่ำเสมอ

### 2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเป่าฟิล์ม

Butler (1992b) ได้กล่าวไว้ว่า ในกระบวนการผลิตฟิล์ม จะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิการหลอมเหลวเพราะมีผลต่อลักษณะของผิวฟิล์ม ถ้าใช้อุณหภูมิในการหลอมพอลิเมอร์ต่ำ ฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะผิวหยาบ และมีรอยดำหนึ่เกิดขึ้น ถ้าเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น พอลิเมอร์จะไหลได้ง่ายขึ้น ฟิล์มจะมีผิวเรียบและใสขึ้น นอกจากนี้ยังมีการเรียงตัวของแนวขวางดีขึ้นอีก

2. อัตราการเป่า หรือ Blow up ratio ( BUR ) เป็นอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่งกับเส้นผ่านศูนย์กลางของคาย ดังแสดงในรูปที่ 2.20 การเพิ่มหรือลด BUR จะมีผลต่อการเรียงตัวของฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 2.21 - 2.23 ถ้าลด BUR จะมีผลทำให้ฟิล์มมีความฝืดลดลง ความทนแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดในแนวเครื่องเพิ่มขึ้น แต่ในแนวขวางแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง

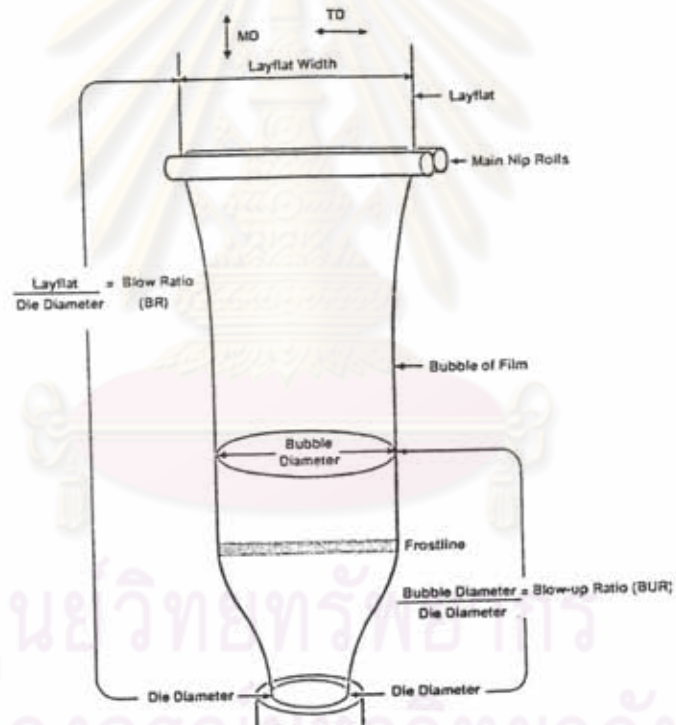
BUR = เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่ง  
เส้นผ่านศูนย์กลางของคาย

= 2 x ความกว้างของฟิล์ม

(2.10)

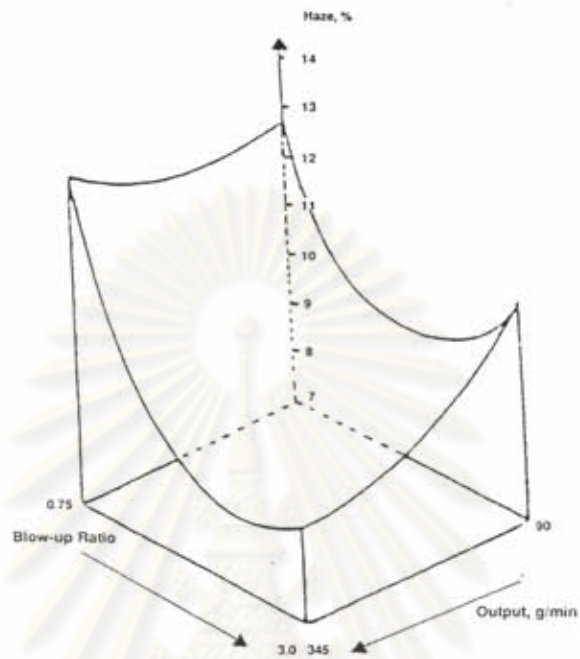
$\pi D$

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของคาย

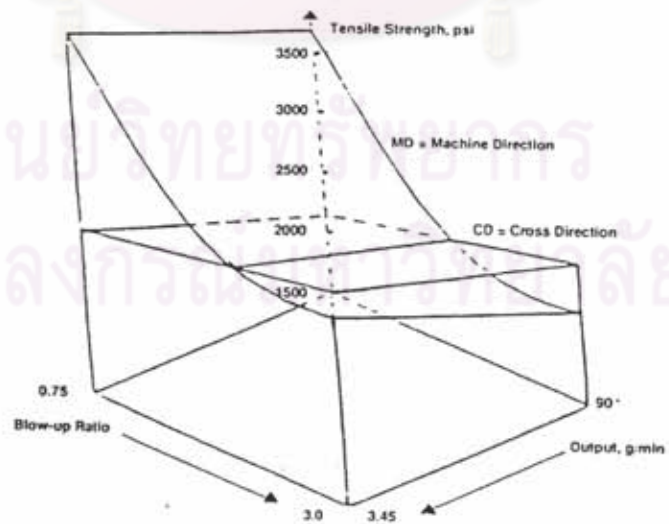


รูปที่ 2.20 ลักษณะของฟิล์มที่ได้จากการเป่าฟิล์ม

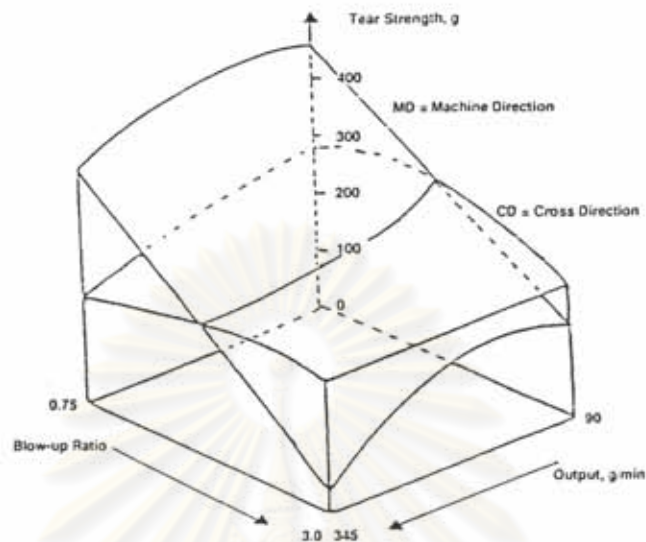




รูปที่ 2.21 แสดงความฝ้าของฟิล์ม LDPE อันเนื่องมาจาก BUR และอัตราการผลิต โดยมีแนวการเขียนตัวสูง 14 นิ้ว



รูปที่ 2.22 ความทนแรงดึงของฟิล์ม LDPE อันเนื่องมาจาก BUR และอัตราการผลิต โดยมีแนวการเขียนตัวสูง 14 นิ้ว



รูปที่ 2.23 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม อันเนื่องมาจาก BUR และอัตราการผลิต โดยมีแนวการเข็นตัวสูง 14 นิ้ว

3. ขนาดของช่องคาย ( die gaps ) จะมีผลต่อการเรียงตัวของโมเลกุล ถ้ามีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีการเรียงตัวตามแนวเครื่องดีขึ้น แต่การเรียงตัวตามแนวขวางลดลง ขนาดของช่องคาย ความหนาของฟิล์ม และ BUR สามารถนำมาคำนวณหา อัตราส่วนการดึง ( draw down-ratio , DDR ) ได้ ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.11 การที่ฟิล์มมี DDR สูง และ BUR ต่ำ แสดงว่า ในระหว่างการผลิตฟิล์มถูกดึง ( cold drawing ) มาก ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น ( lamella ) ถูกดึงมาก ส่วนที่ขดอยู่ระหว่างชั้นจะถูกยืดออกในลักษณะที่ดึง ( tie chain ) ดังแสดงในรูปที่ 2.24 ลักษณะนี้จะเกิดการเรียงตัวในแนวเครื่องดี มีความเป็นระเบียบมากขึ้น ฟิล์มจึงมีความต้านทานต่อการฉีกขาดในแนวเครื่องสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.21 นอกจากนี้ลักษณะของ tie chain ยังช่วยเสริมให้ฟิล์มมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นอีกด้วย แต่ถ้าฟิล์มถูกดึงน้อย หรือ มี BUR สูง จะมีความต้านทานต่อการฉีกขาดในแนวเครื่องน้อยลง DDR และ BUR แทนจะไม่มีผลต่อความต้านทานต่อการฉีกขาดในแนวขวาง ( Yilmazer , 1991 )



รูปที่ 2.24 ลักษณะ tie chain ที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึง ( Daniels, 1989a )

$$\text{DDR} = \frac{\text{ขนาดของช่องคาย}}{\text{ความหนาของฟิล์ม} \times \text{BUR}} \quad (2.11)$$

4. อัตราการผลิต เมื่ออัตราการผลิตเพิ่มขึ้น ฟิล์มจะมีความฝ้าและความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง แต่จะมีความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.21 - 2.23

5. การหล่อเย็น เป็นวิธีการทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวเย็นตัวลง และแข็งตัวเป็นฟิล์มด้วยกระแสลมที่เป่าออกมารอบนอกลูกโป่ง อากาศที่เป่าจะต้องมีการกระจายอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ ลูกโป่งที่ถูกหล่อเย็นจะปรากฏแนวการเย็นตัว ( frostline height ) ให้เห็น มีลักษณะเป็นเส้นแบ่งเขตแดนระหว่างส่วนที่ใสกับส่วนที่ขุ่นของลูกโป่งขณะเป่าฟิล์ม บริเวณใต้เส้นจะมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ มีลักษณะเป็นอสังฐานจึงใส บริเวณแนวการเย็นตัวจะเริ่มมีการจัดเรียงโมเลกุล บางส่วนมีลักษณะเป็นผลึกจึงขุ่น เมื่ออัตราการเย็นตัว ( quenching rate ) ลดลง แนวการเย็นตัวจะเพิ่มสูงขึ้น พอลิเมอร์มีการเย็นตัวลงอย่างช้า ๆ จึงเกิดผลึกมาก ถ้าลดระดับแนวการเย็นตัวลง ความเป็นผลึกจะเกิดได้น้อย ฟิล์มจะใสขึ้น

#### 2.4 สารหล่อลื่น ( Lubricants )

สารหล่อลื่น เป็นสารเติมแต่งที่ใส่เข้าไปในพลาสติกบางชนิด เพื่อทำหน้าที่หล่อลื่นแบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้



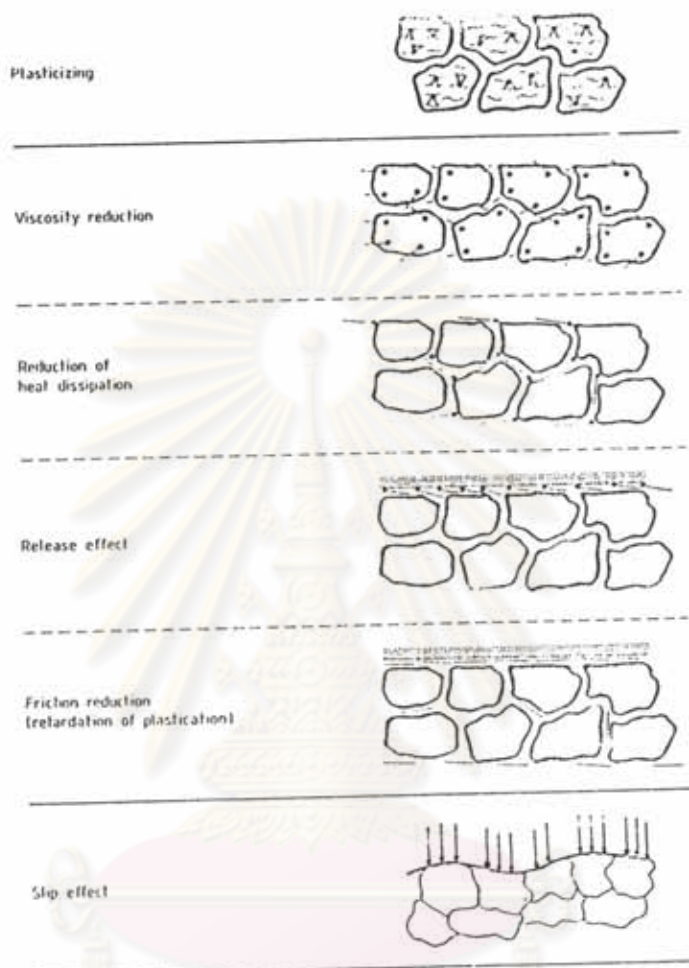
1. สารหล่อลื่นภายใน ( internal lubricant ) เป็นสารที่ช่วยให้พอลิเมอร์สามารถไหลได้ง่ายและมีความหนืดขณะหลอมเหลวลดต่ำลง โดยไม่มีผลต่อสมบัติการหลอมเหลวของสารประกอบ สารที่ใช้มักจะละลายในพลาสติก แต่ก่อนข้างจะมีความคงตัว เช่นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอน 12 - 30 อะตอม ทำหน้าที่หล่อลื่นและลดความเสียดทานระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ จะแตกต่างจากพลาสติกไฮเซอร์ตรงที่ สารหล่อลื่นมีอิทธิพลต่อสมบัติของพอลิเมอร์น้อยมาก เช่น ใช้อะมีนแว็กซ์ ( amine wax ) กับ พีวีซี และไฮโดรคาร์บอนแว็กซ์ ( hydrocarbon-wax ) กับ พอลิเอทิลีน

2. สารหล่อลื่นภายนอก ( external lubricants ) เป็นสารซึ่งเมื่อใส่เข้าไปในพอลิเมอร์แล้ว จะไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ แต่ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป จะซึมออกจากสารประกอบ มาอยู่ระหว่างพอลิเมอร์หลอมเหลวกับผิวโลหะ ( เครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปหรือแม่แบบ ) ฟิล์มบาง ๆ ที่เกิดขึ้นจะป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์เกาะติดกับเครื่องจักรได้ง่าย การเลือกใช้สารหล่อลื่น นอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์แล้ว ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการแปรรูปอีกด้วย แต่โดยมากสารหล่อลื่นภายนอกจะเข้ากับพอลิเมอร์ได้ไม่ดี

การที่สารหล่อลื่นซึมออกมาจากพอลิเมอร์ในระหว่างการผลิต อาจเกิดปัญหาขึ้นได้เมื่อใช้ในปริมาณที่มากเกินไป สารที่ซึมออกมาอาจมีสารเคมีต่าง ๆ คัดออกมาด้วย เช่น สารทำให้เกิดสี ( colorant ) ทำให้เกิดการเปื้อนบนพลาสติกหรือเครื่องจักร ซึ่งมักเกิดภายใต้ภาวะที่ได้รับแรงเฉือนและ/หรือความดันสูง ๆ เช่น การรีดเป็นแผ่นด้วยความเร็วสูง ( high-speed calendering ) และภายในบริเวณหัว ( head ) ของเครื่องอัดรีด สารหล่อลื่นภายนอกอาจมีอิทธิพลต่อความใส ( clarity ) ความขุ่น ( haze ) ของแผ่นพลาสติก และความสามารถในการพิมพ์หรือปิดผนึกด้วยความร้อน ( heat seal ) ของแผ่นพลาสติกอีกด้วย ( เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตรี , ม.ป.ป. )

ในการผลิตฟิล์ม ถ้าพอลิเมอร์มีความหนืดสูง จะต้องใช้อุณหภูมิการหลอมเหลวสูงตามไปด้วย แต่อุณหภูมิการหลอมเหลวที่เพิ่มขึ้นนั้น จะมีขีดจำกัด ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่จะสามารถรับได้ ถ้าเพิ่มอุณหภูมิมากเกินไป ก็อาจเป็นสาเหตุให้พอลิเมอร์นั้นเกิดการสลายตัว เปลี่ยนสี มีน้ำหนักโมเลกุลลดลง หรือเกิดการเชื่อมโยงเป็นร่างแห ( crosslink ) ได้

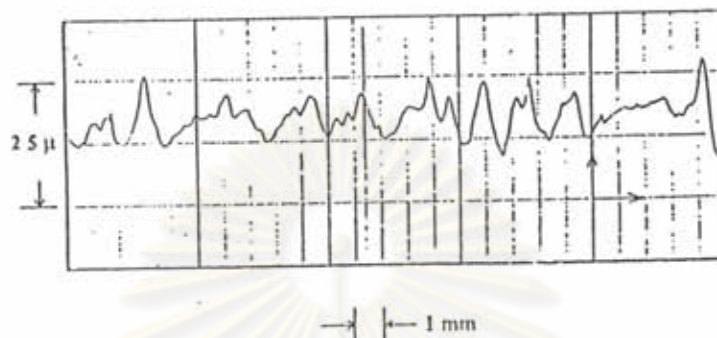
ดังนั้น การใช้สารหล่อลื่นจะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ รูปแบบของการกระทำของสารหล่อลื่นที่มีต่อโมเลกุลของพอลิเมอร์ในทางทฤษฎี แสดงในรูปที่ 2.25 สารหล่อลื่นที่ใช้ในงานเป่าฟิล์มมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ( Turick , 1992 ) ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.25 รูปแบบการกระทำของสารหล่อลื่นที่มีต่อโมเลกุลของพอลิเมอร์  
ในทางทฤษฎี

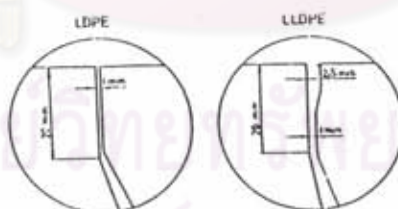
2.4.1 สารช่วยในการขึ้นรูป ( Polymer processing aids , PPA ) ในการผลิตฟิล์ม LLDPE มักเกิดลายหนังไก่บนผิวฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 2.26 ซึ่งมีสาเหตุมาจาก ปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ความหนืดของ LLDPE ที่อัตราการเฉือนสูง ๆ ที่ใช้ในการเป่าฟิล์ม จะมากกว่า LDPE ทำให้เกิดแรงบิดมากขึ้น และเกิดความดันมากตรงบริเวณหัวคาน ทำให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้น ( A state of art review , 1985 )



รูปที่ 2.26 แสดงลักษณะของ sharkskin melt fracture  
( Firdaus and Tong , 1992 )

2. ลักษณะของคานย ช่องคานยที่มีการกางออกของมุมแคบ จะทำให้เกิดความดันสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.27
3. อุณหภูมิในกระบวนการผลิตต่ำเกินไป

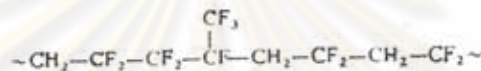


รูปที่ 2.27 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของช่องคานยระหว่าง  
LDPE กับ LLDPE

การแก้ปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้น สามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ เพื่อลดความเค้นเฉือนที่เกิดมากบริเวณคานย ( die land regions ) ให้ต่ำลง การขยายขนาดช่องคานย การลดอัตราการผลิตให้ต่ำลง และการผสมสารหล่อลื่นที่ช่วยในการขึ้นรูป



Blong และคณะ ( 1994 ) ได้ศึกษาสารหล่อลื่นที่ใช้ในการขึ้นรูปของฟิล์ม LLDPE เพื่อลดการเกิดลายหนังไก่บนผิวฟิล์ม ซึ่งเป็นสารประกอบประเภทฟลูออโรคาร์บอน ประกอบด้วยโพลีเมอร์ของไวนิลิดีนฟลูออไรด์ และเฮกซะฟลูออโรโพรพิลีน [polyvinylidene - fluoride and hexafluoropropylene ) copolymer ] สารชนิดนี้นอกจากจะช่วยลดลายหนังไก่ได้แล้วยังทำให้สมบัติทางกายภาพและและสมบัติเชิงกลของฟิล์มดีขึ้นอีก สูตรโครงสร้างของสาร PPA แสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 สูตรโครงสร้างของสาร PPA ( Saunders, 1973 )

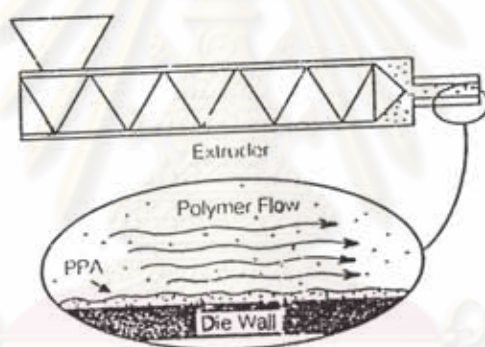
สาร PPA สามารถใช้ได้ดีในการผสมกับพอลิเอทิลีน ที่มีค่าครรชนีการไหลประมาณ 1 หรือต่ำกว่า จึงมักใช้กับ LLDPE และ HDPE ผลึกภัณฑ์ที่ใช้สาร PPA ผสมมีหลายประเภท ( Performance Benefits , 1994 ) ดังต่อไปนี้

1. ผลึกภัณฑ์ประเภทฟิล์ม ที่ได้จากการเป่าฟิล์ม
2. ผลึกภัณฑ์ประเภทฟิล์ม ที่ได้จากการหล่อฟิล์ม
3. ผลึกภัณฑ์จากการเป่าภาชนะกลวง
4. ผลึกภัณฑ์ประเภทท่อ
5. ผลึกภัณฑ์ประเภทสายไฟและสายเคเบิล

#### ข้อดีของการผสมสาร PPA กับ พอลิเมอร์

1. พอลิเมอร์สามารถไหลได้ง่ายขึ้น ทำให้ค่าครรชนีการไหลเพิ่มขึ้น และมีความหนืดลดลง
2. ทำให้สามารถขึ้นรูปผลึกภัณฑ์ผ่านช่องแคบที่มีลักษณะแคบ ๆ ได้
3. สามารถขึ้นรูปผลึกภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่ำลงได้
4. ช่วยลดการเกิดลายหนังไก่บนผิวฟิล์ม
5. ทำให้ความดันที่เกิดขึ้นมากบริเวณหัวคายลดต่ำลง

6. สารชนิดนี้มีราคาไม่แพง เพราะในการใช้งานจะใช้ในปริมาณน้อยในระดับไม่เกิน 2,000 ppm
7. ไม่มีสารตกค้างติดอยู่ที่ผิวฟิล์ม เพราะสาร PPA มีสมบัติในการเคลือบห้วดยได้ดี ดังรูปที่ 2.29
8. ฟิล์มที่ได้มีความใสและความเงามันมากขึ้น
9. ฟิล์มที่ได้สามารถปิดผนึกได้ง่ายขึ้น เพราะ ไม่มีลายหนังไก่อบนผิวฟิล์ม
10. ฟิล์มที่ได้มีการเรียงตัวดีทั้งแนวเครื่องและแนวขวาง จึงมีความแข็งแรงและความเหนียวเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะการเคลือบที่ห้วดยของสาร PPA ( Technical information, 1989 )

#### 2.4.2 สารลดการติดกันของฟิล์ม ( antiblocking-agent )

การติดกันของผิวฟิล์มสามารถเกิดขึ้นได้ ในระหว่างกระบวนการผลิตฟิล์มหรือขณะม้วนเก็บ ผิวฟิล์มที่เรียบและมีความเงามัน จะเกิดการติดกันได้ง่าย เมื่อนำไปใช้งานจะมีปัญหาในการคลี่ออกจากกัน การใส่สารลดการติดกันของฟิล์ม จึงเป็นวิธีการแก้ไขวิธีหนึ่ง สารที่ใช้คือ antiblocking-agent หรือ slip agent เนื่องจากสารดังกล่าวใช้ในปริมาณน้อยมาก จึงนิยมเตรียมเป็น masterbatch ที่มีความเข้มข้นประมาณ 5 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเอามาผสมกับพอลิเมอร์จะผสมให้มีความเข้มข้นลดลงเหลือประมาณ  $5 \times 10^4$  ถึง  $5 \times 10^5$  ppm สารเติมแต่งประเภท antiblocking-agent มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.17

ตารางที่ 2.17 ชนิดและผลของสาร antiblocking-agent ในกระบวนการเป่าฟิล์ม

ชนิดและผลของสาร antiblocking-agent ในกระบวนการเป่าฟิล์ม		
ชนิดของสารเติมแต่ง		
- Diatomaceous	- Ceramic spheres	- Calcium carbonate
- Precipitated silica	- Fatty amides	- Talc
- Amorphous silica		
ระดับการใช้งาน		ผลที่ได้
- ระดับต่ำ	1,000 ppm ( 0.10% )	- good optical
- ระดับปานกลาง	1,500 - 3,000 ppm ( 0.15 - 0.30% )	- industrial and liner film
- ระดับสูง	10,000 ppm ( 1.0% )	- multiwall bags
ชนิดของเรซิน		
- ดรรชนีการไหล	- MI ต่ำลง	- less blocking
	- MI สูงขึ้น	- more blocking
- ความหนาแน่น	- สูงขึ้น	- less blocking
	- ต่ำลง	- more blocking
- ความหนาของฟิล์ม	- เพิ่มขึ้น	- less blocking
	- ลดลง	- more blocking
- การปนอยู่ของ EVA		- more blocking

#### 2.4.3 สารหล่อลื่นระหว่างผิวฟิล์ม ( slip agent )

สารหล่อลื่นระหว่างผิวฟิล์ม เป็นสารที่ใช้ในการลดแรงดึงดูดระหว่างผิวของฟิล์มที่ประกบกันอยู่ ช่วยให้ฟิล์มที่ผลิตขึ้นมาเคลื่อนออกจากกันได้ง่าย สารลดการติดกันของผิวฟิล์มส่วนใหญ่เป็นสารที่มีความหนืดต่ำ จะเกาะอยู่บริเวณผิวฟิล์ม ช่วยลดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างชั้นของฟิล์ม ปกติพอลิเอทิลีนจะมีสมบัติในการหล่อลื่นด้วยตัวเองอยู่แล้ว แต่ถ้าเป็นพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า 0.935 กรัม/ลบ.ซม. ในบางครั้งจำเป็นต้องใช้สารลดการติดกันของผิวฟิล์มเข้าช่วย ซึ่งมีอยู่หลายประเภทด้วยกัน เช่น กรดไขมันอิ่มตัวที่มีสายโซ่



โมเลกุลยาว ๆ แอลกอฮอล์ และ เอไมด์ เช่น  $RCONH_2$  เมื่อ R คือ fatty alkyl chain ในทาง การค้าสารเติมแต่งประเภทนี้จึงนิยมใช้ erucamide และ oleamide ความเข้มข้นที่ใช้ประมาณ 1 - 5 เปอร์เซ็นต์ งานประเภทนี้จะนิยมใช้ oleamide มากกว่า นอกจากนี้ยังมีราคาถูกกว่า ( Kalyon and Khemis, 1987 )

#### 2.4.4 สารลดการเกิดไฟฟ้าสถิตย์บนผิวฟิล์ม ( antistatic agent )

การเกิดไฟฟ้าสถิตย์บนผิวฟิล์ม เนื่องมาจากประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตและเกิดมากในสภาพอากาศแห้ง มีความชื้นต่ำ เช่นในฤดูหนาว สาเหตุของการเกิดไฟฟ้าสถิตย์ มีดังต่อไปนี้

1. อัตราการม้วนเก็บฟิล์มเร็วเกินไป
2. การปรับเปลี่ยนภาวะในการเป่าฟิล์ม
3. การบรรจุของทันที ขณะที่ผลิตฟิล์มออกมา
4. มีฝุ่นละอองเกาะอยู่ที่ผิวฟิล์ม

สารลดการเกิดไฟฟ้าสถิตย์ที่ใช้กัน ได้แก่ กลีเซอไรด์ เกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต และซัลโฟเอไมด์ ( Turick , 1992 )

#### 2.5 การผสมสาร masterbatch

Masterbatch หมายถึง สารเติมแต่งที่มีความเข้มข้นมากผสมอยู่กับพอลิเมอร์ เมื่อเอาไปใช้งาน จะนำไปผสมกับพอลิเมอร์อีกครั้งหนึ่ง เพื่อเจือจางลงตามความเข้มข้นที่ต้องการ masterbatch ที่เตรียมขึ้นสามารถเก็บไว้ใช้งานได้นาน ของผสมที่ได้จะมีความเข้มข้นที่แน่นอน และมีการปนเปื้อนในระหว่างกระบวนการผลิตน้อย ( Technical Information, 1987 )

การเตรียม masterbatch สามารถทำได้โดยการผสมระหว่างสารเติมแต่งกับพอลิเมอร์ ในขั้นตอนเดียว ( one-step process ) ระบบการผสมมีอยู่ 2 ระบบ คือ การผสมระบบเปิด ( open mill mixing ) เช่น การผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดสองลูกกลิ้ง ( two roll mill ) และ การผสมระบบปิด ( internal mixing ) เช่น การบดผสมด้วยเครื่อง Banbury mixer และ เครื่องอัดรีด โดยทั่วไปนิยมทำการผสมด้วยระบบปิด

### หลักการในการผสม

1. เครื่องอัดรีด ควรมีความเค้นสูงที่เกิดขึ้นระหว่างสกรูกับผนังของห้องสกรู เพื่อให้อนุภาคของสารเติมแต่งแตกกระจายภายในเมตริกซ์ของพอลิเมอร์ และทำให้เกิดแรงเฉือนสูงตามไปด้วย
2. อุณหภูมิที่ใช้ในการผสมไม่ควรสูงมากเกินไป เพราะอาจทำให้เกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์หรือสารเติมแต่งได้
3. ลักษณะการผสมที่ดี ควรมีการผสมควบคู่ไปกับการลำเลียงของผสมไปข้างหน้าด้วยในเวลาเดียวกัน และมีส่วนหนึ่งผสมย้อนกลับ (back mixing) ลักษณะการผสมย้อนกลับตามทิศทางการหมุนของสกรูนี้ จะทำให้ของผสมที่ได้มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous)

### 2.6 การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสม

2.6.1 อุณหภูมิการหลอมเหลวและความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ Datta และ Birley (1983) ได้ศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเอทิลีนชนิด LDPE และ LLDPE ด้วยเครื่อง DSC พบว่าถ้าใช้อัตราการเย็นตัว 1 องศาเซลเซียสต่ออนาที จะเห็นเฟสการเกิดผลึก (crystalline-phase) ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดค่อนข้างชัดเจน แต่ถ้าใช้อัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็วประมาณ 20 องศาเซลเซียสต่ออนาที เฟสการเกิดผลึกจะมีลักษณะเลื่อมล้ำกันอยู่หลายเฟส ทำให้เห็นการแยกกันไม่ชัดเจน วัสดุเมื่อได้รับความร้อนจะดูดกลืนพลังงาน ทำให้วัสดุมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสำหรับพอลิเมอร์ที่มีลักษณะกึ่งผลึก เมื่อได้รับความร้อนจะเริ่มหลอมเหลวผลึกจะถูกทำลายลง การทดสอบอุณหภูมิการหลอมเหลวด้วยเครื่อง DSC (differential scanning calorimetry) นั้นจะปรากฏที่อุณหภูมิหนึ่งอุณหภูมิใดของยอดที่การดูดกลืนความร้อน (melting endotherm) แต่อุณหภูมิดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับขนาดของตัวอย่าง อุณหภูมิจะสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อตัวอย่างมีขนาดใหญ่ขึ้น ในการทดสอบแต่ละครั้งย่อมเป็นเรื่องยากที่จะกำหนดขนาดของตัวอย่างให้เท่ากันพอดี จุดหลอมเหลวอาจไม่อยู่ที่อุณหภูมิเดียวกันหมด จึงนิยม เรียกว่า อุณหภูมิการหลอมเหลวมากกว่าจุดหลอมเหลว ในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุนั้น จำเป็นต้องศึกษาอุณหภูมิหลอมเหลวประกอบไปด้วย โดยทั่วไปอุณหภูมิการหลอมเหลวจะเป็นอุณหภูมิต่ำสุดที่ใช้ในการขึ้นรูป

2.6.2 ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ Sebaa และ คณะ (1992) พบว่าความเป็นผลึกของพอลิเมอร์สามารถวัดได้จากความร้อนที่ใช้ในการหลอมพอลิเมอร์ จากเครื่อง DSC โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.12

$$\% \text{ ผลึก} = \frac{\text{ความร้อนที่ใช้ในการหลอมสารตัวอย่าง} \times 100}{\text{ความร้อนที่ใช้ในการหลอมสารอ้างอิงที่มีความเป็นผลึก 100 \%}} \quad (2.12)$$

หมายเหตุ ; ความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวสารอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 285 J/g

2.6.3 ครรชนีการไหล ค่าครรชนีการไหล โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้ในการแบ่งเกรดของพอลิเมอร์ เพื่อนำไปใช้งานต่าง ๆ กันไป การทดสอบครรชนีการไหลจะทำตามมาตรฐาน ASTM D1238 โดยการป้อนเม็ดพลาสติกเข้าไปในช่องรับตัวอย่าง เมื่อได้รับความร้อนจะหลอมเหลวและถูกกดด้วยน้ำหนักให้ไหลผ่าน orifice ภายใต้ความดันคงที่ พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะมีค่าครรชนีการไหลต่ำเพราะสามารถไหลผ่าน orifice ได้ช้า แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความแข็งแรงดี พอลิเมอร์ต่างชนิดกันไม่สามารถเปรียบเทียบค่าครรชนีการไหลได้ เพราะใช้ภาวะในการทดสอบต่างกัน

2.6.4 ความหนาแน่นขณะหลอมเหลว ( Melt density ) ความหนาแน่นขณะหลอมเหลวของพอลิเมอร์สามารถหาได้จากเครื่อง Melt Indexer เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความหนืดโดยมีความสัมพันธ์ดังสมการในภาคผนวก ค

2.6.5 ความหนืด(  $\eta$  ) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือน( shear stress ) ต่ออัตราการเฉือน ( shear rate ) ของพอลิเมอร์ ของไหลที่มีความหนืดคงที่ ไม่ว่าจะอัตราการเฉือนจะเป็นเท่าใด เรียกของไหลนี้ว่า ของไหลนิวตันเนียน ( Newtonian fluid ) สำหรับของไหลที่มีความหนืดไม่คงที่จะเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราการเฉือนหรือเวลา ความหนืดอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของของไหล เราเรียกของไหลแบบนี้ว่า ของไหลแบบนอน-นิวตันเนียน ( Non - Newtonian fluid ) ได้แก่ ของไหลที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และยาว เช่น พอลิเมอร์ ซึ่งมีพฤติกรรมไหลแบบ pseudoplastic หรือ shear thinning วัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการไหลแบบนี้ จะเกิดได้ทันทีที่ได้รับความร้อน ความหนืดของระบบจะลดลง เมื่อเพิ่มความเค้น การเกิด shear thinning เป็นผลเนื่องมาจากแรงหรือความเค้นที่ใส่เข้าไป มีแนวโน้มที่จะรบกวนหรือขัดขวางไม่ให้โมเลกุลของพอลิเมอร์อยู่ใน conformation ที่สมดุล ทำให้เกิดการยืดออกในทิศทาง การเฉือน

สมบัติการไหลหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวและสารละลายพอลิเมอร์ มีความสำคัญในการบอกน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ในการขึ้นรูปพลาสติกส่วนมากจะอาศัย



ความหนืดในการทำน่ายกระบวนการที่เหมาะสมในการขึ้นรูปพลาสติก การขึ้นรูปด้วยวิธีการต่าง ๆ ในทางอุตสาหกรรม นั้น ต้องการอัตราการเฉือนที่แตกต่างกันไป แล้วแต่กระบวนการที่ใช้ ( เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตรี , น.ป.ป. ) ดังต่อไปนี้

compression molding	ต้องการอัตราการเฉือน	$1 - 10 \text{ s}^{-1}$
calendering	ต้องการอัตราการเฉือน	$10 - 10^2 \text{ s}^{-1}$
extrusion	ต้องการอัตราการเฉือน	$10^2 - 10^3 \text{ s}^{-1}$
injection molding	ต้องการอัตราการเฉือน	$10^3 - 10^4 \text{ s}^{-1}$

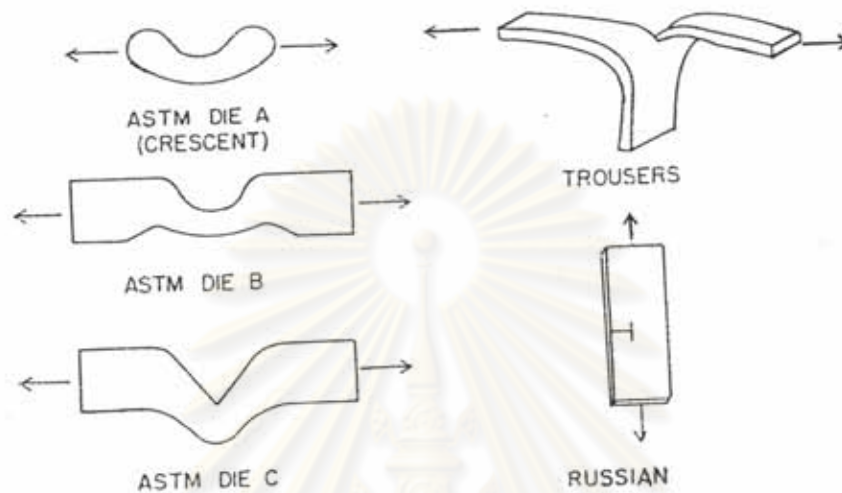
ส่วนความหนืดขณะหลอมเหลว สามารถหาได้จากเครื่อง Melt Indexer

## 2.7 การทดสอบสมบัติของฟิล์ม

2.7.1 ความทนต่อแรงดึง ( Tensile strength ) หมายถึง ความเค้นสูงสุดที่วัสดุหรือชิ้นงานทนได้ในการทดสอบแรงดึง ถ้าเป็นความเค้นสูงสุดที่จุดครากจะเรียกว่า ความทนต่อแรงดึงที่จุดคราก ( tensile strength at yield ) ถ้าเป็นความเค้นสูงสุดที่จุดขาด จะเรียกว่า ความทนต่อแรงดึง ( tensile strength at break or ultimate tensile strength ) แสดงในภาคผนวก ง

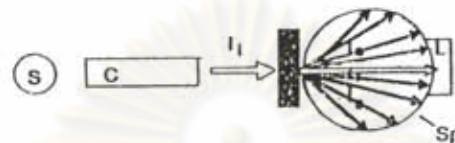
2.7.2 การยืดออกที่จุดขาด ( % elongation at break ) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความยาวของวัสดุ เมื่ออยู่ภายใต้แรงดึงต่อความยาวเดิมของวัสดุก่อนถูกแรงกระทำ ดังแสดงในภาคผนวก ง

2.7.3 ความต้านทานต่อการฉีกขาด หมายถึงความทนทานต่อการรับแรงดึง จนถึงจุดเริ่มต้นของการฉีกขาดของวัสดุต่อหนึ่งหน่วยความหนา ปัจจัยที่มีผลต่อความทนต่อการฉีกขาด ได้แก่ ความหนาของฟิล์ม อันมีผลมาจากการดึง ( drawdown ) ถ้าฟิล์มถูกดึงมากโมเลกุลจะมีการเรียงตัวกันดี การฉีกขาดในแนวขวางจะเกิดได้ง่ายขึ้น เนื่องจากฟิล์มมีการเรียงตัวทั้งสองทิศทาง จึงทำการทดสอบทั้งสองทิศทาง การทดสอบมีหลายวิธี รูปแบบของชิ้นงานจะแตกต่างกันไป ดังรูปที่ 2.30 แบบที่ใช้ในการทดลองนี้คือแบบ ASTM die C ตามมาตรฐาน ASTM D1004 ผลของการทดสอบจะขึ้นอยู่กับแบบของชิ้นทดสอบที่ใช้ อัตราเร็วของการดึงให้ฉีกขาดและอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ ( เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตรี , น.ป.ป. )



รูปที่ 2.30 ลักษณะของชิ้นทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด ตามแบบ ASTM die C

2.7.4 ความฝ้า (haze) फिल्मที่ใช้ในการบรรจุหีบห่อส่วนใหญ่จะเป็นฟิล์มใส มีความฝ้าน้อย ทำให้มองเห็นผลิตภัณฑ์ภายในได้ง่าย ค่าความฝ้า ถ้ามากจะมองเห็นผลิตภัณฑ์ภายในได้ยาก การที่ฟิล์มมีความฝ้ามาก แสดงว่ามีความเป็นผลึกมาก ผลึกของพลาสติกจะเป็นผลึกเดี่ยวขนาดใหญ่ ทำให้การกระเจิงของแสงเป็นมุมกว้าง จึงขุ่นมัว ถ้าต้องการทำให้ฟิล์มมีความเป็นผลึกลดลง หรือมีความใสเพิ่มขึ้น สามารถทำได้โดยการหล่อเย็นฟิล์มอย่างรวดเร็ว พอลิเมอร์ต่างชนิดกันจะมีความเป็นผลึกแตกต่างกันไป การทดสอบความฝ้าของฟิล์ม เป็นการทดสอบโดยอาศัยหลักการของแสง ดังรูปที่ 2.31 เมื่อแสงส่องมากระทบกับผิวของวัสดุ บางส่วนจะสะท้อนออกไปในทิศทางต่าง ๆ (reflected light ;  $I_r$ ) บางส่วนจะถูกดูดกลืน (absorbed light ;  $I_a$ ) บางส่วนสามารถส่งผ่านทะลุวัสดุออกไปลำแสงที่ทะลุออกมาทางด้านหลังวัสดุจะประกอบด้วยลำแสงสะท้อน และลำแสงจากการกระเจิง (scattered transmitted light intensity)



- S - Light Source  
 C - Collimator  
 $I_i$  - Intensity of incident light beam  
 F - Film Sample  
 $I_r$  - Regular Transmitted light intensity  
 $I_s$  - Scattered Transmitted light intensity  
 Sp - Integrating Sphere with detector  
 L - Removable Light Trap that absorbs light in  $2.5^\circ$  Arc

$$\% \text{ Haze} = \frac{I_s > 2.5^\circ}{I_s + I_r} \times 100 = \frac{\text{Intensity of Light Scattered more than } 2.5^\circ}{\text{Intensity of Scattered + Regular Transmitted Light}} \times 100$$

รูปที่ 2.31 หลักการของเครื่อง Haze meter

ความฝ้า หมายถึง ความขุ่นมัวของชิ้นงานที่สามารถยอมให้แสงส่องผ่านได้แล้ว กระจ่างออกไปจากผิวหน้าของชิ้นงาน

$$\% \text{ ความฝ้า} = \frac{I_s > 2.5^\circ}{I_s + I_r} \times 100 \quad (2.13)$$

2.7.5 ความเงามัน ( gloss) หรือ specular gloss เป็นการทดสอบโดยอาศัยหลักการสะท้อนของแสงที่ผิวหน้าของวัสดุตามมุมที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.32 โดยมีลักษณะเหมือนการสะท้อนของกระจกเงา มุมตกกระทบที่ใช้มี  $20^\circ$   $60^\circ$  และ  $80^\circ$  พลาสติกที่มีมุมตกกระทบเพิ่มขึ้น ค่าความเงามันที่พื้นผิววัสดุจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่อแสงส่องไปตกกระทบชิ้นงานแล้วสะท้อนออกมาแสงดังกล่าวจะถูกดักจับโดย photodetector และให้สัญญาณทางไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงาน หรือเปลี่ยนเป็นตัวเลขแสดงทางหน้าจอเครื่องเป็นค่า gloss unit ( Pike, 1993 )





S - Light Source  
 $I_i$  - Incident Light, usually  $20^\circ$ ,  $45^\circ$  or  $60^\circ$   
 F - Film Sample  
 $I_{rf}$  - Intensity of reflected light at an angle equal and opposite to the angle of the incident light  
 D - Detector

Gloss =  $\frac{I_{rf}}{I_{rf \text{ of Ref}}}$  = Intensity of reflected light at chosen angle  
 Intensity of reflected light at chosen angle  
 of a reference material

รูปที่ 2.32 หลักการของเครื่อง Gloss meter

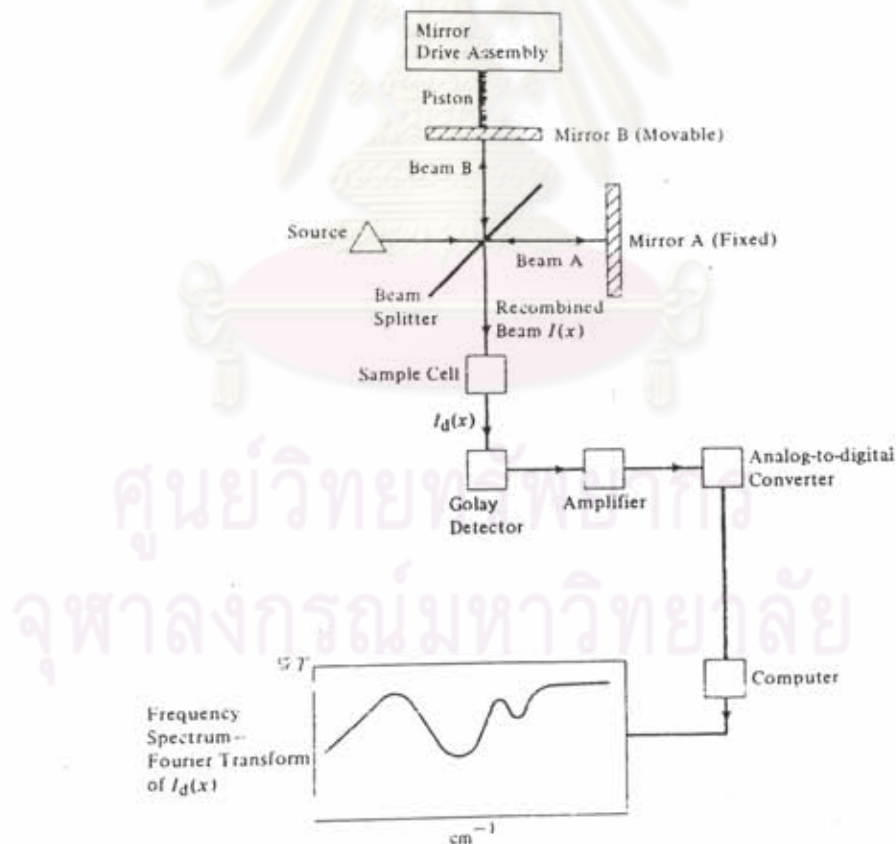
$$\% \text{ ความเงา} = \frac{\text{ความเข้มแสงที่สะท้อนจากผิววัสดุตัวอย่าง}}{\text{ความเข้มของแสงที่สะท้อนจากผิววัสดุอ้างอิง}} \times 100 \quad (2.14)$$

## 2.8 การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

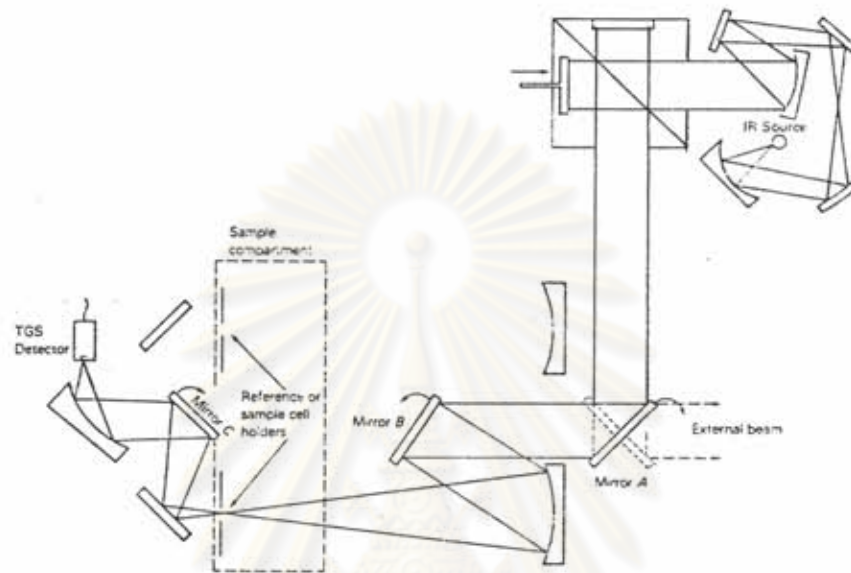
การศึกษาและการนำไปใช้ประโยชน์ของอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี สามารถนำมาวิเคราะห์ของผสมพวกไฮโดรคาร์บอน และสารในกลุ่มใกล้เคียงกันได้ดี โดยทั่วไปมักจะใช้หลักการกระจายแสง (dispersion) ของสเปกตรัมการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ในช่วงที่สนใจเป็นตัวกำหนด โดยการวัดออกมาในรูปของความเข้มแสงต่อความถี่ หรือความยาวคลื่น หรือเลขคลื่น (wave number) จะได้เป็นสเปกตรัม เรียกว่า frequency - domain spectrum แต่ถ้าเป็นการวัดความเข้มแสง หรือกำลังของแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน อย่างต่อเนื่องเทียบกับเวลา เรียกว่า time - domain spectrum หรือ โดยทั่วไปเรียกว่า Fourier Transform Spectroscopy (FT-IR) จากนั้น time - domain spectrum จะถูกเปลี่ยนเป็น frequency - domain spectrum ด้วย fourier transform จากการใช้ดิจิทัลคอมพิวเตอร์ เนื่องจาก fourier transform สามารถวัดการดูดกลืนแสงที่ความถี่ต่าง ๆ กัน ได้พร้อมกันหมด ทำให้การวิเคราะห์รวดเร็วขึ้นหลายเท่า การแยก (resolution) ดีขึ้น และทำให้ signal - to noise ratio ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ การวัดด้วยอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีธรรมดาซึ่งวัดได้ที่ละความถี่เท่านั้น

### หลักการทํางาน

เครื่อง FT-IR ประกอบด้วย Michelson Interferometer ทำหน้าที่ให้แสงที่ผ่านเข้ามายังดีเทคเตอร์มีความถี่พอเหมาะ ลำแสงจะถูกแยกออกเป็นสองลำแสง ดังรูปที่ 2.33 ลำแสง A จะเดินทางในระยะทางที่คงที่ ส่วนลำแสง B จะเดินทางในระยะทางที่เปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของกระจก B เมื่อลำแสง A และ B มารวมกันจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมหรือหักล้างกันขึ้นอยู่กับระยะของลำแสง ถ้ามีการแทรกสอดแบบเสริมจะให้สัญญาณสูงขึ้น ถ้ามีการแทรกสอดแบบหักล้างจะให้สัญญาณต่ำลง Interferometer จะผลิตสัญญาณที่เป็นปฏิภาคกับความถี่ของแสงที่ดีเทคเตอร์สามารถวัดได้แล้วสัญญาณนั้นจะถูกเปลี่ยนเป็น frequency domain spectrum ตามลำดับ ด้วยคอมพิวเตอร์อย่างค่อนเนื่อง ลักษณะการออกแบบทางเดินของแสง double beam fourier transform infrared spectrophotometer ดังแสดงในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.33 แสดง Interferometer และส่วนประกอบต่างๆที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.34 แสดงการออกแบบเครื่อง Double Beam Fourier Transform Infrared Spectrophotometer

การวิเคราะห์ตัวอย่าง ด้วยเทคนิคทางอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี สามารถนำมาใช้วิเคราะห์สารต่าง ๆ ได้ ทั้งสถานะภาพและสถานะที่เป็นแก๊ส ของเหลว และของแข็งโดยทั่วไปแล้ว นิยมนำมาพิสูจน์โครงสร้างของสารอินทรีย์ เช่น ฟังก์ชันนัลกรุปต่าง ๆ ที่ปรากฏออกมาที่ความถี่ต่าง ๆ กัน ( แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม , 2534 ) ข้อมูลต่าง ๆ สามารถดูได้จากตารางในภาคผนวก จ