บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

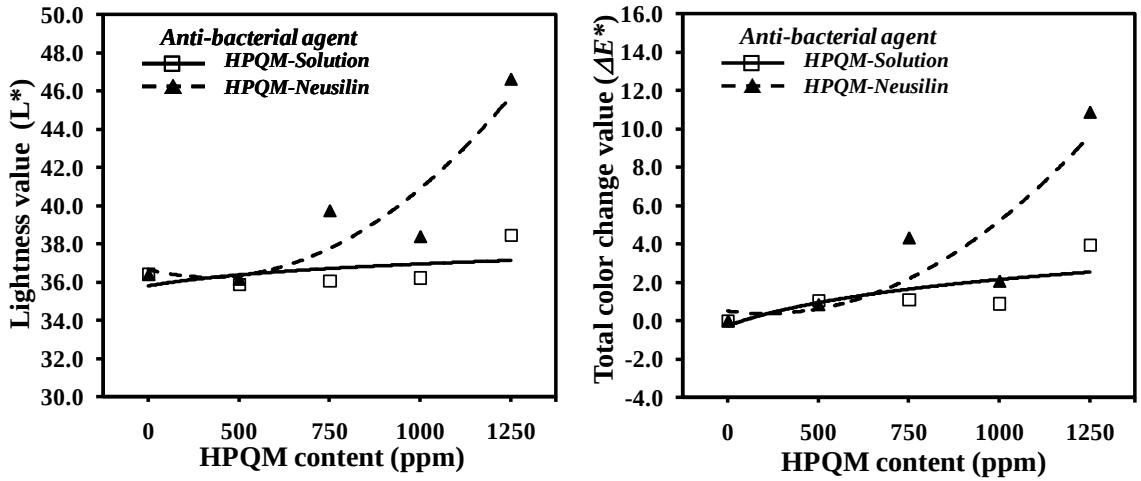
4.1 การวิเคราะห์สมบัติกายภาพและสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนผสม HPQM

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสม HPQM รูปแบบสารละลาย และรูปแบบสารดูดซับ ประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงสี สมบัติการเปียกผิว และสมบัติเชิงกล ทางด้าน มอดุลัสแรงดึง (Tensile modulus) ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และการยืดตัวที่จุดขาด (Elongation at break)

4.1.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสม HPQM

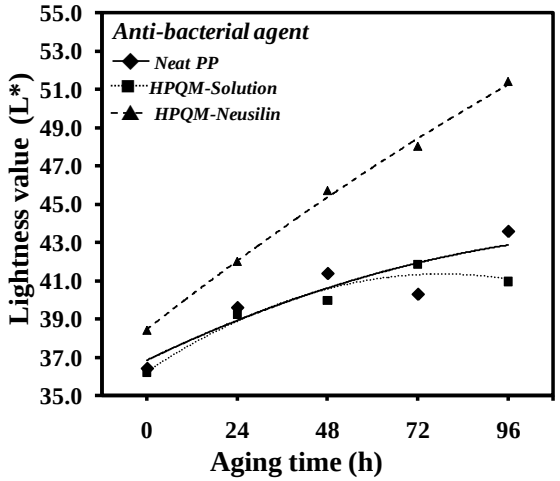
ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM ในพอลิโพรพิลีนเพื่อผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร ซึ่งรูปลักษณ์ภายนอกหรือสีสันของบรรจุภัณฑ์เป็นลักษณะสำคัญหนึ่งที่ส่งผลโดยต่อ ความสนใจจากผู้บริโภค ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรวจสอบถึงอิทธิพลของสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM ในรูปแบบสารละลาย และรูปแบบสารดูดซับ ว่าส่งผลต่อค่าสีของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนหรือไม่ ด้วยเทคนิคการวัดค่าสี ด้วยเครื่อง UV-Vis-NIR Recording Spectrophotometer การวิเคราะห์ค่าความสว่าง (Lightness, L*) ของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสมสาร HPQM รูปแบบสารละลายและรูปแบบสารดูดซับ ที่ปริมาณการผสม 500, 750, 1000 และ 1250 ส่วนในล้านส่วน พบว่าปริมาณการผสมที่เพิ่มขึ้นของสาร HPQM รูปแบบสารละลาย ไม่ส่งผลต่อค่าความสว่างของชิ้นงานในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณการผสมของสาร HPQM รูปแบบสารดูดซับ ส่งผลให้ชิ้นงานมีแนวโน้มค่าความสว่างที่สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผลของอนุภาคสารดูดซับนูซิลินซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของ HPQM รูปแบบสารดูดซับมีลักษณะเป็นผงสีขาว ส่งผลให้ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนมีความสว่างเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.1(ก)

สำหรับการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมด (Total color change, ΔE^*) ของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสมสาร HPQM พบว่าการเพิ่มปริมาณการผสมของ HPQM รูปแบบสารละลายไม่ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ในขณะที่การเพิ่มปริมาณการผสมของ HPQM รูปแบบสารดูดซับ ส่งผลให้ชิ้นงานมีแนวโน้มค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมดสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผลของค่าความสว่างที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมดของชิ้นงาน แสดงในรูปที่ 4.1(ข)



รูปที่ 4.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของพอลิโพรพิลีนผสมสารสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM โดย (ก) ค่าความสว่าง และ (ข) ค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมด

สำหรับการวิเคราะห์อิทธิพลของสภาวะบ่มเร่งด้วยเครื่องเร่งสภาวะการทดสอบ (Accelerated weathering tester, QUV) พบว่าค่าความสว่างของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ผสม HPQM รูปแบบสารละลาย และรูปแบบสารดูดซับ มีค่าความสว่างเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มเร่งเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเสื่อมสลายของพอลิโพรพิลีนส่งผลให้บริเวณผิวของชิ้นงานเกิดริ้วรอย และความขาวมากขึ้น โดยพบว่าชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสม HPQM รูปแบบสารดูดซับมีค่าความสว่างสูงกว่าชิ้นงานพอลิโพรพิลีน และพอลิโพรพิลีนผสม HPQM รูปแบบสารละลาย เนื่องจากอิทธิพลจากความขาวของสารดูดซับนูซิลินดังที่กล่าวไว้ แสดงดังรูปที่ 4.2



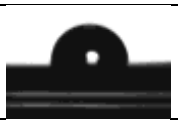
รูปที่ 4.2 ค่าความสว่างของพอลิโพรพิลีนผสมสารสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลาย และรูปแบบสารดูดซับที่ปริมาณการผสม 1,000 ส่วนในล้านส่วน หลังผ่านสภาวะบ่มเร่ง

4.1.2 การทดสอบการเปียกผิวของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสม HPQM

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM ในพอลิโพรพิลีนด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ อาจส่งผลให้ให้สารยับยั้งเชื้อ HPQM ถูกกักไว้ภายในชิ้นงานพอลิโพรพิลีน **[39]** สารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์จำเป็นต้องแพร่ออกมาบริเวณผิวชิ้นงานจึงสามารถแสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ ซึ่งสามารถพิสูจน์การแพร่ของสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้จากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีบริเวณผิวชิ้นงาน โดยการทดสอบการเปียกผิว (Wettability test) ซึ่งทำได้โดยการวัดมุมสัมผัสของน้ำบนผิวชิ้นงานทดสอบพอลิโพรพิลีนผสมสารสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลาย และรูปแบบสารดูดซับ ที่ปริมาณ 500 750 1,000 และ 1,250 ส่วนในล้านส่วน จากผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าชิ้นงานที่ผสม HPQM มีค่ามุมสัมผัสบริเวณผิวของชิ้นงานต่ำกว่าพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ โดยพบว่าพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์มีค่ามุมสัมผัสเท่ากับ 92.81 องศา ในขณะที่เมื่อทำการผสม HPQM รูปแบบสารละลาย และรูปแบบสารดูดซับพบว่ามีค่ามุมสัมผัสสูงสุดเท่ากับ 86.93 และ 87.27 องศา ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติความชอบน้ำของสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM ที่ทำการผสมร่วมกับพอลิโพรพิลีน ส่งผลให้ชิ้นงานมีความชอบน้ำเพิ่มขึ้น และนอกจากนี้ ค่ามุมสัมผัสที่ต่ำลงแสดงให้เห็นว่า สารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM สามารถแพร่ออกมาบริเวณผิวชิ้นงานได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jai-eau และคณะ **[54]** พบว่าการเติมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM ในยางธรรมชาติ

ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่ามุมสัมผัสต่ำลง เนื่องจากสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM สามารถแพร่ออกมาบริเวณผิวของชิ้นงานได้ และเมื่อพิจารณาค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสม HPQM รูปแบบสารละลาย และHPQM รูปแบบสารดูดซับ พบว่าพอลิโพรพิลีนที่ผสม HPQM รูปแบบสารละลายมีค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวของชิ้นงานที่สูงกว่า ชิ้นงานที่ผสม HPQM รูปแบบสารดูดซับ และพบว่าค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวของชิ้นงานมีแนวโน้มคงที่เมื่อเพิ่มปริมาณการผสมของ HPQM รูปแบบสารละลาย ในขณะที่การเพิ่มปริมาณการผสมของ HPQM รูปแบบสารดูดซับ ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้คาดว่าเนื่องจากสารดูดซับนูซิลิน หรือแมกนีเซียมอลูมิโนเมตาซิลิเกต ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของ HPQM รูปแบบสารดูดซับอาจช่วยส่งเสริมให้สารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM สามารถแพร่ออกสู่บริเวณผิวชิ้นงานได้มากขึ้น ส่งผลให้พบมุมสัมผัสบริเวณผิวชิ้นงานมีแนวโน้มลดลง

ตารางที่ 4.1 ค่ามุมสัมผัสบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสมสารสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM

ปริมาณสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ (ส่วนในล้านส่วน)		**มุมสัมผัส (องศา)**	
HPQM รูปแบบสารละลาย	0	92.81 ± 1.57	
	500	86.93 ± 1.80	
	750	86.22 ± 7.53	
	1,000	86.17 ± 0.71	
	1,250	85.32 ± 1.96	
HPQM รูปแบบสารดูดซับ	500	87.27 ± 1.81	
	750	85.17 ± 1.29	
	1,000	84.92 ± 1.15	
	1,250	82.78 ± 0.83	

4.1.3 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสม HPQM

สำหรับการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนที่ผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบสมบัติ มอดุลัสแรงดึง (Tensile modulus) ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และการยืดตัวที่จุดขาด (Elongation at break) โดยเปรียบเทียบการเติมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลาย และรูปแบบสารดูดซับ ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลาย และรูปแบบสารดูดซับ มีค่ามอดุลัสแรงดึงอยู่ในช่วง 578.42 ± 20.78 ถึง 683.88 ± 9.80 เมกะปาสคาล และ 562.31 ± 5.00 ถึง 628.40 ± 10.67 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ในขณะที่ชิ้นงานที่ไม่ผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์มีค่าเท่ากับ 664.13 ± 74.98 เมกะปาสคาล ซึ่งอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานต่อแรงดึงพบว่าชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลายและรูปแบบสารดูดซับมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงอยู่ในช่วง 36.54 ± 0.16 ถึง 37.05 ± 0.16 เมกะปาสคาล และ 34.32 ± 0.66 ถึง 37.84 ± 0.02 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ในขณะที่ชิ้นงานที่ไม่ผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์มีค่าเท่ากับ 37.51 ± 0.12 เมกะปาสคาล ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และเมื่อพิจารณาค่าการยืดตัวที่จุดขาดพบว่าชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลายและรูปแบบสารดูดซับ มีค่าการยืดตัวที่จุดขาดอยู่ในช่วงร้อยละ 23.88 ± 0.95 ถึงร้อยละ 29.37 ± 0.37 และร้อยละ 24.55 ± 1.76 ถึงร้อยละ 28.69 ± 1.52 ตามลำดับ ในขณะที่ชิ้นงานที่ไม่ผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์มีค่าเท่ากับร้อยละ 25.65 ± 0.55 แสดงให้เห็นว่า การผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM ทั้งในรูปแบบสารละลายและรูปแบบสารดูดซับ ที่ความเข้มข้นสูงสุด 1,250 ส่วนในล้านส่วน ไม่ส่งผลต่อค่ามอดุลัสแรงดึง ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าการยืดตัวที่จุดขาดของชิ้นงาน ทั้งนี้อาจเนื่องจากสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในช่วงความเข้มข้นการผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Matrix) ทำให้ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าการยืดตัวที่จุดขาดของพอลิโพรพิลีนผสมสารสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM

ปริมาณสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ (ส่วนในล้านส่วน)		ค่ามอดุลัสแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ค่าความต้านทานแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ค่าการยืดตัวที่จุดขาด (ร้อยละ)
HPQM รูปแบบสารละลาย	0	664.13 ± 74.98	37.51 ± 0.12	25.65 ± 0.55
	500	630.71 ± 28.30	36.54 ± 0.16	29.37 ± 0.37
	750	578.42 ± 20.78	36.54 ± 0.32	27.10 ± 0.72
	1,000	683.88 ± 9.80	37.05 ± 0.16	24.38 ± 1.18
	1,250	680.14 ± 14.35	36.98 ± 0.35	23.88 ± 0.95
HPQM รูปแบบสารดูดซับ	500	562.31 ± 5.00	37.84 ± 0.02	24.55 ± 1.76
	750	628.40 ± 10.67	36.04 ± 0.72	25.54 ± 2.26
	1,000	625.85 ± 75.68	36.36 ± 0.62	20.62 ± 1.43
	1,250	590.72 ± 18.16	34.32 ± 0.66	28.69 ± 1.52

จากนั้นทำการศึกษาอิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยเครื่องเร่งสภาวะการทดสอบ ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 โดยพบว่าค่ามอดุลัสแรงดึงที่ระยะเวลาบ่มเร่ง 24 ชั่วโมง ชิ้นงานผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลาย และรูปแบบสารดูดซับ มีค่าเพิ่มขึ้นจากก่อนบ่มเร่ง หรืออยู่ในช่วง 707.73 ± 13.41 ถึง 755.59 ± 49.26 เมกะปาสคาล สำหรับรูปแบบสารละลาย และ 732.90 ± 46.60 ถึง 740.57 ± 24.82 เมกะปาสคาล สำหรับรูปแบบสารดูดซับ เมื่อระยะเวลาบ่มเร่ง 48 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลาย และรูปแบบสารดูดซับ มีค่ามอดุลัสแรงดึงอยู่ในช่วงใกล้เคียงก่อนบ่มเร่ง ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการเสื่อมสลายของพอลิโพรพิลีน ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.2 พบว่าในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการได้เกิดการแข่งขันกันระหว่างปฏิกิริยาการเกิดพันธะข้าม และปฏิกิริยาการแตกออกของสายโซ่พอลิเมอร์ จากนั้นเมื่อระยะเวลาผ่านไปปฏิกิริยาการแตกออกของสายโซ่พอลิเมอร์มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าปฏิกิริยาการเกิดพันธะข้าม ดังนั้นจึงพบว่าที่ระยะเวลาบ่มเร่ง 24 ชั่วโมง ชิ้นงานผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลาย และรูปแบบสารดูดซับมีค่ามอดุลัสแรงดึงเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีความแข็งเปราะมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากอิทธิพลของปฏิกิริยาการเกิดพันธะข้าม และพบว่าเมื่อระยะเวลา

บ่มเร่ง 48 ชั่วโมง ชิ้นงานผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลาย และรูปแบบสารดูดซับมีค่ามอดุลัสแรงดึงลดลง เนื่องจากอิทธิพลของปฏิกิริยาการแตกออกของสายโซ่พอลิเมอร์มีอิทธิพลสูงกว่าปฏิกิริยาการเกิดพันธะข้าม

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ระยะเวลาบ่มเร่ง 24 ชั่วโมง ชิ้นงานผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลายและรูปแบบสารดูดซับ ไม่พบการเปลี่ยนแปลง เมื่อระยะเวลาบ่มเร่ง 48 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลาย และรูปแบบสารดูดซับ มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลงจากก่อนบ่มเร่ง หรืออยู่ในช่วง 24.87±1.75 ถึง 27.13±2.80 เมกะปาสคาล สำหรับรูปแบบสารละลาย และ 24.90±2.38 ถึง 26.89±2.80 เมกะปาสคาล สำหรับรูปแบบสารดูดซับ ซึ่งเห็นได้ว่าที่ระยะเวลาบ่มเร่ง 48 ชั่วโมง ชิ้นงานมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลง เนื่องจากอิทธิพลของการแตกออกของสายโซ่พอลิเมอร์ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบมอดุลัสแรงดึง

เมื่อพิจารณาค่าการยืดตัวที่จุดขาด พบว่าที่ระยะเวลาบ่มเร่ง 24 ชั่วโมง ชิ้นงานผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลาย และรูปแบบสารดูดซับมีค่าการยืดตัวที่จุดขาดลดลงจากค่าก่อนบ่มเร่งซึ่งอยู่ในช่วงร้อยละ15.06 ± 2.39 ถึงร้อยละ 19.57 ± 1.27 สำหรับรูปแบบสารละลาย และร้อยละ17.89 ± 3.31 ถึงร้อย 19.57 ± 1.27 สำหรับรูปแบบสารดูดซับ ที่ระยะเวลาบ่มเร่ง 48 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานมีค่าการยืดตัวที่จุดขาดลดลงจากชิ้นงานบ่มเร่ง 24 ชั่วโมง ซึ่งอยู่ในช่วงร้อยละ 5.27 ± 0.34 ถึงร้อยละ 6.90 ± 1.30 สำหรับรูปแบบสารละลาย และ ร้อยละ 5.63 ± 0.50 ถึงร้อย 6.41 ± 0.40 สำหรับรูปแบบสารดูดซับ ซึ่งเห็นได้ว่าการยืดตัวที่จุดขาดมีค่าลดลง เมื่อระยะเวลาการบ่มเร่งเพิ่มขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของปฏิกิริยาการเกิดพันธะข้าม และปฏิกิริยาการแตกออกของสายโซ่พอลิเมอร์ในกระบวนการเสื่อมสลายของพอลิโพรพิลีน ส่งผลให้ชิ้นงานผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลาย และรูปแบบสารดูดซับมีความสามารถในการยืดตัวลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบมอดุลัสแรงดึง และการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

นอกจากนี้ผลการทดสอบที่ระยะเวลาบ่มเร่งเป็น 72 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ผสมและไม่ผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM มีการเสื่อมสลายโดยมีลักษณะเปราะ แตกหักง่าย และพบว่ามีเศษอนุภาคหลุดออกจากชิ้นงานเป็นจำนวนมาก ไม่สามารถตัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบได้

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มระยะเวลาบ่มเร่ง ส่งผลให้ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM ทั้งรูปแบบสารละลายและรูปแบบสารดูดซับ มีค่ามอดุลัสแรงดึงเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าการยืดตัวที่จุดขาดลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเสื่อมสลายของ พอลิโพรพิลีนเมื่อสัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเลต **[56]** ส่งผลให้มีความแข็งและเปราะเพิ่มขึ้น โดยทั้งนี้ รูปแบบ และปริมาณการผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM ไม่ส่งผลต่อค่ามอดุลัสแรงดึง ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าการยืดตัวที่จุดขาด เนื่องจากปริมาณการผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในงานวิจัยนี้มีอาจมีค่าต่ำจนไม่สามารถแสดงอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลดังกล่าว **[57]**

ตารางที่ 4.3 สมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนผสมสารสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลาย หลังการบ่มเร่งด้วยเครื่องเร่งสภาวะการทดสอบ

ปริมาณ HPQM รูปแบบสารละลาย (ส่วนในล้านส่วน)		**ค่ามอดุลัสแรงดึง (เมกะปาสคาล)**	**ค่าความต้านทานแรงดึง (เมกะปาสคาล)**	**ค่าการยืดตัวที่จุดขาด (ร้อยละ)**
ไม่ผ่านการบ่มเร่ง	0	664.13 ± 74.98	37.51 ± 0.12	25.65 ± 0.55
	750	578.42 ± 20.78	36.54 ± 0.32	27.10 ± 0.72
	1,000	683.88 ± 9.80	37.05 ± 0.16	24.38 ± 1.18
บ่มเร่ง 24 ชั่วโมง	0	740.57 ± 24.82	36.74 ± 0.28	19.57 ± 1.27
	750	755.59 ± 49.26	36.38 ± 0.91	15.06 ± 2.39
	1,000	707.73 ± 13.41	37.14 ± 0.78	18.53 ± 1.18
บ่มเร่ง 48 ชั่วโมง	0	663.24 ± 54.52	26.89 ± 2.80	6.41 ± 0.40
	750	591.00 ± 7.83	24.87 ± 1.75	5.27 ± 0.34
	1,000	573.83 ± 12.56	27.13 ± 2.80	6.90 ± 1.30
บ่มเร่ง 72 ชั่วโมง	0	N/A	N/A	N/A
	750	N/A	N/A	N/A
	1,000	N/A	N/A	N/A
บ่มเร่ง 96 ชั่วโมง	0	N/A	N/A	N/A
	750	N/A	N/A	N/A
	1,000	N/A	N/A	N/A

***หมายเหตุ:** N/A หมายถึง ไม่สามารถตัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบได้

ตารางที่ 4.4 สมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนผสมสารสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารดูดซับหลังการบ่มเร่งด้วยเครื่องเร่งสภาวะการทดสอบ

ปริมาณ HPQM รูปแบบสารดูดซับ (ส่วนในล้านส่วน)		**ค่ามอดุลัสแรงดึง (เมกะปาสคาล)**	**ค่าความต้านทานแรงดึง (เมกะปาสคาล)**	**ค่าการยืดตัวที่จุดขาด (ร้อยละ)**
ไม่ผ่านการบ่มเร่ง	0	664.13 ± 74.98	37.51 ± 0.12	25.65 ± 0.55
	500	562.31 ± 5.00	37.84 ± 0.02	24.55 ± 1.76
	1,000	625.85 ± 75.68	36.36 ± 0.62	20.62 ± 1.43
บ่มเร่ง 24 ชั่วโมง	0	740.57 ± 24.82	36.74 ± 0.28	19.57 ± 1.27
	500	739.48 ± 12.19	38.10 ± 0.38	17.89 ± 3.31
	1,000	732.90 ± 46.60	36.89 ± 0.17	18.43 ± 2.52
บ่มเร่ง 48 ชั่วโมง	0	663.24 ± 54.52	26.89 ± 2.80	6.41 ± 0.40
	500	617.71 ± 21.32	26.48 ± 3.34	5.63 ± 0.50
	1,000	587.82 ± 27.12	24.90 ± 2.38	6.15 ± 1.40
บ่มเร่ง 72 ชั่วโมง	0	N/A	N/A	N/A
	500	N/A	N/A	N/A
	1,000	N/A	N/A	N/A
บ่มเร่ง 96 ชั่วโมง	0	N/A	N/A	N/A
	500	N/A	N/A	N/A
	1,000	N/A	N/A	N/A

***หมายเหตุ:** N/A หมายถึง ไม่สามารถตัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบได้

4.2 ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในเชิงคุณภาพ และในเชิงปริมาณ โดยอาศัยเทคนิคการวัดรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และเทคนิคการนับเชื้อแบคทีเรียตามลำดับของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลาย และรูปแบบสารดูดซับ โดยใช้เชื้อแบคทีเรียทดสอบ 2 ชนิด ดังนี้ *Escherichia coli* (*E. coli*) และ *Bacillus cereus* (*B. cereus*) ผลการทดลองดังนี้

4.2.1 อิทธิพลของการผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM ในพอลิโพรพิลีนที่ส่งผลต่อรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Clear zone)

เมื่อทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยตรวจสอบรัศมีหรือขอบเขตการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการผสม HPQM ในชิ้นงานพอลิโพรพิลีน ส่งผลให้มีรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้น และสามารถเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ผสม HPQM รูปแบบสารดูดซับ มีรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่สูงกว่า ชิ้นงานที่ผสม HPQM รูปแบบสารละลาย ดังแสดงในตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า สารยับยั้งเชื้อ HPQM รูปแบบสารดูดซับ มีความสามารถในการแพร่ออกจากชิ้นงานได้ดีกว่า HPQM รูปแบบสารละลาย ในขณะที่การตรวจสอบรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *B. cereus* พบว่าชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสม HPQM รูปแบบสารละลาย และสารดูดซับสามารถแสดงรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ปริมาณการผสม 5,000 ส่วนในล้านส่วน ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ทั้งนี้เนื่องจากสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM อาศัยกลไกการเข้าทำลายความสามารถในการสังเคราะห์ผนังเซลล์ของแบคทีเรีย **[15]** เชื้อ *B. cereus* เป็นแบคทีเรียแกรมบวก ซึ่งมีชั้นผนังเซลล์ที่หนากว่าเชื้อ *E. coli* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบ ส่งผลให้เชื้อ *B. cereus* ถูกยับยั้งได้ยากกว่าเชื้อ *E. coli* **[33,54]**

ตารางที่ 4.5 รัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM

สารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์	รัศมียับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (มิลลิเมตร)				
	ปริมาณการผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ (ส่วนในล้านส่วน)				
	0	500	750	1,000	1,250
HPQM รูปแบบสารละลาย	0.0	0.5	0.5	1.3	2.0
HPQM รูปแบบสารดูดซับ	0.0	1.0	1.0	1.0	2.0

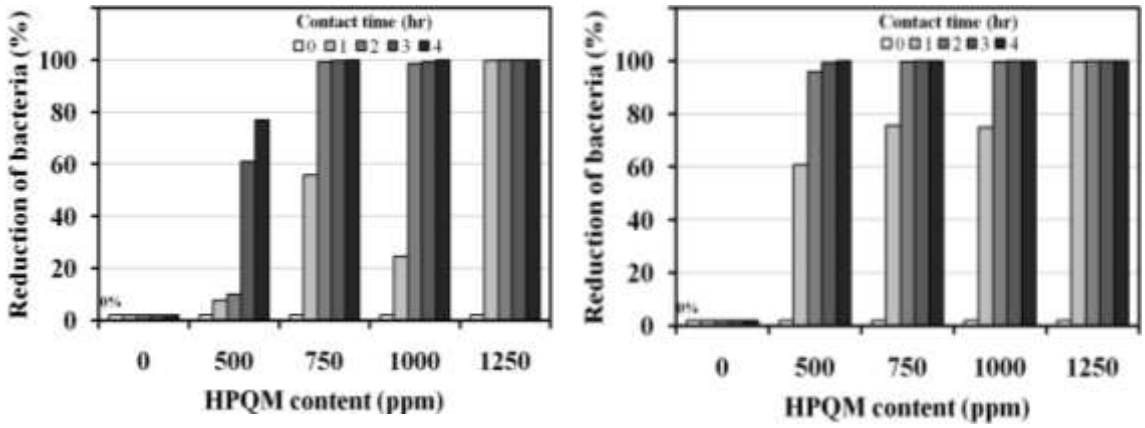
ตารางที่ 4.6 รัศมีการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ *B. cereus* ของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM

สารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์	รัศมียับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (มิลลิเมตร)			
	ปริมาณการผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ (ส่วนในล้านส่วน)			
	0	1,000	2,000	5,000
HPQM รูปแบบสารละลาย	0.0	0.0	0.0	2.0
HPQM รูปแบบสารดูดซับ	0.0	0.0	0.0	2.0

4.2.2 อิทธิพลของการผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM ในพอลิโพรพิลีนที่ส่งผลต่อร้อยละการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย

เมื่อทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์HPQM โดยทดสอบค่าการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ที่ระยะเวลาการทดสอบ 0,1,2,3 และ4 ชั่วโมง พบว่าการผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM ทั้งในรูปแบบสารละลายและรูปแบบสารดูดซับ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียให้กับพอลิโพรพิลีนได้สูงสุดที่ร้อยละ 99.9 จากรูปที่ 4.3 พบว่ามีการลดลงของเชื้อแบคทีเรียถึงร้อยละ 99.9 ที่เวลาการทดสอบ 4 ชั่วโมง เมื่อทดสอบด้วยชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM ในรูปแบบสารละลายที่ปริมาณการผสม 750 ส่วนในล้านส่วน ในขณะที่ทำการผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารดูดซับ ที่ปริมาณ 500 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งสามารถเห็นได้ว่าชิ้นงานผสม HPQM รูปแบบสารดูดซับมีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่สูงกว่าชิ้นงานผสม HPQM รูปแบบสารละลาย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสารดูดซับนูซิลินซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของ HPQM รูปแบบสารดูดซับนั้น เป็นตัว

ช่วยส่งเสริมการปลดปล่อยสาร HPQM ออกจากชิ้นงานพอลิโพรพิลีน เนื่องจากสารดูดซับนูซิลิน หรือแมกนีเซียมอลูมิโนเมตาซิลิเกต เป็นสารดูดซับที่อนุภาคมีความเป็นรูพรุน และมีความสามารถในการดูดซับน้ำที่สูง **[44]** เมื่อทดสอบชิ้นงานในสภาวะที่มีสารละลายเปปโตนซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก สารดูดซับนูซิลินจึงสามารถดูดซับน้ำไว้ และปลดปล่อยสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM ออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการเปียกผิว แสดงในตารางที่ 4.1 ที่พบว่าสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารดูดซับ มีค่ามุมสัมผัสที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการผสม ซึ่งแสดงถึง ชิ้นงานมีความชอบน้ำมากขึ้น และสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM สามารถแพร่ออกมาบริเวณผิวชิ้นงานได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลายที่มีค่ามุมสัมผัสแนวโน้มคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Prapruddivongs และคณะ **[57]** ที่ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเติมผงไม้ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีความชอบน้ำ ในพอลิแลคติกเอซิดผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ ส่งผลให้ชิ้นงานมีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่เพิ่มขึ้น

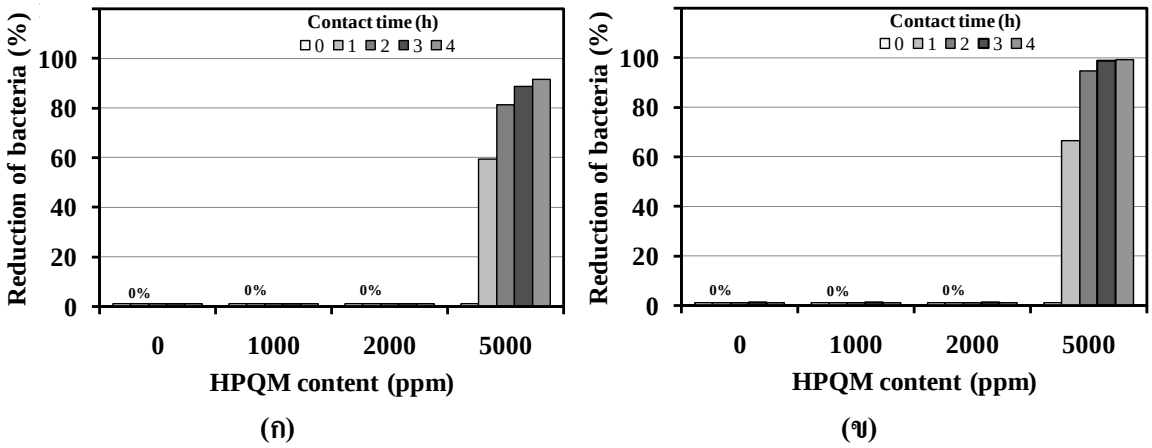


(ก) **(ข)**

รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ของพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM โดย (ก)รูปแบบสารละลาย (ข) รูปแบบสารดูดซับ

สำหรับการทดสอบการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *B. cereus* พบว่าการผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM ทั้งในรูปแบบสารละลายและรูปแบบสารดูดซับ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียให้กับพอลิโพรพิลีนได้ จากรูปที่ 4.4 พบว่ามีการลดลงของเชื้อแบคทีเรียร้อยละ 91.7 ที่เวลาการทดสอบ 4 ชั่วโมง เมื่อทดสอบด้วยชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM ในรูปแบบสารละลาย ที่ปริมาณการผสม 5,000 ส่วนในล้านส่วน ในขณะที่ทำการผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารดูดซับ ที่ปริมาณ 5,000 ส่วนในล้านส่วน มีการลดลงของเชื้อแบคทีเรียร้อยละ 99.3 ที่เวลาการทดสอบ 4 ชั่วโมง ซึ่งเห็นได้ว่า สารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM ทั้ง

รูปแบบสารละลาย และรูปแบบสารดูดซับมีประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรีย *E. coli* สูงกว่า *B. cereus* ซึ่งเห็นได้จากปริมาณการผสมที่สูงถึง 5,000 ส่วนในล้านส่วน แต่การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *B. cereus* ต่ำกว่าร้อยละ 99.9 เนื่องจาก เชื้อ *B. cereus* เป็นแบคทีเรียแกรมบวก ซึ่งมีชั้นผนังเซลล์ที่หนากว่าแบคทีเรียแกรมลบ ส่งผลให้เชื้อ *B. cereus* ถูกยับยั้งได้ยากกว่าเชื้อ *E. coli* **[33]** ดังที่กล่าวมาในหัวข้อ 4.2.1



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *B.cereus* ของพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM (ก)รูปแบบสารละลาย (ข) รูปแบบสารดูดซับ

จากผลการทดสอบที่ผ่านมา พบว่าชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM ทั้งรูปแบบสารละลาย และรูปแบบสารดูดซับ ที่ปริมาณการผสม 5,000 ส่วนในล้านส่วน มีการลดลงของเชื้อแบคทีเรียต่ำกว่าร้อยละ 99.9 อีกทั้งปริมาณการผสมที่สูงถึง 5,000 ส่วนในล้านส่วน อาจไม่เหมาะสม เนื่องจากการใช้งานปกติของสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM ในอุตสาหกรรมอื่นมีการใช้งานสูงสุดเพียง 1,000 ส่วนในล้านส่วน **[15]** ปริมาณการผสมที่สูงถึง 5,000 ส่วนในล้านส่วน ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มสูงขึ้นอาจไม่คุ้มค่าต่อการผลิต ดังนั้นในงานวิจัยในอนาคตอาจศึกษาการใช้สารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ชนิดอื่นที่มีความปลอดภัย และมีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก เช่น poly(2-tert-butylaminoethyl) methacrylate (TBAM) **[50]** หรืออนุพันธ์อื่นๆ ของ สารประกอบ piperazinyl quinolones **[56-57]** เป็นต้น มาทดแทน

ดังนั้นการทดลองในลำดับต่อไป หรือการศึกษาผลของสภาวะบ่มเร่งจากเครื่องเร่งสภาวะการทดสอบจึงไม่นำเชื้อแบคทีเรีย *B. cereus* มาใช้เป็นแบคทีเรียทดสอบ

4.3 ผลของสภาวะบ่มเร่งด้วยเครื่องเร่งสภาวะการทดสอบ ที่มีต่อประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

งานวิจัยในส่วนนี้ได้ศึกษาผลของสภาวะบ่มเร่งชิ้นงานด้วยเครื่องเร่งสภาวะการทดสอบที่มีต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา และประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยได้ทำการเลือกชิ้นงานที่มีปริมาณการผสมที่ต่ำที่สุดที่สามารถแสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ร้อยละ 99.9 ซึ่งเรียกว่าวัสดุปลอดเชื้อ และชิ้นงานที่มีปริมาณการผสมที่เพิ่มขึ้น เพื่อศึกษาแนวโน้มอิทธิพลของสภาวะบ่มเร่งด้วยเครื่องเร่งสภาวะการทดสอบ โดยชิ้นงานสัมผัสรังสียูวี-เอ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง สลับกับไอน้ำที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่มีต่อประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลายที่ความเข้มข้น 750, 1000 และ 1250 ส่วนในล้านส่วน และHPQM รูปแบบสารดูดซับที่ความเข้มข้น 500, 1000 และ 1250 ส่วนในล้านส่วน

เมื่อศึกษาผลของสภาวะบ่มเร่งชิ้นงานด้วยเครื่องเร่งสภาวะการทดสอบ ที่มีต่อรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียพบว่า เมื่อระยะเวลาการบ่มเร่งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM มีรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียลดลง แสดงดังตารางที่ 4.7โดยพบว่าชิ้นงานที่ผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลายปริมาณการผสม 750-1,000 ส่วนในล้านส่วน และ HPQM รูปแบบสารดูดซับปริมาณ 500-1,000 ส่วนในล้านส่วน มีรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 0.0 มิลลิเมตรเมื่อผ่านสภาวะการบ่มเร่งเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง และชิ้นงานที่ผสม HPQM รูปแบบสารละลายและรูปแบบสารดูดซับที่ปริมาณ 1,250 ส่วนในล้านส่วน มีรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 0.0 มิลลิเมตร เมื่อผ่านสภาวะการบ่มเร่งเป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง คาดว่าเนื่องจากชิ้นงานดังกล่าวมีปริมาณการผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM ที่สูง ดังนั้น ปริมาณสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM ที่เหลือบริเวณผิวชิ้นงานจึงมีค่ามากกว่า ส่งผลให้ชิ้นงานแสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้

ตารางที่ 4.7 รัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ของพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM เมื่อผ่านสภาวะการบ่มเร่ง

สารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์	ปริมาณการผสม (ส่วนในล้านส่วน)	รัศมียับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (มิลลิเมตร)				
		ระยะเวลาบ่มเร่ง (ชั่วโมง)				
		ก่อนบ่มเร่ง	24	48	72	96
HPQM รูปแบบสารละลาย	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	750	0.5	0.3	0.0	0.0	0.0
	1,000	1.3	1.3	0.0	0.0	0.0
	1,250	2.0	1.0	1.7	0.0	0.0
HPQM รูปแบบสารดูดซับ	500	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0
	1,000	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0
	1,250	2.0	1.0	1.5	0.0	0.0

สำหรับผลของสภาวะบ่มเร่งชิ้นงานด้วยเครื่องเร่งสภาวะการทดสอบ ที่มีต่อร้อยละการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* พบว่าเมื่อระยะเวลาการบ่มเร่งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM มีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียลดลงดังรูปที่ 4.5 โดยชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลายที่ความเข้มข้น 750 ส่วนในล้านส่วน แสดงดังรูปที่ 4.5 (ก) พบว่า ที่ระยะเวลาการบ่มเร่ง 24-48 ชั่วโมง ชิ้นงานมีแนวโน้มค่าร้อยละการลดลงของเชื้อต่ำลง โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 69.0 และร้อยละ 30.4 ตามลำดับ และไม่สามารถแสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ที่ระยะเวลาบ่มเร่งที่ 72 ชั่วโมง ทั้งนี้คาดว่าไอน้ำที่เกิดขึ้นในกระบวนการบ่มเร่งบริเวณผิวของชิ้นงานชะล้างสารยับยั้งเชื้อบริเวณผิวออกไป ส่งผลให้สารยับยั้งเชื้อบริเวณผิวชิ้นงานมีค่าน้อยลง

เมื่อพิจารณาชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลายที่ความเข้มข้น 1,000 ส่วนในล้านส่วน แสดงในรูปที่ 4.5 (ข) พบว่า ระยะเวลาการบ่มเร่ง 24-48 ชั่วโมง ชิ้นงานมีแนวโน้มการลดลงของเชื้อต่ำลงโดยมีค่าสูงสุด เท่ากับร้อยละ 70.0 และร้อยละ 28.4 ตามลำดับ โดยคาดว่าเนื่องจากอิทธิพลของไอน้ำในระบบการบ่มเร่งดังที่ได้กล่าวมา แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มเร่งเป็น 72 ชั่วโมง พบว่า ชิ้นงานมีค่าร้อยละการลดลงของเชื้อที่สูงถึงร้อยละ 99.6 ทั้งนี้สาเหตุเนื่องจากการเสื่อมสลายของชิ้นงาน โดยพบว่าบริเวณผิวของชิ้นงานเกิดรอยแยก แสดงดัง

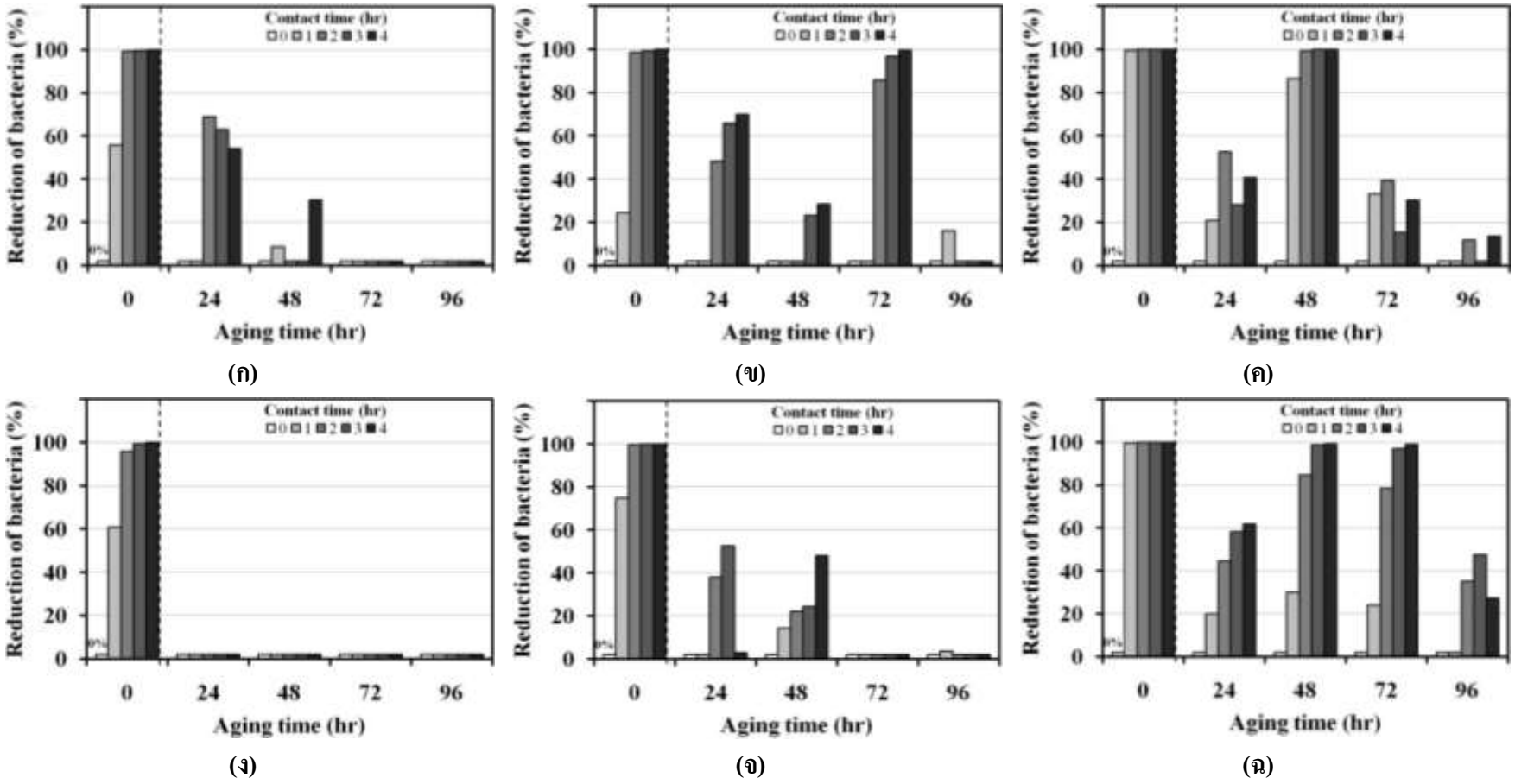
ตารางที่ 4.8 อีกทั้งชิ้นงานมีปริมาณการผสมเพิ่มขึ้น หรือ 1,000 ส่วนในล้านส่วน จึงคาดว่ารอยแยกบริเวณผิวของชิ้นงานส่งผลให้สารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM ภายในชิ้นงานสามารถแพร่ออกมาได้มากขึ้น จึงส่งผลให้ชิ้นงานมีการลดลงของเชื้อแบคทีเรียสูงกว่าระยะเวลาบ่มเร่งที่ 24 และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chinkamonthong และคณะ **[52]** พบว่าการเกิดรอยแยกบริเวณผิวฟิล์มพอเอทิลีนที่ผ่านสภาวะบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตสลับกับไอน้ำ ส่งผลให้อนุภาค Nano-silver สามารถเคลื่อนที่ออกมาสู่บริเวณผิวของชิ้นงานได้ แต่อย่างไรก็ตามไอน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างการบ่มเร่ง อาจชะล้างอนุภาค Nano-silver บริเวณผิวออกไปได้เช่นกัน จึงส่งผลให้ค่าการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย มีค่าต่ำลง

เมื่อพิจารณาชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสม HPQM รูปแบบสารละลายที่ความเข้มข้น 1,250 ส่วนในล้านส่วน แสดงดังรูปที่ 4.5 (ค) พบว่าที่ระยะเวลาการบ่มเร่ง 24 ชั่วโมงชิ้นงานมีการลดลงของเชื้อต่ำลงโดยมีค่าสูงสุด เท่ากับร้อยละ 52.6 และเมื่อระยะเวลาการบ่มเร่ง 48 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานมีค่าร้อยละการลดลงของเชื้อที่สูงถึงร้อยละ 99.6 ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากชิ้นงานมีปริมาณการผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM สูงถึง 1,250 ส่วนในล้านส่วน อาจเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิโพรพิลีน เป็นเหตุให้ชิ้นงานเสื่อมสลายโดยเกิดรอยแยกบริเวณผิวของชิ้นงานเร็วขึ้น แสดงดังตารางที่ 4.9 ส่งผลให้สาร HPQM ภายในชิ้นงานสามารถแพร่ออกมาได้มาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Teptim และคณะ **[56]** พบว่าเมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยเครื่องเร่งสภาวะการทดสอบ เป็นเวลา 21 วัน สารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM สามารถเป็นตัวเร่งให้เกิดการเสื่อมสลายของยางซิลิโคน

ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสม HPQM รูปแบบสารดูดซับที่ความเข้มข้น 500 ส่วนในล้านส่วน แสดงดังรูปที่ 4.5 (ง) พบว่าที่ระยะเวลาการบ่มเร่ง 24-96 ชั่วโมง ชิ้นงานทดสอบไม่สามารถแสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ ทั้งนี้เนื่องจากผลการทดลองข้อที่ 4.2.2 พบว่าสารดูดซับนูซิลินซึ่งเป็นองค์ประกอบของ HPQM เป็นตัวช่วยส่งเสริมการปลดปล่อยสาร HPQM ให้ออกจากชิ้นงานได้มากขึ้น จึงส่งผลให้สารยับยั้งเชื้อ HPQM ที่เหลืออยู่ในชิ้นงานน้อยมาก
ในขณะที่ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อ HPQM รูปแบบสารดูดซับที่ความเข้มข้น 1,000 ส่วนในล้านส่วน แสดงดังรูปที่ 4.5 (จ) พบว่า ที่ระยะเวลาการบ่มเร่ง 24 และ 48 ชั่วโมง ชิ้นงานสามารถแสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีความเข้มข้น 500 ส่วนในล้านส่วน โดยพบว่ามีการลดลงของเชื้อสูงสุดร้อยละ 52.6 และร้อยละ 48.0 ตามลำดับ

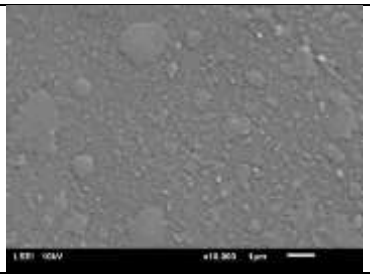
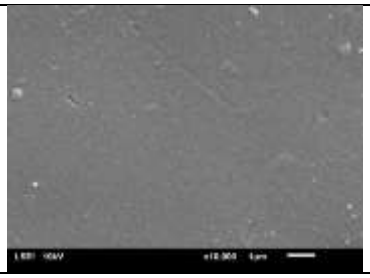
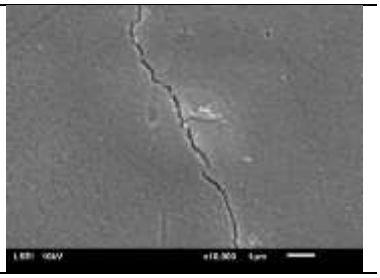
และไม่สามารถแสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ที่ระยะเวลาบ่มเร่งที่ 72 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณการผสม HPQM ที่เพิ่มขึ้นเป็น 1,000 ส่วนในล้านส่วน ส่งผลให้ชิ้นงานสามารถแสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้

เมื่อเพิ่มปริมาณการผสมให้กับชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ผสม HPQM รูปแบบสารดูดซับเป็น 1,250 ส่วนในล้านส่วน แสดงดังรูปที่ 4.5 (ฉ) พบว่า ที่ระยะเวลาการบ่มเร่ง 24 ชั่วโมงชิ้นงานมีการลดลงของเชื้อสูงสุดเท่ากับ ร้อยละ 61.8 ในขณะที่เมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มเร่งที่ 48 ชั่วโมง พบว่า ชิ้นงานมีค่าการลดลงของเชื้อเพิ่มเป็นร้อยละ 99.3 ทั้งนี้เนื่องจากการเสื่อมสลายของชิ้นงาน โดยพบรอยแยกบริเวณผิวของชิ้นงาน แสดงตาราง ที่ 4.10 อีกทั้งมีปริมาณการผสมสูงถึง 1,250 ส่วนในล้านส่วน ส่งผลให้สาร HPQM ภายในชิ้นงานสามารถแพร่ออกมาได้มากขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าร้อยละการลดลงของเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามไอน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างการบ่มเร่ง อาจชะล้างสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM บริเวณผิวออกไปได้เช่นกัน จึงส่งผลให้ค่าการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย มีค่าต่ำลงเมื่อระยะเวลาบ่มเร่งเพิ่มขึ้น

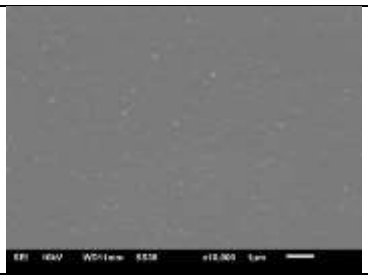
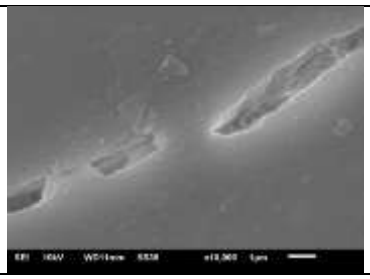
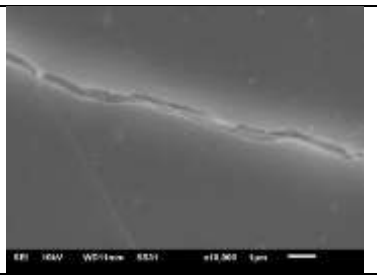


รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* หลังผ่านการบ่มเร่งด้วยเครื่องเร่งสภาวะการทดสอบของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลาย ที่ปริมาณการผสม (ก) 750 ส่วนในล้านส่วน (ข) 1,000 ส่วนในล้านส่วน (ค) 1,250 ส่วนในล้านส่วน และรูปแบบสารดูดซับ ที่ปริมาณการผสม (ง) 500 ส่วนในล้านส่วน (จ) 1,000 ส่วนในล้านส่วน และ(ฉ) 1,250 ส่วนในล้านส่วน

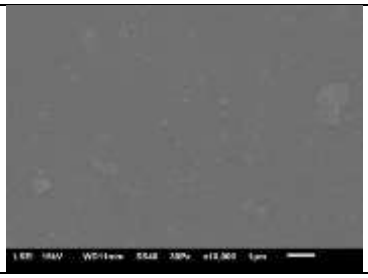
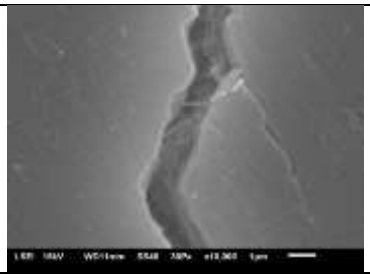
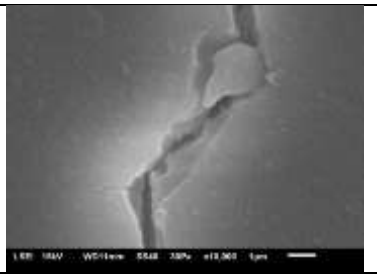
ตารางที่ 4.8 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนผสม HPQM รูปแบบสารละลาย ที่ปริมาณการผสม 1,000 ส่วนในล้านส่วน ที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยเครื่องเร่งสภาวะการทดสอบ

ระยะเวลาบ่มเร่ง		
24 ชั่วโมง	**48 ชั่วโมง**	**72 ชั่วโมง**
		

ตารางที่ 4.9 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนผสม HPQM รูปแบบสารละลาย ที่ปริมาณการผสม 1,250 ส่วนในล้านส่วน ที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยเครื่องเร่งสภาวะการทดสอบ

ระยะเวลาบ่มเร่ง		
24 ชั่วโมง	**48 ชั่วโมง**	**72 ชั่วโมง**
		

ตารางที่ 4.10 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนผสม HPQM รูปแบบสารดูดซับ ที่ปริมาณการผสม 1,250 ส่วนในล้านส่วน ที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยเครื่องเร่งสภาวะการทดสอบ

ระยะเวลาบ่มเร่ง		
24 ชั่วโมง	**48 ชั่วโมง**	**72 ชั่วโมง**
		

4.4 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลาย และรูปแบบสารดูดซับ ในเบื้องต้น หากคำนึงถึงเฉพาะประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยไม่คำนึงถึงปัจจัยอื่นๆ พบว่าผลงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์อาหารพอลิโพรพิลีนที่มีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ 2 รูปแบบดังนี้

- ผลิตบรรจุภัณฑ์อาหารประเภทอ่อนตัว หรือผลิตภัณฑ์ไม่ต้องการประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ยาวนาน สามารถเลือกใช้สารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารดูดซับที่ปริมาณการผสม 500 ส่วนในล้านส่วน เนื่องจากสามารถใช้ปริมาณการผสมที่น้อยกว่า HPQM รูปแบบสารละลาย แต่สามารถแสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อได้ร้อยละ 99.9 แสดงดังรูปที่ 4.3 อีกทั้งปริมาณการผสมดังกล่าวยังไม่ส่งผลค่าการเปลี่ยนแปลงสี และสมบัติชิงกลของชิ้นงานพอลิโพรพิลีน ดังรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.2
- ผลิตบรรจุภัณฑ์อาหารประเภทคงรูป หรือผลิตภัณฑ์ต้องการประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ยาวนานสามารถเลือกใช้สารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลายที่ปริมาณการผสม 750 ส่วนในล้านส่วน เนื่องจากผลการทดสอบชิ้นงานพอลิโพรพิลีนหลังสภาวะบ่มเร่งพบว่าที่ระยะเวลาบ่มเร่ง 24 ชั่วโมง ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนพบความสูญเสียสมบัติเชิงกลน้อยที่สุด ดังตารางที่ 4.3 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารละลายที่ปริมาณ การผสม 750 ส่วนในล้านส่วน ยังคงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้เทียบเท่ากับพอลิโพรพิลีนผสมสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ HPQM รูปแบบสารดูดซับที่ปริมาณการผสม 1,250 ส่วนในล้านส่วน หรือที่ประมาณร้อยละ 60-70 ดังรูปที่ 4.5