

การยับยั้งจุลินทรีย์โดยใช้วัสดุซิลเวอร์นาโนที่ได้จากเคมีสีเขียว
เพื่อประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำ




วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
กรกฎาคม 2559
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์เรื่อง "การยับยั้งจุลินทรีย์โดยใช้วัสดุซิลเวอร์นาโนที่ได้จากเคมีสีเขียว
เพื่อประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำ"

ของนางสาวยุภาดา บุญโต


ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

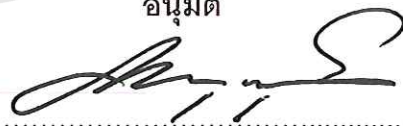

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดลเดช ตั้งตระการพงษ์)


..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์รัตน์ ขจิตวิษยานุกูล)


..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร.จิรภัทร์ อนันต์ภัทรชัย)


..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ดร.อภิชน วัชรเนทรวงศ์)

อนุมัติ



(ดร.ภาณุ พุทธวงศ์)

รองคณบดีฝ่ายบริหารและวางแผน ปฏิบัติราชการแทน
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

22 ก.ค. 2559

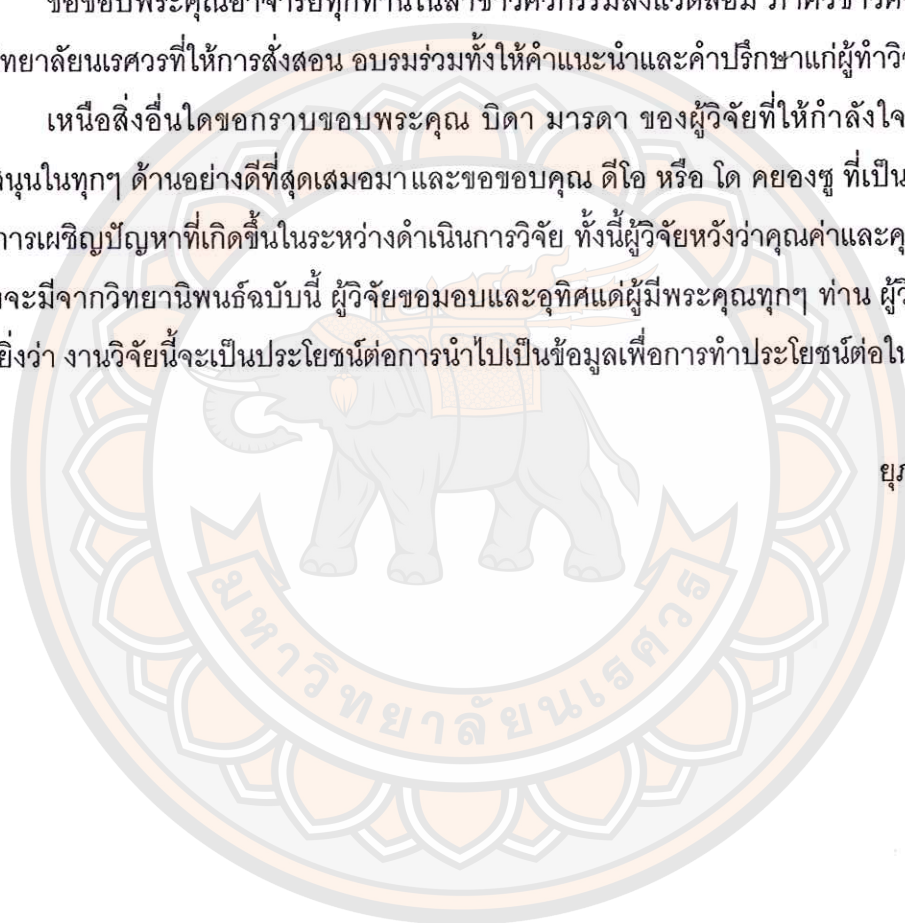
ประกาศคุณูปการ

ผู้ทำวิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร. พวงรัตน์ ขจิตวิทยานุกุล ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. จิรภัทร์ อนันต์ภักตร์ชัย ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ร่วม ที่ได้สละเวลาเพื่อให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำกับผู้ทำวิจัยตลอดระยะเวลาในการดำเนินการวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวรที่ให้การสั่งสอน อบรมร่วมทั้งให้คำแนะนำและคำปรึกษาแก่ผู้ทำวิจัย

เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของผู้วิจัยที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมาและขอขอบคุณ ดีไอ หรือ โด คยองซู ที่เป็นแรงบันดาลใจในการเผชิญปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างดำเนินการวิจัย ทั้งนี้ผู้วิจัยหวังว่าคุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงจะมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบและอุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปเป็นข้อมูลเพื่อการทำประโยชน์ต่อในอนาคต

ยุภาดา บุญโต



ชื่อเรื่อง	การยับยั้งจุลินทรีย์โดยใช้วัสดุซิลเวอร์นาโนที่ได้จากเคมีสีเขียวเพื่อ ประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำ
ผู้วิจัย	ยุภาดา บุญโต
สถานที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.พวงรัตน์ ขจิตวิทยานุกูล
กรรมการที่ปรึกษา	ดร.จิรภัทร์ อนันต์ภัทรชัย
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วศ.ม. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนครสวรรค์, 2558
คำสำคัญ	ซิลเวอร์นาโน, การยับยั้งจุลินทรีย์, เคมีสีเขียวและการบำบัดน้ำ

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีจุดประสงค์ในการสังเคราะห์วัสดุซิลเวอร์นาโนด้วยวิธีเคมีสีเขียว เพื่อที่จะได้วัสดุนาโนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สารสกัดจากพืชที่ใช้ได้แก่ กระเทียม (G), กาแฟ (C), บีทรูท (B), เรดิช (R) และใบชา (T) โดยทำการสังเคราะห์วัสดุซิลเวอร์นาโนด้วยวิธี Microwave irradiation method โดยมีวัสดุซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีเป็นสารควบคุม วัสดุซิลเวอร์นาโนที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีสีเขียว ได้แก่ Ag/AgCl-R, Ag/AgCl-B, Ag/AgCl-C, Ag/AgCl-G, Ag-R, Ag-B, Ag-G, Ag-C และ Ag-T จากผลการศึกษพบว่าวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl ทั้ง 4 ชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์ *Escherichia coli* ได้ สมบูรณ์ที่ความเข้มข้น 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร โดยที่ Ag/AgCl-G ที่ใช้สารสกัดจากกระเทียม ให้ผลร้อยละในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ *E. coli* ได้ดีที่สุด จากผลการศึกษากการบำบัดสารมลพิษด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสพบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ของสีเมทิลลีนบลูวัสดุทดสอบทั้งสองชนิด ได้แก่ Ag/AgCl-G และ Ag/AgCl-C มีประสิทธิภาพในการบำบัดในช่วงร้อยละ 30 ถึง 50 ภายใต้แสงวิสิเบิลและวัสดุทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีมาลาโคโรกรีนจากความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสีที่ 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรให้ลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 50 ถึง 60 ภายใต้แสงอาทิตย์

Title ANTIBACTERIAL ABILITY OF Ag AND Ag/AgCl
NANOPARTICLES FROM GREEN SYNTHESIS FOR WATER
TREATMENT APPLICATION

Author Yuphada Boonto

Advisor Associate Professor Puangrat Kajitvichyanukul, Ph.D.

Co - Advisor Jirapat Ananpattarachai, Ph.D.

Academic Paper Thesis M.Eng. in Environmental Engineering,
Naresuan University, 2015

Keywords Silver nanoparticles, Antibacterial, green nanomaterials, water
treatment

ABSTRACT

This research is aimed to synthesize silver nanoparticles (AgNPs) using green chemistry materials as environmental friendly material. In this work, extracted plants for green synthesis were garlic (G), coffee (C), beetroot (B), Radich (R) and green tea (T). The AgNPs were derived from Microwave irradiation method and the AgNPs synthesized by chemical based method was also performed as a control material. The Silver nanoparticles obtained from green synthesis were Ag/AgCl-R, Ag/AgCl-B, Ag/AgCl-C, Ag/AgCl-G, Ag-R, Ag-B, Ag-G, Ag-C and Ag-T. The result of antibacterial activity showed that 150 $\mu\text{g/ml}$ of Ag/AgCl-R, Ag/AgCl-B, Ag/AgCl-C and Ag/AgCl-G can eliminate all of *Escherichia coli* (*E.coli*). The green synthesized Ag/AgCl-G from garlic extracted provided the highest percentage in inhibition of *E.coli*. From the photocatalysis test, the highest percentages in decreasing 100 mg/L Methylene Blue for Ag/AgCl-C and Ag/AgCl-G were in the range of 30-50 under visible light. The percentages in reducing 100 mg/L Malachite Green for both materials were in the range 65-70 under sunlight.

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาของปัญหา.....	1
จุดมุ่งหมายของการศึกษา.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
นาโนเทคโนโลยี.....	4
ชนิดของวัสดุนาโน.....	5
ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของวัสดุนาโน.....	5
พื้นที่ผิวของวัสดุนาโน.....	6
กระบวนการในการบำบัดสารมลพิษด้วยวัสดุนาโน.....	6
ซิลเวอร์นาโน.....	10
เคมีสีเขียว (Green Chemistry).....	18
ข้อมูลพืชที่นำมาใช้ในการทดลอง.....	21
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	27
วิธีดำเนินงานวิจัย.....	27
4 ผลการวิจัย.....	57
การศึกษาลักษณะและคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโน.....	57
ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ของวัสดุนาโนซิลเวอร์.....	64

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl ในการบำบัดสารสี ชนิดเมทิลีนบลู (Methylene blue: MB) ในน้ำภายใต้หลอดวิสิเบิล ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalytic).....	83
ผลการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl- G ในการบำบัดสารสีชนิดมาลาโคไลท์กรีน (Malachite Green) ในน้ำ ภายใต้แสงอาทิตย์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalytic)	95
5 บทสรุป.....	105
สรุปผลการวิจัย.....	105
ข้อเสนอแนะ.....	108
บรรณานุกรม.....	109
ภาคผนวก.....	114
ประวัติผู้วิจัย.....	120

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1	แสดงค่าความเป็นพิษของอนุภาคซิลเวอร์นาโนเทียบกับสารซิลเวอร์ไนเตรต.....	13
2	แสดงค่าความเป็นพิษของซิลเวอร์นาโนที่มีต่อสัตว์น้ำ.....	14
3	แสดงค่าความเป็นพิษของซิลเวอร์นาโนที่มีต่อสาหร่ายและพืช.....	15
4	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว Kp ของอนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	16
5	แสดงค่าความเป็นพิษของซิลเวอร์นาโนที่มีต่อแบคทีเรีย.....	18
6	แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารสีเมทิลลีนบลู.....	25
7	แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารสีมาลาโคลด์กรีน.....	26
8	แสดงขนาดผลึกและขนาดอนุภาคของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิดต่างๆ.....	63
9	แสดงค่าค่าศักย์ซีต้า (pHpzc) ของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิดต่างๆ.....	64
10	แสดงผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย <i>Escherichia coli</i> และ <i>Staphylococcus aureus</i> ด้วยวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิดต่างๆ.....	64
11	แสดงผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย <i>Escherichia coli</i> ด้วยวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด plasmonic Ag/AgCl ที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากพืชชนิดต่างๆ.....	65
12	แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโนต่อแบคทีเรีย <i>E. coli</i> ด้วยวิธี MIC และ MBC.....	66
13	แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียของวัสดุซิลเวอร์นาโนแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	72
14	แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียของวัสดุซิลเวอร์นาโนแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	78
15	แสดงพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีชนิดเมทิลลีนบลูในน้ำโดยใช้วัสดุซิลเวอร์คอลลอยด์ชนิดต่างๆ.....	84
16	แสดงพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีชนิดเมทิลลีนบลูในน้ำโดยใช้วัสดุ Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G ที่ค่าความเป็นกรดต่างๆ.....	86

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
17 แสดงพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีชนิดเมทิลีนบลูในน้ำ โดยใช้วัสดุ Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G ที่ปริมาณ(dose, g/L)ต่างๆ.....	90
18 แสดงพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีชนิดเมทิลีนบลูในน้ำ ที่ความเข้มข้นต่างๆโดยใช้วัสดุ Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G.....	93
19 แสดงพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีชนิดมาลาโคลิกรีน ในน้ำโดยใช้วัสดุซิลเวอร์คลอไรด์ชนิดต่างๆ.....	96
20 แสดงพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีชนิดมาลาโคลิกรีน ในน้ำที่ค่า pH ต่างๆ โดยใช้วัสดุซิลเวอร์คลอไรด์ชนิด Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G.....	98
21 แสดงพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีชนิดมาลาโคลิกรีน ในน้ำที่ปริมาณวัสดุต่างๆ โดยใช้วัสดุซิลเวอร์คลอไรด์ชนิด Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G.....	101
22 แสดงพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีชนิดมาลาโคลิกรีน ในน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้วัสดุซิลเวอร์คลอไรด์ชนิด Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G.....	104

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1 แสดงขนาดเปรียบเทียบขนาดของวัสดุนาโนกับสิ่งอื่นที่ขนาดนาโนเมตร.....	4
2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของซิลเวอร์นาโนที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ.....	12
3 แสดงกลไกการกำจัดเชื้อแบคทีเรียของซิลเวอร์นาโน.....	17
4 แผนภาพสรุปหลักการพื้นฐาน 12 ข้อ ของเคมีสีเขียว.....	20
5 แสดงลักษณะของเรดิซ.....	21
6 แสดงลักษณะของบีทรูท.....	22
7 แสดงลักษณะของกระเทียม.....	23
8 แสดงลักษณะใบชาเขียว.....	24
9 แสดงลักษณะเมล็ดกาแฟ.....	24
10 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag-R.....	27
11 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ Ag-T.....	29
12 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ Ag-C.....	30
13 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ Ag-B.....	31
14 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ Ag-G.....	33
15 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ Ag-Chemical.....	34
16 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ Ag/AgCl-R.....	35
17 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ Ag/AgCl-B.....	36
18 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ Ag/AgCl-G.....	38
19 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ Ag/AgCl-C.....	39
20 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer).....	40
21 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM).....	41
22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy หรือ TEM).....	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
23	เครื่องวัดค้ำยซีต้า Malvern Zetasizer Nano series.....	44
24	แผนภาพแสดงวิธีการทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโนด้วยวิธี Minimal Inhibition concentration (MIC).....	47
25	วิธีการทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโนด้วยวิธี Minimal bactericidal concentration (MBC).....	47
26	แสดงโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนชนิด Ag.....	57
27	แสดงโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนชนิด Ag/AgCl.....	58
28	แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag –R (ก.), Ag –T (ข.), ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	58
29	แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag –B (ก.), Ag –G (ข.) และ Ag –Chemical (ค.) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (SEM).....	59
30	แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl –R (ก.), Ag/AgCl –B (ข.), Ag/AgCl –G (ค.) และ Ag/AgCl –C (ง.) ด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	60
31	แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างและขนาดผลึกวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag-R (ก.), Ag-T (ข.), Ag-B (ค.), Ag-G (ง.) และ Ag-Chemical (จ.) ด้วยกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งผ่าน.....	61
32	แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างและขนาดผลึกวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl- R (ก.), Ag/AgCl-B (ข.), Ag/AgCl-G (ค.) และ Ag/AgCl-C (ง.) กล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งผ่าน (TEM).....	62
33	แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag/AgCl-B ในการยับยั้งเชื้อ <i>E. coli</i>	68
34	แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag/AgCl-C ในการยับยั้งเชื้อ <i>E. coli</i>	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
35 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag/AgCl-G ในการยับยั้งเชื้อ <i>E. coli</i>	69
36 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag/AgCl-R ในการยับยั้งเชื้อ <i>E. coli</i> ...	70
37 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียของซิลเวอร์นาโนที่ความเข้มข้น 100 µg/ml ที่มีต่อเชื้อ <i>E.coli</i> ที่เวลา 30 นาทีและ 120 นาที.....	71
38 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag-R ในการยับยั้งเชื้อ <i>E. coli</i>	73
39 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag-B ในการยับยั้งเชื้อ <i>E. coli</i>	73
40 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag-B ในการยับยั้งเชื้อ <i>E. coli</i>	74
41 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag-Chemical ในการยับยั้งเชื้อ <i>E. coli</i> ...	75
42 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag-T ในการยับยั้งเชื้อ <i>E. coli</i>	76
43 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียของซิลเวอร์นาโนที่ความเข้มข้น 100 µg/ml ที่มีต่อเชื้อ <i>E.coli</i> ที่เวลา 30 นาทีและ 120 นาที.....	77
44 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ <i>E.coli</i> ของ Ag/AgCl-B ที่ความเข้มข้น 150 µg/ml ภายใต้สภาวะมีและไม่มีแสง.....	79
45 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ <i>E.coli</i> ของ Ag/AgCl-C ที่ความเข้มข้น 150 µg/ml ภายใต้สภาวะมีและไม่มีแสง.....	80
46 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ <i>E.coli</i> ของ Ag/AgCl-G ที่ความเข้มข้น 150 µg/ml ภายใต้สภาวะมีและไม่มีแสง.....	81
47 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ <i>E.coli</i> ของ Ag/AgCl-R ที่ความเข้มข้น 150 µg/ml ภายใต้สภาวะมีและไม่มีแสง.....	81
48 แสดงผลของชนิดวัสดุนาโนต่อการย่อยสลายสารสีชนิดเมทิลีนบลูในน้ำ.....	83
49 แสดงกราฟ 1/C กับเวลาในการย่อยสลายสารสีชนิดเมทิลีนบลูในน้ำโดยใช้วัสดุซิลเวอร์คอลลอยด์ชนิดต่างๆ.....	84

สารบัญภาพ (ต่อ)

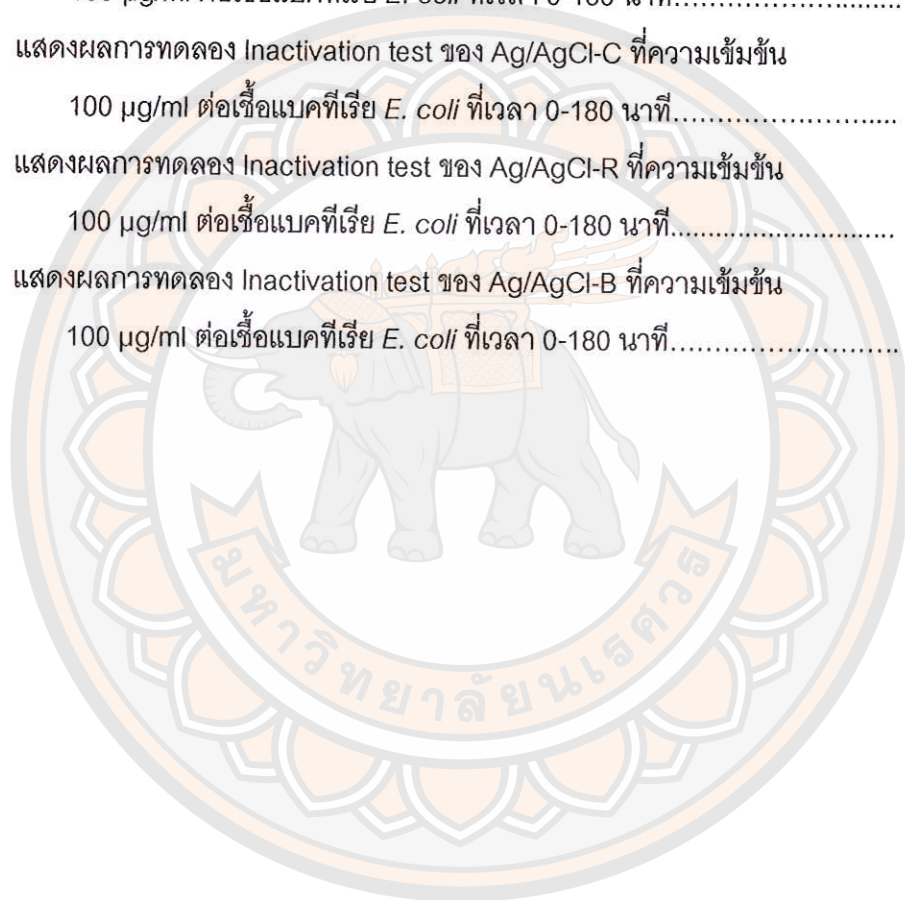
ภาพ	หน้า
50 แสดงผลของค่าความเป็นกรดต่างต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีชนิด เมทิลลีนบลูในน้ำของวัสดุนาโนชนิด (ก) Ag/AgCl-C และ(ข) Ag/AgCl-G....	85
51 ผลของปริมาณวัสดุนาโนต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีชนิดเมทิลลีนบลูในน้ำ ของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-C.....	87
52 ผลของปริมาณวัสดุนาโนต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีชนิดเมทิลลีนบลูในน้ำ ของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-G.....	88
53 แสดงกราฟ 1/C กับเวลาในการย่อยสลายสารสีชนิดเมทิลลีนบลูในน้ำ โดยใช้วัสดุซิลเวอร์คลอไรด์ชนิด Ag/AgCl-C ที่ปริมาณ (dose, g/L) ต่างๆ....	89
54 แสดงกราฟ 1/C กับเวลาในการย่อยสลายสารสีชนิดเมทิลลีนบลูในน้ำโดยใช้วัสดุ ซิลเวอร์คลอไรด์ชนิด Ag/AgCl-G ที่ปริมาณ (dose, g/L) ต่างๆ.....	89
55 แสดงผลของความเข้มข้นของสารสีชนิดเมทิลลีนบลูต่อประสิทธิภาพการบำบัด สารสีของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-C.....	91
56 แสดงผลของความเข้มข้นของสารสีชนิดเมทิลลีนบลูต่อประสิทธิภาพการบำบัด สารสีของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-G.....	91
57 แสดงกราฟ 1/C กับเวลาในการย่อยสลายสารสีชนิดเมทิลลีนบลูในน้ำ ที่ความเข้มข้นต่างๆโดยใช้วัสดุซิลเวอร์คลอไรด์ชนิด Ag/AgCl-C.....	92
58 แสดงกราฟ 1/C กับเวลาในการย่อยสลายสารสีชนิดเมทิลลีนบลูในน้ำ ที่ความเข้มข้นต่างๆโดยใช้วัสดุซิลเวอร์คลอไรด์ชนิด Ag/AgCl-G.....	92
59 แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารสีที่ความเข้มข้น 100 mg/L ของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G.....	94
61 แสดงผลของชนิดวัสดุนาโนต่อการบำบัดสารสีชนิดมาลาโคสิกรีนในน้ำ	96
62 แสดงผลของค่าพีเอชต่อการบำบัดสารสีชนิดมาลาโคสิกรีนในน้ำด้วยวัสดุนาโน ชนิด (ก.) Ag/AgCl-C และ (ข.) Ag/AgCl-G.....	97

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
63 แสดงการย่อยสลายสารสีชนิดมาลาโคล์กรีนในน้ำที่ค่าพีเอชต่างๆ โดยใช้วัสดุซิลเวอร์คอลลอยด์ โดยกราฟ 1/C กับเวลาของ Ag/AgCl-C (ก.)และ -ln (C/Co) กับเวลา Ag/AgCl-G (ข.).....	98
64 แสดงผลของปริมาณวัสดุต่อการบำบัดสารสีชนิดมาลาโคล์กรีนในน้ำด้วยวัสดุชนิด Ag/AgCl-C.....	99
65 แสดงผลของปริมาณวัสดุต่อการบำบัดสารสีชนิดมาลาโคล์กรีนในน้ำด้วยวัสดุชนิด Ag/AgCl-G.....	100
66 แสดงกราฟ 1/C กับเวลาในการย่อยสลายสารสีชนิดมาลาโคล์กรีนในน้ำที่ปริมาณวัสดุต่างๆโดยใช้วัสดุซิลเวอร์คอลลอยด์ชนิด Ag/AgCl-C (ก.) และ Ag/AgCl-G (ข.).....	101
67 แสดงผลการบำบัดสารสีชนิดมาลาโคล์กรีนในน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยวัสดุชนิดAg/AgCl-C.....	102
68 แสดงผลการบำบัดสารสีชนิดมาลาโคล์กรีนในน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยวัสดุชนิด Ag/AgCl-G.....	103
69 แสดงกราฟ 1/C กับเวลาในการย่อยสลายสารสีชนิดมาลาโคล์กรีนในน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆโดยใช้วัสดุซิลเวอร์คอลลอยด์ชนิด Ag/AgCl-C (ก.)และ Ag/AgCl-G (ข.).....	103
70 กราฟมาตรฐานสำหรับสารสีชนิดมาลาโคล์กรีน.....	115
71 กราฟมาตรฐานสำหรับสารสีชนิดเมทิลลีนบลู.....	115
72 แสดงค่าศักย์ซีต้า (pH_{pzc})ของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl-C.....	116
73 แสดงค่าศักย์ซีต้า (pH_{pzc})ของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl-G.....	116
74 แสดงค่าศักย์ซีต้า (pH_{pzc})ของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl-B.....	117
75 แสดงค่าศักย์ซีต้า (pH_{pzc})ของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl-R.....	117

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
76 แสดงผลการทดลอง Inactivation test ของ Ag/AgCl-G ที่ความเข้มข้น 100 µg/ml ต่อเชื้อแบคทีเรีย <i>E. coli</i> ที่เวลา 0-180 นาที.....	118
77 แสดงผลการทดลอง Inactivation test ของ Ag/AgCl-C ที่ความเข้มข้น 100 µg/ml ต่อเชื้อแบคทีเรีย <i>E. coli</i> ที่เวลา 0-180 นาที.....	118
78 แสดงผลการทดลอง Inactivation test ของ Ag/AgCl-R ที่ความเข้มข้น 100 µg/ml ต่อเชื้อแบคทีเรีย <i>E. coli</i> ที่เวลา 0-180 นาที.....	119
79 แสดงผลการทดลอง Inactivation test ของ Ag/AgCl-B ที่ความเข้มข้น 100 µg/ml ต่อเชื้อแบคทีเรีย <i>E. coli</i> ที่เวลา 0-180 นาที.....	119



บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาของปัญหา

ซิลเวอร์หรือโลหะเงินมีการนำมาใช้ประโยชน์มาเป็นเวลานานหลายร้อยปีโดยในยุคแรกถูกนำมาใช้ในการทำของใช้จำพวกเครื่องประดับ ภาชนะบรรจุอาหาร นอกจากนั้นยังมีการใช้ในด้านการแพทย์ ยารักษาโรค เนื่องจากมนุษย์เราค้นพบว่าโลหะเงินมีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญเชื้อจุลินทรีย์ได้ ในยุคแรกจึงมีการใช้พาชนะที่ทำจากโลหะเงินบรรจุอาหารที่เน่าเสียได้ง่ายหรือบรรจุน้ำดื่มจากนั้นจึงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีนาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) เกิดขึ้นซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการสร้างหรือสังเคราะห์วัสดุให้มีขนาดเล็กลงถึงระดับนาโนเมตร คือ ขนาดประมาณ 1-100 นาโนเมตร ซึ่งจะส่งผลให้คุณสมบัติทางด้านกายภาพ เคมีและชีวภาพของวัสดุนั้นเกิดเปลี่ยนแปลง เช่น พื้นที่ผิวของวัสดุจะมีปริมาณมากยิ่งขึ้นเมื่อวัสดุมีขนาดระดับนาโนเมตรเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่า จากนั้นจึงมีการใช้เทคโนโลยีดังกล่าวมาพัฒนาโลหะเงินให้มีขนาดเล็กลงจนถึงขั้นระดับนาโนเมตรซึ่งเรียกว่า "อนุภาคซิลเวอร์นาโน" เพื่อที่จะพัฒนาคุณสมบัติของโลหะเงินให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์

วัสดุซิลเวอร์นาโนมีการนำมาใช้ประโยชน์ในหลายด้านเช่น ด้านการแพทย์ อุตสาหกรรม สิ่งทอผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภครวมทั้งงานด้านสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ใช้วัสดุซิลเวอร์นาโน กลุ่มอุตสาหกรรมสิ่งทอ เช่น ถุงเท้า เสื้อผ้ากีฬา เสื้อผ้าทางการแพทย์ เสื้อผ้าทหาร แต่ซิลเวอร์นาโนที่นำมาใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ ล้วนมาจากการกระบวนการสังเคราะห์ที่ใช้สารเคมีที่มีอันตรายและต้องให้พลังงานความร้อนและไฟฟ้าจำนวนมากในกระบวนการผลิต อีกทั้งยังได้ของเสียที่เป็นของเสียอันตราย (Hazardous Waste by product) จากกระบวนการผลิต จึงเกิดความสงสัยในความปลอดภัยของการนำวัสดุซิลเวอร์นาโนที่จะนำมาใช้งาน เนื่องจากอนุภาคนาโนนั้นมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและยังมีคุณสมบัติที่ไม่เคยพบในอนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งหมายความว่าสารที่อยู่ในระดับอนุภาคนาโนอาจเปลี่ยนจากไม่เป็นพิษไปเป็นมีพิษได้เช่นกัน ดังนั้นเราจึงต้องตระหนักถึงความเป็นพิษของวัสดุนาโนที่อาจเป็นไปได้และผลจากการกระบวนการผลิตวัสดุนาโน

ในประเทศไทยเองก็มีการวิจัยและพัฒนาวัสดุนาโนเพื่อการใช้ประโยชน์เพิ่มมากขึ้นแต่กลับไม่มีการตื่นตัวหรือให้ความสนใจในด้านความเป็นพิษหรือโทษของวัสดุนาโน เมื่อเทียบกับ

ความต้องการใช้ประโยชน์วัสดุนาโนซึ่งถือเป็นความเสี่ยงอย่างมากเพราะในปัจจุบันมีการใช้งานผลิตภัณฑ์หลากหลายประเภทที่มีองค์ประกอบจากวัสดุนาโนหรือผลิตภัณฑ์จากนาโนเทคโนโลยี รวมทั้งผลิตภัณฑ์จากวัสดุนาโนที่มีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะในด้านการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์แต่กลับไม่มีมาตรการใดๆเข้ามาควบคุมด้านความปลอดภัยในการใช้งานผลิตภัณฑ์หรือผู้ที่เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยีหรือวัสดุนาโน ไม่ว่าจะเป็น ผู้บริโภค นักวิจัย พนักงานในโรงงานและที่สำคัญคือการแพร่กระจายและตกค้างในสิ่งแวดล้อมทั้งทาง ดิน น้ำ และอากาศซึ่งจะส่งผลกระทบต่อตามมาอีกมากมาย เช่น หากมีการปนเปื้อนของวัสดุนาโนในแหล่งน้ำก็อาจส่งผลกระทบต่อการผลิตน้ำเพื่อการบริโภค การไปสะสมในพืชที่ได้รับน้ำที่มีการปนเปื้อนวัสดุนาโนซึ่งในที่สุดท้ายแล้วมนุษย์จะเป็นผู้ได้รับผลกระทบจากการได้รับสัมผัสวัสดุนาโนที่มากับตัวกลางต่างๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น

ในระยะเวลาไม่นานมานี้เริ่มมีการตระหนักถึงความเสี่ยงของการผลิตหรือใช้งานวัสดุนาโนในด้านความเป็นพิษต่อผู้ที่เกี่ยวข้องทั้งผู้ผลิตและเป็นผู้บริโภคที่ใช้งานผลิตภัณฑ์ที่มีวัสดุนาโนและด้านผลกระทบของวัสดุนาโนต่อสิ่งแวดล้อมทั้งการแพร่กระจาย การตกค้างในตัวกลางต่างๆ ทางสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะผลกระทบต่อจุลินทรีย์ในสิ่งแวดล้อมอย่างที่ทราบกันเป็นอย่างดีว่าวัสดุนาโนนั้นมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดีจึงมีกังวลว่าหากมีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมอาจส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ในสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินและน้ำรวมทั้งอาจส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์ที่มีโทษให้เกิดการต้านทานต่อวัสดุนาโน (สุพิณ แสงสุข, 20 กรกฎาคม 2550)

การนำวิธีเคมีสีเขียวเข้ามาช่วยในกระบวนการผลิตวัสดุนาโนจึงเป็นทางออกที่ดีสำหรับการแก้ปัญหาและลดความกังวลในการใช้งานวัสดุนาโน เนื่องจากการสังเคราะห์วัสดุนาโนผ่านกระบวนการเคมีสีเขียวนั้นเป็นการสังเคราะห์วัสดุโดยลดการใช้สารเคมีที่เป็นสารเคมีอันตรายและลดการเกิดของเสียอันตรายได้อย่างมากเพราะในวิธีการสังเคราะห์ไม่มีการใช้ตัวรีดิวซ์ (reducing agents) ที่เป็นสารเคมีแต่ใช้สารสกัดจากพืชมาทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ให้กับกระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโน

จุดมุ่งหมายของการศึกษา

1. เพื่อพัฒนาวัสดุนาโนที่สังเคราะห์จากสารสกัดธรรมชาติ
2. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุนาโนที่ได้จากสารสกัดธรรมชาติในด้านการกำจัดหรือยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์

3. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดสารมลพิษของวัสดุซิลเวอร์นาโนที่ได้จากสารสกัดธรรมชาติ

ขอบเขตของงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้แบ่งงานออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

ส่วนที่ 1 การสังเคราะห์วัสดุนาโนซิลเวอร์และศึกษาคุณสมบัติทางวัสดุของอนุภาค

ส่วนที่ 2 การศึกษาความสามารถกำจัดหรือยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของวัสดุนาโนซิลเวอร์

ส่วนที่ 3 การศึกษาความสามารถของวัสดุนาโนซิลเวอร์ในการบำบัดสารมลพิษด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalytic)

ขอบเขตของงานวิจัย

กิจกรรม/ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินงาน (เดือน)			
	1-3	4-6	7-9	10-12
แต่งตั้งอาจารย์ที่ปรึกษา	↔			
สืบค้นข้อมูลและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	↔			
ดำเนินการวิจัยขั้นที่ 1	↔			
สอบโครงร่างวิทยานิพนธ์	↔			
ดำเนินการวิจัยขั้นที่ 2-3	↔			
วิจารณ์ผลและสรุปผลการศึกษา	↔			
เขียนรูปเล่มวิทยานิพนธ์	↔			
สอบวิทยานิพนธ์	↔			
ส่งรายงานฉบับสมบูรณ์	↔			
ยื่นเรื่องขอจบการศึกษา	↔			

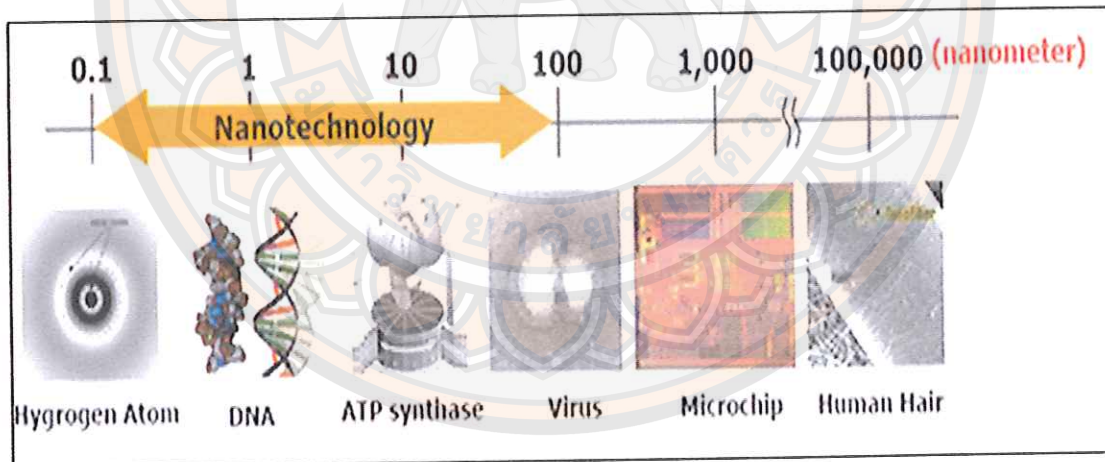
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นาโนเทคโนโลยีเป็นศาสตร์ของการสร้างให้วัสดุอยู่ในระดับนาโนเมตรคือช่วง 1 ถึง 100 นาโนเมตร ด้วยการใช้อองค์ความรู้ทั้ง วิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีเข้ามาผสมผสานกันในช่วงแรกของยุคนาโนเทคโนโลยีคือการพยายามทำให้วัสดุต่างๆ มีขนาดเล็กลงสู่ขนาดระดับนาโนรวมทั้งการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับสิ่งต่างๆ ที่มีขนาดเล็กในระดับนาโน (พวงรัตน์ ขจิตวิธานกุล, 2557, หน้า 1-5)

นาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการสร้าง การสังเคราะห์วัสดุหรืออุปกรณ์ รวมทั้งการจัดการกับวัสดุในระดับนาโนเมตร ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางเคมี กายภาพและชีวภาพของวัสดุนั้นๆ



ภาพ 1 แสดงขนาดเปรียบเทียบขนาดของวัสดุนาโนกับสิ่งอื่นที่ขนาดนาโนเมตร

ที่มา: <http://www.scworksthailand.com>

ชนิดของวัสดุนาโน

วัสดุนาโนมาจาก 2 แหล่งกำเนิด ได้แก่

1. วัสดุนาโนที่เกิดขึ้นเองและมีอยู่ในธรรมชาติ (natural nanomaterials) คือโครงสร้างของวัสดุหรือสารต่างๆ ที่มีขนาดอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 นาโนเมตร ซึ่งเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นหรือมีอยู่แล้วในธรรมชาติ เช่น โครงสร้างของเอมไซม์ ดีเอ็นเอ โปรตีน ไวรัส เป็นต้น

2. วัสดุนาโนที่มนุษย์สร้างขึ้นหรือวัสดุนาโนสังเคราะห์ คือโครงสร้างของวัสดุที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นให้มีขนาดอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 นาโนเมตร อย่างจงใจ (engineered nanomaterials) โดยการใช้กระบวนการต่างๆ ในการจัดการเพื่อต้องการใช้ประโยชน์จากวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้นในด้านต่างๆ ต่อไป (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2558 มาทำความรู้จักกับนาโนเทคโนโลยี. โดยวัสดุนาโนที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นแบ่งเป็น 5 ประเภท ดังนี้

2.1 วัสดุนาโนคาร์บอน (carbon based nanomaterials) เป็นโครงสร้างของวัสดุคาร์บอน เช่น คาร์บอนแบล็ค (carbon black), กราฟีน (graphene), ฟูลเลอร์รีน (fullerene), ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube)

2.2 โลหะ (metal) มักเป็นกลุ่มของโลหะมีตระกูล เช่น ซิลเวอร์ (Ag: Silver), โกลด์ (Au: Gold), แพททินัม (Pt: Paltinium) และ พาลาเดียม (Pd: Padium)

2.3 โลหะออกไซด์ (metal oxide) โครงสร้างเป็นออกไซด์ของโลหะรวมถึงวัสดุอัลลอย (alloy) และเซรามิก (ceramics) เช่น นาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2), นาโนซิลิกา (SiO_2), นาโนไอรอน (Fe), นาโนซิงค์-ออกไซด์ (ZnO)

2.4 ควอนตัมดอต (quantum dots) เป็นสารประเภทกึ่งตัวนำ เช่น แคดเมียมซีลีไนด์ (CdSe) และ แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe)

2.5 นาโนพอลิเมอร์ (polymeric nanoparticles) โครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ที่มีขนาดระดับนาโน เช่น เดนไดรเมอร์ (dendrimers), ไคโตซาน (chitosan) และวัสดุไฮโดรคาร์บอน (พวงรัตน์ ขจิตวิชานุกุล, 2557, หน้า 6-7)

ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของวัสดุนาโน

วัสดุนาโนสามารถแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีคุณสมบัติเป็นคอลลอยด์และกลุ่มที่ไม่ใช่คอลลอยด์ โดยกลุ่มที่เป็นคอลลอยด์จะมีความเสถียรและสามารถอยู่ในรูปของ อนุภาค ไมเซลล์ หรือ สารประกอบอิมัลชันแต่กลุ่มที่ไม่เป็นคอลลอยด์จะสามารถรวมตัวกันและตกผลึกได้

วัสดุนาโนมีรูปร่างภายนอกได้หลายรูปแบบ ได้แก่

1. ทรงกลม (spherical) เป็นลักษณะของวัสดุที่ไม่อยู่ในรูปผลึกและมีขนาดเล็กมาก

2. ของแข็งทรงเรขาคณิต (geometric solid) เป็นลักษณะของสารที่มีรูปผลึกและเป็นรูปร่างเรขาคณิต เช่น ลูกบาศก์ (cubic), ทรงเหลี่ยมสี่ด้าน (tetrahedral)

3. แท่งหรือเส้นลวด (rod, wire)

4. โครงข่าย (dendritic) เป็นโครงข่ายลวดนาโนซึ่งต่อกัน อาจขนาดใหญ่กว่า 100 nm

ลักษณะที่แตกต่างของวัสดุนาโนจะเป็นตัวแบ่งการนำมาใช้งานของวัสดุนาโนแต่ละชนิด ดังนั้นก่อนการนำวัสดุแต่ละชนิดมาใช้งานควรศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุนั้นๆ เพื่อประโยชน์การใช้งานที่มากที่สุด โดยคุณสมบัติที่ควรศึกษาก่อนใช้งานมีดังนี้

ลักษณะทางเคมี ได้แก่ ขนาด รูปร่าง พื้นที่ผิวจำเพาะ การรวมกัน (agglomeration) การกระจายตัว การละลายน้ำ โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว

ลักษณะทางเคมี ได้แก่ เฟสของโครงสร้าง การชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำของวัสดุ เคมีพื้นผิวของวัสดุ โครงสร้างโมเลกุล

พื้นที่ผิวของวัสดุนาโน

ลักษณะพื้นผิวเป็นคุณสมบัติสำคัญของวัสดุนาโนทุกชนิดเพราะเป็นจุดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของวัสดุนั้น พื้นผิว คือการมีสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ซึ่งเมื่อวัสดุมีพื้นที่ผิวสูงคือวัสดุนั้นมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาสูงนั่นเองซึ่งคุณสมบัตินี้เองที่ทำให้วัสดุนาโนแตกต่างจากวัสดุทั่วไป

กระบวนการในการบำบัดสารมลพิษด้วยวัสดุนาโน

1. กระบวนการดูดซับ (adsorption)

การดูดซับเป็นกระบวนการสะสมตัวของสารมลพิษหรือสารที่ถูกดูดซับ (adsorbate) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ (adsorbent) กระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ทั้ง 3 สถานะคือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ในกระบวนการบำบัดสารมลพิษในน้ำนั้น การไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ของสารที่ถูกดูดซับเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการดูดซับ ตัวอย่างเช่น ถ้าสารมลพิษเป็นสารที่ไม่ชอบน้ำคือละลายน้ำได้น้อย สารนั้นก็จะถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับได้ดี แต่หากว่าสารมลพิษนั้นชอบน้ำคือสามารถละลายน้ำได้ดีก็จะไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ และอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการดูดซับคือ แรงแวนเดอวาล์ (van der waals) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับหรือสารมลพิษกับพื้นผิวของตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง

1.1 กระบวนการดูดซับ

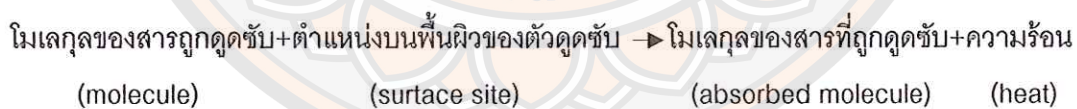
กระบวนการดูดซับของสารมลพิษบนพื้นผิวของตัวดูดซับหรือวัสดุดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

1.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption)

คือการดูดซับของสารมลพิษที่อยู่ในตัวทำละลาย เช่น น้ำ เป็นต้น ถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับที่เป็นของแข็ง เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดของสารมลพิษในน้ำกับสารดูดซับที่มีแรงดึงดูดมากกว่าสารมลพิษและตัวทำละลายส่งผลให้เกิดการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer) กระบวนการดูดซับทางกายภาพเป็นกระบวนการของการคายความร้อนและพลังงานซึ่งจะมีค่าประมาณ 20 กิโลจูลต่อโมลและปริมาณการดูดซับจะแปรผันกับอุณหภูมิ คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการดูดซับทางกายภาพจะลดลง

1.1.2 การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

คือการดูดซับที่เกี่ยวกับพันธะเคมีที่เกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของอิเล็กตรอนที่เกิดจากการสร้างระหว่างสารมลพิษและพื้นผิวของสารดูดซับที่เป็นของแข็ง พันธะโควาเลนต์ (covalent bonds) จะถูกสร้างขึ้นระหว่างอะตอมของสารมลพิษและอะตอมของสารดูดซับซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงของการดูดซับรวมทั้งพลังงานจากการดูดซับที่อยู่ในช่วง 200-400 กิโลจูลต่อโมลสูงกว่าการดูดซับทางกายภาพและลักษณะการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer) โดยที่การดูดซับสามารถเกิดได้ทุกอุณหภูมิแต่จะแตกต่างกันตามอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับโดยปฏิกิริยาการดูดซับของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับนั้นสามารถแสดงเป็นสมการได้ ดังนี้



1.2 ลักษณะการดูดซับ

ลักษณะการดูดซับที่มักเกิดขึ้นในกระบวนการบำบัดสารมลพิษในสิ่งแวดล้อมทางน้ำคือ การดูดซับระหว่างของแข็งและของเหลวซึ่งขั้นตอนการดูดซับประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

1.2.1 การเคลื่อนที่ด้วยการพา (bulk solution transport) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายหรือสารมลพิษไปที่ชั้นล้อมรอบ (boundary layer) ที่เป็นชั้นน้ำหรือชั้นฟิล์มของน้ำรอบพื้นผิวของตัวดูดซับที่เป็นของแข็งเกิดขึ้นจากการกวนผสมหรือความปั่นป่วนของน้ำที่มาจาก

การไหลของน้ำ ถ้าหากมีการกวนผสมที่ไม่ทั่วถึง ความเข้มข้นของสารมลพิษมีความเจือจางมาก หรือตัวดูดซับมีขนาดเล็กเกินไปจะส่งผลให้กระบวนการเคลื่อนที่ของสารมลพิษจากสารละลายไปที่ชั้นล้อมรอบของตัวดูดซับหรืออัตราการดูดซับถูกจำกัดทำให้การเคลื่อนที่ด้วยการพาเกิดขึ้นช้าที่สุด

1.2.2 การแพร่กระจายภายนอก (external diffusion) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายหรือสารมลพิษผ่านชั้นฟิล์มของน้ำรอบตัวดูดซับ เกิดขึ้นจากความเข้มข้นที่แตกต่างกันของสารมลพิษระหว่างชั้นล้อมรอบภายนอกและชั้นฟิล์มของน้ำจนทำให้เกิดการแพร่กระจายของโมเลกุล ถ้าหากกระบวนการนี้เกิดช้าที่สุดจะส่งผลให้เกิดการจำกัดประสิทธิภาพของการดูดซับ

1.2.3 การดูดซับ (adsorption) เป็นการทำปฏิกิริยาของโมเลกุลของสารมลพิษกับโมเลกุลบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง โดยการดูดซับสามารถเกิดได้ 2 แบบคือ การดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

1.3 การดูดซับของสารมลพิษบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

เคมีพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งนั้นเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการดูดซับของสารมลพิษบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นตอนของการถ่ายเทอิเล็กตรอนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยรีดอกซ์ (redox reaction) ซึ่งคือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation reduction) ตามมาจากการกำจัดมลพิษนั้นต้องทำให้มีการดูดซับทางเคมี (chemisorption) ของสารมลพิษบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อน โดยการดูดซับทางเคมีคือการสร้างพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลของสารมลพิษในตำแหน่งที่จะเกิดปฏิกิริยาบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาคะตะไลซิสคือ ความแข็งแรงของพันธะทางเคมีของการดูดซับระหว่างสารมลพิษและตัวเร่งปฏิกิริยา ถ้าสารมลพิษเกิดการดูดซับทางเคมีบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามากก็จะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาคะตะไลซิสมากในทางตรงกันข้ามหากสารมลพิษเกิดการดูดซับทางเคมีบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้น้อย อัตราการเกิดปฏิกิริยาคะตะไลซิสก็จะน้อยตามไปด้วย

2. กระบวนการรีดอกซ์พื้นฐาน (Redox Reaction)

เป็นปฏิกิริยาของการให้และรับอิเล็กตรอนระหว่างโมเลกุลส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะออกซิเดชัน (oxidation state) ของธาตุในสารที่ทำปฏิกิริยาโดยปฏิกิริยารีดอกซ์ประกอบด้วย 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) และปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) โดยรายละเอียดของแต่ละปฏิกิริยามีดังนี้

2.1 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นปฏิกิริยาที่ให้หรือเสียอิเล็กตรอนของโมเลกุลให้กับสารอื่น เรียกสารนี้ว่า "ตัวรีดิวซ์" และสารที่ให้อิเล็กตรอนกับสารอื่นจะมีสถานะออกซิเดชันเพิ่มขึ้น

2.2 ปฏิกริยารีดักชัน เป็นปฏิกริยาที่รับอิเล็กตรอนของโมเลกุลจากสารอื่น เรียกว่า "ตัวออกซิไดซ์" และสารที่รับอิเล็กตรอนจากสารอื่นนี้จะมีสถานะออกซิเดชันลดลง

2.3 ปฏิกริยารีดอกซ์สามารถใช้ในการบำบัดสารมลพิษได้ทั้งสารอินทรีย์ เช่น การบำบัดโลหะหนักด้วยการทำปฏิกริยารีดักชันเพื่อให้สถานะออกซิเดชันลดลงซึ่งจะส่งผลให้พิษของโลหะหนักลดลงตามไปด้วยและการบำบัดมลพิษที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น ไชยาไนต์ด้วยการทำปฏิกริยาออกซิเดชันที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปทางเคมีของไชยาไนต์และทำให้ลดความเป็นพิษลงได้

3. กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes: AOPs)

เป็นกระบวนการที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการบำบัดสารมลพิษทั้งสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ที่บำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพได้ยาก หลักการของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงคือการใช้อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (hydroxyl radical: HO[•]) ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ให้มีขนาดเล็กลงหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารอินทรีย์เพื่อให้ความเป็นพิษลดลงและไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม โดยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงจะใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) ร่วมกับสารเร่งปฏิกริยา เช่น แสงอัลตราไวโอเล็ต โอโซนหรือตัวเร่งปฏิกริยา (catalyst) ที่จะเร่งให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลซึ่งจะไปออกซิไดซ์สารอื่นๆต่อไป ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงกับงานต่างๆ เช่น ใช้กำจัดสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษในน้ำใต้ดิน ซึ่งใช้ในขั้นตอนการบำบัดขั้นต้น (pre-treatment) เช่น บำบัด ไชยาไนต์ ก่อนเข้าสู่กระบวนการบำบัดทางชีวภาพเนื่องจากไชยาไนต์มีความเป็นพิษและขัดขวางการทำงานของจุลินทรีย์ในกระบวนการทางชีวภาพ เป็นต้น

4. กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (photocatalysis)

ในช่วงระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาวิจัยในเรื่องกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นจำนวนมากเนื่องจากกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมีประโยชน์อย่างมากในการใช้งานด้านการบำบัดสารมลพิษทั้งทางน้ำและอากาศ โดยหลักการของกระบวนการนี้คือ การเติมตัวเร่งปฏิกริยา (catalyst) ลงในปฏิกริยานั้นๆร่วมกับการฉายแสงไปที่ตัวเร่งปฏิกริยาเพื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกริยาให้เร็วขึ้นโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสใช้หลักการพื้นฐานของกระบวนการคะตะไลซิสซึ่งมีอยู่ 2 ประเภท ได้แก่

4.1 การเร่งปฏิกริยาแบบโฮโมจีเนียสคะตะไลซิส (homogeneous catalysis) เป็นการทำให้ปฏิกริยาของสารที่อยู่ในสถานะเดียวกันทั้งหมด เช่น ของเหลวทำปฏิกริยากับของเหลว เป็นต้น

4.2 การเร่งปฏิกริยาแบบเฮเทอโรจีเนียสคะตะไลซิส (heterogeneous catalysis) เป็นการทำให้ปฏิกริยาของสารที่มีสถานะแตกต่างกัน คือสารที่ต้องการทำปฏิกริยามีสถานะต่าง

สถานะของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นเอง เช่น ของเหลวทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง เป็นต้น

เมื่อมีการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมด้วยในการทำปฏิกิริยาจะทำให้ปฏิกิริยาเป็นแบบเฮเทอโรจีเนียส โฟโตคะตะไลซิส ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่ใช้ในการบำบัดมลพิษ ได้แก่ ปฏิกิริยา UV/TiO_2 เป็นต้น ปฏิกิริยาเฮเทอโรจีเนียสคะตะไลซิส (heterogeneous catalysis) เป็นปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาและสารที่ต้องการให้เกิดปฏิกิริยาในที่นี้หมายถึงสารมลพิษนั้นมีสถานะต่างกัน เช่น ของแข็งทำปฏิกิริยากับของเหลว โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของแข็งและสารมลพิษอยู่ในสถานะของเหลว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ทั่วไปมีอยู่ 2 ประเภทได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดมีความแตกต่างกันที่การเกิดอิเล็กตรอนในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารมลพิษ โดยที่ปฏิกิริยาเฮเทอโรจีเนียสคะตะไลซิสสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ การดูดซับของสารมลพิษบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา, การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) บนพื้นผิวของตัวเร่งที่เป็นสารกึ่งตัวนำ และการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์บนพื้นผิวของตัวเร่งที่เป็นโลหะ

ซิลเวอร์นาโน

1. ลักษณะสมบัติซิลเวอร์นาโน (silver nanoparticles)

ซิลเวอร์นาโนมีลักษณะสมบัติเหมือนกับซิลเวอร์ทั่วไปคือเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำแต่สามารถแตกตัวให้อนุภาคซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) ซึ่งสามารถไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ได้ต่อไปซึ่งซิลเวอร์นาโนที่เป็นของแข็งมักจะไม่ละลายน้ำแต่จะเป็นสารแขวนลอยอยู่ในน้ำหรือเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนถ้าซิลเวอร์นาโนอยู่ในน้ำจะแตกตัวเป็นไอออนแล้วเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นที่ผิวซึ่งจะส่งผลให้ได้ไอออนของโลหะที่ถูกออกซิไดซ์ในรูปของซิลเวอร์ไอออน ซึ่งซิลเวอร์นาโนนั้นมีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตรจึงส่งผลให้คุณสมบัติด้านพื้นที่ผิวของอนุภาคมากขึ้นกว่าซิลเวอร์ทั่วไปหลายเท่า รวมทั้งคุณสมบัติด้านอื่นๆ เช่น ชนิดของประจุบนพื้นผิว ลักษณะทางควอนตัมแม้ว่าคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ดีกว่าซิลเวอร์ทั่วไป จึงทำให้ซิลเวอร์นาโนถูกนำไปใช้ในการทำผลิตภัณฑ์หลายชนิดเช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ พลาสติก การแพทย์ และสารเคลือบ เป็นต้น

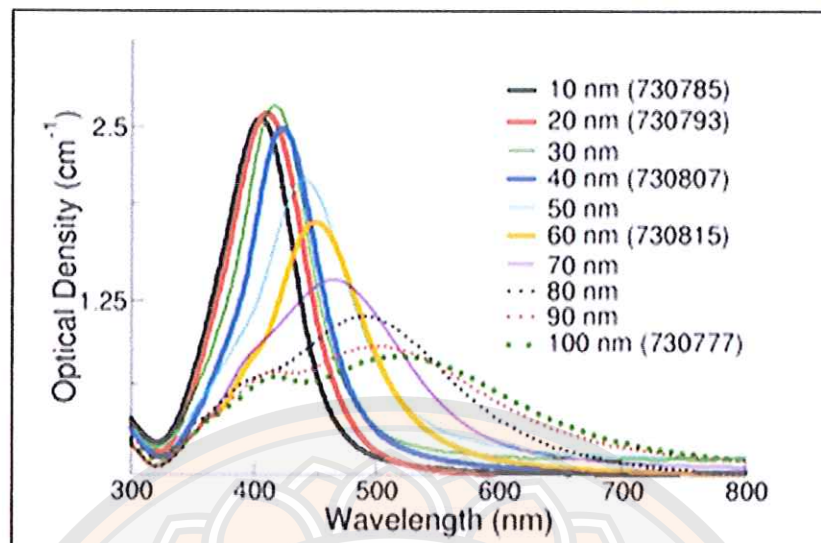
1.1 ลักษณะสมบัติเด่นของซิลเวอร์นาโน

1.1.1 คุณสมบัติในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์เป็นที่เข้าใจกันมาเป็นระยะเวลาอันยาวนานแล้วว่าโลหะเงินนั้นสามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้ซึ่งเมื่อโลหะเงินมาอยู่ในซิลเวอร์นาโนยิ่งส่งผลให้คุณสมบัติในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ของซิลเวอร์นั้นสูงมากขึ้นโดยซิลเวอร์นาโนสามารถฆ่า

เชื้อจุลินทรีย์ได้ทั้งจุลินทรีย์แกรมบวก (gram positive bacteria) และจุลินทรีย์แกรมลบ (gram negative bacteria) ตัวอย่างจุลินทรีย์แกรมบวกที่ซิลเวอร์สามารถกำจัดได้ เช่น *Staphylococcus* sp., *Bacillus* sp., *Enterococcus* sp., *Streptococcus* sp., *Listeria* sp. และ *Clostridium* sp. ตัวอย่างจุลินทรีย์แกรมลบที่ซิลเวอร์สามารถกำจัดได้ เช่น *Escherichia* sp., *Acinetobacter* sp., *Pseudomonas* sp., *Salmonella* sp. และ *Vibrio* sp. นอกจากนี้ซิลเวอร์นาโนยังสามารถฆ่าเชื้อราได้ เช่น *Aspergillus* sp., *Candida* sp. และ *Saccharomyces* sp. รวมทั้งยังมีการนำมาใช้ทดสอบการฆ่าเชื้อไวรัส เอชไอวี (HIV)

1.1.2 คุณสมบัติของ surface plasmon resonance นาโนซิลเวอร์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กมากส่งผลให้อนุภาคของซิลเวอร์นาโนมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงที่มากตกกระทบส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ทางแสงที่เรียกว่า "surface plasmon resonance" ทำให้อนุภาคซิลเวอร์นาโนดูดกลืนแสงสเปกตรัมที่มีช่วงความยาวคลื่นที่สั้นลงกว่าซิลเวอร์ปกติจึงมีการนำคุณสมบัติดังกล่าวไปใช้ในการผลิตเซนเซอร์สำหรับทางการแพทย์ โดยยังพบว่าขนาดของอนุภาคส่งผลต่อการดูดกลืนแสงของโดยยิ่งอนุภาคเล็กลงจะดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่สั้นลงด้วย ดังแสดงในภาพ 2

1.2 คุณสมบัติการเรืองแสง เป็นผลมาจากการที่อนุภาคมีขนาดประมาณ 30 ถึง 80 นาโนเมตรที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนช่วงคลื่นแสงของการปลดปล่อยความเข้มและความคงตัวของแสง (photo-stability) ซึ่งส่งผลต่อการเรืองแสงของวัสดุ จึงมีการนำคุณสมบัติดังกล่าวมาใช้งานด้านภูมิคุ้มกันวิทยา (Immunoassay) และการตรวจหาดีเอ็นเอหรืออาร์เอ็นเอ (DNA/RNA) (พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล. ฐานข้อมูลความปลอดภัยของวัสดุนาโน (nanosafety database), มหาวิทยาลัยนเรศวรและศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ)



ภาพ 2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของซิลเวอร์นาโนที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ

ที่มา: <http://www.sigmaaldrich.com>

2. การนำซิลเวอร์นาโนไปใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรม

2.1 ด้านอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยคุณสมบัติที่สามารถส่งผ่านไฟฟ้าและความร้อนได้ดีควบคู่ไปกับคุณสมบัติเชิงแสง จึงทำให้ถูกนำมาใช้งานมากในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ด้วยการนำมาใช้ทั้งส่วนที่เป็น nanoconnector และ nanoelectrode ในการออกแบบเครื่องมือขนาดเล็ก (Kim et.al., 2007) และนำมาใช้เป็น active waveguide ในเครื่องมือเชิงแสงหมึกพิมพ์ในแผงวงจรรวมถึง nanoelectronics เช่น single-electron transistors และ electrical connector เป็นต้น (พวงรัตน์ ขจิตวิทยานุกุล, 2557) ฐานข้อมูลความปลอดภัยของวัสดุนาโน (nanosafety database), มหาวิทยาลัยนครสวรรค์และศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ)

2.2 ด้านอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภคผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่มุ่งเน้นการใช้ประโยชน์ในด้านการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์หรือป้องกันการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ เช่น เครื่องกรองอากาศ สเปรย์ในอากาศ ถุงเท้า หมอน รองเท้า หน้ากาก สบู่ ผงซักฟอก ยาสีฟัน แปรงสีฟัน เครื่องซักผ้า เป็นต้น

2.3 ด้านอุตสาหกรรมทางการแพทย์มีการนำซิลเวอร์นาโนมาใช้ในอุตสาหกรรมทางการแพทย์ในหลายด้าน ได้แก่ การตรวจโรค การรักษา ระบบนำส่งยาและการเคลือบเครื่องมือหรืออุปกรณ์ทางการแพทย์หลายชนิด เช่น อุปกรณ์ในการผ่าตัด รวมทั้งผลิตภัณฑ์ทั่วไปที่ใช้ทาง

การแพทย์ เช่น ผ้าปิดแผล ผ้าหรือสิ่งทอทางการแพทย์ สายสวนปัสสาวะและวัสดุที่ต้องการให้ปลอดภัยจากเชื้อต่างๆ (พวงรัตน์ ขจิตวิทยานุกูล, 2557) ฐานข้อมูลความปลอดภัยของวัสดุนาโน (nanosafety database), มหาวิทยาลัยนครสวรรค์และศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ)

3. ความเป็นพิษของซิลเวอร์นาโนต่อระบบนิเวศน์ (ecotoxicity)

3.1 ความเป็นพิษที่มีต่อสัตว์น้ำ

Griffitt และคณะ (Griffitt et al., 2008) ได้ทดสอบความเป็นพิษแบบเฉียบพลันของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีต่อปลาหมากลาย (Zebrafish) *Danio rerio* และไรน้ำสองชนิดคือ *Daphnia pulex* และ *Ceriodaphnia dubia* ในช่วงระยะเวลาสั้นโดยเปรียบเทียบความเป็นพิษของสารซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) และอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีขนาด 20-30 นาโนเมตร โดยได้ค่าความเป็นพิษ LC_{50} ของอนุภาคซิลเวอร์นาโนเปรียบเทียบกับสารซิลเวอร์ไนเตรต ดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 แสดงค่าความเป็นพิษของอนุภาคซิลเวอร์นาโนเทียบกับสารซิลเวอร์ไนเตรต

ชนิดของสัตว์น้ำ	ค่าความเป็นพิษ LC_{50}	
	ซิลเวอร์นาโน	ซิลเวอร์ไนเตรต
<i>Danio rerio</i> ตัวเต็มวัย	7.07 mg/L	0.0222 mg/L
<i>Danio rerio</i> ตัวอ่อน	7.20 mg/L	> 10 mg/L
<i>Daphnia pulex</i>	0.04 mg/L	0.008 mg/L
<i>Ceriodaphnia dubia</i>	0.067 mg/L	0.16 mg/L

ที่มา: พวงรัตน์ ขจิตวิทยานุกูล, 2557

จากค่าความเป็นพิษดังกล่าวพบว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีความเป็นพิษน้อยกว่าซิลเวอร์ไนเตรตถึง 100-1000 เท่าเมื่อทดสอบกับสัตว์น้ำชนิดเดียวกันที่โตเต็มวัย ในขณะที่เมื่อทดสอบกับตัวอ่อนกลับพบว่าซิลเวอร์ไนเตรตมีความเป็นพิษน้อยกว่าหรือเท่ากับซิลเวอร์นาโนนอกจากนี้ยังมีการศึกษาความเป็นพิษของอนุภาคซิลเวอร์นาโนอื่นๆ ดังแสดงในตาราง 2

ตาราง 2 แสดงค่าความเป็นพิษของซิลเวอร์นาโนที่มีต่อสัตว์น้ำ

ชนิดของสัตว์น้ำ	ขนาดอนุภาค (nm)	รูปร่างของอนุภาค	ค่าความเป็นพิษ LC ₅₀	ระยะเวลาที่ได้รับ	อ้างอิง
Zebrafish embryo	20-30	กลม	10-20 ppm	72 ชม.	Yeo and Yoon (2009)
Zebrafish embryo	5-20	กลม	5-100 mg/L	72 ชม.	Asharani et al. (2008)
Zebrafish embryo	11.6 ± 3.5	กลม	0.19 nM	0-2 ชม.	Lee et al. (2007)
Zebrafish	10-20	กลม	0.4-4 ppm	2-36 วัน	Yeo and Pak (2008)
Zebrafish	26.6 ± 8.8	กลม	1000 mg/L	48 ชม.	Griffitt et al. (2009)
ปลากระพง	81	รูปไข่/หลายเหลี่ยม	63-300 µg/L	2 วัน	Bilberg et al. (2010)
ปลาเทราท์สีน้ำตาล	10-35	กลม	10-100 µg/L	10 วัน	Scown et al. (2010)

ที่มา: ดัดแปลงจาก J. Fabrega, et al.

3.2 ความเป็นพิษต่อสาหร่ายและพืช การทดสอบความเป็นพิษของซิลเวอร์นาโนในพืชและสาหร่ายแสดงค่าความเป็นพิษดังในตาราง 3

ตาราง 3 แสดงค่าความเป็นพิษของซิลเวอร์นาโนที่มีต่อสาหร่ายและพืช

ชนิดของพืชและสาหร่าย	ขนาดอนุภาค (nm)	รูปร่าง	ค่าความเป็นพิษ EC ₅₀	ระยะเวลาที่ได้รับ	อ้างอิง
Pseudokirchneriella Subcapitata	20-30	กลม	0.19 mg/L	96 ชม.	Griffitt, et al., (2009)
Chlamydomonas Reinhardtii	25 ± 13	กลม	829 nM	5 ชม.	Navarro, et al. (2008)

หากการวัดความเป็นพิษของซิลเวอร์นาโนโดยรวมถึงซิลเวอร์ไอออนนั้น ซิลเวอร์นาโนจะมีผลต่อการเจริญของพืชเนื่องจากลิแกนด์ไอออนของซิลเวอร์ไอออน เช่น cysteine เป็นต้น จะทำให้เกิดการขัดขวางการสังเคราะห์แสงของพืชจนทำให้พืชตายในที่สุด

4. การตกค้างของอนุภาคซิลเวอร์นาโนในสิ่งแวดล้อม

อนุภาคของซิลเวอร์นาโนนั้นสามารถที่จะแตกตัวเป็นซิลเวอร์ไอออนและมีคุณสมบัติเป็นคอลลอยด์ อนุภาคซิลเวอร์นาโนจึงสามารถดูดซับกับสารอื่นและสร้างพันธะจนทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อม เช่น ดิน ตะกอนดิน เป็นต้น (Pronk et al., 2009) อนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถรวมตัวกันเป็นก้อนได้ ซึ่งจะลดความเข้มข้นในการได้รับอนุภาคซิลเวอร์นาโนของสัตว์น้ำแต่จะส่งผลให้มีการตกค้างในสิ่งแวดล้อมสูงขึ้นรวมทั้งสารอินทรีย์ที่อยู่ในดินจะเป็นปัจจัยที่ส่งเสริมให้อนุภาคซิลเวอร์นาโนมีความคงตัวเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย (พวงรัตน์ ขจิตวิทยานุกุล, 2557) ฐานข้อมูลความปลอดภัยของวัสดุนาโน nanosafety database.

การกระจายตัวของอนุภาคนาโนนั้นก็ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว Kp, ชนิดของตัวกลางในสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ดังแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว Kp ของอนุภาคซิลเวอร์นาโน

ตัวกลางในสิ่งแวดล้อม	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว Kp (ลิตร/กิโลกรัม)
ดินน้ำ	2.6
ตะกอนดินน้ำ	3.6
สารแขวนลอยน้ำ	4.9

ที่มา: พวงรัตน์ ขจิตวิทยานุกุล, 2557

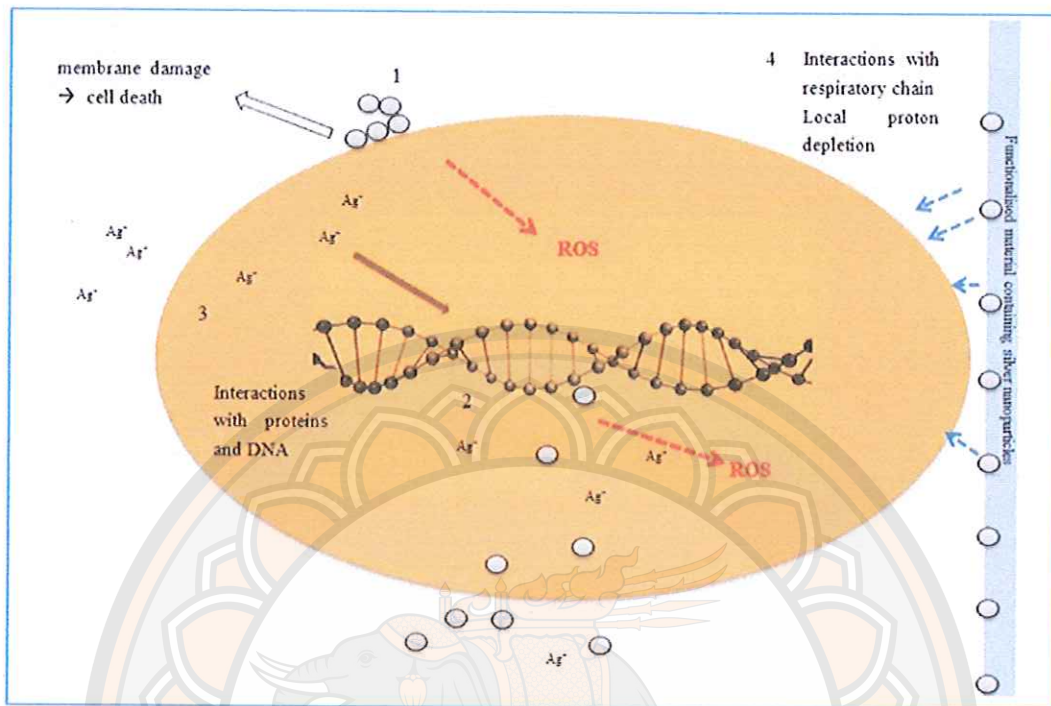
5. กลไกในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ของซิลเวอร์นาโน

ซิลเวอร์นาโนเป็นสารที่สามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้ทั้งแกรมบวกและแกรมลบดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ขนาดของซิลเวอร์นาโนที่เล็กมากจนมองไม่เห็นด้วยตาเปล่าส่งผลให้อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของวัสดุนั้นสูงมาก นอกจากนี้รูปร่างของซิลเวอร์นาโนที่แตกต่างกัน เช่น ทรงกลม แท่ง หรือแผ่นสามเหลี่ยม มีผลต่อการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่แตกต่างกันด้วยตัวอย่าง การฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยซิลเวอร์นาโนดังแสดงในตาราง 5 DeVasConCellos, et al., (2012) ได้ตั้งสมมติฐานของกลไกการกำจัดจุลินทรีย์ของซิลเวอร์นาโนไว้ 3 กลไก คือ

กลไกที่ 1 คือ ซิลเวอร์ไอออนจะเข้าไปในเซลล์และทำปฏิกิริยากับโมเลกุล DNA จนจุลินทรีย์ไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้ ผลกระทบของซิลเวอร์นาโนแบบนี้สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในจุลินทรีย์แกรมบวกและแกรมลบ

กลไกที่ 2 คือ อนุภาคซิลเวอร์นาโนทำปฏิกิริยากับสารประกอบที่มีซัลเฟอร์และฟอสฟอรัส โดยซัลเฟอร์จะมีสารประเภท thiol ซึ่งมีความสำคัญในการทำงานของโปรตีนและเอนไซม์ที่อยู่ภายในเซลล์จุลินทรีย์ โดยที่อนุภาคซิลเวอร์นาโนจะไปรวมตัวกับสารกลุ่ม thiol ในโปรตีนจนส่งผลให้การทำงานของโปรตีนและเอนไซม์ในการทำงานผิดปกติทำเซลล์จุลินทรีย์ตายในที่สุด นอกจากนี้ซิลเวอร์นาโนยังสามารถเข้าไปจับกับซัลเฟอร์ที่เป็นส่วนประกอบของเมมเบรนของเซลล์จุลินทรีย์จนทำให้เมมเบรนมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและทำให้เกิดการขัดขวางกระบวนการหายใจของเซลล์รวมด้วย

กลไกที่ 3 คือ อนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถเข้าสู่ภายในเซลล์จุลินทรีย์และทำปฏิกิริยากับไรโบโซม ส่งผลให้เกิดความผิดปกติในการทำงานของเอนไซม์และโปรตีนซึ่งจำเป็นต่อกระบวนการสร้าง ATP จนส่งผลให้จุลินทรีย์ไม่สามารถสร้าง ATP ได้จึงทำให้จุลินทรีย์ตาย



ภาพ 3 แสดงกลไกการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ของซิลเวอร์นาโน

ที่มา: Bogumila Reidy, et al., 2013

ตาราง 5 แสดงค่าความเป็นพิษของซิลเวอร์นาโนที่มีต่อจุลินทรีย์

ชนิดของจุลินทรีย์	ขนาดอนุภาค (nm)	รูปร่าง	ค่าความเป็นพิษ LC ₅₀	ระยะเวลาที่ได้รับ	อ้างอิง
<i>E.coli</i>	10	กลม	0.1-1 mg/L	24 ชม.	Hwang, et al. (2008)
<i>E.coli</i>	39	แท่ง,กลมและสามเหลี่ยม	0.1-10 µg/ml	0-26 ชม.	Pal, et al (2007)
Nitifying bacteria	15	กลม	1 mg/L	18 ชม.	Choi, et al. (2009)

ที่มา: พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล, 2557

เคมีสีเขียว (Green Chemistry)

"Green Chemistry" ถูกกล่าวขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1991 โดย Anastas โดยจุดประสงค์ของหลักการเคมีสีเขียวก็เพื่อที่จะพัฒนากระบวนการและเทคโนโลยีทางด้านเคมีให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม Paul Anastas และ John C. Warner ได้คิดหลักการ "เคมีสีเขียว" ไว้ 12 ข้อ ดังนี้

1. ป้องกันการเกิดของเสีย (prevent waste) โดยการออกแบบกระบวนการการสังเคราะห์ที่ไม่ก่อให้เกิดของเสียเพื่อจะได้ไม่ต้องมีการกำจัดในภายหลัง
2. ออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นพิษ (design safer chemicals and products) เพื่อให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยไม่มีพิษหรือมีน้อยที่สุด
3. ออกแบบกระบวนการสังเคราะห์ที่ไม่เป็นอันตราย (design less hazardous chemical syntheses) โดยการใช้ หรือ สังเคราะห์สารที่เป็นพิษน้อยหรือไม่เป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม
4. การใช้สารหรือวัตถุดิบที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ (use renewable feedstock) ซึ่งรวมถึงการใช้วัสดุเหลือใช้หรือทิ้งแล้วจากกระบวนการอื่นๆ
5. การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (utilize catalysts) ที่มีประสิทธิภาพ โดยหลีกเลี่ยงการใช้สารทำปฏิกิริยาในปริมาณมาก ปฏิกิริยาที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดของเสียในปริมาณที่น้อย และสามารถใช้ซ้ำได้หลายครั้งในปฏิกิริยาแบบเดียวกัน ในขณะที่ปฏิกิริยาแบบที่มีการใช้สารในปริมาณเท่ากับหรือมากกว่า ปริมาณหน่วยสัมพันธ (stoichiometric equivalent) ของสารตั้งต้น จะทำให้เกิดของเสียในปริมาณที่มากและใช้ได้เพียงครั้งเดียว
6. หลีกเลี่ยงการทำอนุพันธ์ที่ไม่จำเป็น (avoid chemical derivatives) เช่น การใส่หมู่ป้องกัน (protecting groups) ที่ต้องมีการเอาออกในภายหลังทั้งนี้ ขั้นตอนการใส่หมู่ป้องกันและการเอาออก อาจจะเป็นการสร้างของเสียขึ้นมาได้
7. ทำปฏิกิริยาที่ให้มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงสุด (maximize atom economy) โดยการออกแบบกระบวนการที่ให้ผลผลิต อันเกิดจากการรวมตัวของมวลสารตั้งต้นสูงสุด และมีการสูญเสียมวลสารที่ใช้น้อยที่สุด
8. ใช้ตัวทำละลายและกระบวนการที่ปลอดภัย (use safer solvents and reaction conditions) ตัวทำละลายที่ปลอดภัย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ได้แก่ น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์เหลว (supercritical CO₂) และตัวทำละลายมีประจุ (ionic liquids) ในขณะที่ตัวทำละลายอินทรีย์

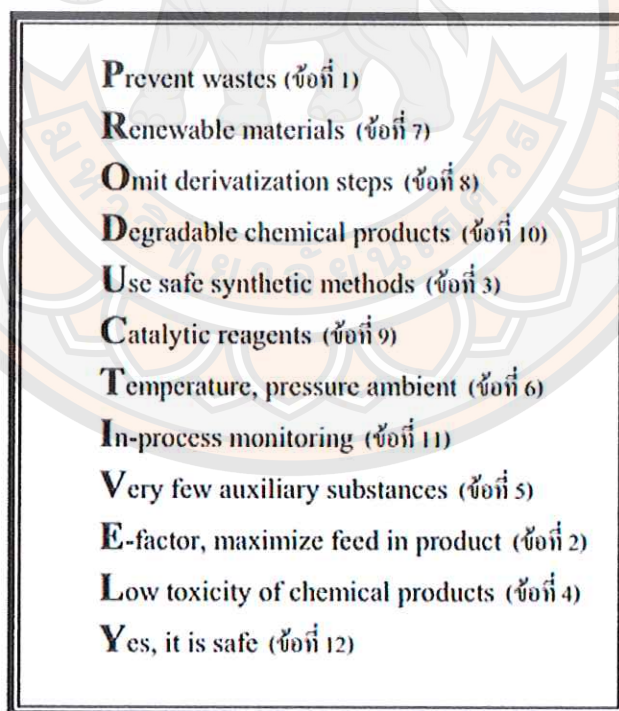
ส่วนมากไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การหลีกเลี่ยงใช้สภาวะที่รุนแรง เป็นพิษ มีกรดหรือด่างรุนแรง ถือเป็นอีกหนึ่งปัจจัยควรหลีกเลี่ยงในการทำ "เคมีสีเขียว"

9. เพิ่มประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน (increase energy efficiency) เช่นการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปกติ แต่ภายใต้สภาวะความดันสูง จะช่วยทำให้ปฏิกิริยามีประสิทธิภาพมากขึ้น

10. การออกแบบให้ผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วย่อยสลายได้ (design chemicals and products to degrade after use) ภายหลังจากใช้งานผลิตภัณฑ์ หรือสารที่ได้จากกิจกรรมนั้นๆ จะต้องมีการสลายตัวในรูปที่ไม่เป็นอันตรายหรือสะสมในสิ่งแวดล้อม

11. มีกระบวนการวิเคราะห์แบบทันทีเพื่อป้องกันการเกิดมลภาวะ (analyze in real time to prevent pollution) ของผลข้างเคียงจากปฏิกิริยา โดยการตรวจสอบและควบคุมตั้งแต่ขั้นตอนการผลิตจนเสร็จสิ้นเพื่อลดหรือกำจัดการเกิดผลข้างเคียง

12. ลดอัตราการเกิดอุบัติเหตุ (minimize the potential for accidents) โดยการออกแบบและควบคุมปฏิกิริยาไม่ว่าอยู่ในสภาวะของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส เพื่อป้องกันมิให้เกิดการระเบิด ลุกติดไฟหรือถูกปลดปล่อยเข้าสู่ธรรมชาติ (นพพร ทัศนาศา, 2009)



ภาพ 4 แผนภาพสรุปหลักการพื้นฐาน 12 ข้อ ของเคมีสีเขียว

การนำสารสกัดจากพืชและผลไม้เริ่มมีการนำมาใช้เป็นสารแทนสารเคมีในการสังเคราะห์วัสดุนาโนจึงทำให้ผู้วิจัยเริ่มให้ความสนใจในการนำสารสกัดจากธรรมชาติในการสังเคราะห์วัสดุนาโนเช่นกัน J. Kou และ R.S. Varma มีการนำบีทรูท (Beet root) มาใช้ในการสังเคราะห์วัสดุ plasmonic AgCl/Ag ซึ่งผลการศึกษาของ J. Kou และ R.S. Varma แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้สารสกัดจากธรรมชาติมาใช้งานในการผลิตวัสดุนาโนได้จริงรวมทั้งยังสามารถผลิตวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ดีอีกด้วยคือวัสดุจะมีขนาดเล็กลง การกระจายตัวดีขึ้นเนื่องจากสารสกัดจากบีทรูททำหน้าที่เป็น capping agents และยังทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ในกระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโนการนำสารสกัดจากธรรมชาติมาใช้งานในการสังเคราะห์วัสดุนาโนเป็นการลดปริมาณการใช้สารเคมี ลดการสร้างของเสียอันตราย ลดการใช้พลังงานในการสังเคราะห์สารต่างๆ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการเทคโนโลยีเคมีสีเขียวเป็นอย่างดี ในการวิจัยนี้จึงมีการนำสารสกัดจากธรรมชาติมาใช้ในการสังเคราะห์วัสดุนาโนโดยเลือกใช้พืชต่างๆ ดังนี้ เรดิช, บีทรูท, กาแฟ, ชา และกระเทียม โดยรายละเอียดและคุณสมบัติทางเคมีของพืชชนิดต่างๆ

ข้อมูลพืชที่นำมาใช้ในการทดลอง

1. เรดิช (radish)



ภาพ 5 แสดงลักษณะของเรดิช

ที่มา: <http://www.gourmetropolis.com>

ชื่อสามัญ: Radish

ชื่อวิทยาศาสตร์: *Raphanus sativus* L. var. *radicula*

ลักษณะทั่วไป: เรดิชเป็นพืชเมืองหนาวชนิดหนึ่ง จัดอยู่ในตระกูล กะหล่ำ ลักษณะกลม หรือรูปไข่ผิวสีแดง เนื้อในสีขาว มีกลิ่นฉุนเล็กน้อย

สารที่พบ: Beta-carotene, Vitamin C, Sulfur compound, phenolic compound, Caffeic acid, Ferulic acid, Hydrocinnamic acid, p-Hydroxybenzoic, Salicylic acid, Vanillic acid, Isothiocyanate, Dimethyl disulfide, Ascorbic acid, folic acid (Pérez Gutiérrez and Perez, 2004)

2. บีทรูท (beetroot)



ภาพ 6 แสดงลักษณะของบีทรูท

ชื่อสามัญ: Beetroot, Garden Beet, Common Beet

ชื่อวิทยาศาสตร์: *Beta vulgaris* L.

ลักษณะทั่วไป: มีรากหรือหัวที่สะสมอาหารอยู่ใต้ดิน มีลักษณะทรงกลมป้อม เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 4-5 เซนติเมตร เนื้อด้านในอวบน้ำ มีสีแดงเลือดหมู ม่วงแดง และเหลือง

สารที่พบ: Folic acid, Vitamin C, Beta-carotene, Vitamin B, Phenolic compound (betacyanin), Ferulic acid ester (<http://www.vegetweb.com>)

3. กระเทียม (Garlic)



ภาพ 7 แสดงลักษณะของกระเทียม

ที่มา: <http://www.barneyfrank.net/wp-content/uploads/2015/04/garlic-cloves.jpg>

ชื่อสามัญ: กระเทียม

ชื่อวิทยาศาสตร์: *Allium sativum*

ลักษณะทั่วไป: กระเทียมเป็นไม้ล้มลุกและใหญ่ยาว สูง 30-60 ซม. มีกลิ่นแรง มีหัวใต้ดินลักษณะกลมแบน เส้นผ่านศูนย์กลาง 2-4 เซนติเมตร มีแผ่นเยื่อสีขาวหรือสีม่วงอมชมพูหุ้มอยู่ 3-4 ชั้น ซึ่งลอกออกได้ แต่ละหัวมี 6-10 กลีบ

สารที่พบ: Allicin , Vitamin B6, Vitamin C, Pantothenic acid (B5), Thiamine (B1)
(<https://th.wikipedia.org>)

3. ชา (green tea)



ภาพ 8 แสดงลักษณะใบชาเขียว

ที่มา: <http://www.aroka108.com/wp-content/uploads/2014/10/0-Cha-05.jpg>

ชื่อสามัญ: ชาเขียว

ชื่อวิทยาศาสตร์: *Camellia sinensis*

ลักษณะทั่วไป: เป็นใบ ใบอ่อน ของต้นชาที่ถูกเก็บแล้วนำมาผ่านกระบวนการต่างๆ

สารที่พบ: polyphenols(epigallocatechin gallate (EGCG), epigallocatechin, picatechin gallate, epicatechin), Flavanols (kaempferol, quercetin, myricitin), and caffeine. (Lan-Sook Lee, et al., 2014)

4. กาแฟ (coffee)



ภาพ 9 แสดงลักษณะเมล็ดกาแฟ

ที่มา: http://www.dooads.net/storage/content_image/17/84990/84990_1_73026523.jpg

ชื่อสามัญ: กาแฟ

ชื่อวิทยาศาสตร์: *Coffea arabica*, *Coffea canephora*

ลักษณะทั่วไป: ผลกาแฟมีลักษณะรียาวประมาณ 1.5 เซนติเมตร ผลกาแฟอ่อนจะมีสีเขียว เมื่อสุก สีของเมล็ดจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง และเมื่อนำไปผึ่งให้แห้ง สีของเมล็ดจะเปลี่ยนเป็นสีแดงเข้มและสีดำในที่สุด

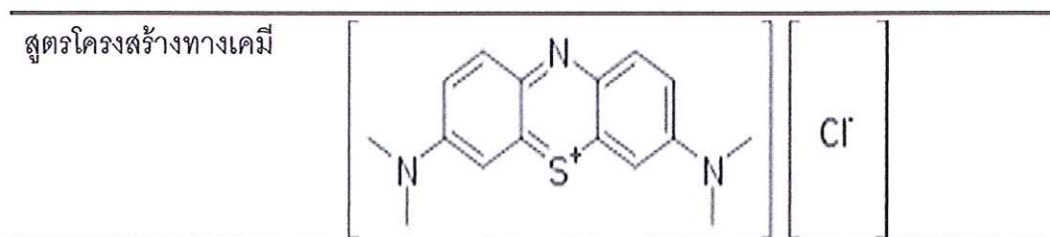
สารที่พบ: Caffeine, purine, Trigonelline, Melanoidins, Quinic acid, Lignin, Pectin, Chlorogenic acid, 5-p-cumaroilquinic acid, Dicafeoilquinic acid (Adriana Farah, 2012)

สารที่พบในพืชแต่ละชนิดเลือกมาใช้ในการศึกษามีจุดประสงค์เพื่อจะให้สารเหล่านี้ทำหน้าที่ตัวรีดิวซ์ (reducing agents) และ capping agents ให้กับอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นหากสารสกัดจากธรรมชาติสามารถทำหน้าที่เป็นไปตามที่ตั้งสมมติฐานจะช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุนาโนทั้ง ขนาด กระจายตัวซึ่งถ้ามีผลช่วยลดขนาดและเพิ่มการกระจายตัวได้จริงจะส่งผลให้วัสดุซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ขึ้นมีประสิทธิภาพดีขึ้นตามไปด้วย โดยสารกลุ่มที่เป็นตัวรีดิวซ์และ capping agents เช่น กรดฟอร์มิก (formic acid), สารประกอบซัลเฟอร์ (sulfur compound), วิตามินบีและวิตามินซีซึ่งสารดังกล่าวก็เป็นองค์ประกอบทางเคมีสารสกัดจากพืชที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ด้วย (Yuphada, B., 2015)

ตาราง 6 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารสีเมทิลีนบลู

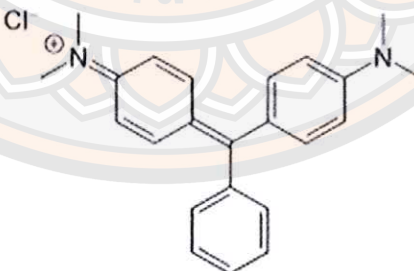
ชื่อสามัญ:	สีเมทิลีนบลู (Methylene Blue dye)
ชื่อทางเคมี:	3,7-bis(Dimethylamino)-phenothiazin-5-ium chloride
สูตรโมเลกุล	$C_{16}H_{18}ClN_3S$
น้ำหนักโมเลกุล	319.85 g/mol
ลักษณะทางกายภาพ	ผงสีน้ำเงิน
สภาพการละลาย	ละลายได้ในน้ำ
การนำไปใช้	สี

ตาราง 6 (ต่อ)



ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Methylene_blue

ตาราง 7 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารสีมาลาไคต์กรีน

ชื่อสามัญ:	สีมาลาไคต์กรีน (Malachite green)
ชื่อทางเคมี:	4-[[4-(dimethylamino)phenyl](phenyl)methylidene]-N,N-dimethylcyclohexa-2,5-dien-1-iminium chloride
สูตรโมเลกุล	C ₂₃ H ₂₅ ClN ₂ (chloride)
น้ำหนักโมเลกุล	364.911 g/mol (chloride)
ลักษณะทางกายภาพ	ของแข็งมีลักษณะสีเขียว
สภาพการละลาย	ละลายได้ในน้ำ
การนำไปใช้	สี
สูตรโครงสร้างทางเคมี	

ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Malachite_green

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยนี้ จะประกอบไปงานวิจัย 3 ส่วนซึ่งสามารถแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังนี้

1. การสังเคราะห์วัสดุนาโนซิลเวอร์นาโน
2. การศึกษาผลการกำจัดและยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของวัสดุนาโนซิลเวอร์นาโน
3. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารสีด้วยวัสดุนาโนซิลเวอร์คลอไรด์

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. การสังเคราะห์วัสดุนาโนซิลเวอร์นาโน (Ag nanoparticles) และวัสดุนาโนซิลเวอร์คลอไรด์ (plasmonic Ag/AgCl nanoparticles)

1.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุนาโนซิลเวอร์นาโนชนิด Ag-R ด้วยสารสกัดจากหัวเรดิช (Jiahui Kou and Rajender S. Varma, 2012, pp.10283-10290)

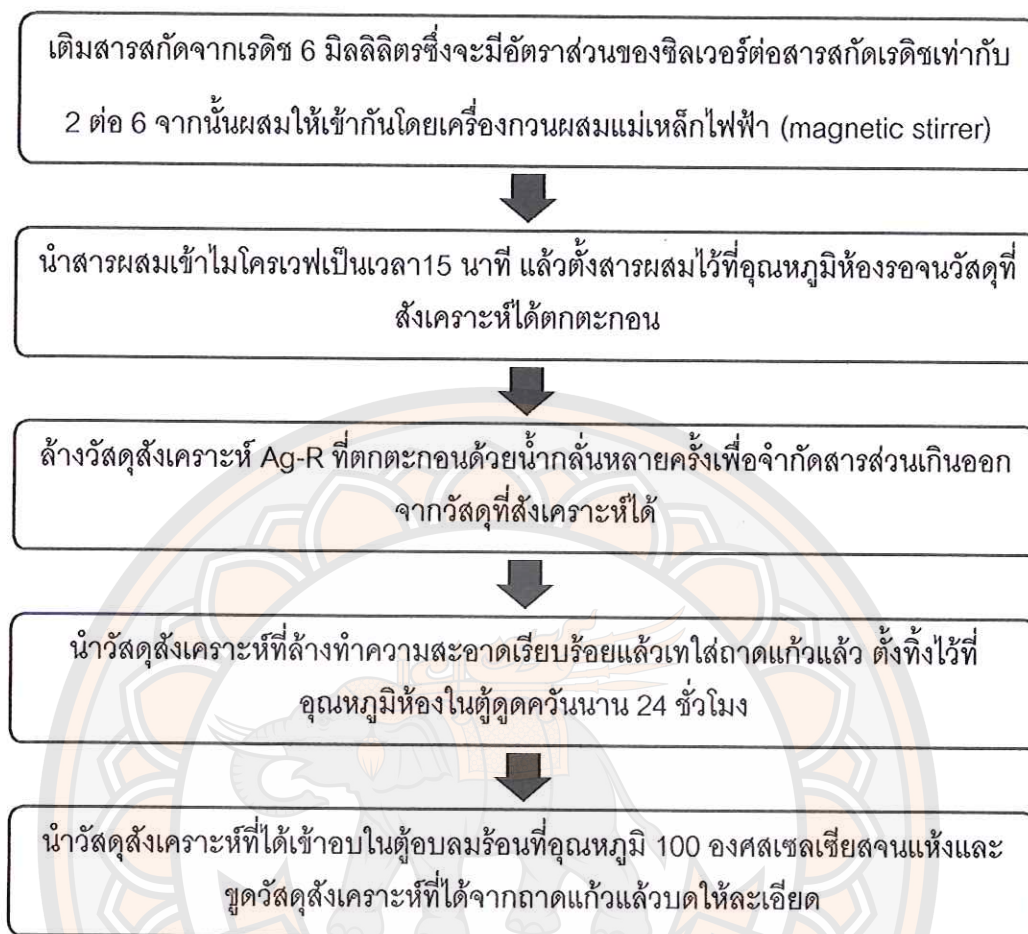
ขั้นตอนที่ 1 เตรียมสารสกัดจากหัวเรดิช โดยการชั่งหัวเรดิช 50 กรัมนำไปใส่ในเครื่องปั่นจากนั้นเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร บินส่วนผสมเป็นเวลา 10 นาทีปั่นซ้ำอีก 2-3 ครั้ง เพื่อให้เป็นเนื้อละเอียดหลังจากนั้นนำมากรองด้วยกระดาษกรอง (whatman No.41) จะได้สารสกัดเรดิช

ขั้นตอนที่ 2. การสังเคราะห์ Ag-R ดังแสดงในภาพ 10

เตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ให้ได้ความเข้มข้นเท่ากับ 0.3 มิลลิโมล โดยชั่ง AgNO_3 0.2548 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร

ดูดสารละลาย AgNO_3 มา 2 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง

ภาพ 10 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุนาโนซิลเวอร์นาโนชนิด Ag-R

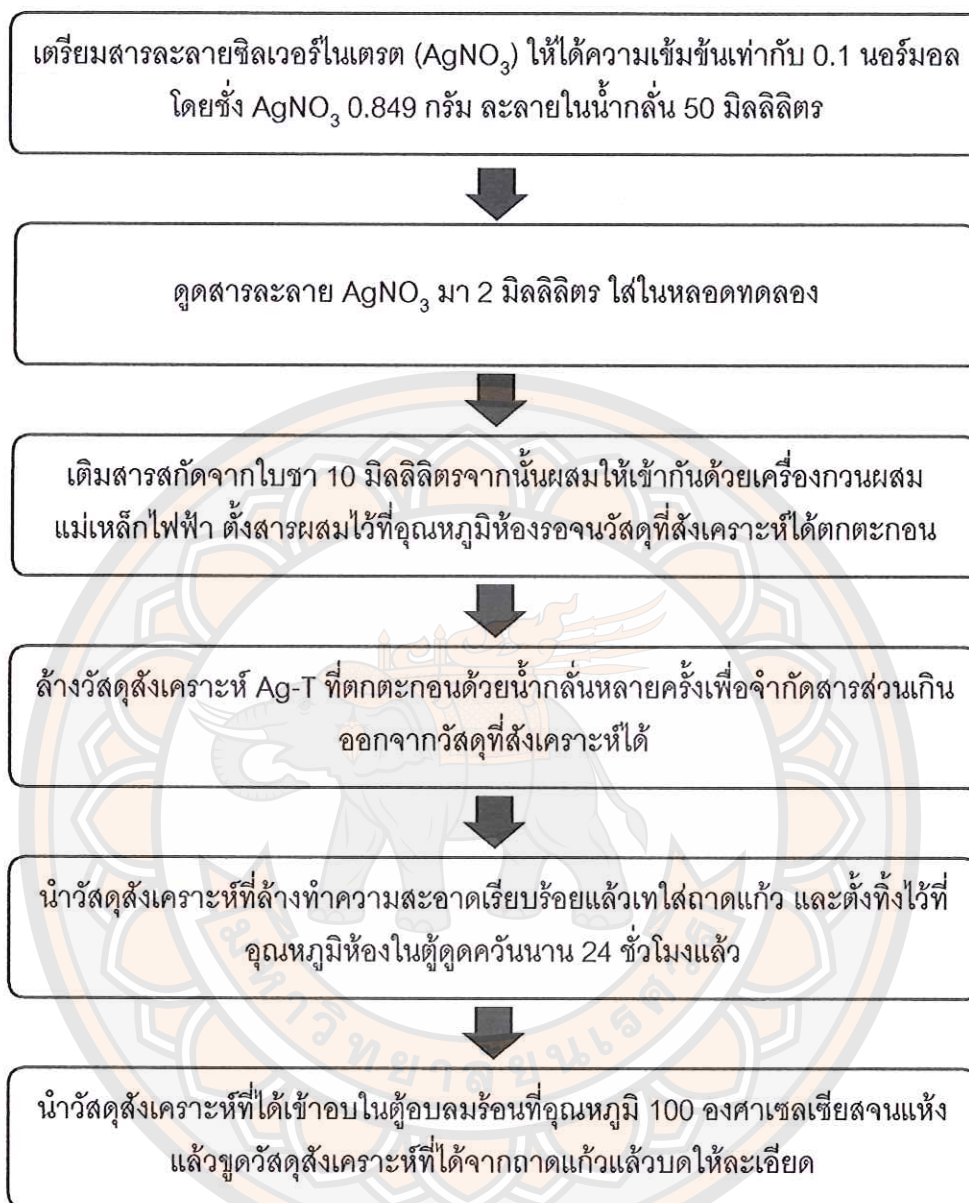


ภาพ 10 (ต่อ)

1.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag-T ด้วยสารสกัดจากใบชา (Mallikarjuna N. Nadagouda and Rajender S. Varma, 2008, pp.859-862)

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมสารสกัดจากใบชาโดยชั่งใบชา 1 กรัม นำไปต้มด้วยน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร จนเดือดจากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนเย็นนำสารสกัดที่ได้มากรองด้วยกระดาษกรอง whatman No.41 จะได้สารสกัดจากใบชา

ขั้นตอนที่ 2 การสังเคราะห์ Ag-T ดังแสดงในภาพ 11

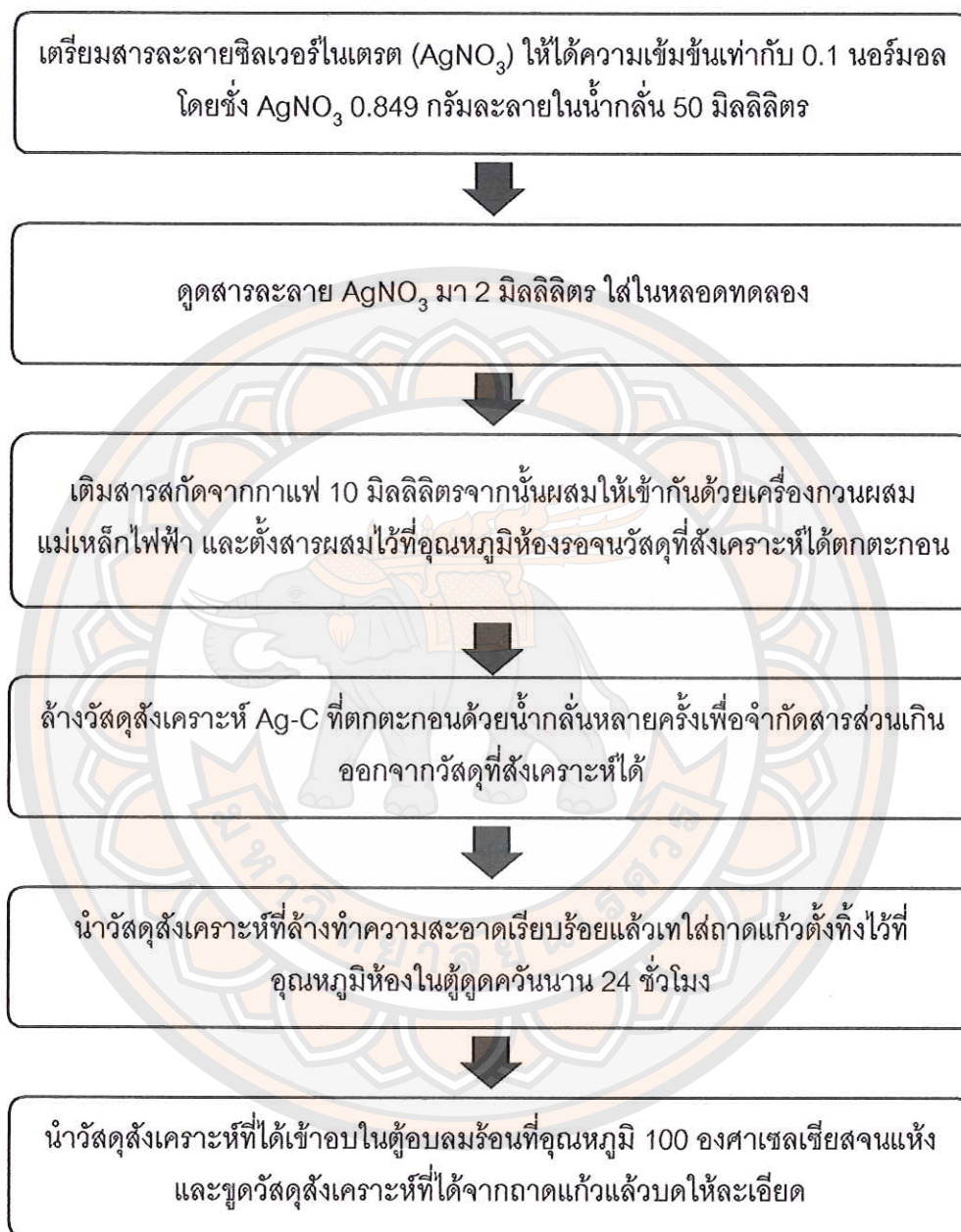


ภาพ 11 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ Ag-T

1.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag -C ด้วยสารสกัดจากกาแฟ (Mallikarjuna N. Nadagouda and Rajender S. Varma, 2008, pp.859–862)

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมสารสกัดจากกาแฟโดยชั่งผงกาแฟบด 0.4 กรัมนำไปต้มด้วยน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตรจนเดือด จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนเย็นนำสารสกัดที่ได้มากรองด้วยกระดาษกรอง whatman No.41จะได้สารสกัดจากกาแฟ

ขั้นตอนที่ 2 การสังเคราะห์ Ag-C ดังแสดงในภาพ 12

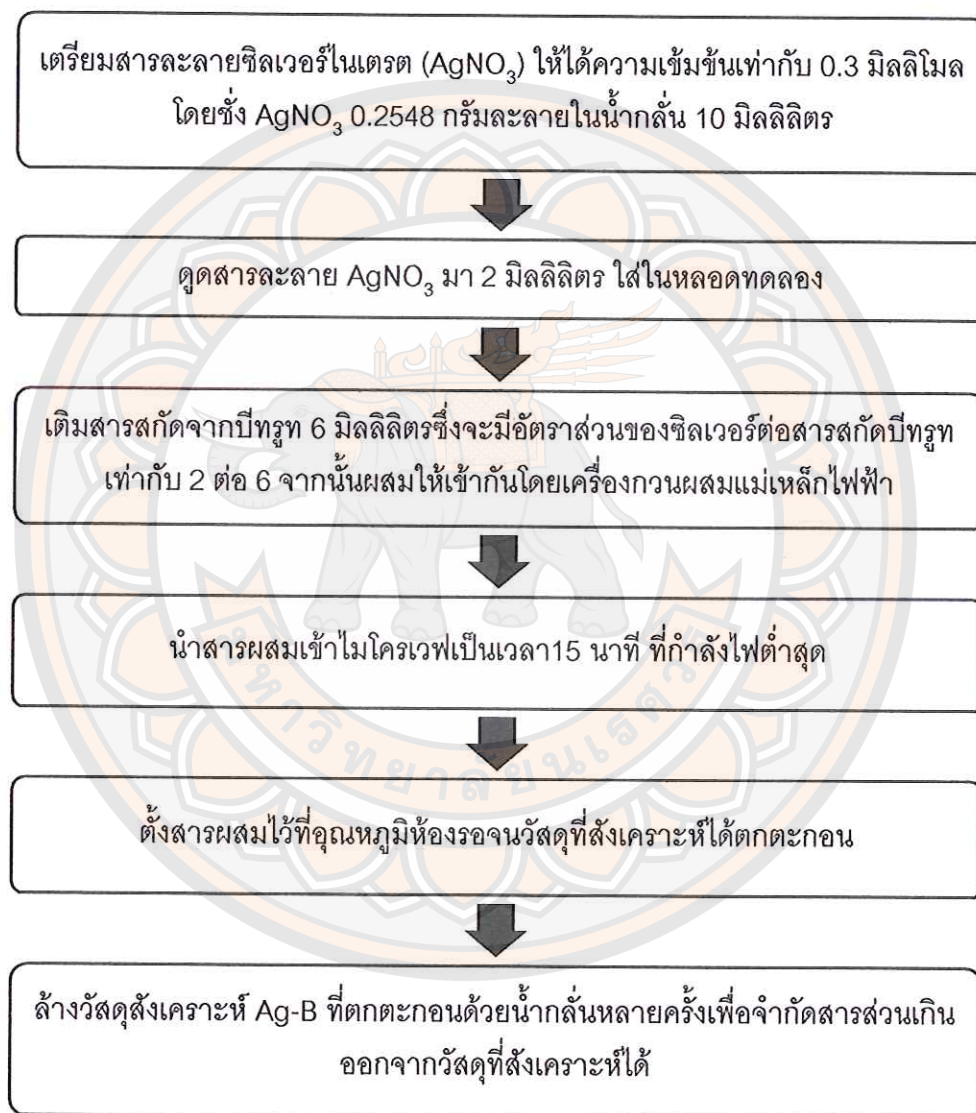


ภาพ 12 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ Ag-C

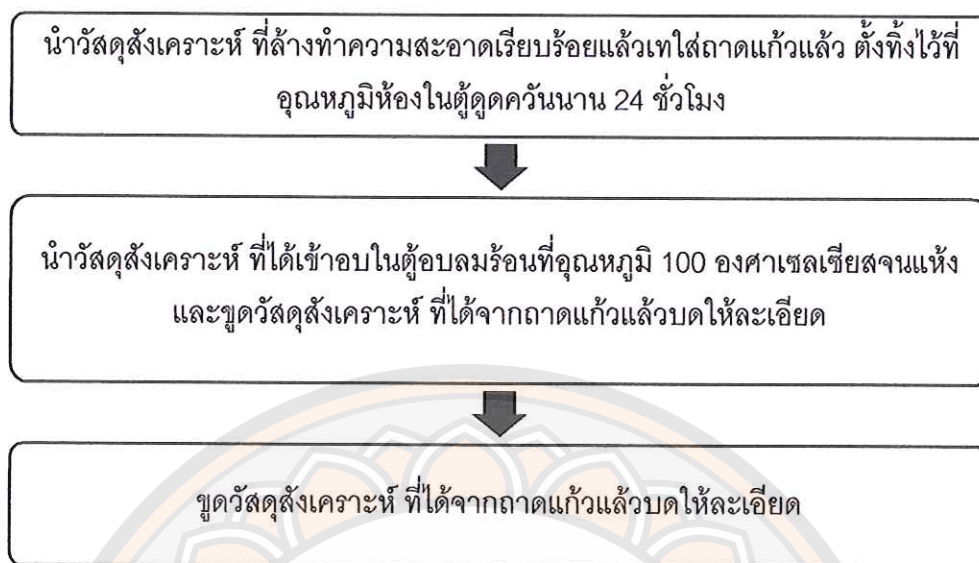
1.4 ขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag-B ด้วยสารสกัดจากหับปีทูท (Jiahui Kou and Rajender S. Varma, 2012, pp.10283–10290)

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมสารสกัดจากหิวปีทรุท โดยการชั่งหิวปีทรุท 50 กรัมนำไปใส่ในเครื่องปั่นจากนั้นเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร บั่นส่วนผสมเป็นเวลา 10 นาทีปั่นซ้ำอีก 2-3 ครั้ง เพื่อให้เป็นเนื้อละเอียดหลังจากนั้นนำมากรองด้วยกระดาษกรอง (whatman No.41) จะได้สารสกัดปีทรุท

ขั้นตอนที่ 2 การสังเคราะห์ Ag-B ดังแสดงในภาพ 13



ภาพ 13 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ Ag-B

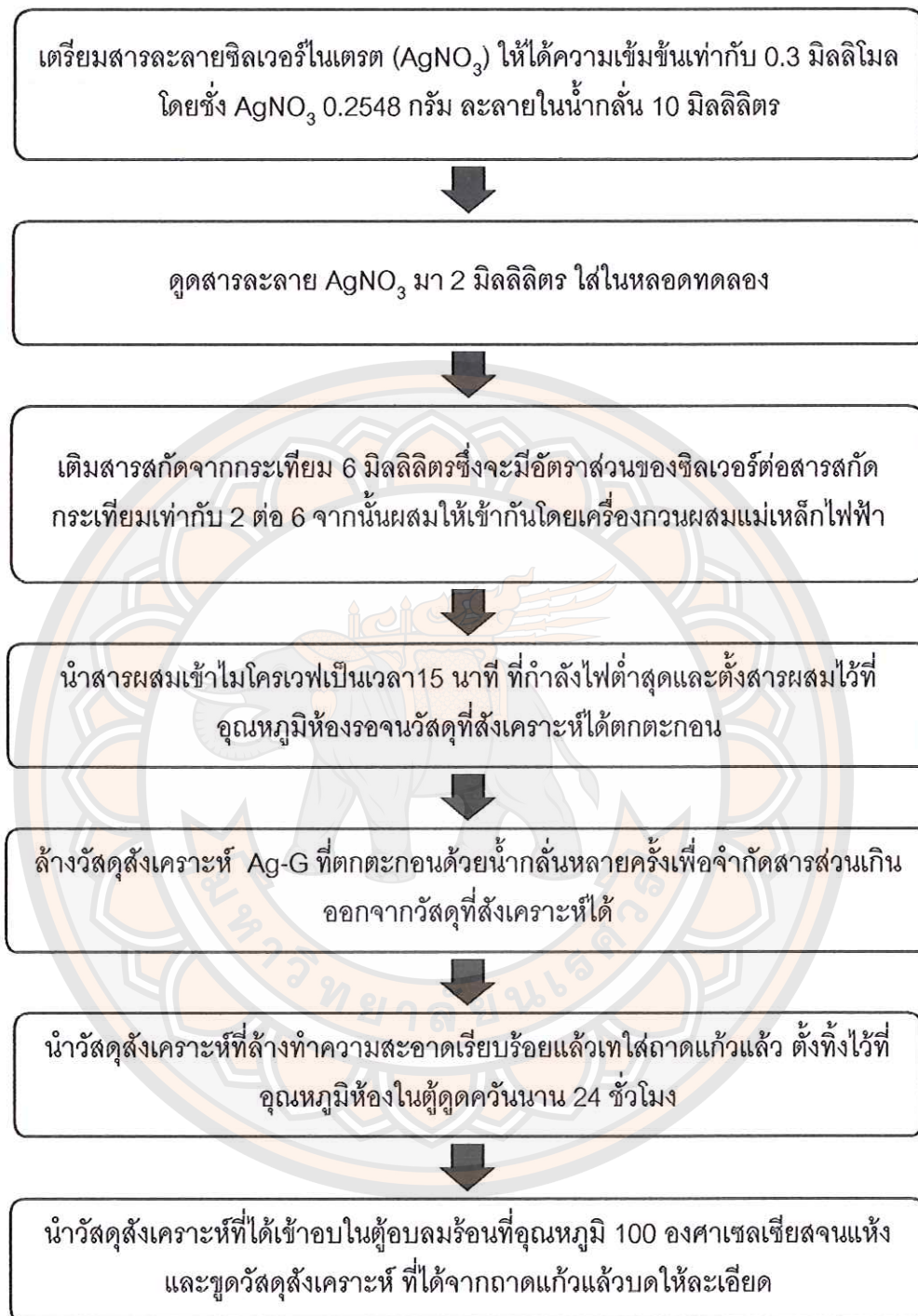


ภาพ 13 (ต่อ)

1.5 ขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag-G ด้วยสารสกัดจากกระเทียม (Jiahui Kou and Rajender S. Varma, 2012, pp.10283–10290)

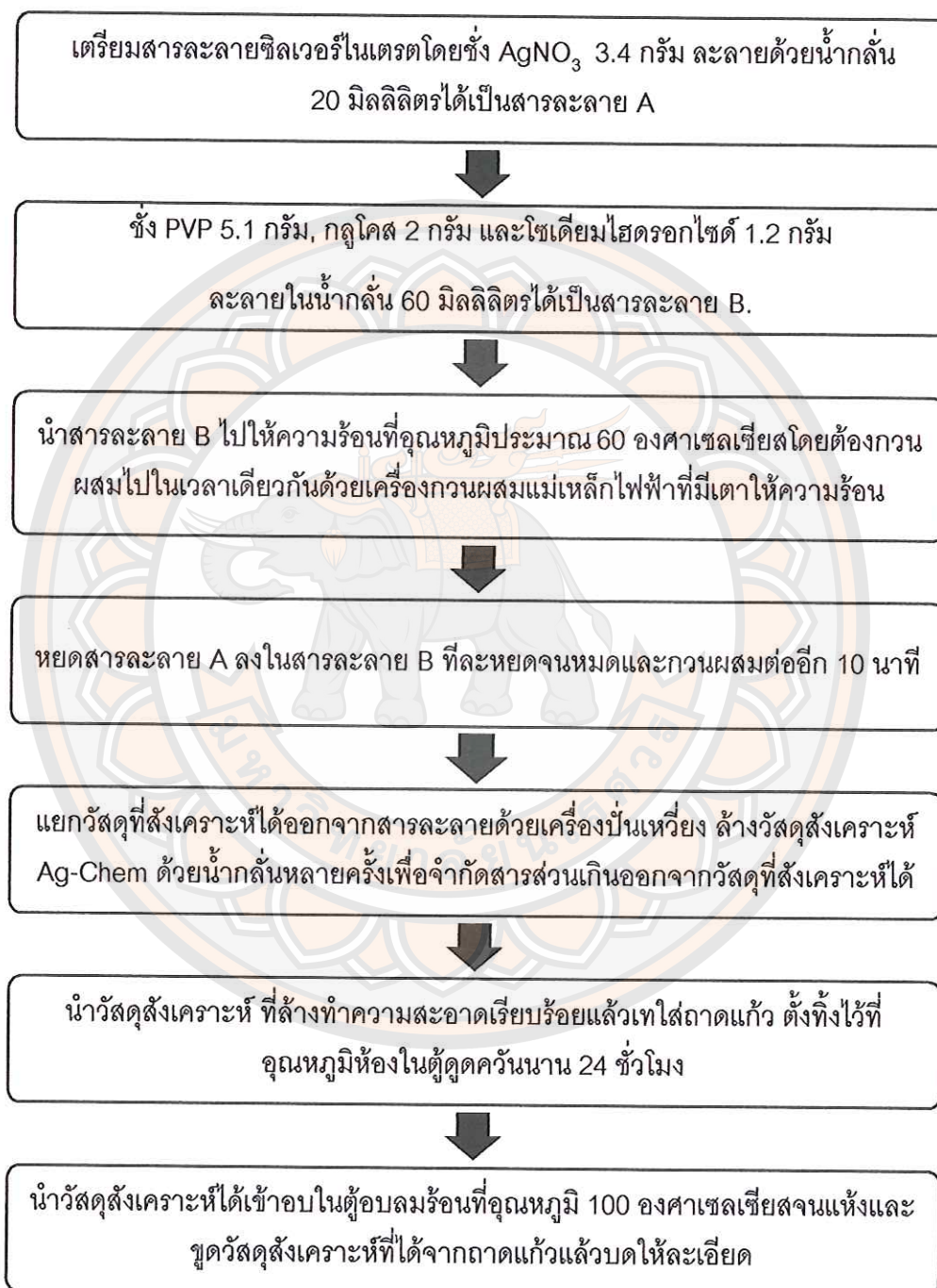
ขั้นตอนที่ 1 เตรียมสารสกัดจากกระเทียม โดยการชั่งกระเทียม 50 กรัมนำไปใส่ในเครื่องปั่นจากนั้นเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร บั่นส่วนผสมเป็นเวลา 10 นาที บั่นซ้ำอีก 2-3 ครั้ง เพื่อให้เป็นเนื้อละเอียดหลังจากนั้นนำมากรองด้วยกระดาษกรอง (whatman No.41) จะได้สารสกัดกระเทียม

ขั้นตอนที่ 2 การสังเคราะห์ Ag-G ดังแสดงในภาพ 14



ภาพ 14 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ Ag-G

1.6 ขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุกึ่งตัวนำนาโนชนิด Ag-Chemical ด้วยวิธี chemical reduction method. (H. Wang, et al., 2005, pp.111–115) ดังแสดงในภาพ 15

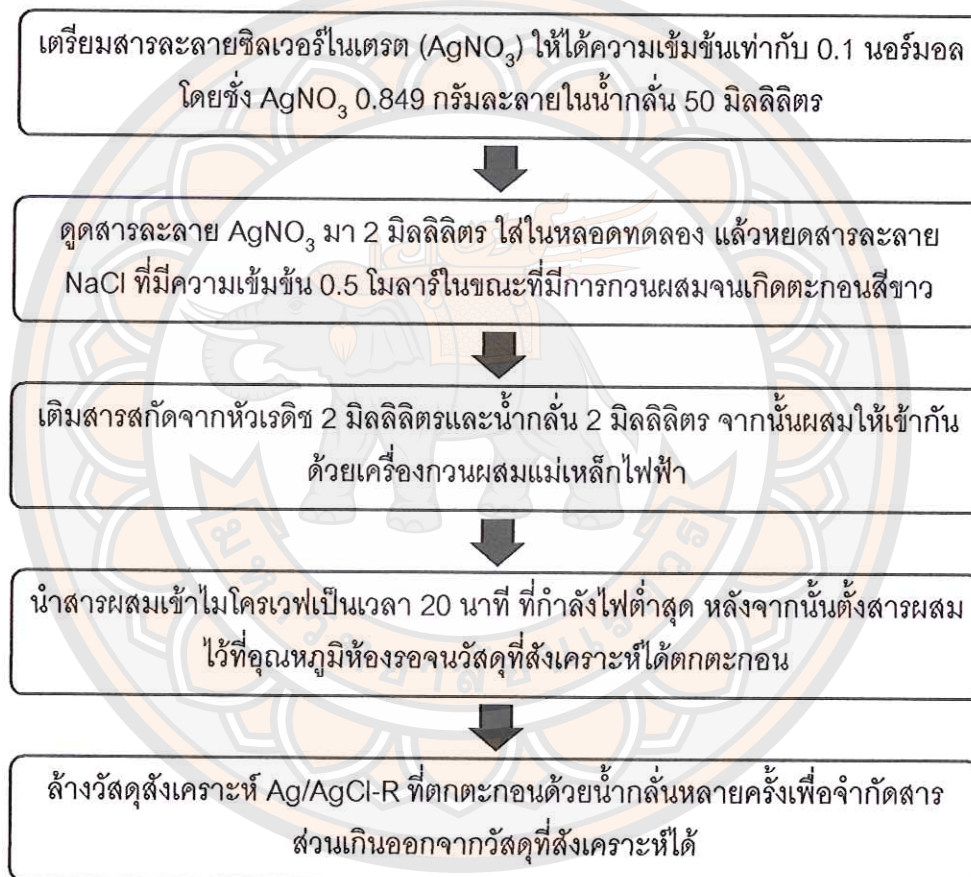


ภาพ 15 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ Ag-Chemical

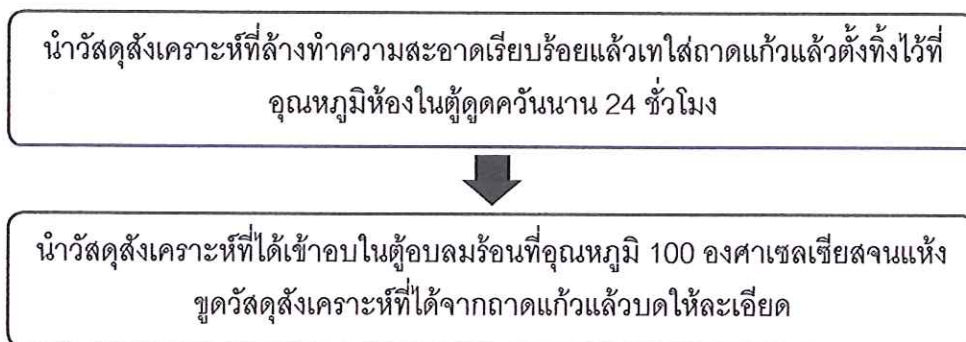
1.7 ขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl-R ด้วยสารสกัดจากหัวเรดิช (Jiahui Kou and Rajender S. Varma, 2012, pp.2435 – 2441)

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมสารสกัดจากหัวเรดิช โดยการขังหัวเรดิช 50 กรัมนำไปใส่ในเครื่องปั่นจากนั้นเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร บั่นส่วนผสมเป็นเวลา 10 นาทีปั่นซ้ำอีก 2-3 ครั้ง เพื่อให้เป็นเนื้อละเอียดหลังจากนั้นนำมากรองด้วยกระดาษกรอง (whatman No.41) จะได้สารสกัดเรดิช

ขั้นตอนที่ 2 การสังเคราะห์ Ag/AgCl-R ดังแสดงในภาพ 16



ภาพ 16 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ Ag/AgCl-R

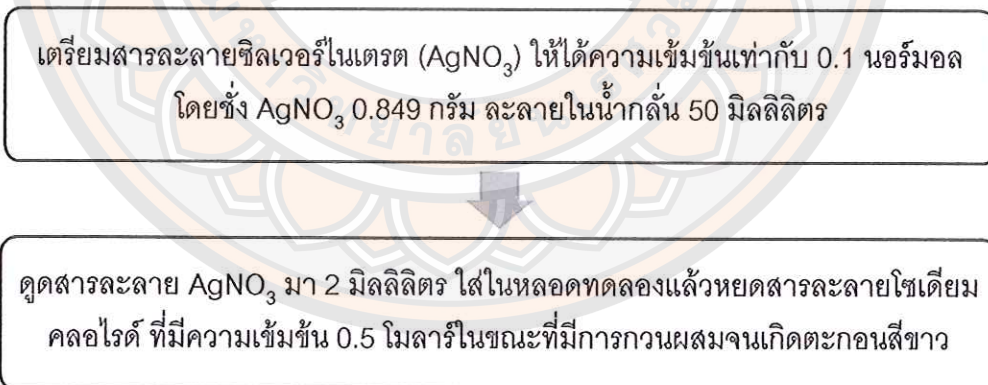


ภาพ 16 (ต่อ)

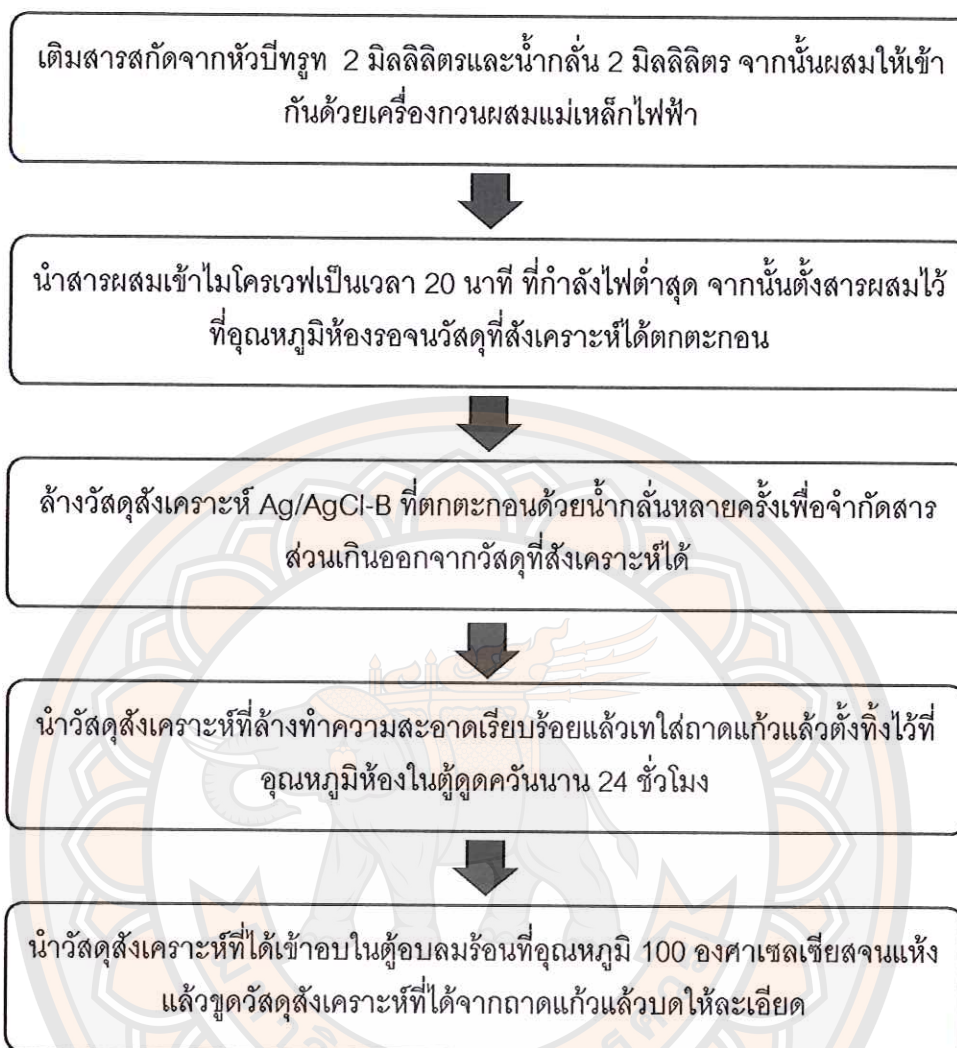
1.8 ขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl-B ด้วยสารสกัดจากหัวปีทรุท (Jiahui Kou and Rajender S. Varma, 2012, pp.2435 – 2441)

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมสารสกัดจากหัวปีทรุท โดยการชั่งหัวปีทรุท 50 กรัมนำไปใส่ในเครื่องปั่นจากนั้นเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร บดส่วนผสมเป็นเวลา 10 นาทีปั่นซ้ำอีก 2-3 ครั้ง เพื่อให้เป็นเนื้อละเอียดหลังจากนั้นนำมากรองด้วยกระดาษกรอง (whatman No.41) จะได้สารสกัดปีทรุท

ขั้นตอนที่ 2 การสังเคราะห์ Ag/AgCl-B ดังแสดงในภาพ 17



ภาพ 17 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ Ag/AgCl-B



ภาพ 17 (ต่อ)

1.9 ขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl-G ด้วยสารสกัดจากหัวกระเทียม (Jiahui Kou and Rajender S. Varma, 2012, pp.2435 – 2441)

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมสารสกัดจากกระเทียม โดยการชั่งกระเทียม 50 กรัมนำไปใส่ในเครื่องปั่น จากนั้นเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ปั่นส่วนผสมเป็นเวลา 10 นาที ปั่นซ้ำอีก 2-3 ครั้ง เพื่อให้เป็นเนื้อละเอียด หลังจากนั้นนำมากรองด้วยกระดาษกรอง (whatman No.41) จะได้สารสกัดกระเทียม

ขั้นตอนที่ 2 การสังเคราะห์ Ag/AgCl-G ดังแสดงในภาพ 18



ภาพ 18 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ Ag/AgCl-G

1.10 ขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl-C ด้วยสารสกัดจาก
กาแฟ (Jiahui Kou and Rajender S. Varma, 2012, pp.2435 – 2441)

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมสารสกัดจากกาแฟโดยชั่งผงกาแฟบด 0.4 กรัมนำไปต้ม
ด้วยน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตรจนเดือด จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนเย็นนำสารสกัดที่ได้มากรอง
ด้วยกระดาษกรอง whatman No.41 จะได้สารสกัดจากกาแฟ

ขั้นตอนที่ 2 การสังเคราะห์ Ag/AgCl-C ดังแสดงในภาพ 19



ภาพ 19 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ Ag/AgCl-C

2. การศึกษาลักษณะและคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโน

2.1 การศึกษาสารประกอบและโครงสร้างผลึกของวัสดุซิลเวอร์นาโนด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer)

ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ การศึกษาถึงสารประกอบ โครงสร้างผลึกของวัสดุนิยมใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ทำโดยการยิงรังสีเอ็กซ์ที่ทราบความยาวคลื่นให้ไปกระทบกับวัสดุทดสอบซึ่งจะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่ถูกยิงออกไปที่มุมแตกต่างกันซึ่งการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของและโครงสร้างของวัสดุทดสอบซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีรูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่แตกต่างกันทำให้สามารถนำมาหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ได้ รวมทั้งข้อมูลที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุ ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดผลึก ความสมบูรณ์ของผลึกได้อีกด้วย



ภาพ 20 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer)

ที่มา: <http://www.rigaku.com>

2.2 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของวัสดุซิลเวอร์นาโนด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy หรือ SEM)

การศึกษาลักษณะของวัสดุนาโนนั้นนิยมใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดเพื่อศึกษาพื้นฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิว (morphology) ของวัสดุนาโน ซึ่งมีหลักการทำงานคือ แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจะสร้างอิเล็กตรอนขึ้นมาแล้วส่งไปที่เลนส์รวบรวมรังสีเพื่อทำให้เกิดเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้เหมาะสมกับภาพที่ต้องการถ่ายได้ จากนั้นปรับลำอิเล็กตรอนด้วยเลนส์ใกล้วัตถุเพื่อให้ได้โฟกัสที่เหมาะสมลงไปที่พื้นผิวของตัวอย่างที่ต้องการศึกษา เมื่อลำอิเล็กตรอนส่องกราดไปที่พื้นผิวตัวอย่างจะส่งผลให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) โดยเครื่องมือจะตรวจวัดและบันทึกอิเล็กตรอนที่ออกมาจากพื้นผิวตัวอย่าง และแปลงข้อมูลไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์จากนั้นสร้างเป็นภาพบนหน้าจอแสดงผลซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะเป็นภาพ 3 มิติที่จะใช้ในการศึกษาพื้นฐานและรายละเอียดของวัสดุนาโนที่ทำการทดสอบ (<http://www.nano.kmitl.ac.th>)



ภาพ 21 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(Scanning Electron Microscopy: SEM)

ที่มา: <http://www.nuance.northwestern.edu>

วิธีการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ
ส่องกราด

1. เตรียม isopropanol 2-5 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดใส่ตัวอย่างสีขาว
2. เติมวัสดุนาโนที่ต้องการทำการศึกษาลงในสารละลาย isopropanol ปริมาณเล็กน้อย
3. นำไปใส่เครื่อง ultrasonic Bath (sonicator) เพื่อให้สารได้มีการแตกตัวในสารละลายเป็นเวลา 30 นาที
4. นำตัวอย่างหยดลงบนแผ่นกระจกปิดสไลด์ (cover slide) ที่เตรียมให้มีขนาดกว้างคูณยาวประมาณ 0.3 เซนติเมตร
5. ตากตัวอย่างไว้ภายใต้โคมไฟนาน 24 ชั่วโมง
6. นำตัวอย่างที่เตรียมแล้วติดบน pin stub ที่ใช้สำหรับเตรียมตัวอย่างของกล้องชนิด SEM
7. นำตัวอย่างไปเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นนานอย่างน้อย 24 ชั่วโมงก่อนการวัดตัวอย่างด้วยกล้องชนิด SEM

2.3 การศึกษาลักษณะโครงสร้างและขนาดผลึกของวัสดุซิลเวอร์นาโนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy: TEM)

การศึกษาลักษณะของวัสดุนาโนนั้นนิยมใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านเพื่อศึกษาเฟสโครงสร้างหรือขนาดผลึกของวัสดุนาโน ซึ่งมีหลักการทำงานคือ แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจะสร้างอิเล็กตรอนขึ้นมาแล้วส่งไปที่เลนส์รวบรวมรังสี เพื่อทำให้เกิดเป็นลำอิเล็กตรอนซึ่งสามารถปรับให้เหมาะสมกับภาพที่ต้องการถ่ายได้ โดยลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนผ่านตัวอย่างและทำให้เกิดการกระเจิงของอนุภาคขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนทะลุผ่านตัวอย่างไป จากนั้นจะใช้เลนส์ใกล้วัตถุเป็นตัวปรับโฟกัสของภาพที่เกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างมาและสามารถจะขยายด้วยเลนส์ทอดภาพไปที่จอร์รับภาพ และปรับโฟกัสของลำอิเล็กตรอนให้พอดีที่จะทำให้เกิดปรากฏบนฉากเรืองแสง (fluorescence screen) ที่เป็นฉากรับภาพทำให้เกิดภาพ 2 มิติ (<http://www.atom.rmutphysics.com>)

วิธีการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

1. เตรียม isopropanol 1 มิลลิลิตรใส่ลงใน eppendorf tube

วิธีการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ

ส่องผ่าน

1. เตรียม isopropanol 1 มิลลิลิตรใส่ลงใน eppendorf tube
2. เติมวัสดุงานที่ต้องการทำการศึกษาลงในสารละลาย isopropanol ปริมาณ

เล็กน้อย

3. นำไปใส่เครื่อง ultrasonic Bath (sonicator) เพื่อให้สารได้มีการแตกตัวในสารละลายเป็นเวลา 30 นาที

4. นำตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 1,000 รอบต่อนาที

5. นำตัวอย่างหยดลงบน grid ที่ใช้สำหรับเตรียมตัวอย่าง TEM โดยเฉพาะ ประมาณ 1-2 หยด

6. ตากตัวอย่างไว้ภายใต้คอมไฟแนน 24 ชั่วโมง

7. นำตัวอย่างไปเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นนานอย่างน้อย 24 ชั่วโมงก่อนการวัดตัวอย่างด้วยกล้องชนิด TEM



ภาพ 22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน
(Transmission Electron Microscopy หรือ TEM)

ที่มา: <http://www.udel.edu>

2.4 การศึกษาค่าศักย์ซีต้าของวัสดุซิลเวอร์นาโนด้วยเครื่องวิเคราะห์ Malvern Zetasizer Nano series.

ในการวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้า คุณสมบัติการกระจายตัวในระดับคอลลอยด์ของอนุภาคของวัสดุนาโนนิยมวัดหาค่า ศักย์ซีต้า (Zeta potential) ซึ่งคือความแตกต่างของประจุไฟฟ้าระหว่างชั้นของไอออนที่อยู่รอบอนุภาคของวัสดุนาโน โดยค่าศักย์ซีต้าที่ได้จะเป็นค่าที่บอกแนวโน้มการรวมตัวหรือกระจายตัวของอนุภาคหากมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (<http://share.psu.ac.th>)



ภาพ 23 เครื่องวัดศักย์ซีต้า Malvern Zetasizer Nano series

ที่มา: <http://www.memil.umd.edu>

วิธีการเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้า

1. ผสมตัวอย่างวัสดุที่จะทดสอบกับน้ำกลั่นโดยใช้เครื่องกวนผสมแม่เหล็กไฟฟ้า
2. ปรับพีเอชของสารผสมไปที่ละพีเอชและเก็บตัวอย่างใหม่แต่ละพีเอชที่ปรับ

โดยเก็บตัวอย่างที่พีเอช 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9

3. นำตัวอย่างในแต่ละพีเอชไปปั่นให้ตกตะกอนด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 12,000 รอบต่อนาทีนาน 10 วินาที

4. ดูดแต่ส่วนใสด้านบน (supernatant) ใส่ในคิวเวต (cuvette) เฉพาะสำหรับวัดค่า zeta potential ด้วยเครื่อง Malvern Zetasizer Nano series

5. อ่านค่าและบันทึกค่าที่เครื่องมือแสดง

3. ศึกษาความสามารถในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ของวัสดุนาโนซิลเวอร์

3.1 ทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโนด้วยวิธี Agar disc diffusion method ด้วยเชื้อ *Escherichia coli* TISTR 780 และ *Staphylococcus aureus* TTSTR 1466

3.1.1 การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์ทดสอบ

เชื้อจุลินทรีย์ทดสอบที่เลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด LB agar ที่มีอายุประมาณ 18-24 ชั่วโมงมา 1-2 โคโลนี ใส่ในน้ำกลั่นปริมาณ 9 มิลลิลิตรที่ฆ่าเชื้อแล้วเพื่อเตรียมเชื้อทดสอบ ตั้งต้นให้มีปริมาณเชื้อประมาณ 3×10^8 cfu/ml โดยวัดด้วยเครื่อง uv-vis spectrophotometer เพื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 630 นาโนเมตรให้ได้ประมาณ 0.08-0.1

3.1.2 การเตรียมแผ่นทดสอบ (disc) ของวัสดุซิลเวอร์นาโนทดสอบ

1. เตรียมแผ่นทดสอบด้วยกระดาษกรองให้เป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5 เซนติเมตรจากนั้นนำไปฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำ (autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสนาน 15 นาที

2. เตรียมสารละลายของวัสดุซิลเวอร์นาโนทดสอบให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร โดยน้ำกลั่นที่ใช้เตรียมเป็นน้ำกลั่นที่ฆ่าเชื้อเรียบร้อยแล้ว

3. ดูดสารละลายของวัสดุซิลเวอร์นาโนทดสอบมา 20 ไมโครลิตรหยดลงบนแผ่นทดสอบที่เตรียมไว้แล้วรอให้แห้ง

3.1.3 วิธีการทดสอบ agar disc diffusion test

1. ใช้ก้านสวอป (cotton swab) จุ่มลงในหลอดทดลองที่มีเชื้อจุลินทรีย์ทดสอบปริมาณ 3×10^8 cfu/ml พอให้หมดจากนั้นสวอปเชื้อลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด LB agar plate ให้ทั่ว

2. นำแผ่นทดสอบของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิดต่างๆ วางลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อจากข้อ 1 โดยวางประมาณ 4-5 แผ่นต่อ 1 เพลทโดยวางให้มีระยะห่างที่เหมาะสม

3. นำอาหารเลี้ยงเชื้อที่วางแผ่นทดสอบเรียบร้อยแล้วไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสนาน 18-24 ชั่วโมงจึงอ่านผล

4. อ่านผลการทดสอบโดยการวัดโซนใส (clear zone) รอบแผ่นทดสอบของวัสดุซิลเวอร์นาโนทดสอบ บันทึกผลเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนใส

3.2 ทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโนด้วยวิธี Minimal Inhibition concentration (MIC) และ Minimal bactericidal concentration (MBC) ด้วยเชื้อจุลินทรีย์ Escherichia coli TISTR 780

3.2.1 การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์ทดสอบ

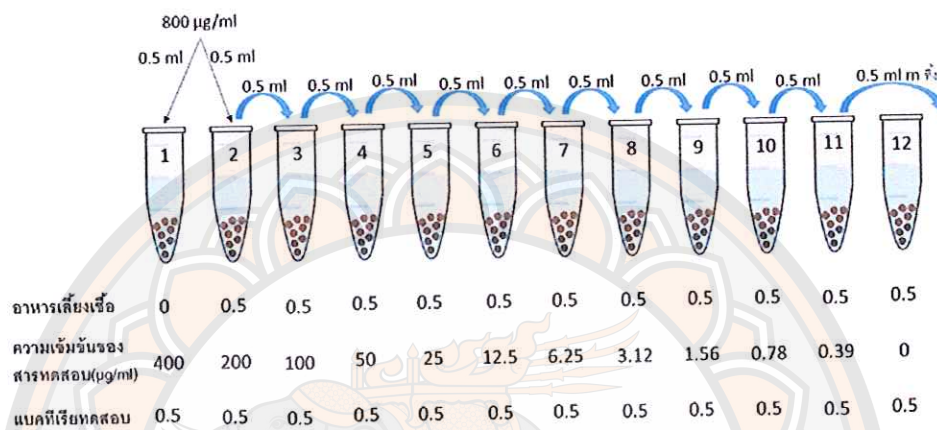
เชื้อจุลินทรีย์ทดสอบที่เลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด LB agar ที่มีอายุประมาณ 18-24 ชั่วโมง มา 1-2 โคโลนี มาใส่ในน้ำกลั่นปริมาณ 9 มิลลิลิตรที่ฆ่าเชื้อแล้ว เพื่อเตรียมเชื้อทดสอบตั้งต้นให้มีปริมาณเชื้อประมาณ 3×10^8 cfu/ml โดยวัดด้วยเครื่อง uv-vis spectrophotometer เพื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 630 นาโนเมตรให้ได้ประมาณ 0.08-0.1 จากนั้นเจือจางเชื้อตั้งต้นจาก 3×10^8 cfu/ml ด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วให้ได้เชื้อประมาณ 10^6 cfu/ml ด้วยเทคนิค 10 fold-dilution

3.2.2 การทดสอบ MIC

1. เตรียมวัสดุนาโนทดสอบ ให้ได้ความเข้มข้นเริ่มต้น 800 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (เพื่อให้ความเข้มข้นสุดท้ายเมื่ออยู่ในอาหารเลี้ยงเชื้อเท่ากับ 400 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)
2. เตรียมหลอด eppendorf ขนาด 1.5 มิลลิลิตรโดยนำไปฆ่าเชื้อก่อนการใช้งาน ซึ่งจะใช้ 12 หลอดต่อหนึ่งวัสดุนาโนทดสอบ เขียนระบุหมายเลขบนหลอดให้ชัดเจน
3. ใส่อาหารเลี้ยงเชื้อเหลวชนิด LB ใส่ลงในหลอดที่ 2 ถึง 12 หลอดละ 0.5 มิลลิลิตร
4. ใส่วัสดุนาโนทดสอบใส่ลงในหลอดที่ 1 และ 2 หลอดละ 0.5 มิลลิลิตร ซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นสุดท้ายของวัสดุทดสอบเท่ากับ 400 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน
5. ใส่น้ำผสมจากหลอดที่ 2 ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดที่ 3 ผสมให้เข้ากันเป็นไปตามการทำ 2 fold-dilution ทำไปจนถึงหลอดที่ 11 และดูดจากหลอดที่ 11 ทิ้งไป 0.5 มิลลิลิตร
6. ใส่เชื้อจุลินทรีย์ทดสอบที่เตรียมไว้ในส่วนที่ 1 หลอดละ 0.5 มิลลิลิตร ในทุกหลอด

7. ผสมเชื้อและวัสดุนาโนทดสอบให้เข้ากันจากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสนาน 18-24 ชั่วโมงจึงอ่านผล

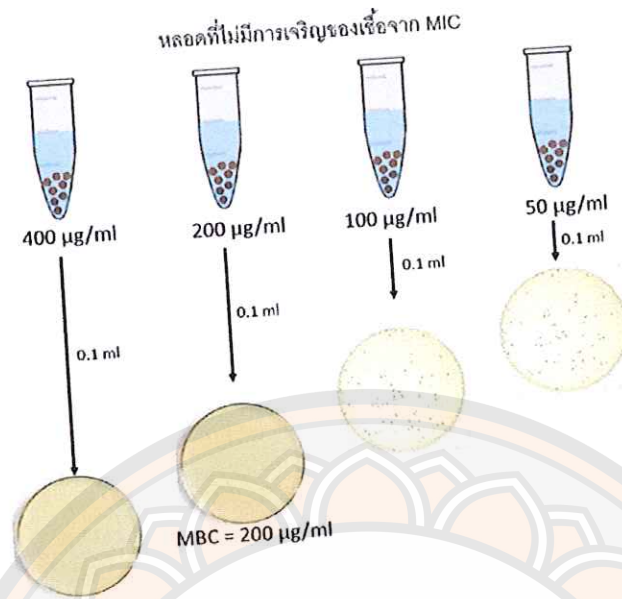
8. อ่านผลโดยการประเมินด้วยสายตาว่าหลอดสุดท้ายที่ไม่มีอาการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ทดสอบ ให้อ่านค่าความเข้มข้นที่หลอดนั้นเป็นค่า MIC ของวัสดุทดสอบนั้นๆ



ภาพ 24 แผนภาพแสดงวิธีการทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโนด้วยวิธี MIC

3.3.3 การทดสอบ Minimal bactericidal concentration (MBC)

จากการทดลองจากการทดสอบ MIC ในส่วนที่ 2 หลังจากอ่านผลแล้วให้นำหลอดทดลองที่ไม่มีอาการเจริญของเชื้อทุกหลอดมาทำการทดสอบหาความเข้มข้นต่ำสุดที่ทำให้เชื้อไม่เจริญบนอาหารเหลวโดยคูดตัวอย่างมา 0.5 มิลลิลิตร spread plate ลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด LB agar plate นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสนาน 18-24 ชั่วโมงจึงอ่านผล ถ้าความเข้มข้นของวัสดุนาโนสามารถฆ่าเชื้อได้จริงจะไม่พบการเจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อแต่ถ้าเชื้อยังไม่ตายจะพบการเจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อดังแสดงในภาพ 25



ภาพ 25 วิธีการทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโนด้วยวิธี MBC

3.3 ทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโนด้วยวิธี Inactivation Test กับเชื้อ *Escherichia coli* TISTR 780

3.3.1 การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์ทดสอบ

เตรียมเชื้อจุลินทรีย์ทดสอบที่เลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด LB agar ที่มีอายุประมาณ 18-24 ชั่วโมง มา 1-2 โคโลนี มาใส่ในน้ำกลั่นปริมาณ 9 มิลลิลิตรที่ฆ่าเชื้อแล้ว เพื่อเตรียมเชื้อทดสอบตั้งต้นให้มีปริมาณเชื้อประมาณ 3×10^8 cfu/ml โดยวัดด้วยเครื่อง uv-vis spectrophotometer เพื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 630 นาโนเมตรให้ได้ประมาณ 0.08-0.1 จากนั้นเจือจางเชื้อตั้งต้นจาก 3×10^8 cfu/ml ด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วให้ได้เชื้อประมาณ 10^4 cfu/ml ด้วยเทคนิค 10 fold-dilution

3.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโนด้วยวิธี Inactivation Test

1. เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวชนิด LB ปริมาตร 8 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปนึ่งฆ่าเชื้อด้วยหม้อไอน้ำความดันไอน้ำ (autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที
2. เตรียมวัสดุนาโนทดสอบที่ความเข้มข้น (ความเข้มข้นสุดท้าย) 25, 30, 50, 75, 100, 150, 300, 450 และ 600 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (แต่ละความเข้มข้นที่ทดสอบขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนาโนไม่ได้ทำทุกความเข้มข้นในทุกวัสดุทดสอบ) โดยใช้ น้ำกลั่นที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วใส่ลงในขวดใส่ตัวอย่างสีขาขนาด 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปใส่เครื่อง ultrasonic bath เพื่อให้สารได้มีการแตกตัวในสารละลายเป็นเวลา 30 นาที ก่อนนำมาใช้งาน

3. ดูควัสดุนาโนทดสอบ 1 มิลลิลิตร ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวชนิด LB จากข้อ 1 จากนั้นดูเชื้อจุลินทรีย์ทดสอบที่มีปริมาณเชื้อตั้งต้น 10^4 cfu/ml ใส่ลงไปจะทำให้เชื้อตั้งต้นที่แท้จริงของการทดสอบคือ 10^3 cfu/ml

4. นำตัวอย่างทดสอบไปใส่ในเครื่องเขย่า (shaker) ที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 10, 20, 30, 45, 60, 120, 180, 240, 300 และ 360 (หมายเหตุ มีการปรับลดเวลาการเก็บตัวอย่างลงในชุดการทดสอบหลังให้เหลือแค่ 180 นาทีมากที่สุด)

5. ใช้เทคนิคการหาจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทดสอบด้วยวิธี spread plate method โดยดูตัวอย่างครั้งละ 0.1 มิลลิลิตร ใส่ลงใน LB agar plate ทำตัวอย่างละ 2 ซ้ำ

6. นำตัวอย่างไปปั่นที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 18-24 ชั่วโมงจึงอ่านผล

7. อ่านผลโดยการนับจำนวนโคโลนี โดยนับในช่วง 30-300 โคโลนี นำค่าที่ได้จากทั้ง 2 ซ้ำมาหาค่าเฉลี่ยและคำนวณหาค่าจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดตามสมการด้านล่าง

$$\text{จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด} = \text{ค่าเฉลี่ยของจำนวนโคโลนีที่นับได้} \times 10$$

3.4 การศึกษาผลของแสงต่อประสิทธิภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโนด้วยวิธี Inactivation Test กับเชื้อจุลินทรีย์ *Escherichia coli* TISTR 780

3.4.1 การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์ทดสอบ

เชื้อเชื้อจุลินทรีย์ทดสอบที่เลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด LB ที่มีอายุประมาณ 18-24 ชั่วโมง มา 1-2 โคโลนี มาใส่ในน้ำกลั่นปริมาณ 9 มิลลิลิตรที่ฆ่าเชื้อแล้ว เพื่อเตรียมเชื้อทดสอบตั้งต้นให้มีปริมาณเชื้อประมาณ 3×10^8 cfu/ml โดยวัดด้วยเครื่อง uv-vis spectrophotometer เพื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 630 นาโนเมตรให้ได้ประมาณ 0.08-0.1 จากนั้นเจือจางเชื้อตั้งต้นจาก 3×10^8 cfu/ml ด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วให้ได้เชื้อประมาณ 10^4 cfu/ml ด้วยเทคนิค 10 fold-dilution

3.4.2 การทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโนด้วยวิธี Inactivation Test

1. เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวชนิด LB broth ปริมาตร 8 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปนึ่งฆ่าเชื้อด้วยความดันไอน้ำ (autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที

2. เตรียมวัสดุนาโนทดสอบที่ความเข้มข้น(ความเข้มข้นสุดท้าย) 25, 30, 50, 75, 100, 150, 300, 450 และ 600 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (แต่ละความเข้มข้นที่ทดสอบขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนาโนไม่ได้ทำทุกความเข้มข้นในทุกวัสดุทดสอบ) โดยใช้น้ำกลั่นที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วใส่ลงในขวดใส่ตัวอย่างสี่ขาขนาด 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปใส่เครื่อง Ultrasonic Bath เพื่อให้สารได้มีการแตกตัวในสารละลายเป็นเวลา 30 นาที ก่อนนำมาใช้งาน

3. การทดลองแบ่งเป็น 2 ชุดการทดสอบคือ ชุดที่ 1 ทำในที่มีดัดลดการทดลอง ชุดที่ 2 ทำในที่มีแสงปกติลดการทดลอง โดยดูวัสดุนาโนทดสอบ 1 มิลลิลิตร ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด LB broth จากข้อ 1. จากนั้นดูเชื้อจุลินทรีย์ทดสอบที่มีปริมาณเชื้อตั้งต้น 10^4 cfu/ml ใส่ลงไปจะทำให้เชื้อตั้งต้นที่แท้จริงของการทดสอบคือ 10^3 cfu/ml

4. นำตัวอย่างทดสอบไปใส่ในเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 10, 20, 30, 45, 60, 120, 180, 240, 300 และ 360 (หมายเหตุ มีการปรับลดเวลาการเก็บตัวอย่างลงในชุดการทดสอบหลังให้เหลือแค่ 180 นาทีมากที่สุด)

5. ใช้เทคนิคการหาจำนวนเชื้อทดสอบด้วยวิธี spread plate method ดูตัวอย่างครั้งละ 0.1 มิลลิลิตร ใส่ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด LB agar plate ทำตัวอย่างละ 2 ซ้ำ

6. นำตัวอย่างไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสนาน 18-24 ชั่วโมงจึงอ่านผล

7. อ่านผลโดยการนับจำนวนโคโลนี โดยนับในช่วง 30 -300 โคโลนี นำค่าที่ได้จากทั้ง 2 ซ้ำมาหาค่าเฉลี่ยและคำนวณหาค่าจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดตามสมการด้านล่าง

$$\text{จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด} = \text{ค่าเฉลี่ยของจำนวนโคโลนีที่นับได้} \times 10$$

4. การศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl ในการบำบัดสารสีชนิดเมทิลีนบลู (Methylene blue) ในน้ำภายใต้แสงวิสิเบิลด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (photocatalytic)

4.1 การศึกษาผลของชนิดวัสดุนาโน (Various types of Ag/AgCl nanoparticles) ต่อการบำบัดสารสีชนิดเมทิลีนบลู (Methylene blue: MB) ในน้ำ

4.1.1 ชั่งวัสดุนาโน 0.06 กรัม โดยทดสอบนี้ใช้วัสดุนาโน 4 ชนิด คือ Ag/AgCl-B, Ag/AgCl-C, Ag/AgCl-G และ Ag/AgCl-R ที่ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของชนิดวัสดุนาโนแต่ละชนิดต่อการบำบัดสารสี MB

4.1.2 นำวัสดุนาโนที่ซึ่งตามอัตราส่วนที่ต้องการใส่ในบีกเกอร์และเก็บไว้ในที่มีดก่อนการทำการทดลองอย่างน้อย 30 นาที

4.1.3 เตรียมสารละลายของสารสี MB ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 150 มิลลิลิตร จากนั้นปรับค่าพีเอช (pH) ของสารละลายให้ได้ประมาณ 7 (7 ± 0.2)

4.1.4 นำบีกเกอร์ที่เติมวัสดุนาโนวางบนเครื่องกวนผสมด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งอยู่ในกล่องทำปฏิกิริยาที่บรรจุหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์จำนวน 4 หลอดโดยยังไม่เปิดหลอดไฟ

4.1.5 เก็บตัวอย่างครั้งละ 5 มิลลิลิตร โดยเก็บตัวอย่างสารละลายสี ก่อนทำปฏิกิริยาเป็นตัวอย่างที่เวลา 0 นาที

4.1.6 เติมสารละลายสี MB ลงในบีกเกอร์กวนผสมให้เข้ากันแล้วเริ่มจับเวลาโดยทำปฏิกิริยาในที่มีदनาน 1 ชั่วโมงเก็บตัวอย่างที่เวลา 1, 15, 30, 45, 60 และ 120 นาที ตัวอย่างที่เก็บต้องกรองด้วยกระดาษกรองชนิด cellulose membrane ขนาด 0.45 ไมครอน

4.1.7 เริ่มเปิดหลอดไฟทั้งหมดในกล่องทำปฏิกิริยา โดยฉายแสงนาน 2 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างที่เวลา 10, 20, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที กรองตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง Cellulose membrane ขนาด 0.45 ไมครอน

4.1.8 การขนานนำตัวอย่างวัดค่าความดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร

4.1.9 จุดค่าที่อ่านได้ในแต่ละตัวอย่างนำมาแทนค่าในสมการจากกราฟมาตรฐานเพื่อหาค่าความเข้มข้นของตัวอย่างในแต่ละเวลา

4.2 การศึกษาผลค่าพีเอช (Varies pH) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีชนิดเมทิลีนบลูในน้ำของวัสดุนาโน

4.2.1 ชั่งวัสดุนาโน 0.06 กรัม โดยการทดสอบนี้ใช้วัสดุนาโน 4 ชนิด คือ Ag/AgCl-B, Ag/AgCl-C, Ag/AgCl-G และ Ag/AgCl-R

4.2.2 นำวัสดุนาโนที่ซึ่งตามอัตราส่วนที่ต้องการใส่ในบีกเกอร์และเก็บไว้ในที่มีดก่อนการทำการทดลองอย่างน้อย 30 นาที

4.2.3 เตรียมสารละลายของสารสี MB ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 150 มิลลิลิตร จากนั้นปรับค่าพีเอชของสารละลายให้เป็น 2, 7 และ 10 เพื่อศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการบำบัด

4.2.4 นำบีกเกอร์ที่เติมวัสดุนาโนวางบนเครื่องกวนผสมด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งอยู่ในกล่องทำปฏิกิริยาที่บรรจุหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ จำนวน 4 หลอดโดยยังไม่เปิดหลอดไฟ

4.2.5 เก็บตัวอย่างครั้งละ 5 มิลลิลิตร โดยเก็บตัวอย่างสารละลายสี ก่อนทำปฏิกิริยาเป็นตัวอย่างที่เวลา 0 นาที

4.2.6 เติมสารละลายสี MB (ในแต่ละค่าพีเอชที่ทดสอบ) ลงในบีกเกอร์กวนผสมให้เข้ากันแล้วเริ่มจับเวลาโดยทำปฏิกิริยาในที่มีदनาน 1 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างที่เวลา 1, 15, 30, 45, 60 และ 120 นาที ตัวอย่างที่เก็บต้องกรองด้วยกระดาษกรองชนิด cellulose membrane ขนาด 0.45 ไมครอน

4.2.7 เริ่มเปิดหลอดไฟทั้งหมดในกล่องทำปฏิกิริยา โดยฉายแสงนาน 2 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างที่เวลา 10, 20, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที กรองตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง cellulose membrane ขนาด 0.45 ไมครอน

4.2.8 นำตัวอย่างวัดค่าความดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร

4.2.9 จุดค่าที่อ่านได้ในแต่ละตัวอย่างนำมาแทนค่าในสมการจากกราฟมาตรฐานเพื่อหาค่าความเข้มข้นของตัวอย่างในแต่ละเวลา

4.3 การศึกษาผลของปริมาณวัสดุนาโน (Various dose of Ag/AgCl nanoparticles) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีชนิดเมทิลีนบลูในน้ำของวัสดุนาโน

4.3.1 ชั่งวัสดุนาโนที่ปริมาณ 0.06 (0.4g/L), 0.03 (0.2g/L), 0.01 (0.1g/L) และ 0.005 (0.05g/L) กรัม เพื่อศึกษาผลของปริมาณวัสดุนาโน โดยการทดสอบนี้ใช้วัสดุนาโน 2 ชนิด คือ Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G

4.3.2 นำวัสดุนาโนที่ชั่งตามอัตราส่วนที่ต้องการใส่ในบีกเกอร์และเก็บไว้ในที่มีดก่อนการทำกรทดลองอย่างน้อย 30 นาที

4.3.3 เตรียมสารละลายของสารสี MB ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 150 มิลลิลิตร จากนั้นปรับค่าพีเอชของสารละลายให้เป็น 10

4.3.4 นำบีกเกอร์ที่เติมวัสดุนาโนวางบนเครื่องกวนผสมด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งอยู่ในกล่องทำปฏิกิริยาที่บรรจุหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ จำนวน 4 หลอดโดยยังไม่เปิดหลอดไฟ

4.3.5 เก็บตัวอย่างครั้งละ 5 มิลลิลิตร โดยเก็บตัวอย่างสารละลายสี ก่อนทำปฏิกิริยาเป็นตัวอย่างที่เวลา 0 นาที

4.3.6 เติมสารละลายสี MB ลงในบีกเกอร์กวนผสมให้เข้ากันแล้วเริ่มจับเวลาโดยทำปฏิกิริยาในที่มีदनาน 1 ชั่วโมงเก็บตัวอย่างที่เวลา 1, 15, 30, 45, 60 และ 120 นาที ตัวอย่างที่เก็บต้องกรองด้วยกระดาษกรองชนิด cellulose membrane ขนาด 0.45 ไมครอน

4.3.7 เริ่มเปิดหลอดไฟทั้งหมดในกล่องทำปฏิกิริยา โดยฉายแสงนาน 2 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างที่เวลา 10, 20, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที กรองตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง cellulose membrane ขนาด 0.45 ไมครอน

4.3.8 นำตัวอย่างวัดค่าความดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร

4.3.9 จุดค่าที่อ่านได้ในแต่ละตัวอย่างนำมาแทนค่าในสมการจากกราฟมาตรฐานเพื่อหาค่าความเข้มข้นของตัวอย่างในแต่ละเวลา

4.4 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสีชนิดเมทิลีนบลู (Various Concentration of Methylene blue) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีของวัสดุนาโน

4.4.4 ชั่งวัสดุนาโนที่ปริมาณ 0.06 (0.4g/L) กรัมเพื่อศึกษาผลของปริมาณวัสดุนาโนโดยการทดสอบนี้ใช้วัสดุนาโน 2 ชนิด คือ Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G

4.4.2 นำวัสดุนาโนที่ชั่งตามอัตราส่วนที่ต้องการใส่ในบีเกอร์และเก็บไว้ในที่มืดก่อนการทำการทดลองอย่างน้อย 30 นาที

4.4.3 เตรียมสารละลายของสารสี MB ที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 10, 50, 85, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 150 มิลลิลิตร จากนั้นปรับค่าพีเอชของสารละลายให้เป็น 10

4.4.4 นำบีเกอร์ที่เติมวัสดุนาโนวางบนเครื่องกวนผสมด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งอยู่ในกล่องทำปฏิกิริยาที่บรรจุหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ จำนวน 4 หลอดโดยยังไม่เปิดหลอดไฟ

4.4.5 เก็บตัวอย่างครั้งละ 5 มิลลิลิตร โดยเก็บตัวอย่างสารละลายสี ก่อนทำปฏิกิริยาเป็นตัวอย่างที่เวลา 0 นาที

4.4.6 เติมสารละลายสี MB ลงในบีเกอร์กวนผสมให้เข้ากันแล้วเริ่มจับเวลาโดยทำปฏิกิริยาในที่มืดนาน 1 ชั่วโมงเก็บตัวอย่างที่เวลา 1, 15, 30, 45, 60 และ 120 นาที ตัวอย่างที่เก็บต้องกรองด้วยกระดาษกรอง cellulose membrane ขนาด 0.45 ไมครอน

4.4.7 เริ่มเปิดหลอดไฟทั้งหมดในกล่องทำปฏิกิริยาโดยฉายแสงนาน 2 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างที่เวลา 10, 20, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที กรองตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง ชนิด cellulose membrane ขนาด 0.45 ไมครอน

4.4.8 การนำเอาตัวอย่างวัดค่าความดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร

4.4.9 จุดค่าที่อ่านได้ในแต่ละตัวอย่างนำมาแทนค่าในสมการจากกราฟมาตรฐานเพื่อหาค่าความเข้มข้นของตัวอย่างในแต่ละเวลา

5. การศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G ในการบำบัดสารสีชนิดมาลาไคต์กรีน (Malachite Green) ในน้ำภายใต้แสงอาทิตย์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (photocatalytic)

5.1 การศึกษาผลของชนิดวัสดุนาโน (Various types of Ag/AgCl nanoparticles) ต่อการบำบัดสารสีชนิดมาลาไคต์กรีน (Malachite Green: MG) ในน้ำ

5.1.1 ชั่งวัสดุนาโน 0.06 กรัม โดยการทดสอบนี้ใช้วัสดุนาโน 2 ชนิด คือ Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G ที่ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของชนิดวัสดุนาโนแต่ละชนิดต่อการบำบัดสารสี MG

5.1.2 นำวัสดุนาโนที่ชั่งตามอัตราส่วนที่ต้องการใส่ในบีเกอร์และเก็บไว้ในที่มีดก่อนการทำการทดลองอย่างน้อย 30 นาที

5.1.3 เตรียมสารละลายของสารสี MG ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 150 มิลลิลิตร จากนั้นปรับค่าพีเอชของสารละลายให้ได้ประมาณ 7

5.1.4 เก็บตัวอย่างครั้งละ 5 มิลลิลิตร โดยเก็บตัวอย่างสารละลายสีก่อนทำปฏิกิริยาเป็นตัวอย่างที่เวลา 0 นาที

5.1.5 เติมสารละลายสี MG ลงในบีเกอร์กวนผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนผสมด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วเริ่มจับเวลาโดยทำปฏิกิริยาภายใต้แสงอาทิตย์นาน 1 ชั่วโมงเก็บตัวอย่างที่เวลา 1, 10, 20, 30, 45 และ 60 นาที ตัวอย่างที่เก็บต้องกรองด้วยกระดาษกรองชนิด cellulose membrane ขนาด 0.45 ไมครอน

5.1.6 ตัวอย่างวัดค่าความดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ความยาวคลื่น 618 นาโนเมตร

5.1.7 จุดค่าที่อ่านได้ในแต่ละตัวอย่างนำมาแทนค่าในสมการจากกราฟมาตรฐานเพื่อหาค่าความเข้มข้นของตัวอย่างในแต่ละเวลา

5.2 การศึกษาผลค่าความเป็นกรดต่างของ (Varies pH) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีชนิดมาลาไคต์กรีน ในน้ำของวัสดุนาโน

5.2.1 ชั่งวัสดุนาโน 0.06 กรัม โดยการทดสอบนี้ใช้วัสดุนาโน 2 ชนิด คือ Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G

5.2.2 นำวัสดุนาโนที่ชั่งตามอัตราส่วนที่ต้องการใส่ในบีเกอร์และเก็บไว้ในที่มีดก่อนการทำการทดลองอย่างน้อย 30 นาที

5.2.3 เตรียมสารละลายของสารสี MG ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 150 มิลลิลิตร จากนั้นปรับค่าพีเอชของสารละลายให้เป็น 2.5, 7 และ 10 เพื่อศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการบำบัด

5.2.4 เก็บตัวอย่างครั้งละ 5 มิลลิลิตร โดยเก็บตัวอย่างสารละลายสี ก่อนทำปฏิกิริยาเป็นตัวอย่างที่เวลา 0 นาที

5.2.5 เติมสารละลายสี MG ลงในบีกเกอร์กวนผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนผสมด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วเริ่มจับเวลาโดยทำปฏิกิริยาภายใต้แสงอาทิตย์นาน 1 ชั่วโมงเก็บตัวอย่างที่เวลา 1, 10, 20, 30, 45 และ 60 นาที ตัวอย่างที่เก็บต้องกรองด้วยกระดาษกรองชนิด cellulose membrane ขนาด 0.45 ไมครอน

5.2.6 การเขานำตัวอย่างวัดค่าความดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 618 นาโนเมตร

5.2.7 จุดค่าที่อ่านได้ในแต่ละตัวอย่างนำมาแทนค่าในสมการจากกราฟมาตรฐานเพื่อหาค่าความเข้มข้นของตัวอย่างในแต่ละเวลา

5.3 การศึกษาผลของปริมาณวัสดุนาโน (Various dose of Ag/AgCl nanoparticles) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีชนิดมาลาโคลิกรีน ในน้ำของวัสดุนาโน

5.3.1 ชั่งวัสดุนาโนที่ปริมาณ 0.06 (0.4g/L), 0.03 (0.2g/L), 0.01 (0.1g/L) และ 0.005 (0.05g/L) กรัม เพื่อศึกษาผลของปริมาณวัสดุนาโนโดยการทดสอบนี้ใช้วัสดุนาโน 2 ชนิด คือ Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G

5.3.2 นำวัสดุนาโนที่ชั่งตามอัตราส่วนที่ต้องการใส่ในบีกเกอร์และเก็บไว้ในที่มืดก่อนการทำการทดลองอย่างน้อย 30 นาที

5.3.3 เตรียมสารละลายของสารสี MG ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 150 มิลลิลิตร จากนั้นปรับค่าพีเอชของสารละลายให้เป็น 7

5.3.4 เก็บตัวอย่างครั้งละ 5 มิลลิลิตร โดยเก็บตัวอย่างสารละลายสี ก่อนทำปฏิกิริยาเป็นตัวอย่างที่เวลา 0 นาที

5.3.5 เติมสารละลายสี MG ลงในบีกเกอร์กวนผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนผสมด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วเริ่มจับเวลาโดยทำปฏิกิริยาภายใต้แสงอาทิตย์นาน 1 ชั่วโมงเก็บตัวอย่างที่เวลา 1, 10, 20, 30, 45 และ 60 นาที ตัวอย่างที่เก็บต้องกรองด้วยกระดาษกรองชนิด cellulose membrane ขนาด 0.45 ไมครอน

5.3.6 การนำเอาตัวอย่างวัดค่าความดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 618 นาโนเมตร

5.3.7 จุดค่าที่อ่านได้ในแต่ละตัวอย่างนำมาแทนค่าในสมการจากกราฟมาตรฐานเพื่อหาค่าความเข้มข้นของตัวอย่างในแต่ละเวลา

5.4 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสีชนิดมาลาไค์กรีน (Various Concentration of Methylene blue) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีของวัสดุนาโน

5.4.1 ชั่งวัสดุนาโน 0.06 กรัม โดยการทดสอบนี้ใช้วัสดุนาโน 2 ชนิด คือ Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G

5.4.2 นำวัสดุนาโนที่ชั่งตามอัตราส่วนที่ต้องการใส่ในปิเกอร์และเก็บไว้ในที่มืดก่อนการทำการทดลองอย่างน้อย 30 นาที

5.4.3 เตรียมสารละลายของสารสี MG ที่ความเข้มข้นต่างๆดังนี้ 10, 50, 100 และ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 150 มิลลิลิตร จากนั้นปรับค่าพีเอชของสารละลายให้เป็น 7

5.4.4 เก็บตัวอย่างครั้งละ 5 มิลลิลิตร โดยเก็บตัวอย่างสารละลายสี ก่อนทำปฏิกิริยาเป็นตัวอย่างที่เวลา 0 นาที

5.4.5 เติมสารละลายสี MG ลงในปิเกอร์กวนผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนผสมด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วเริ่มจับเวลาโดยทำปฏิกิริยาภายใต้แสงอาทิตย์นาน 1 ชั่วโมงเก็บตัวอย่างที่เวลา 1, 10, 20, 30, 45 และ 60 นาที ตัวอย่างที่เก็บต้องกรองด้วยกระดาษกรองชนิด cellulose membrane ขนาด 0.45 ไมครอน

5.4.6 การนำเอาตัวอย่างวัดค่าความดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 618 นาโนเมตร

5.4.7 จุดค่าที่อ่านได้ในแต่ละตัวอย่างนำมาแทนค่าในสมการจากกราฟมาตรฐานเพื่อหาค่าความเข้มข้นของตัวอย่างในแต่ละเวลา

บทที่ 4

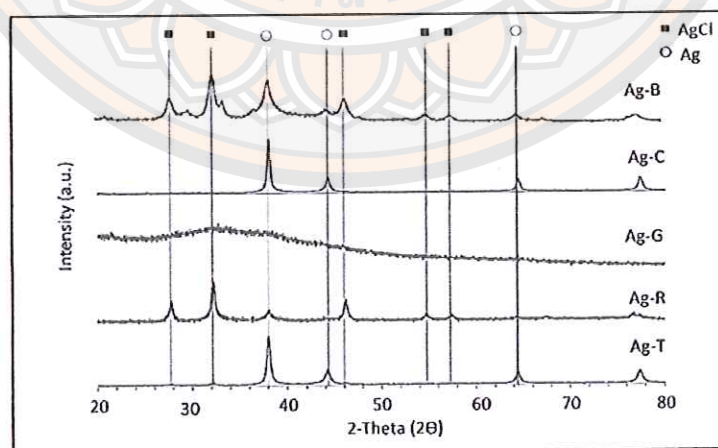
ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์และศึกษาความสามารถในการบำบัดสารสีในน้ำของวัสดุซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากธรรมชาติภายใต้แสงวิธีเปิดและภายใต้แสงอาทิตย์

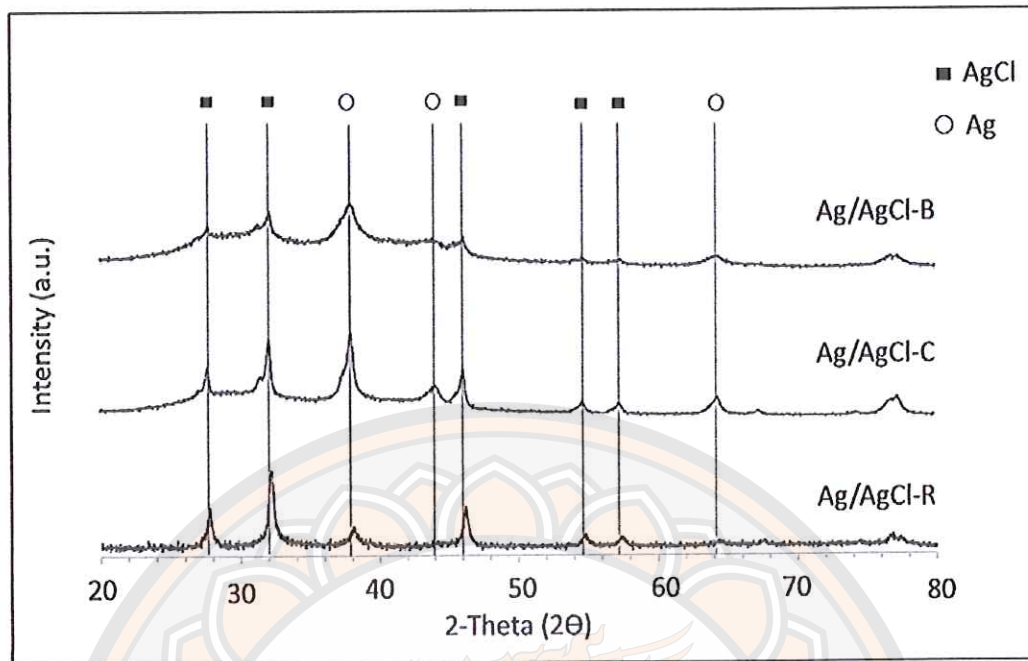
การศึกษาลักษณะและคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโน

1. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุซิลเวอร์นาโน (Ag nanoparticles) และวัสดุซิลเวอร์คลอไรด์ (Plamonic Ag/AgCl nanoparticles)

จากการวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl และชนิด Ag พบว่า วัสดุนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นผลึกของแร่ที่ชื่อว่า " Chlorargyrite " สูตรทางเคมี คือ ซิลเวอร์คลอไรด์ (Silver Chloride: AgCl) มีผลึกแบบลูกบาศก์ (cubic) เป็นองค์ประกอบหลักตำแหน่งพีคของ 2-Theta อยู่ที่ 27.9, 32, 32.5, 46, 55, 57.5, 67.3, 74.7 และ 76.8 (2 θ) องค์ประกอบรองคือ ซิลเวอร์ (Silver: Ag) ตำแหน่งพีคอยู่ที่ 37.9, 38.0, 44.0, 44.1, 64.5, 64.7, 77.5 และ 81.5 (2 θ) โดยวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้นทั้งชนิด Plasmonic Ag/AgCl และชนิด Ag จะมีองค์ประกอบของผลึกทั้งแบบ Ag (cubic Ag) และผลึกของ AgCl (cubic AgCl) ผสมกันดังแสดงในภาพ 26 และ 27



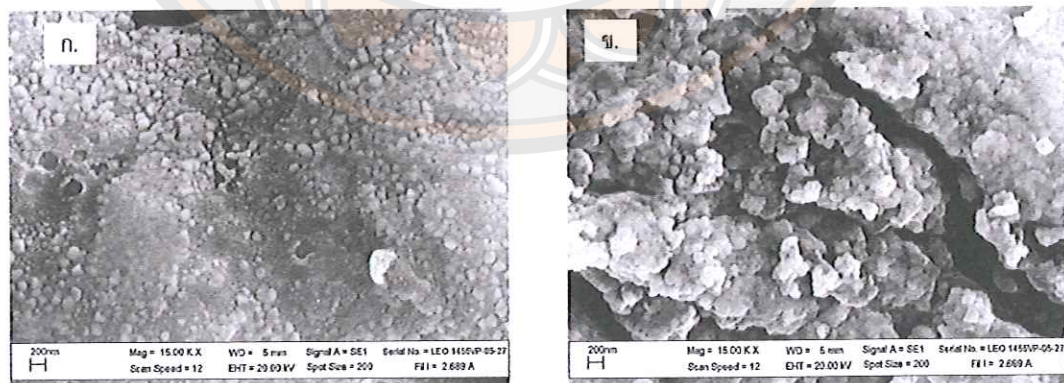
ภาพ 26 แสดงโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนชนิด Ag



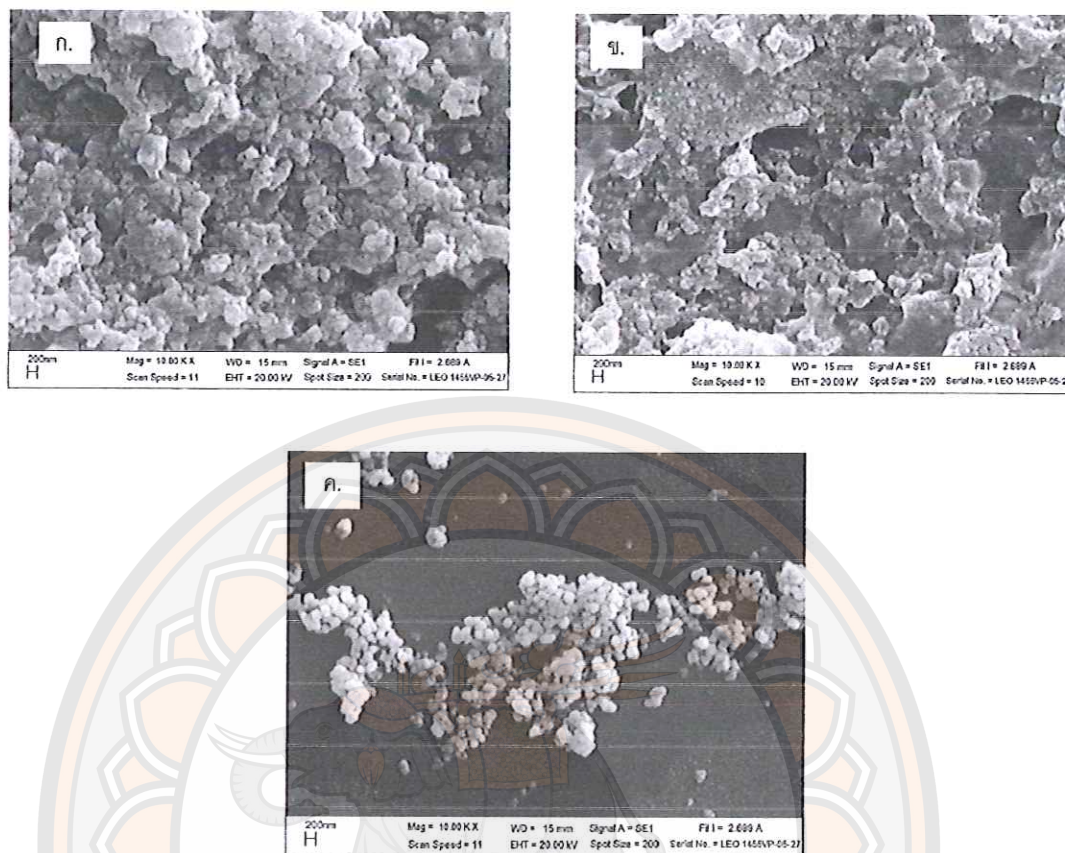
ภาพ 27 แสดงโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนชนิด Ag/AgCl

1.2 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของวัสดุซิลเวอร์นาโนด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy หรือ SEM)

จากการศึกษาลักษณะพื้นฐานและลักษณะพื้นผิว (Morphology) ของวัสดุซิลเวอร์นาโน (Ag NPs) โดยมีลักษณะทางกายภาพดังแสดงในภาพ 28 และ 29

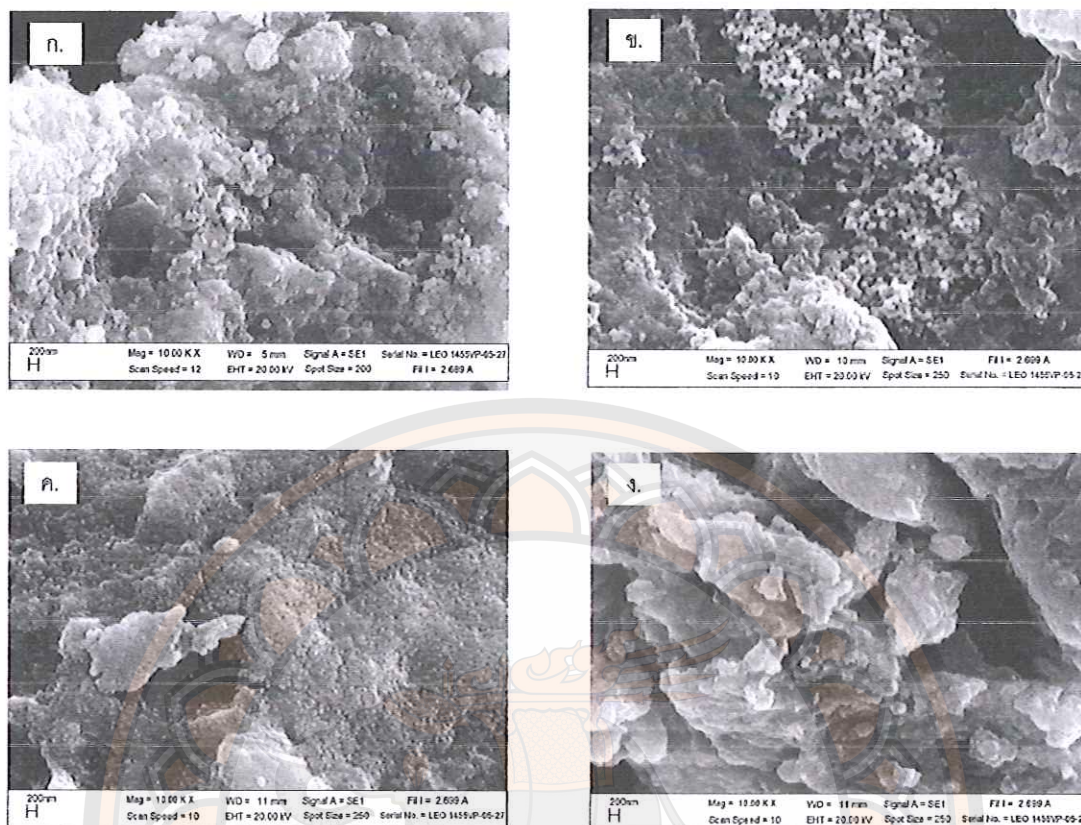


ภาพ 28 แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag -R (ก.), Ag -T (ข.), ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



ภาพ 29 แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag –B (ก.), Ag –G (ข.) และ Ag –Chemical (ค.) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากภาพ 28 และ 29 แสดงภาพถ่าย SEM ของวัสดุนาโนซิลเวอร์นาโน (Ag NPs) ที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากพืชชนิดต่างๆ ผลการศึกษาพบว่า Ag-R ที่กำลังขยาย 15,000 เท่า จะเห็นว่าลักษณะของวัสดุจะขนาดเล็กกลมแต่มีการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม (agglomerate particles) ส่วน Ag-T ที่กำลังขยาย 15,000 เท่าจะเห็นว่าลักษณะของวัสดุมีทรงกลมและรวมตัวกันเป็นอนุภาคมีลักษณะพื้นผิวขรุขระ โดยที่ Ag-B และ Ag-G ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า จะเห็นว่าลักษณะของวัสดุมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนทั้ง ทรงกลม เหลี่ยม และรวมตัวกันเป็นกลุ่มซึ่งมีลักษณะพื้นผิวขรุขระ แต่ Ag-G จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มหนาแน่นกว่าชนิดอื่นๆ และ Ag-Chemical ที่กำลังขยาย 10,000 เท่าจะเห็นว่าลักษณะของวัสดุมีทรงกลมและรวมตัวกันเป็นกลุ่มขนาดของอนุภาคใกล้เคียงกัน พื้นผิวเรียบกว่าวัสดุนาโนชนิดอื่นที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากพืชชนิดต่างๆ



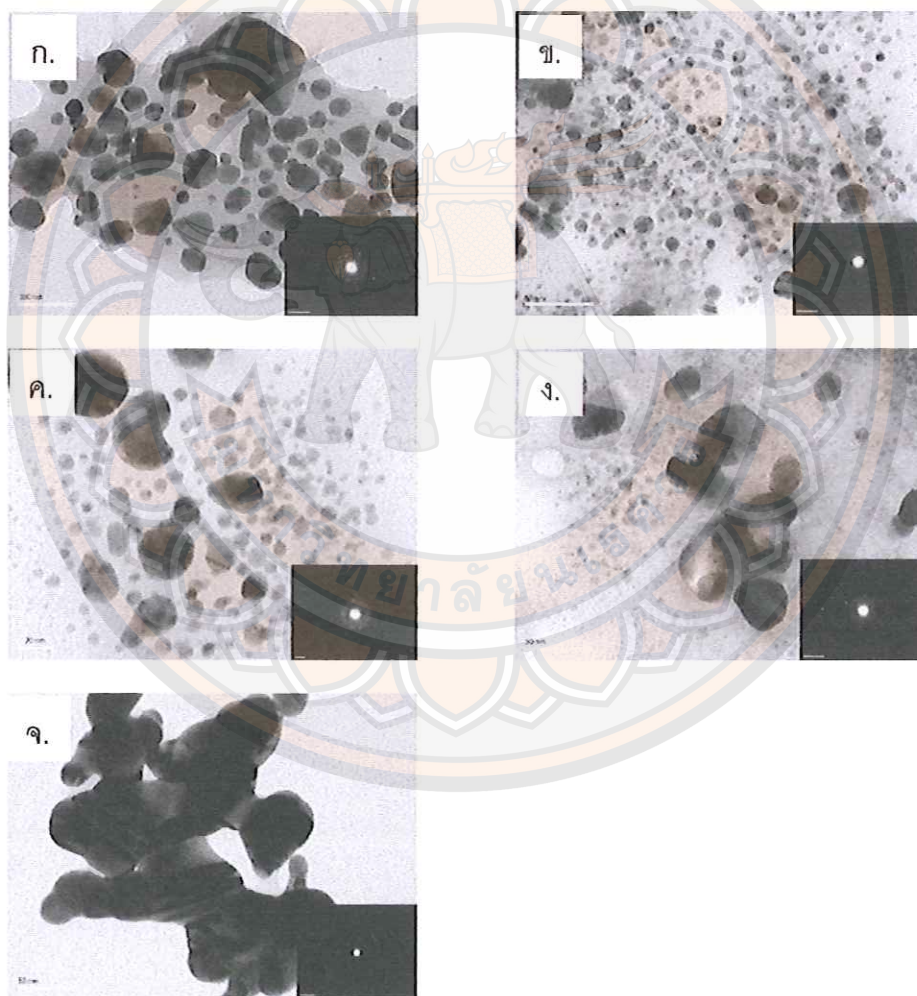
ภาพ 30 แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl -R (ก.), Ag/AgCl -B (ข.), Ag/AgCl -G (ค.) และ Ag/AgCl -C (ง.) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากภาพ 30 แสดงภาพถ่าย SEM ของวัสดุชนิด Ag/AgCl-R ที่กำลังขยาย 10,000 เท่าจะเห็นว่าลักษณะของวัสดุมีรูปร่างไม่แน่นอนทั้ง ทรงกลม หลายเหลี่ยม และรวมตัวกันเป็นกลุ่มพื้นผิวของวัสดุค่อนข้างขรุขระ ส่วนวัสดุชนิด Ag/AgCl-B ที่กำลังขยาย 10,000 เท่าจะเห็นว่าลักษณะของวัสดุมีทรงกลมขนาดของอนุภาคใกล้เคียงกันและรวมตัวกันเป็นกลุ่มแต่ไม่หนาแน่น พื้นผิวค่อนข้างเรียบ โดยที่วัสดุ Ag/AgCl-G ที่กำลังขยาย 10,000 เท่าจะเห็นว่าวัสดุมีทรงกลมและรวมตัวกันเป็นกลุ่มขนาดของอนุภาคใกล้เคียงกันและมีขนาดเล็กกว่าวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl ที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากธรรมชาติชนิดอื่น มีพื้นผิวเรียบ และ Ag/AgCl-C ที่กำลังขยาย 10,000 เท่าจะเห็นว่าลักษณะของวัสดุมีรูปร่างไม่แน่นอน รวมตัวกันเป็นกลุ่มหนาแน่น พื้นผิวเรียบขรุขระ

จากผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl ที่สังเคราะห์จากสารสกัดของพืช 4 ชนิดที่แตกต่างกันได้แก่ กระเทียม, กาแฟ, บีทรูท และเรดิช ผลของลักษณะพื้นผิวของวัสดุทั้ง 4 ชนิด พบว่าวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl- B มีการกระจายตัวที่ดีที่สุดตามด้วย

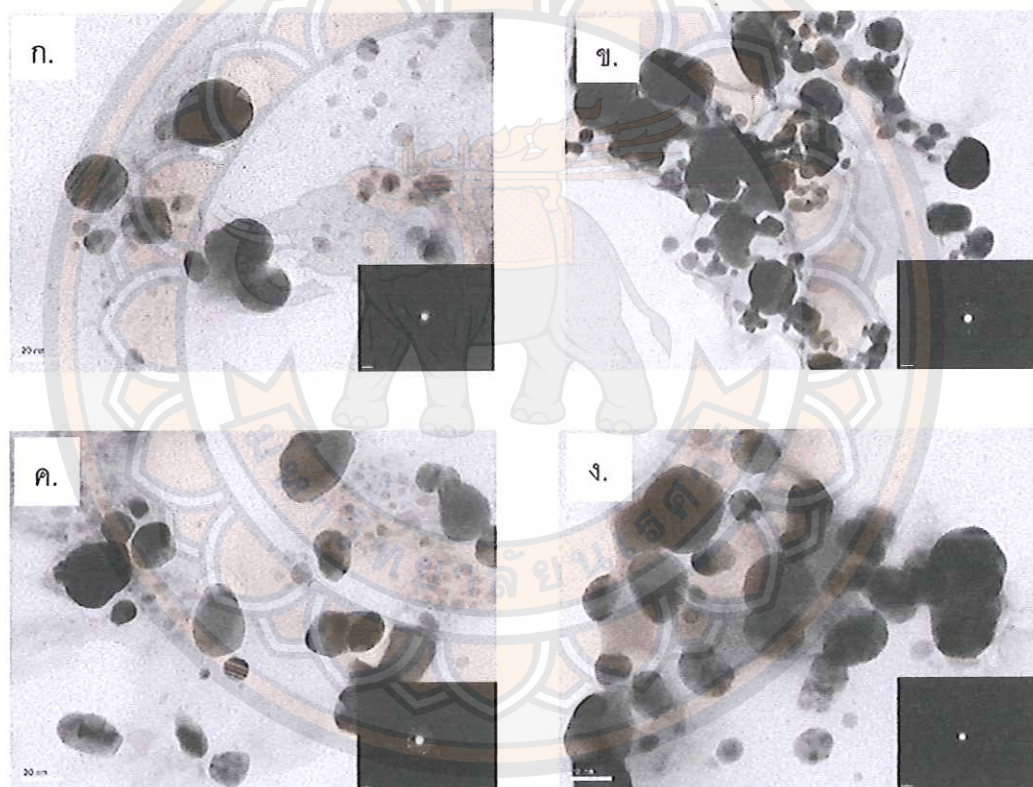
Ag/AgCl-G, Ag/AgCl-R และ Ag/AgCl-C ตามลำดับ และขนาดของอนุภาคของ Ag/AgCl-G มีขนาดเล็กที่สุดตามด้วย , Ag/AgCl-R, Ag/AgCl- B และ Ag/AgCl-C สารกลุ่มวิตามินบีและวิตามินซีที่ได้จากสารสกัด กระเทียม, ปืพรูท และ เเรดิช จะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์และ capping agent ช่วยให้วัสดุนาโนมีการกระจายตัวที่ดีและไม่เกาะรวมเป็นกลุ่ม ซึ่งสารกลุ่มโพลีฟีนอลจากสารสกัดกาแฟจะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agents) และ capping agent เช่นกัน แต่สารกลุ่มวิตามินบีและวิตามินซีจะให้ผลที่ดีกว่า

1.3 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างและขนาดผลึกของวัสดุซิลเวอร์นาโนด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy หรือ TEM)



ภาพ 31 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างและขนาดผลึกวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag-R (ก.), Ag-T (ข.), Ag-B (ค.), Ag-G (ง.) และ Ag-Chemical (จ.) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

จากผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิดต่างๆพบว่า วัสดุชนิด Ag-B มีขนาดเล็กที่สุดในกลุ่มวัสดุนาโนชนิด Ag คือ 22.88 นาโนเมตร ตามด้วย Ag-G, Ag-R, Ag-T และ Ag-Chemical ที่มีผลึกดังนี้ 34.1, 59.1, 65.5 และ 79.6 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยวัสดุทุกชนิดจะมีรูปร่างผลึกไม่แน่นอนมีทั้งรูปร่าง กลม ค่อนข้างกลม รวมถึงสามเหลี่ยมแต่วัสดุชนิด Ag-Chemical มีการเกาะรวมเป็นกลุ่ม ค่อนข้างไม่กระจายตัวเหมือนกับวัสดุชนิดอื่นๆ โดยลักษณะผลึกของวัสดุซิลเวอร์นาโนแต่ละชนิดแสดงในภาพ 31 และขนาดผลึกของวัสดุซิลเวอร์นาโนแต่ละชนิดแสดงในตาราง 8



ภาพ 32 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างและขนาดผลึกวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl-R (ก.), Ag/AgCl-B (ข.), Ag/AgCl-G (ค.) และ Ag/AgCl-C (ง.) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

จากผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิดต่างๆ พบว่า วัสดุชนิด Ag/AgCl-G มีขนาดเล็กที่สุดในกลุ่มวัสดุนาโนชนิด plasmonic Ag/AgCl nanoparticles

คือ 17.13 nm ตามด้วย Ag/AgCl-B, Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-R ที่มีผลึกดังนี้ 19.5, 21.75 และ 68.4 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยวัสดุชนิด Ag/AgCl-R มีรูปร่างกลมแต่ขนาดใหญ่ Ag/AgCl-B มีหลายรูปร่าง หลายขนาดผสมกันทั้งกลุ่มที่ขนาดเล็กระดับ 10 นาโนเมตรและกลุ่มที่ขนาดใหญ่ ขนาดประมาณ 50 นาโนเมตรโดยที่วัสดุชนิด Ag/AgCl-G มีหลายรูปร่างและหลายขนาดทั้งกลุ่มที่ขนาดเล็กประมาณ 5 นาโนเมตรและกลุ่มขนาด 20 นาโนเมตรผสมกัน ส่วนวัสดุชนิด Ag/AgCl-C ขนาดของอนุภาคค่อนข้างใกล้เคียงกันทั้งหมดมีรูปร่างค่อนข้างกลม โดยลักษณะผลึกของวัสดุ ซิลเวอร์นาโนแต่ละชนิดแสดงในภาพ 32 และขนาดผลึกของวัสดุซิลเวอร์นาโนแต่ละชนิดแสดงในตาราง 8

ตาราง 8 แสดงขนาดผลึกและขนาดอนุภาคของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิดต่างๆ

ชนิดวัสดุซิลเวอร์นาโน	ขนาดผลึก (นาโนเมตร)	ขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)
Ag-R	59.1±5.2	180.3±12.4
Ag-T	65.5±3.4	382.6±18.2
Ag-Chemical	79.6±4.6	1637.1±23.1
Ag-B	22.88±6.0	-
Ag-G	34.1±5.9	-
Ag/AgCl-R	68.4±3.5	188.1±17.9
Ag/AgCl-B	19.5±3.6	181.0±23.82
Ag/AgCl-G	17.13±6.25	512.8±124.1
Ag/AgCl-C	21.75±5.0	135.5±69.39

1.4 ผลการศึกษาค่าศักย์ซีต้า (pH_{pcz}) ของวัสดุซิลเวอร์นาโนด้วยเครื่องวิเคราะห์ Malvern Zetasizer Nano series

จากผลการศึกษาค่าศักย์ซีต้าซึ่งคือจุดที่ค่าพีเอชที่มีประจุรวมกัน (ประจุบวกและประจุลบ) เท่ากับศูนย์เป็นค่าที่แสดงประจุบนพื้นผิวของอนุภาคของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิดต่างๆ พบว่าวัสดุทุกชนิดที่สังเคราะห์โดยใช้สารสกัดจากพืชร่วมด้วยจะมีค่าศักย์ซีต้าน้อยกว่าวัสดุซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ด้วยสารเคมีเพียงอย่างเดียว และวัสดุชนิด Ag NPs จะมีค่าศักย์ซีต้านสูงกว่าวัสดุ

ซิลเวอร์ชนิด plasmonic Ag/AgCl จากผลแสดงว่าสารสกัดจากพืชเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า pH_{pcz} ของวัสดุ โดยค่า pH_{pcz} ของวัสดุ Ag/AgCl-R มีค่าน้อยที่สุดคือ 2.0 และ Ag-Chemical มีค่ามากที่สุดคือ 3.1 รายละเอียดค่า pH_{pcz} ของวัสดุชนิดอื่นแสดงในตาราง 9

ตาราง 9 แสดงค่าค่าศักย์ซีต้า (pH_{pcz}) ของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิดต่าง ๆ

ชนิดของวัสดุซิลเวอร์นาโน (AgNP)	ค่าศักย์ซีต้า (pH_{pcz})
Ag-R	2.7
Ag-T	2.8
Ag-Chemical	3.1
Ag-B	2.1
Ag-G	2.74
Ag/AgCl-R	2.0
Ag/AgCl-B	2.25
Ag/AgCl-G	2.16
Ag/AgCl-C	2.5

ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ของวัสดุนาโนซิลเวอร์

1. ผลการทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุนาโนชนิดซิลเวอร์นาโน ด้วยวิธี Agar disc diffusion method ด้วยเชื้อ *E. coli* TISTR 780 และ *S. aureus* TTSTR 1466

ตาราง 10 แสดงผลการยับยั้งเชื้อ *Escherichia coli* และ *Staphylococcus aureus* ด้วยวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิดต่าง ๆ

ชนิดวัสดุซิลเวอร์นาโน	Inhibition zone (มิลลิเมตร)	
	<i>E.coli</i>	<i>S.aureus</i>
Control	0.0±0.0	0.0±0.0
Ag-Chemical	0.0±0.0	0.0±0.0
Ag-C	0.0±0.0	0.0±0.0

ตาราง 10 (ต่อ)

ชนิดวัสดุซิลเวอร์นาโน	Inhibition zone (มิลลิเมตร)	
	<i>E.coli</i>	<i>S.aureus</i>
Ag-B	10.0±0.5	9.5±0.10
Ag-G	8.25±0.25	0.0±0.0
Ag-R	8.75±0.25	8.75±0.25
Ag-T	8.0±1.0	6.5±0.50

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *E. coli* และ *S. aureus* ของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิดต่างๆด้วยวิธี agar disc diffusion test พบว่าวัสดุซิลเวอร์นาโนทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ Ag-B, Ag-R, Ag-G และ Ag-T สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 2 ชนิดแต่ให้ผลที่แตกต่างกันระหว่างเชื้อ *E. coli* ที่ใช้เป็นตัวแทนของจุลินทรีย์แกรมลบและเชื้อ *S. aureus* ที่ใช้เป็นตัวแทนจุลินทรีย์แกรมบวก จากผลการทดสอบพบว่าวัสดุซิลเวอร์นาโนสามารถยับยั้งเชื้อ *E. coli* ได้ดีกว่าเชื้อ *S. aureus* โดยวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag-B มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการยับยั้งการเจริญของเชื้อทั้งสองชนิดโดยค่าของ inhibition zone ที่วัดได้ในการทดสอบกับเชื้อ *E. coli* เท่ากับ 10.0±0.5 มิลลิเมตร ตามด้วยวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag-R, Ag-G และ Ag-T ที่มีค่าการยับยั้งเชื้อ *E. coli* เท่ากับ 8.75±0.25, 8.25±0.25 และ 8.0±1.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ สำหรับผลการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* นั้น Ag-B สามารถยับยั้งได้ดีที่สุดโดยค่า inhibition zone เท่ากับ 9.5±0.10 มิลลิเมตร ตามด้วย Ag-R และ Ag-T ที่มีค่า inhibition zone เท่ากับ 8.75±0.25 และ 6.5±0.50 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลการทดสอบของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิดอื่นแสดงในตาราง 10

2. ผลการทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุนาโน ชนิดซิลเวอร์คลอไรด์ (Plamonic Ag/AgCl nanoparticles) ด้วยวิธี Agar disc diffusion method ด้วยเชื้อ *Escherichia coli* TISTR 780

ตาราง 11 แสดงผลการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ *Escherichia coli* ด้วยวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด plasmonic Ag/AgCl ที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากพืชชนิดต่างๆ

ชนิดวัสดุซิลเวอร์นาโน	Inhibition zone (มิลลิเมตร) <i>E.coli</i>
Control	0.0±0.0
Ag/AgCl-R	8.75±0.75
Ag/AgCl-B	9.0±0.0
Ag/AgCl-C	9.0±0.0
Ag/AgCl-G	9.5±0.0

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *E. coli* ด้วยวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด plasmonic Ag/AgCl ที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากพืชชนิดต่างๆ ด้วยวิธี agar disc diffusion test พบว่าวัสดุซิลเวอร์นาโนทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ Ag/AgCl-R, Ag/AgCl-B, Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G ยับสามารถยับยั้งเชื้อ *E. coli* ได้ทั้ง 4 ชนิดโดย Ag/AgCl-G มีประสิทธิภาพมากที่สุดซึ่งแสดงค่า inhibition zone เท่ากับ 9.5±0.0 มิลลิเมตร ตามด้วย Ag/AgCl-B, Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-R ที่มีค่า inhibition zone เท่ากับ 9.0±0.0, 9.0±0.0 และ 8.75±0.75 มิลลิเมตร ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ *E. coli* ด้วยวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด plasmonic Ag/AgCl และ วัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag พบว่าวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl และ Ag มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อได้ใกล้เคียงกันแต่ Ag-B มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *E. coli* มากที่สุดตามด้วย Ag/AgCl-G, Ag/AgCl-B, Ag/AgCl-C, Ag-R, Ag/AgCl-R, Ag-G และ Ag-T ตามลำดับ

3. ผลการทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโนด้วยวิธี Minimal Inhibition concentration (MIC) และ Minimal bactericidal concentration (MBC) ด้วยเชื้อจุลินทรีย์ *Escherichia coli* TISTR 780

ตาราง 12 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโนต่อจุลินทรีย์ *E. coli* ด้วยวิธี MIC และ MBC

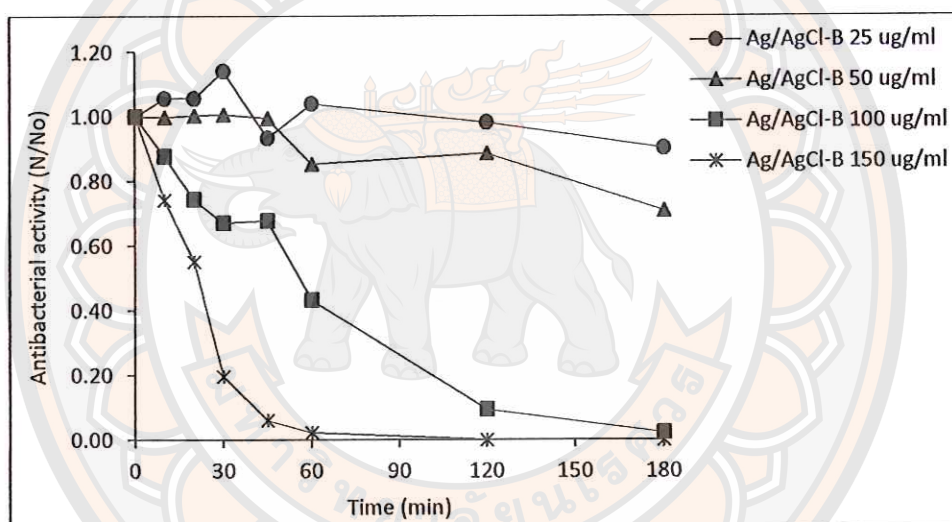
ชนิดวัสดุซิลเวอร์นาโน	ค่า MIC	ค่า MBC
	(ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)	(ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)
Ag-R	100	200
Ag-T	200	400
Ag-C	400	400
Ag-G	100	200
Ag-B	25	50
Ag-chem	400	>400
Ag/AgCl-R	50	50
Ag/AgCl-B	75	150
Ag/AgCl-G	18.75	37.5
Ag/AgCl-C	18.75	75

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโนด้วยวิธี Minimal Inhibition concentration (MIC) เพื่อหาค่าความเข้มข้นที่ต่ำที่สุดที่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ *E. coli* พบว่าวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl-G และ Ag/AgCl-C มีประสิทธิภาพมากที่สุดโดยค่าความเข้มข้นต่ำที่สุดที่สามารถยับยั้งเชื้อ *E. coli* เท่ากันคือ 18.75 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามด้วย Ag-B, Ag/AgCl-R, Ag/AgCl-B, Ag-R, Ag-G, Ag-T, Ag-C และ Ag-chemical ตามลำดับ โดยมีค่า MIC เท่ากับ 25, 50, 75, 100, 100, 200, 400 และ 400 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ หลังจากศึกษาค่า MIC แล้วจึงทำการศึกษาค่า Minimal bactericidal concentration (MBC) คือความเข้มข้นที่ต่ำที่สุดที่สามารถฆ่าเชื้อได้ พบว่า Ag/AgCl-G มีประสิทธิภาพสูงที่สุดโดยมีค่า MBC เท่ากับ 37.5 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามด้วย Ag/AgCl-R, Ag-B, Ag/AgCl-C, Ag/AgCl-B, Ag-R, Ag-G, Ag-T, Ag-C และ Ag-chemical ซึ่งมีค่า MBC เท่ากับ 50, 50, 75, 150, 200, 200, 400, 400 และมากกว่า 400 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ซึ่งจากทั้ง 2 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า Ag/AgCl-G มีประสิทธิภาพในการยับยั้งและฆ่าเชื้อ *E. coli* ได้มากที่สุด ส่วนวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิดอื่น ๆ จะมีค่า MBC ที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกับค่า MIC และจากผลการศึกษา

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของวัสดุในการยับยั้งและฆ่าเชื้อขึ้นอยู่กับ รูปร่าง ขนาดและการกระจายตัวของวัสดุแต่ละชนิดด้วย ที่วัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl-G ให้ผลการศึกษาที่ดีที่สุด เพราะ วัสดุนี้มีลักษณะ กลม มีการกระจายตัวที่ดี ขนาดอนุภาคเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่นๆ คือ 17.13 ± 6.25 นาโนเมตร อีกทั้งยังมีสารที่ช่วยในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่ได้จากสารสกัดกระเทียม ซึ่งคือสาร allicin ที่ช่วยส่งเสริมฤทธิ์ของ Ag/AgCl-G ให้มีประสิทธิภาพในการยับยั้งและฆ่าเชื้อ *E. coli* ได้มากที่สุด

4. ผลการทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโนด้วยวิธี Inactivation Test กับ เชื้อจุลินทรีย์ Escherichia coli TISTR 780

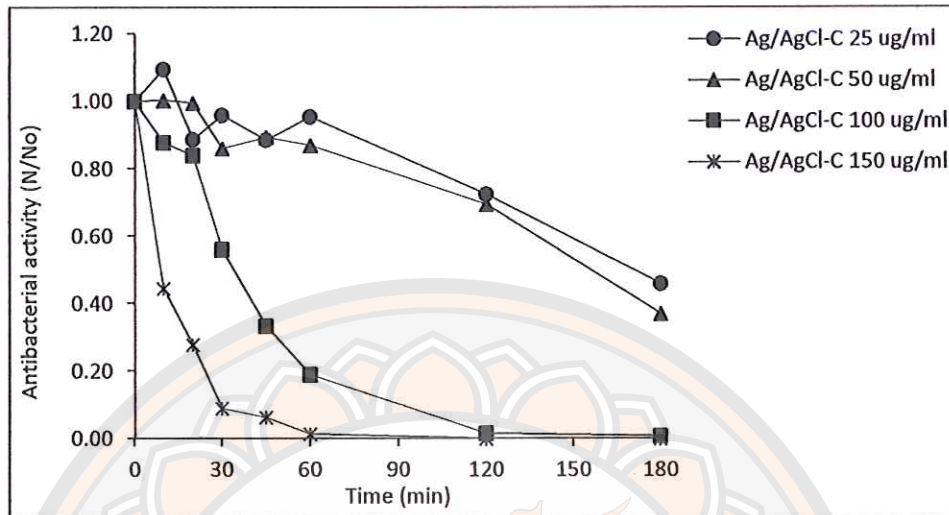
4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag/AgCl-B ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ *E. coli*



ภาพ 33 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag/AgCl-B ในการยับยั้งเชื้อ *E. coli*

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-B ดังแสดงในภาพ 33 ที่ความเข้มข้น 25, 50, 100 และ 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ Ag/AgCl-B เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และที่ความเข้มข้น 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สามารถลดเชื้อ *E. coli* ให้เหลือ 0 โคโลนี โดยใช้เวลา 120 นาที เมื่อเทียบกับความเข้มข้นที่ 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ที่ต้องใช้เวลามากกว่า 180 นาทีเพื่อลดจำนวนเชื้อจากเชื้อตั้งต้นที่ 10^3 cfu/ml ให้เหลือ 0 โคโลนี

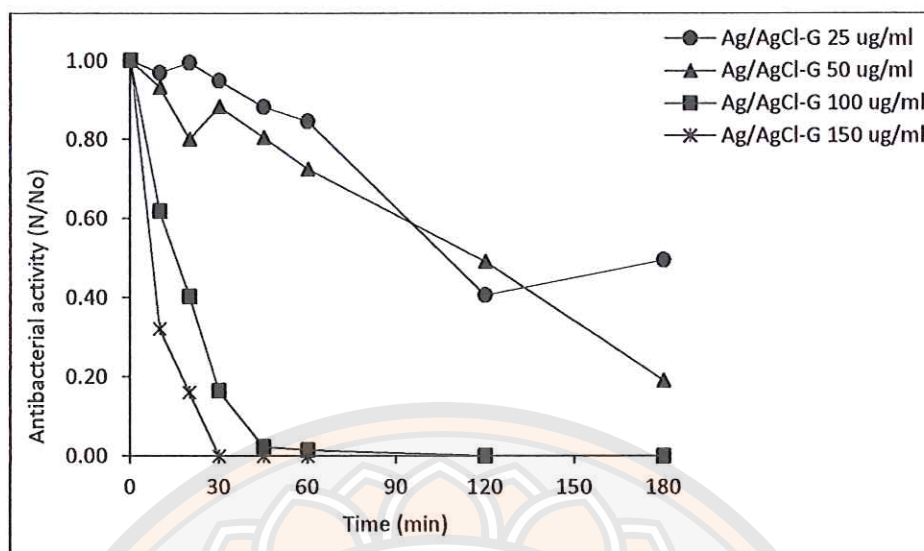
4.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag/AgCl-C ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ *E. coli*



ภาพ 34 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag/AgCl-C ในการยับยั้งเชื้อ *E. coli*

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-C ดังแสดงในภาพ 34 ที่ความเข้มข้น 25, 50, 100 และ 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ Ag/AgCl-C เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และที่ความเข้มข้น 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สามารถลดเชื้อ *E. coli* ให้เหลือ 0 โคโลนีโดยใช้เวลาประมาณ 70 นาที เมื่อเทียบกับความเข้มข้นที่ 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรที่ต้องใช้เวลามากกว่า 120 นาทีเพื่อลดจำนวนเชื้อจากเชื้อตั้งต้นที่ 10^3 cfu/ml ให้เหลือ 0 โคโลนี

4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag/AgCl-G ในการยับยั้งเชื้อ *E. coli*

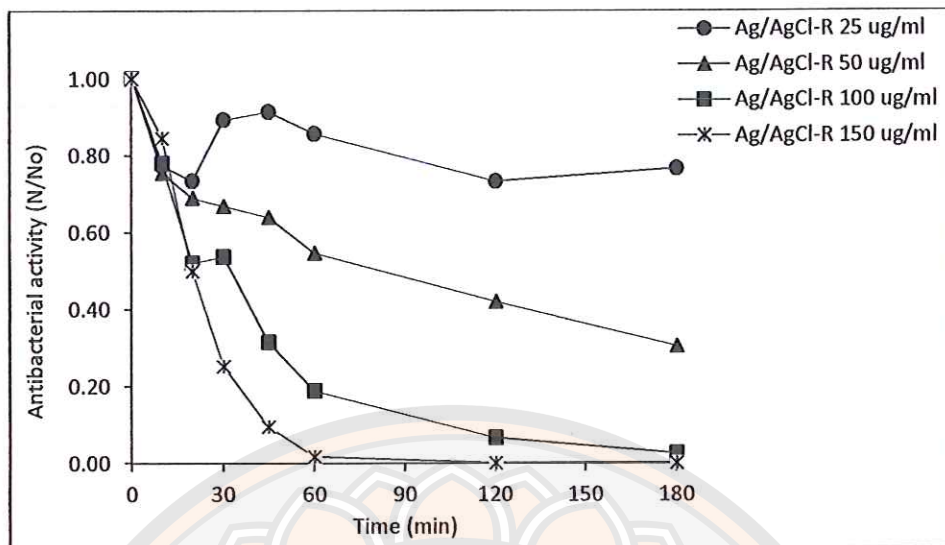


ภาพ 35 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag/AgCl-G ในการยับยั้งเชื้อ *E. coli*

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-G ที่ความเข้มข้น 25, 50, 100 และ 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ดังแสดงในภาพ 35 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ Ag/AgCl-G เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และที่ความเข้มข้น 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สามารถลดเชื้อ *E. coli* ให้เหลือ 0 โคโลนี โดยใช้เวลา 30 นาที เมื่อเทียบกับความเข้มข้นที่ 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ที่ต้องใช้เวลามากกว่า 90 นาทีเพื่อลดจำนวนเชื้อจากเชื้อตั้งต้นที่ 10^3 cfu/ml ให้เหลือ 0 โคโลนี

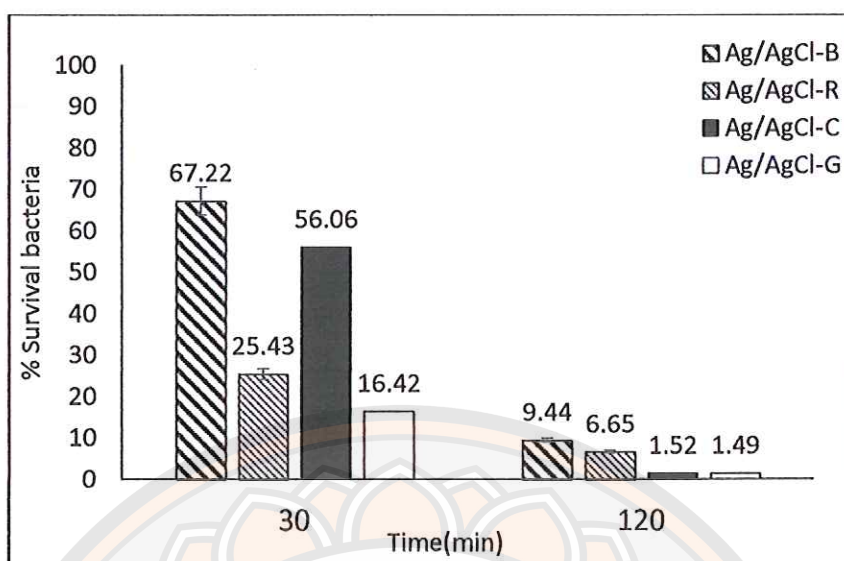
4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag/AgCl-R ในการยับยั้งเชื้อ *E. coli*

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-R ที่ความเข้มข้น 25, 50, 100 และ 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ดังแสดงในภาพ 36 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ Ag/AgCl-R เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และที่ความเข้มข้น 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สามารถลดเชื้อ *E. coli* จนไม่สามารถตรวจพบการเจริญของเชื้อโดยใช้เวลา 120 นาที เมื่อเทียบกับความเข้มข้นที่ 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ที่ต้องใช้เวลามากกว่า 180 นาทีเพื่อลดจำนวนเชื้อจากเชื้อตั้งต้นที่ 10^3 cfu/ml จนไม่สามารถตรวจพบการเจริญของเชื้อ



ภาพ 36 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag/AgCl-R ในการยับยั้งเชื้อ *E. coli*

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิดต่างๆ โดยการหาค่าเปอร์เซ็นต์การรอดของเชื้อ *E. coli* ที่เวลา 30 และ 120 นาที เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาทีวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-G มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณเชื้อได้มากที่สุดโดยเชื้อเหลือรอดอยู่ร้อยละ 16.42 จากจำนวนเชื้อเริ่มต้น ตามด้วย Ag/AgCl-R, Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-B ซึ่งมีปริมาณเชื้อที่เหลือรอดอยู่ร้อยละ 25.43, 56.06 และ 67.22 ตามลำดับ แต่เมื่อเวลาผ่านไปถึง 120 นาที วัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-G ยังคงมีประสิทธิภาพมากที่สุดมีเชื้อเหลือรอดเพียงร้อยละ 1.49 แต่มีการเปลี่ยนแปลงลำดับของประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อโดย Ag/AgCl-C สามารถยับยั้งเชื้อได้ดีในช่วงท้ายโดยมีเชื้อเหลือรอดอยู่ร้อยละ 1.52 และถึงตามด้วย Ag/AgCl-R และ Ag/AgCl-B ซึ่งลดปริมาณเชื้อเหลือร้อยละ 6.65 และ 9.44 ตามลำดับซึ่งผลการทดสอบนี้จะเห็นได้ว่าเวลาที่ใช้การทดสอบและลักษณะการออกฤทธิ์ของวัสดุแต่ละชนิดแตกต่างกัน คือ Ag/AgCl-G จะออกฤทธิ์ได้ดีตั้งแต่ช่วงแรกและเชื้อจะลดลงอย่างสม่ำเสมอแต่ Ag/AgCl-C จะออกฤทธิ์ได้ช้ากว่าถึงมาเห็นผลการลดเชื้อมากในช่วงเวลาที่ 120 นาทีเมื่อเทียบกับ Ag/AgCl-R ที่จะออกฤทธิ์ดีในช่วง 30 นาทีแรกแต่การออกฤทธิ์จะช้าลงในช่วงเวลาที่ 120 นาที จึงเห็นผลของ Ag/AgCl-R ว่าร้อยละการรอดของเชื้อจึงมากกว่าที่ใช้วัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-C



ภาพ 37 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ของซิลเวอร์นาโน ที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ที่มีต่อเชื้อ *E.coli* ที่เวลา 30 นาทีและ 120 นาที

จากการเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพในการยับยั้งและกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ *E.coli* ด้วยวัสดุนาโน ซิลเวอร์คลอไรด์ชนิดต่างดังแสดงในตาราง 13 พบว่าที่ความเข้มข้น 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรวัสดุนาโนซิลเวอร์คลอไรด์ทุกชนิดสามารถยับยั้งการเจริญจนไม่สามารถตรวจพบการเจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อทดสอบเลย แต่วัสดุชนิด Ag/AgCl-G สามารถยับยั้งเชื้อจนไม่สามารถตรวจพบการเจริญได้ที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุชนิด Ag/AgCl-G มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *E. coli* ได้ดีที่สุด

ตาราง 13 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของวัสดุซิลเวอร์นาโนแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นต่างๆ

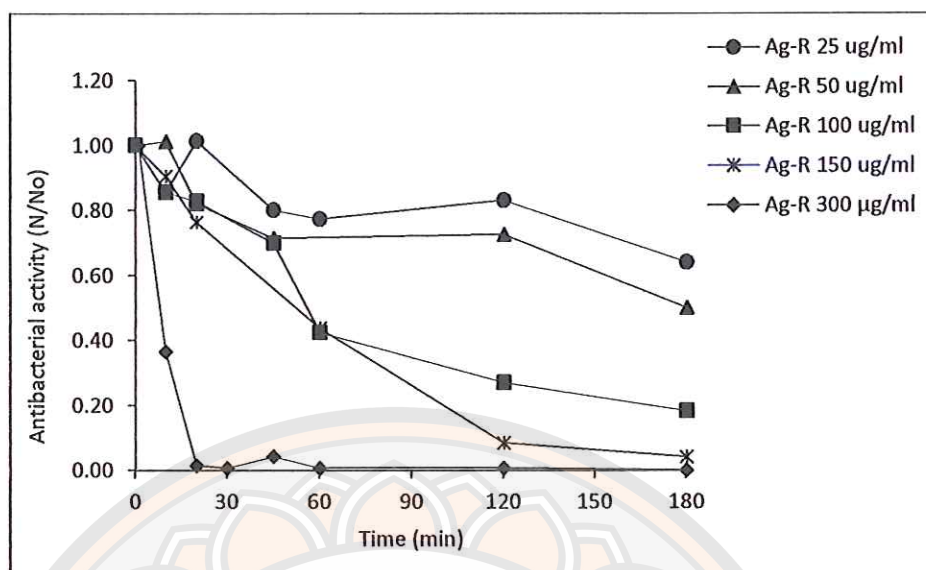
ชนิดวัสดุซิลเวอร์นาโน	ความเข้มข้นของวัสดุซิลเวอร์นาโน (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)	ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ (ร้อยละ)
Ag/AgCl-B	25	9.69
	50	29.05
	100	97.78
	150	100

ตาราง 13 (ต่อ)

ชนิดวัสดุซิลเวอร์นาโน	ความเข้มข้นของวัสดุซิลเวอร์นาโน (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)	ประสิทธิภาพในการยับยั้ง เชื้อจุลินทรีย์ (ร้อยละ)
Ag/AgCl-C	25	53.98
	50	62.87
	100	99.24
	150	100
Ag/AgCl-G	25	50.42
	50	80.85
	100	100
	150	100
Ag/AgCl-R	25	23.29
	50	69.42
	100	97.40
	150	100

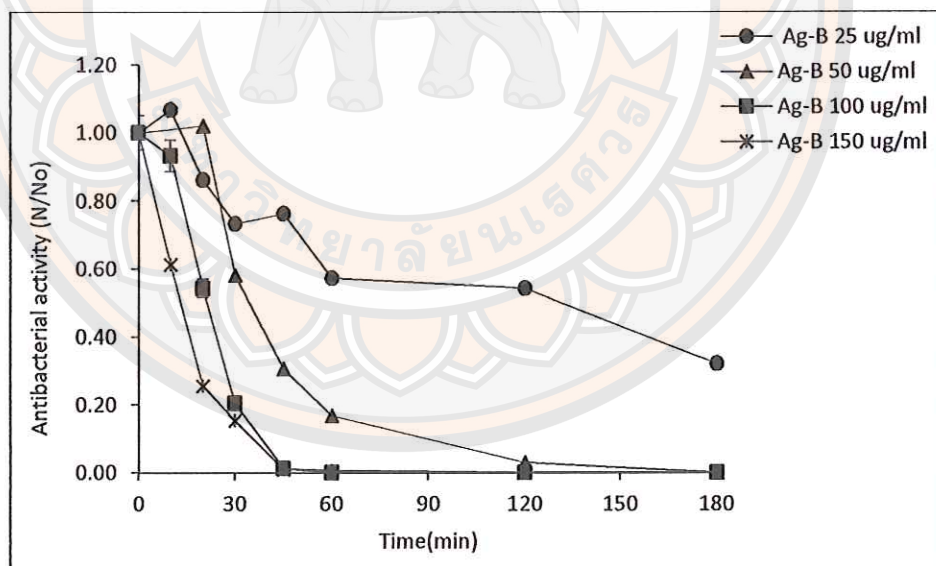
4.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag-R ในการยับยั้งเชื้อ *E. coli*

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของวัสดุนาโนชนิด Ag-R ที่ความเข้มข้น 25, 50, 100, 150 และ 300 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ดังแสดงในภาพ 38 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของ Ag-R เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และที่ความเข้มข้น 300 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สามารถลดเชื้อ *E. coli* จนไม่พบการเจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อใช้เวลาเพียง 30 นาที เมื่อเทียบกับความเข้มข้นที่ 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ที่เวลา 180 นาที ยังคงพบการเจริญของเชื้อ *E. coli* บนอาหารเลี้ยงเชื้อ หากต้องใช้ความเข้มข้น 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร จะต้องใช้เวลานานกว่า 180 นาทีถึงจะยับยั้งเชื้อจนไม่พบการเจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อได้



ภาพ 38 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag-R ในการยับยั้งเชื้อ *E. coli*

4.6 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag-B ในการยับยั้งเชื้อ *E. coli*



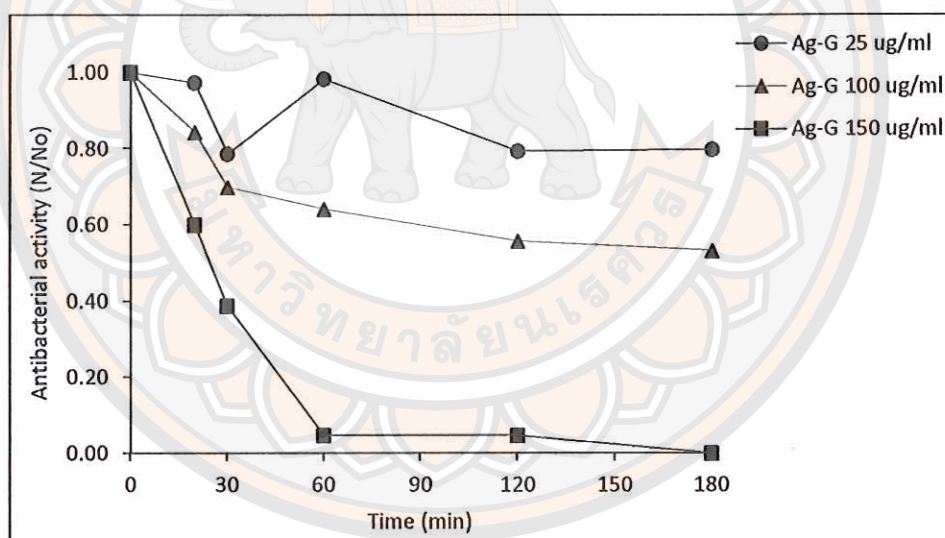
ภาพ 39 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag-B ในการยับยั้งเชื้อ *E. coli*

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของวัสดุนาโนชนิด Ag-B ที่ความเข้มข้น 25, 50, 100 และ 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ดังแสดงในภาพ 39 พบว่าเมื่อ

ความเข้มข้นของ Ag-B เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และที่ความเข้มข้น 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สามารถลดเชื้อ *E.coli* จนไม่พบการเจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อใช้เวลาเพียง 45 นาที ซึ่งที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ก็สามารถลดจำนวนเชื้อจนไม่พบการเจริญได้ที่เวลา 45 นาทีเช่นกัน จากผลแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ความเข้มข้นแค่ 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ก็เพียงพอที่จะยับยั้งเชื้อ *E.coli* ได้อย่างสมบูรณ์เช่นกัน

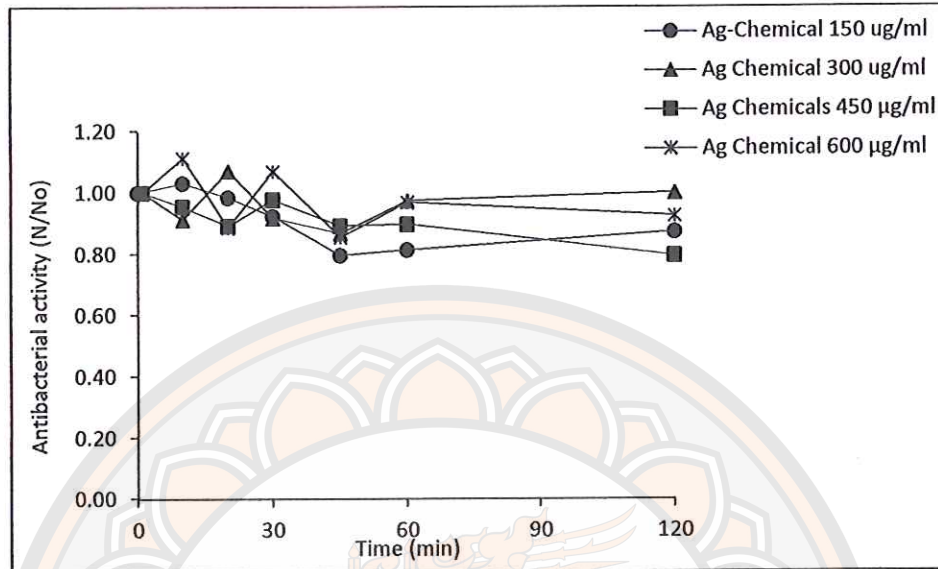
4.7 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag-G ในการยับยั้งเชื้อ *E.coli*

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของวัสดุนาโนชนิด Ag-G ที่ความเข้มข้น 25, 50, 100 และ 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ดังแสดงในภาพ 40 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ Ag-G เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และที่ความเข้มข้น 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สามารถลดเชื้อ *E.coli* จนไม่พบการเจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อใช้เวลา 180 นาที ซึ่งที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สามารถลดจำนวนเชื้อได้เพียงร้อยละ 46.75 แม้เวลาผ่านไป 180 นาที



ภาพ 40 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag-G ในการยับยั้งเชื้อ *E.coli*

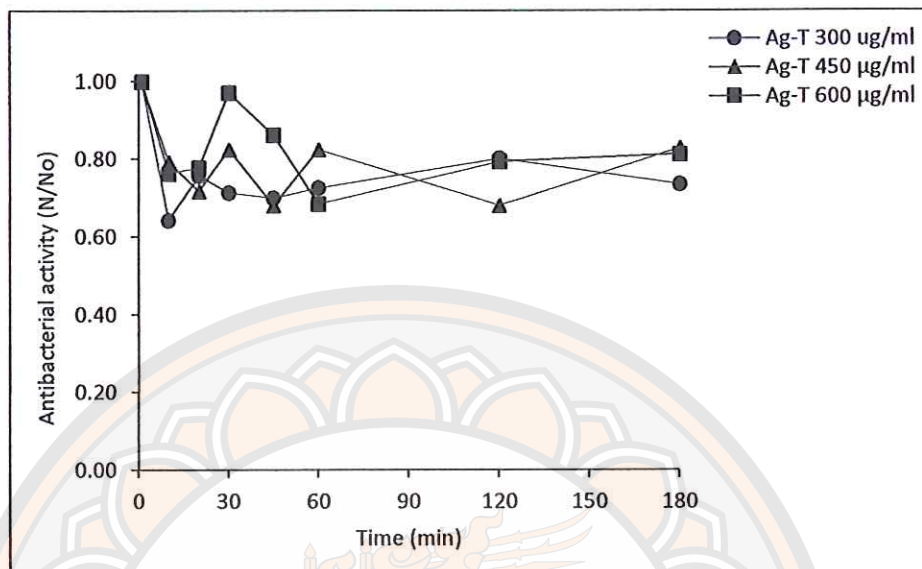
4.8 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag-Chemical ในการยับยั้งเชื้อ *E.coli*



ภาพ 41 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag-Chemical ในการยับยั้งเชื้อ *E. coli*

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของวัสดุนาโนชนิด Ag-Chemical ที่ความเข้มข้น 150, 300, 450 และ 600 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ดังแสดงในภาพ 41 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ Ag-Chemical เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ไม่สามารถลดจำนวนเชื้อลงได้อย่างสมบูรณ์ แม้ว่าจะใช้ Ag-Chemical ถึง 600 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร แล้วก็ตามแต่ก็สามารถลดจำนวนเชื้อได้เพียงร้อยละ 30 จากจำนวนเชื้อตั้งต้นที่ 10^3 cfu/ml จึงสามารถสรุปได้ว่า Ag-Chemical ไม่สามารถยับยั้งเชื้อ *E.coli* ได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิดอื่น ๆ ที่มีการนำสารสกัดจากพืชมาใช้ในการสังเคราะห์ สาเหตุอาจมาจากการที่ Ag-Chemical ไม่มีการกระจายตัวที่ดีและตกตะกอนเร็วเมื่อเทียบกับวัสดุทดสอบชนิดอื่น ๆ ทำให้พื้นผิวที่ใช้ทำปฏิกิริยากับเซลล์จุลินทรีย์มีน้อยจึงส่งผลต่อประสิทธิภาพในการยับยั้งและกำจัดเชื้อให้ต่ำลงอีกทั้งขนาดของวัสดุ Ag-Chemical มีขนาดผลึกใหญ่ที่สุด คือประมาณ 79.6 ± 4.6 นาโนเมตร ทำให้เข้าเซลล์ได้ยากเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการยับยั้งและกำจัดเชื้อจุลินทรีย์

4.9 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag-T ในการยับยั้งเชื้อ *E. coli*



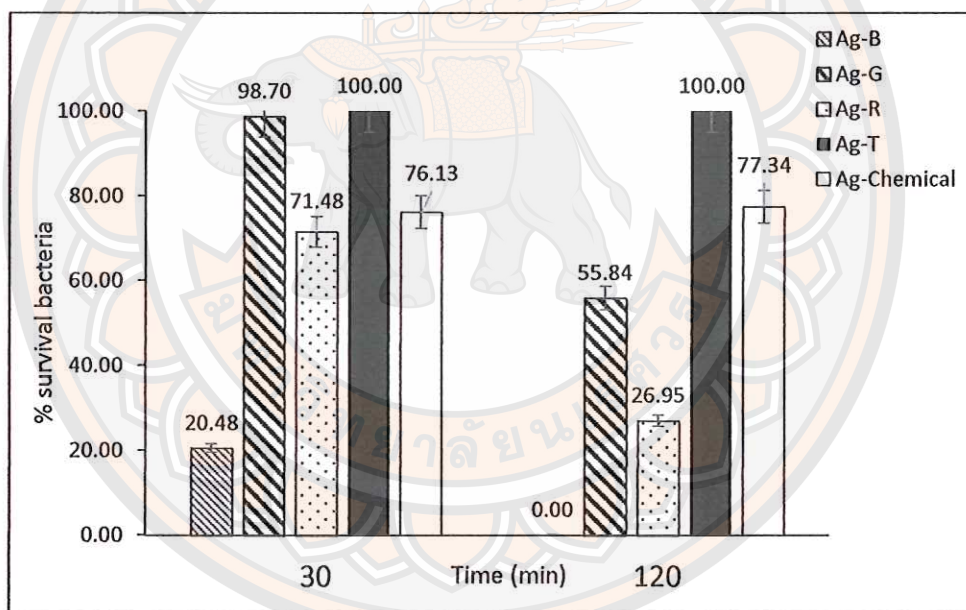
ภาพ 42 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Ag-T ในการยับยั้งเชื้อ *E. coli*

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของวัสดุนาโนชนิด Ag-T ที่ความเข้มข้น 150, 300, 450 และ 600 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ดังแสดงในภาพ 42 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ Ag-T เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ไม่สามารถลดจำนวนเชื้อลงได้อย่างสมบูรณ์ แม้ว่าจะใช้ Ag-T ถึง 600 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สามารถลดจำนวนเชื้อได้เพียงร้อยละ 20 จากจำนวนเชื้อตั้งต้นที่ 10^3 cfu/ml จึงสามารถสรุปได้ว่า Ag-T ไม่สามารถยับยั้งเชื้อ *E. coli* ได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิดที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากพืชชนิดอื่น สารกลุ่มโพลีฟีนอลที่มีในใบชาไม่มีสารที่เสริมฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์เหมือนกับพืชชนิดอื่นที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิดต่างๆโดยการหาค่าร้อยละการรอดของเชื้อ *E. coli* ที่เวลา 30 และ 120 นาที ดังแสดงในภาพ 43 เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที วัสดุนาโนชนิด Ag-B มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณเชื้อได้มากที่สุดโดยเชื้อเหลือรอดอยู่ร้อยละ 20.48 จากจำนวนเชื้อเริ่มต้น ตามด้วย Ag-R, Ag-Chemical, Ag-G และ Ag-T ซึ่งมีปริมาณเชื้อที่เหลือรอดอยู่ร้อยละ 71.48, 76.13, 98.70 และ 100 ตามลำดับ แต่เมื่อเวลาผ่านไปถึง 120 นาที

วัสดุนาโนชนิด Ag-B ยังคงมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยสามารถกำจัดเชื้อได้อย่างสมบูรณ์ไม่มีการเจริญของเชื้อในอาหารเลี้ยงเชื้อเลย ตามด้วย Ag-R, Ag-G, Ag-Chemical

และ Ag-T ซึ่งมีปริมาณเชื้อที่เหลือรอดอยู่ร้อยละ 26.95, 55.84, 77.34 และ 134.19 ตามลำดับ โดยที่วัสดุทดสอบชนิด Ag-Chemical ประสิทธิภาพในการยับยั้งและกำจัดเชื้อไม่มีการเปลี่ยนแปลงแม้เวลาผ่านไป 120 นาที ซึ่งหมายความว่าหลังจากผ่าน 30 นาทีวัสดุทดสอบชนิด Ag-Chemical ไม่สามารถออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อให้ลดลงได้อีก ส่วนวัสดุทดสอบชนิด Ag-G ยังสามารถลดจำนวนเชื้อได้เพิ่มขึ้นที่เวลา 120 นาทีที่สามารถลดเชื้อเพิ่มได้อีกร้อยละ 42.86 จากที่เวลา 30 นาที ที่ลดเชื้อลงจากเชื้อตั้งต้นได้เพียงร้อยละ 1.3 และสำหรับวัสดุทดสอบชนิด Ag-T ไม่สามารถลดเชื้อและเชื้อยังมีการเจริญเพิ่มจำนวนขึ้นอีกด้วย ซึ่งการผลการทดสอบนี้จะเห็นได้ว่าเวลาที่ใช้การทดสอบและลักษณะการออกฤทธิ์ของวัสดุแต่ละชนิดแตกต่างกัน คือ Ag-B และ Ag-R จะออกฤทธิ์ได้ดีตั้งแต่ช่วงแรกและเชื้อจะลดลงอย่างสม่ำเสมอ แต่ Ag-G จะออกฤทธิ์ได้ช้ากว่าถึงมาเห็นผลการลดเชื้อมากในช่วงเวลาที่ 120 นาทีเมื่อเทียบกับ Ag-B ที่จะออกฤทธิ์ดีในช่วง 30 นาทีแรก



ภาพ 43 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ของซิลเวอร์นาโน ที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ที่มีต่อเชื้อ *E.coli* ที่เวลา 30 นาทีและ 120 นาที

ตาราง 14 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ของวัสดุซิลเวอร์นาโน แต่ละชนิดที่ความเข้มข้นต่างๆ

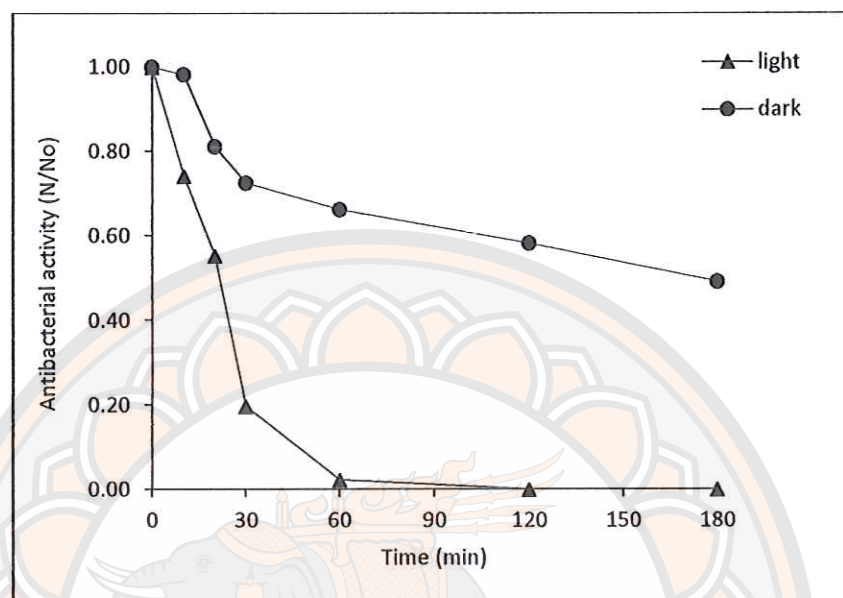
ชนิดวัสดุซิลเวอร์นาโน	ความเข้มข้นของวัสดุซิลเวอร์นาโน (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)	ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ (ร้อยละ)
Ag-B	25	67.94
	50	100
	100	100
	150	100
Ag-G	25	20.27
	100	46.75
	150	100
Ag-R	25	25.16
	50	50.59
	100	78.54
	150	95.31

5. ผลการศึกษาผลของแสงต่อประสิทธิภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิดซิลเวอร์คลอไรด์ (Plamonic Ag/AgCl nanoparticles) ด้วยวิธี Inactivation Test กับเชื้อจุลินทรีย์ *Escherichia coli* TISTR 780

5.1 ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ Ag/AgCl-B เข้มข้น 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ในการยับยั้งเชื้อ *E. coli* ภายใต้สภาวะมีแสงและไม่มีแสง

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุ Ag/AgCl-B ที่ความเข้มข้น 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรที่มีต่อการยับยั้งเชื้อ *E. coli* เปรียบเทียบระหว่างการทดสอบภายใต้สภาวะมีแสง (visible light) และ ภายใต้สภาวะไม่มีแสง พบว่าวัสดุ Ag/AgCl-B ออกฤทธิ์ได้ดีที่สภาวะที่มีแสงมากกว่าภายใต้สภาวะไม่มีแสง โดยภายใต้สภาวะที่วัสดุทำปฏิกิริยาภายใต้แสงสามารถยับยั้งเชื้อจากเชื้อตั้งต้น 10^3 cfu/ml จนไม่พบการเจริญของเชื้อบนอาหารเลี้ยงเชื้อภายในเวลา 120 นาที แต่

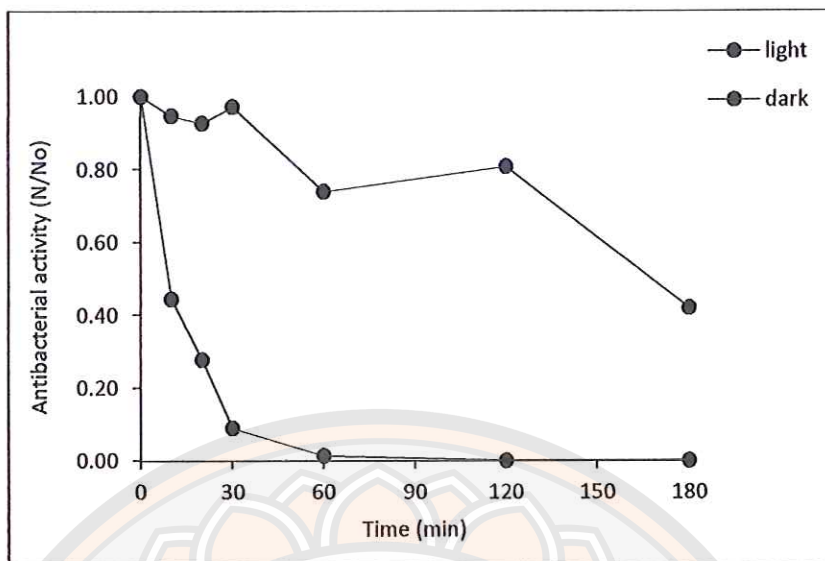
ภายใต้สภาวะไม่มีแสงเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาทีวัสดุสามารถออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อให้ลดลงได้ร้อยละ 50.86 เท่านั้น ดังแสดงในภาพ 44



ภาพ 44 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *E.coli* ของ Ag/AgCl-B ที่ความเข้มข้น 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ภายใต้สภาวะมีและไม่มีแสง

5.2 ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ Ag/AgCl-C เข้มข้น 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรในการยับยั้งเชื้อ *E. coli* ภายใต้สภาวะมีแสงและไม่มีแสง

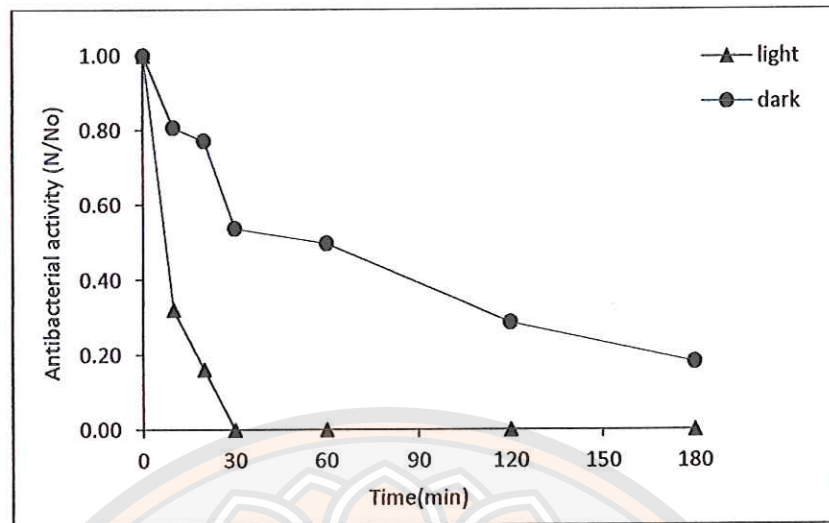
ผลการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุ Ag/AgCl-C ที่ความเข้มข้น 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรที่มีต่อการยับยั้งเชื้อ *E. coli* เปรียบเทียบระหว่างการทดสอบภายใต้สภาวะมีแสง (visible light) และ ภายใต้สภาวะไม่มีแสง พบว่าวัสดุ Ag/AgCl-C ออกฤทธิ์ได้ดีที่สภาวะที่มีแสงมากกว่าภายใต้สภาวะไม่มีแสง โดยภายใต้สภาวะที่วัสดุทำปฏิกิริยาภายใต้แสงสามารถยับยั้งเชื้อจากเชื้อตั้งต้น 10^3 cfu/ml จนไม่พบการเจริญของเชื้อบนอาหารเลี้ยงเชื้อภายในเวลา 120 นาที แต่ภายใต้สภาวะไม่มีแสงเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาทีวัสดุสามารถออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อให้ลดลงได้ร้อยละ 58.06 เท่านั้น ดังแสดงในภาพ 45



ภาพ 45 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *E. coli* ของ Ag/AgCl-C ที่ความเข้มข้น 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรภายใต้สภาวะมีและไม่มีแสง

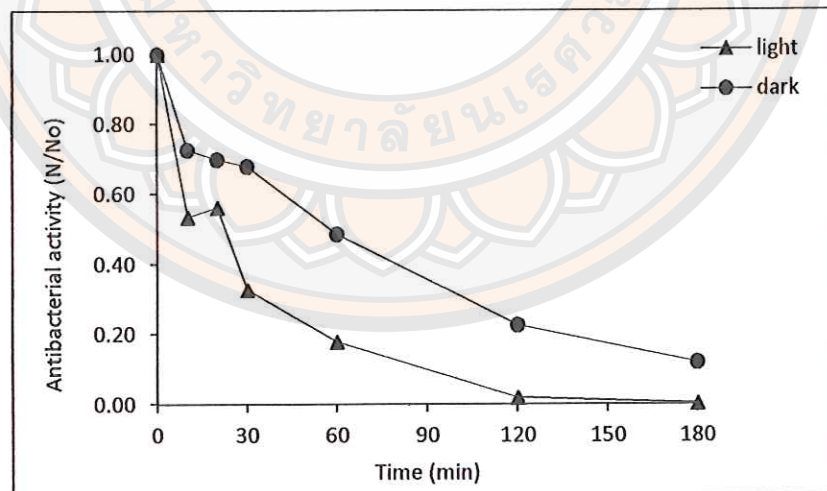
5.3 ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ Ag/AgCl-G เข้มข้น 150 µg/ml ในการยับยั้งเชื้อ *E. coli* ภายใต้สภาวะมีแสงและไม่มีแสง

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุ Ag/AgCl-G ที่ความเข้มข้น 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรที่มีต่อการยับยั้งเชื้อ *E. coli* เปรียบเทียบระหว่างการทดสอบภายใต้สภาวะมีแสง (visible light) และ ภายใต้สภาวะไม่มีแสง พบว่าวัสดุ Ag/AgCl-G ออกฤทธิ์ได้ดีที่สภาวะที่มีแสงมากกว่าภายใต้สภาวะไม่มีแสง โดยภายใต้สภาวะที่วัสดุทำปฏิกิริยาภายใต้แสงสามารถยับยั้งเชื้อจากเชื้อตั้งต้น 10^3 cfu/ml จนไม่พบการเจริญของเชื้อบนอาหารเลี้ยงเชื้อภายในเวลา 30 นาที แต่ภายใต้สภาวะไม่มีแสงเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาทีวัสดุสามารถออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อให้ลดลงได้ร้อยละ 81.87 เท่านั้น ดังแสดงในภาพ 46



ภาพ 46 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *E. coli* ของ Ag/AgCl-G ที่ความเข้มข้น 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรภายใต้สภาวะมีและไม่มีแสง

5.4 ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ Ag/AgCl-R เข้มข้น 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรในการยับยั้งเชื้อ *E. coli* ภายใต้สภาวะมีแสงและไม่มีแสง



ภาพ 47 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *E. coli* ของ Ag/AgCl-R ที่ความเข้มข้น 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรภายใต้สภาวะมีและไม่มีแสง

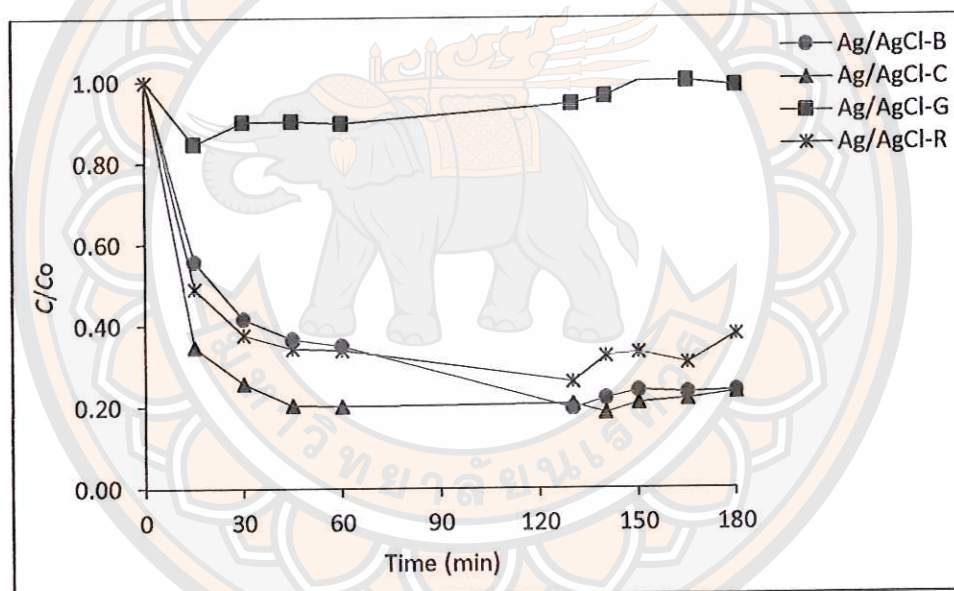
ผลการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุ Ag/AgCl-R ที่ความเข้มข้น 150 ไมโครกรัม ต่อมิลลิลิตร ที่มีต่อการยับยั้งเชื้อ *E. coli* เปรียบเทียบระหว่างการทดสอบภายใต้สภาวะมีแสง (visible light) และ ภายใต้สภาวะไม่มีแสง พบว่าวัสดุ Ag/AgCl-R ออกฤทธิ์ได้ดีที่สภาวะที่มีแสง มากกว่าภายใต้สภาวะไม่มีแสง โดยภายใต้สภาวะที่วัสดุทำปฏิกิริยาภายใต้แสงสามารถยับยั้งเชื้อ จากเชื้อตั้งต้น 10^3 cfu/ml จนไม่พบการเจริญของเชื้อบนอาหารเลี้ยงเชื้อภายในเวลา 180 นาที แต่ ภายใต้สภาวะไม่มีแสงเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาทีวัสดุสามารถออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อให้ลดลงได้ร้อยละ 88 เท่านั้น ดังแสดงในภาพ 47

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ *E. coli* ของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด plasmonic Ag/AgCl nanoparticles ทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ Ag/AgCl-B, Ag/AgCl-C, Ag/AgCl-G และ Ag/AgCl-R พบว่าที่สภาวะมีแสง วัสดุชนิด Ag/AgCl-G มีประสิทธิภาพมากที่สุดตามด้วย Ag/AgCl-C, Ag/AgCl-B และ Ag/AgCl-R ตามลำดับ แต่ที่สภาวะไม่มีแสง Ag/AgCl-R กลับมี ประสิทธิภาพมากที่สุดตามด้วย Ag/AgCl-G, Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-B ตามลำดับ สาเหตุที่ การทดลองภายใต้แสงวิธีเบลินั้นดีกว่าการทดลองในที่มืดเพราะอนุภาคซิลเวอร์คลอไรด์ (Plasmonic Ag/AgCl) นั้นมีลักษณะ co-catalysis/semiconductor ที่จะต้องใช้พลังงานแสงในการกระตุ้นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากชั้นวาเลนซ์ (valence band: VB) ไปที่ชั้นคอนดักชัน (conduction band: CM) ซึ่งในขั้นตอนที่อนุภาคส่วน Ag รับพลังงานจากแสงเพื่อกระตุ้น อิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ไปที่อนุภาคส่วน AgCl เพื่อไปเกิดปฏิกิริยารีดักชัน นั้นจะทำให้เกิดซิลเวอร์ ไฮดรอกไซด์ (Ag^+) ขึ้นมาซึ่งซิลเวอร์ไฮดรอกไซด์จะเข้าไปในเซลล์และทำปฏิกิริยากับโมเลกุลดีเอ็นเอจนเซลล์ ของเชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้ ผลกระทบของซิลเวอร์นาโนแบบนี้สามารถเกิดขึ้นได้ทั้ง ในเชื้อจุลินทรีย์แกรมบวกและแกรมลบทำให้การทดลองภายใต้แสงวิธีเบลินสามารถกำจัด เชื้อจุลินทรีย์ได้มากกว่าการทดลองที่ไม่มีแสงซึ่งอาศัยกลไกที่อนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถเข้าสู่ ภายในเชื้อจุลินทรีย์และทำปฏิกิริยากับไรโบโซม ส่งผลให้เกิดความผิดปกติในการทำงานของเอนไซม์และโปรตีนซึ่งจำเป็นต่อกระบวนการสร้าง ATP จนส่งผลให้เชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถสร้าง ATP ได้จึงทำให้เชื้อจุลินทรีย์ตาย โดยที่หากทำภายใต้แสงวิธีเบลินแล้วนั้นสามารถใช้ทั้งสองกลไกในการ กำจัดเชื้อจุลินทรีย์นั่นเอง

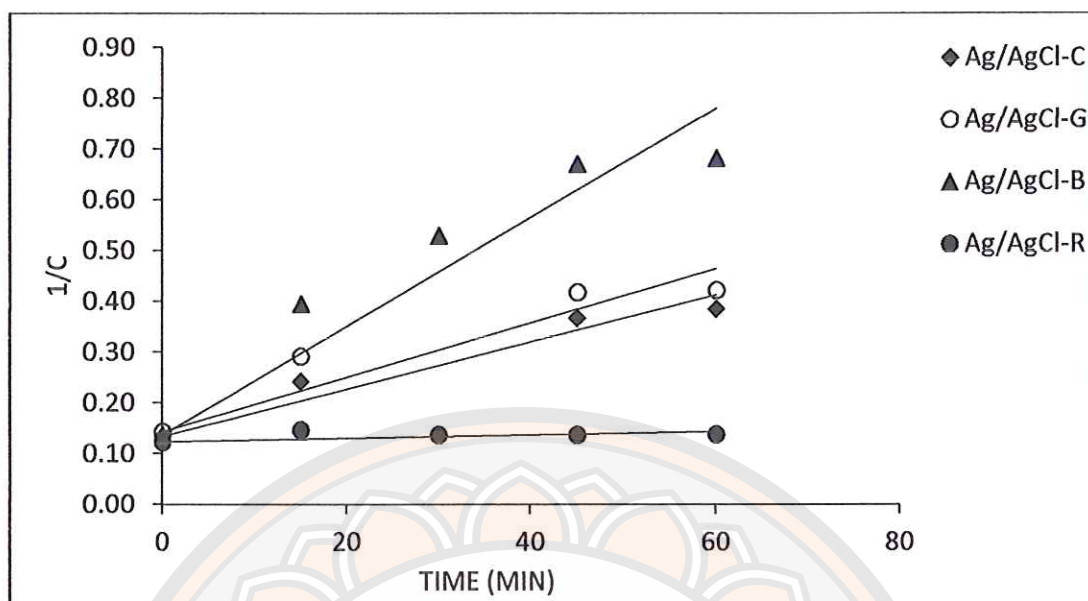
การศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl ในการบำบัดสารสีชนิดเมทิลีนบลู (Methylene blue: MB) ในน้ำภายใต้แสงวิสิเบิลด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (photocatalytic)

1. ผลการศึกษาผลของชนิดวัสดุนาโน (Various types of Ag/AgCl nanoparticles) ต่อการบำบัดสารสีชนิดเมทิลีนบลู (Methylene blue) ในน้ำ

จากผลการศึกษานิตของวัสดุนาโนต่อการบำบัดสารสีชนิดเมทิลีนบลู ดังแสดงในภาพ 48 พบว่าวัสดุนาโน Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-B มีประสิทธิภาพในการบำบัดใกล้เคียงกันที่ประมาณร้อยละ 76 ทั้งสองชนิด แต่ Ag/AgCl-G กลับมีประสิทธิภาพในการบำบัดแย่ที่สุดสามารถบำบัดสีเมทิลีนบลูได้เพียงร้อยละ 1.2 เท่านั้นจากความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรที่พีเอช 7



ภาพ 48 แสดงผลของชนิดวัสดุนาโนต่อการย่อยสลายสารสีชนิดเมทิลีนบลูในน้ำ



ภาพ 49 แสดงกราฟ $1/C$ กับเวลาในการย่อยสลายสารสีชนิดเมทิลลีนบลูในน้ำ โดยใช้วัสดุซิลเวอร์คลอไรด์ชนิดต่างๆ

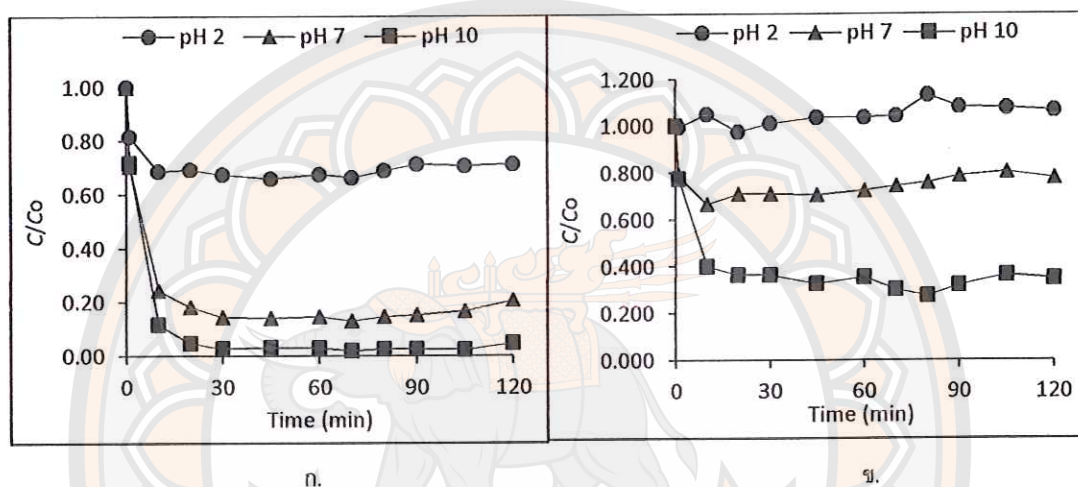
ตาราง 15 แสดงพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีชนิดเมทิลลีนบลูในน้ำโดยใช้วัสดุซิลเวอร์คลอไรด์ชนิดต่างๆ

Ag NPs	pH	MB (mg/L)	Dose (g/L)	Reaction rate, r (mg/L*min)	Reaction constant, k	t 1/2 (hr.)	% removal
Ag/AgCl-B	7	10	0.4	0.8688	0.0107	13	70.82
Ag/AgCl-R	7	10	0.4	-0.356	0.0003	413	-13.66
Ag/AgCl-C	7	10	0.4	0.9327	0.0046	29	71.34
Ag/AgCl-G	7	10	0.4	0.8564	0.0054	27	36.62

เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาค่าทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีดังที่แสดงในภาพ 49 และตาราง 15 เพื่อหาค่าอัตราเร็วในการย่อยสลายเริ่มต้น, r (มก/ล.ต่อนาที) และค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยา, k (ต่อนาที) พบว่า Ag/AgCl-C ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดมากที่สุดที่ร้อยละ 76.438 มีค่าอัตราเร็วในการย่อยสลายเริ่มต้น (r) เท่ากับ 0.9327 มก/ล.ต่อนาที และมีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 0.0046 ต่อนาที ซึ่งจากผลการศึกษานิตของวัสดุนาโนมีผลต่อการ

บำบัดสารสีเมทิลีนบลู ปัจจัยที่สำคัญที่อาจส่งผลต่อการบำบัดสารสีทดสอบคือ สารสกัดจากพืชที่เลือกใช้ในการสังเคราะห์วัสดุนาโนนั่นเอง Ag/AgCl-C ที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากกาแฟ ซึ่งมีสารกลุ่มโพลีฟีนอลเป็นองค์ประกอบ จากผลการทดสอบสามารถช่วยยืนยันว่าสารกลุ่มดังกล่าวช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพในการบำบัดหรือย่อยสลายสารสีให้กับวัสดุซิลเวอร์นาโน

2. การศึกษาผลของค่าพีเอช (Varies pH) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีชนิดเมทิลีนบลูในน้ำของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G



ภาพ 50 แสดงผลของค่าความเป็นกรดต่างต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีชนิดเมทิลีนบลูในน้ำของวัสดุนาโนชนิด(ก) Ag/AgCl-C และ(ข) Ag/AgCl-G

จากผลการศึกษาค่าพีเอชต่อการบำบัดสารสีชนิดเมทิลีนบลูดังแสดงในภาพ 50 พบว่าวัสดุชนิด Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีที่สุดที่ค่าพีเอช 10 ซึ่งเป็นต่างโดยที่ Ag/AgCl-C สามารถบำบัดได้ร้อยละ 95 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารสีได้ดีกว่า Ag/AgCl-G ที่บำบัดได้เพียงร้อยละ 65 และวัสดุซิลเวอร์นาโนทั้ง 2 ชนิดบำบัดได้แย่มากที่สุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 ที่มีสภาวะเป็นกรดซึ่งจากผลดังกล่าวสอดคล้องกับการคาดการณ์ด้วยค่า pH_{pzc} ของวัสดุนาโนและค่า pK_a ของสารสีซึ่งการคำนวณจากค่า pH_{pzc} วัสดุซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากธรรมชาติมีค่า pH_{pzc} ในสภาวะที่เป็นกรดซึ่งเมื่อค่าพีเอชมากขึ้นและมีสภาวะเป็นด่างจะทำให้ประจุที่ผิวของวัสดุซิลเวอร์นาโนเป็นประจุลบ และสารสีที่สภาวะเป็นด่างจะมีประจุที่ผิวอนุภาคเป็นบวกทำให้สามารถจับกันได้ดีจึงเป็นสาเหตุให้วัสดุซิลเวอร์นาโนทั้ง 2 ชนิดทำปฏิกิริยาได้ดีที่สุดในสภาวะเป็นด่างนั่นเอง

ตาราง 16 แสดงพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีชนิดเมทิลีนบลู
 ในน้ำโดยใช้วัสดุ Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G ที่ค่าความเป็นกรดต่างๆ

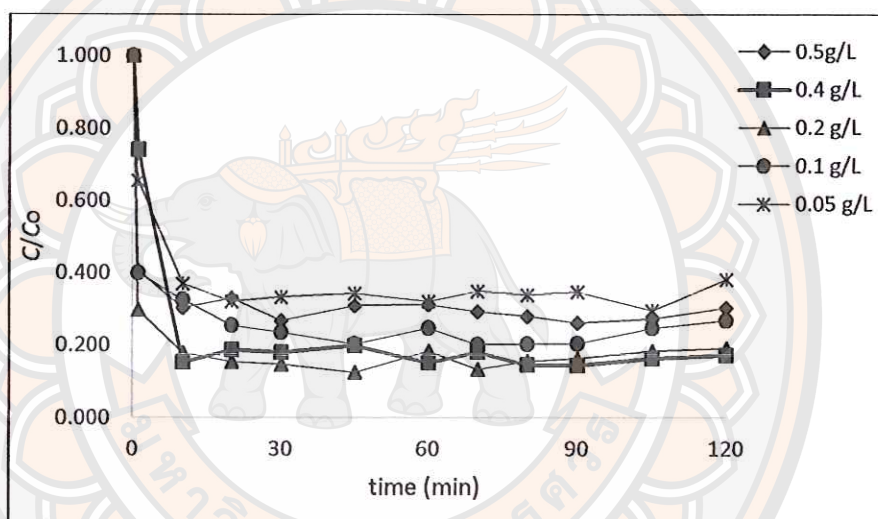
Ag NPs	pH	MB (mg/L)	Dose (g/L)	Reaction rate, r	Reaction constant, k	% removal
Ag/AgCl-C	2	10	0.4	0.3519	0.0019	28.64865
	7	10	0.4	0.9539	0.0206	79.43702
	10	10	0.4	0.9728	0.1062	95.28487
Ag/AgCl-G	2	10	0.4	-0.05	0.00003	-6.81818
	7	10	0.4	-0.094	0.0018	22.07729
	10	10	0.4	0.6986	0.0074	65.14172

เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาค่าทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีดังที่แสดงในตาราง 14 เพื่อหาค่าอัตราเร็วในการย่อยสลายเริ่มต้น, r (มก/ล.ต่อนาที) และค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยา, k (ต่อนาที) พบว่า Ag/AgCl-C ที่ค่าพีเอช 10 มีประสิทธิภาพในการบำบัดมากที่สุดที่ร้อยละ 95.29 มีค่าอัตราเร็วในการย่อยสลายเริ่มต้น (r) เท่ากับ 0.98 มก/ล.ต่อนาที และมีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 0.11 ต่อนาที และ Ag/AgCl-G ที่ค่าพีเอช 10 มีประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ที่ร้อยละ 65.14 มีค่าอัตราเร็วในการย่อยสลายเริ่มต้น (r) เท่ากับ 0.6986 มก/ล.ต่อนาที และมีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 0.0074 ต่อนาที ซึ่งจากผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าค่าความเป็นกรดต่างมีผลต่อการบำบัดสารสีเมทิลีนบลูของวัสดุซิลเวอร์นาโนทั้ง 2 ชนิด

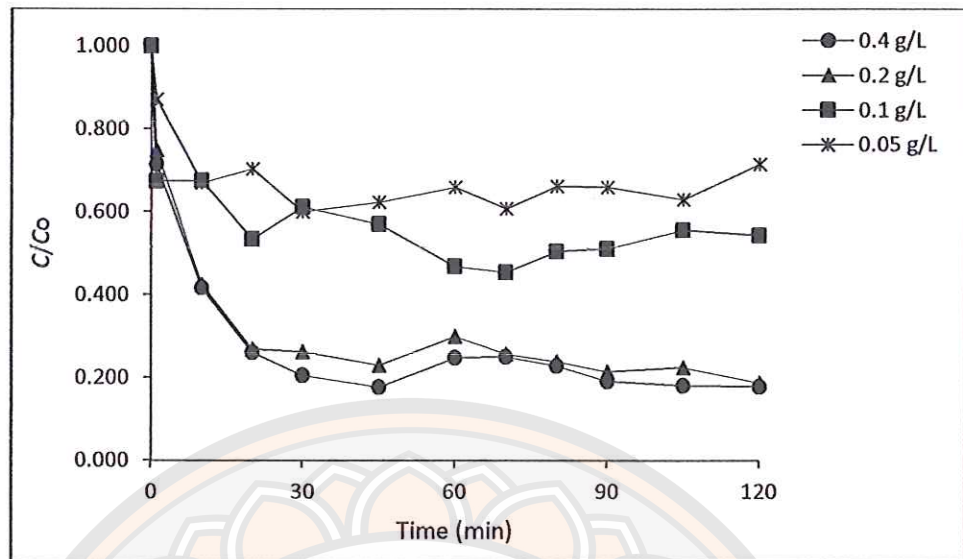
3. การศึกษามลของปริมาณวัสดุนาโน (Varies dose of Ag/AgCl nanoparticles) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีชนิดเมทิลีนบลูในน้ำของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G

จากผลการศึกษามลของปริมาณวัสดุนาโนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีเมทิลีนบลูที่ค่าพีเอช 10 ความเข้มข้นของสารสีที่ใช้เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเปลี่ยนค่าปริมาณวัสดุทดสอบที่ 0.05, 0.1, 0.2 และ 0.4 กรัมต่อลิตร พบว่าปริมาณ (dose) ของวัสดุนาโนทั้งสองชนิด ได้แก่ Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G พบว่าที่ปริมาณ 0.4 กรัมต่อลิตรเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดสำหรับวัสดุทั้งสองชนิด และประสิทธิภาพในการบำบัดสารสีของวัสดุทั้งสองชนิดจะลดลงเมื่อปริมาณวัสดุที่ใช้ลดลงไปด้วยดังแสดงในภาพ 51 และ 52 และจากการทดลองว่าถ้าหาก

มีการใช้ปริมาณที่มากกว่า 0.4 กรัมต่อลิตรจะทำให้การบำบัดสารสีดีขึ้นหรือไม่ จากผลการทดสอบกับวัสดุชนิด Ag/AgCl-C พบว่าเมื่อใช้วัสดุที่ปริมาณ 0.5 กรัมต่อลิตรประสิทธิภาพในการบำบัดสารสีของ Ag/AgCl-C กลับมีประสิทธิภาพน้อยกว่าใช้ปริมาณที่ 0.1 กรัมต่อลิตร ดังแสดงในภาพ 51 ซึ่งจากผลสามารถบอกได้ว่าในกรณีที่ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือคะตะลิสที่ใช้ในการบำบัดสารมลพิษเป็นของแข็ง หากใช้ในปริมาณที่มากเกินไปก็ไม่ได้หมายความว่าประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดี เนื่องจากเมื่อตัวคะตะลิสเป็นของแข็งแล้วนั้น หากใช้ปริมาณมากเกินไปจะไปบดบังการเข้ามาของพลังงานแสงที่ใช้ในการกระตุ้นการทำงานของตัวคะตะลิสทำให้ตัววัสดุไม่ได้รับพลังงานที่จะกระตุ้นได้อย่างเต็มที่จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพของวัสดุในการบำบัดไปด้วย

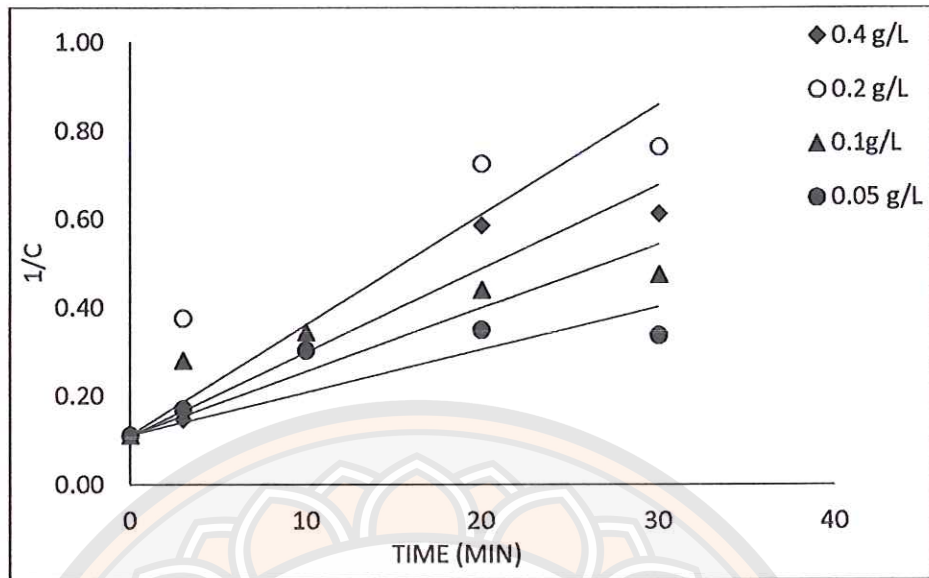


ภาพ 51 ผลของปริมาณวัสดุในต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีชนิดเมทิลลีนบลูในน้ำของวัสดุชนิด Ag/AgCl-C

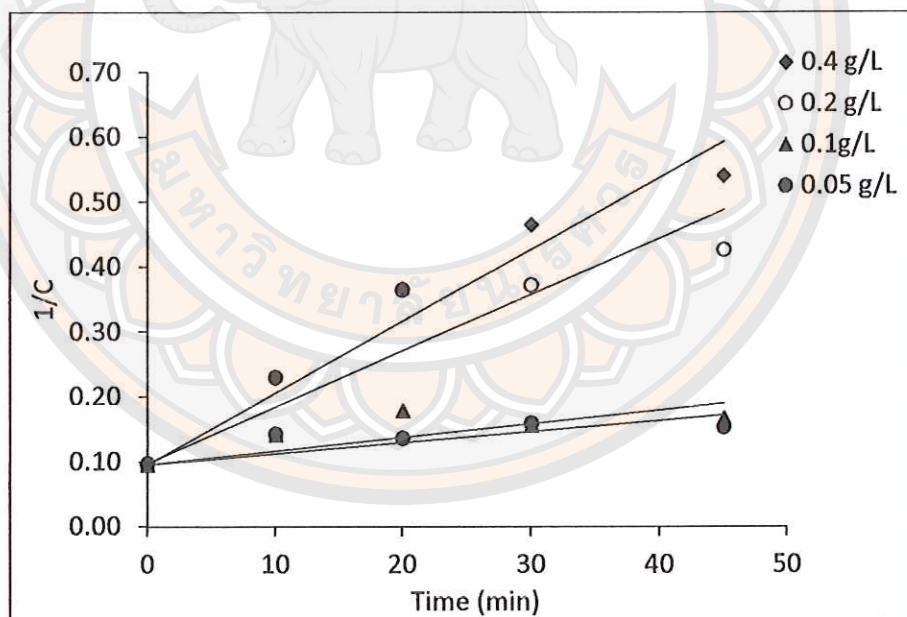


ภาพ 52 ผลของปริมาณวัสดุนาโนต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีชนิดเมทิลีนบลูในน้ำของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-G

เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาค่าทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีดังที่แสดงในภาพ 53 และ 54 ได้ผลดังแสดงในตาราง 17 โดยค่าอัตราเร็วในการย่อยสลายเริ่มต้น, r (มก/ล.ต่อ นาที) และค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยา, k (ต่อ นาที) จากการคำนวณพบว่า Ag/AgCl-C ที่ปริมาณวัสดุที่ 0.4 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการบำบัดมากที่สุดที่ร้อยละ 82.77 มีค่าอัตราเร็วในการย่อยสลายเริ่มต้น (r) เท่ากับ 0.9366 มก/ล.ต่อ นาที และมีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 0.0189 ต่อ นาที และ Ag/AgCl-G ปริมาณวัสดุที่ 0.4 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ที่ร้อยละ 82.15 มีค่าอัตราเร็วในการย่อยสลายเริ่มต้น (r) เท่ากับ 0.9953 มก/ล.ต่อ นาที และมีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 0.0127 ต่อ นาที ซึ่งจากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปริมาณวัสดุซิลเวอร์นาโนที่ใช้เป็นสารคะตะลิสต์มีผลต่อการบำบัดสารสีเมทิลีนบลูของวัสดุซิลเวอร์นาโนทั้ง 2 ชนิดไปในทิศทางเดียวกัน



ภาพ 53 แสดงกราฟ $1/C$ กับเวลาในการย่อยสลายสารสีชนิดเมทิลลีนบลูในน้ำ โดยใช้วัสดุซิลเวอร์คลอไรด์ชนิด Ag/AgCl-C ที่ปริมาณ (dose, g/L) ต่างๆ



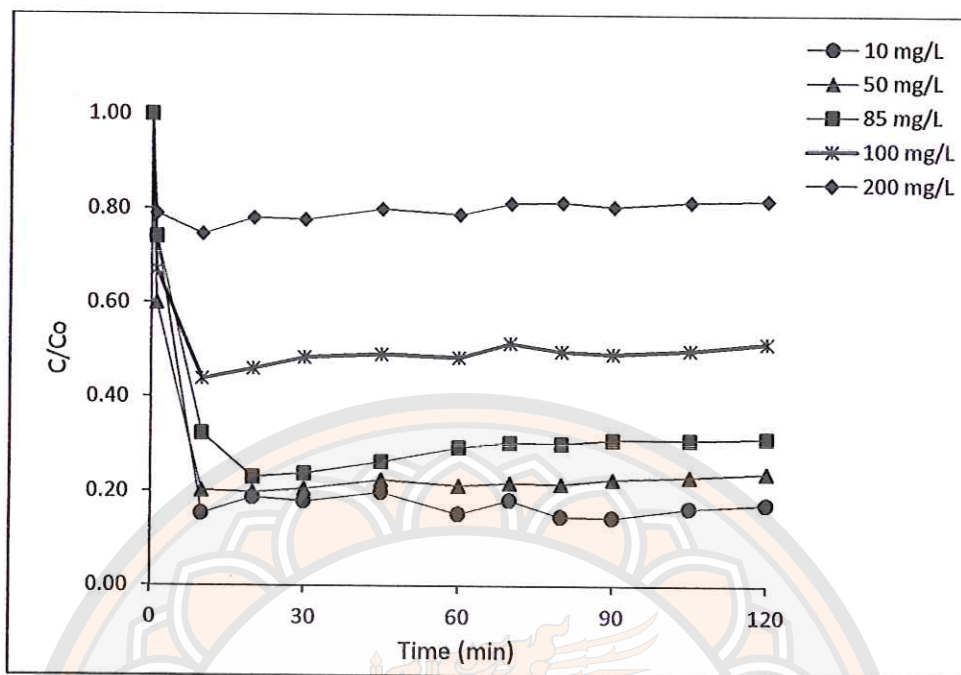
ภาพ 54 แสดงกราฟ $1/C$ กับเวลาในการย่อยสลายสารสีชนิดเมทิลลีนบลูในน้ำโดยใช้วัสดุซิลเวอร์คลอไรด์ชนิด Ag/AgCl-G ที่ปริมาณ (dose, g/L) ต่างๆ

ตาราง 17 แสดงพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีชนิดเมทิลีนบลู
ในน้ำโดยใช้วัสดุ Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G ที่ปริมาณ (dose, g/L) ต่างๆ

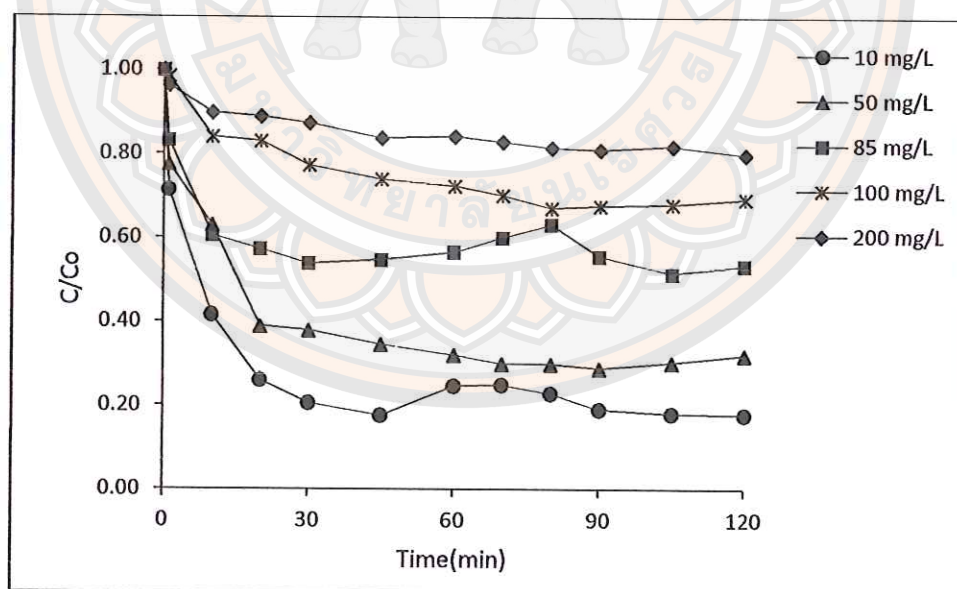
Ag NPs	Dose (g/L)	pH	MB (mg/L)	Reaction rate, r	Reaction constant, k	t 1/2 (hr.)	% removal
Ag/AgCl-C	0.4	10	10	0.9366	0.0189	6	82.77174
	0.2	10	10	0.7973	0.0249	5	80.83333
	0.1	10	10	0.6422	0.0144	8	73.11111
	0.05	10	10	0.6492	0.0096	12	61.77778
Ag/AgCl-G	0.4	10	10	0.9953	0.0127	8	82.14962
	0.2	10	10	0.9148	0.0107	9	81.27721
	0.1	10	10	0.1860	0.0029	33	45.69129
	0.05	10	10	0.7376	0.0023	42	28.50379

4. การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสีชนิดเมทิลีนบลู (various Concentration of Methylene blue) ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G

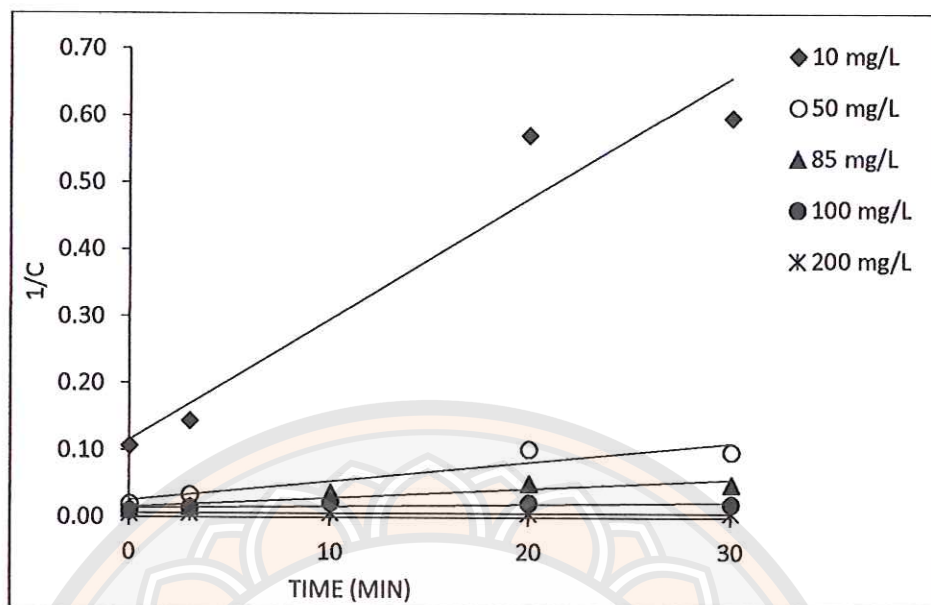
จากผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสีเมทิลีนบลูต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G ที่สภาวะค่าพีเอช 10 ปริมาณวัสดุที่ใช้คือ 0.4 กรัมต่อลิตรโดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นของสารสีเท่ากับ 10, 50, 85, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารสีเมทิลีนบลูเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดสารสีของวัสดุทั้งสองชนิดได้แก่ Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G ลดลงตามไปด้วย โดยที่ความเข้มข้นสูงที่สุดที่ทำการทดสอบที่ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร วัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl-C สามารถบำบัดสารสีได้เพียงร้อยละ 18.12 และ Ag/AgCl-G สามารถบำบัดสารสีได้เพียงร้อยละ 20.04 โดยรูปแบบของการบำบัดเมทิลีนบลูของวัสดุทดสอบทั้ง 2 ชนิดดังแสดงในภาพ 55 และ 56 มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันคือประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารสีทดสอบเพิ่มขึ้น ต่างเพียงแคในบางช่วงความเข้มข้นที่ทดสอบวัสดุทดสอบทั้งสองชนิดจะมีประสิทธิภาพการบำบัดแตกต่างกันแต่ก็เพียงเล็กน้อยเท่านั้น



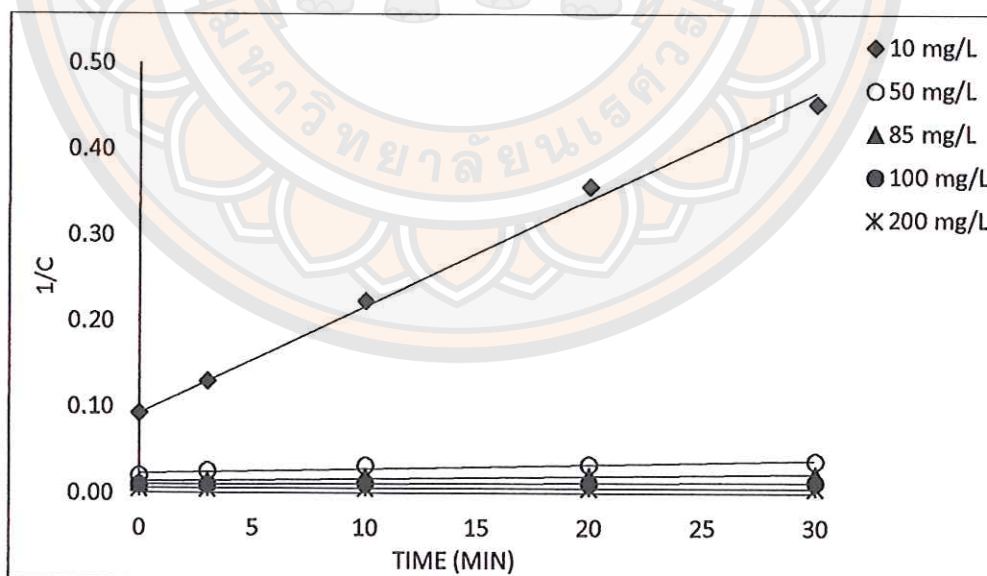
ภาพ 55 แสดงผลของความเข้มข้นของสารสีชนิดเมทิลีนบลูต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-C



ภาพ 56 แสดงผลของความเข้มข้นของสารสีชนิดเมทิลีนบลูต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-G



ภาพ 57 แสดงกราฟ $1/C$ กับเวลาในการย่อยสลายสารสีชนิดเมทิลลีนบลูในน้ำ ที่ความเข้มข้นต่างๆโดยใช้วัสดุซิลเวอร์คลอไรด์ชนิด Ag/AgCl-C



ภาพ 58 แสดงกราฟ $1/C$ กับเวลาในการย่อยสลายสารสีชนิดเมทิลลีนบลูในน้ำ ที่ความเข้มข้นต่างๆโดยใช้วัสดุซิลเวอร์คลอไรด์ชนิด Ag/AgCl-G

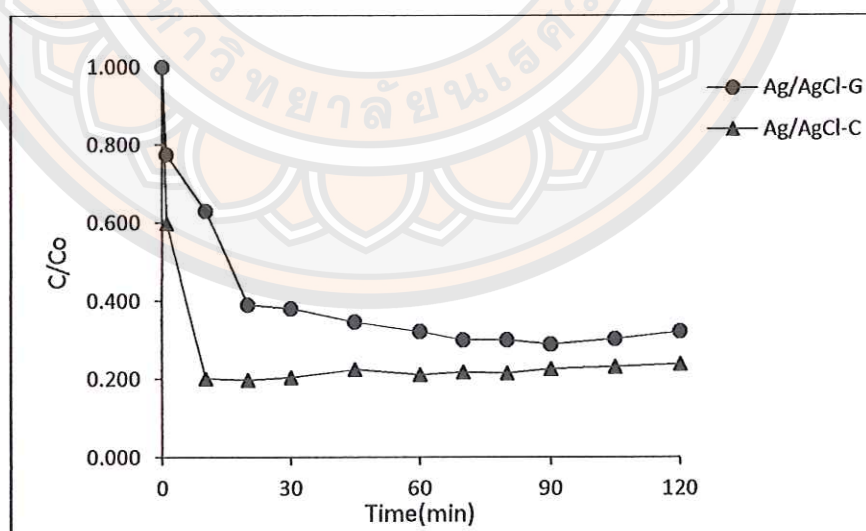
เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาค่าทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีดังที่แสดงในภาพ 57 และ 58 ได้ผลดังแสดงในตาราง 18 จากการคำนวณพบว่า Ag/AgCl-C ที่ปริมาณวัสดุที่ 0.4 กรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 10 ที่ความเข้มข้นเมทิลีนบลูเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากที่สุดที่ร้อยละ 82.77 มีค่าอัตราเร็วในการย่อยสลายเริ่มต้น (r) เท่ากับ 0.9366 มก/ล.ต่อนาที และมีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 0.0184 ต่อนาที และที่ความเข้มข้น 50, 85, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ร้อยละ 76.10, 68.71, 48.46 และ 18.12 ตามลำดับ และสำหรับวัสดุ Ag/AgCl-G มีประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ที่ร้อยละ 82.15 มีค่าอัตราเร็วในการย่อยสลายเริ่มต้น (r) เท่ากับ 0.9952 มก/ล.ต่อนาที และมีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 0.0124 ต่อนาที และที่ความเข้มข้น 50, 85, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ร้อยละ 56.70, 46.57, 30.61 และ 20.04 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปริมาณความเข้มข้นของสารสีเมทิลีนบลูมีผลต่อการบำบัดสารสีเมทิลีนบลูของวัสดุซิลเวอร์นาโนทั้ง 2 ชนิดไปในทิศทางเดียวกัน

ตาราง 18 แสดงพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีชนิดเมทิลีนบลูในน้ำที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยใช้วัสดุ Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G

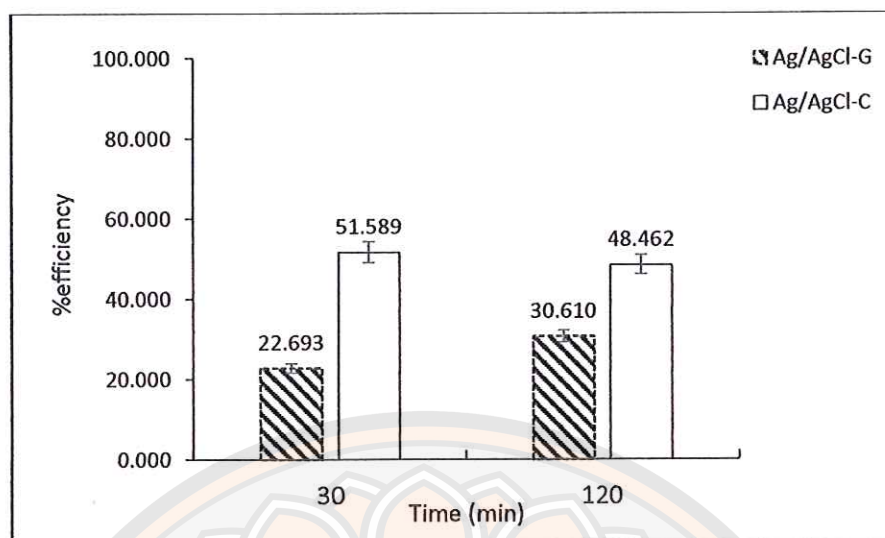
Ag NPs	MB (mg/L)	pH	Dose (g/L)	Reaction rate, r	Reaction constant, k	t 1/2 (hr.)	% removal
Ag/AgCl-C	10	10	0.4	0.9366	0.0184	6	82.77
	50	10	0.4	0.8835	0.0031	7	76.10
	85	10	0.4	0.8331	0.0016	7	68.71
	100	10	0.4	0.2084	0.0005	20	48.46
	200	10	0.4	-1.57	0.00009	61	18.12
Ag/AgCl-G	10	10	0.4	0.9952	0.0124	8	82.15
	50	10	0.4	0.7281	0.0007	29	56.70
	85	10	0.4	0.7635	0.0004	30	46.57
	100	10	0.4	0.8864	0.0001	99	30.61
	200	10	0.4	-1.079	0.00005	110	20.04

5. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารสีที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G

จากการนำผลการทดลองการบำบัดสารสีเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G ภายใต้สภาวะค่าพีเอช 10 และใช้วัสดุทดสอบปริมาณ 0.4 กรัมต่อลิตร มาเปรียบเทียบกันดังแสดงใน ภาพ 59 จะพบว่าวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl-C มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารสีเมทิลีนบลูมากกว่าวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl-G และเมื่อนำผลของประสิทธิภาพการบำบัดสารสีเมทิลีนบลูของวัสดุทดสอบทั้ง 2 ชนิด มาเทียบกับที่เวลา 30 นาทีและที่เวลา 120 นาทีดังแสดงในภาพ 60 พบว่าที่ทั้ง 2 ช่วงเวลาวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl-C มีร้อยละของประสิทธิภาพการบำบัดสารสีดีกว่าวัสดุ Ag/AgCl-G โดยที่ช่วงเวลา 30 นาที ประสิทธิภาพของ Ag/AgCl-C เท่ากับร้อยละ 53.589 ในขณะที่ Ag/AgCl-G มีค่าเท่ากับร้อยละ 22.693 และที่ช่วงเวลา 120 นาที Ag/AgCl-C มีประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ร้อยละ 48.462 และ Ag/AgCl-G มีค่าอยู่ที่ร้อยละ 30.610 จากผลจะสังเกตเห็นว่าที่เวลา 120 นาที ประสิทธิภาพการบำบัดของ Ag/AgCl-C ลดลงเล็กน้อยแสดงว่าที่ช่วงเวลา 30 นาทีหลังการเริ่มการทดลองปฏิกิริยาของวัสดุเข้าสู่ช่วงสมดุลของการทำปฏิกิริยาแล้ว แต่สำหรับวัสดุ Ag/AgCl-G ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นที่เวลา 120 นาที เนื่องจากที่ 30 นาทีแรกวัสดุยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารสีได้ต่อ และยังไม่เข้าสู่สมดุลจึงเห็นว่าร้อยละของประสิทธิภาพการบำบัดจึงเพิ่มขึ้นนั่นเอง



ภาพ 59 แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารสีที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G



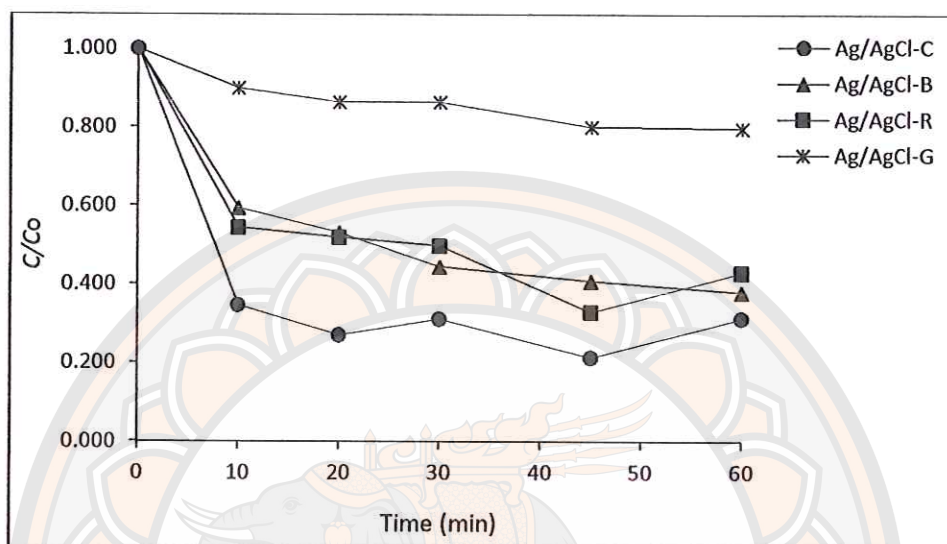
ภาพ 60 แสดงร้อยละของประสิทธิภาพการบำบัดสารสีที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เปรียบเทียบระหว่างวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G ในการบำบัดสารสีชนิดมาลาโคไลท์กรีน (Malachite Green) ในน้ำภายใต้แสงอาทิตย์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (photocatalytic)

1. การศึกษาผลของชนิดวัสดุนาโน (Various types of Ag/AgCl nanoparticles) ต่อการบำบัดสารสีชนิดมาลาโคไลท์กรีน (Malachite Green: MG) ในน้ำภายใต้แสงอาทิตย์

จากผลการศึกษาชนิดของวัสดุนาโนต่อการบำบัดสารสีชนิดมาลาโคไลท์กรีน ดังแสดงใน ภาพ 61 พบว่าวัสดุนาโน Ag/AgCl-C มีประสิทธิภาพในการบำบัดมากที่สุดที่ร้อยละ 68.63 ตามด้วย Ag/AgCl-B และ Ag/AgCl-R ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดใกล้เคียงกันที่ประมาณร้อยละ 62.04 และ 57.04 ตามลำดับและสุดท้ายเป็น Ag/AgCl-G กลับมีประสิทธิภาพในการบำบัดแย่ที่สุดสามารถบำบัดสีมาลาโคไลท์กรีน ได้เพียงร้อยละ 20.30 เท่านั้นจากความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรที่พีเอช 7 และเมื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาค่าทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีได้ผลการคำนวณดังแสดงในตาราง 19 เพื่อหาค่าอัตราเร็วในการย่อยสลายเริ่มต้น, r (มก/ล. ต่อ นาที) และค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยา, k (ต่อ นาที) พบว่า Ag/AgCl-C ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดมากที่สุด มีค่าอัตราเร็วในการย่อยสลายเริ่มต้น (r) เท่ากับ 0.6269 มก/ล. ต่อ นาที และมีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 0.0379 ต่อ นาที ซึ่งจากผลการศึกษาชนิดของวัสดุนาโนมีผลต่อการบำบัดสารสีมาลาโคไลท์กรีน ปัจจัยที่สำคัญที่อาจส่งผลต่อการบำบัดสารสีทดสอบคือ สารสกัด

จากพืชที่เลือกใช้ในการสังเคราะห์วัสดุนาโนนั่นเอง Ag/AgCl-C ที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากกาแฟ ซึ่งมีสารกลุ่มโพลีฟีนอลเป็นองค์ประกอบ จากผลการทดสอบสามารถช่วยยืนยันว่าสารกลุ่มดังกล่าวช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพในการบำบัดหรือย่อยสลายสารสีให้กับวัสดุนาโน



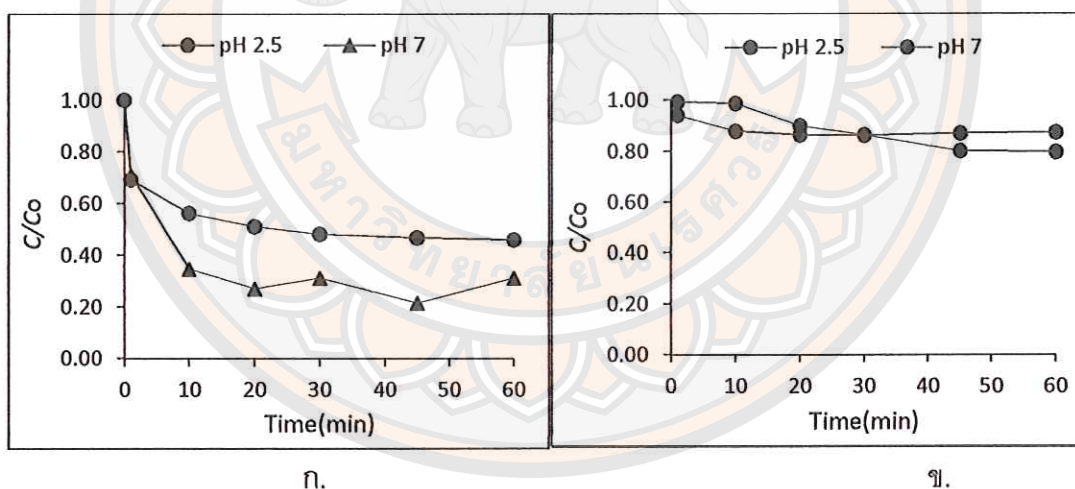
ภาพ 61 แสดงผลของชนิดวัสดุนาโนต่อการบำบัดสารสีชนิดมาลาโคลีกรีนในน้ำ

ตาราง 19 แสดงพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีชนิดมาลาโคลีกรีนในน้ำโดยใช้วัสดุนาโนคลอไรด์ชนิดต่างๆ

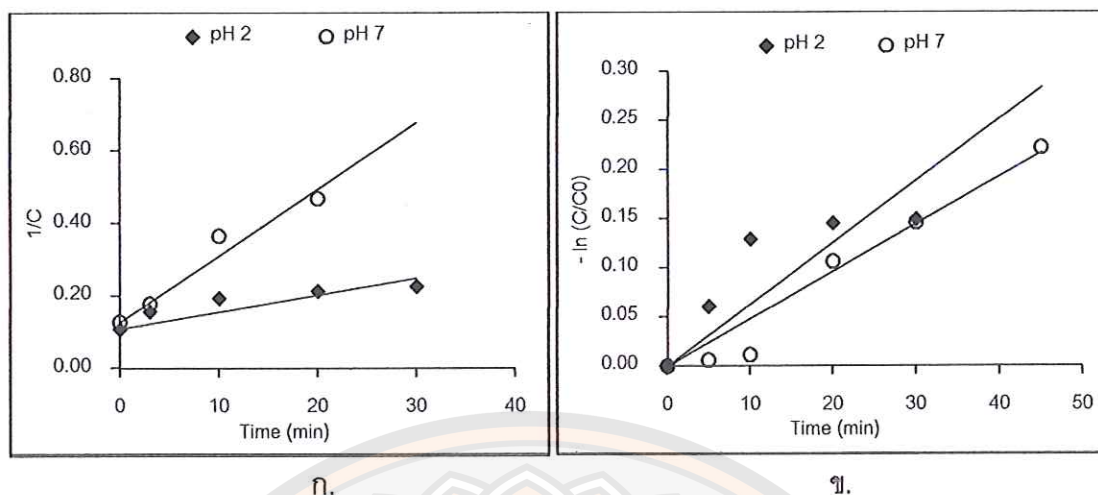
Ag NPs	pH	MB (mg/L)	Dose (g/L)	Reaction rate, r	Reaction constant, k	t 1/2 (hr.)	% removal
Ag/AgCl-C	7	10	0.4	0.6269	0.0379	18	68.632
Ag/AgCl-B	7	10	0.4	0.9575	0.0046	151	62.039
Ag/AgCl-R	7	10	0.4	0.7612	0.0231	30	57.035
Ag/AgCl-G	7	10	0.4	0.7625	0.0263	26	20.302

2. ผลการศึกษาผลของค่าพีเอช (Varies pH) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีชนิดมาลาโคลีกรีน ในน้ำของวัสดุนาโนของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G ภายใต้แสงอาทิตย์

จากผลการศึกษามูลของค่าพีเอชต่อการบำบัดสารสีชนิดมาลาโคลด์กรีน พบว่าวัสดุชนิด Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีที่สุดที่ค่าพีเอช 7 ซึ่งเป็นกลาง โดยที่ Ag/AgCl-C สามารถบำบัดได้ร้อยละ 68.63 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารสีได้ดีกว่า Ag/AgCl-G ที่บำบัดได้เพียงร้อยละ 20.30 และวัสดุซิลเวอร์นาโนทั้ง 2 ชนิดบำบัดได้แย่งที่สุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 ที่มีสภาวะเป็นกรด สาเหตุที่ไม่ได้ทำการทดลองที่ค่าพีเอช 10 เนื่องจากเมื่อทำการปรับค่าพีเอชของสารสีที่เตรียมแล้วค่าพีเอชที่เป็นต่างนั้นจะส่งผลต่อสีของสีมาลาโคลด์กรีน ซึ่งจะส่งผลต่อการวัดประสิทธิภาพในการบำบัดสารสีของวัสดุซิลเวอร์นาโนทั้งสองชนิดจึงไม่ได้ทำการทดลองในสภาวะที่พีเอช 10 นั้นเอง ซึ่งจากผลดังกล่าวสอดคล้องกับการคาดการณ์ด้วยค่า pH_{pzc} ของวัสดุนาโนและค่า pH_{pzc} ของสารสีซึ่งการคำนวณจากค่า pH_{pzc} วัสดุซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากธรรมชาติมีค่า pH_{pzc} ในสภาวะที่เป็นกรดซึ่งเมื่อค่าพีเอชมากขึ้นและมีสภาวะเป็นต่างจะทำให้ประจุผิวของวัสดุซิลเวอร์นาโนเป็นประจุลบ และสารสีที่สภาวะเป็นต่างจะมีประจุที่ผิวอนุภาคเป็นบวกทำให้สามารถจับกันได้ดีจึงเป็นสาเหตุให้วัสดุซิลเวอร์นาโนทั้ง 2 ชนิดทำปฏิกิริยาได้ดีที่สุดในสภาวะเป็นต่างนั้นเอง



ภาพ 62 แสดงผลของค่าพีเอช ต่อการบำบัดสารสีชนิดมาลาโคลด์กรีนในน้ำด้วยวัสดุนาโนชนิด (ก.) Ag/AgCl-C และ (ข.) Ag/AgCl-G



ภาพ 63 แสดงการย่อยสลายสารสีชนิดมาลาไค์กรีนในน้ำที่ค่าพีเอชต่างๆ โดยใช้วัสดุซิลเวอร์คลอไรด์ โดยกราฟ $1/C$ กับเวลาของ Ag/AgCl-C (ก.) และ $-\ln(C/C_0)$ กับเวลา Ag/AgCl-G (ข.)

ตาราง 20 แสดงพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีชนิดมาลาไค์กรีนในน้ำที่ค่าพีเอช ต่างๆ โดยใช้วัสดุซิลเวอร์คลอไรด์ชนิด Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G

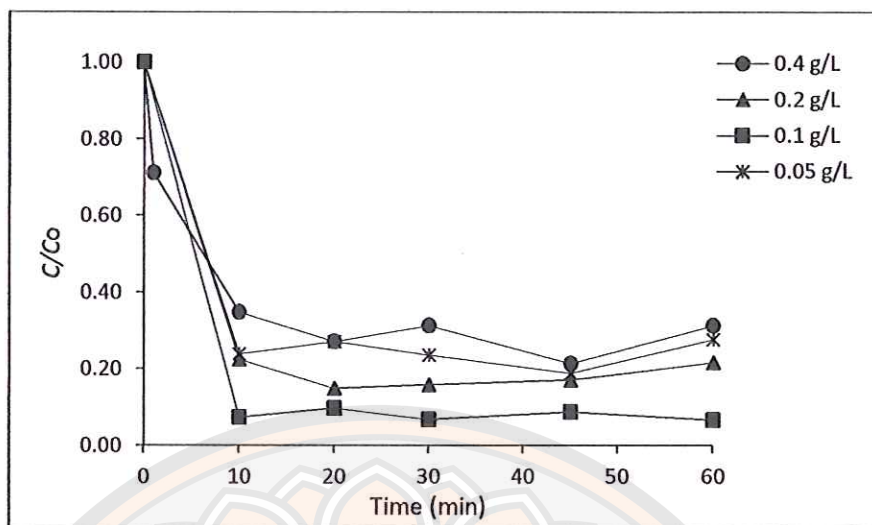
Ag NPs	pH	MG (mg/L)	Dose (g/L)	Reaction rate, r	Reaction constant, k	t 1/2 (hr.)	% removal
Ag/AgCl-C	2.5	10	0.4	0.638	0.0046	24	54.14747
	7	10	0.4	0.9522	0.0184	7	68.63271
Ag/AgCl-G	2.5	10	0.4	0.5746	0.0063	110	12.43178
	7	10	0.4	0.9564	0.0048	144	20.30217

เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาค่าทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีดังที่แสดงในภาพ 63 และ ตาราง 20 เพื่อหาค่าอัตราเร็วในการย่อยสลายเริ่มต้น, r (มก/ล.ต่อนาที) และค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยา, k (ต่อนาที) พบว่า Ag/AgCl-C ที่ค่าพีเอช 7 มีประสิทธิภาพในการบำบัดมากที่สุดที่ร้อยละ 68.633 มีค่าอัตราเร็วในการย่อยสลายเริ่มต้น (r) เท่ากับ 0.9522 มก/ล.ต่อนาที และ

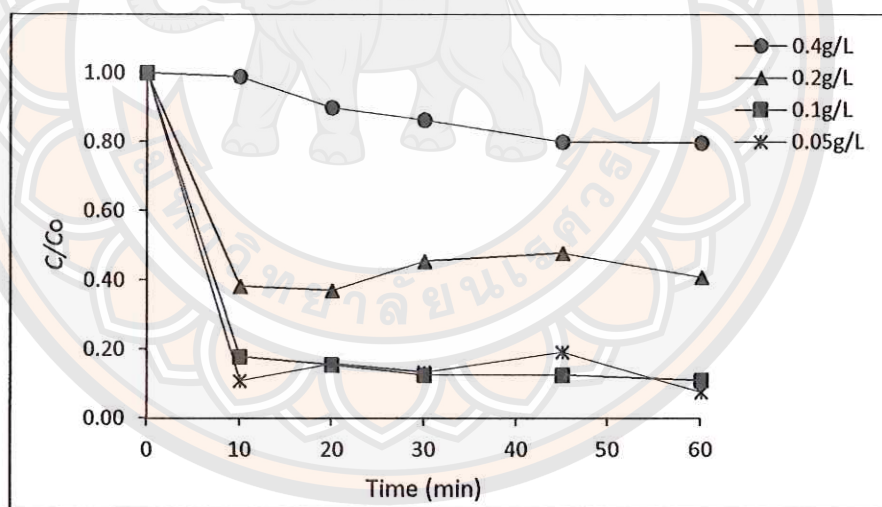
มีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 0.0184 ต่อนาที และ Ag/AgCl-G ที่ค่าพีเอช 7 มีประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ที่ร้อยละ 20.30 มีค่าอัตราเร็วในการย่อยสลายเริ่มต้น (r) เท่ากับ 0.964 มก/ล.ต่อนาที และมีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 0.0048 ต่อนาที ซึ่งจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่าความเป็นกรดต่างมีผลต่อการบำบัดสารสีมาลาโคลด์กรีนของวัสดุซิลเวอร์นาโนทั้ง 2 ชนิด

3. การศึกษาผลของปริมาณวัสดุนาโน (Various dose of Ag/AgCl nanoparticles) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีชนิดมาลาโคลด์กรีน ในน้ำของวัสดุนาโนภายใต้แสงอาทิตย์

จากผลการศึกษาผลของปริมาณวัสดุซิลเวอร์นาโนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีมาลาโคลด์กรีนภายใต้แสงอาทิตย์ (ธรรมชาติ) ที่ค่าพีเอช 7 ความเข้มข้นของสารสีที่ใช้เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเปลี่ยนค่าปริมาณวัสดุทดสอบที่ 0.05, 0.1, 0.2 และ 0.4 กรัมต่อลิตรดังแสดงในภาพ 64 และ 65 พบว่าปริมาณ (dose) ของวัสดุนาโน Ag/AgCl-C ที่ปริมาณ 0.1 กรัมต่อลิตรเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดโดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารสีอยู่ที่ร้อยละ 93.31 และที่ปริมาณ 0.05 กรัมต่อลิตรเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดของ Ag/AgCl-G โดยสามารถบำบัดสารสีได้ร้อยละ 92.35 ในการทดลองใช้วัสดุซิลเวอร์นาโนทั้ง 2 ชนิดในการบำบัดสารสีมาลาโคลด์กรีน ปริมาณวัสดุนาโนไม่ได้มีรูปแบบเดียวกับการทดลองในสารสีเมทิลีนบลูซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ชนิดของสารสี และพลังงานที่ใช้กระตุ้นให้เกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่ในการทดลองกับสารสีเมทิลีนบลูใช้พลังงานแสงวิธีเปิดจากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่มีกำลังวัตต์รวมเท่ากับ 50 วัตต์แต่ในการทดลองกับสารสีมาลาโคลด์กรีนใช้แสงจากแสงอาทิตย์ธรรมชาติที่มีพลังงานและความเข้มแสงที่สูงกว่าจึงเป็นปัจจัยที่ทำให้ผลการทดลองออกมาในรูปแบบที่ต่างออกไป



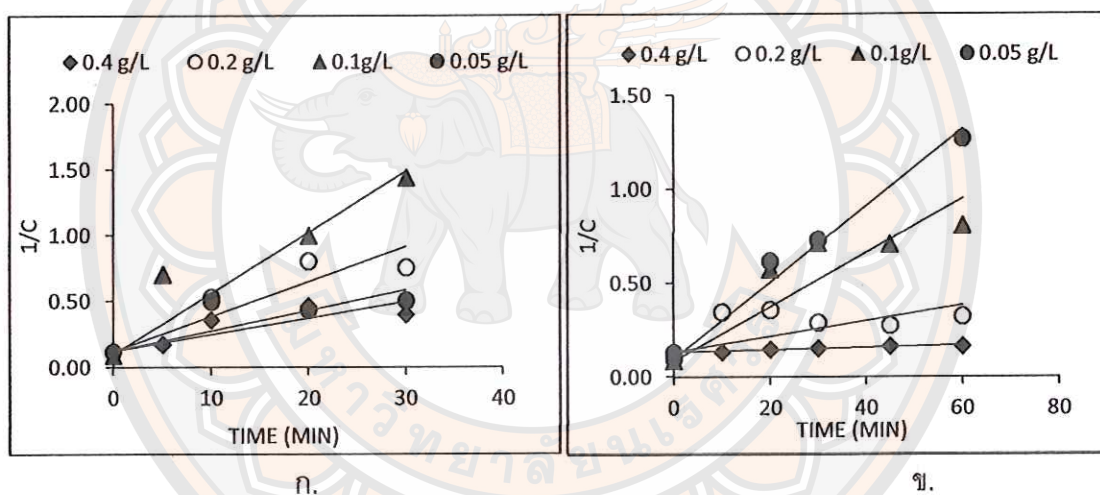
ภาพ 64 แสดงผลของปริมาณวัสดุต่อการบำบัดสารสีชนิดมาลาไค์กรีน
ในน้ำด้วยวัสดุชนิด Ag/AgCl-C



ภาพ 65 แสดงผลของปริมาณวัสดุต่อการบำบัดสารสีชนิดมาลาไค์กรีน
ในน้ำด้วยวัสดุชนิด Ag/AgCl-G

เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาค่าทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีดังที่แสดงใน
ภาพ 66 ได้ผลดังแสดงในตาราง 21 โดยค่าอัตราเร็วในการย่อยสลายเริ่มต้น, r (มก/ล.ต่อนาที) และ

ค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยา, k (ต่อนาที) จากการคำนวณพบว่า Ag/AgCl-C ที่ปริมาณวัสดุที่ 0.1 กรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากที่สุดที่ร้อยละ 93.32 มีค่าอัตราเร็วในการย่อยสลายเริ่มต้น r เท่ากับ 0.8484 มก/ล.ต่อนาที และมีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 0.0464 ต่อนาที ตามด้วย 0.2, 0.05 และ 0.4 กรัมต่อลิตรที่มีค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่ร้อยละ 78.25, 72.30 และ 68.63 ตามลำดับ สำหรับ Ag/AgCl-G ปริมาณวัสดุที่ 0.05 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ที่ร้อยละ 92.35 มีค่าอัตราเร็วในการย่อยสลายเริ่มต้น r เท่ากับ 0.9782 มก/ล.ต่อนาที และมีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 0.0204 ต่อนาที ตามด้วย 0.1, 0.2 และ 0.4 กรัมต่อลิตรที่มีค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่ร้อยละ 88.95, 59.08 และ 20.30 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปริมาณวัสดุซิลเวอร์นาโนใช้เป็นสารคะตะลิสต์มีผลต่อการบำบัดสารสีมาลาโคไลต์กรีนของวัสดุซิลเวอร์นาโนทั้ง 2 ชนิด



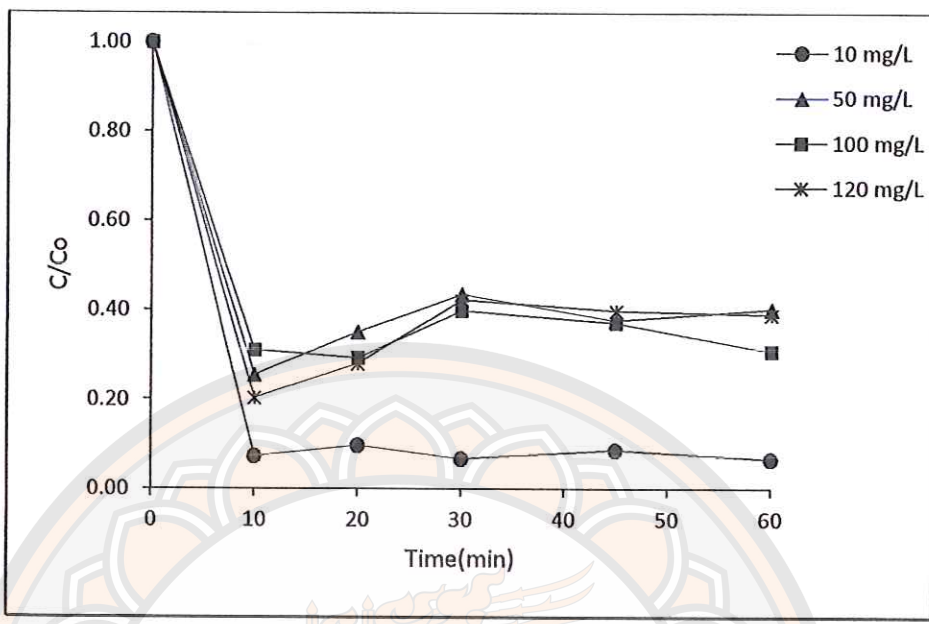
ภาพ 66 แสดงกราฟ $1/C$ กับเวลาในการย่อยสลายสารสีชนิดมาลาโคไลต์กรีนในน้ำ ที่ปริมาณวัสดุต่างๆ โดยใช้วัสดุซิลเวอร์คลอไรด์ชนิด Ag/AgCl-C (ก.) และ Ag/AgCl-G (ข.)

ตาราง 21 แสดงพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีชนิดมาลาไคต์กรีน
ในน้ำที่ปริมาณวัสดุต่างๆ โดยใช้วัสดุซิลเวอร์คลอไรด์ชนิด Ag/AgCl-C และ
Ag/AgCl-G

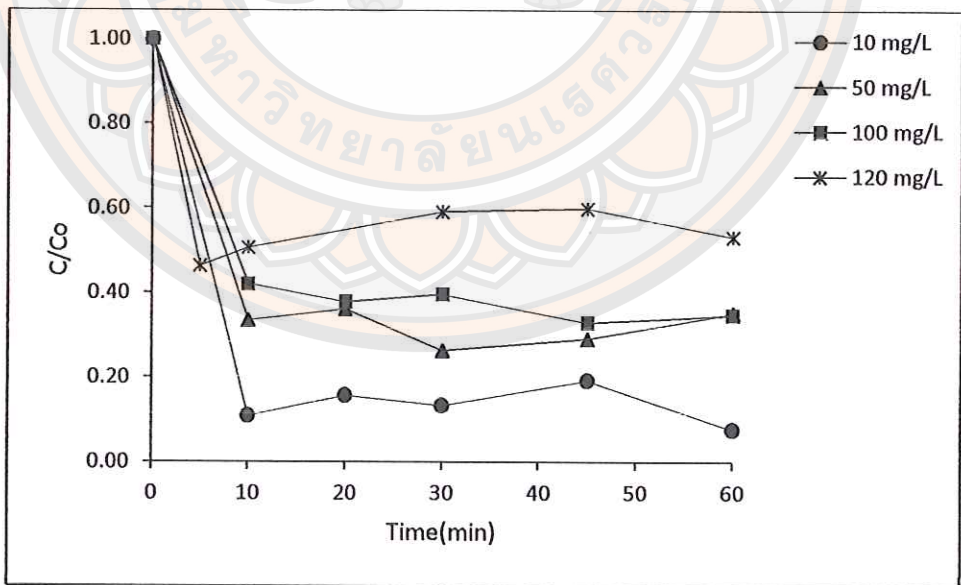
Ag NPs	Dose (g/L)	pH	MG (mg/L)	Reaction rate, r	Reaction constant, k	t 1/2 (hr.)	% removal
Ag/AgCl-C	0.4	7	10	0.6522	0.0125	10	68.63271
	0.2	7	10	0.7598	0.0265	5	78.24979
	0.1	7	10	0.8484	0.0464	2	93.31496
	0.05	7	10	0.433	0.0157	8	72.30246
	0.4	7	10	0.9351	0.0006	223	20.30217
Ag/AgCl-G	0.2	7	10	-0.664	0.0042	32	59.07808
	0.1	7	10	0.6964	0.0145	6	88.95202
	0.05	7	10	0.9782	0.0204	5	92.3501

4. การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสีชนิดมาลาไคต์กรีน (Various concentration of malachite green) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีของวัสดุนาโนภายใต้แสงอาทิตย์

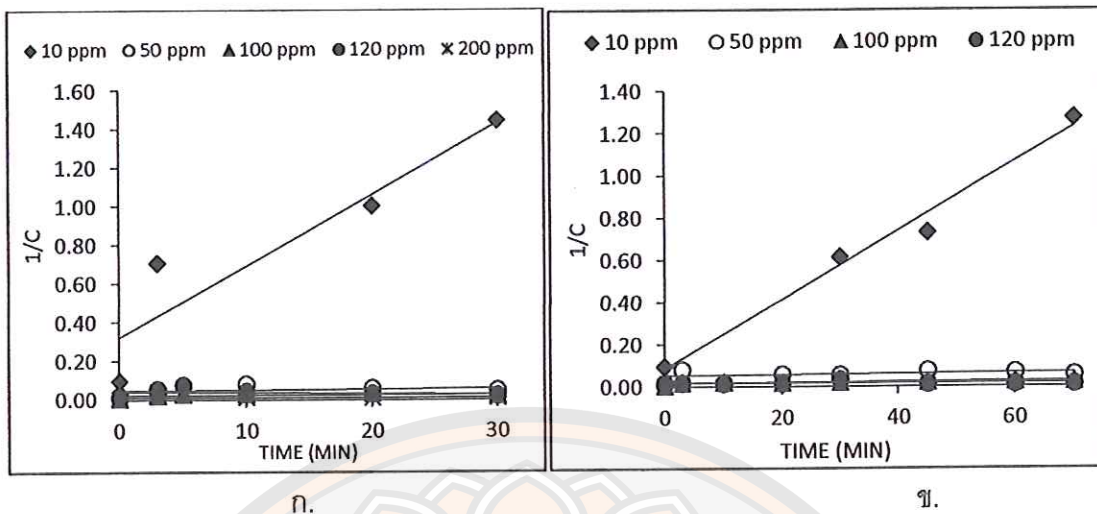
จากผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสีมาลาไคต์กรีนต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารสีของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-C ที่ปริมาณวัสดุ 0.1 กรัมต่อลิตร และ Ag/AgCl-G ที่ปริมาณวัสดุ 0.05 กรัมต่อลิตร ที่สภาวะค่าพีเอช 7 โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นของสารสีเท่ากับ 10, 50, 100 และ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารสีมาลาไคต์กรีนเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดสารสีของวัสดุทั้งสองชนิดได้แก่ Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G ลดลงตามไปด้วยโดยรูปแบบของการบำบัดสารสีมาลาไคต์กรีนของวัสดุทดสอบทั้ง 2 ชนิดดังแสดงในภาพ 67 และ 68 สำหรับวัสดุชนิด Ag/AgCl-C ที่ความเข้มข้นมากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป ค่าการบำบัดจะไม่แตกต่างกันมาก ถึงเห็นลักษณะเส้นกราฟของสารสีที่คงเหลือไม่แยกออกจากกัน ซึ่งเมื่อคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดของ Ag/AgCl-C ที่ความเข้มข้น 50, 100 และ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าร้อยละของประสิทธิภาพอยู่ที่ช่วง 59-62 แต่วัสดุ Ag/AgCl-G มีลักษณะที่ประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารสีทดสอบเพิ่มขึ้น



ภาพ 67 แสดงผลการบำบัดสารสีชนิดมาลาไคล์กรีนในน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยวัสดุชนิด Ag/AgCl-C



ภาพ 68 แสดงผลการบำบัดสารสีชนิดมาลาไคล์กรีนในน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยวัสดุชนิด Ag/AgCl-G

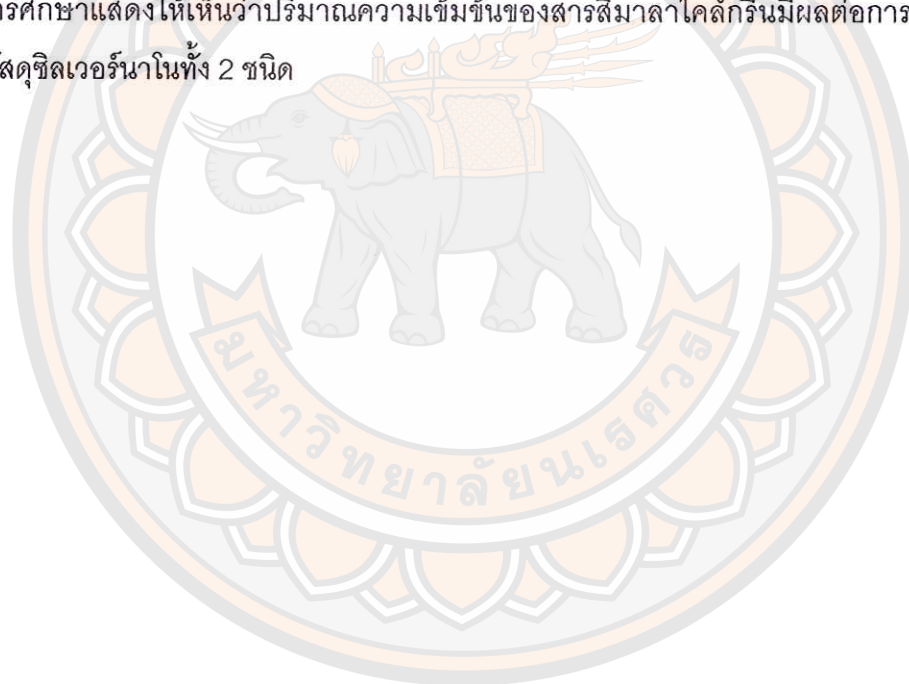


ภาพ 69 แสดงกราฟ $1/C$ กับเวลาในการย่อยสลายสารสีชนิดมาลาโคไซด์กรีน
ในน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆโดยใช้วัสดุซิลเวอร์คลอไรด์ชนิด
Ag/AgCl-C(ก.) และ Ag/AgCl-G (ข.)

ตาราง 22 แสดงพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีชนิดมาลาโคไซด์กรีน
ในน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้วัสดุซิลเวอร์คลอไรด์ชนิด Ag/AgCl-C และ
Ag/AgCl-G

Ag NPs	MG (mg/L)	pH	Dose (g/L)	Reaction rate, r	Reaction constant, k	t 1/2 (hr.)	% removal
Ag/AgCl-C	10	7	0.1	0.7664	0.0461	2	93.31496
	50	7	0.1	-0.642	0.0016	13	59.76676
	100	7	0.1	-0.206	0.0003	32	69.13828
	120	7	0.1	-1.145	0.0011	8	60.95642
Ag/AgCl-G	10	7	0.05	0.9832	0.0162	6	92.3501
	50	7	0.05	-0.983	0.0009	23	64.8688
	100	7	0.05	-0.206	0.0003	32	65.26386
	120	7	0.05	-0.574	0.0002	43	46.73123

เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาค่าทางจลนพลศาสตร์ในการย่อยสลายสารสีดังที่แสดงในภาพ 69 ได้ผลดังแสดงในตาราง 22 จากการคำนวณพบว่า Ag/AgCl-C ที่ปริมาณวัสดุที่ 0.1 กรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 7 ที่ความเข้มข้นมาลาโคลด์กรีนเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการบำบัดมากที่สุดที่ร้อยละ 93.31 มีค่าอัตราเร็วในการย่อยสลายเริ่มต้น (r) เท่ากับ 0.7664 มก/ล.ต่อนาที และมีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 0.0461 ต่อนาทีและที่ความเข้มข้น 50, 100 และ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ร้อยละ 69.14, 60.96 และ 59.77 ตามลำดับ และสำหรับวัสดุ Ag/AgCl-G ที่ปริมาณวัสดุที่ 0.05 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ที่ร้อยละ 92.35 มีค่าอัตราเร็วในการย่อยสลายเริ่มต้น (r) เท่ากับ 0.9832 มก/ล.ต่อนาที และมีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 0.0162 ต่อนาที และที่ความเข้มข้น 50, 85, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ร้อยละ 64.87, 65.26 และ 46.73 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปริมาณความเข้มข้นของสารสีมาลาโคลด์กรีนมีผลต่อการบำบัดสารสีของวัสดุซิลเวอร์นาโนทั้ง 2 ชนิด



บทที่ 5

บทสรุป

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์วัสดุนาโนที่ผสมกับสารสกัดจากธรรมชาติเพื่อเป็นการนำหลักการเคมีสีเขียวหรือที่เรียกว่า "Green Chemistry" เข้ามาใช้ในการวัสดุนาโนที่เป็นวัสดุนาโนชนิดใหม่ โดยได้ทำการทดลองสังเคราะห์วัสดุ 2 ประเภทคือ วัสดุนาโน (Ag nanoparticles) และวัสดุนาโนคลอไรด์ (Plamonic Ag/AgCl nanoparticles) ที่ผสมด้วยสารสกัดจากธรรมชาติ 5 ชนิดได้แก่ กาแฟ, กระเทียม, ชาเขียว, บัทรูปและเรดิช โดยงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือการทดสอบผลของวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้นกับการกำจัดหรือยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์และการนำมาใช้บำบัดสารสี 2 ชนิดคือ เมทิลลีนบลูโดยอาศัยกระบวนการโฟโตคะตาไลซิส ภายใต้แสงวิซิเบิล และสีมาลาโคลิกรีนโดยอาศัยกระบวนการโฟโตคะตาไลซิส ภายใต้แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

สรุปผลการวิจัย

1. การสังเคราะห์วัสดุนาโนที่ผสมด้วยสารสกัดจากธรรมชาติ

วัสดุนาโนชนิดประเภทซิลเวอร์นาโน (Ag nanoparticles) และวัสดุนาโนคลอไรด์ (Plamonic Ag/AgCl nanoparticles) มีผลึกของแร่ที่ชื่อว่า Chlorargyrite สูตรทางเคมีคือซิลเวอร์คลอไรด์; Silver Chloride (AgCl) เป็นองค์ประกอบหลักขององค์ประกอบรองคือ ซิลเวอร์; Ag (Silver) และมีองค์ประกอบของทั้งผลึกของ Ag (cubic Ag) และ ผลึกของ AgCl (cubic AgCl) ผสมกัน

2. การศึกษาความสามารถในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ของวัสดุนาโนซิลเวอร์

2.1 การทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุนาโนชนิด ซิลเวอร์นาโน (Ag nanoparticles) ด้วยวิธี Agar disc diffusion method

2.1.1 พบว่าวัสดุนาโนซิลเวอร์นาโนสามารถยับยั้งเชื้อ *E. coli* ได้ดีกว่า *S. aureus*

2.1.2 วัสดุนาโน Ag-B มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการยับยั้งการเจริญของเชื้อ *E. coli* โดยค่าของ inhibition zone เท่ากับ 10.0 ± 0.5 มิลลิเมตร Ag-R, Ag-G และ Ag-T

2.1.3 วัสดุนาโน Ag-B มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการยับยั้งการเจริญของเชื้อ *S. aureus* ได้ดีที่สุดโดยค่า inhibition zone เท่ากับ 9.5 ± 0.10 มิลลิเมตร ตามด้วย Ag-R และ Ag-T

2.2 การทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุนาโน ชนิดซิลเวอร์คลอไรด์ (Plamonic Ag/AgCl nanoparticles) ด้วยวิธี Agar disc diffusion method โดยเชื้อ *E.coli*

พบว่า Ag/AgCl-G มีประสิทธิภาพมากที่สุดซึ่งแสดงค่า inhibition zone เท่ากับ 9.5 ± 0.0 มิลลิเมตร ตามด้วย Ag/AgCl-B, Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-R

2.3 การทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโนด้วยวิธี Minimal Inhibition concentration (MIC) และ Minimal bactericidal concentration (MBC) ด้วยเชื้อ *E. coli*

2.3.1 วัสดุนาโน Ag/AgCl-G และ Ag/AgCl-C มีประสิทธิภาพมากที่สุดโดยค่า MIC ต่อ *E.coli* เท่ากันคือ 18.75 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามด้วย Ag-B, Ag/AgCl-R, Ag/AgCl-B, Ag-R, Ag-G, Ag-T, Ag-C และ Ag-chemical ตามลำดับ

2.3.2 วัสดุนาโน Ag/AgCl-G มีประสิทธิภาพสูงที่สุดโดยมีค่า MBC เท่ากับ 37.5 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามด้วย Ag/AgCl-R, Ag-B, Ag/AgCl-C, Ag/AgCl-B, Ag-R, Ag-G, Ag-T, Ag-C และ Ag-chemical ตามลำดับ

2.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโนด้วยวิธี Inactivation Test กับเชื้อ *E. coli*

2.4.1 วัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-G มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณเชื้อได้มากที่สุดโดยเชื้อเหลือรอดอยู่ร้อยละ 16.42 จากจำนวนเชื้อเริ่มต้น ตามด้วย Ag/AgCl-R, Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-B เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที

2.4.2 วัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-G ยังคงมีประสิทธิภาพมากที่สุดมีเชื้อเหลือรอดเพียงร้อยละ 1.49 เมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที

2.4.3 วัสดุนาโนซิลเวอร์คลอไรด์ทุกชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ *E.coli* ได้อย่างสมบูรณ์ที่ความเข้มข้น 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

2.4.4 วัสดุนาโนชนิด Ag-B มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณเชื้อได้มากที่สุดโดยเชื้อเหลือรอดอยู่ร้อยละ 20.48 จากจำนวนเชื้อเริ่มต้น ตามด้วย Ag-R, Ag-G, Ag-Chemical และ Ag-T เมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที

2.5 การศึกษาผลของแสงต่อประสิทธิภาพของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิดซิลเวอร์คลอไรด์ (Plamonic Ag/AgCl nanoparticles) ด้วยวิธี Inactivation Test กับเชื้อจุลินทรีย์ *E.coli*

2.5.1 ที่สภาวะมีแสง วัสดุนาโน Ag/AgCl-G มีประสิทธิภาพมากที่สุดตามด้วย Ag/AgCl-C, Ag/AgCl-B และ Ag/AgCl-R ตามลำดับ

2.5.2 ที่สภาวะไม่มีแสง Ag/AgCl-R กลับมีประสิทธิภาพมากที่สุดตามด้วย Ag/AgCl-G, Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-B ตามลำดับ

3. การศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl ในการบำบัดสารสีชนิด เมทิลีนบลู (Methylene blue: MB) ในน้ำภายใต้แสงวิสิเบิลด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalytic)

3.1 ที่เลข 10 เหมาะสมต่อการบำบัดสารสีเมทิลีนบลูด้วยวัสดุนาโนซิลเวอร์คอลลอยด์ภายใต้แสงวิสิเบิลมากที่สุด

3.2 ปริมาณ (dose) ของวัสดุนาโนที่ปริมาณ 0.4 กรัมต่อลิตรเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุ Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G ต่อการบำบัดสารสีเมทิลีนบลู

3.3 วัสดุ Ag/AgCl-C มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ร้อยละ 18.12 - 82.77 ที่ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู 10 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.4 วัสดุ Ag/AgCl-G มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ร้อยละ 20.04 - 82.15 ที่ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู 10 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

4. การศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุนาโนชนิด Ag/AgCl-C และ Ag/AgCl-G ในการบำบัดสารสีชนิดมาลาไคต์กรีน (Malachite Green) ในน้ำภายใต้แสงอาทิตย์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalytic)

4.1 ที่เลข 7 เหมาะสมต่อการบำบัดสารสีมาลาไคต์กรีนด้วยวัสดุนาโนซิลเวอร์คอลลอยด์ภายใต้แสงวิสิเบิลมากที่สุด

4.2 ปริมาณ (dose) ของวัสดุที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดสารสีมาลาไคต์กรีนของวัสดุ Ag/AgCl-C เท่ากับ 0.1 กรัมต่อลิตรและ Ag/AgCl-G เท่ากับ 0.05 กรัมต่อลิตร

4.3 วัสดุ Ag/AgCl-C มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ร้อยละ 59.77 - 93.31 ที่ความเข้มข้นของมาลาไคต์กรีน 10 - 120 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.4 วัสดุ Ag/AgCl-G มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ร้อยละ 46.73 - 92.35 ที่ความเข้มข้นของมาลาไคต์กรีน 10 - 120 มิลลิกรัมต่อลิตร

ข้อเสนอแนะ

ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงกลไกเชิงลึกการทำงานของวัสดุซิลเวอร์นาโนที่มีต่อเชื้อจุลินทรีย์



บรรณานุกรม

มหาวิทยาลัยนเรศวร

บรรณานุกรม

- พวงรัตน์ ขจิตวิธานกุล. (2558).ฐานข้อมูลความปลอดภัยของวัสดุนาโน (Nanosafety Database). สืบค้นเมื่อ 19 พฤศจิกายน 2557, จาก <http://web.eng.nu.ac.th>
- นพพร ทัดนา.(2552). เคมีสีเขียว (Green Chemistry) ตอนที่ 1: 12 หลักการของ “เคมีสีเขียว”. สืบค้นเมื่อ 19 พฤศจิกายน 2557, จาก <http://www.etm.sc.mahidol.ac.th>
- พวงรัตน์ ขจิตวิธานกุล. (2557). นาโนเทคโนโลยีเพื่อสิ่งแวดล้อม (environmental nanotechnology). พิษณุโลก: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- บีทรูท. บีทรูท (2558), สืบค้นเมื่อ 19 พฤศจิกายน 2558 จาก <https://en.wikipedia.org/wiki/Beetroot>
- สุพิน แสงสุร.(2550). นาโนเทคโนโลยีกับความปลอดภัย สืบค้นเมื่อ 19 พฤศจิกายน 2557 จาก <http://kui.most.go.th>
- Adriana Farah. (2012), Coffee Constituents. *Coffee: Emerging Health Effects and Disease Prevention*. 1(1), 21-58
- Asharani PV, Wu YL, Gong ZY, Valiyaveetil S. (2008). Toxicity of silver nanoparticles in zebrafish models. *Nanotechnology* 19, 255102
- Bar-Ilan O, Albrecht RM, Fako VE and Furgeson DY. (2009). Toxicity assessments of multisized gold and silver nanoparticles in zebrafish embryos. *Small*, 5, 1897–910.
- BilbergK, Malte H, Wang T and Baatrup E. (2010). Silver nanoparticles and silver nitrate cause respiratory stress in Eurasian perch (*Perca fluviatilis*). *Aquatic Toxicology* 96, 2, 159–65
- Bogumita Reidy, Andrea Haase, Andreas Luch, Kenneth A. Dawson, and Iseult Lynch. (2013). Mechanisms of Silver Nanoparticle Release, Transformation and Toxicity: A Critical Review of Current Knowledge and Recommendations for Future Studies and Applications., *Materials*, 6, 2295-2350

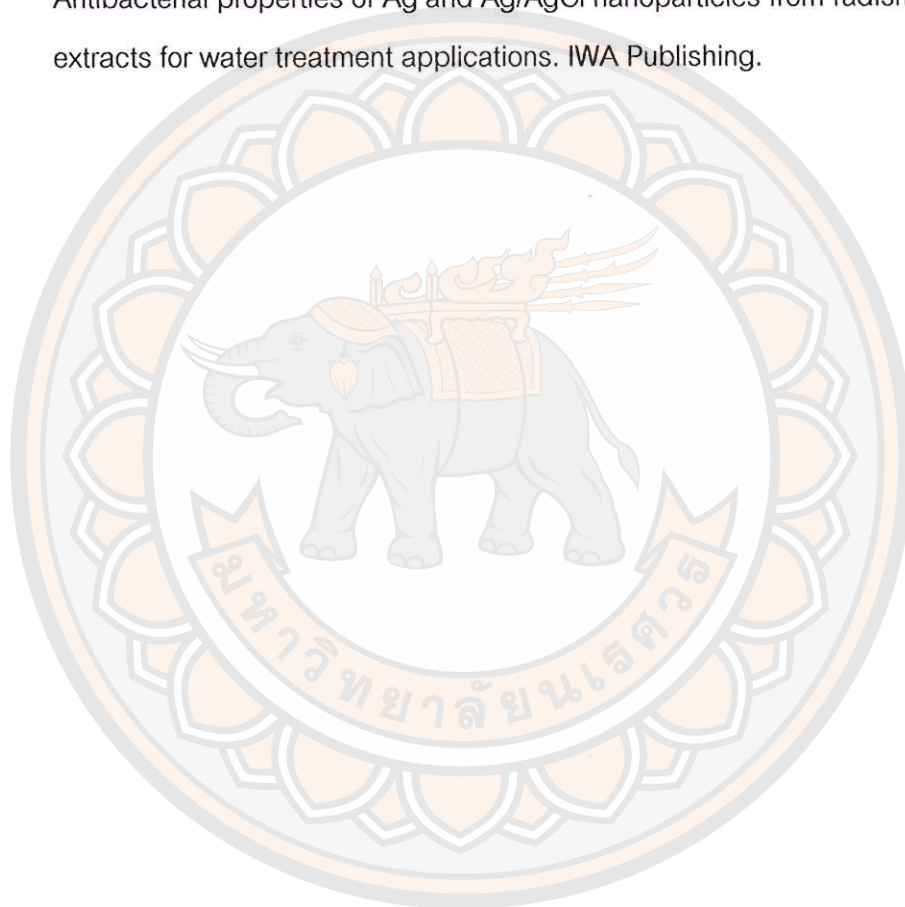
- Choi O, Cleuenger TE, Deng BL, Surampalli RY, Ross L and Hu ZQ. (2009). Role of sulfide and ligand strength in controlling nanosilver toxicity. *Water Res.* 43(7), 1879–86
- Griffitt, R.J., Luo J, Gao J, Bonzongo JC and Barber DS. (2008). Effects of particle composition and species on toxicity of metallic nanomaterials in aquatic organisms. *Environ Toxicol Chem.* 27:1972–8.
- Griffitt, R.J., Hyndman K, Denslow ND and Barber DS. (2009). Comparison of molecular and histological changes in zebrafish gills exposed to metallic nanoparticles. *Toxicol Sci*, 107:404–15.
- Hongshui Wang, Xueliang Qiao, Jianguo Chen and Shiyuan Ding. (2005). Preparation of silver nanoparticles by chemical reduction method. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 256, 111–115
- Hwang ET, Lee JH, Chae YJ, Kim YS, Kim BC and Sang BI, et al. (2008). Analysis of the toxic mode of action of silver nanoparticles using stress-specific bioluminescent bacteria. *Small*, 4, 746–50.
- Jiahui Kou and Rajender S. Varma. (2012). Beet Juice-Induced Green Fabrication of Plasmonic AgCl/Ag Nanoparticles. *ChemSusChem*, 5(12), 2435 – 2441
- Jiahui Kou and Rajender S. Varma. (2012). Beet juice utilization: Expedient green synthesis of noble metal nanoparticles (Ag, Au, Pt, and Pd) using microwaves. *RSC Advances*. 2, 10283–10290
- Kim, J. S.; Kuk, E.; Yu, K. N.; Kim, J. H.; Park, S. J.; Lee, H. J.; Kim, S. H.; Park, Y. K.; Park, Y. H.; Hwang, C. Y.; Kim, Y. K.; Lee, Julia Fabrega, Samuel N. Luoma, Charles R. Tyler, Tamara S. Galloway and Jamie R. Lead. (2011). Silver nanoparticles: Behaviour and effects in the aquatic environment, *Environment International*, 37(11), 517–531
- Larry D. Lawson and Christopher D. Gardner. (2005). Composition, Stability, and Bioavailability of Garlic Products Being Used in a Clinical Trial., *J Agric Food Chem.* 53(16), 6254–6261.

- Lee KJ, Nallathamby PD, Browning LM, Osgood CJ and Xu XHN. (2007). In vivo imaging of transport and biocompatibility of single silver nanoparticles in early development of zebrafish embryos. *ACS Nano*, 1:133–43.
- Lan-Sook Lee, Sang-Hee Kim, Young-Boong Kim and Young-Chan Kim (2014). Quantitative Analysis of Major Constituents in Green Tea with Different Plucking Periods and Their Antioxidant Activity. *Molecules*, 19(14), 9173-9186
- Mallikarjuna N. Nadagouda† and Rajender S. Varma. (2008). Green synthesis of silver and palladium nanoparticles at room temperature using coffee and tea extract. *Green Chemistry*, 10(8), 859–862
- Navarro E, Baun A, Behra R, Hartmann NB, Filser J and Miao AJ (2008). Environmental behavior and ecotoxicity of engineered nanoparticles to algae, plants, and fungi. *Ecotoxicology*, 17:372–86.
- NavarroE, Piccapietra F, Wagner B, Marconi F, Kaegi R and Odzak N (2008). Toxicity of silver nanoparticles to *Chlamydomonas reinhardtii*. *Environ Sci Technol*, 42: 8959–64
- Pal S, Tak YK and Song JM. (2007). Does the antibacterial activity of silver nanoparticles depend on the shape of the nanoparticle? A study of the gram-negative bacterium *Escherichia coli*. *Appl Environ Microbiol*, 73:1712–20.
- Rosa Martha Pérez Gutiérrez* and Rosalinda Lule Perez, *Raphanus sativus* (Radish): Their Chemistry and Biology., *Raphanus sativus* (Radish): Their Chemistry and Biology
- Scown T, Santos E, Johnston B, Gaiser B, Baalousha M and Mitov S (2010). Effects of aqueousexposure to silver nanoparticles of different sizes in rainbow trout. *Toxicol Sci*, 115:521–34.
- Tytti Kujala*, Jyrki Loponen and Kalevi Pihlaja. (2001). Betalains and Phenolics in Red Beetroot (*Beta vulgaris*) Peel Extracts:Extraction and Characterisation., *Z. Naturforsch*, 56 c, 343-348
- Y. S.;Jeong, D. H.; Cho, M. H. (2007). Antimicrobial effects of silver nanoparticles. *Nanomed.-Nanotechnol. Biol. Med*, 3(1), 95–101

Yeo MK, Pak SW. (2008). Exposing zebrafish to silver nanoparticles during caudal fin regeneration disrupts caudal fin growth and p53 signaling. *Mol Cell Toxicol*, 4:311–7.

Yeo MK, Yoon JW. (2009). Comparison of the effects of nano-silver antibacterial coatings and silver ions on zebrafish embryogenesis. *Mol Cell Toxicol*, 5:23–31

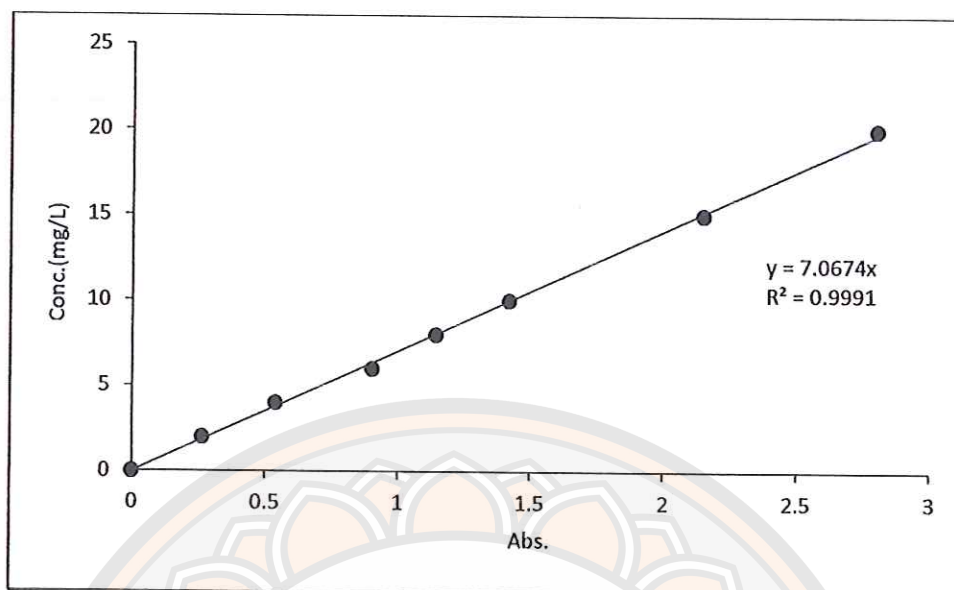
Yuphada Boonto, Jirapat Ananpattarachai and Puangrat Kajitvichyanukul. (2015). Antibacterial properties of Ag and Ag/AgCl nanoparticles from radish and tea extracts for water treatment applications. IWA Publishing.



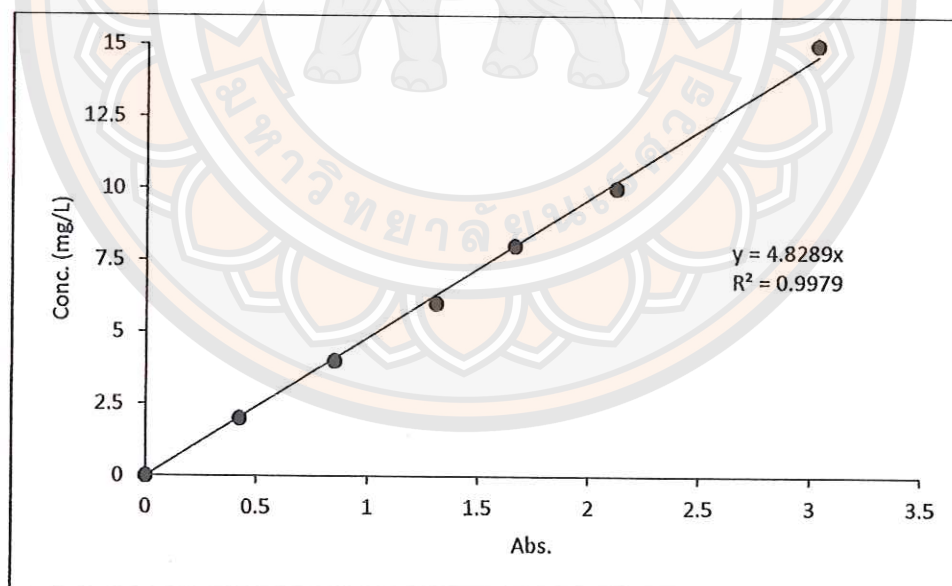


ภาคผนวก

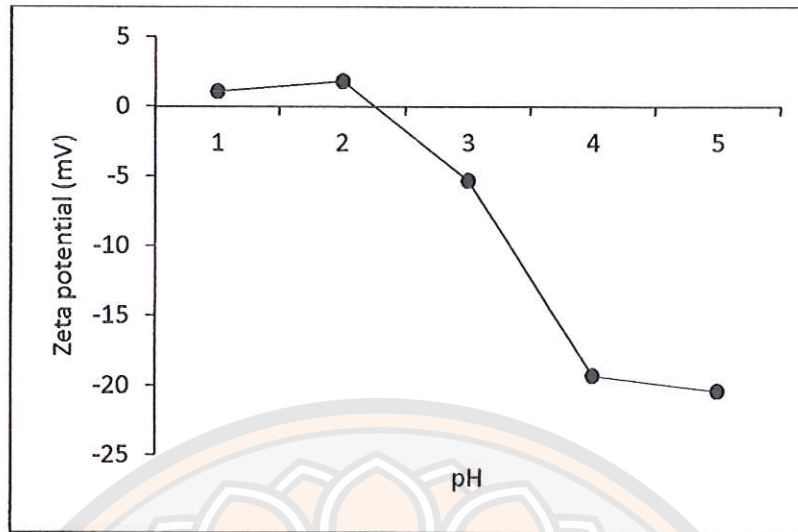
มหาวิทยาลัยรัตนนคร



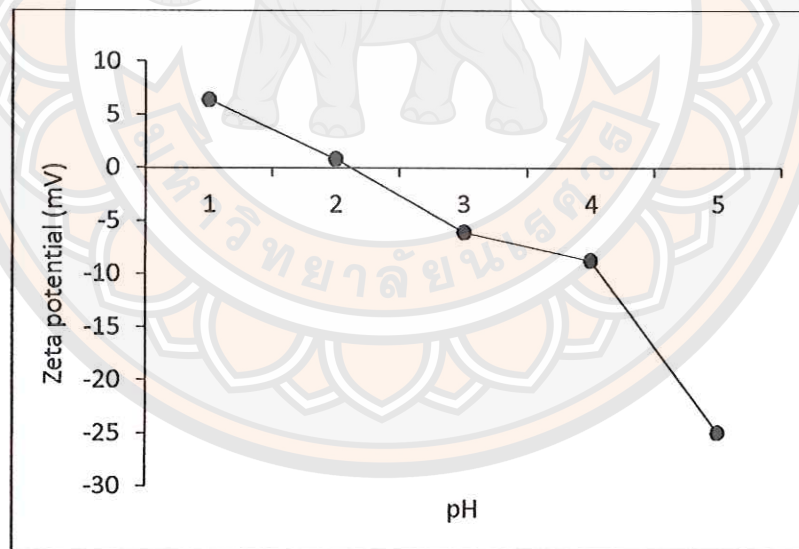
ภาพ 70 กราฟมาตรฐานสำหรับสารสีชนิดมาลาไค์กรีน



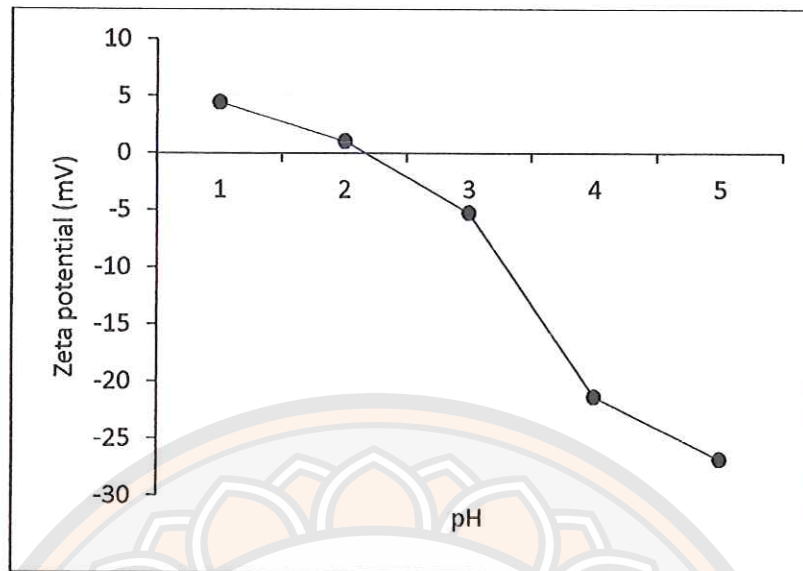
ภาพ 71 กราฟมาตรฐานสำหรับสารสีชนิดเมทิลอินบูล



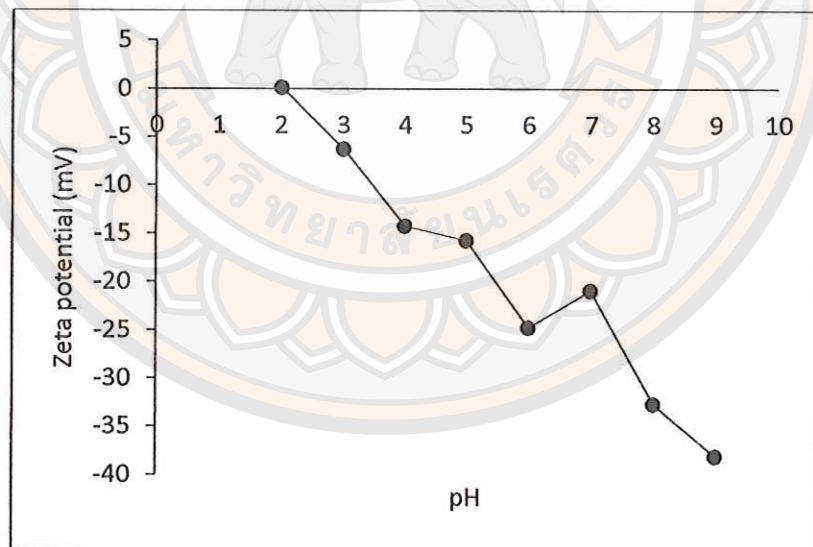
ภาพ 72 แสดงค่าศักย์ซีต้า (pH_{pzc}) ของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl-C



ภาพ 73 แสดงค่าศักย์ซีต้า (pH_{pzc}) ของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl-G



ภาพ 74 แสดงค่าศักย์ซีต้า (pH_{pzc}) ของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl-B



ภาพ 75 แสดงค่าศักย์ซีต้า (pH_{pzc}) ของวัสดุซิลเวอร์นาโนชนิด Ag/AgCl-R



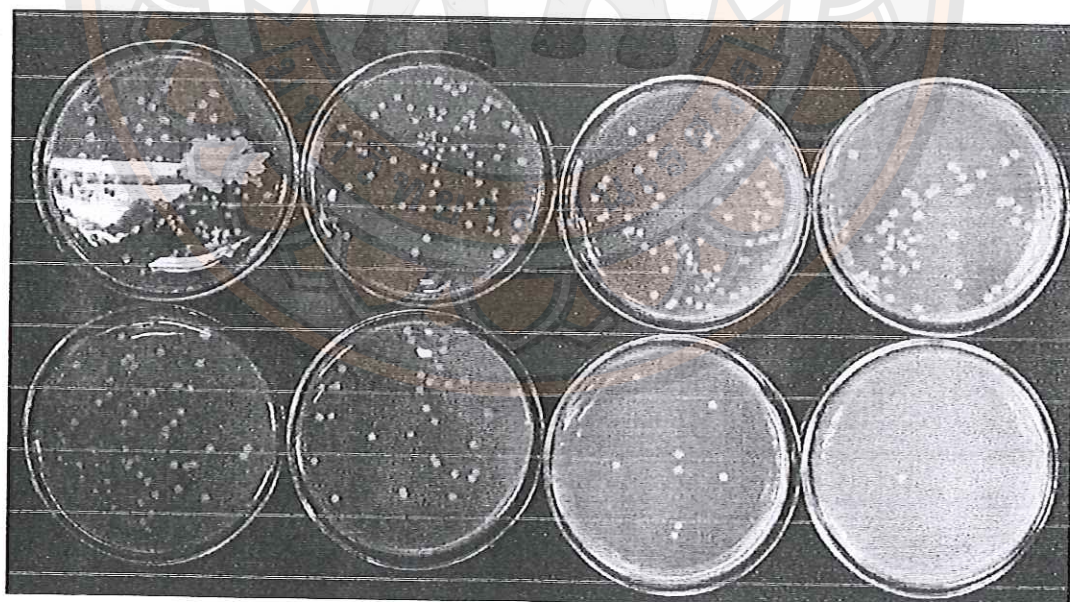
ภาพ 76 แสดงผลการทดลอง Inactivation test ของ Ag/AgCl-G ที่ความเข้มข้น 100 µg/ml ต่อเชื้อ *E. coli* ที่เวลา 0-180 นาที



ภาพ 77 แสดงผลการทดลอง Inactivation test ของ Ag/AgCl-C ที่ความเข้มข้น 100 µg/ml ต่อเชื้อ *E. coli* ที่เวลา 0-180 นาที



ภาพ 78 แสดงผลการทดลอง Inactivation test ของ Ag/AgCl-R ที่ความเข้มข้น 100 µg/ml ต่อเชื้อ *E. coli* ที่เวลา 0-180 นาที



ภาพ 79 แสดงผลการทดลอง Inactivation test ของ Ag/AgCl-B ที่ความเข้มข้น 100 µg/ml ต่อเชื้อ *E. coli* ที่เวลา 0-180 นาที