

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 สารให้กลิ่น (Fragrance) [1]

ในทางเคมีสารให้กลิ่นนำมาใช้เติมลงในผลิตภัณฑ์ เพื่อปรับแต่งให้ได้กลิ่นที่ต้องการหรือช่วยปกปิดกลิ่นที่ไม่ต้องการในวัสดุหรือสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไป เป็นน้ำมันหอมระเหย (perfume oils) ซึ่งทำเป็นเม็ดยาเข้มข้น (masterbatches) ในเทอร์โมพลาสติก โดยมักจะรวมกับสารให้สี (colorant) และขายเป็นผงหรือเป็นเม็ดให้แก่ผู้ประกอบการที่ต้องการผสมเม็ดยาเข้มข้นกับเรซินธรรมชาติเข้าด้วยกันโดยใช้การอัดแบบโดยทั่วไป การอัดรีดและกระบวนการทำโฟม เป็นต้น

สารให้กลิ่นแบ่งตามองค์ประกอบได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

1. สารให้กลิ่นแบบธรรมชาติ (Natural Flavour) เป็นสารให้กลิ่นที่ใช้วัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติ 100 % ไม่มีตัวทำละลายเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ พริกสารสกัดชนิดต่างๆ เช่น essential oil, vanilla extract, malt extract เป็นต้น

2. สารให้กลิ่นชนิดเลียนแบบ (Natural Identical Flavour หรือ Synthetic Flavour) เป็นสารให้กลิ่นที่ผลิตโดยการสังเคราะห์สารเคมีให้มีองค์ประกอบทางเคมีให้เลียนแบบกลิ่นที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สาร Diacetyl เป็นสารให้กลิ่นที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติในเนยอยู่แล้ว ดังนั้นการใช้สาร Diacetyl ในการผลิตเนยจะถือว่าสารให้กลิ่นชนิดนี้เป็นแบบ Natural Identical

3. สารให้กลิ่นสังเคราะห์ (Artificial Flavour) เป็นสารให้กลิ่นที่ผลิตโดยการสังเคราะห์สารเคมีที่ไม่ได้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารวานิลลินซึ่งได้จากการสกัดวานิลลาถือว่าเป็น Natural Identical Raw Material แต่ Ethyl Vanillin จัดเป็นสารให้กลิ่นแบบสังเคราะห์ เนื่องจากสารเคมีตัวนี้ไม่ได้เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติ แต่ได้จากการสังเคราะห์เท่านั้น แต่ Ethyl Vanillin จะมีราคาถูกและให้กลิ่นที่แรงกว่าสาร Vanillin

รูปแบบของสารให้กลิ่น (Flavour Forms)

สารให้กลิ่นที่มีขายอยู่ทั่วไปนั้นมีขายกันในหลายรูปแบบและความเข้มข้นที่แตกต่างกันไป ทั้งนี้เพื่อจุดประสงค์ในด้านความสะดวกและความเหมาะสมในการใช้งาน สามารถแบ่งได้หลายรูปแบบดังต่อไปนี้

1. สารให้กลิ่นชนิดผง (Powder Form) อาจผลิตได้จากการ Spray Dry, Adsorbate (การฉีดพ่นสารให้กลิ่นลงบนตัวพาต่างๆ เช่น เกลือ, น้ำตาล เป็นต้น), Encapsulate (การใช้สารพอก gum ห่อหุ้มสารให้กลิ่นให้อยู่ภายใน)

2. สารให้กลิ่นชนิดน้ำ (Liquid Form) แบ่งเป็น

- ชนิดที่มีตัวทำละลายที่ไม่ใช่แอลกอฮอล์ เช่น Propylene Glycol, Triacetin
- ชนิดที่มีแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลาย
- ชนิดที่มีน้ำมัน, ไขมัน เป็นตัวทำละลาย
- ชนิดที่ไม่มีตัวทำละลาย เช่น Essential Oil

3. สารให้กลิ่นชนิด Emulsion โดยปกติใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

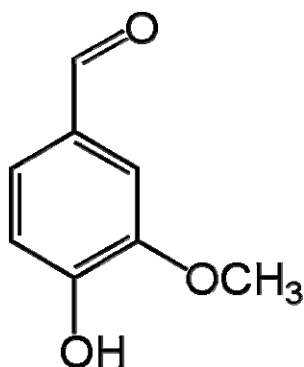
ความเข้มข้นของสารให้กลิ่นมีตั้งแต่ 10 ส่วนในล้านส่วน (ใช้กับฟิล์มห่ออาหาร) จนถึง 40 เปอร์เซ็นต์ (สารปรับอากาศบริสุทธิ์) ความเข้มข้นที่ขายกันประมาณ 2-8 ดอลลาร์ต่อปอนด์ อายุการใช้งานของกลิ่นควบคุมโดยความดันไอของกลิ่น อัตราส่วนระหว่างผิวต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิและการไหลของอากาศที่ได้รับการควบคุม อายุการใช้งานอาจอยู่ในช่วงหลายวันจนถึงหลายปี ผลิตภัณฑ์ที่นิยมนำสารให้กลิ่นไปใช้กันมากคือ การผลิตหัวน้ำหอม กุญชยะ ฟิล์มทั่วไป สารปรับอากาศบริสุทธิ์ในห้องหรือรถยนต์ ของเด็กเล่น สิ่งทอ ของใช้ในโรงพยาบาล ผลิตภัณฑ์ขนมหวาน หมากฝรั่ง เครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากนม เป็นต้น ส่วนมากในงานเหล่านี้ต้องการใช้กลิ่นที่มีความเข้มข้นสูง แต่การใช้งานในบางกรณีใช้กลิ่นที่มีความเข้มข้นสูงไม่ได้จะต้องรักษากลิ่นให้อยู่ในระดับอ่อนเพื่อลดผลที่จะเกิดขึ้นในทางจิตวิทยา

การประเมินกลิ่น (Flavour Evaluation)

สารให้กลิ่นที่ถูกปรุงแต่งขึ้นมามีการประเมินทางประสาทสัมผัส คือ การดม โดยได้อธิบายลักษณะกลิ่นแบ่งเป็น 3 ระยะขึ้นกับระยะเวลาตั้งทิ้งไว้ก่อนหลังดังนี้

1. Top Note เป็นความรู้สึกที่เกิดขึ้นเมื่อดมทันที ส่วนใหญ่มักได้กลิ่นของสารละลาย
2. Body เป็นความรู้สึกที่เกิดขึ้นเมื่อตั้งทิ้งไว้ซักครู่ก่อนที่จะดมกลิ่น
3. Dry Out ทิ้งไว้นานหลายชั่วโมงหรือข้ามคืน ยังมีกลิ่นติดค้างนานยิ่งดี

ในงานวิจัยนี้ใช้สารละลายวานิลลา (vanilla) เป็นสารให้กลิ่น ซึ่งวานิลลาเป็นที่รู้จักกันดีและเป็นที่นิยมนักอย่างแพร่หลายในการนำมาใช้เป็นสารแต่งกลิ่นและรสชาติ ซึ่งสารประกอบหลักที่เป็นตัวให้กลิ่นวานิลลาจะเป็นสารประกอบบริสุทธิ์จะรู้จักกันในชื่อ วานิลลิน (vanillin) มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1 ได้มาจากดอกกล้วยไม้ในตระกูลวานิลลา (genus *Vanilla*) สายพันธุ์ (species) หลักๆ ที่นิยมนำมาปลูกกันคือ วานิลลา แพลนโฟเลีย (*Vanilla planifolia*) ในอดีตเป็นพืชท้องถิ่นของประเทศเม็กซิโก แต่ในปัจจุบันสามารถปลูกได้ทั่วไปในประเทศเขตร้อน ซึ่งที่เกาะมาดากัสการ์ (Madagascar) ทางตะวันออกเฉียงใต้ของทวีปแอฟริกาเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ที่สุดในโลก

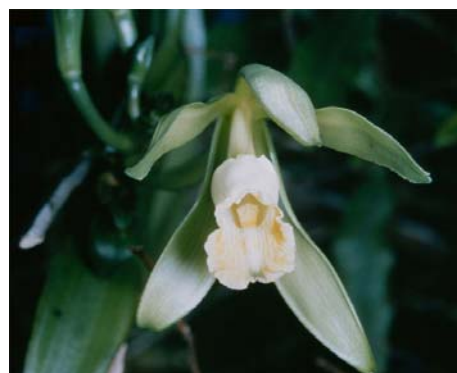


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของวานิลลิน [2]

วานิลลาเป็นไม้เถารูปที่ 2.2 ซึ่งสารประกอบที่ให้กลิ่นมีลักษณะเด่นเฉพาะตัว จะพบได้ที่ส่วนของผลหรือเมล็ดที่ได้จากการผสมเกสรของดอก ถ้าผลหรือเมล็ดสุกจะหลุดออกจากต้นและแตกออกให้กลิ่นที่เป็นลักษณะเฉพาะตัวของวานิลลาออกมา ในเมล็ดที่สุกจะมีสีค่อนข้างดำและภายในจะบรรจุด้วยสารที่ให้กลิ่นเฉพาะตัวของวานิลลาซึ่งจะไม่พบกลิ่นนี้ในเมล็ดที่ยังไม่สุก



a)



b)

รูปที่ 2.2 a) เถาของต้นวานิลลา b) ส่วนของดอกวานิลลา [3]

การผลิตหัวน้ำหอมจากวานิลลาสามารถทำได้ 2 รูปแบบ คือ การสกัดจากผลหรือเมล็ดและจากการสังเคราะห์ ซึ่งวานิลลาที่ได้จากการสกัดจากผลหรือเมล็ดพบว่าเป็นของผสมซึ่งมีสารประกอบต่างๆ รวมกันอยู่มากกว่าร้อยละ โดยมิวนิลลินเป็นองค์ประกอบหลักในการให้กลิ่นวานิลลา ส่วนสารประกอบอื่นๆ ที่รวมกันอยู่จะมีผลทำให้กลิ่นของวานิลลาที่สกัดได้เปลี่ยนไป ตรงกันข้ามกับวานิลลาที่ได้จากการสังเคราะห์ซึ่งจะมีราคาถูกกว่าและมีมิวนิลลินเป็นองค์ประกอบหลักเพียงอย่างเดียวทำให้กลิ่นที่ได้มีความใกล้เคียงกับกลิ่นวานิลลาในธรรมชาติมากที่สุด

2.1.1 การสกัดสารให้กลิ่นจากผลหรือเมล็ดวานิลลา (Vanilla) [3]

สารออร์แกนิกเอสเทอร์ที่ทำหน้าที่เป็นสารให้กลิ่นสามารถสกัดได้จากส่วนที่เป็นฝักหรือเมล็ดของวานิลลา รูปที่ 2.3 ถ้าเป็นเมล็ดที่มีสีเขียวหรือเมล็ดที่ยังไม่สุกจะไม่พบกลิ่นหรือรสชาติที่เป็นลักษณะเฉพาะของวานิลลา ส่วนเมล็ดที่มีสีค่อนข้างดำหรือเมล็ดที่สุกแล้วนั้นมีกลิ่นและรสชาติที่เป็นลักษณะเฉพาะของวานิลลา แต่เมล็ดที่สุกแล้วจะหลุดออกจากดอกและเมล็ดจะแตกออกให้กลิ่นวานิลลาออกมาทำให้ไม่สามารถเก็บเมล็ดนั้นไปใช้งานได้ ดังนั้นต้องเก็บเกี่ยวตั้งแต่เมล็ดที่ยังไม่สุกเพื่อนำไปเตรียมให้เป็นเมล็ดที่สุกจึงจะสามารถนำไปใช้งานได้

กระบวนการเตรียมเมล็ดวานิลลา มีขั้นตอนดังนี้

1. นำเมล็ดสีเขียวหรือเมล็ดที่ยังไม่สุกไปให้ความร้อนที่ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 3 นาที จะทำให้กระบวนการทางธรรมชาติถูกยับยั้ง
2. หลังจากการอบไล่ความชื้นในระยะเวลาสั้นๆ เมล็ดจะถูกเก็บไว้ในกล่องไม้ที่มีผ้าห่อเอาไว้เป็นระยะเวลา 4 เดือน จะทำให้เมล็ดมีสีน้ำตาลเข้มมากขึ้น
3. นำเมล็ดมาตากให้แห้งโดยใช้เตาอบหรือใช้แสงอาทิตย์ โดยทำการเว้นระยะห่างให้เท่าๆ กันตากไปจนกว่าเมล็ดจะแห้ง แต่ถ้าตากจนแห้งเกินไปเมล็ดนั้นก็จะไม่สามารถนำไปใช้งานได้
4. เมล็ดจะถูกแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ โดยเมล็ดที่สมบูรณ์ มีขนาดใหญ่ จะถูกเก็บเอาไว้เพื่อนำไปขาย ส่วนเมล็ดที่มีขนาดเล็ก หรือแตกหักส่วนหนึ่งจะนำไปใช้ในการสกัดสารวานิลลาหรือนำเมล็ดเหล่านั้นไปบดเป็นผง
5. เมล็ดที่เหลือจะถูกปล่อยให้สุกในกล่องไม้ใช้เวลาประมาณ 8 เดือน โดยจะมีการตรวจสอบสภาพหรือความชื้นเป็นระยะๆ สุดท้ายจะได้เมล็ดวานิลลาที่สุกพร้อมที่จะนำไปใช้ในการแต่งเติมกลิ่นและรสชาติที่เป็นลักษณะเฉพาะของวานิลลา



a)



b)

รูปที่ 2.3 a) ฝักของวานิลลาที่ยังไม่สุก b) ฝักของวานิลลาที่สุกแล้ว [4]

2.1.2 การสังเคราะห์สารวานิลลิน (Vanillin) [2]

วานิลลินหรือ 4-ไฮดรอกซี-3-เมทอกซีเบนซัลดีไฮด์ (*4-hydroxy-3-methoxybenzaldehyde*) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตรโมเลกุลดังนี้ $C_8H_8O_3$ ส่วนที่เป็นหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ

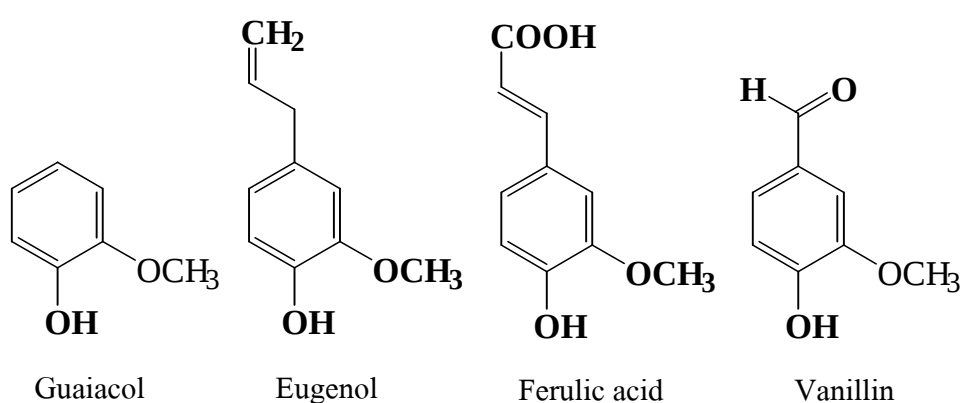
- อัลดีไฮด์ (aldehyde)
- อีเทอร์ (ether)
- แอลกอฮอล์ (alcohol)

ในธรรมชาติสามารถสกัดสารวานิลลินได้จากเมล็ดวานิลลา ซึ่งวานิลลินที่สังเคราะห์ได้นิยมใช้เป็นตัวแต่งกลิ่นในอาหาร เครื่องดื่ม และในผลิตภัณฑ์ยา

วานิลลาที่สกัดได้จากธรรมชาติจะมีสารประกอบแตกต่างกันเป็นร้อยชนิด แต่ในวานิลลาที่สังเคราะห์ขึ้นมาจะมีแค่วานิลลินเพียงอย่างเดียว เนื่องจากวานิลลินที่สกัดได้จากธรรมชาติหายากและมีราคาแพงมาก (ราคาตั้งแต่ 1200-4000 ดอลลาร์ต่อกิโลกรัม ขึ้นกับความบริสุทธิ์ของสารที่สกัดได้) ดังนั้นวานิลลินที่ใช้ในอุตสาหกรรมจึงได้จากการสังเคราะห์ (ราคาต่ำกว่า 15 ดอลลาร์ต่อกิโลกรัม) การสังเคราะห์เพื่อการค้าครั้งแรกตั้งต้นจาก ยูจีนอล (eugenol) รูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นสารประกอบในธรรมชาติที่หาได้ง่ายนำไปผ่านกระบวนการไอโซเมอไรเซชัน (isomerization) จะได้ไอโซยูจีนอล (isoeugenol) แล้วนำไปทำกระบวนการออกซิเดชันจะได้วานิลลิน แต่ปัจจุบันการผลิตวานิลลินได้จาก

- ฟอर्मิลเลชัน (formylation) กัวไอเอคอล (guaiacol) รูปที่ 2.4 หรือเรียกว่า ปฏิกิริยาไรเมอร์-ไทมานน์ (Reimer-Tiemann reaction)

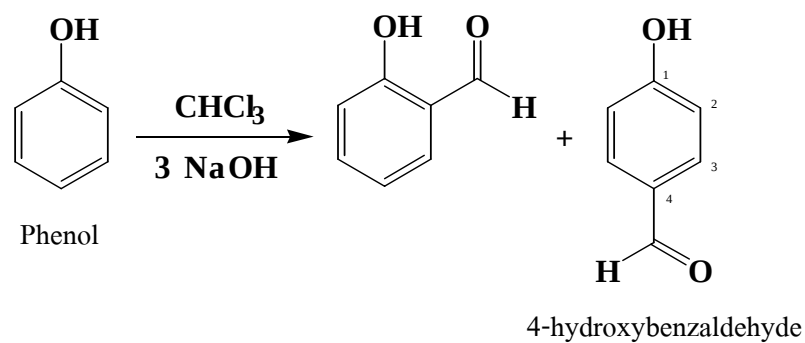
- โดยการหมัก ลิกนิน (lignin) รูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมกระดาษ



รูปที่ 2.4 สารประกอบที่ใช้ในการสังเคราะห์วานิลลิน [5]

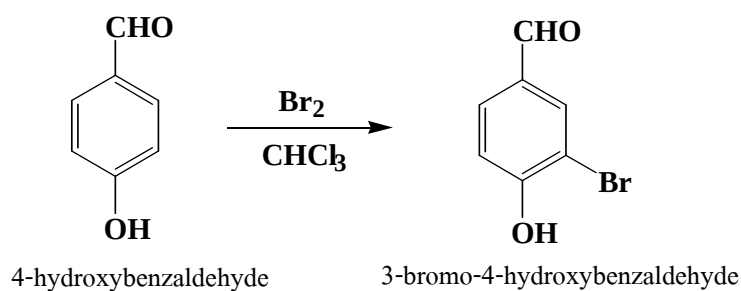
2.1.2.1 การสังเคราะห์ห้วานิลลินผ่านปฏิกิริยาไรเมอร์-ไทมานน์ (Reimer-Tiemann reaction)

ขั้นตอนที่ 1 ทำปฏิกิริยาไรเมอร์-ไทมานน์ (Reimer-Tiemann reaction)



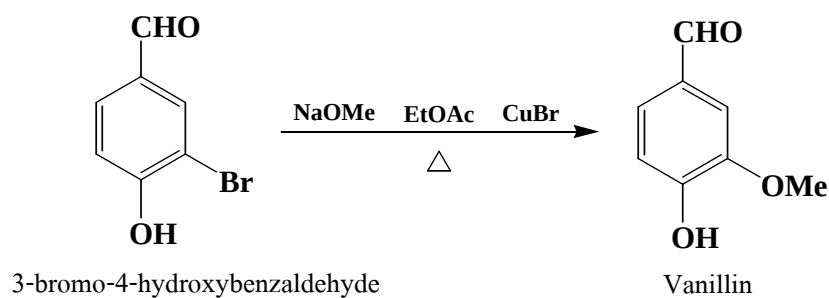
รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาไรเมอร์-ไทมานน์ [6]

ขั้นตอนที่ 2 ทำปฏิกิริยาโบรมิเนชัน 4-ไฮดรอกซีเบนซัลดีไฮด์ (Bromination of 4-hydroxybenzaldehyde)



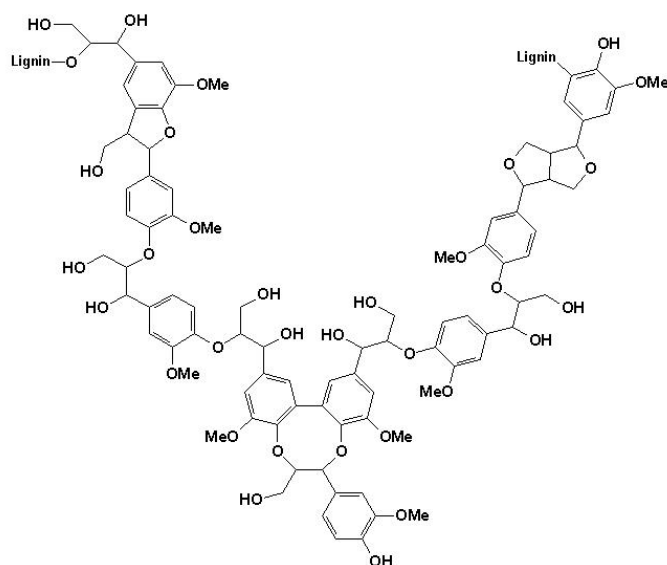
รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาโบรมิเนชัน 4-ไฮดรอกซีเบนซัลดีไฮด์ [7]

ขั้นตอนที่ 3 การเตรียมวานิลลิน



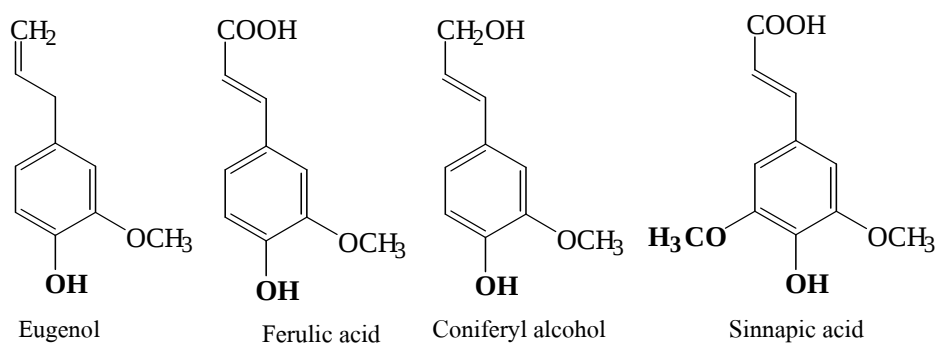
รูปที่ 2.7 การเตรียมวานิลลิน [7]

2.1.2.2 การสังเคราะห์วานิลลินผ่านกระบวนการหมักลิกนิน (Fermentation of lignin)

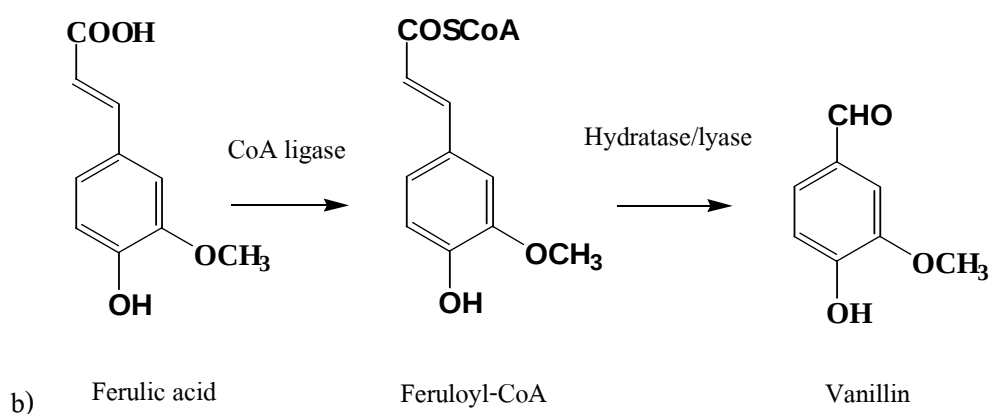
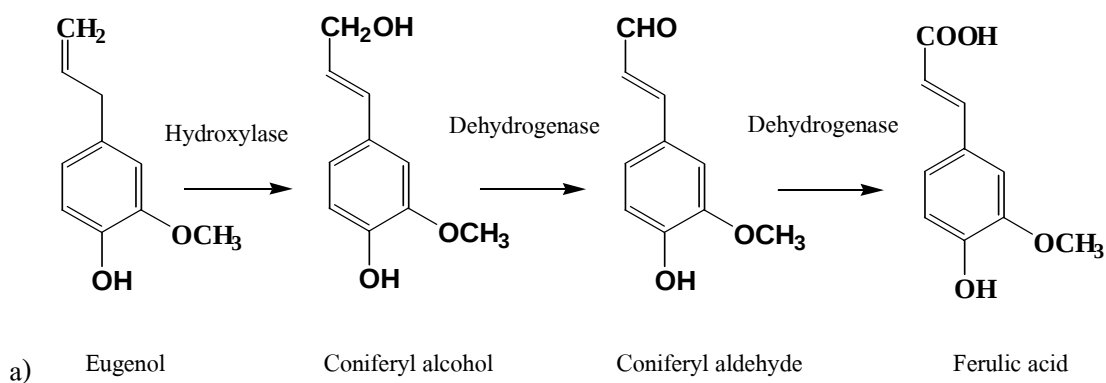


รูปที่ 2.8 โครงสร้างบางส่วนของพอลิเมอร์ลิกนิน [8]

การหมัก (fermentation) เป็นการสลายพันธะของพอลิเมอร์ลิกนินซึ่งจะได้โมโนเมอร์ที่สำคัญออกมาหลายชนิด เช่น ยูเจนอล (eugenol) เฟอูลิก แอซิด (ferulic acid) คอนนิเฟอริล แอลกอฮอล์ (coniferyl alcohol) และซินนาปิก แอซิด (sinnapic acid) เป็นต้น โครงสร้างดังรูปที่ 2.9 ในการสังเคราะห์วานิลลินจะเริ่มจากยูเจนอลซึ่งเป็นสารประกอบที่หาได้ง่ายในธรรมชาติผ่านกระบวนการต่างๆ ที่แสดงในรูปที่ 2.10 จนสุดท้ายได้เป็นวานิลลิน



รูปที่ 2.9 มอนอเมอร์บางตัวที่สำคัญของพอลิเมอร์ลิกนิน [5]



รูปที่ 2.10 แสดง a) การเปลี่ยนจากยูเจนอลเป็นเฟอร์ูลิก แอซิด

b) การเปลี่ยนจากเฟอร์ูลิก แอซิดเป็นวานิลลิน [9]

การนำวานิลลาไปใช้งานจะพบ 3 รูปแบบคือ นำไปใช้ทั้งเมล็ด นำไปใช้ในรูปแบบผง และนำสารที่สกัดหรือสังเคราะห์ได้ไปใช้

การนำวานิลลาไปเป็นสารปรุงแต่งกลิ่นและรสชาติในครีม เค้ก หรือในอาหารประเภทอื่นๆ อาจจะใช้การเติมวานิลลาที่เป็นสารละลายลงไปหรือจะนำทั้งเมล็ดไปผสมในอาหารเลยก็ได้ ซึ่งเมล็ดที่มีสีค่อนข้างดำจะให้กลิ่นวานิลลาเมื่อเมล็ดนั้นแตกออกจากกัน โดยทั่วไปแล้วสารละลายวานิลลาจะมีสีเหลืองน้ำตาลทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสาร

วานิลลาที่มีคุณภาพดีจะให้กลิ่นค่อนข้างแรงแต่ในบางกรณีไม่ต้องการให้มีกลิ่นแรงจึงจำเป็นต้องใช้วานิลลาที่มีคุณภาพต่ำลงมาหรือจะใช้วานิลลาที่ได้จากการสังเคราะห์ ซึ่งในปัจจุบันนี้เป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายเพราะวานิลลาสังเคราะห์ได้นี้มีราคาถูกกว่าวานิลลาที่สกัดได้จากธรรมชาติ

2.2 พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) [10]

ในอดีตมีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่เพื่อตอบสนองความต้องการในการนำไปใช้ประโยชน์เฉพาะทาง แต่ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ได้เริ่มมีการนำพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ที่มีอยู่มาทำการผสมแทนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่และเป็นที่รู้จักกันในชื่อของ *พอลิเมอร์ผสม* ซึ่งหมายถึงการนำพอลิเมอร์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกันเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่หรือเพื่อแก้ไขสมบัติที่ไม่ดีของพอลิเมอร์เดิม ทั้งนี้การผสมกันของพอลิเมอร์มีประโยชน์หลายประการ เช่น

- เพื่อให้พอลิเมอร์มีสมบัติที่ดีขึ้น แต่มีราคาถูกลง
- สามารถนำพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นแต่ละชนิดมาผสมกัน เช่น การทำพอลิเมอร์ผสมของเทอร์โมพลาสติกซึ่งมีความเปราะและมีความทนทานแรงกระแทกได้สูง กับอีลาสโตเมอร์ (elastomer) ซึ่งไม่เปราะแต่มีความแข็ง (stiffness) ต่ำ เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีสมบัติรวมแตกต่างจากสมบัติพอลิเมอร์หลักที่นำมาผสมกัน โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น สภาพในการผสม สมบัติการไหล สันฐานวิทยา ซึ่งมีผลต่อสมบัติและการนำไปใช้งานของพอลิเมอร์ผสมตามต้องการ
- หลีกเลี่ยงปัญหาของความยุ่งยากจากการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่
- ไม่ต้องลงทุนผลิตพอลิเมอร์ใหม่เพื่อนำไปใช้ประโยชน์เฉพาะทาง
- เพื่อช่วยกระบวนการผสมในอุตสาหกรรมการนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น การนำเศษพลาสติกหลายๆ ชนิดกลับมาขึ้นรูปใหม่

พอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียว (Miscible blend) หมายถึง พอลิเมอร์ที่นำมาผสมมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (solubility parameter, δ) ใกล้เคียงกัน เป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน
2. พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียว (Immiscible blend) สามารถอธิบายได้จากสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}}$$

เมื่อ ΔG คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสม (พลังงานอิสระกิบส์)

ΔH คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (enthalpy) ของการผสม

ΔS คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (entropy) ของการผสม

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมส่วนมากเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ (macromolecule) มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นสาเหตุทำให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (entropy) ในการผสมต่ำ ส่วนค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (enthalpy) ในการผสมมักมีค่าเป็นบวก ดังนั้นทำให้ค่าพลังงานอิสระกิบส์ของพอลิเมอร์ผสมมีค่ามากกว่าศูนย์ เป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวหรือกล่าวได้ว่าพอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (solubility parameter, δ) ต่างกันมาก เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน สามารถแบ่งได้เป็น 2 วัฏภาค คือพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของพอลิเมอร์ผสมเรียกว่า *วัฏภาคหลัก* (matrix phase) ส่วนพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบส่วนน้อยเรียกว่า *วัฏภาคกระจาย* (dispersed phase) ซึ่งสามารถตรวจวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM)

2.2.1 ความสามารถในการละลายเข้ากันได้และความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Miscibility and Compatibility) [1]

ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ (Miscibility) ในระดับโมเลกุลจัดเป็นโมโนทัศนทางทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์กล่าวคือ เมื่อสามารถละลายเข้ากันได้จะทำให้เกิดระบบวัฏภาคเดี่ยวเนื้อเดียว (homogeneous single-phase system) มีสมบัติอยู่ระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด และโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ พอลิเมอร์ผสมจัดเป็นสิ่งที่มีความประโยชน์ในทางการค้า โดยเฉพาะเมื่อองค์ประกอบมีส่วนเกี่ยวข้องกับความสามารถในการละลายเข้ากันได้ของโมเลกุล (molecular miscibility) ได้แก่

- น้ำหนักโมเลกุลต่ำ
- ความเป็นผลึกมีค่าเท่ากับศูนย์
- ความมีขั้วคล้ายกัน
- พันธะไฮโดรเจนร่วมกัน

ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Compatibility) จัดเป็นสมบัติในทางปฏิบัติของพอลิเมอร์ผสมบางชนิดซึ่งละลายได้ในระดับโมเลกุลและมีประโยชน์ในทางการค้า อย่างไรก็ตามระบบพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่ในทางการค้าเป็นระบบที่ไม่ละลาย (immiscible) ในระดับโมเลกุลและแยกออกเป็นระบบหลายวัฏภาค (multi-phase system) ในขณะที่ระบบหลายวัฏภาคนี้นานขึ้นจะมีแรงยึดเกาะระหว่างผิวมากขึ้น (strong interfacial adhesion) ทำให้สามารถรวมสมบัติที่ดีที่สุดของแต่ละวัฏภาค และเกิดเป็นความสมดุลของสมบัติทั้งหมดที่ไม่สามารถได้จากสมบัติของพอลิเมอร์บริสุทธิ์โดยลำพัง

2.2.2 สารช่วยผสม (Compatibilizer) [10]

สารละลายวานิลลา ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้วละลายได้ในแอลกอฮอล์หรือน้ำ (hydrophilic) แต่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้วซึ่งจะไม่ละลายในน้ำ (hydrophobic) เนื่องจากความแตกต่างกันในเรื่องของสมบัติดังกล่าวนี้ ทำให้ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (compatibility) มีค่าต่ำ การผสมระหว่างสารละลายวานิลลาและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดข้อบกพร่อง ดังนี้

1. มีสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคไม่ดี
2. มีค่าความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาค (Interfacial tension) สูง
3. มีสัณฐานวิทยา (Morphology) ที่ไม่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป

จากข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์ผสม จึงต้องมีการนำสารช่วยผสม (compatibilizer) มาใช้ เพื่อเพิ่มความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (compatibility) และยังสามารถช่วยลดแรงตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาค ทำให้พอลิเมอร์มีสัณฐานวิทยาที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูปและทำให้สมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาคดีขึ้น ซึ่งวิธีการที่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีขึ้น คือ การเติมสารช่วยผสม ซึ่งแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

1. Non-reactive blending คือ การเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์แบบไม่เกิดปฏิกิริยา ทั้งนี้สารช่วยผสมที่ใช้ควรมีสูตรโครงสร้างเหมือนกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันเพื่อให้เกิดการเกี่ยวพันกัน (entanglement) กับวัฏภาคทั้งสองของพอลิเมอร์ ดังนั้นสารช่วยผสมที่ใช้ต้องเป็นพอลิเมอร์ผสมซึ่งมีหลายชนิด เช่น พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง (graft copolymer) แบบไดบล็อก (diblock copolymer) แบบไตรบล็อก (triblock copolymer) หรือแบบสุ่ม (random copolymer)

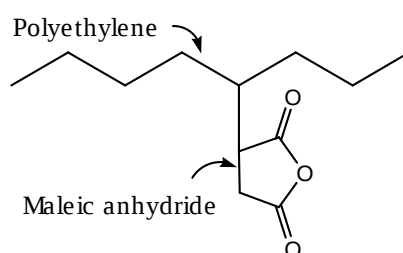
2. Reactive blending เป็นการเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์แบบเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมมีหมู่ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีขณะที่ทำการผสม หรือทำให้เกิดการต่อกิ่งพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งให้มีหมู่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง

โดยสารช่วยผสมอาจเป็นพอลิเมอร์ร่วมชนิดบล็อกหรือกราฟท์ ซึ่งสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสม ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น ในการเลือกพอลิเมอร์ร่วมเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมต้องคำนึงถึงน้ำหนักโมเลกุลในแต่ละส่วนของพอลิเมอร์ร่วม คือ ถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ความยาวของสายโซ่สั้น ทำให้การแทรกซึมผ่านไปในพอลิเมอร์ผสมได้น้อย ส่งผลให้การยึดติดระหว่างผิวสัมผัสต่ำ แต่ถ้าน้ำหนักโมเลกุลสูงมากเกินไป ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยาก การแทรกซึมผ่านไปในพอลิเมอร์ผสมก็ต่ำเช่นเดียวกัน

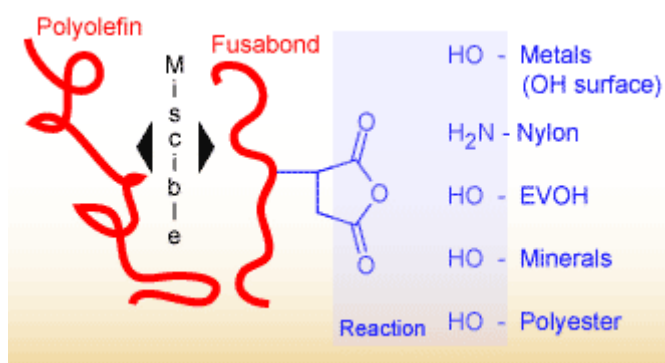
สำหรับในงานวิจัยนี้จะมีการเติมสารฟิวซาบอนด์ เอ็มบี 226ดี (Fusabond MB 226D) เป็นสารช่วยผสม ซึ่งสารนี้เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำต่อกิ่งกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MAPE : Maleic anhydride grafted Polyethylene) มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.11 พอลิเอทิลีนเป็นหนึ่งใน

พอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วส่งผลให้เมื่อทำการผสมกับวัสดุอื่นที่มีขั้ว มักมีสมบัติด้านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวไม่ดี แต่สามารถที่จะทำการแก้ไขได้ โดยการเติมสารอีกชนิดหนึ่งลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติการเข้ากันได้

มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีน เป็นการต่อกิ่งพอลิเอทิลีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เสถียรแล้ว ซึ่งจะทำให้สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ (physicochemical properties) ดีขึ้น โดยเพิ่มความเป็นขั้วของพอลิเอทิลีนทำให้ความเป็นขั้ว (hydrophilicity) เพิ่มขึ้น และความสามารถในการยึดติดเพิ่มขึ้นพบว่าแอนไฮไดรด์เป็นส่วนที่เกิดการเชื่อมโยงจะเกิดอันตรกิริยากับสารวานิลลินรูปที่ 2.12 ทำให้ความสามารถในการเข้ากันได้ของสารทั้งสองชนิดมีเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของฟิวซาบอนด์ [11]

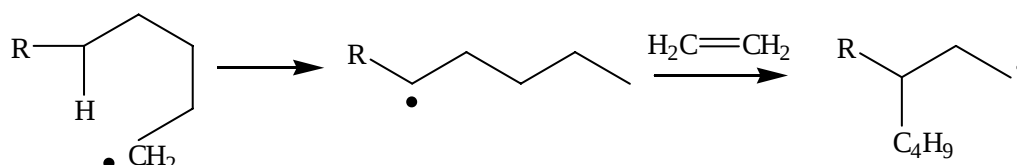


รูปที่ 2.12 การทำงานของพอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ [11]

2.3 พอลิเอทิลีน (Polyethylene) [12,13]

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีความเป็นผลึกต่ำ โครงสร้างมีโซ่กิ่งสาขายาว มีความหนาแน่นต่ำ $0.926 - 0.940 \text{ g.cm}^{-3}$ พอลิเมอร์ไรเซชันผ่านกลไกอนุโมลอิสระมีออกซิเจนหรือเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่ม ทำให้เกิดโซ่กิ่งจำนวนมาก โซ่กิ่งโดยมากเป็นหมู่อัลคิลสายสั้นๆ เช่น เอทิลหรือบิวทิลซึ่งเกิดจากกลไก “intramolecular back-biting” ดังรูปที่ 2.13

โซ่กิ่งเหล่านี้เป็นจุดบกพร่องทำให้ปริมาณผลึกลดลง ความหนาแน่น และจุดหลอมเหลวของ LDPE จึงต่ำเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)



รูปที่ 2.13 กลไก intramolecular back-biting [13]

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,000 – 40,000 ในเชิงพาณิชย์ นิยมระบุน้ำหนักโมเลกุลด้วยค่าดัชนีการหลอมเหลว (melt index) (ASTM 1238) ซึ่งหมายถึง น้ำหนักเป็นกรัมของพอลิเมอร์ที่ไหลออกจากหลอดรูเล็กมาตรฐานที่อุณหภูมิ 190 °C ในเวลา 10 นาที สำหรับ LDPE มีค่า melt index อยู่ในช่วง 0.1 – 10.9 g/10นาที

ตารางที่ 2.1 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) [13]

สมบัติ	หน่วย	ASTM	LDPE
ความถ่วงจำเพาะ	-	D792	0.91 - 0.93
ความเป็นผลึก	%	-	50.0 - 70.0
อุณหภูมิหลอมเหลว	°C	-	98.0 - 120.0
ความแข็งแรงดึง	MPa	D638	4.10 - 16.0
มอดุลัส	GPa	D638	0.10 - 0.26
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด	%	D638	90.0 - 800.0
ความแข็งแรงกระแทก, Notch Izod	J.m ⁻¹	D256	No break
อุณหภูมิเยือกเบนทางความร้อน	°C	D648	38.0 - 49.0

ตารางที่ 2.2 สมบัติเด่นและสมบัติด้อยของพอลิเอทิลีน [13]

สมบัติเด่น	สมบัติด้อย
1. ราคาถูก 2. เป็นฉนวนที่ดี 3. ทนความชื้น 4. ทนสารเคมี 5. ใช้บรรจุอาหารได้ดี 6. ขึ้นรูปได้โดยกระบวนการทางเทอร์โมพลาสติกทั่วไป	1. ขยายตัวได้มากเมื่อได้รับความร้อน 2. ไม่ทนสภาพดินฟ้าอากาศ 3. เมื่อแตกหัก ยากต่อการเชื่อมต่อ 4. ติดไฟได้

2.4 สารคงสภาพ (Stabilizers) [12,13]

สารที่นำมาใช้เป็นสารคงสภาพจะมีประสิทธิภาพในการชะลอและช่วยลดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ แม้ว่าจะนำพอลิเมอร์ที่ผสมสารคงสภาพไปผ่านกระบวนการทางกายภาพ (ให้ความร้อนหรือการฉายรังสี) หรือกระบวนการทางเคมีสารคงสภาพเหล่านั้นก็ยังคงอยู่ในพอลิเมอร์

การเสื่อมของสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์เป็นผลที่เกิดขึ้นจากหลายกรณี เช่น เกิดจากสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง (thermo-oxidative) ออกซิเจน รังสีในบรรยากาศ โอโซน น้ำ และจากจุลินทรีย์ การเสื่อมสภาพทำให้เกิดการแตกหักหรือการตัดขาดสายโซ่ (chain scission) ทำให้พอลิเมอร์สูญเสียความแข็งแรงและความเหนียว เกิดพันธะเชื่อมโยง (crosslinking) ทำให้พอลิเมอร์แข็งเปราะและการละลายลดลง เกิดหมุดูดกลืนแสงซึ่งเป็นสาเหตุทำให้พอลิเมอร์มีสี และเกิดหมู่มิซัวในพอลิเมอร์ ทำให้สมบัติการเป็นฉนวนลดลง

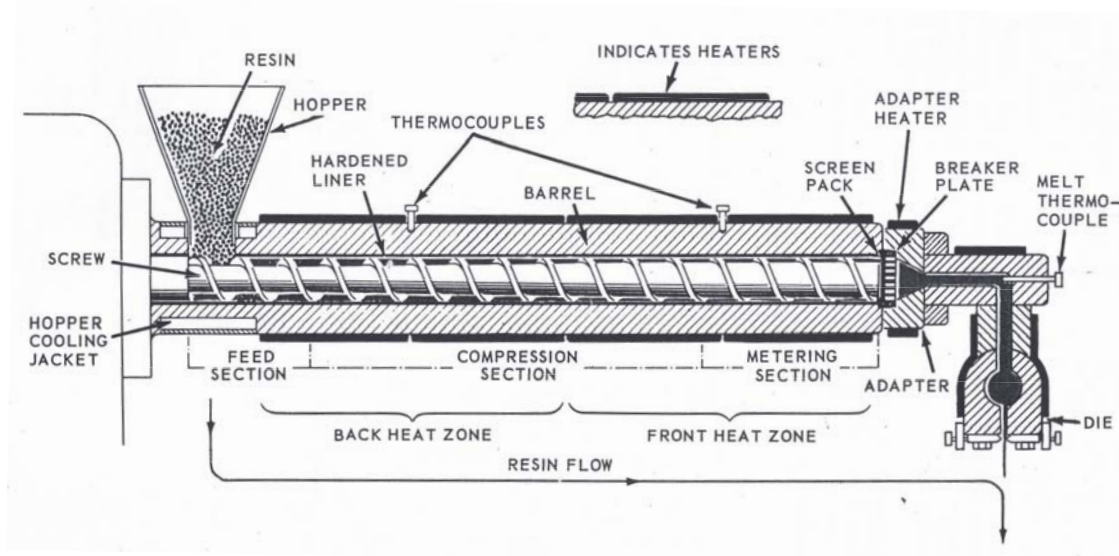
สารคงสภาพส่วนมากจะเป็นสารประกอบอินทรีย์หรือโลหะของสารประกอบอินทรีย์ โดยองค์ประกอบพื้นฐานประกอบด้วย ดีบุก (tin) ตะกั่ว (lead) และสารผสมของโลหะหมู่ 2 (แบเรียม แคลเซียม และ สังกะสี) จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้กับพอลิเมอร์ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ Ca-Zn เป็นสารคงสภาพ

2.5 หลักการของเครื่องมือผสมและการขึ้นรูป

2.5.1 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw extruder) [14]

เครื่องอัดรีดจัดเป็นเครื่องมือที่มีจุดประสงค์หลากหลายในกระบวนการแปรรูปพอลิเมอร์ กล่าวคือ เม็ดพลาสติกที่ถูกป้อนเข้ามาในระหว่างสกรูของเครื่องอัดรีดและกระบอกใส่สกรู (barrel) จะถูกอัด หลอม ผสม เกิดขึ้นในระหว่างที่มีการไหลผ่านไปตามท่อและออกไปทางหัวคาย ทั้งนี้โดยอาศัยความแตกต่างของความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของสกรูและกระบอกใส่สกรูทำให้เกิดพลังงานเฉือน (shearing energy) ช่วยในการผสมและการหลอม ในกรณีของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวอาจทำให้การผสมและการเฉือนเพิ่มขึ้นโดยอาศัยอุปกรณ์เสริมไปติดเพิ่มระหว่างส่วนของเฟืองสกรู (screw flights)

เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวจัดว่ามีความสำคัญอย่างมากในทางอุตสาหกรรม โดยมีลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิต ทั่วไปแบ่งออกได้ 3 ส่วนดังรูปที่ 2.14



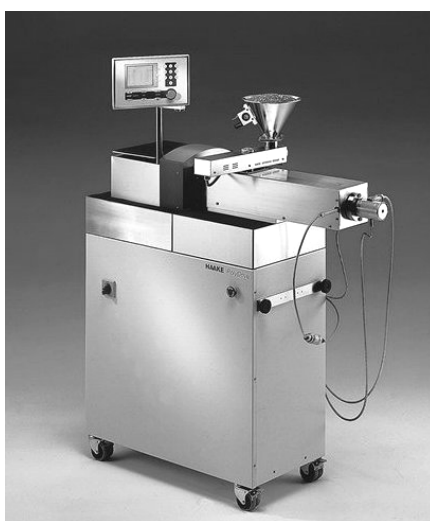
รูปที่ 2.14 รูปทรงทางเรขาคณิตของสกรู [15]

โครงสร้างของสกรูแบบนี้ใช้แทนการทำงานแบบขั้นตอนเดี่ยว (single state) ซึ่งหมายถึงสกรูมีเพียงส่วนของการอัด (compression section) เท่านั้น แม้ว่ารูปทรงทางเรขาคณิตจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนก็ตาม ในส่วนแรก (ใกล้กับทางเปิดให้วัสดุเข้า) จะมีเฟืองค่อนข้างเล็ก โดยวัสดุที่เข้ามายังส่วนนี้จะอยู่ในสถานะของแข็งเรียกส่วนนี้ว่า ส่วนป้อนวัสดุ (feed section) ส่วนท้ายสุด (ใกล้กับคาย) จะมีเฟืองค่อนข้างตื้น โดยวัสดุในส่วนนี้จะอยู่ในสภาวะหลอมเหลวทั้งหมดเรียกส่วนนี้ว่า ส่วนมาตรวัดหรือส่วนปั๊มวัสดุ (metering or compression section) ส่วนที่อยู่ระหว่างส่วนป้อนวัสดุและส่วนปั๊มวัสดุเรียกว่า ส่วนทรานสิชันหรือส่วนอัด (transition or compression section) ส่วนนี้จะทำหน้าที่ในการหลอมวัสดุ

โครงสร้างแบบนี้ความลึกของช่องสกรูจะลดลงแบบเส้นตรงจากส่วนป้อนวัสดุไปยังส่วนมาตรวัดหรือส่วนป้อนวัสดุ ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดการอัดตัวของวัสดุในช่องสกรู ตัวแปรอีกตัวหนึ่งในการออกแบบสกรูที่นับว่ามีความสำคัญคือ อัตราส่วนความยาวของสกรูต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของสกรู (L/D) โดยปกติจะอยู่ในช่วง 20 ถึง 30 แต่ที่นิยมใช้คือ 24 แต่ในเครื่องอัดรีดบางประเภท เช่น เครื่องอัดรีดที่มีช่องระบายอากาศ (vented extruder) จะมีอัตราส่วนนี้สูงถึง 30 ถึง 40

การทำงานพื้นฐานของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว คือ วัสดุเข้ามาทางอุปกรณ์ป้อนวัสดุ (feed hopper) โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงไหลลงมายังส่วนของกระบอกสกรู (extruder barrel) วัสดุบางชนิดป้อนเข้ามาได้ยากจึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์พิเศษช่วยเพื่อป้องกันการติดค้าง (bridging) ของวัสดุ เมื่อวัสดุเข้ามายังกระบอกสกรูจะผ่านไปยังช่องว่างวงแหวนหรือช่องว่างของสกรูเกิดแรงเสียดทานกระทำต่อวัสดุทั้งในส่วนของกระบอกใส่สกรูและพื้นผิวของสกรู แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะพาวัสดุให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าพร้อมกับมีความร้อนจากส่วนของอุปกรณ์ให้ความร้อนที่ติดอยู่ตรงกระบอกใส่สกรู (barrel heater) เป็นตัวช่วยให้ความร้อนสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิของวัสดุเกินจุดหลอมเหลวจะเกิดฟิล์มบางๆ ที่ผิวของกระบอกสกรูซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพพลาสติก (ไม่ใช่บริเวณเดียวกับส่วนที่เกิดการอัด) ทั้งนี้ขึ้นกับรูปทรงเรขาคณิตของเครื่องจักรสมบัติของพอลิเมอร์ และสภาวะการทำงาน

ในขณะที่วัสดุเคลื่อนที่ไปข้างหน้าปริมาณของของแข็งในแต่ละตำแหน่งจะลดลงในขณะที่ปริมาณการหลอมเหลวเพิ่มขึ้น และเมื่อของแข็งหมดไปจะเข้าสู่ปลายบริเวณของการเปลี่ยนสภาพพลาสติกและป้อนเข้าสู่คาย ในขณะที่พอลิเมอร์ไหลผ่านคายจะมีรูปร่างเหมือนกับช่องทางการไหลของคาย ทำให้วัสดุที่ออกจากคายมีรูปร่างสอดคล้องกับภาคตัดขวางของส่วนสุดท้ายของช่องการไหลของคายด้วย



รูปที่ 2.15 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว [16]

2.5.2 เครื่องเป่าฟิล์ม (Blown-film machine) [14]

การเป่าฟิล์มเป็นกระบวนการแปรรูปพลาสติกแบบต่อเนื่องเช่นเดียวกับกระบวนการอัดรีดอื่นๆ การผลิตเริ่มต้นจากการอัดรีดท่อเทอร์โมพลาสติกหลอม ดายที่ใช้เป็นแบบวงแหวนสองชั้น (annular die) โดยทำการอัดรีดในแนวตั้งฉากกับแนวของเครื่องอัดรีด หลังจากนั้นทำการดึงท่อพลาสติกในแนวแกนของการอัดรีด (axial direction) แล้วใช้ลมเป่าท่อในขณะเดียวกัน ทำให้พลาสติกหลอมพองตัวออกในแนวรัศมี (radial direction) เกิดเป็นลูกโป่งที่มีผนังบาง (thin wall bubble) โดยพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่งจะมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวดายหลายเท่า ลูกโป่งที่ร้อนจะถูกหล่อเย็นด้วยลมเป่าที่ผิวด้านนอกของลูกโป่ง โดยมีหัวเป่าเป็นลักษณะวงแหวน (air ring) อยู่ด้านนอกหัวดาย หัวเป่าวงแหวนนี้จะเป็นตัวปรับทิศทางของลมเป่าให้กระทบลูกโป่งในแนวตั้งฉากและทำให้กระแสลมเป่ามีความสม่ำเสมอ ไม่พุ่งออกไปที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง ทำให้การหล่อเย็นมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ลักษณะของเครื่องและกระบวนการเป่าฟิล์มแสดงดังรูปที่ 2.16 ลูกโป่งจะถูกปรับให้มีขนาดที่เหมาะสมและถูกจำกัดอยู่ในส่วนที่ช่วยพองฟิล์ม (sizing basket หรือ calibration unit) หลังจากนั้นรวบรวมลูกโป่งโดยป้อนให้ลูกโป่งเคลื่อนที่ผ่านแผ่นโลหะหุ้มกัมมะหยี่ที่ตีบเข้า (collapsing boards) และป้อนเข้าในช่องว่างของลูกกลิ้งสองตัว (nip roll) ทำให้ลูกโป่งแบนลงเกิดเป็นฟิล์มสองชั้นซ้อนทับกัน หลังจากนั้นทำการดึงฟิล์มโดยใช้หน่วยดึง (haul-off unit) สุดท้ายฟิล์มจะถูกพันเป็นม้วนด้วยตัวม้วนฟิล์ม (winder) แล้วนำไปทำถุงหรือนำไปทำผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ ต่อไป

2.5.2.1 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม

1. เครื่องอัดรีด (extruder) มีหน้าที่หลักในการหลอมเหลวพอลิเมอร์
2. หัวดาย (die) โดยปกติมี 2 ชนิด คือ วงแหวนป้อนเข้าด้านล่าง (annular bottom feed die) และวงแหวนแบบป้อนเข้าด้านข้าง (annular side feed die) รูปที่ 2.17
3. ระบบการหล่อเย็น แบ่งเป็นแบบบังคับด้วยอากาศ (forced air) การทำให้เย็นโดยอาศัยแหล่งความเย็นจากภายในหรือภายนอก (internal or external refrigeration) และการหล่อเย็นด้วยน้ำ (water cooling bath)
4. หอคอยช่วงดึงขึ้น (take-off system) ได้แก่
 - 4.1 ลูกกลิ้งดึง (pull rolls) แบ่งเป็น แบบหลัก (primary type) และแบบรอง (secondary type)
 - 4.2 ระบบการพับฟิล์ม (folding system)
 - 4.3 ระบบม้วนฟิล์ม (wind-up system) แบ่งเป็นแบบระบบขับโดยตรง (direct drive) และระบบขับพื้นผิว (surface drive)

5. อุปกรณ์อื่นๆ

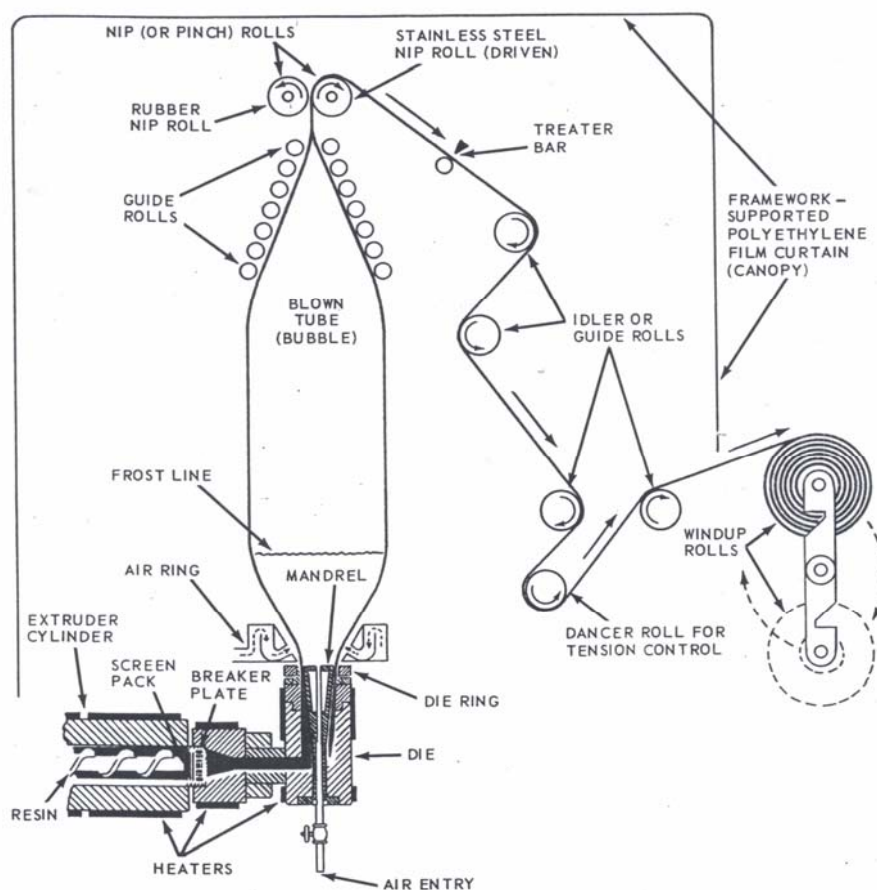
5.1 อุปกรณ์ทั่วไป

- เครื่องวัดความหนาแน่นของแผ่นฟิล์ม (film thickness gauges)
- เครื่องวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (bubble diameter)
- ระบบควบคุมวงจรรปิด (closed loop system)

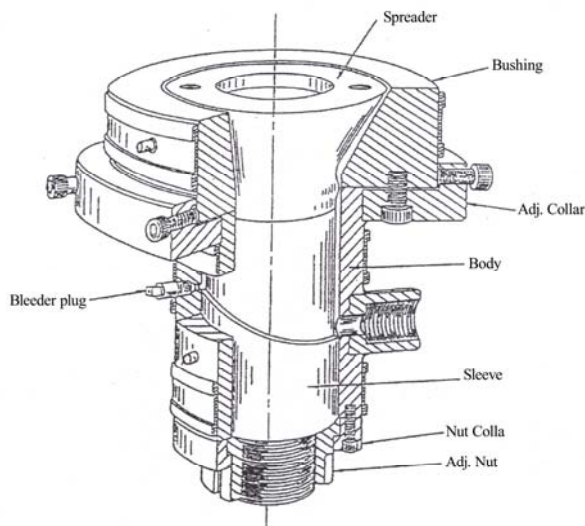
5.2 อุปกรณ์ปรับพื้นผิว

- โคโรนาดีสชาร์จ (corona discharge)
- เปลวไฟก๊าซ (gas flame)

5.3 อุปกรณ์ช่วยเสริม เช่น เครื่องจักรสำหรับทำถุง (bag making machine)



รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม [15]



รูปที่ 2.17 คายวงแหวนแบบป้อนเข้าด้านข้าง [14]

ปัจจัยที่สำคัญต่อการเป่าฟิล์ม เช่น ความเร็วของสกรู อัตราการดึง และขนาดของลูกโป่งที่เหมาะสมกับส่วนพุงฟิล์ม การปิดอากาศที่ใช้เป่าเข้าภายในลูกโป่ง มีการใช้เทอมที่สำคัญในการอธิบายกระบวนการแปรรูปพลาสติกโดยการเป่าฟิล์ม เช่น อัตราการพองตัวของลูกโป่ง (blow-up ratio) และอัตราการดึง (draw-down ratio)

- อัตราการพองตัว (blow-up ratio) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่งกับเส้นผ่านศูนย์กลางของคาย โดยทั่วไปอัตราการพองตัวของลูกโป่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2:1 ถึง 6:1 ซึ่งหมายความว่า คายตัวหนึ่งสามารถทำถุงได้หลายขนาด

- อัตราการดึง (draw-down ratio) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความเร็วของฟิล์มที่ดึงโดยลูกกลิ้ง (หรือ โดยหน่วยดึง) กับความเร็วของการอัดรีด ซึ่งความเร็วของการอัดรีดคำนวณได้จากน้ำหนักของพลาสติกที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลา แปลให้เป็นปริมาตรแล้วค่อนำปริมาตรหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของคาย

วัสดุที่ใช้ในการเป่าฟิล์มเป็นเทอร์โมพลาสติก เช่น พลาสติกในกลุ่มของพอลิโอเลฟินส์ (LDPE, LLDPE, HDPE และ HMW-HDPE) จะเป็นพลาสติกที่นิยมใช้ในกระบวนการเป่าฟิล์ม ในบรรดาพอลิโอเลฟินส์ LDPE เป็นที่นิยมมากที่สุด นอกจากนี้พลาสติกอื่นๆ ที่ใช้ในการเป่าฟิล์ม เช่น ไนลอน พอลิคาร์บอเนต พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิพอฟิลีน และ PET

เทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในการเป่าฟิล์มต้องมีค่าความหนืดสูง และมีค่าดัชนีการไหลต่ำกว่าว่า วัสดุที่ใช้ในการผลิตฟิล์มโดยกระบวนการอัดรีดแบบธรรมดา ตัวอย่างกรณี LDPE ที่ใช้ในการเป่าฟิล์ม มีค่าดัชนีการไหลอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1.0 กรัม / 10 นาที (ทำการทดสอบตัวอย่างที่ 190 °C และใช้น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม) ในขณะที่ LDPE ที่ใช้ในการผลิตฟิล์มโดยกระบวนการอัดรีดแบบธรรมดามีค่าดัชนีการไหลอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 0.6 กรัม / 10 นาที

2.5.2.2 หลักการเป่าฟิล์ม

ฟิล์มเป่ามีความหนาน้อยกว่า 0.020 นิ้ว (0.050 เซนติเมตร) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ทำฟิล์มเป่าประกอบด้วยเครื่องอัดรีดคู่อยู่กับหัวดายประเภทวงแหวน (annular die) ซึ่งโดยปกติจะมีทิศอยู่ในแนวตั้ง การผลิตฟิล์มเป่าแบบท่อ (tubular blown film) จะใช้อากาศและแรงดึงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยอากาศที่อยู่ภายในจะช่วยทำให้เกิดฟองอากาศขนาดใหญ่ และมีส่วนของลูกกลิ้งที่ช่วยรวบฟิล์ม (collapsing guide and nip) อยู่ทางด้านบน โดยฟิล์มจะขยายตัวออกประมาณ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเดิมตามแนวรอบ และขณะเดียวกันจะถูกดึงขึ้นในทิศทางตั้งฉาก ผลที่ได้ทำให้เกิดการจัดเรียงตัว 2 ทิศทาง (biaxial orientation) เกิดการตกผลึก (crystallization) และการแข็งตัว (freeze) อยู่ในทิศทางการจัดเรียงตัวนั้น

ฟิล์มที่เกิดจากการขยายตัวเนื่องจากการเป่ามีกระบวนการเป็นแบบแรงดึง (tensile force) มากกว่าที่จะเป็นแบบแรงเฉือน (shear force) เพราะความเค้นเค้นมีลักษณะการตอบสนองเป็นแบบวิสโคอีลาสติก ทำให้ความหนืดเนื่องจากแรงดึงมีค่าสูง ถ้าความหนืดเนื่องจากแรงดึงไม่ขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด เรียกว่า เทราโตเนียน (troutonian) ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมความเค้นเค้นในนิวโตเนียน แต่ถ้าความหนืดเนื่องจากแรงดึงขึ้นกับอัตราความเครียดจะเรียกว่า นอนเทราโตเนียน (non-troutonian) (พอลิเมอร์หลอมเหลวส่วนใหญ่จะเป็นแบบเทราโตเนียน) ซึ่งแบ่งออกเป็นการทำให้แข็งเนื่องจากแรงดึง (tension stiffening) และการทำให้บางเนื่องจากแรงดึง (tension thinning) เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแบบกึ่งและการตอบสนองแบบอีลาสติกจะเป็นการทำให้แข็งเนื่องจากแรงดึง ในขณะที่พอลิโพรพิลีนแบบเส้นตรง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิพรอพิลีน เป็นการทำให้บางเนื่องจากการดึง เป็นต้น

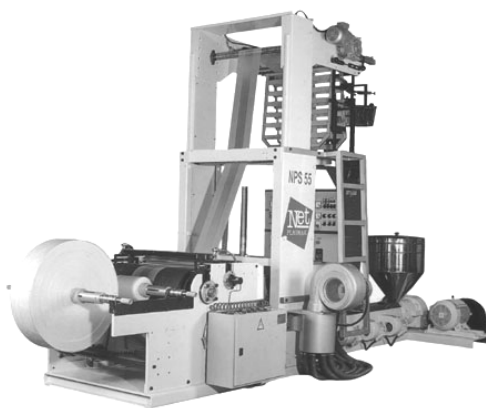
เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวออกจากดายและค่อยๆ บางลง ความเค้นจะมากขึ้นและถ้าวัสดุยังไม่แข็งพอจะเกิดความเครียดต่อไปเรื่อยๆ จนเกิดการแตกของฟิล์มในที่สุด อย่างไรก็ตามการทำให้แข็งเนื่องจากแรงดึงทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นหรือมีการตอบสนองแบบอีลาสติกมากพอที่จะชะลอการเพิ่มขึ้นของความเค้นทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น อัตราการตกผลึก (crystallization rate) เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อเสถียรภาพกล่าวคือ การผลิตฟิล์มโดยวิธีนี้จะมีลักษณะที่เรียกว่า แนวเส้นแข็งตัว (frost line หรือ freeze line) เกิดขึ้นตามทางที่เกิดฟอง ซึ่งเป็นบริเวณที่พอลิเมอร์เกิดการตกผลึกทำให้ความใส (transparent) ลดน้อยลง อิทธิพลของแนวเส้นแข็งตัวนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดการดึงและทำให้เกิดการแข็งตัวขึ้น ด้วยเหตุนี้อัตราการตกผลึกจึงไม่ควรสูงเกินไปจนทำให้ไม่เกิดการจัดเรียงตัวในสองทิศทาง

2.5.2.3 สมบัติของฟิล์มเป่า

สมบัติของฟิล์มเป่า ได้แก่ ความแข็งแรงต่อการฉีกขาด(ทั้งในทิศทางตามเครื่องจักร และทิศทางตามขวางเครื่องจักร โดยใช้วิธีการทดสอบของ เอลเมนดอร์ฟ (Elmendorf)), ความทนทานต่อแรงกระแทก ความใส ความเงาของผิว ความแข็งแรงดึง (ทั้งในทิศทางตามเครื่องจักร และทิศทางตามขวางเครื่องจักร) เปอร์เซ็นต์การยืด ความหนา การจัดเรียงตัว และเปอร์เซ็นต์ความ เป็นผลึก เป็นต้น ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อสมบัติเหล่านี้ ได้แก่ อุณหภูมิการหลอมเหลว ความหนา ของฟิล์ม ความสม่ำเสมอของความหนาแผ่นฟิล์ม อัตราส่วนการดึง อัตราส่วนการเป่า ความสูงของ แนวเส้นแข็งตัว (frost line height) และความสม่ำเสมอของความดันซึ่งช่วยลดหรือจำกัดการเกิด เป็นคลื่น (surging)

ความหนาของฟิล์มขึ้นอยู่กับช่องว่างของคาน อุณหภูมิของการหลอมเหลว อัตราส่วนการ เป่า และอัตราการดึง ส่วนความสูงของแนวเส้นแข็งตัว คือ ระยะทางเหนือคานที่เกิดความขุ่น ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับการเกิดการตกผลึกในขณะที่ยังหลอมเหลวเย็นตัวลง จัดเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมาก ต่อความหนาของฟิล์ม พบว่าถ้าเพิ่มความสูงของแนวเส้นแข็งตัว เปอร์เซ็นต์ของความขุ่นจะเพิ่มขึ้น ความเงาของผิวจะเพิ่มขึ้น แต่ความใสจะลดลง ความไม่สมบูรณ์ของผิวลดลงและความแข็งแรงต่อ แรงกระแทกลดลง นอกจากนี้พบว่าความสูงของแนวเส้นแข็งตัวยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการ หลอมเหลวและอัตราการอัดรีดด้วย โดยตัวแปรทั้งสองเมื่อเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความสูงของแนวเส้น แข็งตัวจะเพิ่มสูงขึ้นด้วย

อัตราส่วนการเป่าจะมีผลต่อความแข็งแรงต่อการดึง โดยจะเพิ่มขึ้นในทิศทางตามขวาง เครื่องจักรและลดลงในทิศทางตามเครื่องจักร แต่จะมีผลตรงข้ามต่อความแข็งแรงต่อการฉีกขาด นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนการเป่าที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนการดึงที่เพิ่มขึ้นจะให้ผลตรงข้ามกัน



รูปที่ 2.18 เครื่องเป่าฟิล์ม (Blown film machine) [17]

2.6 หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์

2.6.1 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนอินฟราเรด (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) [18]

รังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีเลขคลื่นยาวกว่าแสงวิสิเบิล (visible) รังสีอินฟราเรดนี้แบ่งได้เป็น 3 ช่วงคือ

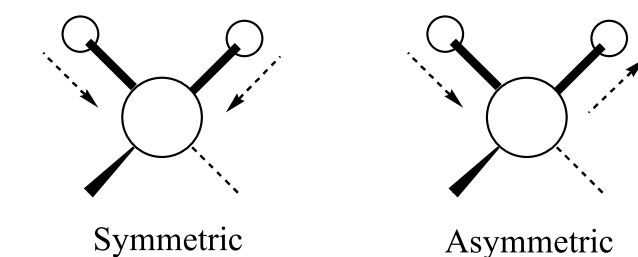
- อินฟราเรดย่านใกล้ (near IR) แถบการดูดกลืนแสงของโมเลกุลในย่านนี้ส่วนใหญ่เกิดจากโอเวอร์โทน ซึ่งจะเริ่มตั้งแต่ 0.8-2.5 ไมโครเมตร (μm) ($12500-4000\text{ cm}^{-1}$)

- อินฟราเรดย่านกลาง (middle IR) แถบการดูดกลืนแสงอยู่ระหว่าง 2.5-50 ไมโครเมตร (μm) ($4000-200\text{ cm}^{-1}$) ใช้ศึกษาคุณภาพวิเคราะห์และปริมาณวิเคราะห์ ในช่วงนี้จะแบ่งเป็นช่วงกลุ่มความถี่ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการดูดกลืนแสงของหมู่ฟังก์ชันและช่วงลายพิมพ์นิ้วมือที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของโมเลกุล

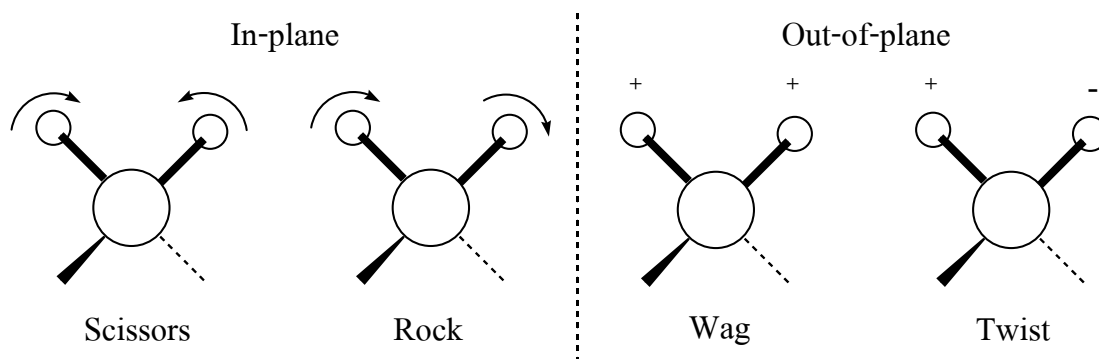
- อินฟราเรดย่านไกล (far IR) แถบการดูดกลืนแสงอยู่ระหว่าง 50-1000 ไมโครเมตร (μm) ($200-10\text{ cm}^{-1}$) จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับการหมุนของโมเลกุล เนื่องจากพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการทรานซิชันมีระดับพลังงานค่อนข้างต่ำ

เมื่อพิจารณาโมเลกุลของสารโดยทั่วไปจะประกอบด้วยอะตอมที่ยึดเกาะกันด้วยพันธะเคมี เมื่อโมเลกุลได้รับรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ตรงกับการสั่นของโมเลกุล จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์โมเลกุลนั้นสามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ เรียกว่า IR active แต่ถ้าการสั่นนั้นไม่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์จะไม่เกิดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เรียกว่า IR inactive

การสั่นของโมเลกุลแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ การยืด (stretching) และการโค้งงอ (bending หรือ deformation) แสดงดังรูปที่ 2.19 และ 2.20 ตามลำดับ โมเลกุลที่มีอะตอมที่เหมือนกัน เช่น โมเลกุลไนโตรเจน (N_2) จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ขณะสั่น โดยโมเลกุลที่ประกอบด้วย n อะตอม มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงจะมีรูปแบบการสั่นเท่ากับ $3n-5$ แบบ ส่วนโมเลกุลที่ไม่เป็นเส้นตรงจะมีรูปแบบการสั่นเท่ากับ $3n-6$ แบบ

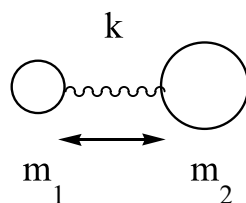


รูปที่ 2.19 การสั่นของโมเลกุลแบบการยืด (stretching) [19]



รูปที่ 2.20 การสั่นของโมเลกุลแบบการโค้งงอ (bending) [19]

พิจารณาการสั่นแบบยี่ดระหว่างอะตอม 2 อะตอม ที่ยึดกันด้วยพันธะเคมี ถ้าสมมติว่ามวลของอะตอมทั้งสองต่อกับขาด้วยสปริงแล้วมีการแกว่งแบบฮาร์โมนิกอย่างง่าย (simple harmonic oscillation) สามารถคำนวณค่าของความถี่ได้จาก



$$\nu = \frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{k}{\mu}}$$

เมื่อ ν คือ ความถี่ของการสั่น (cm^{-1})

k คือ ค่าคงที่ของแรง

c คือ ความเร็วของแสง

μ คือ reduce mass (kg)

โดยที่

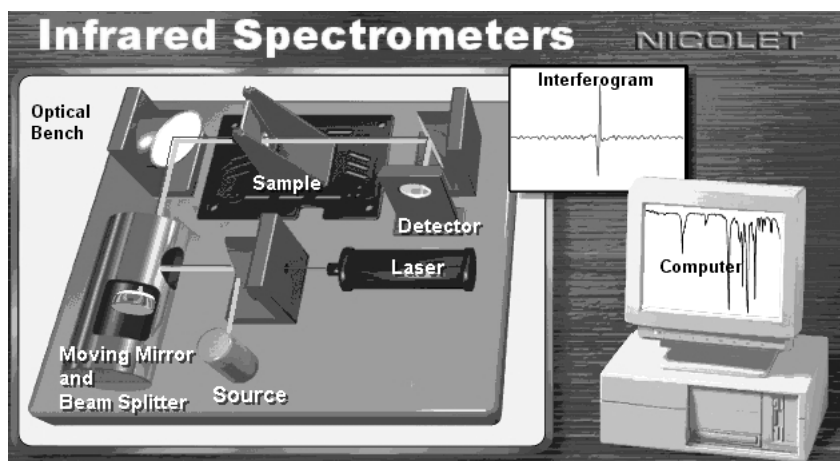
$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

เมื่อ m_1, m_2 คือ มวลของแต่ละอะตอม

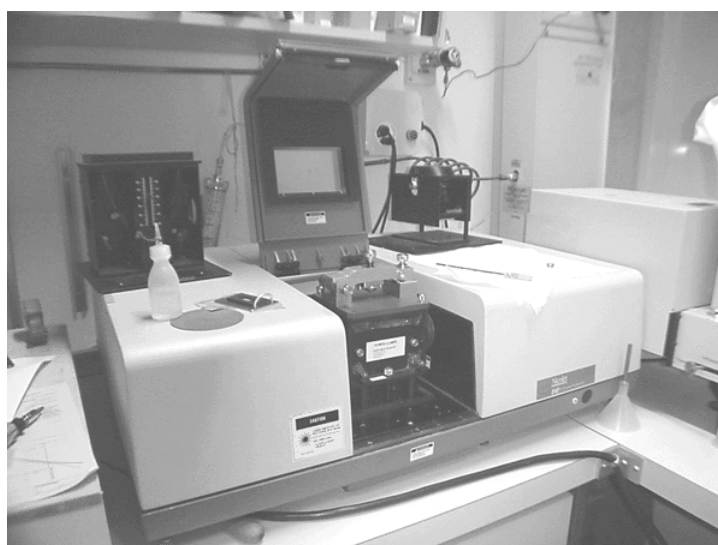
ค่าคงที่ของแรงของพันธะสามจะมากกว่าพันธะสองและมากกว่าพันธะเดี่ยว ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่าความถี่ของการยี่ดระหว่างอะตอมคู่หนึ่งได้

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง IR spectrometer มีดังรูปที่ 2.21

1. แหล่งกำเนิดแสง (radiation source) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการให้ความร้อนแก่โลหะแล้วปล่อยรังสีอินฟราเรดออกมา
2. ส่วนบรรจุสารตัวอย่าง (sample containers) ถ้าเป็นของแข็งจะทำได้หลายวิธี เช่น บดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ แล้วอัดให้เป็นเม็ดหรือทำให้เป็นแผ่นบาง เป็นต้น ถ้าเป็นของเหลวจะบรรจุในเซลล์หรือหยดลงบนผลึกของโซเดียมคลอไรด์ แล้วนำอีกแผ่นมาประกบก่อนนำไปตรวจวัด
3. ส่วนควบคุมเลขคลื่น (wavelength selector) ใช้แยกคลื่นแสงที่ต้องการ
4. เครื่องตรวจวัดสัญญาณ (detector)
5. เครื่องแปรสัญญาณและรายงานผล (signal processor and readout devices)



รูปที่ 2.21 ส่วนประกอบของเครื่อง IR spectrometer [20]



รูปที่ 2.22 Fourier transform infrared spectrometer (FTIR)

2.6.2 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA) [21]

การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางความร้อน (thermogravimetric analysis, TGA) เป็นเทคนิคของการวิเคราะห์โดยอาศัยหลักความร้อน (thermal analysis) นำมาใช้ประโยชน์มาก โดยเฉพาะการหาความทนทานต่อความร้อน (thermal stability) และหาองค์ประกอบทางเคมีของสารตัวอย่าง

เครื่อง TGA (thermogravimetric analyzer) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดน้ำหนักของสารที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อนเทียบกับเวลาหรืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

ถ้าทราบปฏิกิริยาการสลายตัวของสาร จะสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของสารที่สูญเสียไป (% weight loss) ได้ ซึ่งจะตรงกับค่าที่อ่านได้จากเทอร์โมแกรม ดังนั้นสามารถคำนวณหามวลโมเลกุลของสารที่สูญหายไปได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{มวลโมเลกุลของสารที่สูญหายไป} = \frac{\% X}{100} \times MW_s$$

เมื่อ % X คือ % น้ำหนักของสารที่สูญเสียไป (% weight loss)

MW_s คือ มวลโมเลกุลของสารตัวอย่าง

นั่นคือผลจากเทอร์โมแกรมทำให้ทราบปฏิกิริยาการสลายตัวของสาร ความสามารถในการทนทานต่อความร้อน องค์ประกอบหรือสิ่งเจือปนต่างๆ ที่มีอยู่ในสารนั้นได้ และสามารถคำนวณหาปริมาณหรือร้อยละของสารที่เป็นองค์ประกอบหรือสิ่งที่เจือปนอยู่ได้จากสมการดังต่อไปนี้

ให้ A เป็นองค์ประกอบชนิดหนึ่งในสารผสม

$$\% W_{AM} = \frac{\% W_M}{\% W_A}$$

เมื่อ $\%W_{AM}$ คือ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักขององค์ประกอบ A

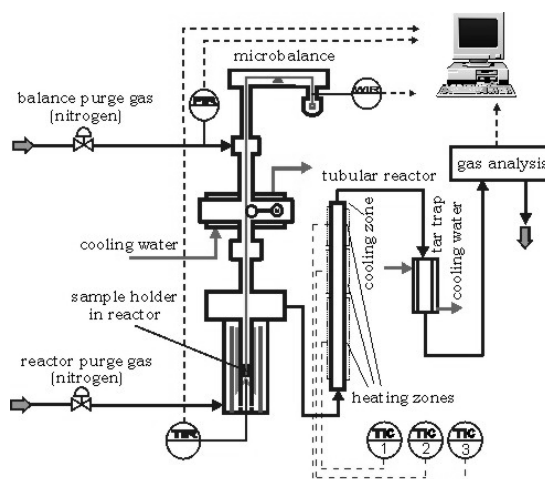
$\%W_M$ คือ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของสารผสมที่เปลี่ยนแปลง

$\%W_A$ คือ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของสาร A บริสุทธิ์ที่เปลี่ยนแปลง

การใช้เครื่อง TGA เพื่อการวิเคราะห์ทดสอบมีอยู่ 2 ประการดังนี้

1. ใช้เพื่อศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของปฏิกิริยาทางจลนพลศาสตร์ เช่นปฏิกิริยาการสลายตัว ปฏิกิริยาการระเหิดกลายเป็นไอ และปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน
2. ใช้ในการศึกษาหาปริมาณของส่วนประกอบต่างๆ ในของผสม เช่นปริมาณสารเติมแต่งในพอลิเมอร์ รวมทั้งพอลิเมอร์ผสม

โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ TGA หาเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 2.23 ส่วนประกอบของเครื่อง TGA [22]

เครื่อง TGA ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนดังนี้

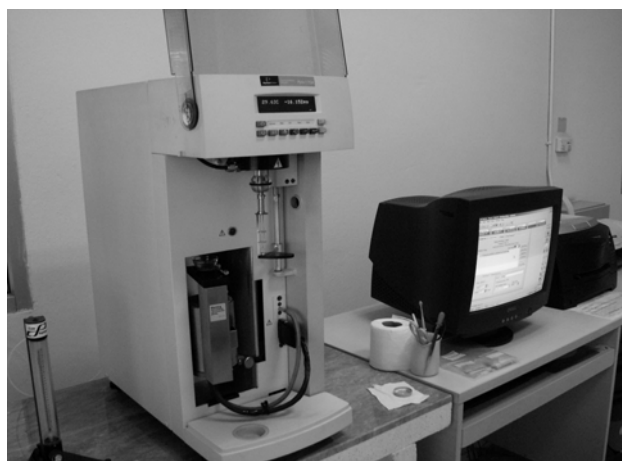
1. ส่วนของเครื่อง TGA ซึ่งประกอบด้วย ระบบที่ให้ความร้อนแก่สารตัวอย่าง ภาชนะสำหรับใส่สารตัวอย่างทำด้วยแพลทินัม เครื่องตรวจวัดความร้อน และเครื่องชั่งน้ำหนัก

2. ส่วนควบคุมหรือโปรแกรมอุณหภูมิพร้อมจอแสดงผล ส่วนนี้จะเชื่อมต่อกับส่วนที่ 1 อุณหภูมิหรือความร้อนที่เตาได้รับจะถูกควบคุมด้วยการโปรแกรมอุณหภูมิโดยทั่วไปทำได้ 2 แบบ คือ

- Isothermal program เป็นการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นด้วยอัตราส่วนคงที่ตลอด เช่น $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ วิธีนี้ใช้ศึกษาความทนทานต่อความร้อน หรือความทนทานต่อการออกซิไดซ์ของสาร

- Multi-state temperature program เป็นการโปรแกรมให้ความร้อนเป็นช่วงๆ

3. ส่วนบันทึกข้อมูลหรือแสดงผล เป็นตัวบันทึกน้ำหนักของสารเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิโดยแกน x เป็นอุณหภูมิและแกน y เป็นร้อยละโดยน้ำหนักของสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.24 Thermogravimetric analyzer

2.6.3 การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope, SEM) [23,24]

การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดโดยอาศัยหลักการใช้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ผ่านชุดคอนเด็นเซอร์เลนส์เพื่อปรับลำอิเล็กตรอนให้วิ่งลงสู่เลนส์วัตถุที่ทำหน้าที่ปรับจุดโฟกัสบนผิวชิ้นงาน และใช้ชุดขดลวดควบคุมการส่องกวาด (scanning coil) ในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวชิ้นงาน แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเพื่อแปลงเป็นสัญญาณภาพ

เมื่อลำอิเล็กตรอนกระทบกับตัวอย่างจะมีสัญญาณที่สำคัญเกิดขึ้น 3 สัญญาณ คือ

1. การกระเจิงกลับของอิเล็กตรอน (backscattered electron, BSE) เป็นผลมาจากแรงกระทำทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กตรอนอิสระในลำอิเล็กตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวอย่างที่มีประจุบวกแล้วกระเจิงออกจากพื้นผิวของชิ้นงาน โดยอิเล็กตรอนที่ออกมาจะมีพลังงานสูง
2. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron, SE) อิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิดขึ้นจากอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงใน (inner shell) ของอะตอมตัวอย่าง อิเล็กตรอนชนิดนี้จะคายออกมาจากตัวอย่างและมีพลังงานต่ำ
3. รังสีเอ็กซ์ (x-ray) เกิดจากการขาดหายไปของอิเล็กตรอนในวงในของอะตอมตัวอย่างหลุดหายไป ทำให้อะตอมที่อยู่บนนอกซึ่งมีพลังงานสูงกว่าเข้ามาแทนที่แล้วคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปรังสีเอ็กซ์

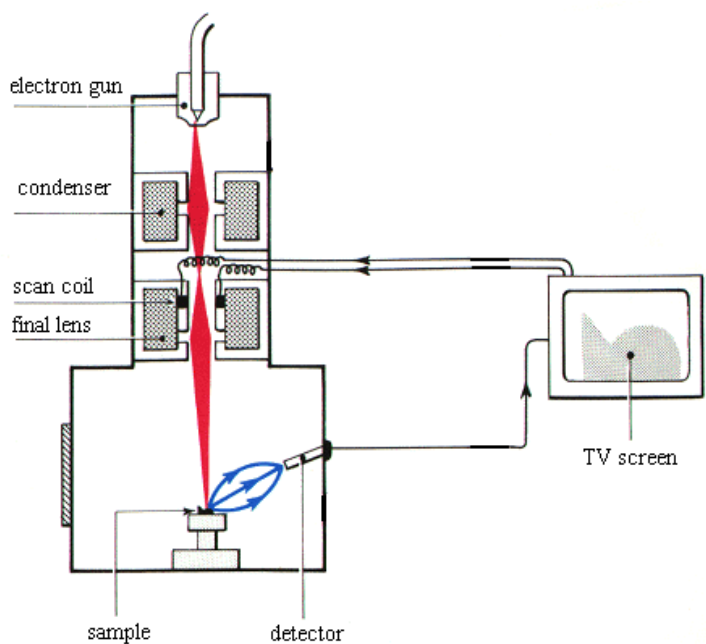
สัญญาณทั้งหมดจะเกิดขึ้นพร้อมกัน ดังนั้นการตรวจวัดจะขึ้นอยู่กับเครื่องมือตรวจวัด (detector) ที่ใช้



รูปที่ 2.25 Scanning electron microscope (SEM)

ส่วนประกอบที่สำคัญของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ดังรูปที่ 2.26

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปจะเป็นหลอดทั้งสแตนที่ถูกทำให้ร้อน (heated tungsten filament) หรืออาจใช้แลนทานัม เฮกซะโบรไรด์ (lanthanum hexaboride, LaB_6) โดยจะต้องให้ลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานเพียงค่าเดียว
2. ชุดคอนเด็นเซอร์เลนส์ (condenser lens) ใช้เพื่อปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดตามต้องการ
3. ชุดขดลวดควบคุมการส่องกวาด (scanning coil) ใช้ควบคุมตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดที่ละตำแหน่งจนกระทั่งได้ข้อมูลทั้งภาพ
4. เครื่องตรวจวัด (detector) ใช้ตรวจวัดสัญญาณที่เกิดขึ้น สามารถใช้ได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับความต้องการในการตรวจวัด เช่น secondary electron detector จะใช้ในการตรวจวัดสัญญาณที่เป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งมีพลังงานต่ำ โดยเรียกสัญญาณภาพที่เกิดขึ้นว่า secondary electron detector (SEI)
5. จอแสดงภาพ (cathode ray tube) จะเป็นอุปกรณ์ที่แสดงภาพที่ได้จากเครื่องมือวัด



รูปที่ 2.26 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด [25]

2.6.4 การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry : GC-MS) [26,27]

เป็นวิธีที่สามารถทำนายชนิดขององค์ประกอบที่สามารถระเหยได้ (Volatile organic compounds : VOCs) ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้อย่างค่อนข้างแม่นยำ โดยอาศัยการเปรียบเทียบเลขมวล (Mass number) ที่เป็นลักษณะเฉพาะของสารตัวอย่างนั้นๆ กับข้อมูลที่มีอยู่ในฐานข้อมูลอ้างอิง นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณ (Quantitative analysis) และเชิงคุณภาพ (Qualitative analysis)

ในกรณีที่สารตัวอย่างเป็นสารละลายจะถูกฉีดเข้าสู่เครื่องและระเหยเป็นไอก่อนที่จะเข้าสู่ Column แต่ในกรณีที่สารตัวอย่างเป็นของแข็งไม่สามารถฉีดเข้าเครื่อง GC-MS ได้โดยตรงจึงต้องใช้อุปกรณ์ช่วยในการตรวจวิเคราะห์คือ headspace-solid-phase microextraction (HS-SPME) ซึ่งอุปกรณ์นี้จะช่วยดูดซับความเข้มข้นของสารละลายที่ระเหยออกมาจากสารตัวอย่างแล้วนำไปฉีดเข้าสู่เครื่อง GC-MS เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารที่ระเหยออกมา ในงานวิจัยนี้ใช้ HS-SPME ชนิด 50/30 μm divinylbenzene-carboxen /poly(dimethylsiloxane) fibre (DVB-CAR/PDMS)

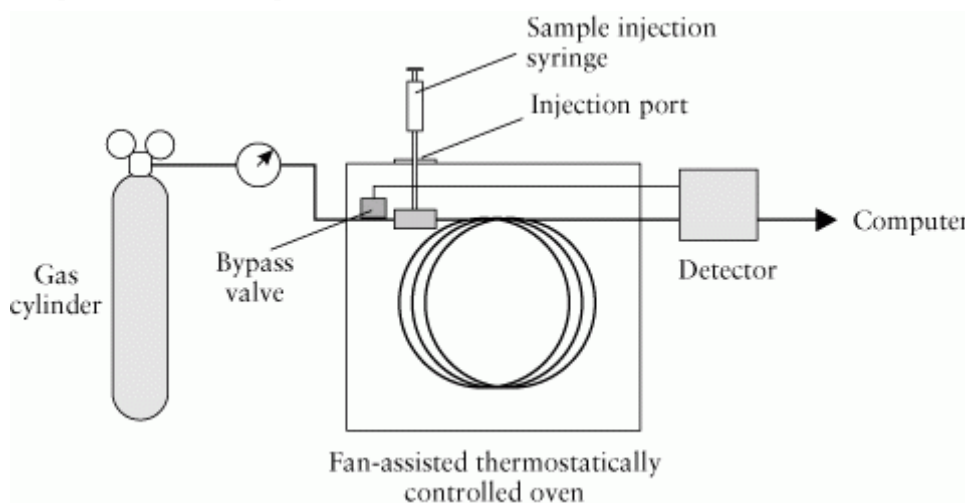
GC-MS ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของเครื่อง Gas chromatography (GC) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการแยกองค์ประกอบของสารที่มีอยู่ในตัวอย่างให้ออกมาทีละองค์ประกอบก่อนที่จะเข้าสู่ detector และส่วนของเครื่อง Mass spectrometer (MS) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็น detector ในการตรวจสอบว่าองค์ประกอบต่างๆ ที่ผ่านออกมาจากเครื่อง GC นั้น มีเลขมวล (mass number) เป็นเท่าไร เพื่อที่จะได้สามารถทำนายได้ว่า สารที่สนใจอยู่นั้นประกอบด้วยองค์ประกอบชนิดใดบ้าง และมีปริมาณเท่าไร



รูปที่ 2.27 เครื่อง Gas Chromatography-Mass Spectrometry [26]

1) Gas Chromatograph (GC)

ทำหน้าที่ในการแยกองค์ประกอบของสารที่สามารถระเหยกลายเป็นไอ (Volatile organic compounds : VOCs) ได้เมื่อถูกความร้อน กลไกที่ใช้ในการแยกองค์ประกอบต่างๆ ในสารตัวอย่างอาศัยหลักของความชอบที่แตกต่างกันขององค์ประกอบในตัวอย่างที่มีต่อเฟส 2 เฟส คือ Stationary phase และ Mobile phase



รูปที่ 2.28 ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่อง GC [26]

องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง GC สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ดังรูปที่ 2.28

1. Injector คือ ส่วนที่สารตัวอย่างจะถูกฉีดเข้าสู่เครื่องและระเหยเป็นไวก่อนที่จะเข้าสู่ Column อุณหภูมิที่เหมาะสมของ injector ควรเป็นอุณหภูมิที่สูงพอที่จะทำให้สารตัวอย่างสามารถระเหยได้แต่ต้องไม่ทำให้สารสลายตัว ตัวอย่างของ injector ได้แก่ Split, Splitless, On column

2. Oven คือ ส่วนที่ใช้สำหรับบรรจุ Column และเป็นส่วนที่ควบคุมอุณหภูมิของ Column ให้เปลี่ยนไปตามความเหมาะสมกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิของ Oven นั้นมี 2 แบบ คือ

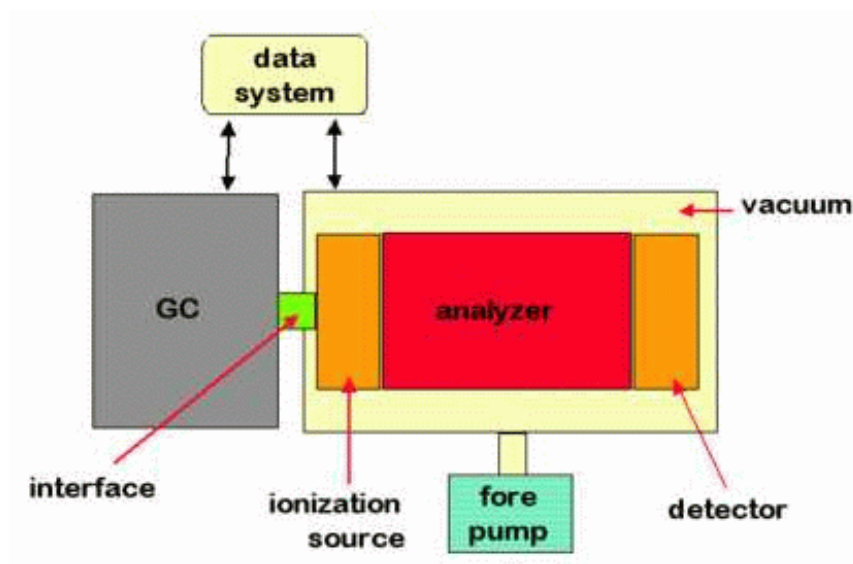
2.1) Isocratic Temperature

2.2) Gradient Temperature ข้อดีของการทำ Gradient temperature คือสามารถใช้กับสารตัวอย่างที่มีจุดเดือดกว้าง (Wide boiling range) และยังช่วยลดเวลาในการวิเคราะห์

3. Detector คือส่วนที่จะใช้สำหรับตรวจวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและดูว่าสารตัวอย่างชนิดที่เราสนใจมีปริมาณอยู่เท่าใด

2) Mass Spectrometer (MS)

เป็น Detector ที่ใช้ตรวจวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างโดยอาศัยกลไก คือ โมเลกุลขององค์ประกอบที่ถูกแยกออกมาจากสารตัวอย่างโดยเครื่อง GC จะถูกไอออไนซ์ในสถานะสุญญากาศแล้วตรวจวัดออกมาเป็นเลขมวล (Mass number) เทียบกับฐานข้อมูลอ้างอิง แล้วแปลผลออกมาเป็นชื่อขององค์ประกอบนั้นๆ



รูปที่ 2.29 ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่อง MS [26]

องค์ประกอบสำคัญของ MS แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังรูปที่ 2.29

1. Ionization Source แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

Electron Ionization (EI) เป็นการทำให้สารเกิด Fragment โดยใช้ลำอิเล็กตรอน ซึ่ง Ionization chamber ต้องมีความดันต่ำประมาณ 8-10 Torr โดยอิเล็กตรอนจาก Filament ที่ร้อนจะถูกโฟกัสผ่านห้องนี้และถูกดึงเข้าหา repeller voltage ที่มีความต่างศักย์ 70 โวลต์ ซึ่งจะให้พลังงานกับอิเล็กตรอนเป็น 70 eV ทำให้ของผสมที่ซับซ้อนของไอออนเกิดการแตกหัก (Fragmentation ion) ที่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างและความอุดมสมบูรณ์ (Relative abundance)

Chemical Ionization (CI) เป็นการทำให้สารเกิดการ Fragment ด้วยวิธีทางเคมีโดยผสมสารตัวอย่าง (ความดัน 4-10 Torr) เข้ากับแก๊สที่ทำปฏิกิริยาด้วย (ความดัน 1 Torr) แล้วผ่านสารผสมเข้าไปใน Ionization chamber โดยการทำให้เกิดการ Fragment ด้วยการชนกับอิเล็กตรอน เช่นเดียวกันแก๊สที่ใช้ได้แก่ Methane, Isobutane, Ammonia

2. Mass Analyzer

เป็นเครื่องวิเคราะห์มวล มีหลายแบบ คือ Magnetic-sector analyzer, Electrostatic analyzer, Time-of-flight analyzer, Ion cyclotron resonance analyzer และ Quadrupole mass spectrometer ใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยสนามแม่เหล็ก คือ เป็น Path-stability mass spectrometer ซึ่งมีแหล่งผลิตไอออน 2 ส่วนโดยส่วนแรกจะทำให้ตัวอย่างกลายเป็นไอออน และส่วนที่ 2 ทำให้สารมาตรฐานกลายเป็นไอออนลำไอออนทั้งสองจะถูกบังคับให้ผ่านเครื่องแยกไอออนชุดเดียวกัน ดังนั้นไอออนทั้งหมดจะได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กในสถานะเดียวกัน แต่ถูกตรวจและวัดด้วยเครื่อง Detector แยกกันซึ่งมีข้อดีคือทำให้สามารถวัดมวลได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

3. Detector

ที่ใช้โดยทั่วไปมีหลายอย่าง คือ Faraday cup detector, Electron multiplier detector, Scintillation counter detector และ Photographic plate detector

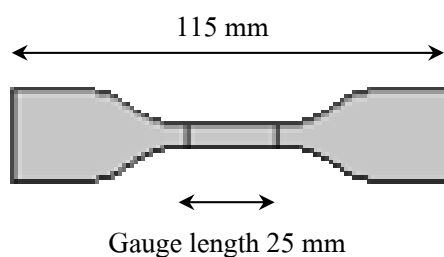
2.6.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

2.6.5.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile tests) [28,29]

ความแข็งแรงดึง (tensile strength) โมดูลัสแรงดึง (tensile modulus) นับเป็นหนึ่งในสมบัติที่สำคัญที่สุดของวัสดุต่างๆ และมีความจำเป็นที่จะต้องทดสอบสำหรับวัสดุพอลิเมอร์ การทดสอบแรงดึง คือการวัดความสามารถของวัสดุหนึ่งที่จะทนทานต่อแรงดึงยึดออกจากกัน ก่อนที่จะเกิดการฉีกขาด แตกหัก หรือเสียสภาพ ค่าโมดูลัสแรงดึงจะเป็นค่าที่บอกถึงความแข็งแรงเปราะ (stiffness) ของวัสดุ สามารถหาได้จากความชันของกราฟความเค้น-ความเครียด (stress-strain curve)

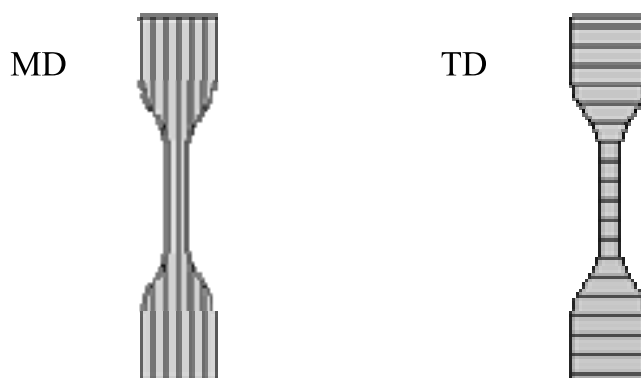
การทดสอบแรงดึงทำได้โดยการยึดชิ้นงานตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐาน โดยใช้ที่จับ (grips) สองชุด ที่จับข้างหนึ่งจะถูกยึดให้อยู่กับที่และอีกข้างหนึ่งจะเคลื่อนที่โดยมีเซลล์วัดแรง (load cells) เป็นตัววัดและควบคุมแรงที่กระทำกับชิ้นงานตัวอย่าง โดยมากแล้วชิ้นงานจะมีรูปร่างคล้าย “ดัมเบลล์” (dump-bell) เพื่อให้ชิ้นงานตัวอย่างเกิดการขาดที่บริเวณตรงกลางของชิ้นงาน ห่างจากบริเวณที่จับ การยึดออกของชิ้นงานพอลิเมอร์สามารถวัดได้จากการวัดระยะห่างระหว่างสองเส้น (gauge marks) บนชิ้นงานตัวอย่างที่ห่างกันเป็นระยะเท่ากับ “ความยาวเกจ” (gauge length) ตามมาตรฐานใช้ความยาวเกจ 20 หรือ 25 มิลลิเมตร สำหรับตัวอย่างขนาดเล็ก ดังรูปที่ 2.30 โดยใช้เครื่องแอ็กเทนโซมิเตอร์ (extensometer) หนีบกับชิ้นงานตัวอย่าง พลาสติกโดยทั่วไปใช้ความเร็วในการดึง 50-100 มิลลิเมตรต่อนาที เนื่องจากอัตราเร็วการดึงมีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมของพอลิเมอร์และผลการทดสอบแรงดึง การใช้อัตราเร็วต่ำเปรียบเสมือนการดึงธรรมดา ในขณะที่การดึงอัตราเร็วสูงเปรียบเสมือนการกระแทกหรือการกระตุกชิ้นงานตัวอย่าง การ

เพิ่มอัตราเร็วในการดึงจะทำให้ความชันของเส้นกราฟความเค้น-ความเครียดเพิ่มขึ้น หรือค่ามอดูลัสที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.30 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึง [30]

เมื่อ MD - Machine Direction และ TD – Transverse Direction



รูปที่ 2.31 ทิศทางการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ [30]

จากแรงดึงที่ใช้และการยืดออกของตัวอย่างสามารถคำนวณค่าสมบัติเชิงกลต่างๆ ดังนี้

- ความเค้นดึง (tensile stress), $\sigma = F / A$
- ความเครียดดึง (tensile strain), $\epsilon = \Delta l / l_0$ ($\Delta l = l - l_0$)
- มอดูลัส (modulus), $E = \text{ความเค้นดึง} / \text{ความเครียดดึง}$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ดึงยึดตัวอย่าง (หน่วยเป็นนิวตัน, N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร, mm^2)

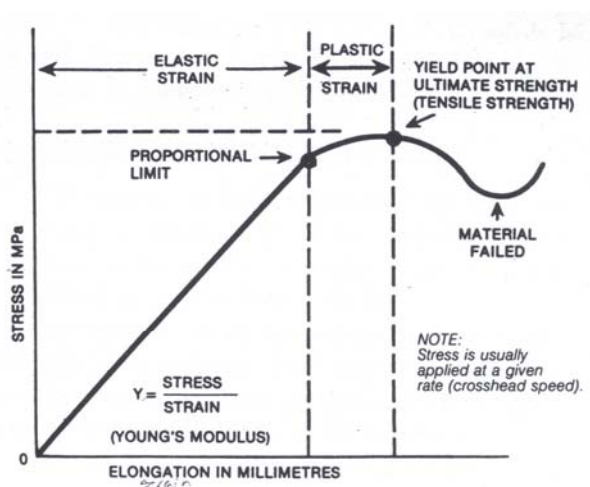
l คือ ระยะห่างระหว่างขีดสองเส้นบนตัวอย่าง (gauge marks) ขณะดึง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร, mm)

l_0 คือ ระยะห่างระหว่างขีดสองเส้นบนตัวอย่างก่อนดึง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร, mm)

เครื่องวัดแรงดึงที่นิยมใช้เรียกว่า เครื่องทดสอบแรงดึง (tensile testing machine) หรือเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) เนื่องจากมีความหลากหลายในการใช้งาน ตัวเครื่องประกอบด้วยส่วนจับตัวอย่าง (grips) สองข้าง ข้างหนึ่งยึดติดอยู่กับที่อีกด้านหนึ่งติดกับส่วนให้แรงที่สามารถเคลื่อนที่ให้แรงดึง (tension) หรือเคลื่อนที่ลงให้แรงกดอัด (compression) ในอัตราเร็ว (crosshead speed) ที่สามารถควบคุมได้ โดยมีเครื่องวัดแรง (load cell) ต่ออยู่ทำหน้าที่วัดแรงที่ใช้ดึงหรือกดอัดตัวอย่าง ส่วนจับตัวอย่างมีหลายชนิดต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับตัวอย่าง สามารถจับตัวอย่างได้ดี ไม่มีการเลื่อนหลุด (slippage) หรือทำให้ตัวอย่างบิดเบี้ยว



รูปที่ 2.32 Universal testing machine

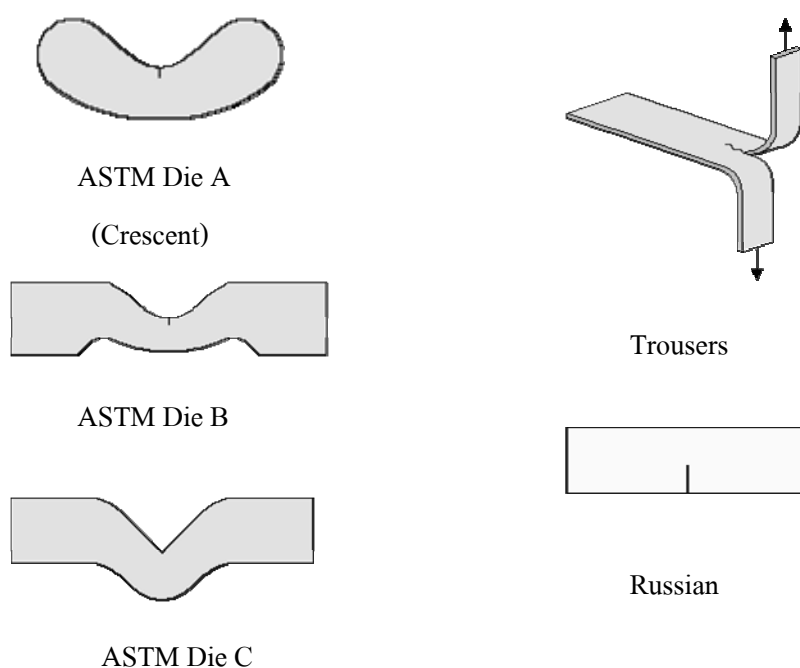


รูปที่ 2.33 กราฟที่ได้จากการทดสอบแรงดึง [31]

ในงานวิจัยนี้ใช้มาตรฐาน ASTM D 882 ในการทดสอบค่าความแข็งแรงดึง (tensile strength) และมอดุลัส (modulus) ของฟิล์มที่มีความอ่อนนุ่ม มีความหนาไม่เกิน 1 มิลลิเมตรและใช้ทดสอบชิ้นงานที่มีค่าความเครียดดึงที่จุดขาด (strain at break) สูงได้ โดยตัดชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลล์ มีความยาวเกจ 25 มิลลิเมตร

2.6.5.2 การทดสอบการฉีกขาด (Tear test) [32]

การทดสอบการฉีกขาดขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ อัตราเร็วการฉีก และอุณหภูมิ ลักษณะตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการฉีกขาดมีหลายลักษณะดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 ลักษณะของตัวอย่างทดสอบการฉีกขาด (Tear specimens) [33]

ตัวอย่างการทดสอบการฉีกขาดตามมาตรฐาน ASTM D 1004 และแบบ Trousers รอยขาดจะตั้งฉากกับทิศทางแรงที่ให้ แต่การทดสอบตัวอย่างแบบ Russian จะขาดตามแนวตรง โดยรายงานผลเป็นแรงที่ใช้ในการฉีกขาดตัวอย่างที่มีความหนาตามกำหนด นิยมเรียกผลที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM ว่า “ความแข็งแรงฉีกขาด” (tear strength) และนิยมเรียกผลที่ได้จากการทดสอบด้วยตัวอย่างแบบ Trousers ว่า “ความต้านทานฉีกขาด” (tear resistance)

ค่าที่ได้จากการทดสอบลักษณะตัวอย่างแบบ Russian ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด รองลงมาคือตัวอย่าง ASTM Die A หรือ B และ ASTM Die C และตัวอย่างแบบ Trousers ให้ค่าความแข็งแรงต่ำสุด ค่าความแข็งแรงลักษณะของแต่ละชนิดต่างกัน ไม่มีความสัมพันธ์กัน และไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้

ในงานวิจัยนี้จะตัดชิ้นงานแบบ ASTM Die C ตามมาตรฐาน ASTM D 1004 ในการทดสอบการฉีกขาด จะทำให้ทราบถึงแรงที่ทำให้ชิ้นงานเริ่มฉีกขาด ซึ่งจะเป็นค่าความเครียดสูงสุด (maximum stress) ของชิ้นงาน

2.6.6 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

2.6.6.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพเป็นวิธีวิเคราะห์ที่ไม่ซับซ้อน โดยจะพิจารณาจากลักษณะภายนอกของพอลิเมอร์ผสมที่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างได้ง่าย เช่น ลักษณะพื้นผิว สี และกลิ่นของพอลิเมอร์ผสม เป็นต้น วิธีการวิเคราะห์อาจใช้วิธีการสังเกตด้วยตาเปล่า อาศัยการใช้มือสัมผัส และใช้การสูดดมทางจมูกเพื่อบอกความแตกต่างของพอลิเมอร์ผสม

2.6.6.2 การตรวจวิเคราะห์ด้วยการชั่งน้ำหนัก

เป็นการตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพที่อาศัยการชั่งน้ำหนักจากเครื่องชั่งที่มีความละเอียดสูง (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปนี้อาจเกิดจากการสลายตัวของสารที่สามารถระเหยได้ในพอลิเมอร์ผสมหรือเกิดจากการดูดความชื้นของพอลิเมอร์ผสมก็เป็นไปได้ การสังเกตน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงนี้อาศัยเวลาในการศึกษาอย่างน้อย 2 – 4 เดือนเพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่ชัดเจน

2.6.6.3 การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (ASTM E 96-95) [35]

การซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงสำหรับอุตสาหกรรมฟิล์มพลาสติกที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ โดยวัดการซึมผ่านได้จากปริมาตรหรือมวลของก๊าซหรือของไอน้ำที่สามารถแทรกผ่านฟิล์มได้ในเวลา 24 ชั่วโมง

อุปกรณ์

1. ถ้วยทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ
2. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
3. ขี้ผึ้งพาราฟิน
4. ซิลิกาเจลอบแห้ง

การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างต้องไม่มีรอยพับ ขูด จีด ร้าว ตัดตัวอย่างฟิล์มเป็นวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 7 เซนติเมตร ก่อนทำการทดสอบต้องเก็บไว้ในสภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (27/65) อย่างน้อย 24 ชั่วโมง

วิธีการทดสอบ

ใส่ซิลิกาเจลอบแห้งลงในถ้วย นำตัวอย่างฟิล์มปิดทับลงบนปากถ้วยผนึกด้วยพาราฟินเหลวเพื่อป้องกันรอยร้าว นำถ้วยทดสอบไปชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด แล้วนำไปเก็บในที่ควบคุมสภาวะ บันทึกการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักทุกๆ 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 8 วัน

การคำนวณ

$$\text{อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR)} = (G/t) / A \quad \text{Unit : g/m}^2 \cdot \text{day}$$

เมื่อ WVTR คือ Water Vapor Transmission Rate

G/t คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่อเวลา (slope)

A คือ พื้นที่ของตัวอย่างที่วัดการซึมผ่าน

$$\text{การซึมผ่านของไอน้ำ (WVP)} = \text{Permeance} \times \text{ความหนาฟิล์ม} \quad \text{Unit : g} \cdot \text{mm/m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{kPa}$$

$$\text{โดยที่ Permeance} = \text{WVTR} / \Delta P = \text{WVTR} / S(R_1 - R_2)$$

เมื่อ WVP คือ Water Vapor Permeability

S คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 25 °C (3.169 kPa หรือ 23.7694 mmHg)

R₁ คือ ความชื้นสัมพัทธ์บรรยากาศห้องทดสอบ = 72%

R₂ คือ ความชื้นสัมพัทธ์บรรยากาศในถ้วยทดสอบ = 0%