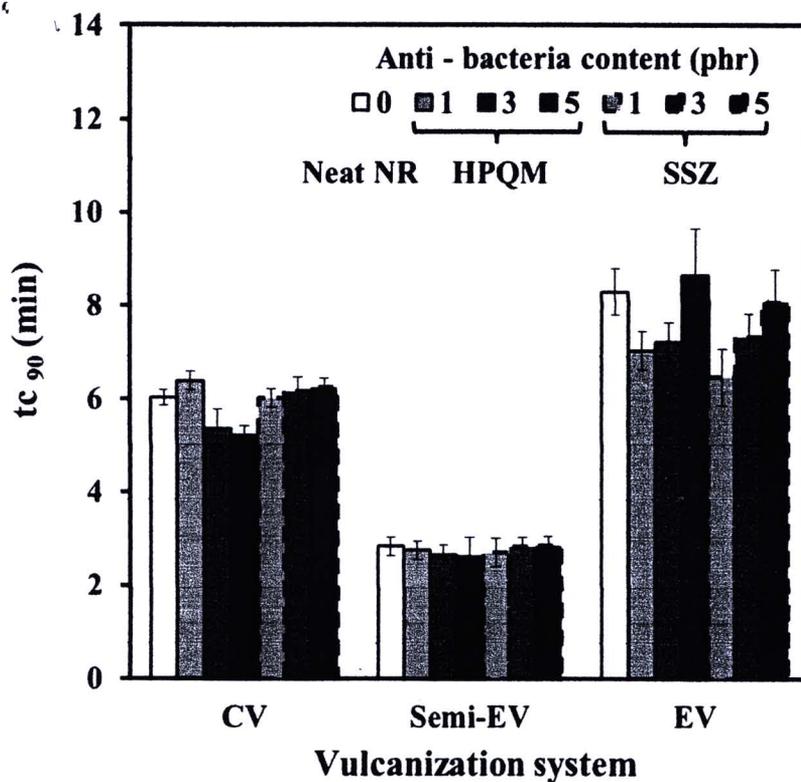


บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 เวลาในการคงรูปยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบ ที่ร้อยละ 90 (t_{c90})

เวลาในการคงรูปยางคอมปาวด์ระบบ CV, Semi-EV และ EV ที่ร้อยละ 90 สำหรับยางคอมปาวด์ที่ไม่ผสมและผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM และ SSZ ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr แสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 เวลาในการคงรูปยางที่ร้อยละ 90 (t_{c90}) ของยางที่คงรูประบบต่าง ๆ ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM และ SSZ

การทดสอบหาเวลาการคงรูปยางที่ร้อยละ 90 ของยางคอมปาวด์ระบบ CV, Semi-EV และ EV ที่ไม่ผสมและผสมสารยับยั้งเชื้อชนิด HPQM และ SSZ ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่า การเติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM และ SSZ ไม่ส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการคงรูปยางคอมปาวด์ระบบ CV, Semi-EV และ EV เวลาในการคงรูปของยางคอมปาวด์ แต่ละระบบที่

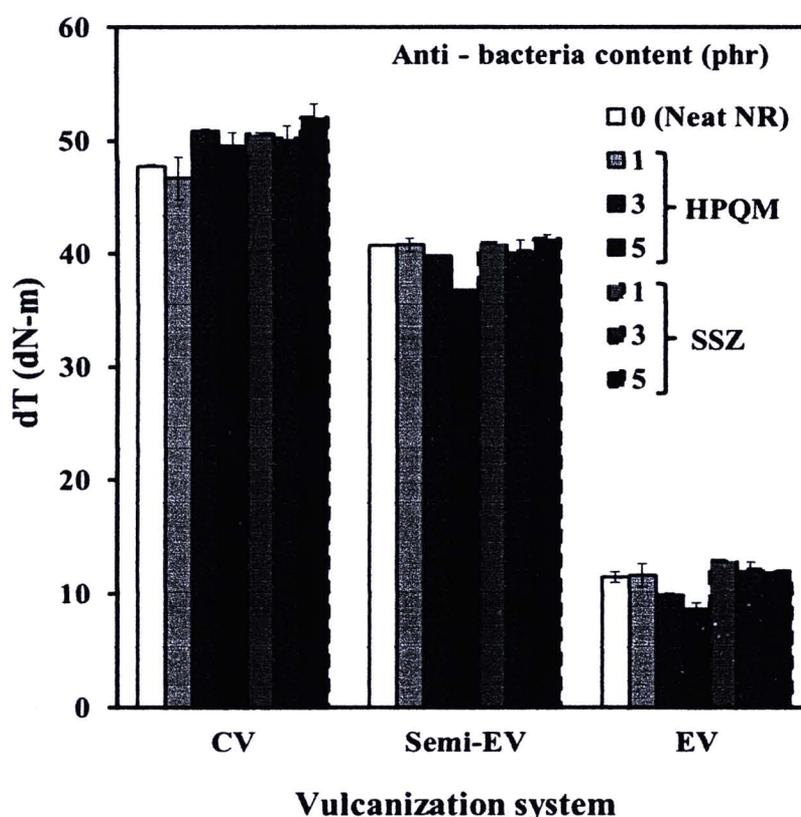
ผสมสารยับยั้งเชื้อทั้ง 2 ชนิด ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเวลาในการคงรูปยาง ส่วนยางคอมปาวด์ในแต่ละระบบ เวลาในการคงรูปมีค่าที่แตกต่างกัน เป็นผลเนื่องจากปริมาณสารกำมะถันและตัวเร่งปฏิกิริยาในแต่ละระบบมีค่าไม่เท่ากัน

4.2 ผลต่างแรงบิดและความหนาแน่นของพันธะข้ามของยางคอมปาวด์

ผลต่างแรงบิดและความหนาแน่นของพันธะข้ามของยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบที่ไม่ผสมและผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย แสดงดังต่อไปนี้

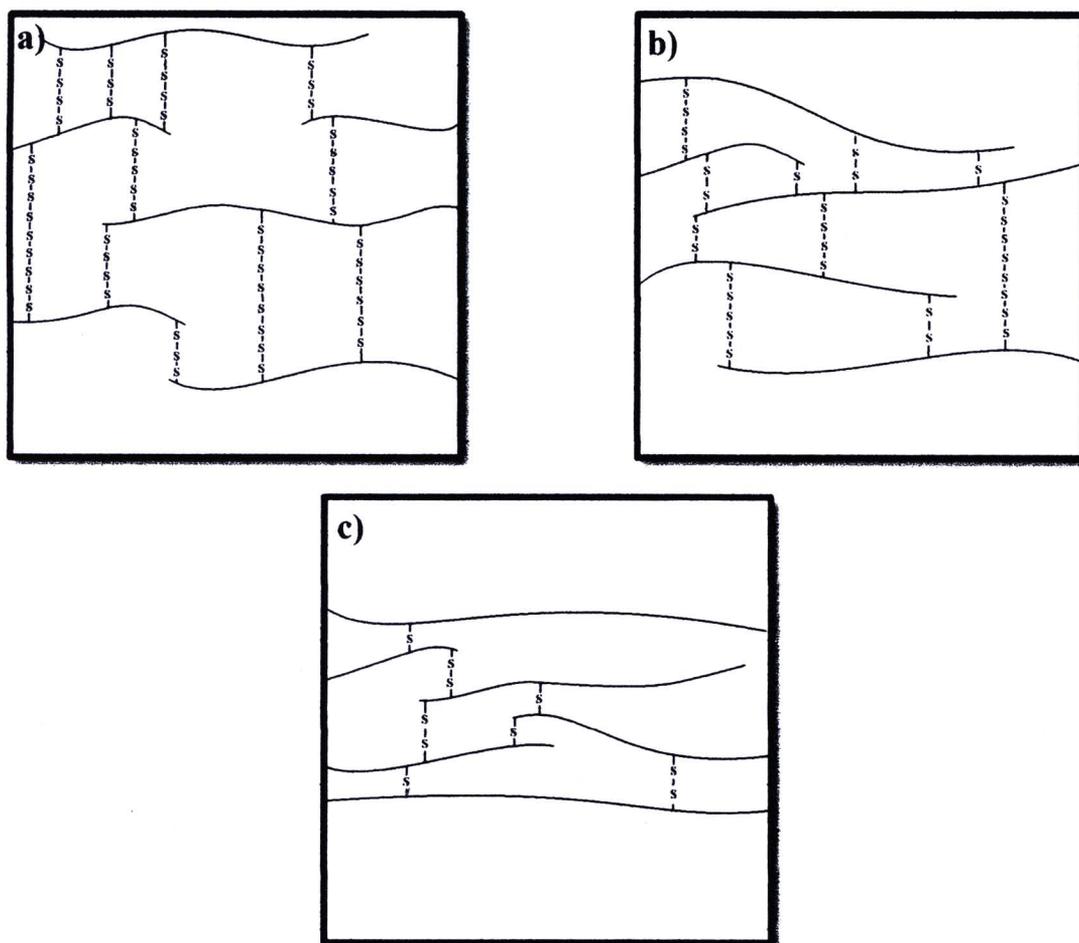
4.2.1 ผลต่างแรงบิดของการคงรูปยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบ

ผลต่างแรงบิดของการคงรูปยางคอมปาวด์ระบบ CV, Semi-EV และ EV ที่ไม่ผสมและผสมสาร HPQM และ SSZ ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr แสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.2 ผลต่างแรงบิดของการคงรูปยางคอมปาวด์ระบบ CV, Semi-EV และ EV ที่ไม่ผสมและผสมสาร HPQM และ SSZ

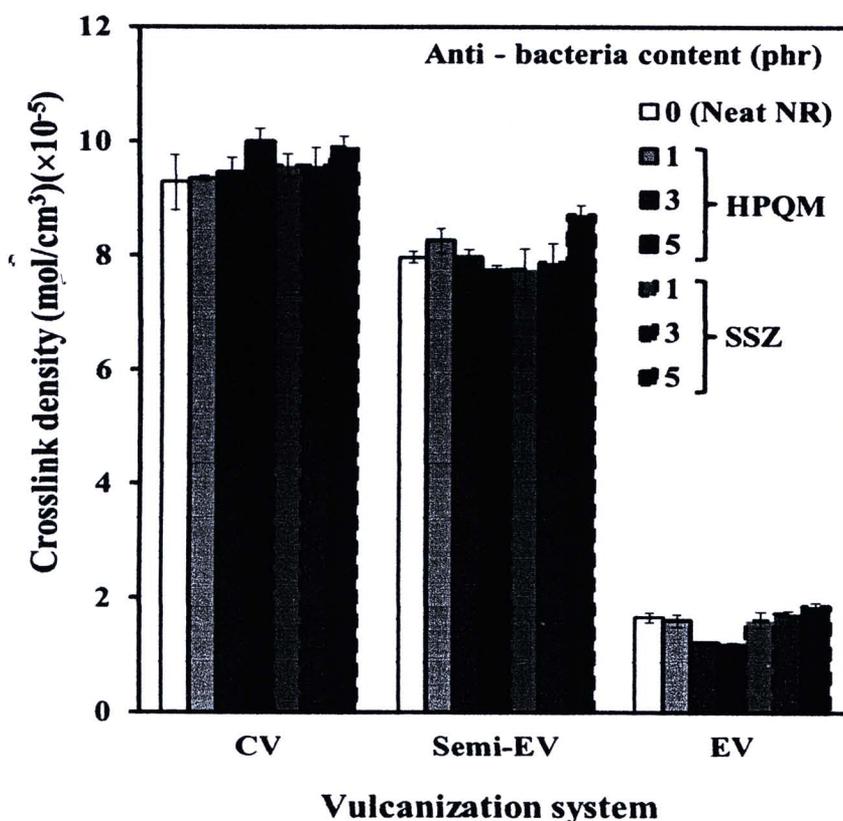
รูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณาค่าผลต่างแรงบิด (dT) เป็นแรงบิดสูงสุด (ค่าแรงบิดของโมเลกุลยางที่เกิดการเชื่อมโยงของกำมะถันอย่างสมบูรณ์) และ แรงบิดต่ำสุด (ค่าแรงบิดที่โมเลกุลยางยังไม่เกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลยาง) ซึ่งผลต่างแรงบิดเป็นค่าบ่งบอกระดับหรือปริมาณพันธะข้าม พบว่า ยางคอมปาวด์ระบบ CV มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ Semi-EV และ EV ตามลำดับ ทั้งนี้มีสาเหตุจากผลของความสามารถในการเกิดการเชื่อมโยงของกำมะถัน กล่าวคือ ยางคอมปาวด์ที่คงรูปด้วยระบบ CV มีปริมาณกำมะถันสูงสุด เกิดการเชื่อมโยงของกำมะถันแบบพันธะซัลไฟด์ระหว่าง โมเลกุลสายโซ่ยาว (Polysulphidic) ส่งผลให้ค่าผลต่างแรงบิดมากที่สุด รองลงมาคือ ระบบ Semi-EV เกิดการเชื่อมโยงของกำมะถันแบบพันธะซัลไฟด์ระหว่าง โมเลกุลสายโซ่ยาวผสมกับสายโซ่สั้น (Disulphidic & Monosulphidic) และระบบ EV เป็นการเชื่อมโยงของกำมะถันแบบพันธะซัลไฟด์ระหว่าง โมเลกุลสายโซ่สั้น [15] ลักษณะการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นในยางทั้ง 3 ระบบดังในรูปที่ 4.3 สำหรับผลของการผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM และ SSZ ในยางคอมปาวด์ที่ปริมาณ 1-5 phr พบว่า ไม่ส่งผลต่อค่าผลต่างแรงบิด เนื่องจากปริมาณการเติมการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่มีปริมาณน้อยมาก



รูปที่ 4.3 ลักษณะการเชื่อมโยงของกำมะถันที่เกิดขึ้นในการคงรูปยางคอมปาวด์ a) ระบบ CV b) ระบบ Semi-EV และ c) ระบบ EV

4.2.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นของพันธะข้ามของยางคอมปาวด์

ผลความหนาแน่นของพันธะข้ามของการคงรูปยางคอมปาวด์ระบบ CV, Semi-EV และ EV ที่ไม่ผสม และผสมสาร HPQM และ SSZ ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr แสดงดังต่อไปนี้

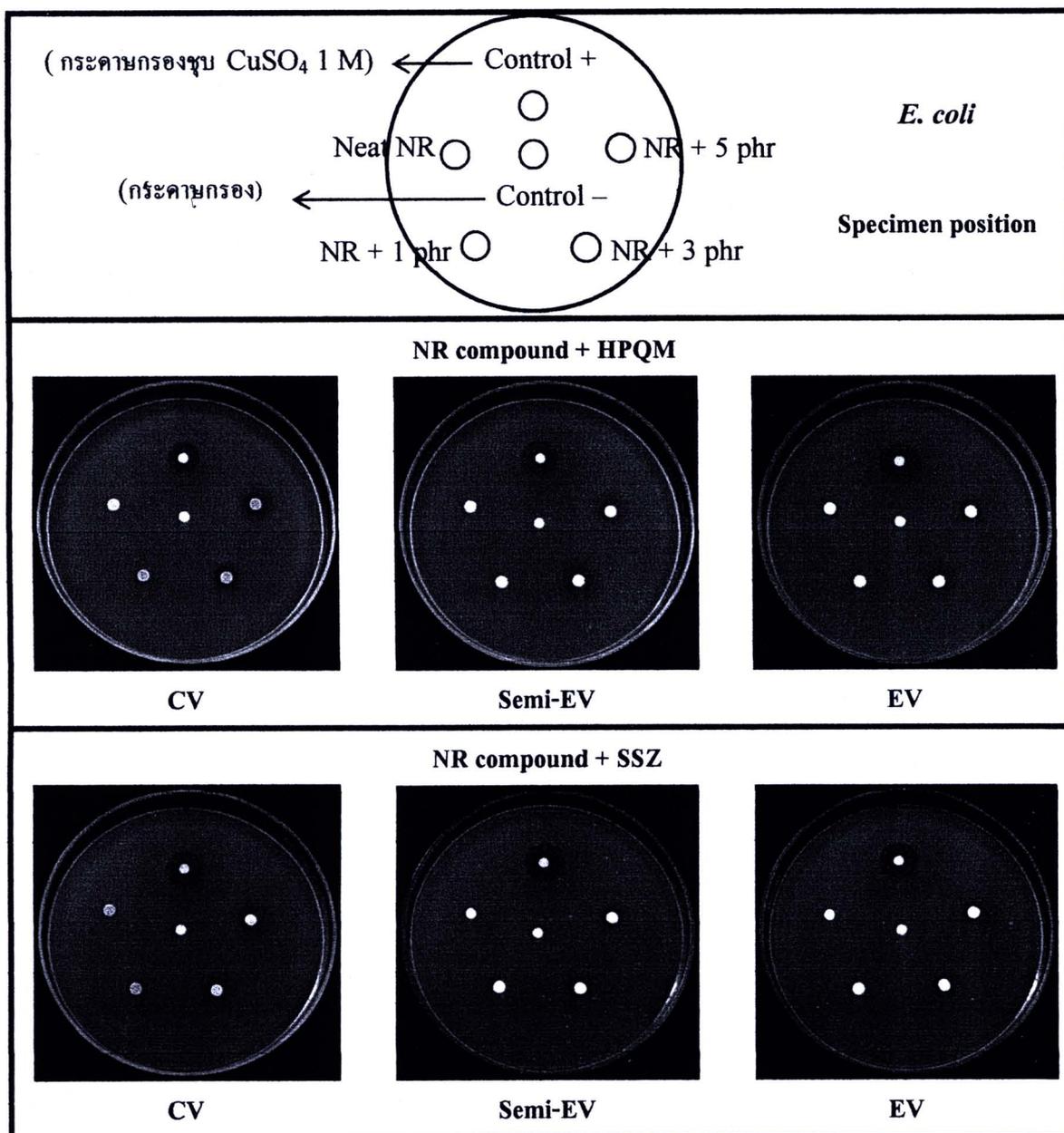


รูปที่ 4.4 ความหนาแน่นของพันธะข้ามของการคงรูปยางคอมปาวด์ระบบ CV, Semi-EV และ EV ที่ไม่ผสมและผสมสาร HPQM และ SSZ

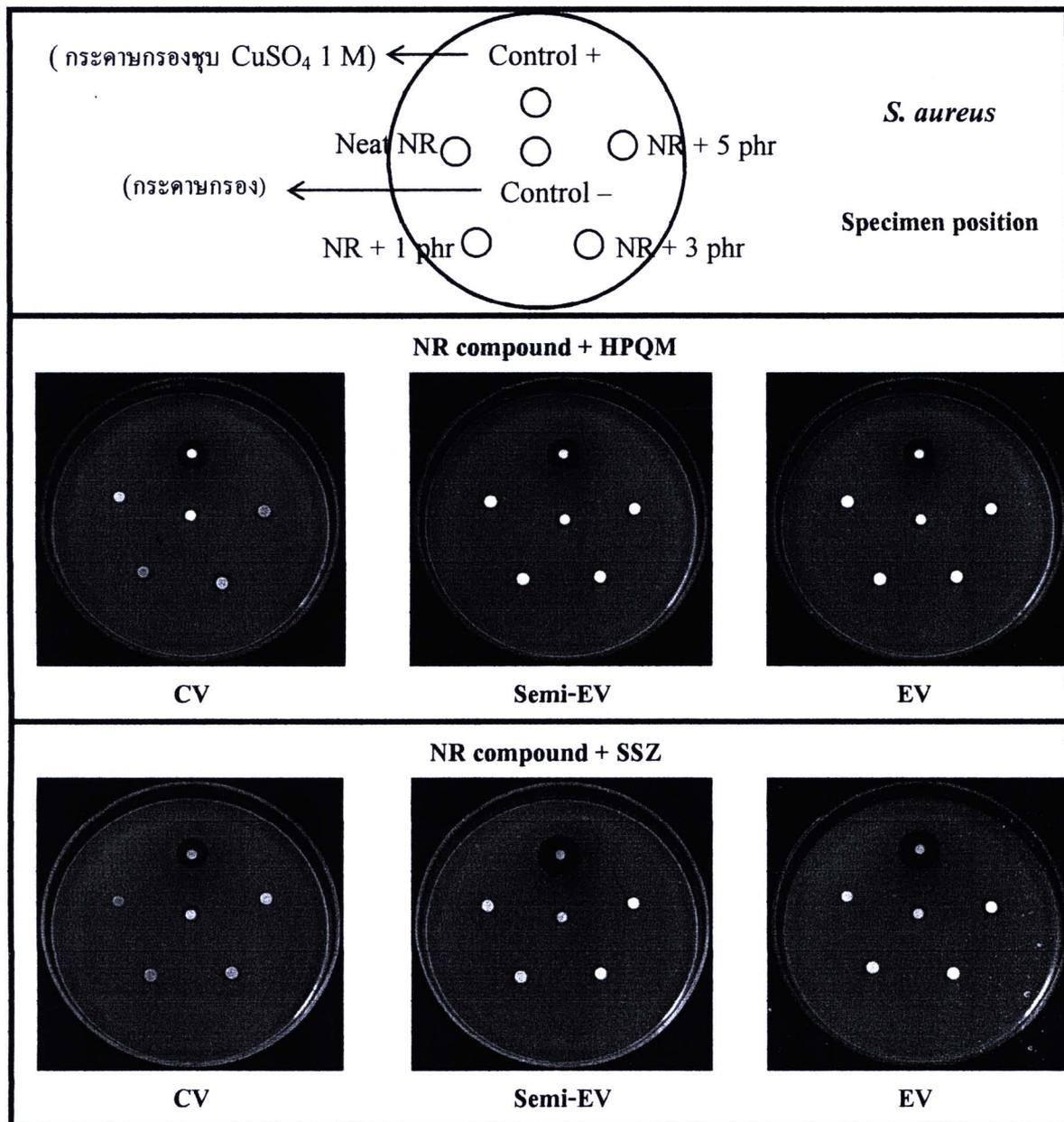
รูปที่ 4.4 แสดงผลของระบบการคงรูปยางคอมปาวด์ระบบ CV, Semi EV และ EV ที่ไม่ผสมและผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย HPQM และ SSZ ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr ต่อค่าความหนาแน่นของพันธะข้าม (Crosslink density) พบว่า ค่าความหนาแน่นของพันธะข้ามของยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบ มีค่าสูงสุดไปต่ำสุดตามลำดับดังนี้ ระบบ CV, Semi EV และ EV ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการวัดค่าผลต่างแรงบิดที่แสดงดังรูปที่ 4.2 เนื่องจากปริมาณกำมะถันที่ผสมในยางคอมปาวด์ระบบ CV มีปริมาณสูงกว่ายางคอมปาวด์ระบบ Semi-EV และ EV ส่วนผลการผสมสารยับยั้งเชื้อชนิด HPQM และ SSZ ในยางคอมปาวด์ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr พบว่า ไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของพันธะข้าม เช่นเดียวกับผลการทดสอบการวัดค่าผลต่างแรงบิด

4.3 ผลการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของยางคอมปาวด์ด้วยวิธี Halo test

การทดสอบบริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และ *S. aureus* ของยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบ ที่ไม่ผสมและผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM และ SSZ แสดงดังรูปที่ 4.5, 4.6 และ ตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.5 การเกิดบริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* ของยางคอมปาวด์ที่ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM และ SSZ



รูปที่ 4.6 การเกิดบริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *S. aureus* ของยางคอมปาวด์ที่ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM และ SSZ

ตารางที่ 4.1 บริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* และ *S. aureus* ของยางคอมปาวด์ที่ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM และ SSZ

NR compound	Antibacterial content (phr)	Inhibition zone of <i>E. coli</i> (mm)			Inhibition zone of <i>S. aureus</i> (mm)		
		Vulcanization system			Vulcanization system		
		CV	Semi-EV	EV	CV	Semi-EV	EV
Neat NR	0	6.0 ± 0.2	6.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1	6.0 ± 0.2	6.0 ± 0.1
NR + HPQM ₁	1	6.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1
	3	8.8 ± 0.1	9.8 ± 0.1	8.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1	6.0 ± 0.2	6.0 ± 0.1
	5	9.7 ± 0.2	9.1 ± 0.6	8.8 ± 0.1	6.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1
NR + SSZ	1	6.0 ± 0.1	6.0 ± 0.2	6.0 ± 0.1	6.0 ± 0.2	6.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1
	3	8.7 ± 0.1	7.8 ± 0.4	7.6 ± 0.1	6.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1
	5	9.5 ± 0.1	8.3 ± 0.4	8.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1	6.0 ± 0.2	6.0 ± 0.1

รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* และ *S. aureus* ส่วนตารางที่ 4.1 แสดงค่ารัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* และ *S. aureus* ที่วัดได้จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.5 และ 4.6 โดยตัวควบคุมแบบลบ (Control -) คือ กระดาษกรอง และตัวควบคุมแบบบวก (Control +) คือกระดาษกรองที่ชุบสารคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) 1 โมลาร์ เนื่องจาก CuSO_4 สามารถแตกเป็น Cu^{2+} เพื่อยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย [17] พบว่ายางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบ ที่ไม่ได้ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ไม่แสดงการเกิดรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* เมื่อพิจารณาจากคอมปาวด์ที่ผสมสารยับยั้งเชื้อชนิด HPQM และ SSZ ต่อการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* พบว่า ที่ปริมาณการผสมสารยับยั้งเชื้อ 1 phr ในยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบ ไม่เกิดรัศมีการยับยั้งเชื้อ *E. coli* ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารยับยั้งเชื้อที่ 1 phr มีปริมาณที่น้อยเกินไป ไม่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ แต่เมื่อปรับปริมาณสารยับยั้งเชื้อ HPQM และ SSZ เป็น 3 และ 5 phr พบว่า เกิดรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* สูงขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าสารยับยั้งเชื้อชนิด HPQM และ SSZ สามารถแพร่ออกมาจากชิ้นงานยางได้

ผลของระบบการคงรูปของยางทั้ง 3 ระบบที่มีต่อรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียพบว่า ยางคอมปาวด์ระบบ CV มีรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* สูงที่สุด รองลงมายางคอมปาวด์ระบบ Semi-EV และ EV ทั้งนี้เนื่องจาก ยางคอมปาวด์ระบบ CV มีโครงสร้างโมเลกุลแบบพันธะซัลไฟด์ระหว่าง โมเลกุลสายโซ่ยาว (Polysulphidic) [39] ทำให้เกิดช่องว่าง (Free volume) ระหว่าง โมเลกุลสูง โมเลกุลของยาง

เคลื่อนไหวได้ง่าย ส่งผลให้สารยับยั้งเชื้อแพร่ออกมายับยั้งเชื้อภายนอกง่ายกว่ายางคอมปาวด์ระบบ Semi-EV และ EV ตามลำดับ ส่วนผลการทดสอบบริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ของยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบ พบว่า ยางคอมปาวด์ที่ผสมและไม่ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM และ SSZ ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr นั้น ไม่พบบริเวณการเกิดรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลจากสารยับยั้งเชื้อ HPQM เข้าไปทำลายในส่วนของความสามารถในการสังเคราะห์ Cell wall ของแบคทีเรีย แบคทีเรียแกรมบวกซึ่งมี Cell wall หนากว่าแบคทีเรียแกรมลบ ส่งผลให้แบคทีเรียแกรมบวกถูกยับยั้งได้ง่ายกว่าแบคทีเรียแกรมลบ [13, 24] ส่วน SSZ สารที่ออกมายับยั้งเชื้อแบคทีเรีย คือ Ag^+ การที่ Cell wall ของแบคทีเรียแกรมบวกมีชั้น Peptidoglycan ที่หนากว่าแบคทีเรียแกรมลบ ประกอบกับชั้น Peptidoglycan เป็นประจุลบ ทำให้ Ag^+ จับกับประจุลบที่ชั้น Peptidoglycan ในแบคทีเรียแกรมบวกได้มากกว่าแบคทีเรียแกรมลบ ทำให้ Ag^+ เข้าไปทำลาย Cell membrane ของแบคทีเรียแกรมบวกได้น้อยกว่าแบคทีเรียแกรมลบ ส่งผลให้แบคทีเรียแกรมบวกทนต่อสาร SSZ ได้สูงกว่าแบคทีเรียแกรมลบ [14, 25]

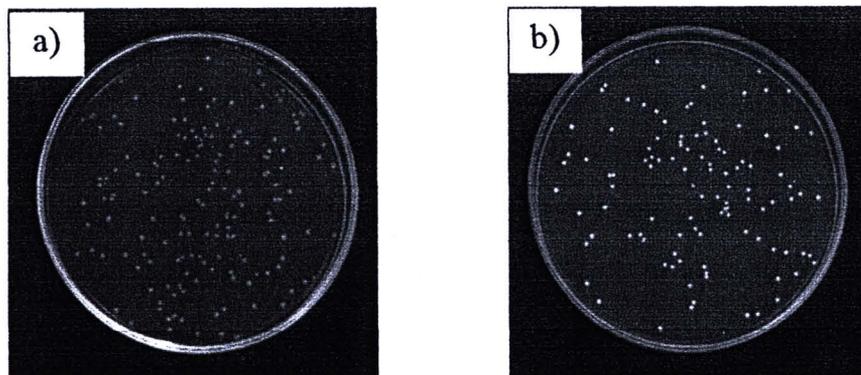
4.4 ผลการทดสอบเชิงปริมาณโดยใช้วิธีการนับจำนวนเชื้อแบคทีเรีย

(Plate count agar method)

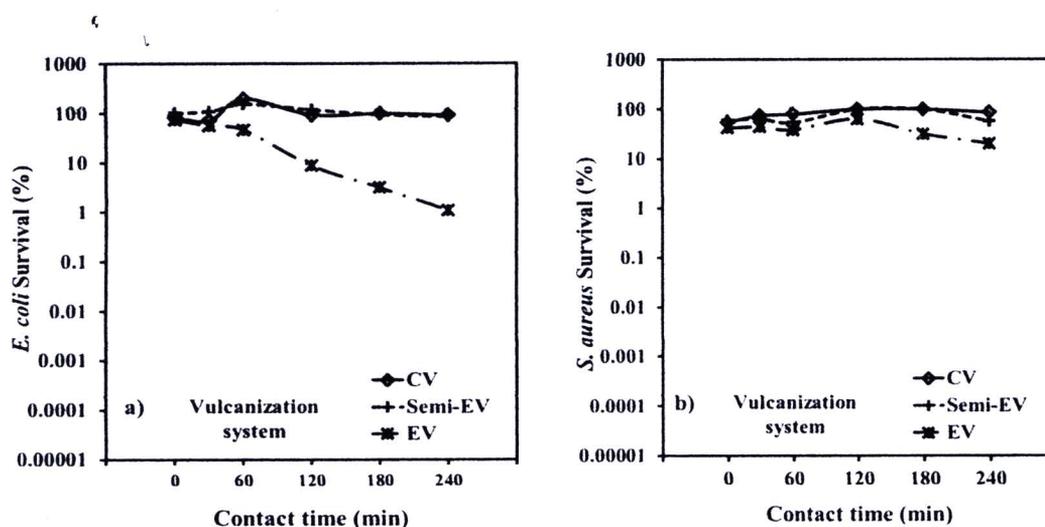
การทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเชิงปริมาณของยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบ ด้วยวิธีการนับจำนวนเชื้อแบคทีเรีย โดยใช้ยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบ ที่ผสมและไม่ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และสารที่ใช้คงรูปยางคอมปาวด์ ทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และ *S. aureus* ที่เวลาทดสอบ 0-240 นาที ผลการทดสอบเป็นดังนี้

4.4.1 การทดสอบเชิงปริมาณของยางคอมปาวด์ที่ไม่ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

การทดสอบเชิงปริมาณเป็นการทดสอบที่ขึ้นกับเวลา หรือปริมาณสารที่ใช้ในการทดสอบ โดยเชื้อแบคทีเรียที่ผ่านการทดสอบ ถูกนำมาเจือจางแล้วเลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยงานเพาะเชื้อที่นำผลมาวิเคราะห์ผลต้องมีจำนวนเชื้อที่ 30-300 โคโลนีต่องานเพาะเชื้อ ลักษณะและปริมาณของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และ *S. aureus* มีลักษณะการเจริญแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างเชื้อแบคทีเรีย a) *E. coli* b) *S. aureus* จากการทดสอบเชิงปริมาณ



รูปที่ 4.8 ร้อยละการอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรีย a) *E. coli* b) *S. aureus* ที่ทดสอบแบบเขย่าด้วยยางคอมปาวด์ระบบ CV, Semi-EV และ EV โดยไม่มีการเติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ที่เวลา 0-240 นาที

รูปที่ 4.8 แสดงร้อยละการอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และ *S. aureus* ที่ทดสอบแบบเขย่าด้วยยางคอมปาวด์ระบบ CV, Semi-EV และ EV ที่เวลา 0-240 นาที พบว่ายางคอมปาวด์ระบบ CV และ Semi-EV ที่เวลาในการทดสอบนานขึ้น ร้อยละการอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* มีค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 100 ของแบคทีเรียเริ่มต้น แสดงว่ายางคอมปาวด์ระบบ CV และ Semi-EV ไม่มีประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* แต่เมื่อพิจารณาของยางคอมปาวด์ระบบ EV พบว่า ร้อยละการอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* มีค่าลดต่ำลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น แสดงว่ายางคอมปาวด์ระบบ EV มีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ *E. coli* ได้ พฤติกรรมดังกล่าวยังพบได้เช่นเดียวกันในเชื้อ *S. aureus* ทั้งนี้ คาดว่าเนื่องจาก ความแตกต่างของสูตรยางทั้ง 3 ระบบ ทั้งนี้การที่ยางคอมปาวด์ระบบ EV สามารถ

ยับยั้งการเจริญของเชื้อ *E. coli* และ *S. aureus* ได้ ทำให้เกิดความสนใจในการศึกษาผลของสารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปยางที่มีต่อประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

4.4.2 การทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อของสารเคมีที่ใช้กรรูปยางคอมปาวด์ด้วยเชื้อ

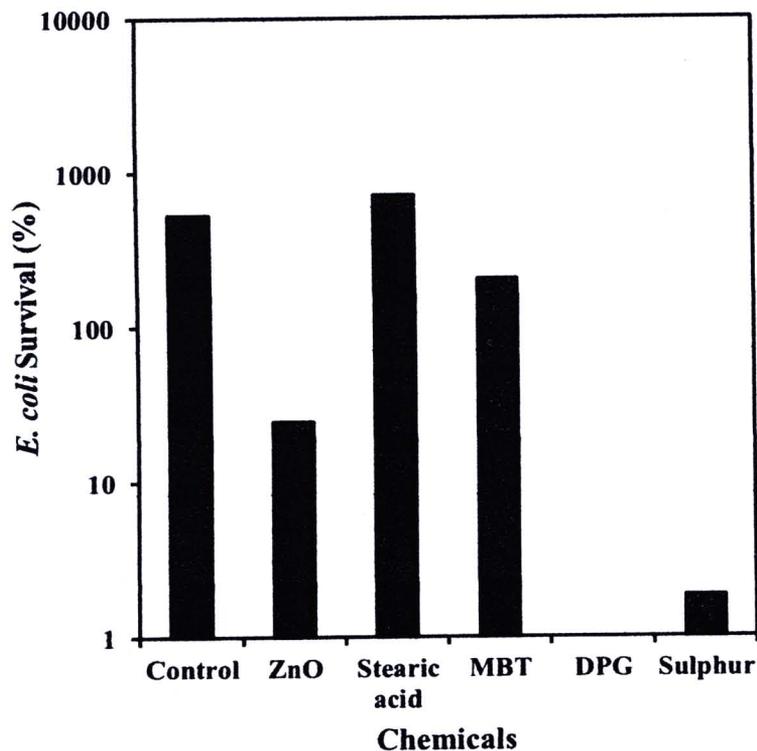
E. coli และ *S. aureus*

สำหรับการตรวจสอบผลของสูตรยางที่ใช้ในงานวิจัย ทำได้โดยการตรวจสอบสารเคมีที่ใช้ในการกรรูปยางที่ใช้ในการทดลองนี้ ใช้ปริมาณการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.2 โดยการคำนวณปริมาณสารที่ใช้ในการทดสอบนั้นคำนึงถึงปริมาณความเข้มข้นของสารเท่ากับที่ผสมในยางทดสอบ โดยเลือกสารเคมีแต่ละชนิดปริมาณมากที่สุดที่ผสมในยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบ เช่น ยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบ มีการใช้ไดฟีนิลกัวนิดีน (DPG) สูงสุดในยางคอมปาวด์ระบบ EV ดังนั้นปริมาณสาร DPG ที่เลือกมาทำการทดสอบจะอยู่ที่ 1 phr ซึ่งใช้ในการกรรูปยางคอมปาวด์ระบบ EV นั้นเอง สำหรับตัวอย่างการคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้ทดสอบ ทำโดยนำยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบ ขนาด 5×5 ตารางเซนติเมตร มาชั่งน้ำหนัก พบว่ายางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบ มีน้ำหนักประมาณ 2.982 กรัม คิดเป็นเนื้อยางได้ 2.669 กรัม ดังนั้นสารเคมีจึงคัดออกไซค์ 5 phr จึงคิดเป็น $\frac{2.669 \times 5}{100} = 0.135$ กรัม ส่วนปริมาณสารเคมีอื่น ๆ ที่ใช้ในการกรรูปยางแสดงดังตารางที่ 4.2 ปริมาตรทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอยู่ที่ 50 มิลลิลิตร แบคทีเรียทดสอบมีค่า OD₆₀₀ เท่ากับ 0.1

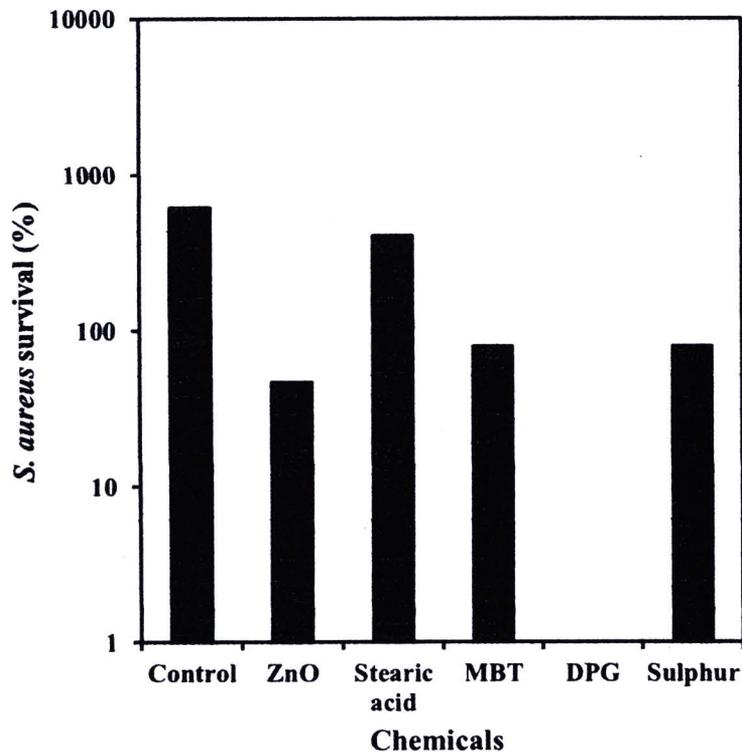
ตารางที่ 4.2 ปริมาณสารเคมีสำหรับการกรรูปยางธรรมชาติในการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

Chemicals	Content in NR compound		
	phr	g/50 ml	mg/ml
ZnO	5.0	0.135	2.7
Stearic acid	2.0	0.099	1.8
MBT	2.5	0.113	2.3
DPG	1.0	0.045	0.9
Sulphur	3.0	0.135	2.7

รูปที่ 4.9 แสดงร้อยละการอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* ทดสอบแบบเขย่าด้วยสารเคมีที่ใช้ในการคงรูปร่างคอมปาวด์ ที่เวลา 240 นาที พบว่า ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ไคฟีนิลกัวนิดีน (DPG) และกำมะถัน (Sulphur) สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ได้ อย่างไรก็ตาม สูตรอย่างทั้ง 3 ระบบ มีการใช้ปริมาณซิงค์ออกไซด์เท่ากันในการคงรูปร่าง ดังนั้น ซิงค์ออกไซด์จึงไม่ใช่สารเคมีที่เป็นสาเหตุให้ยางคอมปาวด์ระบบ EV สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ได้ ส่วนกำมะถันที่ใช้ทดสอบนี้ มีความเป็นอิสระ สามารถเคลื่อนที่ไปยังเชื้อแบคทีเรียได้ แต่ยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบที่ผสมกำมะถันในการคงรูปร่างคอมปาวด์ ไม่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ ทั้งนี้เนื่องจาก กำมะถันถูกตรึงกับสายโซ่โมเลกุลยาง ส่งผลให้กำมะถันไม่สามารถเคลื่อนที่ออกมายับยั้งเชื้อแบคทีเรียภายนอกชิ้นงานได้ ดังนั้นกำมะถันจึงไม่ใช่สารเคมีที่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ในยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบได้ และสารตัวสุดท้ายคือ สารไคฟีนิลกัวนิดีน มีการใช้ในยางคอมปาวด์ระบบ EV ปริมาณสูงกว่ายางคอมปาวด์ 2 ระบบ ทำให้สารไคฟีนิลกัวนิดีนเหลือจากการคงรูปร่าง คอมปาวด์ระบบ EV และมีปริมาณมากพอที่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ได้



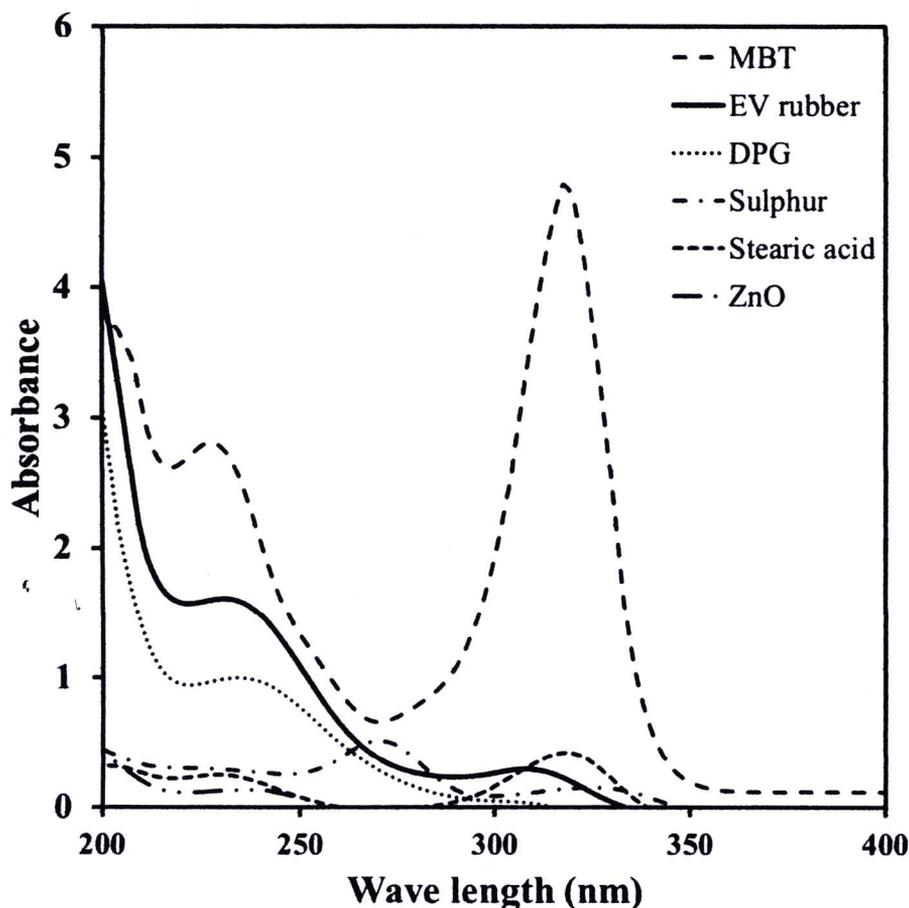
รูปที่ 4.9 ร้อยละการอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* ทดสอบแบบเขย่าด้วยสารเคมีที่ใช้ในการคงรูปร่างคอมปาวด์ ที่เวลา 240 นาที



รูปที่ 4.10 ร้อยละการอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรียชนิด *S. aureus* ทดสอบแบบเขย่าด้วยสารเคมีที่ใช้ในการคงรูปยางคอมปาวด์ ที่เวลา 240 นาที

การทดสอบสารเคมีที่ใช้คงรูปยางต่อการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่า สารไดฟีนิลกัวนิดีน สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อ *S. aureus* ได้ชัดเจนที่สุด จึงเป็นการยืนยันว่าการที่ยางคอมปาวด์ระบบ EV ที่ไม่ได้ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย มีร้อยละการอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ลดลงเนื่องจากสาร ไดฟีนิลกัวนิดีนที่ไปยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย *S. aureus* นั้นเอง

รูปที่ 4.11 แสดงช่วงการดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตของสารเคมีที่ใช้คงรูปยางคอมปาวด์ และสารเคมีที่แพร่จากยางคอมปาวด์ระบบ EV ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ลักษณะเส้นกราฟการดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตของสารเคมีที่ออกจากชิ้นงานยางคอมปาวด์ระบบ EV มีความคล้ายคลึงกับเส้นกราฟการดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตของสาร ไดฟีนิลกัวนิดีน คือมีช่วงการดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตที่ประมาณ 230 และ 200 นาโนเมตร ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าสาร ไดฟีนิลกัวนิดีนแพร่ออกจากยางคอมปาวด์ระบบ EV

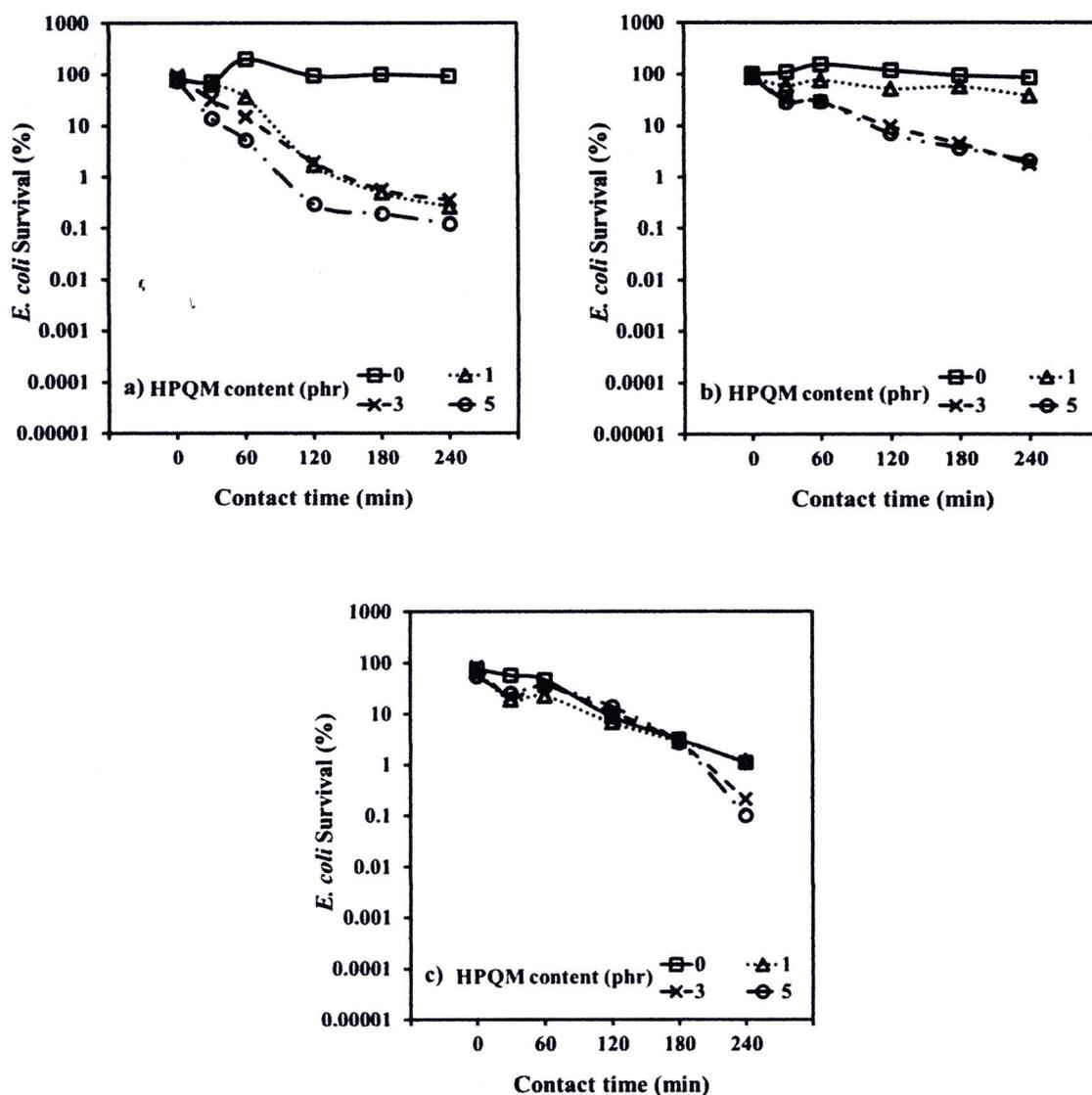


รูปที่ 4.11 ช่วงการดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตของสารเคมีที่ใช้คงรูปยางคอมปาวด์และสารเคมีที่แพร่จากยางคอมปาวด์ระบบ EV ด้วยเครื่อง Spectrophotometer

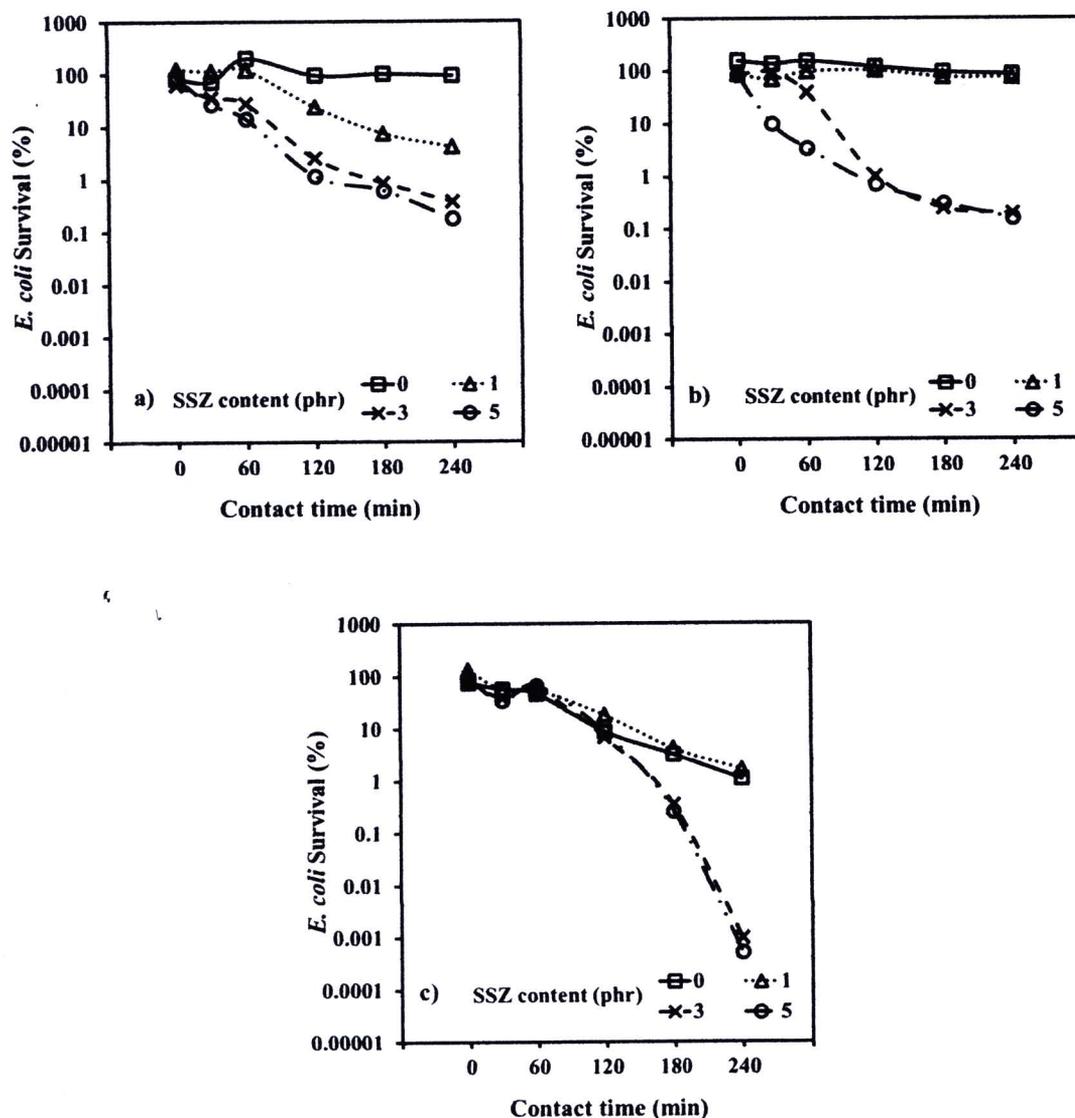
การที่สารไดฟีนิลกัวนิดิน (DPG) ที่ใช้ในการคงรูปยางคอมปาวด์มีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และ *S. aureus* ได้นั้น การเพิ่มปริมาณสาร DPG แทนการใส่สารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเพื่อลดต้นทุนการผลิต สาร DPG ซึ่งมีความเป็นพิษต่อมนุษย์ [40] ถ้าใส่ในปริมาณที่มาก ทำให้เป็นอันตรายต่อมนุษย์ ดังนั้น การเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของยางคอมปาวด์ ต้องผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่มีความปลอดภัยต่อมนุษย์เพิ่มลงในยางคอมปาวด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย นอกจากนั้นถ้าใช้สาร DPG ในปริมาณที่สูง ส่งผลให้เวลาในการคงรูปยางที่นานขึ้น และสมบัติของยางคอมปาวด์ในแต่ละสูตรยางเปลี่ยนแปลงไป

4.4.3 การทดสอบเชิงปริมาณของยางคอมปาวด์ 3 ระบบ ที่ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM และ SSZ ด้วยเชื้อ *E. coli*

การทดสอบเชิงปริมาณของยางคอมปาวด์ระบบ CV, Semi-EV และ EV ที่ไม่ผสมและผสมสาร HPQM และ SSZ ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr ด้วยเชื้อ *E. coli* แสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.12 ร้อยละการอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* ที่ผ่านการทดสอบแบบเขย่ากับยางคอมปาวด์ผสมสาร HPQM ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr ที่เวลา 0-240 นาที โดย a) ระบบ CV b) ระบบ Semi-EV และ c) ระบบ EV



รูปที่ 4.13 ร้อยละการอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* ที่ผ่านการทดสอบแบบเขย่ากับ ยางคอมปาวด์ผสมสาร SSZ ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr ที่เวลา 0-240 นาที โดย a) ระบบ CV b) ระบบ Semi-EV และ c) ระบบ EV

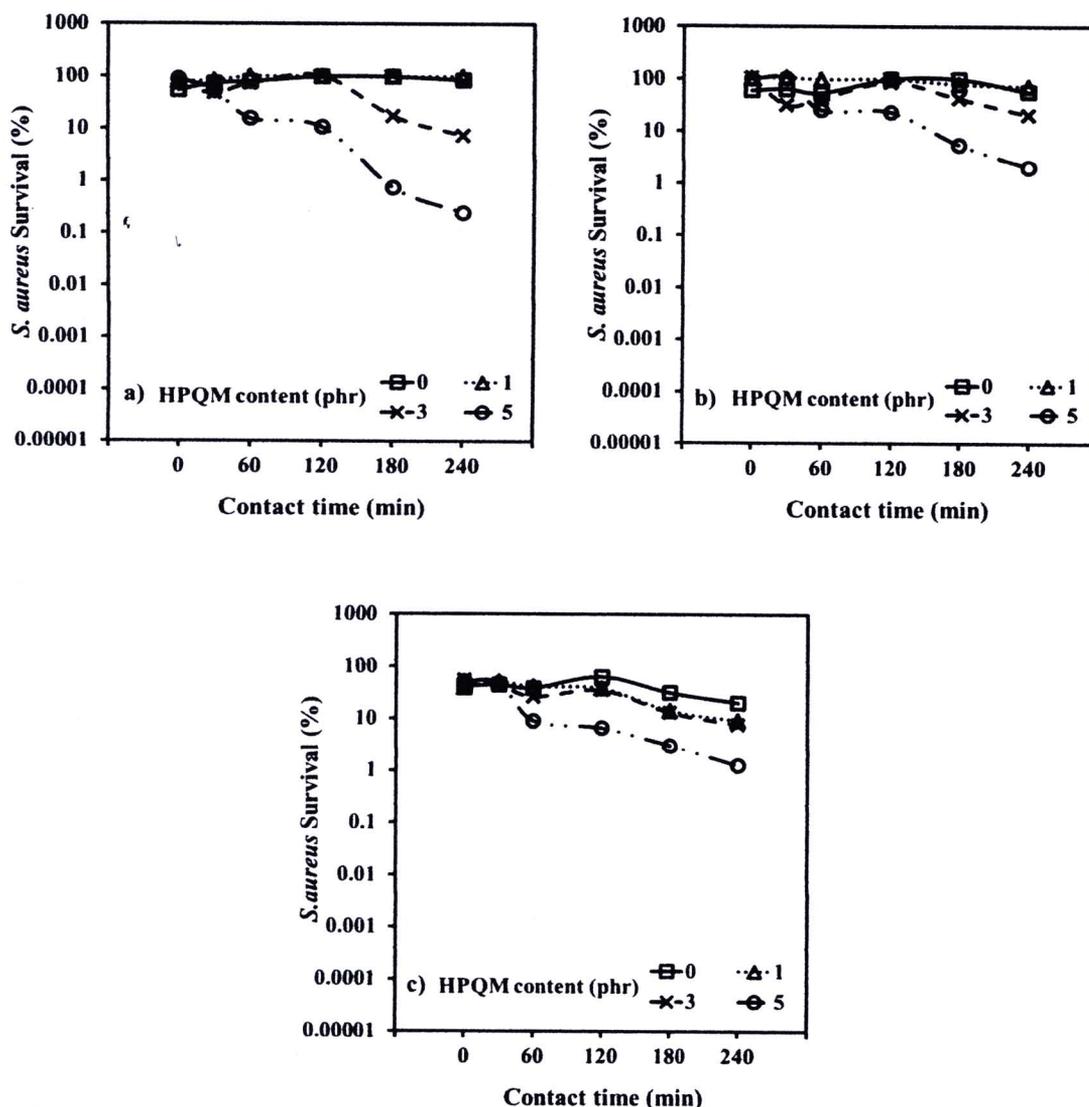
รูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงร้อยละการอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* จากการทดสอบแบบเขย่า ของยางคอมปาวด์ระบบ CV, Semi-EV และ EV ที่ไม่ผสมและผสมสาร HPQM และ SSZ ตามลำดับที่ ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr เวลา 0-240 นาที เมื่อพิจารณาเวลาที่ชิ้นงานยางคอมปาวด์สัมผัสกับเชื้อ แบคทีเรียชนิด *E. coli* พบว่ายางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบที่ผสมสาร HPQM และ SSZ มีร้อยละการ อยู่รอดของเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* ที่ลดลงตามเวลา ซึ่งแสดงว่ามีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อสูงขึ้น การปรับเปลี่ยนปริมาณสาร HPQM และ SSZ จาก 1 phr เป็น 3 และ 5 phr ในยาง คอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* มีร้อยละการอยู่รอดลดลง ทั้งนี้เป็น

ผลเนื่องมาจากการแพร่ของสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบเชิงคุณภาพ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบขบวนการปาวด์ทั้ง 3 ระบบที่ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย พบว่า ขบวนการปาวด์ระบบ CV ที่ผสมสารยับยั้งเชื้อชนิด HPQM และ SSZ มีความว่องไวต่อการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* สูงสุด ใช้ปริมาณสารยับยั้งเชื้อทั้ง 2 ชนิด ที่ 1 phr รองลงมาคือขบวนการปาวด์ระบบ Semi-EV และ EV ที่ต้องใช้ปริมาณสารยับยั้งเชื้อที่ 3 phr เนื่องจากช่องว่างที่เกิดขึ้นในขบวนการปาวด์ทั้ง 3 ระบบ มีความแตกต่างกัน โดยช่องว่างที่เกิดขึ้นในขบวนการปาวด์ระบบ CV มีขนาดใหญ่ที่สุด ส่งผลให้การแพร่ออกมาของสารยับยั้งเชื้อทั้ง 2 ชนิดในขบวนการปาวด์ระบบ CV ได้ง่ายกว่าขบวนการปาวด์ระบบ Semi-EV และ EV ซึ่งมีช่องว่างขนาดเล็กกว่า ส่วนสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM อาจไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในขบวนการปาวด์ระบบ EV โดยผลการทดลองร้อยละการอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* มีความคล้ายคลึงกับชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมสาร HPQM เนื่องจากสาร DPG ที่เป็นสารช่วยในการคงรูปภายในขบวนการปาวด์ระบบ EV มีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียตามที่ได้กล่าวมาแล้ว

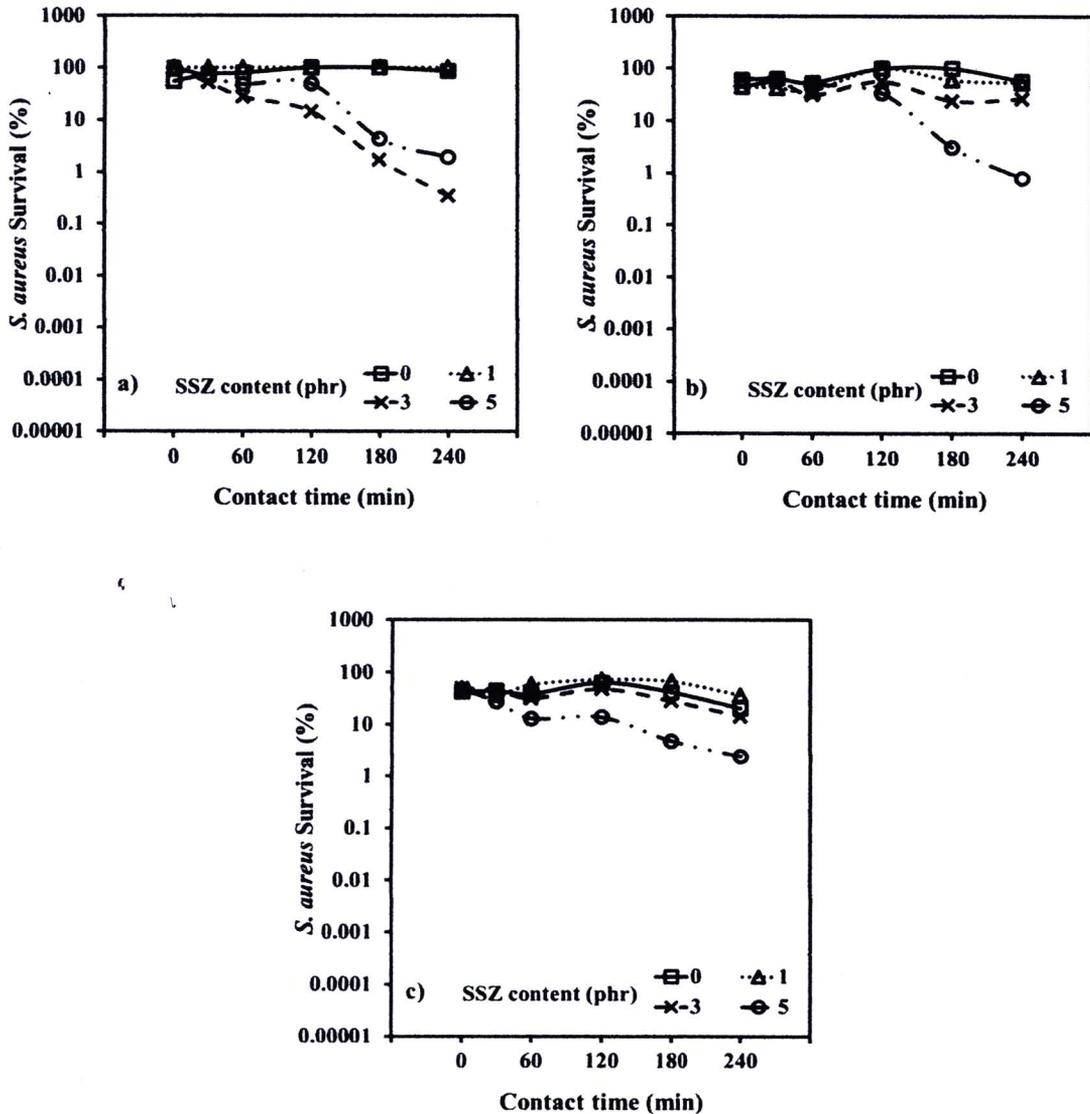
สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียระหว่างสาร HPQM และ SSZ พบว่า ขบวนการปาวด์ที่ผสมสาร HPQM มีประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียสูงกว่ากรณีสาร SSZ สำหรับการทดสอบด้วยวิธีการวัดบริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ในขณะที่ผลการทดสอบการวัดค่าร้อยละการอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรีย แสดงให้เห็นว่า สาร HPQM มีประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียได้ดี เมื่อผสมในขบวนการปาวด์ระบบ CV ในขณะที่ส่วนสาร SSZ สามารถแสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อฯ ได้ดี เมื่อผสมอยู่ในขบวนการปาวด์ระบบ Semi-EV และ EV โดยสังเกตจากความแตกต่างของค่าร้อยละการอยู่รอดระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมและผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ณ เวลาการทดสอบ 240 นาที

4.4.4 การทดสอบเชิงปริมาณของยางคอมปาวด์ 3 ระบบ ที่ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM และ SSZ ด้วยเชื้อ *S. aureus*

การทดสอบเชิงปริมาณของยางคอมปาวด์ระบบ CV, Semi-EV และ EV ที่ไม่ผสมและผสมสาร HPQM และ SSZ ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr ด้วยเชื้อ *S. aureus* แสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.14 ร้อยละการอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรียชนิด *S. aureus* ที่ผ่านการทดสอบแบบเขย่ากับยางคอมปาวด์ผสมสาร HPQM ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr ที่เวลา 0-240 นาที โดย a) ระบบ CV b) ระบบ Semi-EV และ c) ระบบ EV



รูปที่ 4.15 ร้อยละการอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ที่ผ่านการทดสอบแบบเขย่ากับ ยางคอมปาวด์ผสมสาร SSZ ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr ที่เวลา 0-240 นาที โดย a) ระบบ CV (b) ระบบ Semi-EV และ (c) ระบบ EV

ผลการทดสอบเชิงปริมาณของยางคอมปาวด์ ระบบ CV, Semi-EV และ EV ที่ไม่ผสมและผสมสาร HPQM และ SSZ ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr โดยแสดงเป็นร้อยละการอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* เวลาทดสอบ 0-240 นาที แสดงดังรูปที่ 4.14 และ 4.15 พบว่า เวลาในการทดสอบและปริมาณสารยับยั้งเชื้อ HPQM และ SSZ ที่เพิ่มขึ้น มีค่าร้อยละการอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ลดลง เช่นเดียวกับการทดสอบกับเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* เมื่อพิจารณาระบบของยางคอมปาวด์ พบว่า ยางคอมปาวด์ระบบ CV มีความไวต่อการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* สูงสุด ใช้ปริมาณสารยับยั้งเชื้อทั้ง 2 ชนิด ที่ 3 phr รองลงมาคือยางคอมปาวด์ระบบ Semi-EV และ EV ที่ต้องใช้ปริมาณสารยับยั้งเชื้อที่

5 phr ซึ่งผลการสอบเป็นเช่นเดียวกับการทดสอบชิ้นงานยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบ ด้วยเชื้อทดสอบ ชนิด *E. coli* เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของสาร HPQM และ SSZ พบว่า มีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ *E. coli* สูงกว่า *S. aureus* ทั้งนี้เป็นผลจากสารยับยั้งเชื้อ HPQM เข้าไปทำลายในส่วนของความสามารถในการสังเคราะห์ Cell wall ของแบคทีเรีย โดยแบคทีเรียแกรมบวกมี Cell wall ที่หนากว่าแบคทีเรียแกรมลบ ส่งผลให้แบคทีเรียแกรมบวกถูกยับยั้งได้ง่ายกว่าแบคทีเรียแกรมลบ [13, 24] ส่วน SSZ สารที่ออกมายับยั้งเชื้อแบคทีเรีย คือ Ag^+ การที่ Cell wall ของแบคทีเรียแกรมบวกมีชั้น Peptidoglycan ที่หนากว่าแบคทีเรียแกรมลบ ประกอบกับชั้น Peptidoglycan เป็นประจุลบ ทำให้ Ag^+ จับกับประจุลบที่ชั้น Peptidoglycan ในแบคทีเรียแกรมบวกได้มากกว่าแบคทีเรียแกรมลบ ทำให้ Ag^+ เข้าไปทำลาย Cell membrane ของแบคทีเรียแกรมบวกได้น้อยกว่าแบคทีเรียแกรมลบ ส่งผลให้แบคทีเรียแกรมบวกทนต่อสาร SSZ ได้สูงกว่าแบคทีเรียแกรมลบ [14, 25] สรุปผลการทดสอบด้วยวิธี Plate count agar method โดยใช้ตัวแปรสำหรับทดสอบคือ Contact time ปริมาณและชนิดของสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ระบบการคงรูปของยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบ รวมถึงชนิดของเชื้อแบคทีเรีย แสดงดังตารางที่ 4.3

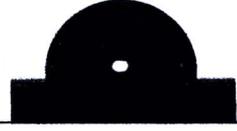
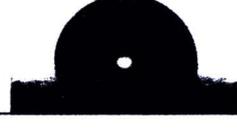
ตารางที่ 4.3 สรุปผลการทดสอบด้วยวิธี Plate count agar method

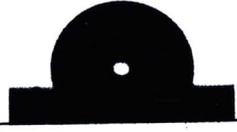
ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	ผลการทดลอง
1. Contact time	การเพิ่มเวลาในการทดสอบของชิ้นงานยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบที่ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย <i>E. coli</i> และ <i>S. aureus</i> ชนิดได้สูงขึ้น
2. ปริมาณสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย	ปริมาณสารยับยั้งเชื้อ HPQM และ SSZ ที่สูงขึ้นสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย <i>E. coli</i> และ <i>S. aureus</i> ได้สูงขึ้น
3. ระบบการคงรูปของยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบ	ยางคอมปาวด์ที่ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียระบบ CV มีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย <i>E. coli</i> และ <i>S. aureus</i> ได้สูงกว่ายางคอมปาวด์ระบบ Semi-EV และ EV ตามลำดับ ส่วนยางคอมปาวด์ระบบ EV ที่ไม่ได้ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้
4. ชนิดของสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย	สาร HPQM มีประสิทธิภาพดีต่อยางคอมปาวด์ระบบ CV ส่วนสาร SSZ มีประสิทธิภาพดีต่อยางคอมปาวด์ระบบ Semi-EV และ EV
5. ชนิดของเชื้อแบคทีเรีย	เชื้อแบคทีเรีย <i>E. coli</i> สามารถยับยั้งเชื้อได้ดีกว่าเชื้อแบคทีเรีย <i>S. aureus</i> สำหรับยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบที่ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย HPQM และ SSZ

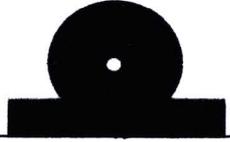
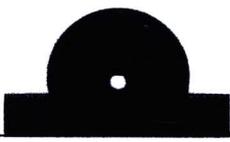
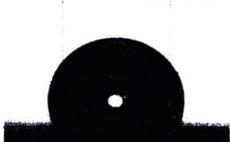
4.5 ผลการทดสอบการแพร่ออกมาของสารเคมี

การผสมขึ้นรูปชิ้นงานยางคอมปาวด์ของงานวิจัยนี้ใช้เครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ ทำให้สารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ผสมในยางคอมปาวด์อาจถูกกักไว้ข้างในชิ้นงานยางคอมปาวด์ สารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียต้องขึ้นมาที่ผิวชิ้นงานยางคอมปาวด์จึงสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ การพิสูจน์การแพร่ของสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทำได้จากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ผิวชิ้นงาน โดยทำการทดสอบการเปลี่ยนแปลงบริเวณผิวชิ้นงานยางคอมปาวด์ด้วยวิธีวัดมุมสัมผัส ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่ามุมสัมผัสของยางคอมปาวด์ที่ไม่ผสมและผสมสารยับยั้งเชื้อชนิด HPQM และ SSZ

Vulcanization system	NR compound	Anti-bacteria content (phr)	Contact angle value (Degree)	Wettability form
CV	Neat NR	0	115.9 ± 3.9	
	NR + HPQM	1	108.9 ± 3.6	
		3	98.9 ± 0.8	
		5	82.9 ± 2.9	
	NR + SSZ	1	111.7 ± 1.7	
		3	114.6 ± 2.2	
		5	114.4 ± 3.1	

Vulcanization system	NR compound	Anti-bacteria content (phr)	Contact angle value (Degree)	Wettability form
Semi-EV	Neat NR	0	128.5 ± 4.5	
	NR + HPQM	1	133.1 ± 3.0	
		3	119.6 ± 1.6	
		5	119.7 ± 1.4	
	NR + SSZ	1	130.8 ± 3.7	
		3	130.3 ± 2.9	
		5	125.4 ± 3.6	

Vulcanization system	NR compound	Anti-bacteria content (phr)	Contact angle value (Degree)	Wettability form
EV	Neat NR	0	121.1 ± 2.2	
	NR + HPQM	1	126.2 ± 4.1	
		3	118.9 ± 1.4	
		5	118.4 ± 1.7	
	NR + SSZ	1	125.4 ± 2.6	
		3	123.8 ± 4.2	
		5	117.3 ± 1.8	

จากผลการทดสอบเรื่องการแพร่ออกมาของสารเคมีของชิ้นงานยางคอมปาวด์ดังตารางที่ 4.4 พบว่า ค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ระหว่างน้ำกับผิวของยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบที่ไม่ได้ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 116-130 องศา ทั้งนี้ค่าของมุมสัมผัสแสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบ มีค่ามุมสัมผัสสูง เนื่องจาก โมเลกุลของยางคอมปาวด์เป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วซึ่งมีลักษณะไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) ส่วนกรณีการผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM ซึ่งเป็นสารเคมีที่ละลายอยู่ในน้ำ เข้าไปยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบ ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr พบว่า ในยางคอมปาวด์ระบบ CV นั้น มีค่ามุมสัมผัสลดลงตามปริมาณการผสมสาร HPQM โดยมีค่าต่ำสุด 82.9 องศา ที่ปริมาณการผสม 5 phr นั้นแสดงว่ายางคอมปาวด์ระบบ CV มีการ

เปลี่ยนแปลงของผิว เนื่องจากสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM สามารถแพร่ออกมาที่ผิวชิ้นงานยางคอมปาวด์ระบบ CV ได้ โดยที่ปริมาณการผสมสาร HPQM สูงสุด สารยับยั้งเชื้อชนิด HPQM สามารถแพร่ออกมาที่ผิวชิ้นงานในปริมาณที่มากเช่นเดียวกัน ส่วนยางคอมปาวด์ระบบ Semi-EV และ EV ที่ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr พบว่า ค่ามุมสัมผัสสูงกว่ายางคอมปาวด์ระบบ CV เมื่อปริมาณสาร HPQM เพิ่มสูงขึ้น แสดงว่าสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM ที่ผสมเข้าไปนั้นแพร่ออกมาสู่ผิวชิ้นงานได้ยากกว่ายางคอมปาวด์ระบบ CV เนื่องจากลักษณะ โครงสร้างภายในของยางคอมปาวด์ระบบ CV นั้นมีช่องว่าง (Free volume) ที่ใหญ่กว่ายางคอมปาวด์ระบบ Semi-EV และ EV ตามลำดับ ส่วนการผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด SSZ ที่ปริมาณ 1 3 และ 5 phr ในยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบ พบว่ามุมสัมผัสที่เกิดขึ้น มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจากยางคอมปาวด์ที่ไม่ได้ผสมสารยับยั้งเชื้อ ทั้งนี้เนื่องจากสารยับยั้งเชื้อชนิด SSZ นั้น คือซิลเวอร์ (Silver) ที่ถูกตรึงอยู่บนซีโอไลท์ แพร่ออกมาบนผิวชิ้นงานได้น้อย ต้องอาศัยตัวกลางคือน้ำในการแพร่ออกมาสู่ผิวชิ้นงานยางคอมปาวด์ ส่งผลให้เห็นการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ของค่ามุมสัมผัสระหว่างน้ำกับผิวชิ้นงานยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบที่ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด SSZ [34]

4.6 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

การเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์สินค้ายางพาราที่ใช้งานด้านอนามัยและคำนึงถึงสุขภาพอนามัยเป็นเรื่องที่สำคัญ การเพิ่มมูลค่าให้กับยางพาราของไทยและช่วยด้านชีวอนามัยให้สูงขึ้น โดยผลงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติตามการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมและแผ่นยางชีวอนามัยได้ โดยที่ราคาผลิตภัณฑ์แผ่นยางที่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียได้นี้ อาจมีค่าเพิ่มขึ้น โดยต้นทุนการผลิตนั้นแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.5 ราคาสารเคมีที่ใช้ในสูตรผลิตภัณฑ์ยางคอมปาวด์ 3 ระบบ ที่ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM

สารเคมี	ปริมาณ (phr)	ราคา/บาท/กก	สัดส่วน (ปริมาณที่ใช้จริง/ราคา)
ยางธรรมชาติเกรด STR 5L *ราคาขง ณ วันที่ 30/5/54	100 ส่วน	166*	16600
สารกระตุ้นปฏิกิริยา ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	5.0	26.0	130
สารกระตุ้นปฏิกิริยา กรดสเตียริก (Stearic acid)	2.0	20.0	40
เป็นสารเร่งปฏิกิริยา วัลคาไนซ์ (MBT)	0.5 / 1.5 / 2.5 (CV / Semi-EV / EV)	172.7	86.35 / 259.05 / 431.75 (CV / Semi-EV / EV)
เป็นสารเร่งปฏิกิริยา วัลคาไนซ์ (DPG)	0.2 / 0.6 / 1.0 (CV / Semi-EV / EV)	150.0	30 / 90 / 150 (CV / Semi-EV / EV)
กำมะถัน (Sulphur)	3.0 / 1.2 / 0.2 (CV / Semi-EV / EV)	40.0	120.0 / 48 / 8 (CV / Semi-EV / EV)
สารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM	5.0	1850	9250
ปริมาณและราคารวม	115.7 / 115.3 / 115.7 (CV / Semi-EV / EV)	-	26256.35 / 26417.05 / 26609.75 (CV / Semi-EV / EV)
ราคารายคอมปาวด์ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (บาท/กิโลกรัม)**			226.93 / 229.12 / 229.99 (CV / Semi-EV / EV)

** (ราคานี้ไม่รวมค่าเครื่องจักรและค่าแรงงาน)

ตารางที่ 4.6 ราคาสารเคมีที่ใช้ในสูตรผลิตภัณฑ์ยางคอมปาวด์ 3 ระบบ ที่ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด SSZ

สารเคมี	ปริมาณ (phr)	ราคา/บาท/กก	สัดส่วน (ปริมาณที่ใช้จริง/ราคา)
ยางธรรมชาติเกรด STR 5L *ราคาขาย ณ วันที่ 30/5/54	100 ส่วน	166*	16600
สารกระตุ้นปฏิกิริยา ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	5.0	26.0	130
สารกระตุ้นปฏิกิริยา กรดสเตียริก (Stearic acid)	2.0	20.0	40
เป็นสารเร่งปฏิกิริยา วัลคาไนซ์ (MBT)	0.5 / 1.5 / 2.5 (CV / Semi-EV / EV)	172.7	86.35 / 259.05 / 431.75 (CV / Semi-EV / EV)
เป็นสารเร่งปฏิกิริยา วัลคาไนซ์ (DPG)	0.2 / 0.6 / 1.0 (CV / Semi-EV / EV)	150.0	30 / 90 / 150 (CV / Semi-EV / EV)
กำมะถัน (Sulphur)	3.0 / 1.2 / 0.2 (CV / Semi-EV / EV)	40.0	120 / 40 / 8 (CV / Semi-EV / EV)
สารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด SSZ	5.0	2200	11000
ปริมาณและราคารวม	115.7 / 115.3 / 115.7 (CV / Semi-EV / EV)	-	28006.35 / 28167.05 / 28359.75 (CV / Semi-EV / EV)
ราคายางคอมปาวด์ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (บาท/กิโลกรัม)**			242.06 / 244.29 / 245.11 (CV / Semi-EV / EV)

** (ราคานี้ไม่รวมค่าเครื่องจักรและค่าแรงงาน)

จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 แสดงต้นทุนที่ใช้ในการผลิตยางธรรมชาติ 3 ระบบที่ไม่ได้ผสมสารยับยั้งเชื้อซึ่งมีราคา 154.92 บาทต่อกิโลกรัม โดยยางคอมปาวด์ทั้ง 3 ระบบ ที่ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM มีราคาที่ใกล้เคียงกัน คือ 228.68 บาทต่อกิโลกรัม และการผสม SSZ มีราคาอยู่ที่ 243.82 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งราคานี้ไม่รวมค่าเครื่องจักรและค่าแรงงาน