

**สมบัติของวัสดุและความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย  
ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผสมไตรโคลซาน**  
**Material characterizations and anti-bacterial performances of  
triclosan containing high-density polyethylene**

อภิสิทธิ์ โฆษิตชัยยงค์<sup>1</sup> จันทร์ฉาย ทองปิ่น<sup>2</sup> ขวัญเนตร สมบัติสมภพ<sup>3</sup> ชญาณ์ จันทวาส<sup>4</sup>  
ธีระศักดิ์ หมากผิน<sup>1</sup> เอกชัย วิมลมาลา<sup>1</sup> และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ<sup>1\*</sup>

- 1) กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF) สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี อีเมลล์: narongrit.som@kmutt.ac.th
- 2) ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์
- 3) วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- 4) บริษัท ปตท. เคมีคอล จำกัด (มหาชน)

**Apisit Kositchaiyong<sup>1</sup> Chanchai Thongpin<sup>2</sup> Kwannate Sombatsompop<sup>3</sup> Chaya Chandavas<sup>4</sup>  
Teerasak Markpin<sup>1</sup> Ekachai Wimolmala<sup>1</sup> and Narongrit Sombatsompop<sup>1\*</sup>**

- 1) Polymer Processing and Flow (P-PROF) Research Group, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT) Email: narongrit.som@kmutt.ac.th
- 2) Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Sanamchandra Palace Campus, Nakornpathom
- 3) Civil and Environmental Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB)
- 4) PTT Chemical Public Company Limited

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติการไหล และสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิดไตรโคลซาน ในช่วง 1.0 ถึง 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แบคทีเรียที่ใช้ทดสอบได้แก่ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) *Bacillus subtilis* (*B. subtilis*) และ *Escherichia coli* (*E. coli*) สำหรับการทดสอบสมบัติการไหล พบว่าค่าแรงบิดสกรูขณะอัดรีดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณไตรโคลซานในวัสดุผสมเพิ่มสูงขึ้น ผลการวัดค่าดัชนีความเหลืองและความขาวของชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานมีสีเหลืองขึ้นและมีความขาวลดลงตามปริมาณไตรโคลซาน สำหรับการทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียพบว่า รัศมีการยับยั้งการเจริญของเชื้อทั้งสามชนิดมีค่าเท่ากับ 8.7 – 11.1, 4.1 – 6.7 และ 7.0 – 8.8 มิลลิเมตรตามลำดับ สำหรับเปอร์เซ็นต์การ

ลดลงของเชื้อแบคทีเรียภายใต้สภาวะในการวิจัยครั้งนี้ พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรียของ *S. aureus* และ *B. subtilis* มีค่าสูงสุดประมาณ 99.9 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณการผสมไตรโคลซาน 3 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ในขณะที่กรณีการทดสอบกับเชื้อ *E. coli* เปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรียมีค่าสูงสุดที่ 96.0 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณการผสมไตรโคลซาน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก นอกจากนี้การทดสอบคุณภาพของน้ำนมที่บรรจุในผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าค่า pH ของน้ำนมที่บรรจุในขวดพอลิเอทิลีนที่ผสมไตรโคลซาน มีการเปลี่ยนแปลงช้ากว่ากรณีการบรรจุน้ำนมในขวดพอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมไตรโคลซาน

**คำสำคัญ:** พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง, ไตรโคลซาน, การยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย, การทดสอบน้ำนม

## Abstract

This work studied physical and rheological properties and anti-bacterial performance high-density polyethylene (HDPE) containing 1 – 5%wt triclosan. *Staphylococcus aureus* *Bacillus subtilis* and *Escherichia coli* were used as testing bacteria. Adding triclosan into HDPE resulted in a progressive decrease in mixing torque. The physical appearances of the HDPE were found to change with increasing triclosan contents; increasing in yellowness index with a decrease in whiteness index. The clear zone results suggested that the inhibition radii for *S. aureus* *B. subtilis* and *E. coli* were 8.7 – 11.1, 4.1 – 6.7 and 7.0 – 8.8 millimeters, respectively for a triclosan

concentration range of 1.0 – 5.0% by weight in HDPE. Under the experimental conditions used in this work, the maximum percentage reductions of *S. aureus* and *B. subtilis* were 99.9% at triclosan loading of 3% by weight whereas those for *E. coli* were 96.0% at triclosan loading of 5% by weight. An examination of milk properties indicated that the pH change of the milk in a triclosan/HDPE bottle at 30°C was much slower than that in a neat HDPE bottle.

**Key words:** High-density polyethylene, Triclosan, Anti-bacterial activity, Milk test

## บทนำ

พอลิเอทิลีนเป็นวัสดุที่ถูกนำไปใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของมนุษย์ อาทิ ภาชนะบรรจุภัณฑ์อาหาร อุปกรณ์การแพทย์ อุปกรณ์ภายในที่อยู่อาศัย เป็นต้น จากผลดังกล่าว การพัฒนาให้วัสดุพอลิเอทิลีนมีสมบัติต้านทานการเจริญของจุลินทรีย์จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ [1] สำหรับวิธีการที่สะดวกและเป็นที่ยอมรับซึ่งทำให้พอลิเอทิลีนมีสมบัติต้านทานการเจริญของจุลินทรีย์ได้ คือ การผสมสารยับยั้งจุลินทรีย์ (Antimicrobial agent) ลงไปโดยตรงในพอลิเอทิลีน ทั้งนี้ในส่วนมูลค่าทางการตลาดของความนิยมใช้สารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์พบว่าในปี ค.ศ. 2001 มีสูงถึง 130 ล้านดอลลาร์สหรัฐและมูลค่าของการใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์พบว่ามีค่าสูงประมาณ 231 ล้านดอลลาร์สหรัฐ โดยอัตราการเติบโตของการใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีความสามารถในการต้านทานการเจริญเติบโตมีค่าประมาณ 3.4 – 4.0 เปอร์เซ็นต์ต่อปี [2-3] ตัวอย่างสารยับยั้งจุลินทรีย์ที่นิยมผสมในวัสดุประเภทพอลิเมอร์ได้ [4-5] ได้แก่ 10,10'-Oxybisphenoxarsine (OBPA) Trichloro-hydroxydi-phenylether (Triclosan) n-Octyl-isothiazoolinone (OIT) 4, 5-Di-chloro-isothiazolinone (DCOIT) Mercaptopyridine-n-oxide (pyrithione) Butyl-benzisothiazolinone (butyl-BIT) 2-Hydroxypropyl-3-Piperazinyl-Quinoline Carboxylic Acid Methacrylate (HPQM) และ Metal-based biocides เช่น Organotin และ โลหะเงิน เป็นต้น

โดยทั่วไป การผสมสารยับยั้งจุลินทรีย์ในพอลิเมอร์ที่นิยมใช้มี 2 วิธี คือ การผสมพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะ

หลอมเหลวกับสารยับยั้งเชื้อ (Melt blend) และการผสมในสถานะที่พอลิเมอร์และสารยับยั้งเชื้อ ละลายอยู่ในตัวทำละลาย (Solution blend) อย่างไรก็ตาม การผสมแบบหลอมเหลวเป็นวิธีที่เหมาะสมกับกระบวนการขึ้นรูปพอลิเอทิลีน โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ ด้วยเหตุนี้สารยับยั้งจุลินทรีย์ต้องมีความสามารถในการทนความร้อนสูงได้ และไม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์เปลี่ยนแปลง [6-7] งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการใช้สารไตรโคลซาน (Triclosan) เป็นสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น Bhargava และ Leonard (1996) [8] พบว่าสารไตรโคลซานมีความสามารถในการต้านจุลินทรีย์ได้หลายชนิด และสามารถทนความร้อนได้สูงถึง 150–200 องศาเซลเซียส โดยไม่ทำให้ความสามารถในการยับยั้งจุลินทรีย์เปลี่ยนแปลง Kalyon และ Olgun (2001) [9] ได้ทำการผสมไตรโคลซานลงในพอลิเอทิลีนด้วยวิธีการผสมแบบหลอมและทดสอบความสามารถในการยับยั้งจุลินทรีย์โดยเตรียมแผ่นชิ้นงานทดสอบเป็นแผ่นกลม จากนั้นวางบนวุ้นอาหารที่มีเชื้อจุลินทรีย์เจริญอยู่ ผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานทดสอบสามารถป้องกันการเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้ ซึ่งความสามารถดังกล่าวขึ้นอยู่กับความสามารถในการแพร่ของไตรโคลซานออกมาสู่ตัวกลาง ส่วนการศึกษาการใช้สารไตรโคลซานผสมในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง Iconomopoulou และ Voyiatzis (2005) [10] พบว่าอัตราการแพร่ของไตรโคลซานมีค่าลดลงเมื่อปริมาณผลึกที่เกิดจากการดึงยึดชิ้นงานฟิล์มพอลิเอทิลีนเพิ่มสูงขึ้น Zhang และคณะ (2006) [11] ได้ศึกษา

การใช้สารไตรโคลซานและโบรโนพอล (Bronopol) เคลือบบนผิวพอลิเอทิลีนโดยวิธีการพ่นเคลือบด้วยประจุไฟฟ้าพลาสมา (Plasma immersion ion implantation) พบว่า การเคลือบพอลิเอทิลีนด้วยสารไตรโคลซานมีสมบัติด้านการยับยั้งแบคทีเรียได้ดีกว่าการเคลือบพอลิเอทิลีนด้วยสารโบรโนพอล สำหรับรายงานการวิจัยที่กล่าวถึงผลกระทบของไตรโคลซานที่มีต่อสุขภาพของมนุษย์นั้น Allmyr และคณะ (2006) [12] พบว่า สารไตรโคลซานที่ผสมอยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ใช้ภายในบ้าน เช่น ยาสีฟัน สบู่และน้ำยาล้างจาน สามารถปนเปื้อนเข้าสู่ร่างกายของผู้ใช้ได้ โดยสามารถตรวจพบได้ทั้งในในโลหิตและในน้ำนมของผู้เป็นมารดา อย่างไรก็ตาม ปริมาณไตรโคลซานที่พบในโลหิตมีน้อยกว่าในน้ำนมมาก กล่าวคือในโลหิตมีค่าเท่ากับ 0.067 นาโนกรัมต่อกรัม ในขณะที่ในน้ำนมมีค่าต่ำกว่า 0.018 นาโนกรัมต่อกรัม ดังนั้นเด็กทารกที่ดื่มน้ำนมของมารดาจึงได้รับปริมาณไตรโคลซานในปริมาณที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับปริมาณสารดังกล่าวที่ปนเปื้อนในโลหิตของมารดา สำหรับข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณการบริโภคสารไตรโคลซานที่ปลอดภัยนั้น คณะกรรมการด้านสุขภาพและการคุ้มครองผู้บริโภคของยุโรป [13] ได้กำหนดว่าปริมาณการใช้สารไตรโคลซานที่ปลอดภัยในผลิตภัณฑ์ประเภทเครื่องสำอางค์ แชมพู สบู่ ยาสีฟัน แป้งฝุ่นโรยตัวไว้ไม่เกิน 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนในอาหารนั้นได้กำหนดไว้ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม (หรือ 5 ส่วนในล้านส่วนโดยน้ำหนัก)

สำหรับในงานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะด้านต่างๆ ของพอลิเอทิลีนที่ผสมไตรโคลซาน ได้แก่ สมบัติการไหล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพและสมบัติการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียตามวิธีทดสอบมาตรฐาน รวมถึงการทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของไตรโคลซาน โดยใช้สีน้ำนมเป็นตัวบ่งชี้ (Indicator) โดยทำการวัดการเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นกรดต่าง (ค่า pH) และจำนวนโคโลนีของจุลินทรีย์ที่เจริญอยู่ในน้ำนมที่บรรจุในขวดที่ขึ้นรูปจากพอลิเอทิลีนที่ผสมไตรโคลซานเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียตามวิธีมาตรฐาน ทั้งนี้คาดว่าผลการวิจัยที่ได้สามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้น สำหรับการผลิตบรรจุภัณฑ์ปลอดเชื้อจุลินทรีย์ที่ไม่สัมผัสกับอาหารโดยตรง เช่น กล่องพลาสติกปลอดเชื้อจุลินทรีย์ สำหรับบรรจุหีบห่ออาหารหรือยา เป็นต้น

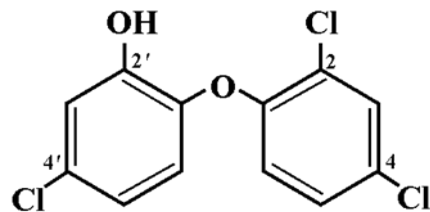
**วิธีการทดลอง และขั้นตอนการทดสอบ**

**วัสดุวิจัย**

-พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) เกรด HD6600B จากบริษัท ปตท. เคมีคอล จำกัด (มหาชน) จังหวัดระยอง

-ไตรโคลซาน (Triclosan) ชื่อทางเคมี 2,4,4'-trichloro-2'-hydroxydiphenylether เกรด USP 24 จาก บริษัท โคเวนเจอร์ จำกัด กรุงเทพฯ มีโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 1

-เชื้อแบคทีเรียทดสอบ ได้แก่ แบคทีเรียแกรมบวกชนิด *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) และ *Bacillus subtilis* (*B. subtilis*) และแบคทีเรียแกรมลบชนิด *Escherichia coli* (*E. coli*)



รูปที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของไตรโคลซาน (Triclosan) น้ำนมทดสอบเป็นน้ำนมโคบริสุทธิ์ที่ผ่านการพาสเจอร์ไรซ์ของ บริษัท ซีพี เมจิ จำกัด (จ.สระบุรี)

**การเตรียมชิ้นงานทดสอบ**

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและไตรโคลซานถูกผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบอัดรีดเกลียวทวนคู่ (Twin screw compounding extruder) รุ่น Haake PolyLab-Rheomex CTW100P ประเทศเยอรมันนี โดยตั้งอุณหภูมิการผสมจากส่วนป้อนวัตถุดิบจนถึงส่วนหัวขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 170 180 และ 190 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ปริมาณไตรโคลซานที่ผสมอยู่ในช่วง 1 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก สำหรับชิ้นงานทดสอบมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน (Compression moulding process) โดยให้ความดันบนแม่พิมพ์ขณะขึ้นรูป 150 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แผ่นฟิล์มทดสอบที่ได้มีความหนาประมาณ 0.01 เซนติเมตร จากนั้นนำไปตัดเป็นชิ้นงานทดสอบ ดังนี้

1. แผ่นรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบ "รัศมีการยับยั้งเชื้อ"

- แผ่นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1 ตารางเซนติเมตร จำนวน 5 ชิ้นต่อสูตรวัสดุผสม สำหรับการทดสอบวัดค่า “เปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย” และ
- ภาชนะทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร ความสูง 17 เซนติเมตรและความหนา 0.06 เซนติเมตร มีปริมาตรโดยรวมประมาณ 400 ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับการทดสอบ “คุณภาพน้ำมัน”

### การทดสอบสมบัติการไหล

ความสามารถในการผลิตและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์สามารถตรวจสอบได้จากสมบัติการไหลของวัสดุผสม โดยในงานวิจัยนี้สมบัติการไหลของพอลิเอทิลีนที่ผสมไตรโคโลซานสังเกตได้จากค่าแรงบิดของสกรูที่เปลี่ยนไปตามกำลังการผลิต ซึ่งแปรผันตรงกับความเร็วยรอบการหมุนของสกรู โดยค่าแรงบิดของสกรูจะถูกวัดในขณะที่การผสมและอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปจากเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ รุ่น Haake PolyLab-Rheomex CTW100P สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี ในช่วงความเร็วยรอบการหมุนสกรู 20 ถึง 120 รอบต่อนาที

### การทดสอบสมบัติทางความร้อน โครงสร้างเคมี และสมบัติทางกายภาพ

การทดสอบสมบัติทางความร้อนทำได้โดยอาศัยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะหรือทำปฏิกิริยากันของสารในงานวิจัยนี้ ได้ใช้เทคนิคนี้เพื่อหาอุณหภูมิการหลอม (Melting temperature,  $T_m$ ) อุณหภูมิการตกผลึก (Crystallization temperature,  $T_c$ ) และค่าความร้อนที่ใช้ในการสลายผลึก (Enthalpy of fusion,  $H_m$ ) เครื่องมือที่ใช้คือเครื่องรุ่น Pyris1 DSC บริษัท Perkin-Elmer (ประเทศสหรัฐอเมริกา) ส่วนการหาค่าอุณหภูมิการเสื่อมสลาย (Decomposition temperature, T-d) ของไตรโคโลซานได้อาศัยเทคนิค Thermal gravimetric analysis (TGA) โดยใช้เครื่องรุ่น TGA7HT บริษัท Perkin Elmer (ประเทศสหรัฐอเมริกา)

สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมี เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงสมบัติของไตรโคโลซานเทียบกันระหว่างไตรโคโลซานที่ไม่ผ่านและผ่านการได้รับความร้อน ได้อาศัยเทคนิคฟูเรียอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) รุ่น Vertex70 บริษัท Bruker Optik GmbH (สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี) ส่วนสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การสังเกตลักษณะอนุภาค

ของไตรโคโลซานทั้งก่อนและหลังการผสมในพอลิเอทิลีน โดยอาศัยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) รุ่น BHM Metallurgical Microscope บริษัท Olympus (ประเทศญี่ปุ่น) และการวัดปริมาณไตรโคโลซานที่หลุดออกจากพอลิเอทิลีน โดยอาศัยหลักการดูดกลืนคลื่นแสง UV และมีเอทานอลเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นตัวกลางทดสอบ [10] เครื่องมือที่ใช้คือ UV-Vis spectrophotometer รุ่น HACH DR/4000U บริษัท HACH (ประเทศสหรัฐอเมริกา)

### การทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญแบคทีเรีย

#### การทดสอบการเกิดรัศมีการยับยั้งเชื้อ (Halo test)

การทดสอบการเกิดรัศมีการยับยั้งเชื้อ คือ การสังเกตบริเวณที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้รอบชิ้นงานทดสอบหรือเรียกว่าการเกิด บริเวณใส (Clear zone) โดยทั่วไปการทดสอบนี้ขึ้นกับความสามารถในการแพร่ของสารยับยั้ง เชื้อบนวุ้นอาหารหรือภายในวัสดุที่ผสมสารยับยั้งเชื้ออยู่ ซึ่งถือเป็นวิธีการทดสอบเชิงคุณภาพ อย่างไรก็ตาม ขนาดของบริเวณใสสามารถถูกนำมาใช้เพื่อรายงานผลในเชิงปริมาณได้โดยอาศัยสมการที่ 1 สำหรับขั้นตอนการทดสอบเริ่มจาก การนำเชื้อแบคทีเรียทดสอบเข้มข้น  $10^6$  โคโลนีต่อมิลลิเมตร ปริมาณ 100 ไมโครลิตร เกลี่ยให้สม่ำเสมอบนวุ้นอาหารในจาน Petri dish จากนั้นวางชิ้นงานทดสอบในตำแหน่งที่กำหนดไว้แล้วนำไปบ่มเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ  $37 \pm 0.5$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการสังเกตและบันทึกรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียโดยใช้จำนวนตัวอย่างในการทดสอบอย่างน้อย 2 ตัวอย่าง (Duplication)

$$R_a = \frac{D_c - D_s}{2} \quad (\text{สมการที่ 1})$$

โดยคือ  $R_a$  คือ รัศมีการยับยั้งเชื้อ; หน่วยมิลลิเมตร

$D_c$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณใส; หน่วยมิลลิเมตร

$D_s$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบ; หน่วยมิลลิเมตร

#### การวัดเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย

##### (Percentage reduction of bacteria)

การวัดเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรียทำได้โดยอาศัยเทคนิคการนับจำนวนโคโลนีของเชื้อบนวุ้นอาหาร (Plate count agar method, PCA) โดยใช้มาตรฐานการ

ทดสอบมาตรฐาน ASTM E2149-01 ซึ่งมีขั้นตอนเริ่มจากการเตรียมสารแขวนลอยเชื้อทดสอบโดยเจือจางให้ได้จำนวนเชื้อทดสอบตั้งต้นที่  $10^6$  โคโลนีต่อมิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ซึ่งมีสารละลายเปปโตนเป็นตัวยกกลางทดสอบ (Peptone, เตรียมโดยใช้ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ค่า pH 6.8 – 7.2) และมีชิ้นงานทดสอบอยู่ จากนั้นเริ่มทำการทดสอบโดยการเขย่าขวดรูปชมพู่ดังกล่าวด้วยความถี่ 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ  $37 \pm 0.5$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการดูดสารแขวนลอยแบคทีเรียปริมาตร 100 ไมโครลิตร ถ่ายลงสู่จานอาหารเลี้ยงเชื้อใน Petri dish แล้วเกลี่ยให้ทั่วจานอาหารเพื่อทำการนับจำนวนโคโลนีของแบคทีเรียที่เหลืรอดชีวิตอยู่หลังการทดสอบ โดยบ่มจานเพาะเชื้อไว้ในตู้บ่มเพาะเป็นเวลา 24 ชั่วโมง สำหรับเปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรียสามารถคำนวณได้โดยอาศัยสมการที่ 2 [5, 14-15] คือ

$$R = \frac{A - B \times 100}{A} \quad (\text{สมการที่ 2})$$

โดย R คือ เปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย;

หน่วยเปอร์เซ็นต์ (%)

A คือ จำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียกรณีชิ้นงานพอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมไตรโคไลซาน; หน่วยโคโลนีต่อมิลลิลิตร (cfu/ml)

B คือ จำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียกรณีชิ้นงานพอลิเอทิลีนที่ผสมไตรโคไลซาน; หน่วยโคโลนีต่อมิลลิลิตร (cfu/ml)

#### การทดสอบคุณภาพนํ้านม

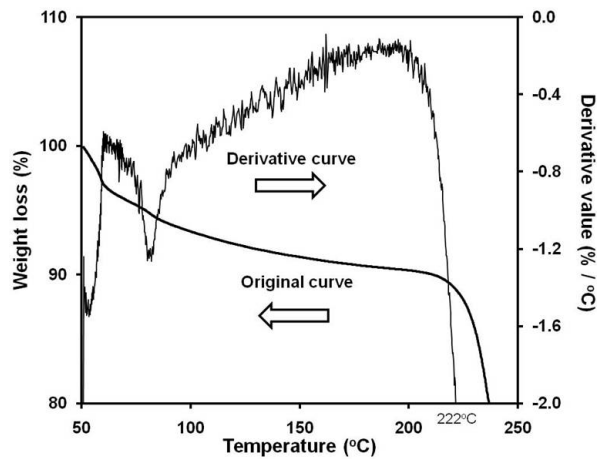
สำหรับการทดสอบในส่วนนี้ ได้ใช้นํ้านมเป็นตัวแทนบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับวิธีทดสอบมาตรฐาน อย่างไรก็ตามการประยุกต์ผลการทดสอบที่ได้กับผลิตภัณฑ์ที่บรรจุสารไตรโคไลซานจะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของอาหารที่บรรจุอยู่ในภาชนะ คุณภาพของนํ้านมที่ได้ทำการทดสอบ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงค่า pH และจำนวนโคโลนีของจุลินทรีย์ในนํ้านม ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการบรรจุนํ้านมปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในขวดทดสอบ จากนั้นวัดค่า pH ของนํ้านมโดยใช้เครื่องวัด pH ของบริษัท Mettler Tolo จำกัด รุ่น Sevenmulti (สาธารณรัฐประชาชนจีน) ระยะเวลาทำการวัดอยู่ในช่วง 0 – 9 วัน ทั้งนี้นํ้านมพลาสเจอร์ช็อคปกติมีค่า pH ประมาณ 6.5-6.8 [16] ส่วนการวัดปริมาณจุลินทรีย์

ในนํ้านมทำได้โดยอาศัยเทคนิคการนับจำนวนโคโลนี (เทคนิค PCA) ระยะเวลาทดสอบในช่วง 0 – 30 วัน การรายงานผลแสดงเป็นค่าโคโลนีต่อมิลลิลิตร (cfu/ml) จากการทำตัวอย่างซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้ง (Duplication) และคำนวณจากจานเพาะเชื้อที่มีจำนวนโคโลนีอยู่ระหว่าง 30 ถึง 300 โคโลนี ซึ่งถือเป็นช่วงที่เหมาะสมทางสถิติในการคำนวณ จากนั้นทำการสังเกตการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ได้แก่ ระยะเวลาการตะกอนของนํ้านมและสีที่เกิดขึ้นบนผนังภายในขวด

#### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

##### คุณลักษณะของไตรโคไลซาน

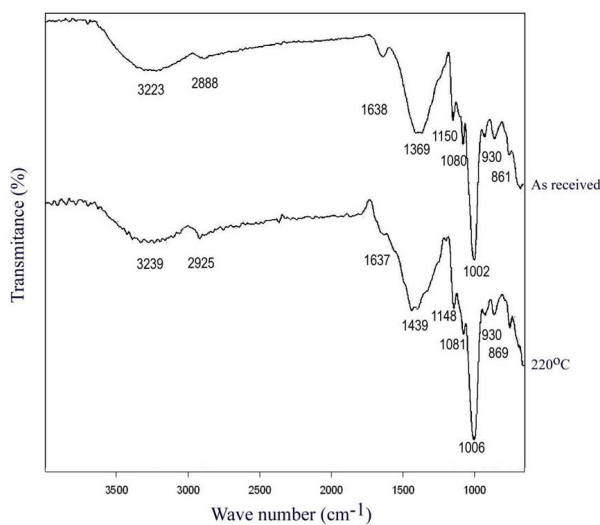
ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากไตรโคไลซานต้องผสมกับพอลิเอทิลีนและผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน โดยอุณหภูมิในการผสมและขึ้นรูปอยู่ที่ 190 องศาเซลเซียส ดังนั้นในส่วนนี้จึงได้ศึกษาคุณลักษณะของไตรโคไลซานประกอบด้วย การวัดอุณหภูมิการเสื่อมสลายของไตรโคไลซาน การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของไตรโคไลซานหลังได้รับความร้อนและการสังเกตรูปร่างอนุภาคของไตรโคไลซานทั้งก่อนและหลังการผสมในพอลิเอทิลีน ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 5 จากผลการทดสอบการวัดการลดลงของน้ำหนักสารที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิด้วยเทคนิค Thermal gravimetric analysis (TGA) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2 นั้น พบว่าอุณหภูมิการเสื่อมสลายของไตรโคไลซาน มีค่าประมาณ 222 องศาเซลเซียส สำหรับการพิสูจน์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared spectroscopy) เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของไตรโคไลซานที่ผ่านการได้รับความร้อน โดยสังเกตจากการปรากฏของพีค ณ ตำแหน่งเลขคลื่นต่างๆ นั้น ตารางที่ 1 ได้แสดงค่าเลขคลื่น (Wave number) ที่สัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏบนโมเลกุลของไตรโคไลซาน โดยผลการทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าสัญญาณของพีคในกรณีไตรโคไลซานที่ผ่านการได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส มีลักษณะเช่นเดียวกับสัญญาณของพีคในกรณีไตรโคไลซานที่ไม่ได้ผ่านการได้รับความร้อน หรืออยู่ในสภาพแรกรับจากผู้ผลิต (As received) นั้นแสดงให้เห็นว่า สารไตรโคไลซานสามารถทนอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมและขึ้นรูปเป็นแผ่นชิ้นงานทดสอบได้ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี [7]



รูปที่ 2 อุณหภูมิการเสื่อมสภาพของไตรโคลซานจากเทคนิค TGA (Thermal gravimetric analysis)

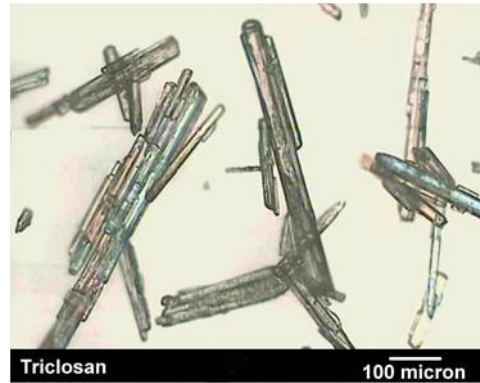
ตารางที่ 1 เลขคลื่นการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดและหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไตรโคลซาน

เลขคลื่น (cm <sup>-1</sup> )	หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไตรโคลซาน
3615	O-H (-Phenol) : stretching
3500-3250	O-H (Polymer) : stretching
3100-3000	C-H (Aromatic) : stretching
1680-1560	C=C (Cyclic of conjugated) : stretching
1615-1590	C=C (Phenyl) : stretching
1515-1480	
1280-1150	-C-O-C- : asym. Stretch in ethers
1275-1070	(1275-1200 conjugated)
870-670	C-H (Aromatic ring) : Out of plane bending
750-700	C-Cl (Acyclic and Aromatic) : Stretching

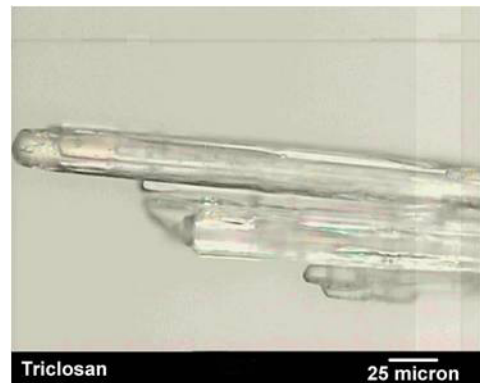


รูปที่ 3 การเปรียบเทียบตำแหน่งเลขคลื่นด้วยเทคนิคฟูเรียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโคปีของไตรโคลซานแรกรับ (As received) และไตรโคลซานที่ผ่านการได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4 แสดงลักษณะอนุภาคไตรโคลซานก่อนผสมในพอลิเอทิลีน พบว่ามีลักษณะเป็นผลึกรูปแท่ง มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 55.4 ไมโครเมตร สำหรับลักษณะอนุภาคของไตรโคลซานที่ผสมอยู่ในพอลิเอทิลีนแสดงดังรูปที่ 5 จะสังเกตเห็นว่า อนุภาคไตรโคลซานมีขนาดความยาวลดลงเมื่อเทียบกับอนุภาคไตรโคลซานก่อนผสม (เทียบกับรูปที่ 4 ด้านขวา) ทั้งนี้เป็นผลมาจากความเค้นเฉือนและความดันที่เกิดขึ้นในเครื่องมือที่ใช้ผสมและขึ้นรูป



กำลังขยาย 50 เท่า

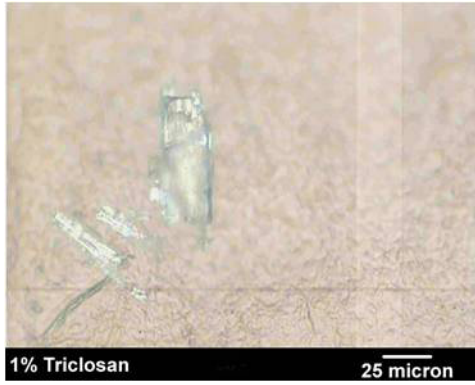


กำลังขยาย 200 เท่า

รูปที่ 4 ลักษณะของอนุภาคไตรโคลซานถ่ายได้จากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 50 เท่า (ซ้าย) และ 200 เท่า (ขวา)



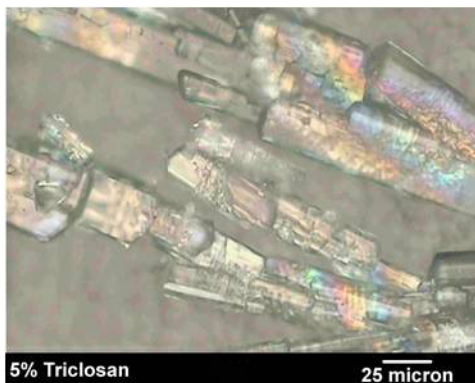
0 เปอร์เซ็นต์



1 เปอร์เซ็นต์



3 เปอร์เซ็นต์



5 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 5 ลักษณะอนุภาคไตรโคลซานที่ผสมอยู่ในพอลิเอทิลีนที่ปริมาณต่างๆ ถ่ายได้จากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 200 เท่า

**สมบัติของพอลิเอทิลีนที่ผสมไตรโคลซาน**

สมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อน ได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature,  $T_m$ ) อุณหภูมิการตกผลึก (Crystallization temperature,  $T_c$ ) และปริมาณความร้อนในการสลายผลึก (Enthalpy of fusion,  $DH_m$ ) ของพอลิเอทิลีนที่ผสมไตรโคลซานในช่วงปริมาณ 1 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าสารไตรโคลซานไม่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีน ทั้งนี้คาดว่า

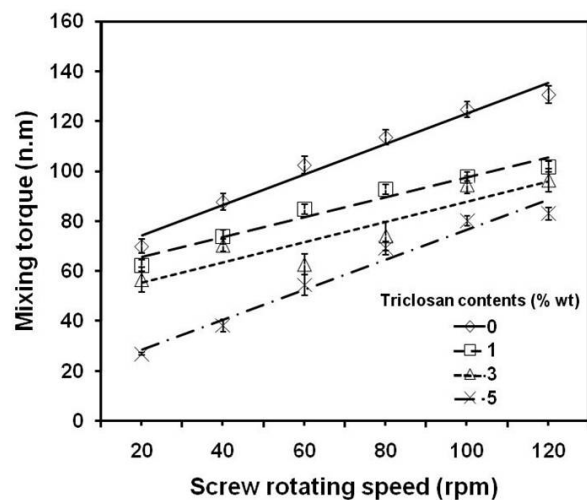
เนื่องจากการผสมไตรโคลซานและพอลิเอทิลีนมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous system) จึงทำให้สมบัติด้านความร้อนของวัสดุผสมไม่ขึ้นกับสารไตรโคลซานที่เติมลงไป

ตารางที่ 2 สมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนที่มีไตรโคลซานผสมอยู่ที่ปริมาณต่างๆ ด้วยเทคนิค DSC

ปริมาณไตรโคลซาน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	อุณหภูมิหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิจากการเกิดผลึก (องศาเซลเซียส)	ปริมาณความร้อนในการสลายผลึก (จูลต่อกรัม)
0	131.0	117.9	190.3
1	132.5	117.4	189.8
3	131.3	117.6	186.5
5	131.7	117.2	189.9

สมบัติการไหล

สมบัติการไหลที่แสดงจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดของสกรูขณะผสมและความเร็วรอบการหมุนของสกรูแสดงดังรูปที่ 6 พบว่า การเพิ่มปริมาณไตรโคลซานในพอลิเอทิลีนส่งผลให้ระดับค่าแรงบิดของสกรูลดลงตลอดความเร็วรอบการหมุนของสกรู ทั้งนี้เนื่องจากไตรโคลซานซึ่งมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 58 องศาเซลเซียส เกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวขณะทำการผสม ณ อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้สารดังกล่าวทำหน้าที่เสมือนสารหล่อลื่น (Lubricant) โดยทำให้โมเลกุลของพอลิเอทิลีนสามารถเคลื่อนที่และไหลได้ง่ายขึ้นขณะทำการผสมและอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูป [17]



รูปที่ 6 แรงบิดของสกรูขณะผสมพอลิเอทิลีนและไตรโคลซานที่ปริมาณต่างๆ

การเปลี่ยนสีของชิ้นงาน

ผลการทดสอบการวัดค่าดัชนีสี (Color index) ของชิ้นงานพอลิเอทิลีนที่ผสมไตรโคลซาน ได้แก่ ดัชนีความเหลือง (Yellowness index) และค่าดัชนีความขาว (Whiteness index) แสดงดังตารางที่ 3 พบว่าการเพิ่มปริมาณไตรโคลซานส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีความเหลืองเพิ่มขึ้น หรือชิ้นงานมีความเป็นสีเหลืองมากขึ้น ในขณะที่ดัชนีความขาวลดลงหรือชิ้นงานมีความเป็นสีขาวลดลง

ตารางที่ 3 ดัชนีสีของพอลิเอทิลีนที่มีไตรโคลซานผสมอยู่ที่ปริมาณต่างๆ ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ดัชนีสี	ปริมาณไตรโคลซาน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)			
	0	1	3	5
ดัชนีความเหลือง (Yellowness index, YI)	-19.5	-12.7	-9.5	-6.7
ค่าดัชนีความขาว (Whiteness index, T <sub>w</sub> )	83.5	83.1	81.4	81.0

สมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

การทดสอบรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Halo test) ซึ่งถือเป็นวิธีที่แสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเชิงคุณภาพ ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถในการแพร่ของสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย สามารถรายงานผลในเชิงปริมาณได้โดยการวัดขนาดรัศมีการยับยั้งเชื้อ แสดงดังตารางที่ 4 พบว่า พอลิเอทิลีนที่ผสมไตรโคลซานในช่วงปริมาณ 1 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีขนาดรัศมีการยับยั้งเชื้อเพิ่มขึ้นตามปริมาณไตรโคลซาน สำหรับการทดสอบด้วยเชื้อ *S. aureus* มีขนาดรัศมีดังกล่าวเกิดขึ้นมากที่สุด (8.7 – 11.1 มิลลิเมตร) รองลงมาคือเชื้อ *E. coli* (7.0 – 8.8 มิลลิเมตร) และน้อยที่สุดคือเชื้อ *B. subtilis* (4.1 – 6.7 มิลลิเมตร) ทั้งนี้ คาดว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดรัศมีการยับยั้งเชื้อ ของแบคทีเรียแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับความสามารถในการแพร่ของไตรโคลซานที่แตกต่างกัน [18]

ตารางที่ 4 รัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของพอลิเอทิลีนที่มีไตรโคลซานในปริมาณต่างๆ

ปริมาณไตรโคลซาน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	รัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (มิลลิเมตร)		
	<i>S.aureus</i>	<i>B.subtillis</i>	<i>E.coli</i>
0	0.0	0.0	0.0
1	8.7	4.1	7.0
3	10.4	5.6	8.4
5	11.1	6.7	8.8

สำหรับผลการทดสอบที่แสดงดังตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่าการผสมไตรโคลซานในพอลิเอทิลีนที่สูงขึ้นส่งผลให้มีปริมาณการหลุดออกของไตรโคลซานมีมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอย่างไรก็ตาม จะสังเกตเห็นว่า สำหรับปริมาณไตรโคลซานที่ผสมในพอลิเอทิลีนช่วง 0.5-1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไตรโคลซานสามารถแพร่ออกสู่ตัวกลางทดสอบได้ 10.2-14.2 ส่วนในล้านส่วนโดยน้ำหนัก ซึ่งค่าดังกล่าว ถือว่ามีค่าสูงเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้ในการปนเปื้อนสารไตรโคลซานในอาหารซึ่งกำหนดไว้โดยคณะกรรมการด้านสุขภาพและการคุ้มครองผู้บริโภคของยุโรป โดยระบุไว้ไม่เกิน 5 ส่วนในล้านส่วนโดยน้ำหนัก [13] ดังนั้นขอเสนอแนะจากนักวิจัยในการเลือกใช้สารไตรโคลซาน ควรคำนึงถึงปริมาณการปลดปล่อยสารออกมาสู่ภายนอกชิ้นงานมากกว่าปริมาณที่เติมลงไปในวัสดุพอลิเมอร์

ตารางที่ 5 ปริมาณการปลดปล่อยสารไตรโคลซานที่ผสมในพอลิเอทิลีน

ปริมาณไตรโคลซาน ในพอลิเอทิลีน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ปริมาณการปลดปล่อย ของไตรโคลซาน (ส่วนในล้านส่วนโดยน้ำหนัก)
0.5	10.2
1.0	13.7
1.5	14.2



เปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย

เปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งเป็นผลการทดสอบแสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเชิงปริมาณ โดยวิธี ASTM E2149 เวลาทดสอบ 1 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 6 พบว่า การผสมไตรโคไลซานลงในพอลิเอทิลีนปริมาณมากขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรียสูงขึ้น โดยเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรียชนิด *S. aureus* *B. subtilis* และ *E. coli* คือ 95.5 - 99.9 96.3 - 99.9 และ 30.9 - 96.0 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ทั้งนี้จะสังเกตเห็นว่า ไตรโคไลซานสามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียแกรมบวกชนิด *S. aureus* และ *B. subtilis* ได้สูงกว่าแบคทีเรียชนิดแกรมลบ ชนิด *E. coli* โดยที่ปริมาณการผสมไตรโคไลซาน 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรียของ *S. aureus* และ *B. subtilis* มีค่าสูงสุดประมาณ 99.9 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ ปริมาณการผสมไตรโคไลซาน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การทดสอบโดยใช้เชื้อ *E. coli* เปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรียมีค่าสูงสุดที่ 96.0 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบลำดับประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียแต่ละชนิด ระหว่างผลการทดสอบที่ได้จากการวัดการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรียพบว่ามีผลแตกต่างกัน ทั้งนี้สาเหตุมาจาก ในวิธีการทดสอบการวัดการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียเป็นความสามารถในการแพร่ของไตรโคไลซานบนอาหารเลี้ยงเชื้อซึ่งอัตราการแพร่อาจขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของชนิดของแบคทีเรีย ในขณะที่การทดสอบในวิธีการวัดเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย ไตรโคไลซานที่ปลดปล่อยออกมาจากพอลิเอทิลีนสัมผัสโดยตรงเชื้อแบคทีเรียในสารละลายเปปโตเนเป็นตัวอย่างทดสอบ โดยไม่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการแพร่ของไตรโคไลซาน อย่างไรก็ตาม วิธีการทดสอบทั้งสองวิธีให้ผลทดสอบที่ระบุชัดเจนว่า พอลิเอทิลีนที่ผสมไตรโคไลซานสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งสามชนิดได้

ตารางที่ 6 เปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของพอลิเอทิลีนที่มีไตรโคไลซานผสมอยู่ที่ปริมาณต่างๆ ในช่วงเวลาทดสอบ 1 ชั่วโมง

ปริมาณไตรโคไลซาน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	<i>S. aureus</i>	<i>B. subtilis</i>	<i>E. coli</i>
1	95.5	96.3	30.9
3	99.9	99.3	87.8
5	99.9	99.9	96.0

**คุณภาพน้ำนมที่บรรจุในภาชนะที่ผลิตจากวัสดุผสมพอลิเอทิลีนและไตรโคไลซาน**

สำหรับในส่วนนี้ได้ทำการเปรียบเทียบคุณภาพของน้ำนมที่บรรจุในขวดพอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมและผสมไตรโคไลซานปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของวัสดุผสมดังกล่าว เช่นเดียวกับวิธีที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียตามวิธีมาตรฐาน ผลการทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

การเปลี่ยนแปลงค่า pH

สำหรับระดับ pH ของน้ำนม ถือเป็นค่าที่แสดงถึงคุณภาพของน้ำนม กรณีที่มีจุลินทรีย์เจริญขึ้นในน้ำนมจะส่งผลให้ระดับ pH ของน้ำนมมีค่าลดลง [13] ผลการทดสอบการวัดค่า pH ของน้ำนมแสดงดังตารางที่ 7 พบว่า ค่า pH ของน้ำนมจะลดลงอย่างรวดเร็วในกรณีขวดพอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมไตรโคไลซาน เมื่อเทียบกับกรณีขวดพอลิเอทิลีนที่ผสมไตรโคไลซานปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้กรณีขวดพอลิเอทิลีนที่ไม่ได้ผสมไตรโคไลซานจะสังเกตเห็นการตกตะกอนของน้ำนมเกิดขึ้นก่อนอีกด้วย

ตารางที่ 7 ค่า pH ของน้ำนมที่บรรจุอยู่ในภาชนะที่ขึ้นรูปจากวัสดุพอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมและผสมไตรโคไลซานปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

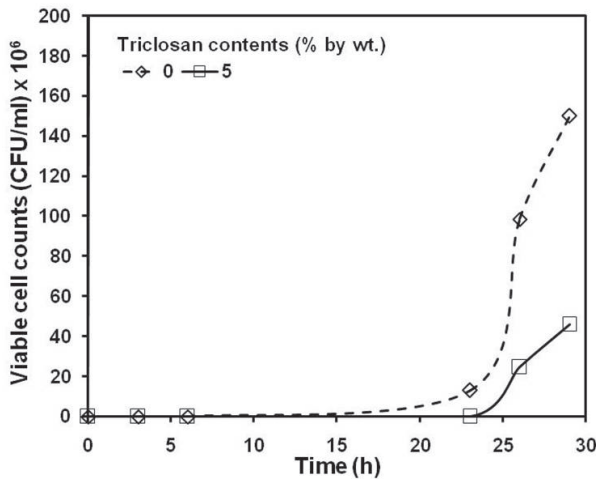
เวลาในการทดสอบ (วัน)	ค่า pH ของน้ำนม	
	ปริมาณไตรโคไลซานที่ผสมในพอลิเอทิลีน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	
	0	5
0	6.69	6.69
1	6.37	6.53
4	5.44*	6.34
9	5.23*	6.00*

\* น้ำนมเริ่มมีการตกตะกอน

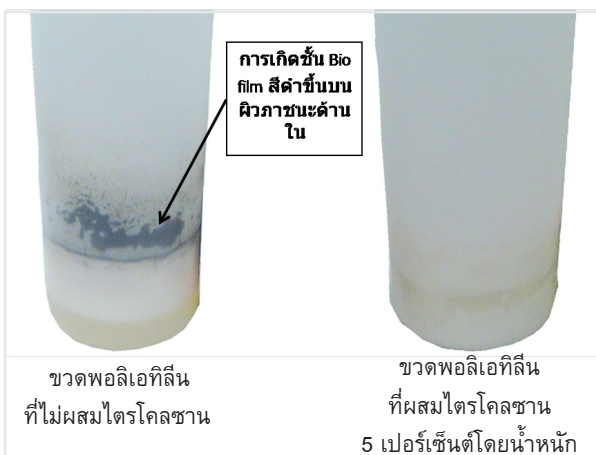
การเจริญของจุลินทรีย์ในน้ำนม

สำหรับผลการวัดการเจริญของจุลินทรีย์ในน้ำนมเปรียบเทียบระหว่างการบรรจุน้ำนมในขวดพอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมและผสมไตรโคไลซาน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 7 โดยหลังการทดสอบผ่านไปเป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง จะสังเกตเห็นว่า จำนวนโคโลนีของจุลินทรีย์ในน้ำนมที่บรรจุในขวดพอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมไตรโคไลซานจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีอัตราการเพิ่มจำนวนที่สูงกว่ากรณีที่บรรจุในขวดพอลิเอทิลีนที่ผสมไตร-

โคลซานอย่างชัดเจน นั้นแสดงให้เห็นว่าขวดที่ผลิตจากวัสดุพอลิเอทิลีนที่ผสมไตรโคลซานสามารถต้านทานการเจริญของจุลินทรีย์ในน้ำนมได้ นอกจากนี้ จากการสังเกตขวดที่บรรจุน้ำนมโดยตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 วัน พบว่า ขวดพอลิเอทิลีนที่ไม่ได้ผสมไตรโคลซานจะปรากฏฟิล์มชีวภาพ (Bio film) สีดำ ซึ่งเป็นร่องรอยของการเจริญของจุลินทรีย์ เช่น รา บนผิวด้านในขวดอีกด้วย โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 7 การเจริญของจุลินทรีย์ในน้ำนมที่บรรจุอยู่ในภาชนะที่ขึ้นรูปจากวัสดุพอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมและผสมไตรโคลซานปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 8 สภาพขวดที่บรรจุน้ำนมหลังจากผ่านไป 30 วัน ประกอบด้วย (ซ้าย) ขวดพอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมไตรโคลซาน และ (ขวา) ขวดพอลิเอทิลีนที่ผสมไตรโคลซานปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

### ข้อคิดเห็นจากภาคเอกชนผู้ร่วมวิจัย

ตามที่ บริษัท ปตท. เคมีคอล จำกัด (มหาชน) ซึ่งเป็นผู้ผลิตเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ภายใต้ชื่อทางการค้าว่า InnoPlus สำหรับงานบรรจุภัณฑ์ประเภทต่างๆ ได้มีนโยบายสนับสนุนงานวิจัย เพื่อพัฒนาระบบการผลิตและผลิตภัณฑ์เพื่อให้ตอบสนองความต้องการของลูกค้า และสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์ในการประยุกต์ใช้งานในหลากหลายด้านอย่างต่อเนื่องนั้น สำหรับงานวิจัยนี้ทางบริษัทฯ เล็งเห็นถึงประโยชน์ในการศึกษาการใช้สารยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียชนิดไตรโคลซานในพอลิเอทิลีน อันจะนำไปสู่การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่สามารถรักษาความสดใหม่ของผลิตภัณฑ์ที่มีอายุสั้นเช่น น้ำนมให้ยาวนานขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการทดสอบการวัดประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ด้วยวิธีการทดสอบมาตรฐาน และทดสอบผลในการบรรจุตัวอย่างอาหาร ได้แก่ น้ำนม ซึ่งเป็นแนวทางที่สะท้อนให้เห็นความสัมพันธ์ของผลการทดลองที่ได้จากวิธีการทดสอบมาตรฐานต่อความสามารถในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ในการใช้งานจริง จากผลการวิจัยได้แสดงให้เห็นว่าไตรโคลซานที่ผสมในพอลิเอทิลีนสามารถแสดงฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามการทดสอบเพิ่มเติมในด้านความปลอดภัยของผู้บริโภคต่อสารเติมแต่งนี้เมื่อสัมผัสอาหาร รวมถึงการพัฒนาปรับปรุงเรื่องของกลิ่นและสี จะช่วยให้ผลิตภัณฑ์ได้รับความนิยมนำแพร่หลายมากยิ่งขึ้น

### สรุปผลงานวิจัย

จากผลการทดสอบสมบัติการไหล พบว่า ค่าแรงบิดของสกรูขณะอัดรีดมีค่าลดลงตามปริมาณไตรโคลซานที่ผสมในพอลิเอทิลีน และชิ้นงานพอลิเอทิลีนมีค่าดัชนีความเหลืองมีค่าสูงขึ้น และมีค่าดัชนีความขาวลดลงตามปริมาณไตรโคลซาน สำหรับผลทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของพอลิเอทิลีนที่ผสมไตรโคลซานในช่วง 1.0 – 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้เชื้อทดสอบชนิด *S. aureus* *B. subtilis* และ *E. coli* พบว่า รัศมีการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียมีค่าเท่ากับ 8.7 – 11.1 4.1 – 6.7 และ 7.0 – 8.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลการวัดเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรียภายใต้สภาวะในการวิจัยครั้งนี้ พบว่าที่ปริมาณการผสมไตรโคลซาน 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถทำให้เปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรียของ *S. aureus* และ *B. subtilis* มีค่าสูงถึงประมาณ 99.0 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่

กรณีการทดสอบกับเชื้อ *E. coli* เพอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรียมีค่าสูงสุดที่ 96.0 เพอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณการผสมไตรโคลซาน 5 เพอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับการทดสอบคุณภาพของน้ำนม ในสภาวะอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าค่า pH ของน้ำนมที่บรรจุในขวดพอลิเอทิลีนที่ผสมไตรโคลซานลดลงจนเกิดเป็นตะกอนนมที่ระยะเวลา 9 วัน ในขณะที่ ค่า pH ของน้ำนมที่บรรจุในขวดพอลิเอทิลีนที่ไม่ได้ผสมไตรโคลซานลดลงจนเกิดเป็นตะกอนนม ที่ระยะเวลา 4 วัน ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าไตรโคลซานสามารถใช้เป็นสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในภาชนะบรรจุน้ำนมได้

### กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัย ขอขอบพระคุณ บริษัท ปตท. เคมีคอล จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากรและวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สำหรับการให้คำปรึกษาและอนุเคราะห์สถานที่ทำวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

[1] P. Appendini and J.H. Hotchkiss, Review of Antimicrobial Food Packaging, *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 3 (2002), pp. 113 – 126.

[2] Antimicrobials in Plastics: A Global Review, *Plastics Additives and Compounding*, December (2001), pp. 12 – 15.

[3] Antimicrobial Additive Systems See Increased Used in Polymer, *Plastics Additives and Compounding*, December (2001), pp. 16 – 18.

[4] Antimicrobial Additives in Plastics and European Biocidal Products Directive, *Plastic Additives & Compounding*, December (2002), pp. 14 – 17.

[5] P. Chammanee, K. Sombatsompop, A. Kositchaiyong and N. Sombatsompop, Effects of Anti-bacterial Agents, Sample Preparation and Contact Time on Anti-bacterial Efficacy in MDPE Film, *Journal of Macromolecular Science. Part B: Physics* 48 (2009), pp. 755 – 765.

[6] *Antimicrobial Systems and Their Use in Plastics, Plastics Additives and Compounding*, October (2001), pp. 20 – 23.

[7] K. Cooksey, *Antimicrobial Food Packaging Materials, Additives for Polymer* 8 (2001), pp. 6 – 10.

[8] H.N. Bhargava and P.A. Leonard, Triclosan: Applications and Safety, *AJIC Special Article* 24 (1996), pp. 209 – 218.

[9] Y.D. Kalyon and U. Olgun, Antibacterial Efficacy of Triclosan-incorporated Polymers, *AJIC special article* 29 (2001), pp. 124 – 125.

[10] S.M. Iconomopoulou and G.A. Voyiatzis, The Effect of the Molecular Orientation on the Release of Antimicrobial Substances from Uniaxially Drawn Polymer Matrixes, *Journal of Controlled Release* 103 (2005), pp. 451 – 464.

[11] W. Zhang, P.K. Chu, J. Ji, Y. Zhang, R.K.Y. Fu, and Q. Yan, Antibacterial Properties of Plasma – modified and Triclosan or Bronopol coated Polyethylene, *Polymer* 47 (2006), pp. 931 – 936.

[12] Allmyr, M., Adolfsson-Erici, M. McLachlan, M. and Sandborgh-Englund, G., Triclosan in Plasma and Milk from Swedish Nursing Mothers and Their Exposure via Personal Care Products, *Science of the Total Environment* 372 (2006), pp. 87-93.

[13] P. Winitchai, W. Thanapane, U. Saejung, N. Wongjaroen and P. Houysrichun, Quantitative analysis of triclosan in soap bar and liquid soap in market by spectrophotometry, *Proceedings of 42nd Kasetsart University Annual Conference* 3-6 Feb (2004), pp. 266 – 272.

[14] H.J. Lee, S.Y. Yeo and S.H. Jeong , Antibacterial Effect of Nanosized Silver Colloidal Solution on Textile Fabrics, *Journal of Materials Science* 38 (2003), pp. 2199 – 2204.

[15] H.J. Lee and S.H. Jeong, Bacteriostasis and Skin Innoxiousness of Nanosize Silver Colliods on Textile Fabrics, *Textile Research Journal* 75 (2005), pp. 551 – 556.

[16] M. L. Antonelli, R. Curini, D. Scricciolo and G. Vinci, Determination of Free Fatty Acids and Lipase Activity in Milk: Quality and Storage Markers, *Talanta* 58 (2002), pp. 561 – 568.

[17] I. Frás, P. Cassagnau and A. Michel, Lubrication and slip flow during extrusion of plasticized PVC compounds in the presence of lead stabilizer, *Polymer* 40 (1999), pp. 1261 – 1269.

[18] E.S. Park, W.S. Moon, M.J. Song, M.N. Kim, K.H. Chung and J.S. Yoon, Antimicrobial activity of phenol and benzoic acid derivatives, *International Biodeterioration & Biodegradation* 47 (2001), pp. 209 – 214.