

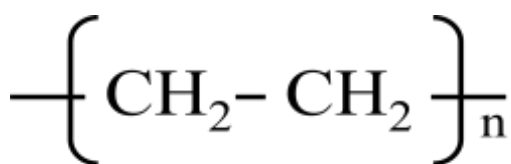
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ในส่วนนี้ได้แสดงสมบัติทั่วไปของวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน พอลิไวนิลคลอไรด์ สารบ่มแข็งเชื้อแบคทีเรียชนิดไตรโคลซาน และสารตัวเติมชนิดแคลเซียมคาร์บอเนต ดังนี้

2.1.1 เทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัย [8]

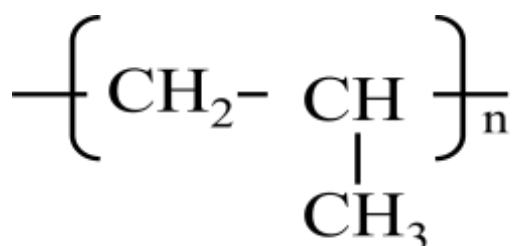
- a) **พอลิเอทิลีน (Polyethylene):** พอลิเอทิลีนนั้นมีโครงสร้างเป็นทั้งแบบเชิงเส้น และแบบกิ่ง ซึ่งควบคุมได้จากการเปลี่ยนแปลงสถานะในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าร่วม โดยพอลิเอทิลีนที่มีโครงสร้างเป็นแบบเชิงเส้นจะมีส่วนที่เป็นผลึกมากกว่าโครงสร้างแบบกิ่ง สำหรับส่วนที่เป็นผลึกนี้ทำให้พอลิเมอร์มีความหนาแน่น จุดหลอมเหลว (Melting Temperature, T_m) และสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่สูงขึ้น รวมถึงช่วยป้องกันการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำได้ดีขึ้น นอกจากนี้พอลิเอทิลีนยังมีความเหนียวต่อสารเคมีค่อนข้างสูง มีความเป็นขี้ดต่ำ โดยจุดอ่อนตัวของพอลิเอทิลีนอยู่ระหว่าง 80-130 องศาเซลเซียส ทำให้สามารถขึ้นรูปด้วยความร้อนได้ง่าย สำหรับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g) ประมาณ -120 องศาเซลเซียส ทำให้ยืดหยุ่นที่อุณหภูมิห้องและทนทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน

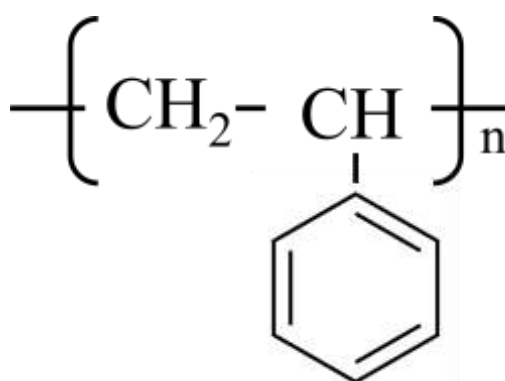
- b) **พอลิโพรพิลีน (Polypropylene):** พอลิโพรพิลีนมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 60,000 ถึง 200,000 เนื่องจากเป็นแบบสายโซ่ตรง จึงมีคุณสมบัติคล้ายพอลิเอทิลีนไม่ว่าจะเป็นสมบัติการบวมตัวเมื่อถูกตัวทำละลายหรือสมบัติทางไฟฟ้า ส่วนสมบัติที่ต่างกันได้แก่ ความหนาแน่นต่ำกว่าคือประมาณ 0.90 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วอยู่ที่ -120 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ที่ 164-170 องศาเซลเซียส (สูงกว่าพอลิเอทิลีน) สมบัติการละลายคล้ายพอลิเอทิลีน คือไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ ที่อุณหภูมิห้อง ยกเว้นเมื่ออุณหภูมิเกิน 80 องศาเซลเซียส

ขึ้นไปจะละลายในไฮโดรคาร์บอน อะโรมาติก และคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอนได้ โครงสร้างทางเคมีของพอลิโพรพิลีนแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิโพรพิลีน

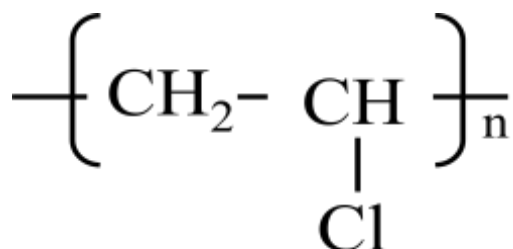
- c) **พอลิสไตรีน (Polystyrene):** โครงสร้างโมเลกุลของพอลิสไตรีน มีวงแหวนเบนซีนซึ่งมีขนาดใหญ่ ทำให้เกิดการขัดขวางการเกิดผลึกและมักจัดเรียงตัวแบบอะแทคติก จึงทำให้พอลิสไตรีน มีความเป็นอสัณฐานมากส่งผลให้การป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้น้อย และมีความใสมาก นอกจากนี้วงแหวนเบนซีนภายในโครงสร้างยังส่งผลให้วัสดุมีความเปราะและความแข็งตึงสูง สำหรับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วอยู่ที่ 74 – 105 องศาเซลเซียส และจุดอ่อนตัวอยู่ที่ 90 – 95 องศาเซลเซียส โครงสร้างทางเคมีของพอลิสไตรีนแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิสไตรีน

- d) **พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride):** จัดเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกต่ำ เนื่องจากการจัดเรียงตัวของมอนอเมอร์ส่วนใหญ่เป็นแบบอะแทคติก จะมีส่วนของซินดิโอแทคติกบ้างเล็กน้อย การมีอะตอมคลอรีนบนโมเลกุลส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูง ทำให้มีความหนาแน่นสูง (1.35 – 1.41 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) และมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูงประมาณ 75 – 105 องศาเซลเซียส จุดอ่อนตัวอยู่ที่ 85 องศาเซลเซียส มีความสามารถป้องกันการซึมผ่านของก๊าซและน้ำมันได้ดีมาก ส่วนการป้องกันการซึมผ่านของน้ำปานกลาง สำหรับการขึ้นรูปพอลิ

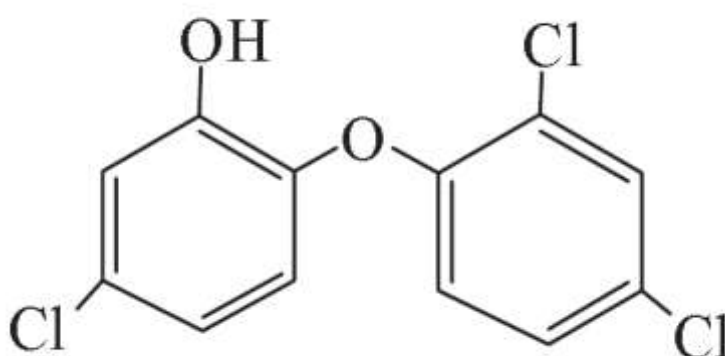
ลิไวนิลคลอไรด์ทำได้ยากเนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวใกล้เคียงกับอุณหภูมิการขึ้นรูป โครงสร้างทางเคมีของพอลิไวนิลคลอไรด์แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิไวนิลคลอไรด์

2.1.2 สารยับยั้งแบคทีเรียที่ใช้ในงานวิจัย

ไตรโคลซาน (Triclosan) มีสูตรโมเลกุลคือ $\text{C}_{12}\text{H}_7\text{Cl}_3\text{O}_2$ เป็นสารที่มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดีแม้ที่ความเข้มข้นต่ำ และมีการใช้อย่างแพร่หลายในอุปกรณ์เพื่อสุขภาพในบ้านเรือน อย่างเช่น สบู่ป้องกันแบคทีเรียและในอุปกรณ์ที่ทำจากพลาสติกทั่วไป การเติมไตรโคลซานลงในผลิตภัณฑ์ส่วนมากขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ซึ่งปกติจะใช้ปริมาณ 100-200 ppm สำหรับงานที่ใช้ในร่มและจะใช้มากขึ้นสำหรับงานที่ใช้กลางแจ้ง โดยทั่วไปไตรโคลซานจะใช้เพื่อป้องกันการเจริญของเชื้อแบคทีเรียแต่ถ้าในกรณีต้องการใช้เพื่อยับยั้งการเจริญเชื้อราด้วยต้องใช้ไตรโคลซานที่ความเข้มข้นมากขึ้น ข้อดีของไตรโคลซานคือมีความเป็นพิษน้อยต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมและข้อเสียคือ สามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 250 องศาเซลเซียส) โครงสร้างทางเคมีของไตรโคลซานแสดงดังรูปที่ 2.5 [9]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของไตรโคลซาน

2.1.3 สารตัวเติมที่ใช้ในงานวิจัย

แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate, CaCO_3) เป็นสารตัวเติมที่มีปริมาณการใช้มากที่สุดทั้งในอุตสาหกรรมพลาสติก ยาง สารเคลือบผิว สิ่งทอ กระดาษ และอุตสาหกรรมอื่นๆ เนื่องจากมีความขาวสูง มีการขัดสีที่ต่ำ แคลเซียมคาร์บอเนตมีด้วยกันหลายเกรดซึ่งมีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ทำให้สามารถนำไปใช้งานต่างๆ ได้อย่างหลากหลาย และที่สำคัญคือหาได้ง่ายและมีราคาถูก แคลเซียมคาร์บอเนตมีอยู่ด้วยกันสองชนิดคือ ชนิดที่ได้จากธรรมชาติและชนิดที่ได้จากการสังเคราะห์ เมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติแล้ว แคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์มีความบริสุทธิ์และความขาวสูงกว่า ขนาดของอนุภาคเล็กกว่าและสามารถผลิตให้มีขนาดของอนุภาคแตกต่างกันได้หลายเกรด ซึ่งจากการมีอนุภาคที่เล็กกว่านี้ ทำให้เมื่อนำไปใช้กับพอลิเมอร์ แคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์จึงทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรง และความทนแรงกระแทกสูงกว่ากรณีที่ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติ นอกจากนี้ ผลิตภัณฑ์ยังมีความเงาที่พื้นผิวสูงด้วย [10]

2.2 บรรจุภัณฑ์พลาสติก

ปัจจุบันนี้มีบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ใช้กันอยู่เป็นร้อยๆ จำพวก และแต่ละจำพวกยังอาจแยกตามน้ำหนักโมเลกุลและความหนาแน่น ตัวอย่างพลาสติกพอลิเอทิลีน สามารถแยกได้ตั้งแต่พอลิเอทิลีนเชิงเส้น ความหนาแน่นต่ำ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง และ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง พลาสติกแต่ละประเภทยังสามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติโดยการทำปฏิกิริยากับพลาสติกอีกตัวให้เกิดพลาสติกใหม่เกิดขึ้น นอกจากนี้กระบวนการผลิตที่แตกต่างกันจะได้พลาสติกที่มีสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น พอลิโพรพิลีน เป็นต้น [11]

- พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE)

พอลิเอทิลีนนับเป็นพลาสติกที่มีการใช้มากที่สุดและราคาถูก การผลิตพอลิเอทิลีนผลิตจากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ของก๊าซเอทิลีน (Ethylene) ภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูงโดยอยู่ในสภาวะปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ (Metal Catalyst) การจับตัวของโมเลกุลในลักษณะโซ่สั้นและยาวจะส่งผลให้พอลิเอทิลีนที่ได้ออกมามีความหนาแน่นแตกต่างกัน พอลิเอทิลีนแบ่งเป็น 3 ประเภทตามความหนาแน่น คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เป็นพลาสติกที่ใช้มากและชื่อสามัญเรียกว่าถุงเย็น มักจะใช้ทำถุงฟิล์มหัดและฟิล์มยืด ขวดน้ำ และฝาขวด เป็นต้น เนื่องจากยืดตัวได้ดี ทนต่อการซึมทะลุและการฉีกขาด พร้อม

ทั้งสามารถใช้ความร้อนเชื่อมติดปิดผนึกได้ดี โครงสร้างของพอลิเอทิลีนสามารถป้องกันความชื้นได้ดีพอสมควรแต่จุดอ่อนของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ คือ สามารถปล่อยให้ไขมันซึมผ่านได้ง่าย แต่ทนต่อกรดและด่างต่างๆ ไป นอกจากนี้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำยังปล่อยให้อากาศซึมผ่านได้ง่ายด้วยเหตุนี้อาหารที่ไวต่ออากาศ เช่น ของขบเคี้ยวและของทอด เมื่อใส่ในถุงเย็นธรรมดา คุณภาพอาหารจะแปรเปลี่ยนไปเพียงเวลาไม่กี่วัน พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำยังมีสมบัติจับฝุ่นในอากาศให้มาเกาะติดตามผิว ทำให้บรรจุภัณฑ์ที่ทำจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเมื่อทิ้งไว้นานๆ จะเปรอะด้วยฝุ่น

พอลิเอทิลีนเชิงเส้นความหนาแน่นต่ำ เป็นการสังเคราะห์ภายใต้สภาวะความดันต่ำ และเริ่มจำหน่ายในตลาดเมื่อปลายปี ค.ศ. 1970 ในปี ค.ศ. 1995 ตลาดโลกของ พอลิเอทิลีนเชิงเส้นความหนาแน่นต่ำ มีมากถึง 10,000 ล้านกิโลกรัม โดยนิยมใช้เป็นชั้นป้องกันความชื้น ด้วยสมบัติที่เหนือกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำธรรมดาส่งผลให้ พอลิเอทิลีนเชิงเส้นความหนาแน่นต่ำ แย่งตลาดของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ แต่จุดอ่อนของ พอลิเอทิลีนเชิงเส้นความหนาแน่นต่ำ คือ ขุ่นกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำจากสมบัติดังกล่าวจึงนิยมผสมเม็ดพลาสติกทั้ง 2 ประเภทเข้าด้วยกัน โดยผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และพอลิเอทิลีนเชิงเส้นความหนาแน่นต่ำ ในอัตราส่วน 50 ต่อ 50

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ประมาณ 1 ใน 5 ของพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนที่ใช้จะเป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และส่วนใหญ่จะเป่าเป็นขวดเนื่องจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีความเหนียวและทนต่อการซึมผ่านได้ดีกว่าพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่างๆ กัน แต่ยังไม่สามารถป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดีนัก จากการใช้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมาแทนที่พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักของขวดสามารถลดลงได้มากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากสามารถเป่าขวดที่มีผิวบางกว่าได้ นอกจากผลิตภัณฑ์ประเภทขวดแล้ว พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงยังสามารถใช้เป่าเป็นฟิล์ม หรือทำเป็นถาดที่ไม่ต้องการความใสมากนัก

ตัวอย่างการใช้งานของพอลิเอทิลีนที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

- ใช้ผลิตเป็นถุงร้อน (พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง) และถุงเย็น (พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ) สำหรับการใช้งานทั่วไปสามารถหาซื้อได้ง่ายในท้องตลาดทั่วไป ข้อสังเกตถุงร้อนที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงจะมีสีขาวขุ่น
- ใช้ห่อหรือบรรจุอาหารได้เกือบทุกชนิดโดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค แต่ไม่ควรใช้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับอาหารร้อน
- นิยมใช้ทำถุงบรรจุนมปิ้ง เนื่องจากพอลิเอทิลีนป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดีจึงช่วยไม่ให้ขนมปิ้งแห้ง เนื่องจากสูญเสียความชื้นออกไป นอกจากนี้ราคาของพอลิเอทิลีนไม่สูงเกินไปเมื่อเทียบกับราคาของขนมปิ้ง

- นิยมใช้ทำถุงบรรจุผักและผลไม้สด เนื่องจากพอลิเอทิลีนยอมให้ก๊าซซึมผ่านได้ดี ทำให้มีก๊าซออกซิเจนซึมผ่านเข้ามาเพียงพอให้พืชหายใจ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่พืชคายออกมาก็สามารถซึมผ่านออกไปได้ง่าย ในบางกรณีจำเป็นต้องเจาะรูที่ถุงเพื่อช่วยระบายไอน้ำที่พืชคายออกมา
- นิยมใช้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเป็นชั้นสำหรับการปิดผนึกด้วยความร้อน เนื่องจากกระดาษและแผ่นพลาสติกชนิดอื่นที่นิยมนำมาใช้เป็นถุงหรือซองอาหาร ไม่สามารถปิดผนึกด้วยความร้อนได้จึงนิยมนำพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมาประกบติดกับวัสดุต่างๆ เหล่านี้ โดยใช้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำอยู่ชั้นในสุด และทำหน้าที่เป็นชั้นสำหรับการปิดผนึกด้วยความร้อน ตัวอย่างการใช้งาน เช่น ซองบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป แผ่นปิดถ้วยโยเกิร์ต กล่องนมยูเอชที เป็นต้น
- फिल्मพอลิเอทิลีนชนิดยืดตัวได้ (Stretch Film) นิยมใช้ห่ออาหารสดพร้อมปรุง เนื้อสด และอาหารทั่วไป รูปแบบที่นิยมใช้คือ การใช้ถาดรองอาหารแล้วห่อหุ้มด้วยฟิล์มยืดตัวได้
- พอลิเอทิลีนไม่นิยมนำมาใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหารที่มีไขมันสูง เช่น เนย ถั่วทอด ขนมขบเคี้ยว

● พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP)

พอลิโพรพิลีนส่วนใหญ่รู้จักกันในนามของถุงร้อน ด้วยสมบัติเด่นของพอลิโพรพิลีนซึ่งมีความใสและป้องกันความชื้นได้ดี มากกว่าครึ่งหนึ่งของพอลิโพรพิลีนจึงนิยมนำมาใช้กันผลิตในรูปของฟิล์ม อย่างไรก็ตาม การป้องกันอากาศซึมผ่านของพอลิโพรพิลีนยังไม่ดีเท่าพลาสติกบางชนิด เนื่องจากช่วงอุณหภูมิในการหลอมละลายมีช่วงอุณหภูมิสั้นทำให้พอลิโพรพิลีนเชื่อมติดได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ฟิล์มประเภท OPP (Oriented polypropylene) ที่มีการจัดเรียงโมเลกุลในทิศทางเดียวกันจะไม่สามารถเชื่อมติดได้เลย สมบัติเด่นอีกประการหนึ่งของพอลิโพรพิลีนคือมีจุดหลอมเหลวสูงทำให้สามารถใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารสำหรับบรรจุอาหารในขณะร้อนได้ (Hot-Fill)

การใช้งานพอลิโพรพิลีนกับผลิตภัณฑ์อาหาร

- ใช้บรรจุอาหารร้อน เช่น ถุงร้อน (ชนิดใส)
- ใช้บรรจุอาหารที่ต้องผ่านความร้อนในการฆ่าเชื้อ โดยที่พอลิโพรพิลีนจะเป็นองค์ประกอบหนึ่งของวัสดุที่ใช้ผลิตของประเภทนี้ ซึ่งนิยมนิยมนำมาใช้เรียกว่า Retort Pouch ซองนี้สามารถใช้แทนกระป๋องโลหะได้บางครั้งจึงเรียกว่า Flexible Can
- ใช้ทำถุงบรรจุผักและผลไม้
- ใช้ทำซองบรรจุอาหารแห้ง เช่น บะหมี่สำเร็จรูป และอาหารที่มีไขมันที่มีอายุการเก็บรักษาไม่สูง เช่น ลูกก๊วย ถั่วทอด เป็นต้น
- ใช้ทำกล่องอาหาร ลัง ถาด และตะกร้า

บรรจุภัณฑ์ขนส่งอีกประเภทหนึ่งที่มีการใช้พอลิโพรพิลีนอย่างมากมาย คือ ถุงพลาสติกสาน (Wooven Sacks) ที่มีขนาดบรรจุมาตรฐาน 50 กิโลกรัมซึ่งทนทานต่อการใช้งาน วิวัฒนาการทางด้านนี้ได้ก้าวไปสู่การผลิตถุงขนาดใหญ่ที่บรรจุสินค้าได้ที่เรียกว่า FIBC (Flexible Intermediate Bulk Containers) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างถุงบรรจุสินค้าชนิด FIBC

- พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (*Polyethylene Terephthalate, PET*)

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต บรรจุภัณฑ์ที่ได้รับการคิดค้นขึ้นมาเพื่อการบรรจุน้ำอัดลม โดยเฉพาะสมบัติเด่นทางด้านความใสแวววาวเป็นประกาย ทำให้ได้รับความนิยมในการบรรจุน้ำมันพีชและน้ำดื่ม นอกจากการผลิตเป็นขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ยังสามารถผลิตในรูปของฟิล์มซึ่งมีสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้เป็นอย่างดี จึงมีการนำไปเคลือบหลายชั้นทำเป็นซองสำหรับบรรจุอาหารที่มีความไวต่อก๊าซ เช่น อาหารขบเคี้ยว เป็นต้น นอกจากนี้ฟิล์มพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตยังมีสมบัติเด่นอีกหลายประการ เช่น ทนแรงยืดและแรงกระแทกเสียดสีได้ดี จุดหลอมเหลวสูง แต่ข้อด้อยคือ ไม่สามารถปิดผนึกด้วยความร้อนและเปิดฉีกยาก ทำให้โอกาสใช้ฟิล์มพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตอย่างเดียวน้อยมาก แต่มักใช้เคลือบชั้นกับพลาสติกอื่นๆ

นอกจากขวดและฟิล์มแล้วพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตยังสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นถาด ด้วยการพัฒนาพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตให้โมเลกุลตกผลึก (Crystalline) กลายมาเป็น CPET (Crystallized Polyethylene Terephthalate) วัสดุพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตจึงสามารถทนอุณหภูมิสูงได้และเหมาะสำหรับทำเป็นถาดบรรจุภัณฑ์อาหารใช้ได้ทั้งเตาอบและเตาไมโครเวฟ

พิจารณาจากในแง่ของสิ่งแวดล้อมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตนับได้ว่าเป็นพลาสติกเพียงไม่กี่ประเภทที่สามารถเปลี่ยนกลับมาเป็นเม็ดพลาสติกที่เป็นมอนอเมอร์ (Monomer) และทำการผลิตใหม่ได้ด้วย

กระบวนการ Depolymerization วัสดุพอลิเอธิลีนเทรฟทาเลตที่มีคุณภาพดีและมูลค่าค่อนข้างสูงสามารถนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อผลิตสินค้าอย่างอื่นได้ เช่น ในเมืองไทยมีการนำเอาขวดพอลิเอธิลีนเทรฟทาเลตน้ำดื่มกลับมาผลิตใหม่เป็นพรม ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ ทำให้ขวดพอลิเอธิลีนเทรฟทาเลตได้รับความนิยมใช้มากขึ้น และแย่งตลาดของขวดพอลิไวนิลคลอไรด์ นอกจากนี้ยังนิยมใช้สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ในรูปแบบของการ์ด

- พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride, PVC)

พอลิไวนิลคลอไรด์ เป็นพลาสติกที่สามารถแปรเปลี่ยนสมบัติได้ โดยการเติมสารเคมีปรุงแต่ง (Additives) ต่างๆ เช่น พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) โมดิฟายเออร์ (Modifier) และ ฟิลเลอร์ (Fillers) ทำให้พอลิไวนิลคลอไรด์นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ มากกว่าอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ โดยพอลิไวนิลคลอไรด์มักใช้ในรูปแบบของขวด ฟิล์ม และแผ่น แม้ว่าครั้งหนึ่งเคยมีข่าวจะให้เลิกใช้พอลิไวนิลคลอไรด์ในบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากมีสารตกค้างของไวนิลคลอไรด์ ซึ่งอาจก่อให้เกิดมะเร็งในตับได้ แต่จากการพัฒนาการด้านการผลิตในปัจจุบัน ทำให้สามารถผลิตพอลิไวนิลคลอไรด์ที่มีไวนิลคลอไรด์ตกค้างน้อยกว่า 1 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ส่งผลให้บรรจุภัณฑ์ที่ทำจากพอลิไวนิลคลอไรด์นี้ปลอดภัยสำหรับใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร

ในแง่ของการผลิตฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์จะผลิตยากกว่าฟิล์มพอลิเอธิลีนหรือพอลิโพรพิลีนจุดเด่นของฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์คือทนต่อน้ำมันและกันกลิ่นได้ดี ใส แข็งแรงทนทานต่อการเสียดสี ในขณะที่ความต้านทานต่อการซึมผ่านของก๊าซขึ้นอยู่กับชั้นปานกลาง อุณหภูมิการใช้งานของพอลิไวนิลคลอไรด์ไม่เกิน 90 องศาเซลเซียส และถ้าอุณหภูมิใช้งานเกินกว่า 137 องศาเซลเซียสแล้ว จะทำให้คุณภาพด้อยลง ขวดพอลิไวนิลคลอไรด์ สามารถใช้แทนขวดแก้ว เนื่องจากเบากว่าและตกไม่แตก แต่ในระยะหลังถูกแย่งตลาดโดยขวดพอลิเอธิลีนเทรฟทาเลตเนื่องจากเหตุผลทางด้านสิ่งแวดล้อมดังกล่าวมาแล้ว ส่วนแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์มักใช้กับบรรจุภัณฑ์ในรูปแบบของการ์ด ประเภทบลิสเตอร์ แพ็ค เนื่องจากมีความใส และเหนียว

การใช้งานของพอลิไวนิลคลอไรด์กับบรรจุภัณฑ์อาหาร

- นิยมใช้ทำฟิล์มยืดสำหรับห่อเนื้อสด ผักและผลไม้สด เนื่องจากความใสและมันวาวทำให้เห็นผลิตภัณฑ์ได้ดีและอัตราการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำอยู่ในช่วงที่เหมาะสม
- นิยมใช้ทำถาดบรรจุอาหารแห้ง เช่น ขนมอบกรอบ ลูกเกด ช็อกโกแลตและอื่นๆ เพื่อแบ่งเป็นสัดส่วน และป้องกันการแตกหัก
- นิยมใช้ทำถาดหรือกล่องบรรจุอาหารสด
- นิยมใช้ทำขวดบรรจุน้ำมันพืชปรุงอาหาร

- พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS)

พอลิสไตรีน พลาสติกจำพวกพอลิสไตรีนนี้ ใช้ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ ที่อัดขึ้นรูปด้วยความร้อนเป็นรูปถ้วย ถาด ในกรณีที่มีการเติมสารพองตัว (Blowing Agent) พอลิสไตรีนสามารถผลิตออกมาเป็นโฟมที่เรียกว่า EPS (Expanded Polystyrene) ซึ่งนำมาใช้เป็นวัสดุกันการกระแทก (Cushioning) เมื่อทำเป็นฟิล์มพอลิสไตรีนจะมีความใสมากแวววาวเป็นประกายแต่เนื่องจากนิกขาดได้ง่ายและป้องกันการซึมผ่านความชื้นและก๊าซได้ต่ำ การใช้ฟิล์มพอลิสไตรีนจึงจำกัดอยู่เพียงการใช้ห่อสินค้า เช่น ผลไม้ ดอกไม้ เป็นต้น หรือทำเป็นบิสเตอร์แพ็ค ถาดที่ขึ้นรูปจากแผ่นพอลิสไตรีนจะมีความใสและแข็งแรงพอสมควร ในสภาวะปกติพอลิสไตรีนจะเปราะจึงมีการพัฒนาด้วยการเติมสารบิวตะไดอิน (Butadine) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงซึ่งรู้จักกันในนามของ HIPS (High Impact Polystyrene)

การใช้งานของพอลิสไตรีนกับผลิตภัณฑ์อาหาร

- นิยมใช้ทำช่องหน้าต่างของกล่องกระดาษ
- ใช้ห่อผัก ผลไม้สด และดอกไม้สด เนื่องจากความใสและยอมให้ก๊าซซึมผ่านได้ง่าย
- ใช้ทำโฟมทั้งเป็นภาชนะบรรจุและแผ่นฉนวนกันความร้อน
- นิยมใช้ทำถ้วย ถาด หรือแก้วน้ำสำหรับใช้ครั้งเดียว
- ใช้ทำถาดหลุมสำหรับรองขนมปังกรอบ ลูกเกด ช็อกโกแลต และอื่นๆ ก่อนบรรจุใส่กล่อง

2.3 แบคทีเรีย

แบคทีเรียสามารถพบได้ทั่วไปในสิ่งแวดล้อมทั้งบนบก น้ำ และอากาศ มีทั้งชนิดที่ก่อให้เกิดประโยชน์ และก่อให้เกิดโทษ แบคทีเรียแต่ละชนิดมีลักษณะทางสัณฐานวิทยา และสรีรวิทยาที่ต่างกันการสืบพันธุ์ มีทั้งแบบอาศัยเพศ (Sexual reproduction) และไม่อาศัยเพศ (Asexual reproduction) การเจริญของแบคทีเรียมีการแบ่งออกเป็นช่วงๆ ตามกราฟการเจริญ (Growth curve) และมีวิธีการวัดการเจริญที่ต่างกัน ดังนั้น การนำแบคทีเรียแต่ละชนิดมาใช้ประโยชน์ จึงควรทำการศึกษามาก่อน เพื่อที่จะได้สามารถใช้ประโยชน์จากแบคทีเรียชนิดนั้นๆ ได้อย่างสูงสุด [12]

2.3.1 รูปร่างของแบคทีเรีย

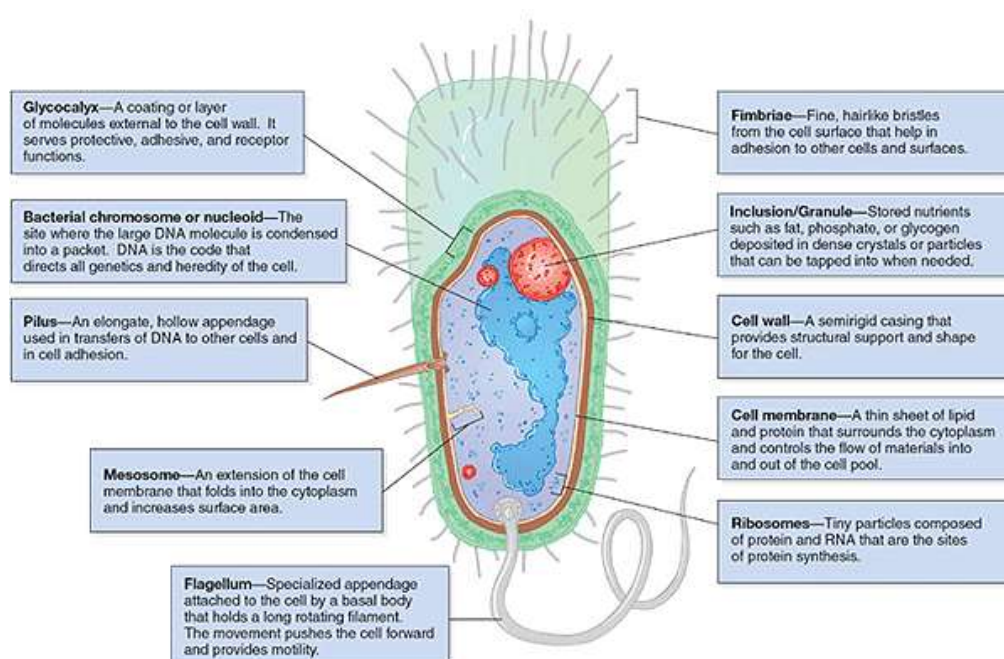
แบคทีเรียมีลักษณะเป็นเซลล์เดี่ยว (Unicellular) ที่มีรูปร่างการเรียงตัวหลายแบบ เช่น รูปกลม (Coccus) รูปแท่ง (Bacillus) และรูปเกลียว (Spirillum) และมีการเรียงตัวหลายแบบ เช่น ถ้ารูปกลม 2 เซลล์มาเรียงตัวติดกันเรียกว่า ดิโพลค็อกไค (Diplococcic) ถ้าหลายเซลล์มาเรียงติดกัน เรียกว่า สเตรปโตค็อกไค (Streptococci) ถ้าเซลล์เรียงติดกันเรียกว่า เทแทรด (Tetrad) แปดเซลล์มาเรียงติดกันเป็นลูกบาศก์เรียกว่า ซาซึนา (Sacina) และหลายเซลล์เรียงติดกันคล้ายพวงองุ่นเรียกว่า สแตฟฟีโลค็อกไค (Staphylococci)

การที่แบคทีเรียมีรูปร่างที่แตกต่างกันเป็นการปรับตัวให้อยู่ได้ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม เช่น แบคทีเรียทรงกลมสามารถคงทนอยู่ได้ในสภาวะแวดล้อมที่แห้งแล้งดี แบคทีเรียรูปท่อนมีพื้นที่ผิวมากกว่ารูปกลมจึงช่วยในการแลกเปลี่ยนสารอาหารกับสภาพแวดล้อมได้ดี แบคทีเรียรูปเกลียวลักษณะคล้ายสว่าน จึงไม่ค่อยมีแรงเสียดทานจากสิ่งแวดล้อมในขณะที่เคลื่อนที่

แบคทีเรียต่างชนิดกันก็จะอาศัยอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่ต่างกัน เช่น อาหาร และสิ่งแวดล้อม เป็นต้น แบคทีเรียก็จะมีทั้งสายพันธุ์ที่ก่อให้เกิดโรค และสายพันธุ์ที่มีประโยชน์ซึ่งมีการนำมาใช้ในการอุตสาหกรรมอาหารอย่างมากมาย

2.3.2 โครงสร้างพื้นฐานของแบคทีเรีย (Essential structure)

แบคทีเรียมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.7 โดยมีหน้าที่การทำงานต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ



รูปที่ 2.7 โครงสร้างพื้นฐานของแบคทีเรีย [13]

1) ผนังเซลล์ (Cell wall)

สัณฐานวิทยา

ผนังเซลล์ มีส่วนประกอบเป็นเพปทิโดไกลแคน (Peptidoglycan) ประกอบด้วยกรดอะมิโนหลายชนิด เช่น กรดกลูตามิก (Glutamic acid) และไลซีน (Lysine) โดยแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบมีความแตกต่างกันดังนี้

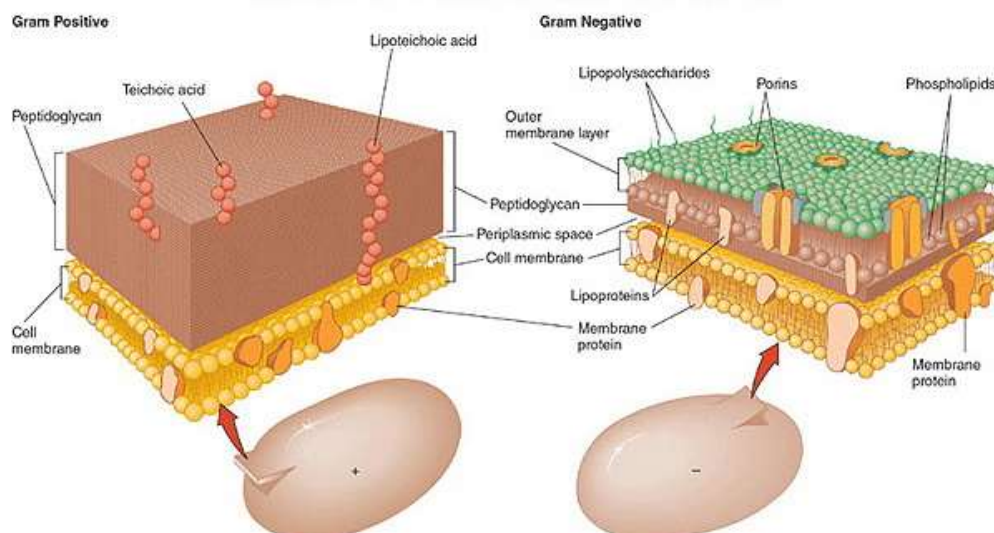
แบคทีเรียแกรมบวก ประกอบไปด้วยน้ำตาลเอ็น-อะซิetylกลูโคซามีน (N-acetylglucosamine) กรดเอ็น-อะซิetylมิวรามิก (N-acetylmuramic acid) และกรดไทโคอิก (Teichoic acid)

แบคทีเรียแกรมลบ จะประกอบไปด้วยน้ำตาลเอ็น-อะซิetylกลูโคซามีน (N-acetylglucosamine) และ กรดเอ็น-อะซิetylมิวรามิก (N-acetylmuramic acid) โดยมีกรดไดอะมิโนปิเมลิก (Diamino pimelic acid) แทนที่กรดอะมิโนไลซีน มีลิโปโปรตีน (Lipoprotein) และเยื่อหุ้มชั้นนอก (Outer membrane) ซึ่งมีไขมันมาห่อหุ้มเพปทิโดไกลแคน เยื่อหุ้มชั้นนอกประกอบด้วยฟอสโฟไลปิด (phospholipid) โปรตีน และลิโปโพลีแซคคาไรด์ (Lipopolysaccharide : LPS) ซึ่งลิโปโพลีแซคคาไรด์ตัวนี้มีคุณสมบัติเป็น สารพิษชนิดเอนโดทอกซิน (Endotoxin) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นเอนไซม์ซึ่งถือเป็นสารเคมีจากภายนอกไม่ให้เข้าไปทำลายเซลล์ ดังนั้นแบคทีเรียแกรมลบจึงไม่ถูกทำลายด้วยเอนไซม์ไลโซไซม์ (Lysozyme) ช่วยป้องกันการถูกฟาโกไซโทซิส (Phagocytosis) และมีสมบัติเป็น โอ แอนติเจน (O antigen) ซึ่งเป็น ตัวรับ (Receptor) ให้แบคทีเรียโอฟาจ (Bacteriophage) มาเกาะ

ผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมลบมีเพปทิโดไกลแคนเพียงชั้นเดียวจึงมีผนังเซลล์ที่บางกว่าแบคทีเรียแกรมบวกซึ่งมีเพปทิโดไกลแคนหลายชั้น โดยผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมลบจะมีความซับซ้อนกว่าแบคทีเรียแกรมบวก การเปรียบเทียบลักษณะผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบแสดงดังรูปที่ 2.8

แบคทีเรียบางชนิดไม่มีผนังเซลล์ เช่น *Mycoplasma* สามารถที่จะเจริญและเพิ่มจำนวนได้ เรียกว่า แอล-ฟอร์ม (L-form) จะสามารถสร้างผนังเซลล์ได้ถ้าเลี้ยงในอาหารที่เหมาะสม

การทำให้แบคทีเรียปราศจากผนังเซลล์ ทำได้โดยการใส่สารปฏิชีวนะ เอนไซม์ หรือสารอื่นๆ ที่จะไปยับยั้งการสร้างเพปทิโดไกลแคน ในกรณีแบคทีเรียแกรมบวกเมื่อมีการนำผนังเซลล์ออกจนหมด เซลล์ที่เหลืออยู่เรียกว่า โปรโทพลาสต์ (Protoplast) ส่วนแบคทีเรียแกรมลบเมื่อมีการนำผนังเซลล์ออกจะเหลือเยื่อหุ้มชั้นนอก และตัวเซลล์เรียกว่า สเปโรพลาสต์ (Speroplast)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ [13]

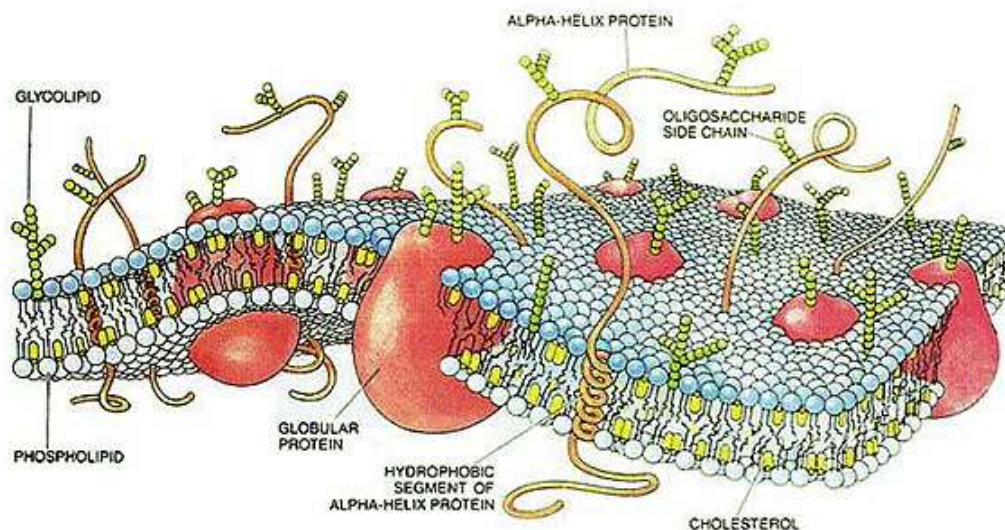
หน้าที่ของผนังเซลล์

- ป้องกันการแตกของเซลล์ เนื่องจากความแตกต่างของความดันออสโมติกระหว่างภายนอกและภายในเซลล์
- มีสมบัติเป็น โอ-แอนติเจน
- ทำให้เซลล์คงรูปร่าง
- เป็นที่ให้แฟลกเจลลามายึดเกาะ
- ทำให้เกิดการแบ่งเซลล์

2) เยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrane)

สัณฐานวิทยา

เยื่อหุ้มเซลล์ (Cytoplasmic membrane หรือ Plasma membrane) จะห่อหุ้มส่วนที่เป็นโปรโทพลาสซึม (Protoplasm) มีลักษณะเป็นเป็นเยื่อหุ้มชั้นเดียว (Unit membrane) ประกอบด้วยฟอสโฟไลปิด (Phospholipid) ลิโปโพลีแซคคาไรด์ (Lipopolysaccharide : LPS) มีสมบัติเป็นสารพิษชนิดเอนโดทอกซิน (Endotoxin) และโปรตีน (Protein) ฝังอยู่ในฟอสโฟไลปิด โครงสร้างเป็นแบบฟลูอิดโมเซอิกโมเดล (Fluid mosaic model) คือส่วนของไลปิดและโปรตีนมีการเคลื่อนไหวไปมาได้ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์แสดงดัง รูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างเยื่อหุ้มเซลล์ [13]

หน้าที่ของเยื่อหุ้มเซลล์

- เกี่ยวข้องกับกระบวนการแอคทีฟทรานสปอร์ต (active transport) ซึ่งจะยอมให้สารบางอย่างผ่านเข้ามาในเซลล์ได้
- มีเอนไซม์เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์องค์ประกอบของผนังเซลล์
- สังเคราะห์ฟอสโฟไลปิด

3) นิวคลีออยด์ (Nucleoid)

สัณฐานวิทยา

นิวคลีออยด์ เป็นส่วนที่ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส (Nuclear membrane) มีสารพันธุกรรม คือ ดีเอ็นเอ หรือ อาร์เอ็นเอ

หน้าที่ของนิวคลีออยด์

ควบคุมลักษณะของสิ่งมีชีวิต

4) ไซโทพลาสซึม (Cytoplasm) ประกอบด้วยอวัยวะหลายอย่าง คือ

ไรโบโซม (Ribosome)

สัณฐานวิทยา

ไรโบโซม ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ Smooth endoplasmic reticulum (SER) ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์โปรตีน และ Rough endoplasmic reticulum (RER) ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์โปรตีนในสิ่งมีชีวิต ถ้าเป็นพวกยูคาริโอตจะมี 80s ประกอบด้วย 60s+40s และพวกโพรคาริโอตจะมี 70s ประกอบด้วย 50s+30s โดยที่ 50s ประกอบด้วย 23s RNA และ 5s RNA กับโปรตีนจำเพาะ และ 30s ประกอบด้วย 16s RNA กับโปรตีนจำเพาะ

หน้าที่ของไรโบโซม

มีหน้าที่ในการสังเคราะห์โปรตีนชนิดต่างๆ

มีโซโซม (Mesosome)

สัณฐานวิทยา

มีลักษณะคล้ายถุง เมื่อเยื่อหุ้มเซลล์ที่เว้าเข้าไปในไซโทพลาสซึม

หน้าที่ของมีโซโซม

เกี่ยวข้องกับการหายใจของเซลล์ และเป็นจุดเริ่มต้นในการสังเคราะห์ดีเอ็นเอ

ก๊าซแวกิวโอล (Gas vacuole)

สัณฐานวิทยา

ภายในมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกกลวง ล้อมรอบด้วยโปรตีนที่มีความแข็งแรงมากเพราะต้องทนต่อแรงดันน้ำ

หน้าที่ของก๊าซแวกิวโอล

ช่วยในการลอยตัวของเซลล์ และเป็นเครื่องกำบังแสง

2.4 การควบคุมจุลินทรีย์

2.4.1 หลักในการควบคุมจุลินทรีย์

ในทางจุลชีววิทยาความหมายของคำว่า "ตาย" หมายถึง การที่จุลินทรีย์ไม่สามารถสืบพันธุ์เพื่อเพิ่มจำนวนเซลล์ได้ หลังจากนำไปเพาะเลี้ยงเชื้อในอาหารเลี้ยงเชื้อที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น การนำซัสเพนชันของแบคทีเรียใส่ลงในน้ำยาฆ่าเชื้อ ชนิดเมอคิวริกคลอไรด์ (HgCl_2 1:1,000) 5 นาที ส่วนการหยดซัสเพนชันของเชื้อแบคทีเรียลงในขวดที่มีกรดร้อนๆ หรือนำไปเผาไฟ แบคทีเรียจะถูกฆ่าตายอย่าง

รวดเร็วจนไม่สามารถวัดอัตราการตายได้ แต่ถ้าสภาพการกระทำนั้นไม่รุนแรงมาก การฆ่าแบคทีเรียให้ตายจะต้องใช้เวลานานขึ้น อัตราการตายของแบคทีเรียจะเป็นแบบอัตราคงที่ (Constant exponential rate) ซึ่งตรงข้ามกับอัตราการเจริญที่มีการเพิ่มจำนวนแบบทวีคูณ (Exponential growth pattern) [14]

2.4.2 อัตราการตายของแบคทีเรีย

อัตราการตายของแบคทีเรียขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารเคมีหรือตัวกระทำทางฟิสิกส์และเวลาที่ใช้ทดสอบ นั่นคือเมื่อความเข้มข้นของสารเคมีหรือตัวกระทำทางฟิสิกส์มีมากจะฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้มาก และเมื่อใช้เวลาดูทดสอบนานขึ้นจะสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้หมด อัตราการตายของแบคทีเรียตามทฤษฎี เมื่อสัมผัสกับสารที่ทำให้ตาย แสดงไว้ใน ตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงอัตราการตายของแบคทีเรียตามทฤษฎีเมื่อสัมผัสกับสารที่ทำให้ตาย

เวลา	เซลล์ที่รอดตาย	การตายต่อหน่วยเวลา	จำนวนที่ตายทั้งหมด
0	1,000,000	0	0
1	100,000	900,000 = 90%	900,000
2	10,000	90,000 = 90%	990,000
3	1,000	9,000 = 90%	999,000
4	100	900 = 90%	999,900
5	10	90 = 90%	999,990
6	1	9 = 90%	999,999

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมจุลินทรีย์

ปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ ได้แก่

- **อุณหภูมิ** เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะช่วยเร่งการทำลายจุลินทรีย์ของการใช้ร่วมกับสารเคมีชนิดนั้น ตัวอย่างเช่น *E.coli* ถูกทำลายได้เร็วขึ้น เมื่อสารฟีนอลมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30 องศาเซลเซียสเป็น 42 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงอาจใช้สารเคมีจำนวนน้อยที่อุณหภูมิสูงจะให้ผลเท่ากับการใช้สารเคมีจำนวนมากที่อุณหภูมิต่ำกว่า
- **ชนิดของจุลินทรีย์** จุลินทรีย์แต่ละชนิดมีความทนทานต่อสภาพทางกายภาพและสารเคมีต่างกัน เช่น พวกที่สร้างสปอร์ได้จะทนทานกว่าเซลล์ปกติ โดยเฉพาะสปอร์ของแบคทีเรียทนทานมากที่สุดต่อสภาวะทางกายภาพและเคมี

- สภาพของเซลล์ที่ต่างกัน มีผลต่อการถูกทำลายต่างกัน เช่น เซลล์ที่อายุน้อยจะถูกทำลายได้ง่ายกว่าเซลล์ที่แก่หรืออยู่ในระยะพัก (Dormant) ระยะที่แบคทีเรียจะถูกทำลายได้ง่าย คือ ระยะลอการิทึม (Logarithm)
- สภาพแวดล้อมอื่นๆ มีผลที่ช่วยเร่งประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ เช่น การใช้ความร้อนจะให้ผลในการทำลายจุลินทรีย์ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรดได้ดีกว่าในสภาพที่เป็นด่าง ความเหนียวหนืดของสารตัวกลางก็มีผลต่อการแทรกซึมของสารเคมี และความเข้มข้นของคาร์โบไฮเดรตจะช่วยทำให้จุลินทรีย์ทนต่อความร้อนได้ดี การมีสารอินทรีย์ในตัวกลางหรือในอาหารจะช่วยลดประสิทธิภาพของสารเคมีทำให้ปกป้องจุลินทรีย์ได้ โดยที่สารทำลายเชื้อ (Disinfectant) อาจจะรวมกับสารอินทรีย์กลายเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ซึ่งไม่มีผลในการทำลายจุลินทรีย์ หรือกลายเป็นสารที่ตกตะกอน และไม่มีผลในการรวมกับจุลินทรีย์ หรือสารอินทรีย์นั้นอาจไปเคลือบที่ผิวเซลล์เป็นการปกป้องเซลล์จากสารทำลายเชื้อ

2.4.4 กลไกการออกฤทธิ์ของสารต้านจุลินทรีย์ (Mode of action of antimicrobial agents)

กระบวนการที่จุลินทรีย์ถูกยับยั้งหรือทำลายได้ เนื่องจากสารต้านจุลินทรีย์ทำลายส่วนต่างๆ ของเซลล์ จุลินทรีย์มีดังนี้

- **การทำลายที่ผนังเซลล์ หรือการยับยั้งการสร้างผนังเซลล์**

สารเคมีบางชนิดอาจไปยับยั้งการสร้างผนังเซลล์ของแบคทีเรียที่กำลังเจริญเติบโต มีผลทำให้เกิดเป็นโปรโทพลาสต์ (Protoplast) ซึ่งถ้าไม่เลี้ยงไว้ในสภาพที่เหมาะสม เซลล์จะแตกได้ หรือการใช้ยาเพนนิซิลลินจะมีผลยับยั้งการสร้างผนังเซลล์ ผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกบางชนิดจึงถูกทำลายได้ด้วยเอนไซม์ไลโซไซม์ (Lysozyme) ที่พบในน้ำตา เม็ดเลือดขาว หรือเมือก เป็นต้น และยังพบในแบคทีเรียอีกหลายชนิด เอนไซม์นี้จะไปย่อยสลายโครงสร้างของผนังเซลล์ทำให้เซลล์แตก

- **การเปลี่ยนแปลงสมบัติของเยื่อหุ้มเซลล์ที่ยอมให้สารผ่าน (Cell permeability)**

เยื่อหุ้มเซลล์มีสมบัติเป็นเยื่อเลือกผ่านของสารอาหารผ่านเข้าสู่เซลล์ ถ้าเยื่อหุ้มเซลล์นี้ถูกทำลายจะมีผลทำให้การเจริญเติบโตของเซลล์หยุดชะงัก และทำให้เซลล์ตายได้ สารเคมีบางอย่าง เช่น ฟีนอล สารซักฟอก สบู่ มีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้องค์ประกอบต่างๆ ภายในเซลล์รั่วไหลออกมาได้

- การเปลี่ยนแปลงสภาพของโปรตีนและกรดนิวคลีอิก

เซลล์ที่มีชีวิตจะต้องมีโปรตีน และกรดนิวคลีอิกอยู่ภายในเซลล์สภาพปกติหรือเป็นธรรมชาติ ถ้ามีสารเคมีหรือสภาพใดๆ ที่มาทำให้โปรตีน และกรดนิวคลีอิกเปลี่ยนไปจากสภาพธรรมชาติ (Denature) จะมีผลทำลายเซลล์ได้ เช่น อุณหภูมิสูง สารเคมีความเข้มข้นสูงจะทำให้โปรตีนและกรดนิวคลีอิกตกตะกอน จับตัวเป็นก้อนแข็ง ซึ่งจะไม่สามารถแปรสภาพให้กลับมาเหมือนเดิมได้อีก

- การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์

เอนไซม์ต่างๆ จำเป็นในปฏิกิริยาเคมีของกระบวนการเมแทบอลิซึมในเซลล์ ดังนั้นถ้ามีตัวยับยั้งเอนไซม์ (Enzyme inhibitor) ก็จะมีผลต่อปฏิกิริยาของกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการไกลโคลิซิส (Glycolysis) วัฏจักรเครปส์ (Kreb's tricarboxylic acid cycle) และระบบไซโตโครม (Cytochrome system) สารที่เป็นตัวยับยั้ง ได้แก่ ไซยาไนด์ ยับยั้งไซโตโครม ออกซิเดส ฟลูออไรด์ยับยั้งไกลโคลิซิส เป็นต้น

สารที่เป็นออกซิไดซิงเอเจนต์อย่างแรง เช่น ฮาโลเจน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อาจทำลายองค์ประกอบของเซลล์จนเซลล์ไม่สามารถทำหน้าที่ตามปกติต่อไปได้ เช่น รวมตัวกับหมู่ซัลไฟไฮไดรล (Sulphydryl) ของเอนไซม์ในเซลล์ ทำให้โครงสร้างของเอนไซม์เปลี่ยนไป เอนไซม์จึงไม่ทำงาน นอกจากนี้ยังมีไอออนของโลหะ เช่น เงิน ทองแดง และปรอท ซึ่งจะไปรวมตัวกับหมู่ซัลไฟไฮไดรลของเอนไซม์หรือโปรตีน มีผลทำให้เซลล์ถูกทำลายได้

- การป้องกันการสร้างเมทาบอลไลต์ (Antimetabolites)

เมทาบอลไลต์เป็นสารที่จำเป็นสำหรับกระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ เช่น การสังเคราะห์กรดโฟลิก จุลินทรีย์จำเป็นต้องใช้สารกรดพาราอะมิโนเบนโซอิก (P-aminobenzoic acid) ซึ่งสารนี้มีโครงสร้างคล้ายกับซัลฟาไมด์ (Sulfanilamide) ดังนั้นการใช้ซัลฟาไมด์เข้าแย่งทำปฏิกิริยาแทนที่กรดพาราอะมิโนเบนโซอิก ทำให้การสังเคราะห์กรดโฟลิกหยุดชะงัก ดังนั้นการใช้สารที่มีโครงสร้างคล้ายคลึงกันกับสารเมทาบอลไลต์เพื่อไปยับยั้งเมแทบอลิซึมของเซลล์จึงช่วยทำลายจุลินทรีย์ได้

- การยับยั้งการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก

สารบางอย่างมีผลในการยับยั้งการสังเคราะห์ DNA และ RNA โดยสารนั้นจะไปขัดขวางการสร้างหน่วยพื้นฐานของกรดนิวคลีอิก คือ พิวรีนและพิริมิดีน และไปขัดขวางการรวมตัวของนิวคลีโอไทด์เข้าเป็นกรดนิวคลีอิก ซึ่งจะมีผลต่อการสังเคราะห์โปรตีนของเซลล์ทำให้กระบวนการเมแทบอลิซึมผิดปกติไป และทำให้เซลล์ถูกทำลายได้ในที่สุด

2.4.5 การควบคุมจุลินทรีย์ด้วยสารเคมี

ในการใช้สารเคมีเพื่อควบคุมจุลินทรีย์นั้นจะต้องตระหนักว่าไม่มีสารเคมีชนิดใดชนิดเดียวที่จะดีที่สุดในการทำลายจุลินทรีย์ทุกชนิด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสภาพต่างๆ ในการใช้สาร และขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ที่ถูกทำลายด้วย ดังนั้นการเลือกใช้สารเคมีเพื่อควบคุมจุลินทรีย์ จะต้องคำนึงถึงสมบัติของสารเคมีด้วย

สมบัติของสารเคมีที่ใช้ควบคุมจุลินทรีย์

สารเคมีที่ใช้ควบคุมจุลินทรีย์ ควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

- มีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์เท่านั้น แต่ไม่มีพิษต่อคนและสัตว์อื่นๆ และทำลายจุลินทรีย์ได้หลายชนิดที่ความเข้มข้นต่ำ
- สามารถละลายน้ำได้ดี หรือในตัวทำละลายอื่นๆ ที่มีอยู่ในเป้าหมายได้
- มีความคงตัวสูง (Stable) ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์
- มีสมบัติในการทำลายจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิปกติในร่างกายหรืออุณหภูมิห้อง
- มีความสามารถในการซึมผ่านผนังเซลล์เข้าทำปฏิกิริยากับสารในเซลล์
- ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสิ่งที่สัมผัส เช่น ไม่ทำให้เกิดการสีกกร่อนของโลหะต่างๆ
- ไม่มีกลิ่นเหม็นหรือกลิ่นที่รบกวน
- มีสมบัติเป็นสารทำความสะอาดด้วย จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพสารทำลายเชื้อ (Disinfectant)
- สามารถซื้อได้ง่ายและราคาถูก

ปัจจัยที่จะต้องคำนึงถึงในการเลือกและใช้สารเคมี คือ

- ธรรมชาติของวัตถุที่จะใช้กับสารเคมี เช่น สารเคมีที่จะใช้กับพวกเครื่องมือเครื่องใช้ จะไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับร่างกาย เพราะอาจทำอันตรายต่อเซลล์หรือเนื้อเยื่อ
- ชนิดของจุลินทรีย์ สารเคมีแต่ละชนิดจะมีประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ไม่เท่ากัน เช่น สปอร์มีความคงทนกว่าเซลล์ปกติ หรือแบคทีเรียที่มีสมบัติในการดื้อสียาต่างกันก็มีความคงทนต่างกัน ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้สารเคมีให้เฉพาะเจาะจงกับชนิดของจุลินทรีย์ที่จะถูกทำลาย
- สภาพแวดล้อมทั่วไป เช่น อุณหภูมิ pH เวลา ความเข้มข้นของสาร จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ต่างกัน

คำจำกัดความ [14]

การทำไร้เชื้อ (Sterilization) เป็นกระบวนการทำลายจุลินทรีย์ทุกชนิดบนวัตถุหรือสิ่งของทีผ่านกระบวนการสเตอริไรเซชันจะปราศจากสิ่งมีชีวิตใดๆ

สารทำลายเชื้อ (Disinfectant) หมายถึงสารเคมีที่ฆ่าจุลินทรีย์ที่กำลังเจริญเติบโต แต่ไม่สามารถฆ่าเชื้อโรคที่มีสปอร์ได้

การทำลายเชื้อ (Disinfection) เป็นกระบวนการทำลายจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค

สารระงับเชื้อ (Antiseptic) เป็นสารป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ โดยอาจทำลายหรือยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์โดยสารนี้สามารถใช้กับร่างกายคนและสัตว์ได้

แซนนิไทเซอร์ (Sanitizer) เป็นสารที่ลดจำนวนจุลินทรีย์ลงจนถึงระดับปลอดภัยของมาตรฐานทางสาธารณสุข มักเป็นสารเคมีที่ฆ่าแบคทีเรียที่กำลังเจริญได้ถึง 99.9 เปอร์เซ็นต์ แซนนิไทเซอร์มักใช้กับเครื่องมือเครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน หรือภาชนะในโรงงานนมและอาหาร และใช้กับเครื่องแก้ว ถ้วยชามในภัตตาคาร

สารฆ่าจุลินทรีย์ (Germicide หรือ Microbicide) เป็นสารที่ใช้ฆ่าจุลินทรีย์ที่กำลังเจริญแต่อาจไม่ฆ่าสปอร์ของจุลินทรีย์ สารฆ่าจุลินทรีย์จึงสามารถจัดเป็นสารทำลายเชื้อชนิดหนึ่งได้

สารฆ่าแบคทีเรีย (Bactericide) เป็นสารสำหรับฆ่าแบคทีเรีย ซึ่งคล้ายกับคำว่า ฟังจิไซด์ (Fungicide) ไวรัไซด์ (Virucide) และสปอริไซด์ (Sporicide) ซึ่งเป็นสารที่ฆ่ารา ไวรัส และสปอร์ตามลำดับ

แบคทีริโอสแตซิส (Bacteriostasis) เป็นสภาพที่ห้ามหรือยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียเช่นเดียวกับ ฟังจิสแตติก (Fungistatic) ซึ่งเป็นสารที่ห้ามการเจริญของรา ดังนั้นสารใดๆ ที่ใช้ห้ามการเจริญของจุลินทรีย์ได้เรียกรวมว่า ไมโครบิสแตติก เอเจนต์ (Microbistatic agent)

2.4.6 สารเคมีที่ใช้ควบคุมจุลินทรีย์ [14]

สารเคมีที่ใช้ควบคุมจุลินทรีย์ ได้แก่

- **ฟีนอลและสารประกอบฟีนอล (Phenol and phenolic compounds)**

ฟีนอลหรือสารประกอบฟีนอลิกเป็นสารที่ โจเซฟ ลิสเตอร์ ใช้เป็นยาฆ่าเชื้อโรคในการผ่าตัดมาตั้งแต่ปี ค.ศ.1880 สารประกอบฟีนอลอาจใช้เป็นยาฆ่าเชื้อหรือหยุดชะงักการเจริญของแบคทีเรีย ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นที่ใช้ ความเข้มข้น 2-5 เปอร์เซ็นต์ ใช้ฆ่าเชื้อโรคในเสมหะ อูจจาระ ปัสสาวะ และเครื่องมือเครื่องใช้ทางการแพทย์ แต่ไม่สามารถทำลายสปอร์และไวรัสได้ ประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อโรค

ของฟีนอลจะลดต่ำลง ถ้าอยู่ในที่อุณหภูมิต่ำและมีสบู่ปะปนด้วย นอกจากนี้คุณสมบัติของฟีนอลสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้ดีกว่าฟีนอล เช่น ครีซอล (Cresol) และเฮกซะคลอโรฟีน (Hexachlorophene) ซึ่งสามารถทำลายจุลินทรีย์ได้กว้างขวาง แต่ถ้าใช้ความเจือจางมากๆ ก็จะทำหน้าที่เพียงชะงักการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย นอกจากนี้ฟีนอลยังมีประสิทธิภาพในการทำลายแบคทีเรียแกรมบวกได้ดีกว่าแกรมลบ ดังนั้นจึงใช้ผสมในสบู่ น้ำมัน ครีม เพื่อเป็นแอนติเซพติกที่ผิวหนัง

ผลของสารประกอบฟีนอลในการทำลายจุลินทรีย์ คือการทำให้เซลล์แตกและการทำให้โปรตีนในเซลล์ตกตะกอน ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โดยการทำให้กรดอะมิโนรั่วไหลออกจากเซลล์ ทั้งนี้สาเหตุที่ทำให้จุลินทรีย์ตาย คือ การทำลายโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งทำให้การผ่านเข้าออกของสารในเซลล์ผิดปกติ ส่งผลทำให้เซลล์ตายได้

● แอลกอฮอล์ (Alcohol)

แอลกอฮอล์นิยมใช้นำมาฆ่าเชื้อตามผิวหนัง และอุปกรณ์การแพทย์ เช่น เทอร์โมมิเตอร์ โดยเฉพาะเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) ความเข้มข้น 50-90 เปอร์เซ็นต์ จะมีประสิทธิภาพทำลายเซลล์ปกติได้ ส่วนแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ให้ผลในการทำลายไวรัสได้ โดยทั่วไปมักใช้ความเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ มากที่สุดในการทำลายเชื้อ ส่วนเมทิลแอลกอฮอล์มีสมบัติในการทำลายแบคทีเรียได้น้อยกว่าเอทิลแอลกอฮอล์ และยังเป็นพิษมากด้วย เนื่องจากไอของเมทิลแอลกอฮอล์สามารถทำอันตรายต่อนัยน์ตาของมนุษย์ จึงไม่นิยมใช้ สำหรับแอลกอฮอล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น เอมีลแอลกอฮอล์ โพรพิลแอลกอฮอล์ บิวทิลแอลกอฮอล์ จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการฆ่าจุลินทรีย์ได้ดียิ่งขึ้นกว่าเอทิลแอลกอฮอล์

ผลของแอลกอฮอล์ที่มีต่อการทำลายจุลินทรีย์คือ คือ ทำให้โปรตีนและเอนไซม์เสียสภาพและทำหน้าที่เป็นตัวทำลายเอาไขมันที่เยื่อหุ้มเซลล์ออก ส่งผลให้โครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์ถูกทำลาย นอกจากนี้ยังเป็นตัวดึงน้ำออกจากเซลล์ ทำให้กิจกรรมของเซลล์หยุดชะงักจึงสามารถยับยั้งการเจริญหรือทำลายเซลล์ได้

● ฮาโลเจน (Halogen)

ฮาโลเจน คือ พวกสารประกอบของธาตุโลหะหมู่ที่เจ็ด ได้แก่

- ไอโอดีน (Iodine)

ไอโอดีนเป็นยาฆ่าเชื้อที่ใช้ได้ผลดีที่สุดชนิดหนึ่ง โดยอยู่ในรูปของทิงเจอร์ไอโอดีน ซึ่งประกอบด้วยไอโอดีน 2 เปอร์เซ็นต์ และโซเดียมไอโอไดด์ 2 เปอร์เซ็นต์ ละลายในแอลกอฮอล์ ไอโอดีนใช้ทำลาย

จุลินทรีย์ทั้งแบคทีเรีย รา และไวรัส ได้ นอกจากนี้ยังสามารถทำลายสปอร์ได้ด้วย จึงนิยมใช้ฆ่าเชื้อตามผิวหนัง และบาดแผล

ผลของไฮโอไดนในการฆ่าจุลินทรีย์ คือการทำหน้าที่เป็นสารออกซิไดซ์ และยับยั้งสารประกอบพวกโปรตีนที่มีหมู่ซัลฟไฮดริล นอกจากนี้ยังอาจรวมตัวกับกรดอะมิโนไทโรซีนในเอนไซม์และโปรตีนอื่นๆ ทำให้กิจกรรมของเซลล์ผิดปกติ มีผลให้เซลล์ถูกทำลาย

- คลอรีนและสารประกอบคลอรีน (Chlorine and Chlorine compound)

คลอรีนและสารประกอบคลอรีนนิยมใช้ฆ่าเชื้อในน้ำประปาหรือน้ำดื่ม ส่วนใหญ่ที่เดิมในน้ำอยู่ในรูปของเกลือไฮโปคลอไรต์ (Hypochlorite) เช่น แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$) และโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaClO) ส่วนก๊าซคลอรีนที่เดิมในน้ำจะทำปฏิกิริยาในน้ำเกิดเป็นสารไฮโปคลอรัส (HOCl) ซึ่งเป็นสารที่ออกซิไดซ์ได้รุนแรงกว่าคลอรีน

คลอรามิน (Chloramine) เป็นสารประกอบที่ไฮโดรเจนหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งอะตอมให้หมู่อะมิโนถูกแทนที่ด้วยคลอรีน ได้แก่ โมโนคลอรามิน (Monochloramine, NH_2Cl) คลอรามิน-ที (Chloramines-T) และเอโซคลอราไมด์ (Azochloramide) เป็นต้น ข้อดีของคลอรามิน คือ มีความคงตัวสูงกว่าไฮโปคลอไรต์ จึงสลายปล่อยคลอรีนออกไปช้าๆ เหมาะที่จะใช้ในกิจการประปาที่ส่งน้ำไปตามท่อ มักใช้คลอรามินเป็นสารกำจัดเชื้อหรือแอนติเซพติกกับเครื่องมือในการผลิตอาหาร รวมทั้งเครื่องแก้วต่างๆ และเครื่องใช้ในบ้าน

ผลของคลอรีนและสารประกอบคลอรีนในการกำจัดจุลินทรีย์ คือ การเกิดออกซิไดซ์อย่างรุนแรงกับส่วนประกอบของเซลล์ จึงสามารถทำลายจุลินทรีย์ได้ นอกจากนี้สารประกอบคลอรีนยังรวมตัวกับโปรตีนที่เชื่อมเซลล์และเอนไซม์ มีผลทำให้เซลล์ตายได้

ปฏิกิริยาการเกิดกรดไฮโปคลอรัส แสดงดังสมการเคมีดังนี้



สำหรับกรดไฮโปคลอรัสจะแตกตัวต่อไปได้แนสเซนต์ออกซิเจน (Nascent oxygen) ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงมาก สามารถออกซิไดซ์ส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์ทำให้แบคทีเรียตาย

- โลหะหนักและสารประกอบโลหะหนัก (Heavy metals and their compounds)

โลหะหนักที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งหรือทำลายจุลินทรีย์ ได้แก่ปรอท เงิน และทองแดง ทั้งนี้ความสามารถในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ขึ้นกับความสามารถในการแตกตัวเป็นไอออนของโลหะหนักนั้น ตัวอย่างสารประกอบโลหะหนัก เช่น สารละลายซิลเวอร์ไนเตรด สามารถทำลายเชื้อ *Neisseria*

gonorrhoeae ได้ ส่วนเมอคิวโรโครม (Mercurochrome) และเมอไธโอเลต (Merthiolate) มีความเป็นพิษน้อย จึงใช้ฆ่าเชื้อโรคตามผิวหนังและเยื่อเมือก สารคอปเปอร์ซัลเฟต (Copper sulfate) สามารถทำลายเซลล์สาหร่ายและเชื้อราได้ดี จึงนิยมใช้ในสระว่ายน้ำ

ผลของสารประกอบโลหะหนักในการยับยั้งหรือทำลายจุลินทรีย์ คือ การรวมตัวกับโปรตีนในเซลล์ และยับยั้งการทำงานของเซลล์ ตัวอย่างเช่น เมอคิวริกคลอไรด์ (HgCl_2) จะรวมตัวกับหมู่ซัลไฟไฮไดรล (Sulphydryl) ของเอนไซม์ ทำให้เอนไซม์นั้นไม่ทำงาน นอกจากนี้ สารประกอบโลหะหนักที่ความเข้มข้นสูงๆ ยังทำให้โปรตีนในเซลล์ตกตะกอน มีผลทำให้เซลล์ตายได้

2.5 บรรจุภัณฑ์ยับยั้งจุลินทรีย์ (Antimicrobial Packaging)

บรรจุภัณฑ์ยับยั้งจุลินทรีย์หมายถึง บรรจุภัณฑ์ที่มีความสามารถทำลายหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย (Spoilage Microorganisms) และจุลินทรีย์ก่อโรค (Pathogens) ที่ปนเปื้อนอาหาร เพื่อช่วยรักษาความปลอดภัยของอาหาร รวมทั้งถนอมรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บของอาหาร ซึ่งหลักการของบรรจุภัณฑ์ยับยั้งจุลินทรีย์คือ การใช้สารยับยั้งจุลินทรีย์ (Antimicrobial Agent) ร่วมกับวัตถุดิบ ที่ใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์ ซึ่งอาจใช้ในรูปแบบของบรรจุสารยับยั้งจุลินทรีย์ การผสมสารยับยั้งจุลินทรีย์ในวัสดุที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ การใช้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติยับยั้งจุลินทรีย์ ซึ่งการนำสารยับยั้งจุลินทรีย์มาใช้ในบรรจุภัณฑ์นั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของสารยับยั้งจุลินทรีย์ สมบัติของอาหาร ลักษณะของอาหาร และชนิดจุลินทรีย์ที่ก่อปัญหา [8]

2.5.1 ประเภทของสารต้านจุลินทรีย์

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาวิจัยสารต้านจุลินทรีย์สำหรับการใช้ในการบรรจุอาหารแบบแอคทีฟกันมาก เพื่อหาสารที่เหมาะสมกับการใช้งานและมีประสิทธิภาพสูงเพียงพอในการประกันความปลอดภัยของอาหารตลอดอายุการเก็บ สารที่ใช้มีทั้งวัตถุดิบเสียที่ใช้กับอาหาร สารสกัดจากพืชโดยเฉพาะพืชสมุนไพรและพืชที่มีสรรพคุณเชิงยา เอนไซม์ แบคทีริโอซิน (Bacteriocins) สารฆ่ารา (Fungicides) ไอออนของโลหะ พอลิเมอร์ และก๊าซบางชนิด กลไกการต้านจุลินทรีย์ของสารแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน การใช้สารต้านจุลินทรีย์หลายชนิดร่วมกันมักให้ผลดีกว่าการใช้สารชนิดเดียว ทั้งนี้ต้องคัดเลือกสารให้สามารถทำงานเสริมกันได้ด้วย

สารต้านจุลินทรีย์ที่มีการใช้ในการบรรจุอาหารทั้งที่อยู่ระหว่างการวิจัยและที่ผลิตเชิงพาณิชย์และใช้ในอุตสาหกรรมแล้ว ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 2.2 และตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสารต้านจุลินทรีย์ที่ใช้แต่งเติมในวัสดุบรรจุภัณฑ์ [3, 8, 15]

Antimicrobial agents	Polymer/Carrier	Main target microorganisms
Organic acids/Anhydrides:		
Benzoic acid, Sorbic acid, Propionic acid, Acetic acid, Lactic acid, Malic acid	Edible films, EVA, LLDPE	Mould
Bacteriocins:		
Nisin, Pediocins, Lacticin	Edible films, Cellulose, LDPE, Nylon, PVA-co-PE	Gram positive bacteria <i>L. monocytogenes</i> <i>S. aureus</i>
Chelating agent:		
EDTA	Edible films	Gram negative bacteria
Enzymes:		
Chitinase, Glucose oxidase, Lactoperoxidase, Lysozyme	Edible films, Cellulose acetate, PS, PVOH, Nylon	Gram positive bacteria <i>L. monocytogenes</i> <i>S. aureus</i> , <i>E.coli</i>
Fungicides:		
Benomyl, Imazalil	LDPE, Ionomer	Mould
Inorganic Gases:		
Sulfur dioxide, Chlorine dioxide	Various polyolefins	Bacteria, mould, yeast
Metal:		
Silver	Various polyolefins	Bacteria, mould
Natural Extracts:		
Betle pepper, Cinnamon, Clove, Finger root, Grapefruit seed, Horseradish	Edible films, Paper, Cellulose, LDPE, Nylon	Aerobic bacteria, Coliforms, mould, yeast

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสารต้านจุลินทรีย์ที่ใช้แต่งเติมในวัสดุบรรจุภัณฑ์ (ต่อ)

Antimicrobial agents	Polymer/Carrier	Main target microorganisms
Plant Volatile		
Compounds: Ally isothiocyanate, Eugenol, Cinnamaldehyde, Cineole, Hinokitol, Thymol	Edible films, Paper, Cellulose, LDPE, Nylon	Bacteria, mould, yeast
Polymers: Chitosan, UV/excimer laser irradiated Nylon	Chitosan, Nylon	Aerobic bacteria, mould

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างสารต้านจุลินทรีย์ผลิตในเชิงพาณิชย์ [3, 8, 15]

Antimicrobial Agents	Tradename	Producer company	Packaging forms for food applications
Silver substituted zeolite	AgIon TM	AgIon Technologies LLC	Bulk food storage containers paperboard cartons, plastic or paper
	Novaron [®]	Toagosei Chem. Ind. Co.	food wraps and milk containers Many (Japan)
Tricosan	Microban [®]	Microban products	Deli wrap, reheatable food containers (UK)
Ally isothiocyanate	Wasao [®]	Mitsubishi-kagaru Foods Corporation Dry Company Ltd.	Pressure sensitive labels, Sheet Sachet

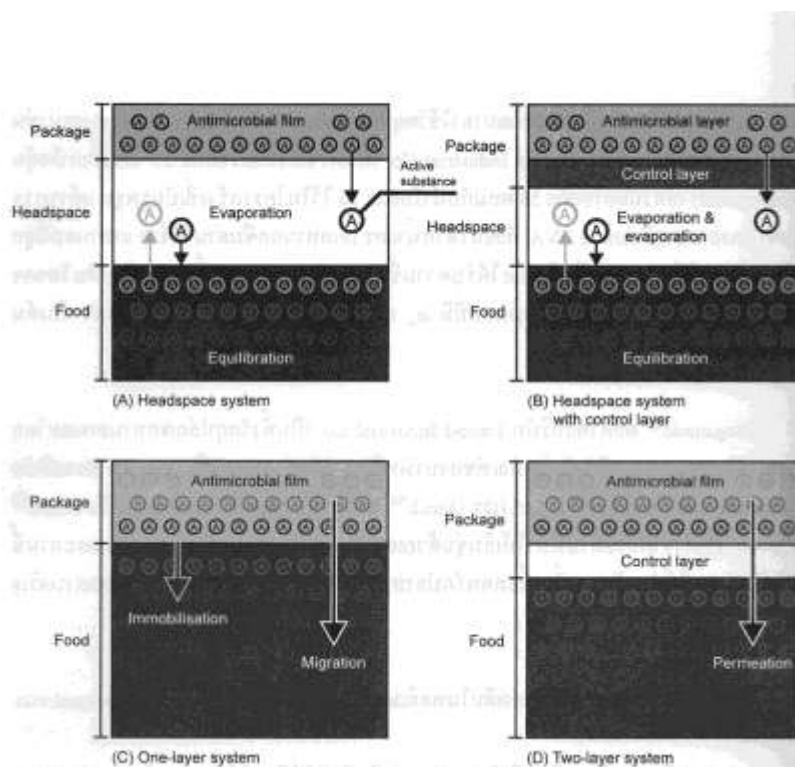
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างสารต้านจุลินทรีย์ผลิตในเชิงพาณิชย์ (ต่อ)			
Antimicrobial Agents	Tradename	Producer company	Packaging forms for food applications
Chlorine dioxide	Microsphere TM	Bernard Technologies Inc.	Storage bags for produce, paperboard coating, rigid containers, pressure sensitive labels
Carbon dioxide	Freshpax	Mutisorb	Sachets
	Verifrais	Technologies SARL Codimer	Sachets (France)
Ethanol vapor	Ethicap [®]	Freund Industrial	Sachets (Japan)
	Negamold [®]	Co.	Sachets
	Fretek [®]		Sachets
	Oitech TM	Nippon Kayaku	Sachets
Glucose oxidase	Bioka	Bioka Ltd.	Sachets (Finland)

2.5.2 สารต้านจุลินทรีย์ที่แต่งเติมในพอลิเมอร์ (Antimicrobial Agents Incorporated into Polymer)

การผสมสารยับยั้งจุลินทรีย์โดยตรง หรือการตรึง (Immobilization) ไว้ที่ผิวของพอลิเมอร์เป็นวิธีที่ใช้กันมาก โดยสารยับยั้งจุลินทรีย์ที่ผสมโดยตรงในพอลิเมอร์จะต้องสามารถแพร่ออกมาสู่อาหารเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตที่ผิวหรือในเนื้ออาหารได้ ส่วนในกรณีที่สารยับยั้งจุลินทรีย์ที่ถูกตรึงไว้ที่ผิวของพอลิเมอร์ไม่มีการแพร่ออกมาปนเปื้อนอาหาร จะสามารถยับยั้งจุลินทรีย์ที่มาสัมผัสที่ผิวของพอลิเมอร์ได้ สำหรับกลไกการทำงานของสารยับยั้งจุลินทรีย์ที่ผสมในพอลิเมอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

การปล่อย (Release): การปลดปล่อยไอของสารยับยั้งจุลินทรีย์เคลื่อนที่เข้าสู่ช่องว่างเหนืออาหารโดยตรง ดังในรูปที่ 2.10 (A) และการปลดปล่อยไอของสารยับยั้งจุลินทรีย์ผ่านฟิล์มควบคุมปริมาณสารที่จะเข้าสู่ช่องว่างเหนืออาหาร ดังในรูปที่ 2.10 (B)

การตรึง (Immobilization): การตรึงสารยับยั้งจุลินทรีย์ไว้กับวัสดุบรรจุภัณฑ์และแพร่เข้าสู่อาหารดังในรูปที่ 2.10 (C) และการตรึงโดยสารยับยั้งจุลินทรีย์จะถูกดูดกลืนไว้ในวัสดุบรรจุภัณฑ์และแพร่ผ่านแผ่นฟิล์มควบคุมปริมาณสารที่จะเข้าไปในอาหาร ดังในรูปที่ 2.10 (D)

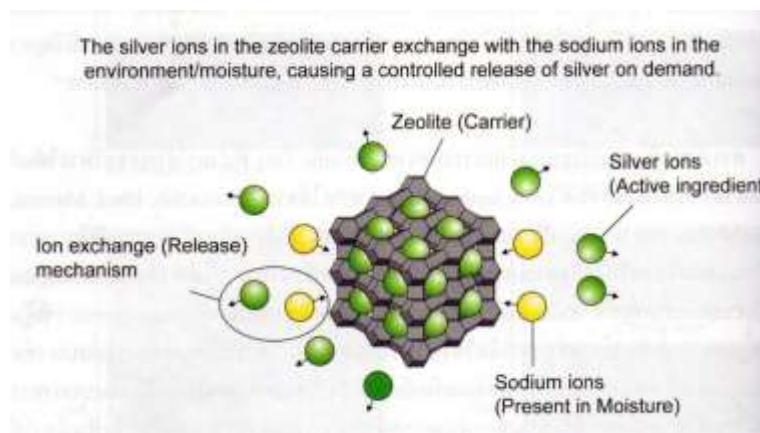


รูปที่ 2.10 แผนภาพการทำงานของสารต้านจุลินทรีย์ที่ผสมวัสดุบรรจุภัณฑ์

ข้อดีของการผสมสารยับยั้งจุลินทรีย์ในพอลิเมอร์ที่เป็นภาชนะบรรจุภัณฑ์ คือ สารดังกล่าวไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับอาหารโดยตรง โดยเมื่อเกิดปฏิกิริยาจึงปลดปล่อยสารยับยั้งจุลินทรีย์ออกมา เช่น คลอรีนไดออกไซด์ (ClO_2) โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) และแอลลิไธโอไซโทไอโซไซยานต (Allyl isothiocyanate) เป็นต้น สำหรับ Bernard Technologies Inc (BTI) ได้พัฒนาวัสดุบรรจุภัณฑ์ยับยั้งจุลินทรีย์ด้วยการเติมแต่งสารตั้งต้นคือ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) กับกรดในพอลิเมอร์ โดยเมื่อสารดังกล่าวได้รับความชื้นจะเกิดปฏิกิริยาเคมีแล้วให้ก๊าซคลอรีนไดออกไซด์ ซึ่งมีฤทธิ์ในการยับยั้งจุลินทรีย์ออกมา สำหรับเทคโนโลยีของ BTI เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากควบคุมให้เกิดคลอรีนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำมาก [3]

ตัวอย่างสารยับยั้งจุลินทรีย์ประเภทน้ำมันระเหยง่าย (Volatile Oil) ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหาร ได้แก่ แอลลิลไอโซไทโอไซยานेट (Allyl isothiocyanate) สกัดได้จาก Horseradish Black mustard Brown mustard และ Wasabi หรือ Japanese horseradish มีสมบัติยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และเชื้อรา โดยการทำงานของแอลลิลไอโซไทโอไซยานेटจะเข้าไปในช่องว่างเนื้ออาหาร บริษัท Mitsubishi-kagaku food corporation ผู้ผลิต Wasaoru[®] ซึ่งเป็นสารยับยั้งแบคทีเรียชนิดหนึ่งมีลักษณะเป็นผงของไซโคลเด็คตริน (Cyclodextrin) ที่ถูกเคลือบด้วยน้ำมันระเหยง่ายของแอลลิลไอโซไทโอไซยานेट สำหรับการนำสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียดังกล่าวไปใช้งานมีหลายรูปแบบ เช่น การผสม Wasaoru[®] กับพอลิเมอร์ หรือใช้เคลือบกระดาษห่ออาหารพร้อมบริโภคแบบอาหารกล่อง (เบนโตะ) ของญี่ปุ่น

สารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอีกชนิดหนึ่ง ที่นิยมนำมาผสมกับพอลิเมอร์เพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร คือ ซิลเวอร์ไอโอสต์ที่มีไอออนของเงินเข้าไปแทนที่โซเดียมในโครงสร้าง (Silver substituted zeolite, Ag-zeolite) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดย Ag-zeolite มีความสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและรา ซึ่งมีประสิทธิภาพสูง กลไกการยับยั้งแบคทีเรียเริ่มจากไอออนของเงินจะเข้าไปทำลายระบบการทำงานของเอนไซม์ในเซลล์ของแบคทีเรีย อย่างไรก็ตามเนื่องจากเงินมีราคาสูง จึงมักผสมในพอลิเมอร์แล้วผลิตเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ (ความหนาประมาณ 3-6 ไมโครเมตร) ในปริมาณร้อยละ 1-3 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังสามารถนำ Ag-zeolite ไปเคลือบกับพอลิเมอร์ที่เป็นโครงสร้างหลักของบรรจุภัณฑ์ได้



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของสารต้านจุลินทรีย์ Ag-zeolite

ไตรโคลซาน (Triclosan) เป็นสารยับยั้งแบคทีเรียอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ผสมในพอลิเมอร์โดยไตรโคลซานที่ผสมในพอลิเมอร์จะแพร่ออกจากพอลิเมอร์ แล้วไปทำลายระบบการทำงานของเอนไซม์ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย บริษัท Microban Product ผลิตสินค้าภายใต้ชื่อทางการค้า Microban[®] ซึ่งเป็นเครื่องใช้ในครัว เช่น กล่องบรรจุอาหาร จาน เชียง และเสื้อผ้า เป็นต้น แต่สหภาพยุโรปยังไม่อนุญาตให้ใช้ไตรโคลซานสัมผัสกับอาหารโดยตรง [8]

อย่างไรก็ตาม ปัญหาของการผสมสารยับยั้งจุลินทรีย์ในพอลิเมอร์คือ

- ความเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างพอลิเมอร์และสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์มีต่ำเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีมีความแตกต่างกันมาก เช่นความเป็นขั้วของโมเลกุล จึงทำให้การรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันยาก
- อัตราการแพร่ของสารยับยั้งจุลินทรีย์และการควบคุมการแพร่ยังต้องมีการศึกษาวิจัยอีกมาก
- ข้อบ่งเกี่ยวกับวัสดุพอลิเมอร์ที่มีการเติมแต่งสารหรือวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร โดยสารเติมแต่งที่แพร่เข้าไปปนเปื้อนในอาหาร จะต้องเป็นสารที่ได้รับให้ใช้กับอาหารได้

2.5.3 สารต้านจุลินทรีย์ตรึงกับพอลิเมอร์ด้วยพันธะไอออนิกและโควาเลนต์ (Immobilized antimicrobials to polymers by covalent linkages)

การตรึงสารต้านจุลินทรีย์ด้วยพันธะไอออนิกและโควาเลนต์กับพอลิเมอร์ โดยไม่มีการแพร่สารต้านจุลินทรีย์เข้าสู่อาหารเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่มีการศึกษาวิจัยกันมาก สมบัติสำคัญของสารต้านจุลินทรีย์และพอลิเมอร์คือจะต้องมีหมู่ฟังก์ชัน (Functional groups) ที่ทำให้เกิดพันธะระหว่างกันได้ ตัวอย่างสารต้านจุลินทรีย์ที่ใช้ตรึงกับพอลิเมอร์ เช่น เปปไทด์ เอนไซม์ กรดอินทรีย์ พอลิเอมีน (Polyamines) เป็นต้น ส่วนพอลิเมอร์ที่ใช้ เช่น ไอโอโนเมอร์ ไนลอน พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิสไตรีน เอทิลีนเมทิลอะครีเลต เอทิลีนเมทาคริลิกแอซิด และ โคพอลิเมอร์ พอลิเอทิลีน เป็นต้น สารต้านจุลินทรีย์จะยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บนผิวอาหารที่สัมผัสกับวัสดุบรรจุนี้ Appendini and Hotchkiss (1997) [16] ได้ศึกษาวิจัยการตรึงเอนไซม์ไลโซไซม์ (Lysozyme) กับฟิล์มพลาสติกหลายชนิด พบว่า ฟิล์มเซลลูโลสไตรอะเตต (Cellulose Triacetate) มีประสิทธิภาพดีที่สุด

เปปไทด์หลายชนิดที่แยกได้จากสัตว์ พืช จุลินทรีย์ แมลง รวมทั้งเปปไทด์สังเคราะห์ที่มีสมบัติเป็นสารต้านจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสียหรือเป็นพิษ หมู่ทำหน้าทีอะมิโนและคาร์บอกซิลิกสามารถสร้างพันธะโควาเลนต์กับพอลิเมอร์ Appendini and Hotchkiss (2001) [17] ได้ทดลองตรึงเปปไทด์ของกรดอะมิโน 14 ชนิดกับพอลิสไตรีนพบว่าสามารถยับยั้ง *E.coli* ได้ดี

นอกจากนี้ Appendini and Hotchkiss (2002) [3] ได้รวบรวมงานวิจัยการใช้สารต้านจุลินทรีย์ตรึงกับพอลิเมอร์เช่น ไลโซไซม์ โคคีนัส กลูโคสออกซิเดส เบตา-กาแลคโตซิเดส แลคโตเฟอร์รีน ซัลโฟไดรอกซิเดส เป็นต้น โดยงานวิจัยในปัจจุบันส่วนใหญ่เน้นศึกษาวิธีการตรึงสารและศึกษาผลกระทบของผลพลอยได้ (By-product) จากปฏิกิริยาที่อาจมีผลเสียต่อคุณภาพอาหาร

2.5.4 สารต้านจุลินทรีย์เคลือบพอลิเมอร์หรือดูดซับที่ผิวพอลิเมอร์ (Coating or adsorbing antimicrobials to polymer surface)

สารต้านจุลินทรีย์บางชนิดสลายตัวที่อุณหภูมิสูงจึงไม่สามารถผสมหรือเติมแต่งกับพลาสติกในขณะขึ้นรูปได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องผสมสารต้านจุลินทรีย์กับสารพาหะก่อนแล้วนำมาเคลือบผิวพอลิเมอร์หรือให้สารต้านจุลินทรีย์ถูกดูดซับที่ผิวพอลิเมอร์แทน เช่น การผสมสารต้านจุลินทรีย์ในไขเคลือบกระด้างห่ออาหาร เป็นต้น

สารเคลือบหรือฟิล์มบริโกลไดนิยมใช้เป็นพาหะสำหรับสารต้านจุลินทรีย์ ใช้เคลือบฟิล์มหรือภาชนะบรรจุพลาสติก เช่น การผสมไนซิน (Nisin) ในเมทิลเซลลูโลส (Methylcellulose) หรือการผสมไนซินในเซอีน (Zein) ที่ใช้เคลือบฟิล์มห่ออาหาร เป็นต้น โปรตีนเป็นสารพาหะที่นิยมใช้เนื่องจากในโมเลกุลของโปรตีนมีทั้งส่วนที่มีขั้วและส่วนที่ไม่มีขั้ว จึงรวมตัวกับสารต้านจุลินทรีย์และเกาะติดผิวพอลิเมอร์ได้ดี

การดูดซับสารที่ผิวพอลิเมอร์แล้วให้สารนั้นค่อยๆ แพร่ไปสู่อาหาร เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่นิยมใช้กับสารต้านจุลินทรีย์ประเภท แบคทีเรียโอซินและเอนไซม์ ที่ไม่ทนทานความร้อนสูงเช่น การใช้ไนซินดูดซับที่ผิวของ พอลิเอทิลีน เอทิลีน ไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิโพรพิลีน ไนลอน พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และ อะคริลิก หรือการใช้ไนซินผสมเอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติกแอซิด และ กรดซิตริก ดูดซับที่ผิวของพอลิเอทิลีนเชิงเส้นความหนาแน่นต่ำ ไนลอน และพอลิไวนิลคลอไรด์ เป็นต้น

2.5.5 พอลิเมอร์ที่มีสมบัติต้านจุลินทรีย์ (Inherently Antimicrobial polymers)

พอลิเมอร์บางชนิดมีสมบัติต้านจุลินทรีย์ จึงมีการนำมาใช้เป็นฟิล์มหรือสารเคลือบอาหารพอลิเมอร์ที่มีประจุบวก (Cationic polymers) เช่น โคลิโดแซน และ พอลิ-แอล-ไลซีน (Poly-L-Lysine) ซึ่งมีหมู่เอมีนที่มีประจุบวกจะดูดซับเซลล์จุลินทรีย์ที่มีประจุลบให้ติดกับฟิล์ม ทำให้ผนังเซลล์แตก จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตแต่อาจจะไม่ตาย นิยมใช้โคลิโดแซนเป็นสารเคลือบผักผลไม้สด หรือเติมแต่งโคลิโดแซนด้วยสารต้านจุลินทรีย์ประเภทกรดอินทรีย์หรือสารสกัดจากเครื่องเทศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ นอกจากนี้ FDA ได้อนุญาตให้ใช้โคลิโดแซน เป็น Food contact substance (FCS)

ฟิล์มแคลเซียมแอลจิเนต (Calcium alginate film) มีสมบัติยับยั้งจุลินทรีย์ที่มีในธรรมชาติ (Natural flora) และ Coliforms ในเนื้อสด เป็นผลจากแคลเซียมคลอไรด์ในฟิล์ม นอกจากนี้ฟิล์มอะคริลิกยังมีสมบัติต้านจุลินทรีย์และสามารถยืดอายุการเก็บของผักและผลไม้สดได้

การดัดแปรพอลิเมอร์ด้วยวิธีทางฟิสิกส์ (Physical modification of polymers) เพื่อให้ผิวของพอลิเมอร์มีสมบัติต้านจุลินทรีย์ เป็นอีกวิธีที่มีการศึกษาวิจัยกันมากและมีแนวโน้มที่จะนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การดัดแปรไนลอนด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต หรือเอ็กซ์ไซเมอร์เลเซอร์ (Excimer laser irradiation) ที่ความยาวคลื่น 193 นาโนเมตร จะทำให้เกิดหมู่أمينที่ผิว Nylon เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 10 ซึ่งมีสมบัติต้านจุลินทรีย์หลายชนิด ได้แก่ *Staphylococcus aureus* *Enterococcus faecalis* และ *Pseudomonas fluorescens*

2.6 พอลิเมอร์ยับยั้งจุลินทรีย์ (Antimicrobial polymer)

การใช้วัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถยับยั้งจุลินทรีย์นั้นก็เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพบางอย่างของสารยับยั้งจุลินทรีย์และยังไปช่วยลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมในการใช้งานสารยับยั้งแบคทีเรียโดยตรงโดยการลดสารพิษที่ตกค้างของตัวสารยับยั้งๆ เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารยับยั้งๆ และช่วยยืดอายุการใช้งานของสารยับยั้งๆ ด้วย อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ที่มีฤทธิ์ยับยั้งๆ ก็มีข้อดีที่ไม่ระเหย มีความเสถียรทางเคมีและไม่มีการซึมผ่านผิวหนังได้ ดังนั้นจึงสามารถช่วยลดการสูญเสียที่เกิดจากการระเหย การเสื่อมสลายด้วยแสง และการเคลื่อนที่ ในกรณีของวัสดุพอลิเมอร์ทางการแพทย์ การติดเชื้อมีปัญหาสำคัญที่มีอยู่ในการใช้งานหลายๆ ชนิดในการปลูกถ่ายทางการแพทย์ การติดเชื้อเป็นสาเหตุสำคัญของความล้มเหลวในการปลูกถ่ายวัสดุชีวภาพในการแพทย์สมัยใหม่ พอลิเมอร์ยับยั้งแบคทีเรียจึงมีบทบาทสำคัญในการลดเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ ท่อที่ใส่เข้าไปในร่างกายซึ่งทำมาจากพอลิเมอร์นั้นจะปล่อยสารยับยั้งๆ ออกมาอย่างช้าๆ ซึ่งสามารถช่วยชีวิตผู้ป่วยหลายชีวิตซึ่งมีอาการติดเชื้อในทุกๆ ปี ในกรณีของสิ่งทอมีการพัฒนาสิ่งทอชนิดใหม่ที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งจุลินทรีย์เพื่อใช้ในทางการแพทย์ การพัฒนาที่สำคัญในสามสิบปีที่ผ่านมา ก็เพื่อสังเคราะห์และใช้งานพอลิเมอร์ในการป้องกันจุลินทรีย์

วิธีการหนึ่งของการทำพอลิเมอร์ยับยั้งแบคทีเรียคือการใส่สาร Organic หรือ Inorganic ไปที่พอลิเมอร์ในระหว่างกระบวนการผลิตของวัสดุ วิธีการอื่นคือสร้างความสามารถในการยับยั้งๆ ไปที่พอลิเมอร์หลังจากกระบวนการผลิต ข้อแตกต่างของการเตรียมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ที่สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ได้คือการเตรียมการพอลิเมอร์ไรเซชันของมอนอเมอร์ที่บรรจุสารยับยั้งๆ อยู่ส่วนหนึ่งหลังจากนั้นจึงทำการพอลิเมอร์ไรเซชันโดยตรงหรือทำโคพอลิเมอร์ไรเซชันกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง [18]

2.6.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรีย (Factors affecting the antimicrobial activity)

ปัจจัยมากมายที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของพอลิเมอร์ยับยั้งจุลินทรีย์และกลไกการทำงานในการยับยั้งแบคทีเรีย ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุล ระยะห่างระหว่างแอคทีฟไซต์ (Active site) กับพอลิเมอร์ รวมถึงความสมดุลของ Hydrophilic-hydrophobic และธรรมชาติของเคาเตอร์ไอออน (Counterions)

ผลของน้ำหนักริมโกล. น้ำหนักริมโกลมีบทบาทสำคัญในการกำหนดสมบัติในการยับยั้งจุลินทรีย์ ดังนั้นจึงมีกลุ่มวิจัยมากมายที่ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของน้ำหนักริมโกล Ikeda และคณะ(1984, 1986) [19, 20] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียของโสมโพลิเมอร์ของพอลิอะคริเลต และพอลิเมทิลอะคริเลตกับหมู่ข้างเคียงไบกวไนด์ (Biguanide) และโคพอลิเมอร์ (Copolymer) นี้กับอะคริลาไมด์ ผลการวิจัยพบว่าการยับยั้งแบคทีเรียของพอลิเมทิลอะคริเลตที่มีหมู่ไบกวไนด์สามารถยับยั้ง *S. aureus* ได้อย่างชัดเจนซึ่งเป็นผลมาจากน้ำหนักริมโกล ซึ่งน้ำหนักริมโกลที่อยู่ในช่วงระหว่าง 5×10^4 และ 1.2×10^5 ดาลตัน เป็นช่วงที่เหมาะสม และเมื่อน้ำหนักริมโกลต่ำกว่า 5×10^4 ดาลตัน สมบัติการยับยั้งแบคทีเรียจะเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักริมโกล อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียจะลดลงเมื่อน้ำหนักริมโกลเพิ่มขึ้นเกินกว่า 1.2×10^5 ดาลตัน การยับยั้งแบคทีเรียนี้สามารถอธิบายได้จากความสามารถในการซึมผ่านผนังเซลล์ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ของพอลิเมอร์ิกควอเตอนารีแอมโมเนียมซอลต์ (Polymeric quaternary ammonium salts) ที่ใช้ศึกษาการต้านทานเชื้อ *S. aureus* *B. subtilis* *E. coli* *A. aerogenes* และ *P. aeruginosa* พบว่าขึ้นอยู่กับน้ำหนักริมโกล

Kanazawa และคณะ(1993) [21] ได้ศึกษาอิทธิพลของน้ำหนักริมโกลของ Poly(tributyl 4-vinylbenzyl phosphonium chloride) เพื่อศึกษาการต้านทานเชื้อ *S. aureus* ในสารละลายน้ำเกลือพบว่าสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักริมโกลในช่วง 1.6×10^4 ดาลตันไปจนถึง 9.4×10^4 ดาลตัน ประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียที่ดีของพอลิเมอร์สามารถตรวจสอบได้โดยผลของพอลิเมอร์ในแต่ละกระบวนการฆ่าเชื้อ ตัวอย่างเช่น ความต่อเนื่องของเหตุการณ์ ในการฆ่าเชื้อของสารยับยั้งแคทไอออนิก (Cationic) สามารถอธิบายได้จาก (1) เกิดการดูดซึมสารยับยั้งไปที่ผิวของเซลล์แบคทีเรีย (2) เกิดการแพร่ของสารยับยั้งต่อไปที่ผนังเซลล์ (3) เกิดการดูดซึมสารยับยั้งไปที่ไซโทพลาสซึมเมมเบรน (Cytoplasmic membrane) (4) ไซโทพลาสซึมเมมเบรนเกิดการแตกออก (5) เกิดการรั่วไหลขององค์ประกอบภายในไซโทพลาสซึมและ (6) เซลล์ไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ เป็นที่รู้กันอยู่แล้วว่าเซลล์ของแบคทีเรียโดยปกติแล้วจะเป็นประจุลบ การยึดเกาะของพอลิแคทไอออน (Polycations) ไปที่ผิวประจุลบคาดว่าจะเกิดขึ้นเป็นบริเวณที่ใหญ่กว่ามอนอเมอร์ิกแคทไอออน (Monomeric cations)

Ikeda และคณะ (1984, 1993) [19, 21] ได้ทำการสังเคราะห์สารยับยั้งพอลิแคทไอออนิกด้วยฟอสโฟเนียมซอลต์ (Phosphonium salts) และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียของสารที่สังเคราะห์ได้นี้ด้วยมอนอเมอร์ชนิดต่างๆ จากผลงานวิจัยได้แสดงว่าประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักริมโกลของมอนอเมอร์

Chen และคณะ (2000) [22] ได้ทำการสังเคราะห์ควอเตอนารีแอมโมเนียมฟังก์ชันนาไลซ์พอลิโพรพิลีนไอมินเดนไดรเมอร์ (Quaternary ammonium functionalized poly(propyleneimine) dendrimer) โดยพบว่าสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียของสารยับยั้งเดนไดรเมอร์นี้มีความเกี่ยวข้องกับน้ำหนักริมโกลซึ่ง

Tokura และคณะ (1997) [23] ก็พบเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม Panarin และคณะ (1985) [24] ได้รายงานไว้ว่าสมบัติการยับยั้งจุลินทรีย์นั้นไม่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล ส่วนในกรณีของโคพอลิเมอร์คือไวนิลเอมีน (Vinylamine) เมทิลอะครีเลต (Methyl acrylate) และ *N*-vinyl pyrrolidone กับหมู่เพนแดนท์ควอเตอร์นารีแอมโมเนียม (Pendent quaternary ammonium) เพื่อที่จะอธิบายความขัดแย้งของข้อมูล อย่างแรกควรจะพิจารณาโครงสร้างของแบคทีเรีย ซึ่งขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของโครงสร้างผนังเซลล์ แบคทีเรียสามารถแบ่งออกเป็นสองชนิดคือ แกรมบวก (เช่น *S. aureus*) และ แกรมลบ (เช่น *E. coli*) แบคทีเรียแกรมบวกมีผนังเซลล์ที่กว้าง ขณะที่แบคทีเรียแกรมลบบมีโครงสร้างของผนังชั้นนอกในตัวผนังเซลล์ ซึ่งสร้างเป็นผนังสำหรับป้องกันโมเลกุลที่มาจากภายนอก โดยส่วนมากในการศึกษาจะสรุปผล จากผลของน้ำหนักโมเลกุลต่อการกำจัดเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) จากการศึกษาพบว่าโมเลกุลของโคพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ช่วง 5×10^4 คาลตันถึง 9×10^4 คาลตัน นี้ไม่ส่งผลต่อการซึมผ่านข้ามผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) รวมถึงแบคทีเรียแกรมลบอย่างเช่น *E. coli* ซึ่งมักเกิดปัญหาการแพร่ไปที่ย่อหุ้มเซลล์ได้ยากเนื่องจากมีผนังเซลล์ด้านนอกอยู่ด้วย

ผลของ Counterion Kanazawa และคณะ (1993) [21] ได้ศึกษาผลของเคาท์เตอร์ไอออน (Counteranion) ของ poly[tributyl(4-vinylbenzyl)phosphonium] salts กับเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* พบว่าประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเป็นผลมาจากโครงสร้างของเคาท์เตอร์ไอออน ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียต่ำลงเมื่อเคาท์เตอร์ไอออนมีแนวโน้มที่จะสร้าง Ion-pair อย่างหนาแน่นกับฟอสโฟเนียมไอออน (Phosphonium ion) ขณะที่ประสิทธิภาพจะสูงขึ้นเมื่อเกิดการแยกออกของไอออนไปเป็นไอออนอิสระ (Free ion) โดยสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียจากมากไปน้อยคือ คลอไรด์ เตตระฟลูออไรด์ เปอร์คลอเรต และเฮกซะฟลูออโรฟอสเฟต ตามลำดับ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการละลายของผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์

ประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ของควอเตอร์นารีแอมโมเนียมเดนไดรเมอร์ (Quaternary ammonium dendrimers) ที่สังเคราะห์โดย Chen และคณะ (2000) [22] ได้แสดงอิทธิพลของเคาท์เตอร์ไอออน โดยพวกเขาพบว่าสารยับยั้งที่มีโบรมีนแอมไอออนจะมีอำนาจมากกว่าคลอไรด์แอมไอออน อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยของ Panarin และคณะ (1985) [24] ในการสังเคราะห์ไฮโมพอลิเมอร์ของไวนิลเอมีนและ เมทิลเมทาครีเลต กับหมู่เพนแดนท์ควอเตอร์นารีแอมโมเนียม ไม่แสดงผลของเคาท์เตอร์ไอออนต่อประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของทั้ง ครอไรด์ โบรมีน และไอโอดีน ซึ่งพบว่ายังไม่เป็นที่ชัดเจนถึงสาเหตุของเคาท์เตอร์ไอออน ที่มีต่อประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย นอกจากผลของการเปลี่ยนความสามารถในการละลายของโฮสพอลิเมอร์ (Host polymer)

ผลของ Spacer Length และ Alkyl Chain ประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียจะขึ้นอยู่กับความยาวของสายโซ่เนื่องจากผลดังกล่าวส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรวมถึงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพอลิเมอร์ โดยจะส่งผลต่อวิธีการในการทำปฏิกิริยากับไฮโดรฟาสติกเมมเบรนได้ สำหรับสาร

ยับยั้งพอลิเมอร์ควอเตอร์นารีแอมโมเนียมคลอไรด์ (Quaternary ammonium chloride) ความสมดุลของ Hydrophilic-lipophilic มีผลต่อคุณสมบัติการยับยั้งแบคทีเรีย อย่างไรก็ตาม Panarin และคณะ (1985) [24] พบว่าประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียของพอลิเมอร์เหล่านี้ไม่มีความแตกต่างเมื่อความยาวของสายโซ่เปลี่ยนไป Ikeda และคณะ (1984) [25] ได้ทำการศึกษาพอลิไตรอัลคิลไวนิลเบนซิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (Poly(trialkylvinylbenzylammonium chloride)) พบว่าประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียจะสูงที่สุดเมื่อความยาวสายโซ่มีมากที่สุด (C_{12})

Sawada และคณะ (1999) [26] ได้เตรียมเปอฟลูออโรโพรพิเลต (Perfluoro-propylated) และ Perfluoro-oxaalkylated end-capped 2-(3-acrylamidopropyl)dimethylammonio) ethanoate หรือ APDMAE โดยเมื่อนำพอลิเมอร์ชนิด Fluorinated APDMAE มาศึกษาความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียกับเชื้อ *S. aureus* และ *P. aeruginosa* พบว่าพอลิเมอร์ชนิด Perfluoro-oxaalkylated APDMAE มีประสิทธิภาพต่อการต้านเชื้อแบคทีเรียทั้ง *S. aureus* และ *P. aeruginosa* มากขึ้นเนื่องจากพอลิเมอร์ดังกล่าวมีความยาวสายโซ่ที่ยาวกว่า

Nonaka และคณะ (2003) [27] ได้สังเคราะห์โคพอลิเมอร์ Methacryloyl ethyl trialkyl phosphonium chlorides/*N*-isopropylacrylamide พบว่าประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียของโคพอลิเมอร์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความยาวของสายโซ่อัลคิล (Alkyl chain) ในหมู่ฟอสโฟเนียม (Phosphonium) ในโคพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น

สำหรับการอธิบายถึงการเชื่อมโยงกันระหว่างประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียและความยาวสายโซ่อัลคิลได้มีการอภิปรายเอาไว้ว่าต้องมีสมบัติคือ (1) มีตำแหน่ง Dual binding บนผิวซึ่งเกี่ยวข้องกับการดึงดูดกันตำแหน่งที่แตกต่างกันสำหรับอะตอมแทนที่ที่ยาวและสั้นหรือ (2) ความแตกต่างของพฤติกรรมการรวมตัวกันสำหรับสายโซ่ยาวและสั้น

2.7 การถ่ายเทมวลสารและการซึมผ่าน

ในการเลือกวัสดุและภาชนะบรรจุสำหรับผลิตภัณฑ์อาหาร ประเด็นสำคัญประเด็นหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณา คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างผลิตภัณฑ์กับภาชนะบรรจุ (Product-package interaction) โดยหลักการแล้วภาชนะบรรจุต้องไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ กับผลิตภัณฑ์อาหาร สามารถแยกผลิตภัณฑ์ออกจากสภาวะแวดล้อมได้ และไม่มีการแลกเปลี่ยนหรือถ่ายเทสารระหว่างผลิตภัณฑ์กับภาชนะบรรจุและกับสิ่งแวดล้อม สารดังกล่าวได้แก่ ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ ไอออน องค์ประกอบต่างๆ ในภาชนะบรรจุ เป็นต้น ในทางปฏิบัติภาชนะบรรจุที่มีสมบัติดังกล่าวไม่อาจจัดหาได้ หรือหากมีได้จริงราคาจะสูงมากจนไม่สามารถนำมาใช้กับผลิตภัณฑ์อุปโภคและบริโภคได้ กรณีภาชนะแก้ว ซึ่งเป็นที่ยอมรับว่ามีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาสูงมากและป้องกันการซึมผ่านของโมเลกุลเล็กๆ ได้ดีมากยังพบว่าฮีเลียมและไฮโดรเจนสามารถแพร่ผ่านแก้วได้ และสารอนินทรีย์ในแก้วโดยเฉพาะโซเดียมสามารถ

ออกมาปนเปื้อนผลิตภัณฑ์ได้ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว สำหรับภาชนะโลหะซึ่งป้องกันการซึมผ่านได้ดีมากเช่นกัน ยังพบว่าไอออนของโลหะสามารถละลายหรือทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์หรือสภาวะแวดล้อมได้ (เช่น การเกิดสนิม)

ภาชนะบรรจุภัณฑ์พลาสติกสามารถเกิดปฏิกิริยาร่วมกับผลิตภัณฑ์ที่สัมผัสได้สูงกว่าภาชนะแก้วและโลหะมาก ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวลสาร ได้แก่ ก๊าซ ไอ น้ำ และสารประกอบโมเลกุลเล็กๆ ระหว่างผลิตภัณฑ์กับพลาสติกและ/หรือกับสภาวะแวดล้อม การถ่ายเทมวลสารนี้เป็นปรากฏการณ์ที่มีความสำคัญทั้งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และความปลอดภัยของผู้บริโภค สามารถจำแนกดังต่อไปนี้

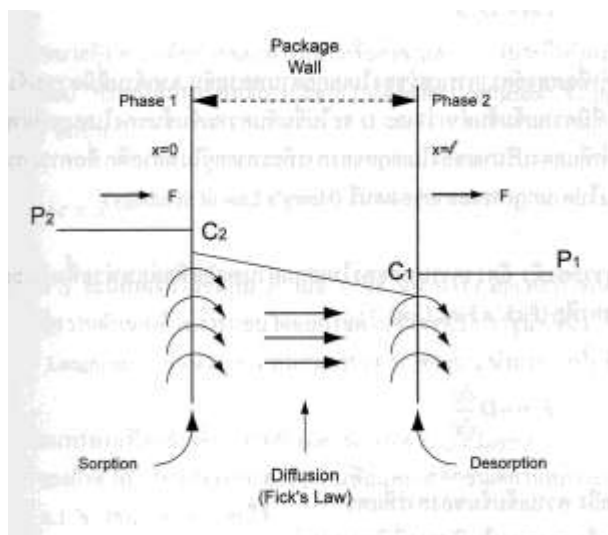
- การซึมผ่าน (Permeation)
- การเคลื่อนที่ (Migration)
- การดูดซับ (Sorption หรือ Scalping)

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาของ การซึมผ่านของสารยับยั้งแบคทีเรียชนิดนี้ [8]

2.7.1 ทฤษฎีการซึมผ่าน (Permeation)

การซึมผ่าน หมายถึง กระบวนการแพร่ของโมเลกุลของก๊าซ ไอ หรือของเหลว ผ่านเมมเบรน (Membrane) ทั้งนี้ไม่รวมการแพร่ผ่านรูรั่วหรือรอยปริแตกของเมมเบรนนั้นๆ โมเลกุลที่แพร่ผ่านเมมเบรนนี้ เรียกว่าเพอเมนต์ (Permeant) และค่าที่แสดงอัตราการแพร่ผ่านเมมเบรนหรืออัตราการซึมผ่านเมมเบรนนี้เรียกว่าเพอมีเอบิลิตี (Permeability)

การซึมผ่านเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญมากต่อภาชนะบรรจุพลาสติก ทั้งประเภทแผ่นฟิล์ม ภาชนะบรรจุอ่อนตัวและภาชนะบรรจุคงรูป จากโครงสร้างทางเคมีของพลาสติก ทำให้ ก๊าซ ไอ และสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดเล็กสามารถละลาย (Dissolve) เข้าไปในพลาสติกได้ โมเลกุลที่ละลายเข้าไปนี้จะแพร่ผ่าน (Diffuse) พลาสติกโดยกระบวนการที่เรียกว่าแอกติเวตดิฟฟิวส์ชันโพรเซส (Activated Diffusion Process) หรือโมเลกุลดิฟฟิวส์ชันโพรเซส (Molecular Diffusion Process) เพื่อสร้างสมดุลต่อศักย์ทางเคมี (Chemical Potential) ของโมเลกุลนั้น และแพร่จากที่มีศักย์สูงกว่าไปสู่ที่มีศักย์ต่ำกว่าจนกระทั่งผ่านพลาสติกไปอีกด้านหนึ่ง (Desorp หรือ Evaporate) รูปที่ 2.12 แสดงการซึมผ่านพลาสติกของก๊าซ หรือ ไอ



รูปที่ 2.12 กระบวนการซึมผ่านพลาสติกของก๊าซ หรือ ไอ

การอธิบายการซึมผ่านโดยเอกดิเวทิฟฟิวส์ชัน โพรเซสนี้ มีสมมติฐานสำคัญ 3 ประการคือ

- 1) เมมเบรน จะต้องปราศจากรูรั่ว รอยปริแตก รอยพับ คราบสกปรกหรือความบกพร่องอื่นๆ ถ้าเป็นภาชนะบรรจุขึ้นรูปแล้วต้องปิดผนึกให้สนิท โมเลกุลใดๆ ไม่สามารถซึมผ่านรอยปิดผนึกนี้ได้
- 2) เมมเบรน และโมเลกุลซึมผ่านจะต้องไม่ทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกัน
- 3) สถานะคงตัว (Steady State) ของการถ่ายเทมวลจะต้องเกิดขึ้นในเวลา เหมาะสม

2.7.2 สมการการแพร่และการดูดซับ (Diffusion and Sorption Equations)

อัตราการซึมผ่านพลาสติกของโมเลกุลต่างๆ ที่สถานะคงตัว หรือเพอมีอะบิลิตี โคอэффициเซียนส์ (Permeability Coefficient) หรือนิยมเรียกเพอมีอะบิลิตีและเขียนด้วยสัญลักษณ์ Pm (บางครั้งอาจใช้ P) Pm นี้เป็นผลลัพธ์ของ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient หรือ S) ดังแสดงในสมการ (2.1)

$$Pm = D \times S \quad (2.1)$$

โดย D คือค่าที่แสดงอัตราการแพร่ของโมเลกุลผ่านพลาสติก จากด้านที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่ด้านที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าและ D จะไม่ขึ้นกับโมเลกุลที่แพร่

โดย S คือค่าที่แสดงปริมาณของโมเลกุลของสารที่ละลายอยู่ในพลาสติก ที่สภาวะสมดุล และ S นี้เป็นไปตามกฎการละลายของเฮนรี (Henry's Law of Solubility)

ปัจจัยที่มีผลต่อการซึมผ่านฟิล์มพลาสติก

- โครงสร้างทางเคมีของพลาสติก

โครงสร้างทางเคมีมีผลต่อทั้งค่า D และ S นั่นคือมีผลโดยตรงต่อค่า Pm ของพลาสติกนั้นๆ สำหรับพลาสติกที่มีโครงสร้างดังแสดงในตารางที่ 2.4 นั้นมีค่า X และ Pm ที่เปลี่ยนไปตามหมู่ฟังก์ชันบนโมเลกุล

โดย X จะเป็นโมเลกุลที่เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของพลาสติก ค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจนจะเปลี่ยนไปตามโมเลกุล X โดยค่าดังกล่าวเป็นค่าสัมพัทธ์ที่เปรียบเทียบกับค่าอัตราการซึมผ่านของพลาสติกที่มี X เป็นหมู่ ไฮดรอกซิล (-OH)

ตารางที่ 2.4 ผลของโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกต่อค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน

Structure	X	Relative Pm (O ₂)
$\left[\text{CH}_2 - \underset{\text{X}}{\text{CH}} \right]_n$	-OH	1
	-CN	4
	-Cl	800
	-F	1,500
	-COOCH ₃	1,700
	-CH ₃	15,000
	-C ₆ H ₅	42,000
	-H	48,000

- สัณฐานวิทยาของพลาสติก (Morphology of Plastic)

สัณฐานวิทยาของพลาสติก หมายถึง โครงสร้างทางกายภาพของพลาสติกที่มีทั้งบริเวณที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous Region) และบริเวณกึ่งผลึก (Semicrystalline Region) อยู่ด้วยกันโดยการเกิดโครงสร้างลักษณะนี้มาจากการจัดระเบียบโมเลกุล (Orientation) ทางเคมีและการจัดระเบียบโมเลกุลทางกายภาพ

ความสำคัญของสัณฐานวิทยาต่อการซึมผ่านของพลาสติกแบ่งได้เป็น 2 ประเด็นสำคัญคือ *สมมาตรและสภาพมีขั้วของมอนอเมอร์ (Symmetry and polarity of monomer)* จะมีผลโดยตรงต่อการเกิดโครงสร้างผลึก (Crystalline Structure) พลาสติกที่มีสมมาตรจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำกว่าพลาสติกที่ไม่มีสมมาตรหรือมีสมมาตรน้อยกว่า ซึ่งจะมีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซต่ำกว่าด้วย ตัวอย่างเช่นพอลิเอทิลีนมีโครงสร้างสมมาตรมากกว่ายาง ดังนั้นค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซของพอลิเอทิลีนจึงต่ำกว่าของยาง นอกจากนี้มอนอเมอร์ที่สมมาตรเหมือนกัน เช่นพอลิเอทิลีนกับพอลิไวนิลลิดีนคลอไรด์แต่พอลิเอทิลีนไม่มีขั้ว ในขณะที่พอลิไวนิลลิดีนคลอไรด์มีขั้ว พบว่าสภาพมีขั้วส่งผลให้ค่า

สัมประสิทธิ์การแพร่ลดลง ดังนั้นค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซของพอลิเอทิลีนจึงสูงกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์

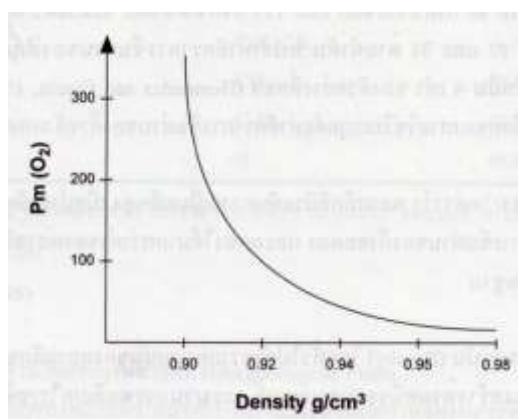
การจัดระเบียบ (Orientation) ของสายโซ่โมเลกุล จะทำให้เกิดโครงสร้างแบบผลึกมากขึ้น พลาสติกที่มีระดับของความเป็นผลึก (Crystallinity) สูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และการละลายต่ำ นั่นคือค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซลดลงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างผลึกจะขวางเส้นทางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่แพร่เข้ามา ทำให้โมเลกุลเหล่านี้เคลื่อนที่เป็นเส้นทางวกวน (Tortuous path) เป็นผลให้แพร่ออกมาได้ยากและใช้เวลามากขึ้น ตัวอย่าง พิล์มพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตที่ผ่านการจัดระเบียบของสายโซ่โมเลกุลที่ 90 องศาเซลเซียส และ 115 องศาเซลเซียส ซึ่งมีระดับของความเป็นผลึกร้อยละ 22 และ 31 ตามลำดับ พบว่าอัตราการซึมผ่านของฟิล์มพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตตัวอย่างแรกมีค่าเป็น 4 เท่า ของตัวอย่างที่สอง (Hernandez and Giacin, 1997) [28] ผลของการจัดระเบียบของสายโซ่โมเลกุลต่อค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซแสดงดังตารางที่ 2.5

Pascat (1985) [29] กล่าวว่าพลาสติกที่มีระดับความเป็นผลึกสูง เมื่อนำมาจัดระเบียบโมเลกุลจะทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซลดลง และลดลงได้มากกว่าค่าของพลาสติกที่มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นอสัณฐาน

ความหนาแน่น (Density) โดยทั่วไปค่าความหนาแน่นของพลาสติกชนิดหนึ่งๆ จะขึ้นกับโครงสร้างทางเคมีของมานอเมอร์ กระบวนการพอลิเมอไรเซชัน กระบวนการแปรรูป โดยเฉพาะขณะทำให้เย็น และกระบวนการจัดระเบียบโมเลกุล ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซจะลดลงเมื่อค่าความหนาแน่นของพลาสติกเพิ่มขึ้น และค่าความหนาแน่นของพลาสติกจะแปรผันโดยตรงกับระดับของความเป็นผลึก ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.13 และตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 ผลของการจัดระเบียบโมเลกุลต่อค่า $P_m(O_2)$ ของพลาสติก

Polymer	Degree of Orientation	$P_m(O_2)$
Polypropylene (PP)	0	57
	300%	30
Polystyrene (PS)	0	160
	300%	114
Polyester (PET)	0	3.8
	500%	1.9
Copolymer	0	0.38
70% Acrylonitrile	300%	0.34
30% Styrene		



รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับค่าอัตราการซึมผ่านของ ออกซิเจน สำหรับพลาสติกพอลิเอทิลีน

ตารางที่ 2.6 ผลของระดับความเป็นผลึกต่อค่า $P_m(O_2)$ ของพลาสติก

Polymer	%Crystallinity	$P_m(O_2)$
Low density polyethylene	50	182
High density polyethylene	80	42
Nylon 66 (soaked)	20	3
Nylon 66 (annealed)	40	0.6

- วัตถุเติมแต่งในพลาสติก (Plastic additives)

พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) มอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่เติมลงในพลาสติกโดยทั่วไปจะทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซสูงขึ้น (ยกเว้นสำหรับพลาสติกไซเซอร์บางประเภท) เช่น การเติมยางในพอลิไวนิลคลอไรด์จะทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มเป็น 2 เท่า หรือการเติมพลาสติกไซเซอร์ในพอลิไวนิลคลอไรด์อาจทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มได้ถึง 20 เท่า กรณีฟิล์มพลาสติกที่ไวต่อความชื้นซึ่งนิยมเรียกไฮโดรฟิลิกพลาสติก (Hydrophilic plastic) เช่น ไนลอน และ พอลิเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์เมื่ออยู่ในที่มีความชื้นสูง จะดูดซับน้ำเข้าไปในพลาสติกได้ โดยน้ำจะทำหน้าที่คล้ายพลาสติกไซเซอร์ทำให้โมเลกุลของพลาสติกเคลื่อนที่ได้มากขึ้น ดังนั้นค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซจะเพิ่มขึ้นตามความชื้นของฟิล์ม หรือความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

สารตัวเติม (Filler) โดยเฉพาะสารอนินทรีย์ที่ใช้เติมในพลาสติกเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความเสถียรของรูปร่าง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ทิตาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และ แป้งฝุ่น (Talc) จะมีผลทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านของพลาสติกนั้นเพิ่มหรือลดลงก็ได้ ขึ้นกับปริมาณที่เติม ขนาด และรูปร่างของสาร อย่างไรก็ตามสารตัวเติมส่วนใหญ่จะทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้น แต่ถ้ามีการใช้

สารเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างพลาสติกกับตัวเติม ซึ่งเรียกสารนี้ว่า Coupling agent เช่น ทิตาเนต (Titanate) และ ไสเลน (Silane) จะทำให้การซึมผ่านพลาสติกของก๊าซและไอน้ำลดลงได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ผลของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจนของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

%Filler (by volume)	Surface tests	Pm (O ₂)
0	None	0.189
15	None	0.394
25	None	0.787
15	Yes	0.098
25	Yes	0.059

- สมบัติของสารแพร่

ขนาด รูปร่าง และสภาพมีขั้วของสารแพร่มีผลต่อการซึมผ่านฟิล์มพลาสติก ซึ่งจะต้องพิจารณาเป็นกรณีเฉพาะ เนื่องจากมีหลายปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยทั่วไปสารแพร่ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กจะแพร่ได้เร็วกว่าพวกที่มีโมเลกุลใหญ่ เมื่อพิจารณาตารางที่ 2.8 พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าทั้งออกซิเจนและไนโตรเจน แต่ค่าอัตราการซึมผ่านกลับสูงกว่า

ตารางที่ 2.8 ขนาดโมเลกุลและสัดส่วนของค่าอัตราการซึมผ่านของไนโตรเจน ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์

Gas	Molecular diameter, Å ^o	Pm (X):Pm (O ₂)
N ₂	3.0	0.25
O ₂	3.1	1
CO ₂	3.4	6

สารแพร่ที่มีโมเลกุลเป็นเส้นตรงจะแพร่ได้ดีกว่าโมเลกุลเป็นวงหรือเป็นกิ่งก้าน และสารที่มีขั้วจะแพร่ผ่านพลาสติกที่มีขั้วได้ดี โมเลกุลที่ไม่มีขั้วจะแพร่ผ่านพลาสติกที่ไม่มีขั้วได้ดีกว่าผ่านพลาสติกที่มีขั้ว สารแพร่ที่เป็นไอของสารอินทรีย์ (Organic vapor) ซึ่งมักเกี่ยวข้องกับกลิ่นในอาหารและมักอยู่ในรูปของสารผสม อาจจะมีผลเสริมซึ่งกันและกัน ทำให้การซึมผ่านของสารเหล่านั้นหรือบางชนิดเพิ่มขึ้น เช่นกรณีของฟิล์ม BOPP (Bi-axially oriented polypropylene) เมื่อไปผสมเอทิลแอลกอฮอล์กับ ลิโมเนน

(Ethyl acetate and Limonene) ที่เป็นสารแพร่ พบว่า ลิโมนีนจะทำให้การซึมผ่านของเอทิลแอซีเตตเพิ่มขึ้นเป็น 5 เท่าของค่าการซึมผ่านของเอทิลแอซีเตตบริสุทธิ์ และพบว่าเอทิลแอซีเตตกลับมีผลต่อการซึมผ่านของลิโมนีนน้อยมาก ปรากฏการณ์แบบนี้จะพบเสมอในการบรรจุอาหารที่มีกลิ่นหอมจากสารระเหยอินทรีย์หลายๆ ชนิด และจะเรียกสารที่ไปเสริมให้อีกสารหนึ่งในสารผสมนั้นมีการซึมผ่านดีขึ้นว่า Co-permeant

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhang และคณะ (2006) [5] ได้ทำการศึกษาวิธีการปรับปรุงผิวของพอลิเอทิลีนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรีย พบว่าการปรับปรุงผิวพอลิเอทิลีนด้วยวิธี Plasma immersion ion implantation สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลือบสารยับยั้งแบคทีเรียบนพื้นผิว และส่งผลให้สมบัติในการต้านแบคทีเรียสูงขึ้นได้ เนื่องจากวิธีการดังกล่าวทำให้พื้นผิวของพอลิเอทิลีนมีความเป็นขรุขระมากขึ้น

Park และคณะ (2001) [6] ได้ศึกษาผลของหมู่แทนที่ในพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ต่อความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรีย พบว่าพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากอนุพันธ์ของไวนิลโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟินอลและหมู่กรดเบนโซอิกต่างกัน จะส่งผลต่ออัตราการเกิดบริเวณยับยั้งแบคทีเรีย โดยพอลิเมอร์ที่มีอนุหมู่มิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเป็นคล้ายยางสูงจะมีความสามารถในการยับยั้งต่ำลง เนื่องจากความสามารถดังกล่าวขึ้นอยู่กับความสามารถในการแพร่ของสารยับยั้งในพอลิเมอร์เมตริกซ์

Chung และคณะ (2003) [7] ได้ศึกษาผลของตัวกลางที่ใช้ในการยับยั้งแบคทีเรียของโคพอลิเมอร์ พบว่าประสิทธิภาพของไตรโคลซาน (Triclosan) ที่ผสมใน สไตรีน-อะคริเลต โคพอลิเมอร์ (Styrene-acrylate copolymer) ต่อความสามารถในการแพร่เพื่อไปยับยั้งเชื้อฯ ขึ้นกับสถานะที่เหมาะสม โดยประสิทธิภาพการแพร่ในตัวกลางจากน้อยไปมาก คือ น้ำ สารละลายเอทานอลเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ (จำลองสภาพกรดในอาหาร) และ *n*-hexane (จำลองสภาพไขมันในอาหาร) ตามลำดับ จากผลการศึกษาข้างต้นสามารถสังเกตเห็นได้ว่า ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียนั้นขึ้นกับความสามารถในการแพร่ของสารยับยั้งไปยังแบคทีเรีย

Cooksey และคณะ (2001) [30] ได้แบ่งชนิดของฟิล์มที่มีสารยับยั้งจุลินทรีย์เพื่อใช้ทำวัสดุหีบห่ออาหารเป็น 2 ชนิดคือ ชนิดที่หนึ่ง ทำได้โดยการผสมสารยับยั้งฯ ลงไปในฟิล์มโดยตรง ส่วนฟิล์ม ชนิดที่สองสามารถทำได้โดยการเคลือบวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นตัวพาสารยับยั้งฯ (Carrier) ลงบนผิวฟิล์ม ซึ่งจากกรณีทั้งสองวิธีที่จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อจุลินทรีย์มากที่สุด จำเป็นต้องทำให้เนื้ออาหารและฟิล์มสัมผัสกันโดยตรง อย่างไรก็ตาม อีกแนวทางหนึ่งที่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพได้โดยไม่ต้องทำให้เกิดการสัมผัสกันโดยตรงคือ การใช้สารยับยั้งจุลินทรีย์ที่สามารถระเหยออกมาได้ซึ่งในระบบหลังนี้การปลดปล่อยสารยับยั้งจุลินทรีย์ออกมาสู่อากาศในอัตราที่ต่ำสามารถเพิ่มผลกระทบ

ต่อการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้ยาวนานและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น นอกจากนี้เพื่อลดการสูญเสียสารยับยั้งจุลินทรีย์ออกไปสู่ภายนอกโดยไม่จำเป็นแล้วสามารถทำได้โดยการเคลือบผิวอีกด้านหนึ่งด้วยฟิล์มกั้นการแพร่ผ่าน (Barrier)

Kalyon และ Olgun (2001) [31] ได้ศึกษาประสิทธิภาพของการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุผสมระหว่างพอลิสไตรีน (PS) และไตรโคลซาน (Triclosan) ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยวิธีการผสมแบบหลอมเหลว (Melt mixing) จากผลการทดสอบ พบว่า วัสดุผสมดังกล่าวสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดีในระยะเริ่มต้น 5 ชั่วโมงแรกเท่านั้น สำหรับในระยะยาวหลังจากเวลาผ่านไป 20 ชั่วโมง ไตรโคลซานไม่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้เลย ถึงแม้ว่าวัสดุผสมจะมีความเข้มข้นของไตรโคลซานที่สูงก็ตาม อย่างไรก็ตาม เมื่อเติมสารละลายเอทานอลลงไปในงานทดสอบ พบว่า ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นจากเดิมอีกครั้ง เนื่องจากเอทานอลสามารถไปละลายไตรโคลซานให้แพร่ออกมาจากแผ่นวัสดุผสมมากขึ้น และสามารถแสดงฤทธิ์การยับยั้งแบคทีเรียได้ต่อไป นอกจากนี้ยังได้เสนอว่าไตรโคลซานมีกลไกในการยับยั้งแบคทีเรียด้วยการต่อต้านการยับยั้งการลำเลียงเอนไซม์ที่มีชื่อว่า Enoylacyl carrier protein reductase (ENR) ซึ่งสารดังกล่าวมีความสำคัญต่อการสังเคราะห์ไขมันในเซลล์ของแบคทีเรีย

Jeong และคณะ (2005) [32] ได้ศึกษาผลของอนุภาคโลหะเงินระดับนาโนเมตรที่มีต่อการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยอนุภาคโลหะเงินเตรียมขึ้นจาก Colloid ใน 3 ลักษณะ คือ อนุภาคโลหะเงินที่กระจายตัวอยู่ในน้ำ อนุภาคโลหะเงินที่กระจายตัวอยู่ในเอทานอล อนุภาคโลหะเงินผสมกับกัมมะถันที่กระจายตัวอยู่ในเอทานอล จากนั้นนำไปเคลือบผิวเส้นใยพอลิพรอพิลีนด้วย Dipping pad dry method แล้วนำไปทดสอบความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียด้วยวิธี AATCC – 100 แบคทีเรียที่ใช้ทดสอบคือ *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumonia* และ *Escherchia coli* ผลงานวิจัย พบว่า อนุภาคโลหะเงินขนาดเล็กระดับนาโนเมตร ความเข้มข้น 10 ppm สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยพบเชื้อแบคทีเรียหลงเหลืออยู่เพียง 10 เซลล์ เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่ออนุภาคดังกล่าวมีขนาดเล็กส่งผลให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคโลหะเงินมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ส่วนผลของวิธีการเตรียมอนุภาคโลหะเงิน พบว่า โลหะเงินที่เตรียมโดยผสมกับกัมมะถันที่กระจายตัวอยู่ในเอทานอลมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียดีที่สุด

Iconomopoulou และ Voyiatzis (2005) [33] ได้ศึกษาวิธีการควบคุมการปลดปล่อยสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ผสมอยู่ในพอลิเมอร์เมตริกซ์ด้วยเทคนิคการยืดดึงทิศทางเดียว (Uniaxially drawn film) ซึ่งสารยับยั้งแบคทีเรียที่ใช้คือ ไตรโคลซาน ส่วนพอลิเมอร์เมตริกซ์คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง สำหรับการวัดระดับการจัดเรียงของโมเลกุลทำได้โดยอาศัยเทคนิค Polarized raman spectra และการวัดปริมาณไตรโคลซานที่ละลายออกมาโดยอาศัยเทคนิค UV-Vis spectroscopy จากผลการวิจัยพบว่า

การปรับสัดส่วนการคั่งยัดซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณความเป็นผลึกนั้น สามารถควบคุมการปลดปล่อยสารไตรโคลซานที่อยู่ในพอลิเมอร์เมตริกซ์ออกมาสู่ตัวกลางภายนอกให้มีอัตราต่ำลงและยาวนานขึ้นได้โดยกลไกที่ให้อธิบายเกี่ยวข้องกับการแพร่ของไตรโคลซาน ที่อาศัยอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งมีการจัดเรียงตัวที่เปลี่ยนไป

Tomohiko และ Takao (2006) [34] ได้ศึกษาสารผสมระหว่างสารอินทรีย์ (Organic) และสารอนินทรีย์ (Inorganic) เพื่อสร้างวัสดุชนิดใหม่ที่มีสมบัติในการยับยั้งได้ทั้งเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา ซึ่งเรียกว่า Hybrid Material (CS-100) สำหรับสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่เลือกใช้คือ โลหะเงิน (Silver) และสารยับยั้งเชื้อราคือ Benzimidazol สารทั้งสองชนิดจะถูกนำมาผสมกันและตรึงบนซิลิกา (SiO_2) จากผลการศึกษาพบว่า CS-100 สามารถทนความร้อนได้ดี และสามารถทนความเป็นกรดและด่างได้ในช่วง pH ตั้งแต่ 3-13 ส่วนสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียซึ่งทดสอบโดยการวัดรัศมีการยับยั้งเชื้อ (Halo test) พบว่า รัศมีการยับยั้งเชื้อมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 3-5 มิลลิเมตร แบคทีเรียทดสอบที่ใช้คือ *Staphylococcus aureus* และ *Escherichia coli* สำหรับการทดสอบการยับยั้งเชื้อราซึ่งใช้การทดสอบวิธีเดียวกับการทดสอบแบคทีเรีย พบว่า รัศมีการยับยั้งเชื้อมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5-7 มิลลิเมตร เชื้อราทดสอบที่ใช้คือ *Aspergillus niger*

Geany และคณะ (2009) [35] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเอทิลีนที่มีปริมาณไตรโคลซานแตกต่างกัน โดยทดสอบกับเชื้อ *Escherichia coli* *Staphylococcus aureus* *Listeria innocua* *Salmonella choleraesuis* และ *Pseudomonas aeruginosa* พบว่า สารไตรโคลซานไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีน และสามารถสังเกตพบรัศมีการยับยั้งเชื้อเมื่อทดสอบกับเชื้อ *E.coli* และ *S.aureus* ยกเว้นในกรณีของ *L.innocua* *S.choleraesuis* และ *P.aeruginosa* สำหรับประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อเมื่อสังเกตจากการลดลงของโคโลนีพบว่าการลดลงถึง 1.5 รอบลอการิทึม เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่มีสารไตรโคลซาน

Halek (1988) [36] ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพในการนำพอลิเมอร์มาทำเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร เพื่อสังเกตโครงสร้างทางเคมีและทางกายภาพ และการเกิดปฏิกิริยาทางกายภาพต่อส่วนผสมของอาหาร และพบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา คือ ความชื้น และ โครงสร้างผลึกของทั้งพอลิเมอร์และส่วนผสมของอาหาร

Li และ Ji (2008) [37] ได้ทำการทดสอบการป้องกันการติดเชื้อของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำโดยใช้สารยับยั้งแบคทีเรียแบบอินทรีย์คือไตรโคลซาน และอนินทรีย์คือไอออนเพียว และเชื้อที่ใช้ทดสอบคือ *E.coli* และ *S.aureus* พบว่าชิ้นงานทดสอบที่ผสมสารยับยั้งแบคทีเรียชนิดไตรโคลซานสามารถยับยั้งการติดเชื้อได้ถึง 99.9 เปอร์เซ็นต์ แต่ในชิ้นงานที่ผสมสารยับยั้งแบคทีเรียชนิดไอออนเพียวพบว่า มีแบคทีเรียจำนวนมากติดอยู่ที่บริเวณผิวชิ้นงาน

Iconomopoulou และคณะ (2005) [38] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการปลดปล่อยสารยับยั้งแบคทีเรียชนิดไตรโคซานและเกลือโพแทสเซียมจากพอลิไสตรีนไดไวนิลเบนซีน โดยใช้เครื่อง UV-visible absorption spectroscopy พบว่าปริมาณสัดส่วนของสารยับยั้งแบคทีเรียมีผลต่อปริมาณการปลดปล่อยของสารออกมา และพบว่าความหนาแน่นของการ Cross-link มีผลต่อการขัดขวางไม่ให้สารยับยั้งสามารถปลดปล่อยออกมานอกพอลิเมอร์ได้

Chammanee และคณะ (2009) [39] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลางที่มีการผสมสารยับยั้งแบคทีเรีย 3 ชนิดได้แก่ TROYSAN-S88 HPQM และ ZEOMIC โดยทำการทดสอบการเกิดครีสมิการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและการนับจำนวนโคโลนีที่หลงเหลืออยู่ พบว่าครีสมิการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของพอลิเอทิลีนผสม HPQM มีขนาดใหญ่ที่สุด แต่ในกรณีของพอลิเอทิลีนผสม ZEOMIC ไม่พบครีสมิการยับยั้งเชื้อ และผลการนับจำนวนโคโลนีที่เหลืออยู่พบว่าพอลิเอทิลีนผสม HPQM สามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ถึง 99.9 เปอร์เซ็นต์

Zhang และคณะ (2005) [40] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงผิวของพอลิไวนิลคลอไรด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรีย โดยใช้สารยับยั้งแบคทีเรีย 2 ชนิดคือ ไตรโคซาน และโบรโนพอล พบว่าการปรับปรุงผิวโดยวิธี Plasma immersion ion implantation ทำให้ผิวของพอลิไวนิลคลอไรด์มีหมู่ที่ชอบน้ำมากขึ้นจึงทำให้การเคลือบสารยับยั้งมีประสิทธิภาพมากขึ้น และส่งผลต่อความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียมีมากขึ้นตามไปด้วย

Ramesh และ Chai (2007) [41] ได้ทำการศึกษาฟิล์มพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์พอลิไวนิลคลอไรด์-ลิเทียมไทรเฟส โดยใช้เครื่อง FTIR เพื่อศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิไวนิลคลอไรด์และลิเทียมไทรเฟส พบว่าเลขคลื่นของพอลิไวนิลคลอไรด์และลิเทียมไทรเฟสมีการซ้อนทับกันรวมถึงมีการเปลี่ยนที่ ซึ่งเป็นการแสดงว่าพอลิไวนิลคลอไรด์และลิเทียมไทรเฟสมีการทำปฏิกิริยากัน

Rai และ Singh (2003) [42] ได้ทำการศึกษาวัสดุคอมพอสิตของพอลิไสตรีนและแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตในพอลิไสตรีนส่งผลให้ค่า Fracture toughness Flexural strength และ elastic modulus ของพอลิไสตรีนมีค่าเพิ่มขึ้น

Chen และคณะ (2004) [43] ได้ทำการศึกษาผลของการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตระดับนาโนปริมาณต่างๆ ลงในพอลิไวนิลคลอไรด์ พบว่าการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้พอลิไวนิลคลอไรด์มีค่า Impact strength Flexural modulus Vicat softening temperature Yield strength และ Elongation at break เพิ่มขึ้นตามปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ผสมลงไป

Sahebian และคณะ (2009) [44] ได้ทำการศึกษาผลของการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตระดับนาโนลงในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง พบว่าการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไป 10 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีค่า Heat capacity Sensible และ Crystallinity index เพิ่มขึ้น