

# สมบัติเชิงกลและประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุเชิงประกอบ ยางธรรมชาติที่มีสารตัวเติมผงเขม่าดำ

ชิตสุปรีย์ กตาศิการกุล<sup>1</sup> ปิยะภรณ์ นิลทัญ<sup>1</sup> สิริชัย ก้านกิ่ง<sup>1,2</sup> ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ<sup>1</sup>  
และ เอกชัย วิมลมาลา<sup>1\*</sup>

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติเชิงกลและประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีผงเขม่าดำเกรด N220, N330 และ N660 ที่ปริมาณ 0, 20, 40 และ 60 ส่วนในยางร้อยละ (phr) เติมนิวซิลินชนิด 2-Hydroxypropyl- 3-Piperazinyl-Quinoline carboxylic acid Methacrylate (HPQM) based Neusilin ปริมาณ 0, 3, 5 และ 7 phr เชื้อแบคทีเรียที่ใช้ คือ *Escherichia coli* (*E. coli*) ATCC 25923 และ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) ATCC 25922 ทดสอบความสามารถการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธีการวัดรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Halo test) และการนับจำนวนเชื้อแบคทีเรีย (PCA) พบว่า การเติมผงเขม่าดำเกรด N330 ที่ปริมาณ 40 phr ทำให้สมบัติเชิงกลทางด้านมอดูลัสแรงดึง ค่าความแข็ง และความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าเกรด N220 และ N660 และพบว่าสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM based Neusilin ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล โดยที่สารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียร่วมกับผงเขม่าดำสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* ได้ดีกว่าชนิด *S. aureus* ซึ่งระดับการเสริมแรงส่งผลต่อความสามารถการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยการเสริมแรงที่ดีส่งผลให้มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียลดลง

**คำสำคัญ :** ยางธรรมชาติ, ผงเขม่าดำ, สารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย, สมบัติเชิงกล

<sup>1</sup> กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์, สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ, คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

<sup>2</sup> สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมวัสดุและกระบวนการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง

\* ผู้ติดต่อ, อีเมล: ekachai.wim@kmutt.ac.th รับเมื่อ 10 มิถุนายน 2557 ตอบรับเมื่อ 31 ตุลาคม 2557

## Mechanical Properties and Antibacterial Efficacies of HPQM based Neusilin/Natural Rubber with Carbon Black Filler

Chitsupree Katathikankul<sup>1</sup> Piyaporn Niltui<sup>1</sup> Sirichai Kanking<sup>1,2</sup> Narongrit Sombatsompop<sup>1</sup>  
and Ekachai Wimolmala<sup>1\*</sup>

### Abstract

This work studied the mechanical properties and antibacterial efficacies of natural rubber (NR) reinforced with different grades of carbon black N220, N330 and N660 at various loadings 0, 20, 40 and 60 parts per hundred of rubber (phr). 2-Hydroxypropyl-3-Piperazinyl-Quinoline carboxylic acid Methacrylate (HPQM) based Neusilin at loading 0, 3, 5 and 7 phr were used as antibacterial agent against *Escherichia coli* (*E. coli*) ATCC 25923 and *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) ATCC 25922. The Inhibition zone (Halo test) and Plate Count Agar (PCA) methods were employed to assess the anti-bacterial ability. The experimental results suggested that carbon black grade N330 loadings at 40 phr in NR vulcanized improved the tensile modulus, hardness and tensile strength. However, the overall mechanical properties of the NR vulcanizates were not affected by the addition of HPQM based Neusilin. HPQM based Neusilin addition in NR vulcanized reinforced with carbon black against *E. coli* was found to be more effective than that against *S. aureus*. The antibacterial efficacy was conversely associated with the reinforcement level of the NR vulcanizates by carbon black, the higher the reinforcement level the poorer the antibacterial ability.

**Keywords :** Natural rubber, Carbon black, Antibacterial agent, Mechanical properties

---

<sup>1</sup> Polymer Processing and Flow Group, Material Technology, School of Energy Environment and Material, King Mongkut's University of Technology Thonburi

<sup>2</sup> Material and Process Engineering Technology, Faculty of Engineering and Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok Rayong campus

\* Corresponding author, E-mail: ekachai.wim@kmutt.ac.th Received 10 June 2014, Accepted 31 October 2014

## 1. บทนำ

ผลิตภัณฑ์จากวัสดุยางธรรมชาติสำหรับการใช้งานด้านสุขอนามัย มีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้น เช่น แผ่นยางรองพื้นสนามเด็กเล่น ยางรองพื้นในรองเท้า แผ่นยางรองพื้นในห้องปลอดเชื้อ และสายพานยางลำเลียงอาหาร เป็นต้น หากมีการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียหรือเชื้อจุลินทรีย์เข้าสู่ร่างกายอาจทำให้เกิดโรคต่างๆ การเติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในผลิตภัณฑ์จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถช่วยลดความเสี่ยงก่อให้เกิดโรคได้ ซึ่งผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติที่นำไปใช้งานจำเป็นต้องมีการผสมสารเคมีชนิดต่างๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติให้สามารถขึ้นรูปและเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน โดยเฉพาะการใช้สารตัวเติมเสริมแรงชนิดผงเขม่าดำ สามารถช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกล และเป็นการเพิ่มมูลค่าและขีดความสามารถขยายขอบเขตการใช้งานผลิตภัณฑ์วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง

จากงานวิจัยของ Taptim and Sombatsompop [1] ศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบในสภาวะบ่มเร่งด้วยรังสียูวี โดยสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย 3 ชนิด คือ Nano-Ag, Silver substituted Zeolite Compound (SSZ) และ HPQM เชื้อแบคทีเรียที่ใช้ คือ *E. coli* และ *S. aureus* ทดสอบการบ่มเร่งเวลา 21 วัน พบว่า สารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM ให้ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสูงสุด และมีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของสารยับยั้งเชื้อ ส่วนงานวิจัยของ Simhi et al. [2] ศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของยางซิลิโคนที่เคลือบด้วย TA Anitibiotic โดยเชื้อแบคทีเรียที่ใช้ในการทดสอบ คือ *E. coil 67* และ *E. coil Hu 734*

โดยพบว่า ยางซิลิโคนที่ไม่มีสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียมีการเจริญเติบโตของแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด บนผิวชิ้นงานหลังจากเวลาทดสอบ 4 ชั่วโมง ส่วนชิ้นงานที่เคลือบด้วย Anitibiotic TA พบการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดบนผิวชิ้นงานหลังจากเวลาทดสอบที่นานขึ้นเวลา 24 ชั่วโมง นอกจากนี้งานวิจัยของ Jai-eau et al. [3] ศึกษาผลกระทบของระบบการคงรูปยางที่มีต่อประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของยางธรรมชาติที่ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย พบว่า การคงรูปยางระบบ CV มีรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรียสูงกว่าระบบการคงรูปแบบ Semi-EV และ EV ส่วนการเติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ได้

งานวิจัยของผลิตภัณฑ์ยางที่เกี่ยวข้องด้านอนามัยมีไม่แพร่หลาย ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ยางปลอดเชื้อจึงเป็นเป้าหมายสำคัญที่คณะผู้วิจัยให้ความสนใจศึกษาอิทธิพลของสารเสริมแรงผงเขม่าดำและปริมาณการใช้สารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่เติมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งคาดว่าจะได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และมีสมบัติเชิงกลด้านมอดูลัสแรงดึง ความต้านทานแรงดึง การยืดตัวที่รี รวมถึงมีค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ยางที่สามารถนำไปใช้งานได้

## 2. วิธีการทดลอง

### 2.1 ขั้นตอนการผสมและการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

งานวิจัยนี้ทำการผสมยางธรรมชาติ โดยปรับเปลี่ยนเกรด (N220, N330 และ N660) และปริมาณผงเขม่าดำที่ปริมาณ 0, 20, 40 และ 60 phr ทำการเติมสารยับยั้งเชื้อ

แบคทีเรีย (HPQM based Neusilin) ที่ปริมาณ 0, 3, 5 และ 7 phr ด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill) จากบริษัท ยง ฟง แมชชีนเนอรี จำกัด ตามส่วนประกอบของสูตรยาง ดังแสดงในตารางที่ 1 เวลาในการผสมเท่ากับทุกสูตรที่ 30 นาที อุณหภูมิการผสมที่ 40-45 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ ทดสอบเวลาขางไหลตัวในแม่พิมพ์และเวลาในการบ่มสุก ( $t_{c90}$ ) ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating Disk Rheometer; ODR) ของบริษัท โทเทคเทสคิง แมชชีน รุ่น GT 70-70-S2 ตามมาตรฐาน ASTM D2084-01 อุณหภูมิทดสอบ 160 องศาเซลเซียส เตรียมขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน (Hot compression moulding) ของบริษัท แล็บเทค จำกัด อุณหภูมิขึ้นรูป 160 องศาเซลเซียส แรงดันแม่พิมพ์ที่ 150 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรและเตรียมชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน

## 2.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ตรวจสอบสมบัติด้านมอดูลัสแรงดึง ความต้านทานแรงดึง และการยืดตัวด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (Autograph AG-I, Shimadzu, Tokyo, Japan) ตามมาตรฐาน ASTM D412-06 อัตราเร็วในการดึงที่ 500 มิลลิเมตรต่อนาที และทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Hardness durometer (Shore A Model GS-719G, Japan) ตามมาตรฐาน ASTM D2240-10

## 2.3 การทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ

การตรวจสอบโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของสารตัวเติมผงเขม่าดำในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ

ส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5800 สักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ เคลื่อนผิวชิ้นงานทดสอบด้วยทอง

## 2.4 การทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

สำหรับแบคทีเรียที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ คือ เชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมลบ *Escherichia coli* (*E. coli*) ATCC 25923 และเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมบวก *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) ATCC 25922 จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์สาธารณสุข กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข (ประเทศไทย)

### 2.4.1 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเชิงคุณภาพ (Halo test)

การทดสอบรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ตามมาตรฐาน AATCC 90 และแปรผลทดสอบรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย [4] จำนวนดังนี้

$$D_C = \frac{D_A - D_B}{2} \quad (1)$$

โดย

$D_C$  คือ รัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (มิลลิเมตร)

$D_B$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณใส (มิลลิเมตร)

$D_A$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานทดสอบ (มิลลิเมตร)

### 2.4.2 การทดสอบยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเชิงปริมาณ โดยใช้วิธีนับจำนวนเชื้อ (Plate Count Agar method)

ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM E2149-01 โดยมีค่าดัชนีความขุ่นที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรของเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นเท่ากับ 0.1 ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส [4] จำนวนปริมาณเชื้อแบคทีเรียหลังการทดสอบ ตามสมการดังนี้

**ตารางที่ 1** หน้าที่ของสารเคมี ปริมาณที่ใช้ และผู้ผลิต/ผู้จำหน่ายวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

Compound/Grade	Function	Content (phr*)	Supplier
Natural rubber / STR5L	Matrix	100 part	Chemical Innovation Co., Ltd., Thailand.
Zinc Oxide / ZnO	Activator	5.0	Thai-Lysaght Co., Ltd., Thailand.
Stearic acid / ST-DDK	Activator	2.0	Imperial Industrial Chemicals Co., Ltd., Thailand.
Mercaptobenzothaizole, MBT	Accelerator	0.5	CMC advance Co., Ltd., Thailand.
DiphenylGuanidune, DPG	Accelerator	2.0	Siam Chemicals Co., Ltd., Thailand.
Sulphur (325 mesh)	Crosslinking agent	3.0	Zeon advanced Polymix Co., Ltd., Thailand.
N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p phenylenediamine, 6PPD	Antioxidant	1.0	Behn Meyer Chemical Co., Ltd., Thailand.
Carbon black powder (Grade N220, N330 and N660)	Reinforcing filler	0, 20, 40, 60	Thai Carbon Black Public Co., Ltd., Thailand.
HPQM based Neusilin	Antibacterial agent	0, 3, 5, 7	Koventure Co., Ltd., Thailand.

\*phr: part per hundred of rubber

$$cfu/ml = \frac{A}{(10^{-n} \times B)} \quad (2)$$

โดย cfu/ml คือ กลุ่มแบคทีเรีย (Colony forming unit) ต่อมิลลิลิตร

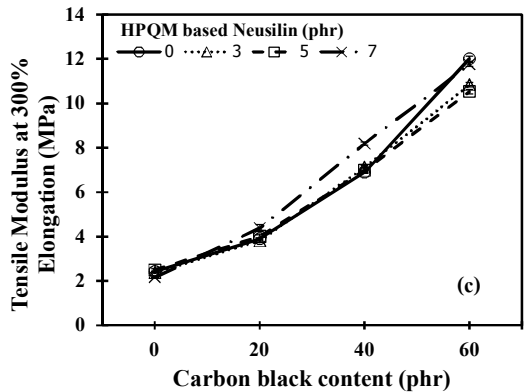
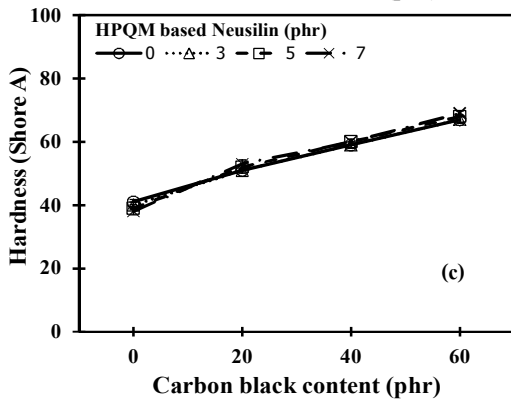
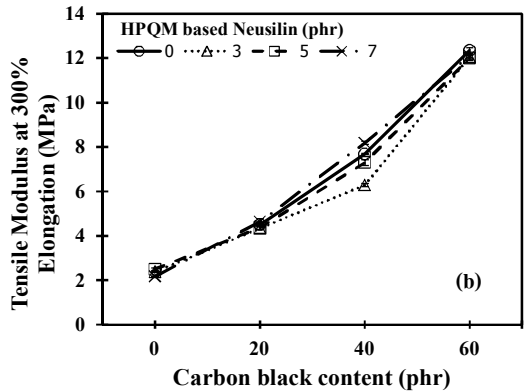
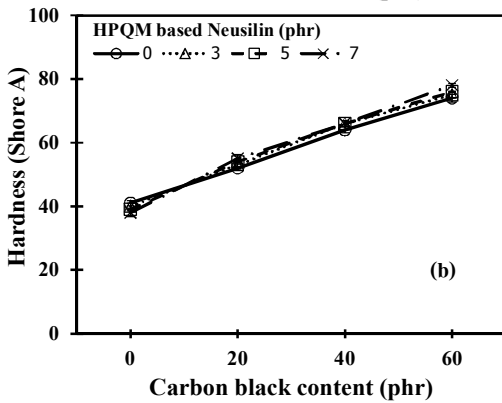
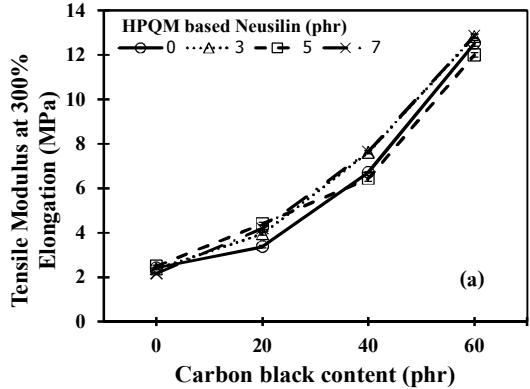
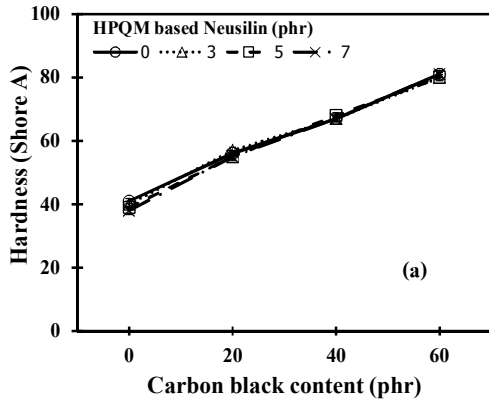
- A คือ จำนวนกลุ่มแบคทีเรียโดยเฉลี่ย
- n คือ จำนวนครั้งการเจือจาง
- B คือ ปริมาตรสารละลายแบคทีเรีย (กำหนดที่ปริมาตร 100 ไมโครลิตร)

**3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

**3.1 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ**

การศึกษาวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ปรับเปลี่ยนเกรดผงเขม่าดำ ปริมาณผงเขม่าดำ และ

สารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM based Neusilin โดยศึกษาสมบัติเชิงกล ดังนี้ ความแข็งที่ผิว มอดูลัสแรงดึงที่การยืดตัว 300 เปอร์เซ็นต์ ความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด จากผลการทดลองค่าความแข็งที่ผิว และมอดูลัสแรงดึง แสดงดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2 พบว่าความแข็งที่ผิวและมอดูลัสแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงเขม่าดำ เนื่องจากอนุภาคของผงเขม่าดำมีความแข็งแกร่ง (Rigidity) สูงกว่าเนื้อยาง ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางโดยรวมมีความแข็งที่ผิวและความแข็งแกร่งเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาเกรดของผงเขม่าดำ พบว่า การเติมผงเขม่าดำเกรด N220 และ N330 มีค่าความแข็ง และค่ามอดูลัสแรงดึงใกล้เคียงกัน แต่มากกว่าการเติมผงเขม่าดำเกรด N660 เพียงเล็กน้อย



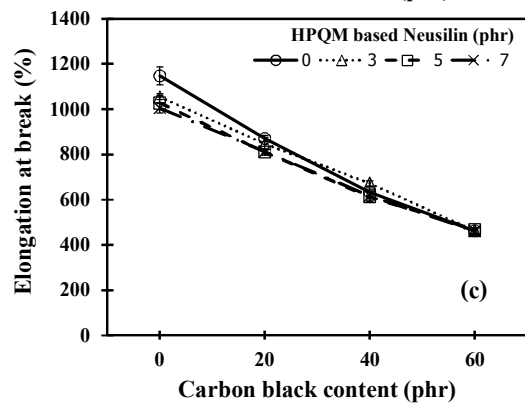
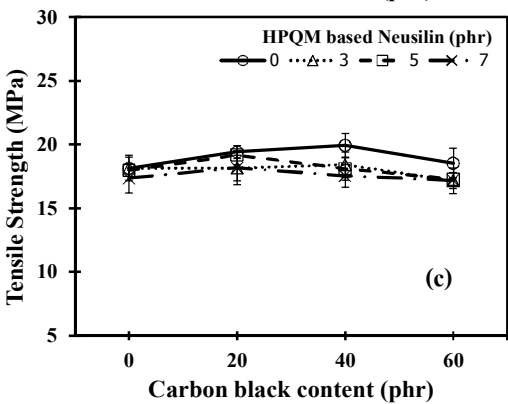
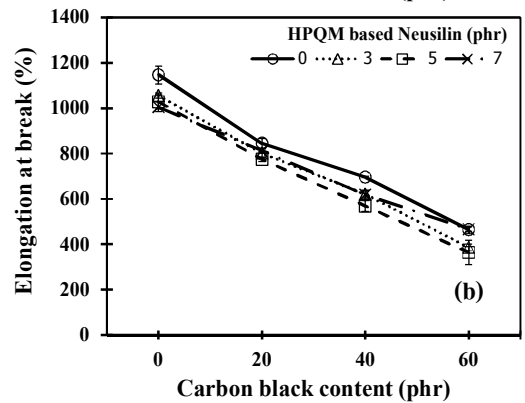
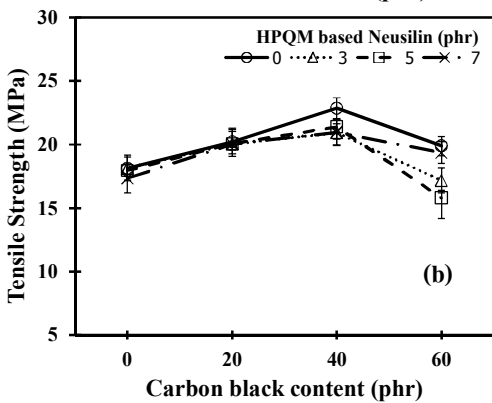
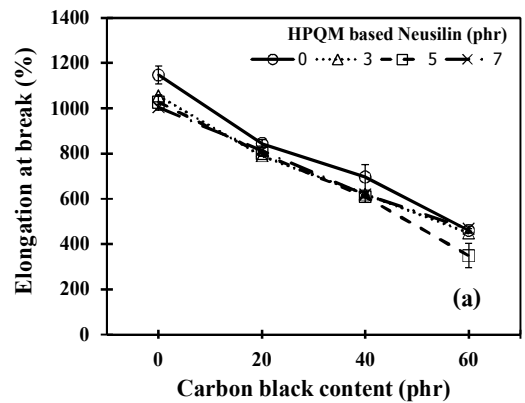
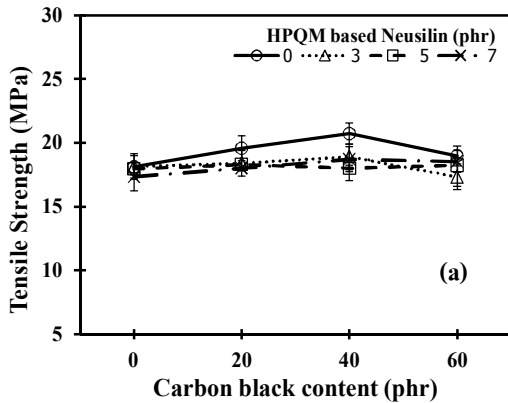
รูปที่ 1 ความแข็งที่ผิวของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมผงเขม่าดำร่วมกับสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (a) เกรด N220 (b) เกรด N330 และ (c) เกรด N660

รูปที่ 2 มอดุลัสแรงดึงที่การยืดตัว 300 เปอร์เซ็นต์ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมผงเขม่าดำร่วมกับสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (a) เกรด 220 (b) เกรด N330 และ (c) เกรด N660

เนื่องจากผงเขม่าดำเกรด N220 และ N330 มีอนุภาคขนาดเล็กและพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific area) มากกว่าผงเขม่าดำเกรด N660 ส่วนกรณีของการเติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM based Neusilin ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ พบว่า ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งที่ผิวและค่ามอดูลัสแรงดึง ทั้งนี้เนื่องจากสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง และมีการเติมในปริมาณน้อยมาก ทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติดังกล่าว สำหรับค่าความต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ปรับเปลี่ยนเกรด ปริมาณผงเขม่าดำและสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย แสดงดังรูปที่ 3 พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมผงเขม่าดำทั้ง 3 เกรด และมีค่าสูงสุดที่ปริมาณ 40 phr เนื่องจากผงเขม่าดำสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์ของยาง (Rubber-filler interaction) ส่งผลให้มีการเสริมแรงของผงเขม่าดำในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น [5] และพบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงเขม่าดำที่ปริมาณ 60 phr ทั้งนี้เนื่องจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคสารตัวเติมในยางทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของเฟสยาง [6] เมื่อพิจารณาเกรดของผงเขม่าดำ พบว่า การเติมผงเขม่าดำเกรด N330 ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าเกรด N220 และ N660 ทั้งนี้เนื่องจากผงเขม่าดำเกรด N330 มีการกระจายตัวที่ดีและสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมส่งผลให้เกิดการเสริมแรงได้ดี ส่วนในงานวิจัยนี้พบว่า ผงเขม่าดำเกรด N220 มีขนาดอนุภาคเล็ก พื้นที่ผิวจำเพาะมากจึงอาจเกิดการเกาะกลุ่ม

กัน (Agglomerate) ของสารตัวเติมด้วยตัวเอง สำหรับผงเขม่าดำเกรด N660 ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเกรด N220 และ N330 จึงมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเสริมแรงที่ลดลง ส่วนกรณีการเติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM based Neusilin ในวัสดุเชิงประกอบยาง พบว่า สารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง ทั้งในกรณีที่ไม่เติมและไม่เติมร่วมกับผงเขม่าดำ เนื่องจากสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM based Neusilin ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยาง [7] จึงไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลโดยรวม

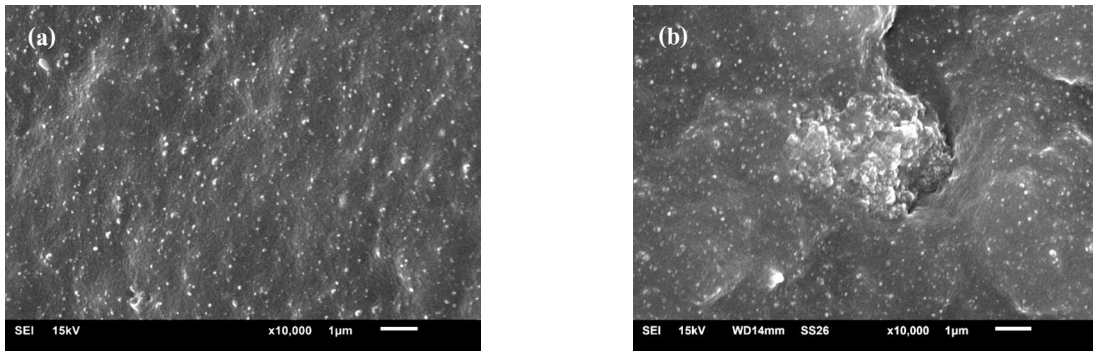
จากรูปที่ 4 แสดงอิทธิพลของชนิด ปริมาณผงเขม่าดำ และสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM based Neusilin ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด พบว่าการเติมผงเขม่าดำในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ที่มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของผงเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลจากผงเขม่าดำขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โพลิเมอร์ของยาง และปริมาณของผงเขม่าดำที่เพิ่มขึ้นเข้าไปแทนที่สัดส่วนของยางธรรมชาติ จึงส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีการยืดตัวและมีความเป็นอิลาสติก (Elasticity) ลดลง โดยที่เกรดของผงเขม่าดำไม่ส่งผลต่อค่าการยืดตัว สำหรับการเติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM based Neusilin ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ทั้งในกรณีที่ไม่เติม และเติมร่วมกับผงเขม่าดำทั้ง 3 เกรด พบว่า ไม่ส่งผลต่อค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ เนื่องจากมีการเติมปริมาณสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในปริมาณที่น้อยมาก



รูปที่ 3 ความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมผงเขม่าดำร่วมกับสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (a) เกรด N220 (b) เกรด N330 และ (c) เกรด N660

รูปที่ 4 เปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมผงเขม่าดำร่วมกับสารยับยั้งเชื้อ (a) เกรด N220 (b) เกรด N330 และ (c) เกรด N660





รูปที่ 5 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค SEM ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีปริมาณสารตัวเติมผงเขม่าดำเกรด N330 (a) 40 phr และ (b) 60 phr (กำลังขยาย 10,000 เท่า)

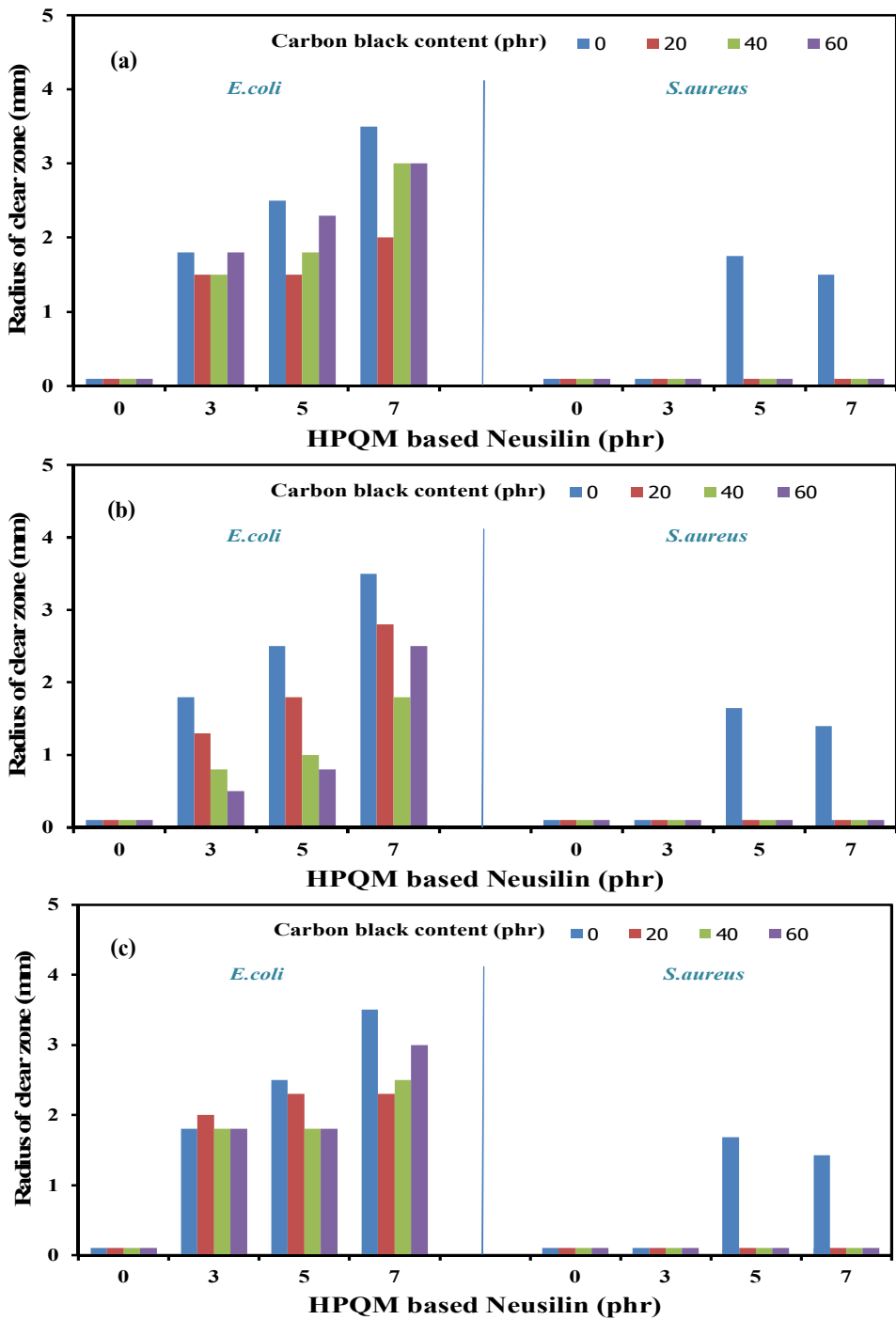
**3.2 การตรวจสอบโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา**

การตรวจสอบโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของสารตัวเติมผงเขม่าดำในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมผงเขม่าดำเกรด N330 ที่ปริมาณ 40 และ 60 phr แสดงดังรูปที่ 5 พบว่า การเติมผงเขม่าดำที่ปริมาณ 40 phr มีการกระจายตัวในเฟสของยางอย่างสม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 5 (a) ขณะที่การเติมผงเขม่าดำที่ปริมาณ 60 phr พบว่าผงเขม่าดำมีการเกาะกลุ่มกันเองของสารตัวเติม (Filler-filler interaction) แสดงดังรูปที่ 5 (b) โดยที่ผลการทดลองสอดคล้องกับความต้านทานต่อแรงดึงที่ลดลง

**3.3 ผลทดสอบความสามารถการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเชิงคุณภาพ (Halo test)**

การทดสอบบริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* และ *S. aureus* ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ผสมผงเขม่าดำ เกรด N220, N330 และ N660 ที่ปรับเปลี่ยนปริมาณสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM based Neusilin แสดงดังรูปที่ 6 ผลทดสอบ

บริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* (รูปที่ 6 ด้านซ้าย) โดยที่การเติมสารยับยั้งเชื้อ HPQM based Neusilin ที่ปริมาณการเติม 3, 5 และ 7 phr พบว่ามีบริเวณรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียมากกว่าไม่เติมสารยับยั้งเชื้อ แสดงว่าสารยับยั้งเชื้อ HPQM based Neusilin สามารถแพร่ออกจากชิ้นงานในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดี ส่วนกรณีการทดสอบบริเวณการยับยั้งเชื้อชนิด *S. aureus* (รูปที่ 6 ด้านขวา) ในวัสดุยางที่เติมผงเขม่าดำไม่พบรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย แต่พบรัศมีการยับยั้งเชื้อของวัสดุยางที่ไม่เติมผงเขม่าดำ ที่ปริมาณสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ปริมาณสูง โดยที่สารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM based Neusilin สามารถแพร่ออกมายับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* ได้ดีกว่าชนิด *S. aureus* ทั้งนี้เนื่องจากสารยับยั้งเชื้อ HPQM based Neusilin สามารถทำลายการสังเคราะห์ผนังเซลล์ (Cell wall) ของแบคทีเรียชนิด *E. coli* ที่มีโครงสร้างผนังเซลล์ที่บางได้ดีกว่าแบคทีเรียชนิด *S. aureus* ที่มีโครงสร้างของชั้นเพปติโดไกลแคน (Peptidoglycan) ที่หนา [3]



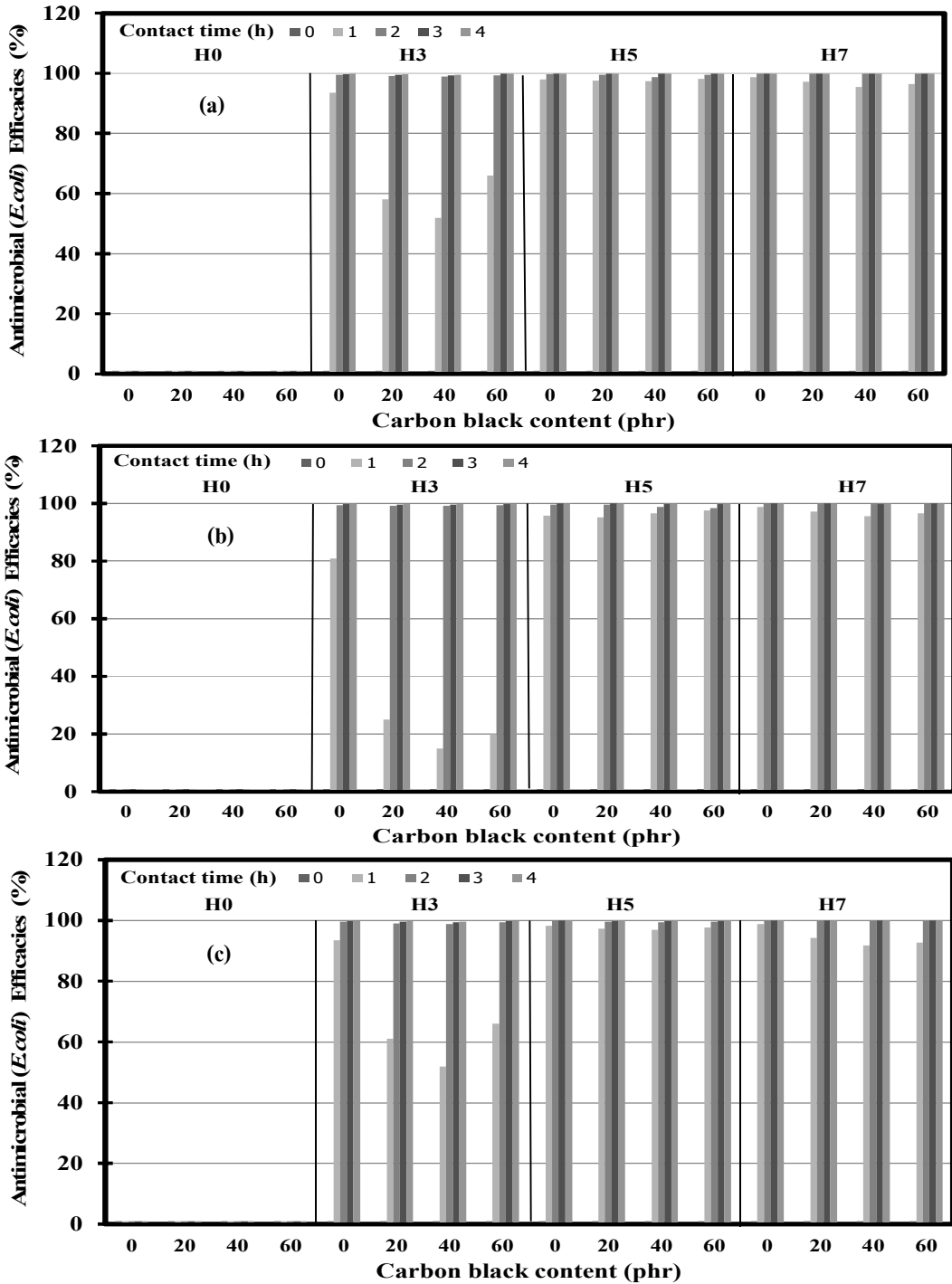
รูปที่ 6 บริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* และ *S. aureus* ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ที่ปริมาณและเกรดผงเขม่าดำ (a) เกรด N220 (b) เกรด N330 และ (c) เกรด N660

### 3.4 ผลการทดสอบความสามารถการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเชิงปริมาณ (Plate Count Agar Method)

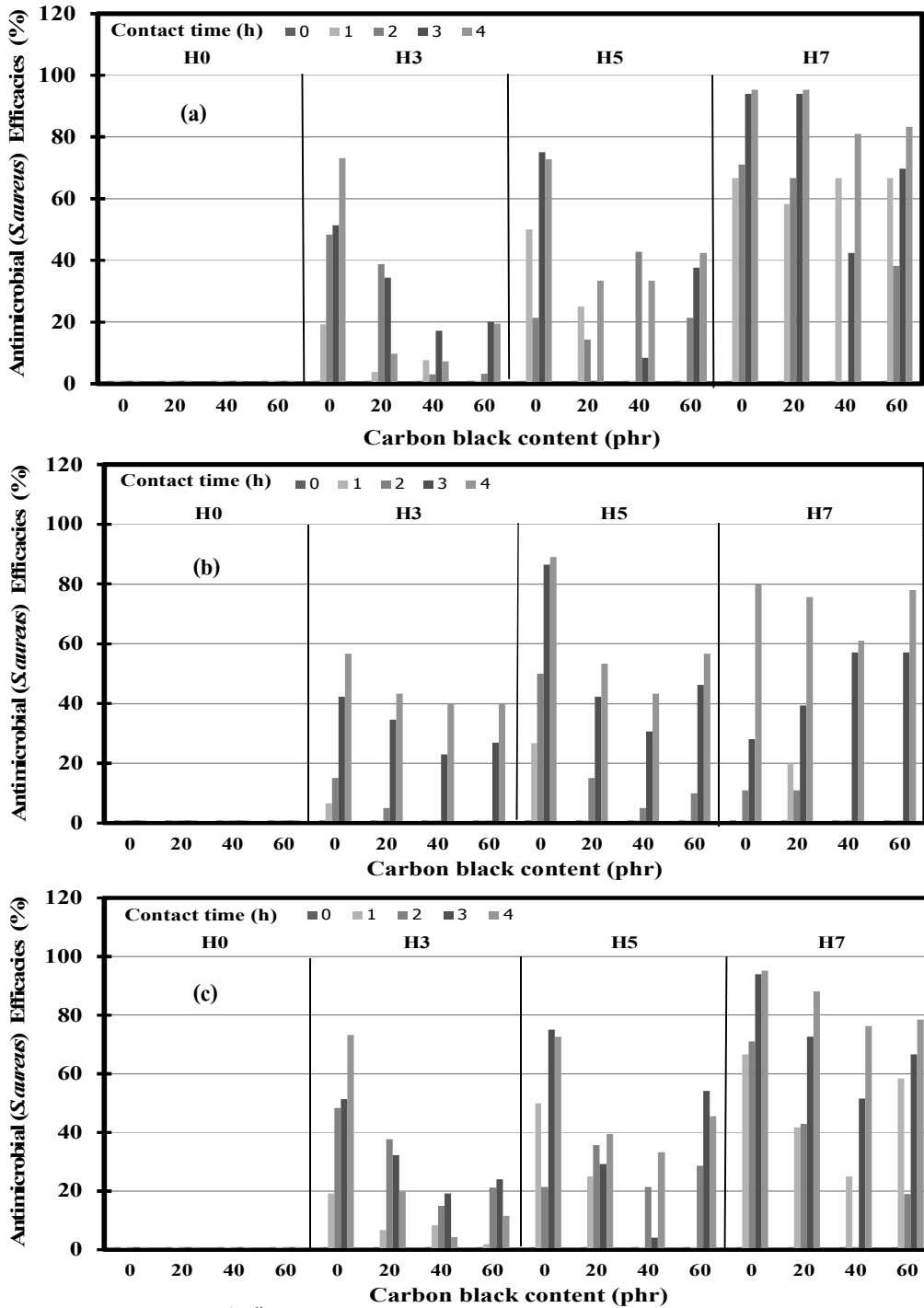
รูปที่ 7 แสดงการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเชิงปริมาณด้วยวิธีการนับจำนวนเชื้อแบคทีเรียของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมสาร HPQM based Neusilin ปริมาณ 0, 3, 5 และ 7 phr โดยการทดสอบแบบเขย่าขึ้นงานที่เวลา 0 - 4 ชั่วโมง พบว่า การเติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ปริมาณ 3 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ที่เวลาทดสอบ 4 ชั่วโมง สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* ได้ถึง 99.9% (บ่งบอกถึงวัสดุยางปลอดเชื้อแบคทีเรีย) และเมื่อเพิ่มปริมาณสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ 5 phr (H5) และ 7 phr (H7) พบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่เวลาทดสอบ 2 ชั่วโมงเป็นต้นไป ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมปริมาณสารยับยั้งเชื้อปริมาณน้อย จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการยับยั้งเชื้อนานกว่าชิ้นงานขงที่มีสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ปริมาณมาก ส่วนกรณีของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมผงเขม่าดำ พบว่า สารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสามารถแพร่ออกมายับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดี ซึ่งการแพร่ของสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM based Neusilin ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ แสดงแบบจำลองดังรูปที่ 9 (a) (ดูสรุปแสดงถึงปริมาณการแพร่ของสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย) พบว่ามีการแพร่ของสารยับยั้งเชื้อออกมาภายนอกได้ดี เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลวัสดุเชิงประกอบยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ด้วยระบบซัลเฟอร์ มีการเชื่อมโยงที่สามารถเคลื่อนไหวได้ง่าย และมีพันธะเชื่อมโยงแบบไม่หนาแน่น ส่งผลทำให้มีการแพร่ของสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดี

ส่วนกรณีของการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติมผงเขม่าดำทั้ง 3 เกรดปริมาณสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ 3 phr (H3) เวลาทดสอบเริ่มต้น (0 ชั่วโมง) พบว่าความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณของผงเขม่าดำที่ 20 - 40 phr และมีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียต่ำสุดที่ปริมาณผงเขม่าดำ 40 phr ดังแสดงในรูปที่ 7 (b) เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาที่ีระหว่างยางที่มีสารตัวเติมเสริมแรงผงเขม่าดำ และสายโซ่โมเลกุลยางถูกจำกัดการเคลื่อนที่ จึงทำให้เกิดการขัดขวางการแพร่ออกมาของสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยที่ระดับของการเสริมแรงเพิ่มขึ้นจึงส่งผลต่อความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ลดลง ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับความต้านทานแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 3

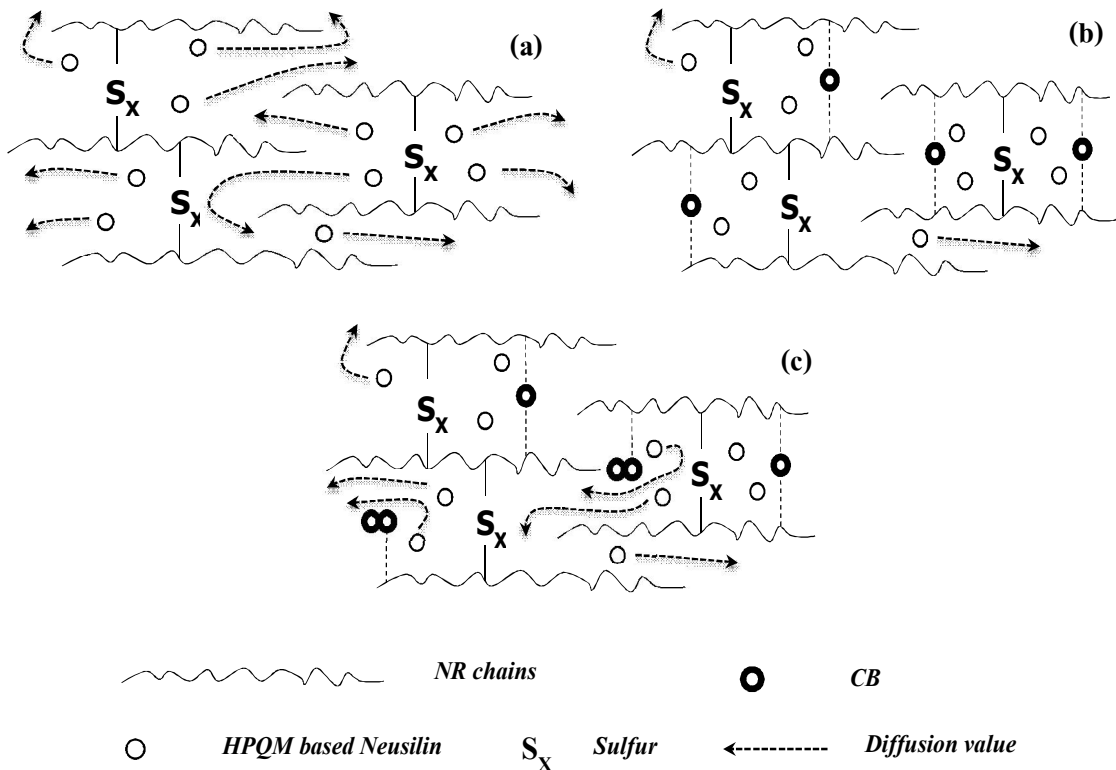
โดยทั้งนี้แสดงแบบจำลองการเคลื่อนที่ของสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ดังแสดงในรูปที่ 9 (b) โดยการแพร่ของสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมผงเขม่าดำที่ปริมาณ 40 phr พบว่าการเคลื่อนที่ออกมาของสารยับยั้งเชื้อน้อยสุด เนื่องจากการเสริมแรงจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมเพิ่มขึ้น นอกเหนือจากการวัลคาไนซ์ของยางที่เติมซัลเฟอร์ที่สามารถขัดขวางการแพร่ของสารยับยั้งเชื้อมากขึ้น และเมื่อปริมาณผงเขม่าดำที่ 60 phr พบการแพร่ออกมาของสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกาะกลุ่มกันของผงเขม่าดำทำให้เกิดช่องว่างในสายโซ่โมเลกุลยางส่งผลให้สารยับยั้งเชื้อสามารถแพร่ออกได้มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9 (c)



รูปที่ 7 ความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียร่วมกับเกรดผงเขม่าดำ ดังนี้ (a) เกรด N220 (b) เกรด N330 และ (c) เกรด N660



รูปที่ 8 ความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *S. aureus* ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียร่วมกับผงเขม่าดำ (a) เกรด N220 (b) เกรด N330 และ (c) เกรด N660



รูปที่ 9 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM based Neusilin ในวัสดุเชิงประกอบของ (a) ไม่เติมผงเขม่าดำ (b) ผงเขม่าดำ 40 phr และ (c) ผงเขม่าดำ 60 phr

เมื่อพิจารณาเกรดของผงเขม่าดำ พบว่า วัสดุเชิงประกอบของธรรมชาติที่เติมผงเขม่าดำเกรด N330 ที่ปริมาณ 40 phr พบว่ามีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* ต่ำกว่าการเติมผงเขม่าดำเกรด N220 และ N660 ทั้งนี้เนื่องจากผงเขม่าดำเกรด N330 มีระดับของการเสริมแรงที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมผงเขม่าดำกับวัสดุเชิงประกอบของธรรมชาติมากที่สุด ส่งผลทำให้สารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแพร่ออกจากวัสดุภายในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ยากขึ้น ส่วนรูปที่ 8 (รูป a - c) แสดงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *S. aureus* ของวัสดุเชิงประกอบของที่เติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM based Neusilin

ที่ปรับเปลี่ยนเกรดและปริมาณผงเขม่าดำ ผลการทดลองโดยรวมพบว่า การเติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในวัสดุเชิงประกอบของธรรมชาติไม่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *S. aureus* ได้ ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งแรงของชั้นผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมบวกที่ต้านทานต่อสารยับยั้งเชื้อที่มากกว่าเชื้อแบคทีเรียแกรมลบชนิด *E. coli*

#### 4. สรุปผล

การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบของธรรมชาติที่เติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ร่วมกับผงเขม่าดำ พบว่ามอดูลัสแรงดึง ความแข็งที่ผิว มีแนวโน้ม

เพิ่มขึ้นตามปริมาณผงขมิ้นดำ ขกเว้นเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง ส่วนความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีค่าสูงสุด ที่มีสารตัวเติมผงขมิ้นดำเกรด N330 ปริมาณ 40 phr สำหรับการเติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM based Neusilin พบว่าไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบยาง และพบว่าประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* ได้ดีกว่าแบคทีเรียชนิด *S. aureus* ซึ่งระดับการเสริมแรงส่งผลต่อความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยการเสริมแรงที่ดีส่งผลทำให้ความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียลดลง

## 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ทุนวิจัยมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สัญญาเลขที่ MRG-555S052 และบริษัท ไทเวนเจอร์ จำกัด ที่สนับสนุนด้านทุนสนับสนุนวิจัย และภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือด้านทดสอบเชื้อ

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Taptim and N. Sombatsompop, "Effect of UV Weathering on Mechanical and Anti-Bacterial Performances for Peroxide-Cured Silicone Rubber with HPQM", *Journal of Vinyl and Additive Technology* 20, 2014, pp. 49-56.
- [2] E. Simhi, H. C. Mei, E. Z. Ron, E. Rosenberg and H. J. Busscher, "Effect of the Adhesive antibiotic TA on Adhesion and Initial Growth of *E. coli* on Silicone Rubber" *FEMS Microbiology Letters* 192, 2000, pp. 97 - 100.
- [3] K. Jai-eau, E. Wimolmala and N. Sombatsompop, "Cure Behavior and Antimicrobial Performance of Sulfur-Cured NR Vulcanizates Containing 2-Hydroxypropyl-3-Piperazinyl-Quinoline Carboxylic Acid Methacrylate or Silver Substituted Zeolite", *Journal of Vinyl and Additive Technology* 19, 2013, pp. 123-131.
- [4] A. Kositchaiyong, C. Thongpin, K. Sombatsompop, C. Chandavasu, T. Markpin, E. Wimolmala and N. Sombatsompop, "Material Characterizations and Anti-bacterial Performances of Triclosan Containing High-Density Polyethylene", *Journal of Research and Innovation for Thai Industries* 1, 2010, pp. 16-27.
- [5] K. Agarwal, D. K. Setua and K. Sekhar, "Scanning Electron Microscopy Study on the Influence of Temperature on Tear Strength and Failure Mechanism of Natural Rubber Vulcanizates", *Polymer Testing* 24, 2005, pp. 781-789.
- [6] T. Ratanawilai, S. Ratanawilai and W. Sukawanich, "The Comparison of Filler Palm Oil Sludge and Carbon Black in Rubber Product", *Naresuan University Journal*, 19, 2011, pp. 52-59. (in Thai)
- [7] J. E. Mark, B. Erman and C. M. Roland, "*Science and Technology of Rubber* (4<sup>th</sup> ed.)", Academic Press, 2013.