

การตรวจสอบสมบัติทางกลและทางชีวภาพของโฟมเงินที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด



นางสาวอัญมณี อุ่นประเคิม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

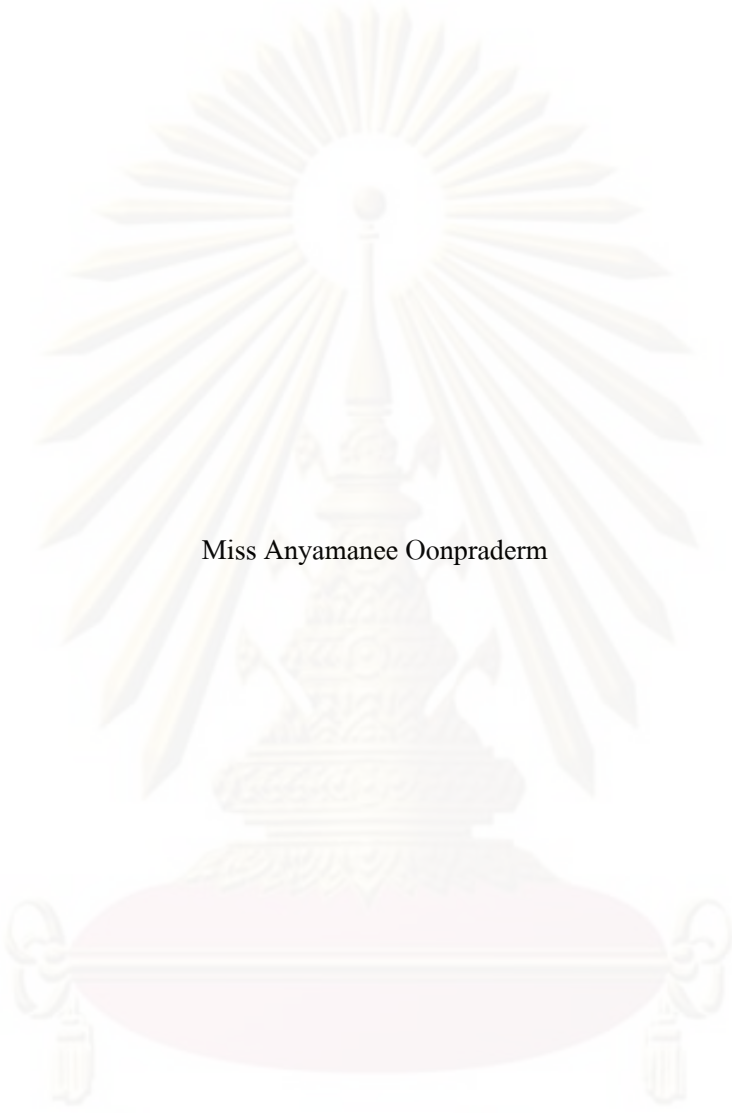
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND BIOLOGICAL PROPERTIES OF OPEN-CELL SILVER
FOAMS



Miss Anyamanee Oonpradern

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineer Program in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การตรวจสอบสมบัติทางกลและทางชีวภาพของโพน์เงินที่มีโครงสร้าง
โพรงอากาศแบบเปิด

โดย

นางสาวอัญมณี อุ่นประเดิม

สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการ

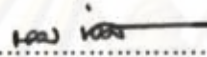
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย

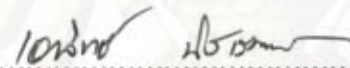
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

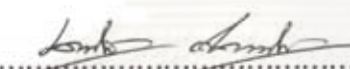
ดร.อุรษา รักษัตานนท์ชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.อุรษา รักษัตานนท์ชัย)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.เรืองเดช ชงศรี)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไสว ค่านชัยวิจิตร)

อัญมณี อุ้นประเดิม : การตรวจสอบสมบัติทางกลและทางชีวภาพของ โฟมเงินที่มีโครงสร้าง โพรงอากาศแบบเปิด. (INVESTIGATION OF MECHANICAL AND BIOLOGICAL PROPERTIES OF OPEN-CELL SILVER FOAMS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร.อุรษา รัศมีตานนท์ชัย, 103 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้าง สมบัติทางกล สมบัติทางชีวภาพและความสามารถในการซึมผ่านของโฟมเงินที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด ซึ่งนำ NaCl มาใช้เป็นตัวสร้างโพรงอากาศในกรรมวิธีการถอดแบบ ผงเงินถูกผลิตโดยกระบวนการกลีเซอรอล และนำมาผลิตเป็น โฟมเงินด้วยการนำผงเงินผสมกับ NaCl ที่มีทั้งขนาดของอนุภาคและปริมาณที่ต่างกัน แล้วนำไปเผาผนึกที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ การทดสอบการรับแรงอัดนั้นใช้โฟมเงินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 mm ใช้ความเร็วในการอัด 0.5 mm/min อัดจนถึง 60% ของความเครียด

จากผลการวิจัยพบว่า โฟมเงินมีการเชื่อมต่อกันของรูพรุน โครงสร้างของโฟมเงินมีความสม่ำเสมอและการเชื่อมต่อกันของรูพรุนลดลงเมื่ออนุภาค NaCl มีขนาดใหญ่ในปริมาณที่เท่ากัน สำหรับการทดสอบการรับแรงอัดของโฟมเงิน เมื่อเปรียบเทียบโฟมที่มีขนาดของโพรงอากาศเท่ากันแต่มีปริมาณต่างกันจะเห็นว่าโฟมที่มีปริมาณ NaCl น้อยมีความแข็งแรงมากกว่าโฟมที่มีปริมาณ NaCl มาก ความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของโฟมเงิน เมื่อโฟมเงินสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที พบว่าโฟมเงินสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ดีกว่าเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ในทุกกรณีเมื่อปริมาณรูพรุนของโฟมเงินเพิ่มขึ้น โฟมเงินสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ได้เพิ่มขึ้น เพราะมีพื้นที่สัมผัสมากขึ้น ความสามารถในการซึมผ่านของโฟมเงินเพิ่มขึ้นเมื่อ โฟมเงินที่มีขนาดของอนุภาค NaCl ใหญ่ และมีปริมาณของอนุภาค NaCl เพิ่มขึ้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต.....อัญมณี อุ้นประเดิม.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2552.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....อุรษา รัศมีตานนท์ชัย

#4970699121 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS : METAL FOAM/ SILVER/ ANTIMICROBIAL ABILITY/ POWDER METALLURGY/
POROSITY

ANYAMANEE OONPRADERM : INVESTIGATION OF MECHANICAL AND BIOLOGICAL
PROPERTIES OF OPEN-CELL SILVER FOAMS. THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR
SEKSAK ASAVAVISITHCHAI, Ph.D., THESIS COADVISOR : URACHA RUKTANONCHAI,
Ph.D., 103 pp.

The objective of this work is to study the structure, mechanical properties, biological properties and permeability of open-cell Ag foams through the replication process in which NaCl was employed as space-holder. The Ag powder was synthesized through glycerol process. The Ag foams were produced by mixing the Ag powders with NaCl of various particle contents and sizes, followed by sintering at 750°C for 3 h in air. The compression tests were performed with the 11 mm diameter cylindrical samples at a crosshead speed of 0.5 mm/min to 60% strain.

It was found that the Ag foams had interconnected open-cell porosity with pore size and morphology similar to that of the NaCl particles. Homogeneity and interconnected porosity of foam structure decrease when larger NaCl particles of equivalent volume content were used. The compressive properties of the foams using lower NaCl contents, of equivalent pore size, are higher than that of the foams with higher NaCl contents. It was also found that antimicrobial ability of Ag foams, after 15 min of incubation, is more effective on *E.coli* than *S.aureus*. In all cases, when the foam porosity increases, the growth inhibition of both *E.coli* and *S.aureus* increases, due to increasing contact area. The permeability of Ag foams increases when larger NaCl particles, as well as higher particle contents, were employed.

Department :Metallurgical Engineering..... Student's signature : Anyamanee Oonpradern
Field of study : ...Metallurgical Engineering..... Advisor's signature : Seksak Asavavisithchai
Academic year :2009..... Co-advisor's signature : อรุชา รุกตัญจนชัย
ศูนย์วิทยทรัพยากร

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆ ฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำแนวทางที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยนี้ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.อรุชา รัศมีตานนท์ชัย ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือตลอดจนให้คำแนะนำแนวทางที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไสว ค่านชัยจิตร และ ดร.เรืองเดช ชงศรี ที่ให้ความรู้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอขอบพระคุณ คุณชูชาติ วารินทร์ ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำในการปฏิบัติการที่ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้การสนับสนุนผู้วิจัยในทุกด้านด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ ขอขอบพระคุณกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดลองตลอดมาจนเสร็จสิ้นงานวิจัยด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้กับข้าพเจ้าตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา ขอกราบขอบพระคุณ คุณครูและอาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนข้าพเจ้ามาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และขอขอบคุณพี่ เพื่อน และน้องนิสิตทุกท่านที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยด้วยดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ข้อยกเว้นของงานวิจัย.....	2
1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 โฟมโลหะ.....	4
2.1.1 โครงสร้างของโฟมโลหะ.....	4
2.1.2 การใช้งานของโฟมโลหะ.....	5
2.2 การผลิตโฟมโลหะ.....	5
2.2.1 วิธีตัวสร้างโพรงอากาศ.....	5
2.2.2 วิธี Sintering-dissolution process (SDP).....	6
2.3 โฟมเงิน.....	10
2.3.1 การผลิตโฟมเงิน.....	10
2.3.2 เงิน (Silver (Ag)).....	12
2.4 การผลิตผงเงิน.....	12
2.4.1 การผลิตผงเงินโดยกระบวนการกลีเซอรอล.....	13
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตโฟมโลหะโดยกรรมวิธีการถอดแบบ.....	15
2.5.1 ประเภทของโลหะหลัก.....	15
2.5.2 ขนาดและรูปร่างของตัวสร้างโพรงอากาศ.....	16

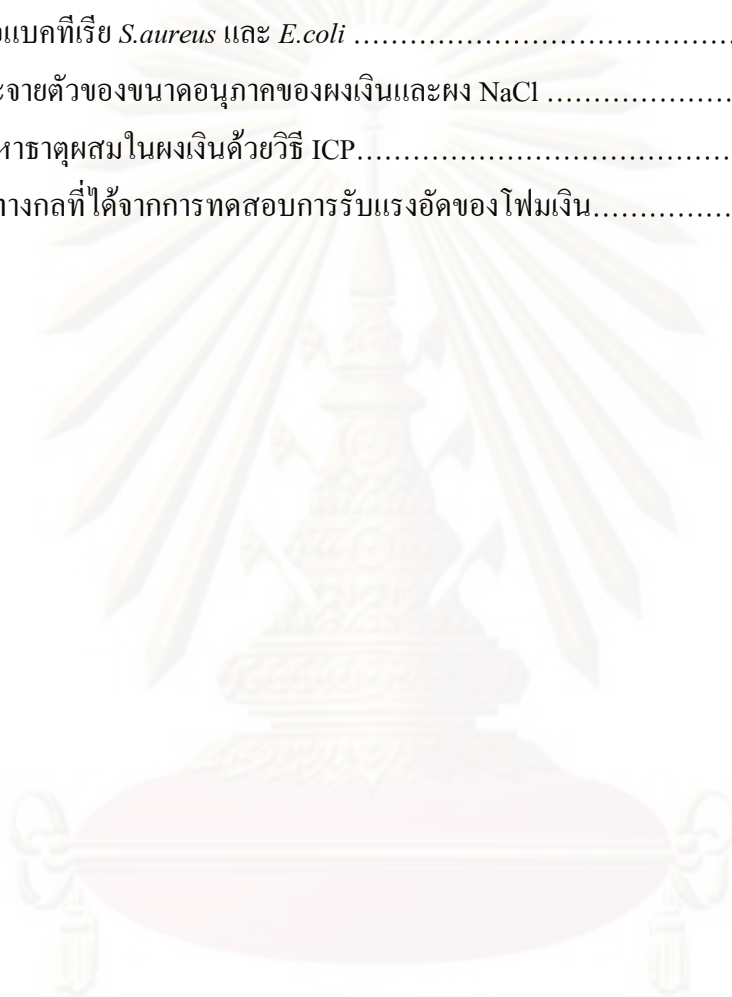
2.5.3 ปริมาณของตัวสร้างโพรงอากาศ.....	17
2.5.4 ความดันในการอัดขึ้นงาน.....	18
2.5.5 อุณหภูมิและเวลาในการเผาขึ้น.....	19
2.5.6 ชาติผสม.....	19
2.6 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย (Antimicrobial).....	21
2.6.1 วิธี Minimum Inhibitory Concentration (MIC).....	21
2.6.2 วิธี Cup diffusion method	22
2.7 ลักษณะของเชื้อแบคทีเรีย.....	26
2.8 สมบัติทางกลของโฟมโลหะ.....	27
2.8.1 ความสามารถในการรับแรงอัดของโฟม.....	27
2.8.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงในการรับแรงอัดและการดูดซับพลังงาน.....	29
2.8.2.1 ความหนาแน่น.....	29
2.8.2.2 ขนาดและรูปร่างของตัวสร้างโพรงอากาศ.....	30
2.8.2.3 ปริมาณของโพรงอากาศ.....	31
2.8.2.4 การกระจายตัวของโพรงอากาศ.....	31
2.8.2.5 ทิศทางของโพรงอากาศ.....	31
2.8.2.6 ตำแหน่ง.....	31
2.8.3 ความสามารถในการไหล (Fluidity).....	32
3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง.....	36
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	36
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	36
3.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	37
3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	37
3.4.1 การผลิตผงเงินโดยกระบวนการกลีเซอรอล.....	37
3.4.2 การเตรียมผง NaCl	41
3.4.3 การผลิต Precursor	41
3.4.4 การผลิตโฟมเงิน.....	41
3.4.5 การวัดความหนาแน่นของ Precursor และ โฟมเงิน	42
3.4.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโฟมเงิน.....	43

	หน้า
3.4.7 การทดสอบสมบัติทางกลของโฟมเงิน.....	43
3.4.8 การทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย.....	44
3.4.9 การตรวจสอบลักษณะของเชื้อแบคทีเรีย	48
3.4.10 การวัดอัตราการไหลของของเหลวผ่านโฟมเงิน.....	48
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	50
4 ผลการทดลอง.....	51
4.1 คุณลักษณะเฉพาะของวัสดุผง.....	51
4.2 โครงสร้างมหภาคของโฟมเงิน (Macrostructure).....	52
4.3 โครงสร้างจุลภาคของโฟมเงิน (Microstructure).....	55
4.4 ปริมาณรูพรุนของชิ้นงานอัดขึ้นรูปของโฟมเงิน.....	57
4.5 ความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมเงิน.....	59
4.6 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียหลังจากที่โฟมเงินสัมผัสเชื้อ แบคทีเรียที่เวลาต่าง ๆ.....	64
4.7 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย.....	65
4.8 ลักษณะของเชื้อแบคทีเรียบนชิ้นงาน.....	73
4.9 อัตราการไหลของโฟมเงิน.....	74
5 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	79
5.1 ผลของปริมาณเงินต่อโครงสร้างของโฟมเงิน.....	79
5.2 ผลของขนาดอนุภาคตัวสร้างโพรงอากาศต่อโครงสร้างของโฟมเงิน.....	80
5.3 ความแข็งแรงของโฟม.....	80
5.4 ความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย.....	83
5.5 ความสามารถในการไหลของของเหลวผ่านโฟมเงิน.....	86
6 สรุปผลการทดลอง.....	88
รายการอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก.....	92
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	103

สารบัญตาราง

ญ

ตาราง	หน้า
2.1 แสดงคุณสมบัติของเงิน.....	12
2.2 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุผสมในผงเงิน โดยวิธีรีดิวซ์ด้วยกลีเซอรอล.....	15
2.3 แสดง Growth inhibition rate ของ Ag-NPs ในการยับยั้งการเจริญเติบโต ของเชื้อแบคทีเรีย <i>S.aureus</i> และ <i>E.coli</i>	23
4.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงเงินและผง NaCl	51
4.2 ผลการหาธาตุผสมในผงเงินด้วยวิธี ICP.....	52
4.3 สมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบการรับแรงอัดของโฟมเงิน.....	62



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่	หน้า
2.1 (ก) ภาพโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด และ (ข) โครงสร้างโพรงอากาศแบบปิด.....	4
2.2 การผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด.....	6
2.3 กราฟความเค้นและความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมซึ่งเผาผนึกที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ปริมาณรูพรุน = 70%).....	6
2.4 วิธี Sintering and dissolution process ของการผลิตโฟมอะลูมิเนียม.....	7
2.5 ลักษณะของ (ก) ฟองอะลูมิเนียม และ (ข) ฟอง NaCl	8
2.6 ปริมาณรูพรุนและความหนาแน่นของชิ้นงานอัดขึ้นรูปที่ความดันต่างๆ (ก) ขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 338 และ 1,500 μm ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของ NaCl/Al, 70:30 และ (ข) ปริมาณรูพรุน และอัตราส่วนโดยปริมาตรของ NaCl/Al ขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 338 μm และความดันในการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน 330 MPa.....	9
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% และปริมาณรูพรุนในโฟม อะลูมิเนียมที่มีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 338 μm (\diamond), 855 μm (\square), 1,500 μm (Δ) และ 3,000 μm (\circ).....	9
2.8 ภาพโฟมอะลูมิเนียมที่มีปริมาณรูพรุน (ก) 85% และ (ข) 62%.....	10
2.9 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานอัดขึ้นรูปและโฟมเงินที่สัมพันธ์กับปริมาณ ของน้ำตาล.....	11
2.10 (a) ถึง (d) การวิเคราะห์โครงสร้างด้วย XRD ของผงเงินโดยกระบวนการ กลีเซอรอลที่อัตราส่วน โมลาร์ = 0.01, 0.02, 0.04 และ 0.10.....	14
2.11 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วย XRD ของผงเงินโดยกระบวนการกลีเซอรอล ที่อัตราส่วน โมลาร์ = 0.01.....	14
2.12 (ก) และ (ข) ภาพ SEM ของผงเงินที่ผลิตโดยกระบวนการกลีเซอรอล (R=0.01).....	15
2.13 (ก) และ (ข) ภาพ SEM ของผงเงินที่ผลิตโดยกระบวนการกลีเซอรอล (R=0.02).....	15
2.14 (ก) และ (ข) โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง NaCl แบบอนุภาคลูกบาศก์ขนาดเล็กและ อนุภาคลูกบาศก์ขนาดใหญ่.....	16
2.15 รูปร่างของตัวสร้างโพรงอากาศ (ก) คาร์บอนไมด์ที่มีรูปทรงแบบทรงกลม (ข) คาร์บอนไมด์ที่มีรูปทรงแบบ Strip shaped	17
2.16 ภาพ SEM ของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ตัวสร้างโพรงอากาศแบบ	

(ก) คาร์บาไมด์ที่มีรูปทรงแบบทรงกลม (ข) คาร์บาไมด์ที่มีรูปทรงแบบ Strip - shaped	17
2.17 กราฟความเค้นและความเครียดของโฟมเงินที่ทำด้วยน้ำตาลทรายขาว หรือน้ำตาลทรายแดงที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่างกัน.....	18
2.18 การพังของชิ้นงานเนื่องจากการใช้ความดันในการอัดชิ้นงานไม่เหมาะสม (ก) เกิดรอยร้าวและแตกหักที่ 300 MPa (ข) เกิดการหลุดของผงโลหะมาก ที่ 100 MPa (ค) เกิดการหลุดของผงโลหะที่ 150 MPa	19
2.19 ผลของการเติมดีบุกและแมกนีเซียมในโครงสร้างเนื้อพื้นของอะลูมิเนียม (ก) และ (ข) โฟมอะลูมิเนียมไม่ได้เติมดีบุกและแมกนีเซียม (ค) 0.5 wt.%Mg (ง) 0.5 wt.% Sn + 0.5 wt.% Mg.....	20
2.20 (ก) และ (ค) แสดงการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย <i>S.aureus</i> และ <i>E.coli</i> ในอาหารเลี้ยงเชื้อ (LB medium) ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Ag-NPs แตกต่างกัน (ข) และ (ง) 1 เซลล์ของแบคทีเรีย (โคโลนี) หลังจาก Ag-NPs มีความเข้มข้น 10 ppm หลังจากทำการบ่มเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 0, 2, 3.5 ชั่วโมง ของเชื้อแบคทีเรีย <i>S.aureus</i> และ <i>E.coli</i>	21
2.21 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย (Antibacterial) (ก) สารละลาย Pt-NPs ที่มีสารช่วยเพิ่มความคงตัว PVP (ข) สารละลาย Ag-NPs ที่มีสารช่วยเพิ่มความคงตัว PVP (ค) สารละลาย Ag-NPs ที่มีสารช่วยเพิ่มความคงตัว SDS ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย <i>S.aureus</i> และ <i>E.coli</i> โดย Ag-NPs และ Pt-NPs มีความเข้มข้น 5.4 ppm (10 μ L).....	22
2.22 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียสำหรับความเข้มข้นที่ต่างกันของสารละลาย Ag-NPs ที่มีสารช่วยเพิ่มความคงตัว PVP ของเชื้อแบคทีเรีย <i>S.aureus</i> และ <i>E.coli</i>	24
2.23 ภาพโครงสร้าง (ก) โพลียูรีเทน (ข) โพลียูรีเทนเคลือบอนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	25
2.24 แสดงการเกิดเชื้อแบคทีเรีย <i>E.coli</i> ที่มีความเข้มข้น 10^2 บนอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย (ก) Control (ข) หลังจากสัมผัสกับโพลียูรีเทน และ (ค) หลังจากสัมผัสกับโพลียูรีเทนเคลือบอนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	25
2.25 ลักษณะของเชื้อแบคทีเรีย (ก) แบคทีเรีย <i>E.coli</i> และ (ข) แบคทีเรีย <i>S.aureus</i>	26

2.26 (ก) กราฟความเค้นและความเครียดของโฟมโลหะในอุดมคติ	
(ข) กราฟความเค้นและความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมที่มีความหนาแน่น สัมพัทธ์ 0.363.....	27
2.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโฟมอะลูมิเนียม.....	29
2.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโฟมอะลูมิเนียม.....	30
2.29 ความเร็วเฉลี่ยของไหลกับความดันลดในโฟมอะลูมิเนียม โครงสร้างแบบเปิด ที่มีความหนาแน่นของโครงอากาศ 10, 20 และ 40 PPI	32
2.30 Velocity profile ของการไหล.....	34
2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์กับความเสียดทานของ โฟมอะลูมิเนียม.....	35
3.1 กระบวนการผลิตซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$).....	39
3.2 การผลิตผงเงินโดยใช้ซิลเวอร์ไนเตรต.....	40
3.3 การผลิตโฟมเงิน.....	42
3.4 ทิศทางการตัดชิ้นงาน.....	43
3.5 การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อและการเตรียมเชื้อแบคทีเรีย.....	46
3.6 การทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย.....	47
3.7 การวัดอัตราการไหลของของเหลวผ่านโฟมเงิน.....	49
3.8 อุปกรณ์จริงที่ใช้ในการวัดอัตราการไหลของของเหลวผ่านโฟมเงิน.....	50
4.1 ลักษณะรูปร่างของวัสดุผง (ก) ผงเงิน (ข) ผง NaCl	51
4.2 โครงสร้างมหภาคของโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% และมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ (ก) 494 μm (ข) 337 μm (ค) 126 μm และ (ง) 39 μm	53
4.3 ภาพขยายโครงสร้างมหภาคของโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% และมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ (ก) 494 μm (ข) 337 μm (ค) 126 μm และ (ง) 39 μm	54
4.4 โครงสร้างจุลภาคของโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% และมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ (ก) 494 μm (ข) 337 μm (ค) 126 μm และ (ง) 39 μm	56
4.5 ความหนาแน่นของชิ้นงานอัดขึ้นรูปและผลิตเป็นโฟมที่มีขนาดเฉลี่ย	

(ก) $\varnothing = 494 \mu\text{m}$ (ข) $\varnothing = 337 \mu\text{m}$ (ค) $\varnothing = 126 \mu\text{m}$ และ (ง) $\varnothing = 39 \mu\text{m}$	57
4.6 ปริมาตรรูพรุนของโฟมเงินที่ผสม NaCl ที่มีขนาดเฉลี่ย (ก) $\varnothing = 494 \mu\text{m}$ (ข) $\varnothing = 337 \mu\text{m}$ (ค) $\varnothing = 126 \mu\text{m}$ และ (ง) $\varnothing = 39 \mu\text{m}$	58
4.7 แสดงกราฟความเค้นและความเครียดในการเปรียบเทียบระหว่าง ขนาดของอนุภาค NaCl กับปริมาณในการผสม NaCl (ก) 60 vol.% (ข) 70 vol.% (ค) 80 vol.%	60
4.8 ภาพขยายของกราฟความเค้นและความเครียดในการเปรียบเทียบระหว่าง ขนาดของอนุภาค NaCl กับปริมาณในการผสม NaCl (ก) 60 vol.% (ข) 70 vol.% และ (ค) 80 vol.%	61
4.9 ความแข็งแรงจุดครากของโฟมเงิน.....	63
4.10 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย <i>E.coli</i> และ <i>S.aureus</i> ภายหลังจากที่โฟมเงินสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15, 30, 45, 60 นาที และ 24 ชั่วโมง ในโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 70 vol.% ซึ่งมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ $494 \mu\text{m}$ และบ่มเชื้อแบคทีเรีย ที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	64
4.11 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย <i>E.coli</i> และ <i>S.aureus</i> ภายหลังจากที่โฟมเงินสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% ซึ่งมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ $447 \mu\text{m}$ และบ่มเชื้อแบคทีเรีย ที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	65
4.12 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย <i>E.coli</i> และ <i>S.aureus</i> ภายหลังจากที่โฟมเงินสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% ซึ่งมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ $494 \mu\text{m}$ และบ่มเชื้อแบคทีเรีย ที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	66
4.13 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย <i>E.coli</i> และ <i>S.aureus</i> ภายหลังจากที่ โฟมเงินสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% ซึ่งมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ $337 \mu\text{m}$ และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	67

- 4.14 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ภายหลังจากที่ โฟมเงินสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% ซึ่งมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 126 μm และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง..... 68
- 4.15 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ภายหลังจากที่ โฟมเงินสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% ซึ่งมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 39 μm และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง..... 69
- 4.16 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ภายหลังจากที่ โฟมเงิน สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โฟมเงินที่ผสม NaCl ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาค NaCl ต่าง ๆ ที่ผสม NaCl ปริมาณ (ก) 60 vol.% (ข) 70 vol.% และ (ค) 80 vol.% และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง..... 71
- 4.17 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ภายหลังจากที่ โฟมเงิน สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โฟมเงินที่ผสม NaCl ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาค NaCl ต่าง ๆ ที่ผสม NaCl ปริมาณ (ก) 60 vol.% (ข) 70 vol.% และ (ค) 80 vol.% และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง..... 73
- 4.18 ลักษณะของเชื้อแบคทีเรียบนชิ้นงาน ภายหลังจากที่ชิ้นงานสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรีย เป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 80 vol.% ซึ่งมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 494 μm (ก) *E.coli* (ข) *S.aureus* และ (ค) *E.coli* (ง) *S.aureus* ที่ไม่ได้ผ่านการสัมผัสกับโฟมเงิน..... 74
- 4.19 อัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่าน โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% และมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ (ก) 494 μm (ข) 337 μm (ค) 126 μm และ (ง) 39 μm 76
- 4.20 การวัดอัตราการไหลของน้ำมันถั่วเหลืองที่ไหลผ่าน โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% และมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ (ก) 494 μm (ข) 337 μm (ค) 126 μm และ (ง) 39 μm 78
- 5.1 แสดงรูปร่างของโพรงอากาศในแบบจำลองสำหรับ โฟมที่มีโครงสร้างแบบเปิด..... 83

1ก	การยับยั้งของโคโลนีของเชื้อแบคทีเรีย <i>E.coli</i> และ <i>S.aureus</i> ตามลำดับ ภายหลังจากที่ชิ้นงานสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้โฟมเงินที่ผสม NaCl ที่มีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 447 μm และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ก) 60 vol.% (ข) 70 vol.% (ค) 80 vol.% (ง) control.....	93
2ก	การยับยั้งของโคโลนีของเชื้อแบคทีเรีย <i>E.coli</i> และ <i>S.aureus</i> ตามลำดับ ภายหลังจากที่ชิ้นงานสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โฟมเงินที่ผสม NaCl ที่มีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 494 μm และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ก) 60 vol.% (ข) 70 vol.% (ค) 80 vol.% (ง) control.....	94
3ก	การยับยั้งของโคโลนีของเชื้อแบคทีเรีย <i>E.coli</i> และ <i>S.aureus</i> ตามลำดับ ภายหลังจากที่ชิ้นงานสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โฟมเงินที่ผสม NaCl ที่มีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 337 μm และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ก) 60 vol.% (ข) 70 vol.% (ค) 80 vol.% (ง) control.....	95
4ก	การยับยั้งของโคโลนีของเชื้อแบคทีเรีย <i>E.coli</i> และ <i>S.aureus</i> ตามลำดับ ภายหลังจากที่ชิ้นงานสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โฟมเงินที่ผสม NaCl ที่มีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 126 μm และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ก) 60 vol.% (ข) 70 vol.% (ค) 80 vol.% (ง) control.....	96
5ก	การยับยั้งของโคโลนีของเชื้อแบคทีเรีย <i>E.coli</i> และ <i>S.aureus</i> ตามลำดับ ภายหลังจากที่ชิ้นงานสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โฟมเงินที่ผสม NaCl ที่มีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 39 μm และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ก) 60 vol.% (ข) 70 vol.% (ค) 80 vol.% (ง) control.....	97
6ก	แสดงการหาค่าคงที่ (C) ในสมการของ Ashby.....	102

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

โพลีโพลีเมอร์เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงเมื่อเทียบกับโลหะทั่วไป โดยทั่วไปปริมาณของโพรงอากาศในโพลีโพลีเมอร์จะมีมากกว่า 50 vol.% นิยมใช้อลูมิเนียม (Aluminium) มาใช้เป็นโลหะในการทำเป็นโพลีโพลีเมอร์ เนื่องจากอะลูมิเนียมมีข้อดีหลายประการ เช่น มีราคาถูก สามารถนำมารีไซเคิลได้ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถหาได้ง่าย อย่างไรก็ตามการใช้ อะลูมิเนียมเป็นโลหะหลักอาจไม่เหมาะสมในการใช้งานบางประเภทของโพลีโพลีเมอร์ที่ต้องการ ปริมาณพื้นที่ผิวสูงและมีโครงสร้างแบบเปิด เนื่องจากอะลูมิเนียมยังมีสมบัติการนำความร้อนที่ไม่ดี มาก และมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ และไม่มีสมบัติการต้านทานการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียและ จุลินทรีย์ การใช้งานโพลีโพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเปิดจะเหมาะสำหรับนำไปใช้งานในด้านตัวกรอง (Filter) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) อุปกรณ์ด้านการแพทย์ (Medical equipment) และตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst support) เนื่องจากโพลีโพลีเมอร์มีความหนาแน่นต่ำ และมีปริมาณพื้นที่ผิวมากทำให้เหมาะสมในการนำไปใช้งานดังกล่าว

การผลิตโพลีโพลีเมอร์สามารถผลิตได้หลายวิธี ซึ่งกรรมวิธีการถอดแบบ (Replication process) ประเภท Sintering and dissolution process (SDP) เป็นหนึ่งในกรรมวิธีการผลิตโพลีโพลีเมอร์ ที่เป็นที่ยอมรับสำหรับการผลิตโพลีโพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเปิด โดยใช้หลักการของการสร้างโพรง อากาศจำลองขึ้นในเนื้อโพลีโพลีเมอร์ ซึ่งเรียกว่าตัวสร้างโพรงอากาศ (Space holder) โดยนำ NaCl มาใช้ เป็นตัวสร้างโพรงอากาศ แล้วนำไปอัดขึ้นรูปชิ้นงานจากนั้นนำไปเผาผลาญเพื่อให้โครงสร้างของเนื้อ พื้นยึดติดกัน และทำการละลายตัวสร้างโพรงอากาศออกในตัวทำละลายที่เหมาะสม การผลิตโพลี โพลีเมอร์โดยกรรมวิธีการถอดแบบทำให้ได้โครงสร้างโพลีโพลีเมอร์ที่มีลักษณะเหมือนกันทุกประการกับ ต้นแบบ และสามารถควบคุมขนาดของโพรงอากาศได้โดยการเลือกใช้ตัวสร้างโพรงอากาศที่ เหมาะสม สามารถกำจัดตัวสร้างโพรงอากาศได้ง่ายและควบคุมปริมาณรูพรุนในชิ้นงานได้อย่าง แม่นยำ

ในการทำวิจัยนี้ผู้ทำวิจัยได้นำโลหะเงินมาใช้เป็นโลหะหลักในการผลิตโพลีโพลีเมอร์ เพราะเงินมีคุณสมบัติเด่นหลายด้าน ไม่ว่าจะเป็นความหนาแน่นและอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่สูง การทนทานต่อการกัดกร่อนในอากาศชั้นได้ดี การนำความร้อนและการนำไฟฟ้าที่ดี รวมทั้งมีสมบัติ การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่ดีด้วย โลหะเงินเป็นโลหะที่เหมาะสมสำหรับนำมาผลิต เป็นโพลีโพลีเมอร์ เนื่องจากมีความเสถียรสูงสามารถยึดเกาะกันได้ดีหลังจากการเผาผลาญ และไม่

จำเป็นต้องควบคุมบรรยากาศในการเผาผนึก นอกจากนี้การนำโลหะเงินมาเป็นส่วนผสมในการผลิตตัวกรองน้ำสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำได้

โดยทั่วไปแบคทีเรียสามารถแบ่งได้หลายรูปแบบ เช่น แบ่งตามการย้อมติดสีโดยแยกได้เป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ พวกที่ติดสีแกรมบวก (Gram-positive) คือ *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*) และพวกที่ติดสีแกรมลบ (Gram-negative) คือ *Escherichia coli* (*E.coli*) ซึ่งเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* เป็นเชื้อแบคทีเรียที่สามารถพบได้ทั่วไปในอากาศ ผุ่นละออง น้ำและอาหาร จึงเหมาะสำหรับการนำมาทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียในโพลีเมอร์ โดยให้โพลีเมอร์สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียที่เวลาต่างกัน ดังนั้นการทําวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษา ลักษณะของโครงสร้างของโพลีเมอร์ พฤติกรรมการรับแรงอัดและการดูดซับพลังงานของโพลีเมอร์ การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียและความสามารถในการไหลของของไหลผ่านโพลีเมอร์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการผลิตโพลีเมอร์ด้วยกรรมวิธีการถอดแบบ (Replication method) ประเภท Sintering and dissolution process (SDP)
- 1.2.2 เพื่อศึกษาโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของโพลีเมอร์
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความแข็งแรงในการอัดของโพลีเมอร์
- 1.2.4 เพื่อศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของโพลีเมอร์
- 1.2.5 เพื่อศึกษาความสามารถในการไหลของของไหลผ่านโพลีเมอร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ผลิตโพลีเมอร์โดยใช้วิธีการถอดแบบโดยใช้ผงเงินที่ได้จากกรีควอตซ์ของซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) โดยกระบวนการกลีเซอรอล ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$)
- 1.3.2 ศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* (*S.aureus* ATCC6538) และ *Escherichia coli* (*E.coli* ATCC25922)
- 1.3.3 ทดสอบสมบัติทางกลของโพลีเมอร์โดยการทดสอบการรับแรงอัด (Compression test)
- 1.3.4 ทดสอบความสามารถในการไหลของน้ำและน้ำมันถั่วเหลืองที่ไหลผ่านโพลีเมอร์

1.4 ข้อจำกัดของงานวิจัย

เครื่องวัดอัตราการไหลของของไหลถูกออกแบบและสร้างขึ้นมา โดยนำน้ำและน้ำมันถั่วเหลืองที่มีความหนืดต่างกันมาใช้ในการทดลองการวัดอัตราการไหล แม่พิมพ์ที่ใช้อัดขึ้นรูปชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าเครื่องมือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 และ 11 mm

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

โฟมโลหะ (Metal foam), เงิน (Ag), การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย (Antimicrobial activity), กรรมวิธีโลหะผง (Powder metallurgy), รูพรุน (Porosity)

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 มีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการผลิตโฟมเงิน โดยกรรมวิธีการถอดแบบ
- 1.6.2 มีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการเตรียมผงเงิน โดยกระบวนการกลีเซอรอล
- 1.6.3 มีความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างแบบเปิดของโฟมเงินที่ผลิตโดยกรรมวิธีการถอดแบบ
- 1.6.4 มีความรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมเงิน
- 1.6.5 มีความรู้เกี่ยวกับความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของโฟมเงิน
- 1.6.6 มีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับความสามารถในการไหลของของไหลผ่านโฟมเงิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

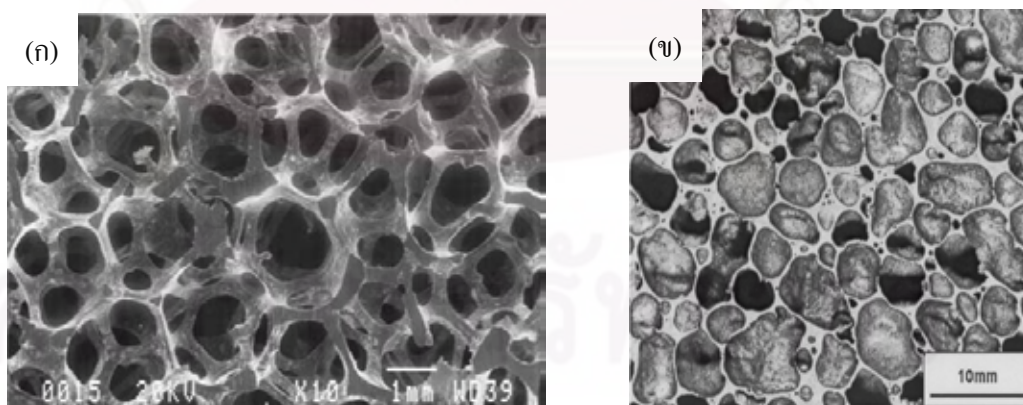
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โฟมโลหะ

โฟมโลหะเป็นวัสดุโลหะประเภทใหม่ที่มีโพรงอากาศหรือเรียกอีกอย่างว่าเซลล์ (Cell) จำนวนมากในเนื้อโลหะ โดยทั่วไปปริมาณของโพรงอากาศที่มีจะมีมากกว่า 50 vol.% จึงทำให้โฟมโลหะมีความหนาแน่นต่ำ มีขนาดพื้นที่ผิวมากซึ่งส่งผลให้มีสมบัติทางกลที่ดี เมื่อเทียบกับโลหะอื่นที่มีปริมาตรเท่ากัน การใช้งานของโฟมโลหะส่วนใหญ่ใช้เป็นวัสดุทำโครงสร้างที่ต้องการน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงสูง ใช้เป็นวัสดุทนไฟและอื่นๆ [1]

2.1.1 โครงสร้างของโฟมโลหะ

โครงสร้างของโฟมโลหะสามารถจำแนกตามลักษณะของโพรงอากาศได้เป็นโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด (Open-cell structure) และโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิด (Closed cell structure) สำหรับโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดแต่ละโพรงอากาศจะต่อเชื่อมทะลุถึงกันกับโพรงอากาศข้างเคียงจึงมีลักษณะคล้ายร่างแห สำหรับโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิดแต่ละโพรงอากาศจะถูกปิดล้อมไว้ด้วยผนังของโพรงอากาศคล้ายมีเยื่อหุ้มปิดคลุมโดยรอบโพรงอากาศ ข้อดีของโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด คือมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากแต่มีข้อเสีย คือมีความแข็งแรงน้อยกว่า โฟมโลหะที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิด ดังแสดงในรูปที่ 2.1 [2]



รูปที่ 2.1 (ก) ภาพโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด [3] และ (ข) โครงสร้างโพรงอากาศแบบปิด [4]

2.1.2 การใช้งานของโฟมโลหะ

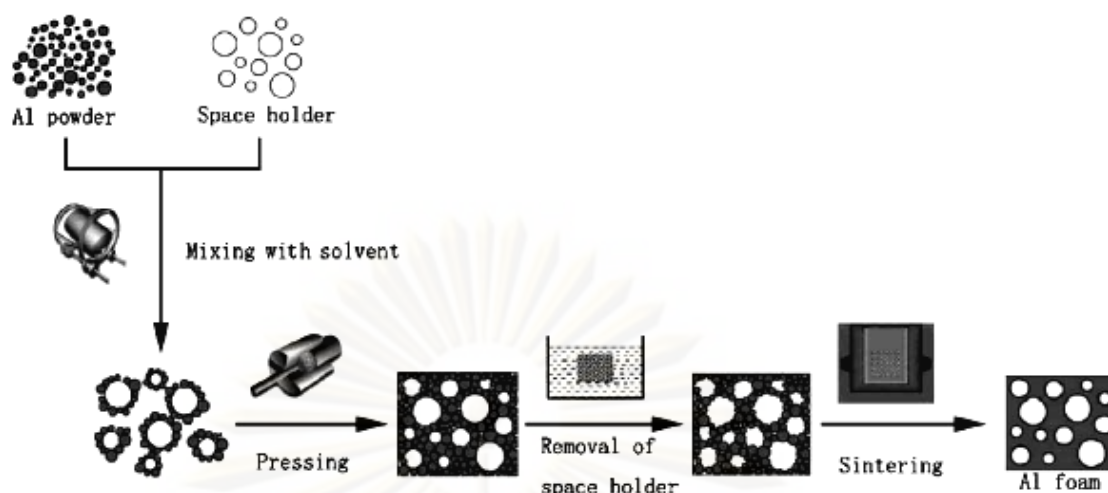
การใช้งานของโฟมโลหะโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดมีการนำไปใช้งานหลายอย่าง เช่น ตัวกรอง (Filter) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) วัสดุทนไฟ (Fire-retardant material) วัสดุดูดซับเสียง (Sound absorber) อุปกรณ์ด้านการแพทย์ เป็นต้น เพราะว่าโฟมโลหะที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากทำให้มีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยามากตาม และสามารถนำไปใช้ทำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ การเลือกโฟมโลหะไปใช้งานนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและลักษณะโครงสร้างของโฟมโลหะ [5]

2.1 การผลิตโฟมโลหะ

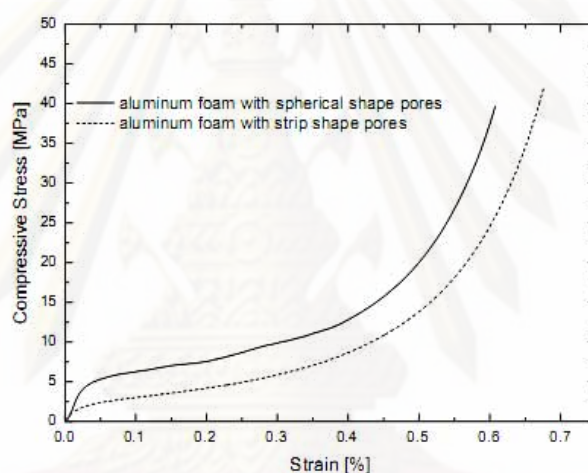
การผลิตโฟมโลหะนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งสามารถจำแนกได้หลายประเภท ขึ้นอยู่กับการผลิต เช่น การเป็นไอของโลหะ (Metal vapour) โลหะหลอมเหลว (Liquid metal) โลหะผง (Powder metal) ไอออนของโลหะ (Metal ions) ในการทำวิจัยครั้งนี้ได้ใช้กรรมวิธีการถอดแบบ (Replication process) เพื่อผลิตโฟมโลหะที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด วิธีการถอดแบบนี้สามารถทำได้หลายรูปแบบ แต่กรรมวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดวิธีหนึ่ง คือวิธีตัวสร้างโพรงอากาศ (Space-holder method) แบบ Sintering and dissolution process (SDP) ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการผลิตโฟมอะลูมิเนียมแบบใช้ผงอะลูมิเนียม [7]

2.2.1 วิธีตัวสร้างโพรงอากาศ

วิธีตัวสร้างโพรงอากาศนี้ใช้สำหรับการผลิตโฟมโลหะที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด ซึ่งโลหะที่นิยมใช้ ได้แก่ อะลูมิเนียม (Aluminium) ไทเทเนียม (Titanium) เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) และโลหะผสมพิเศษ (Superalloy) เป็นต้น [8] โดยกระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมเริ่มต้นจากการนำผงอะลูมิเนียมและตัวสร้างโพรงอากาศมาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน และนำมาอัดขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้การอัดแบบความดันแกนเดียว (Uniaxial pressing) ที่ความดัน 400 MPa ซึ่งเรียกชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปว่า Green compact หลังจากนั้นกำจัดตัวสร้างโพรงอากาศโดยนำไปล้างด้วยน้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 500°C และ 570°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ได้โฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด ดังแสดงในรูปที่ 2.2 สำหรับรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ตัวสร้างโพรงอากาศที่มีรูปทรงแบบทรงกลมจะแสดงค่าความแข็งแรงในการรับแรงอัดสูงกว่าโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ตัวสร้างโพรงอากาศที่มีรูปทรงแบบ Strip shaped



รูปที่ 2.2 การผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด [8]

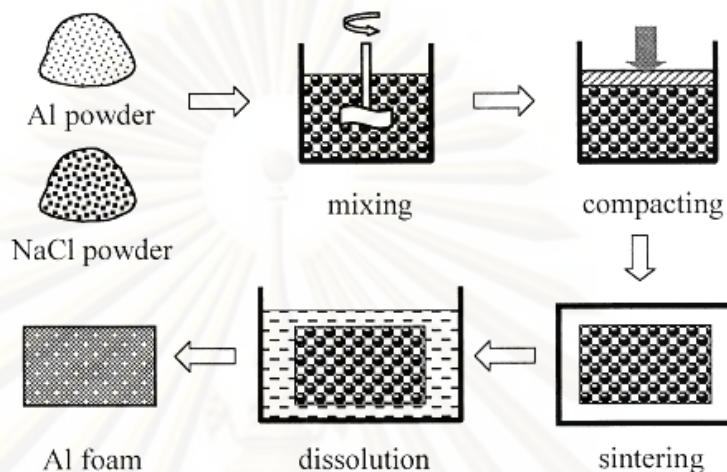


รูปที่ 2.3 กราฟความเค้นและความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมซึ่งเผาผนึกที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ปริมาณรูพรุน = 70%) [8]

2.2.2 วิธี Sintering and dissolution process (SDP)

วิธี Sintering and dissolution process (SDP) เป็นหนึ่งในวิธีผลิตโฟมอะลูมิเนียมในกรรมวิธีตัวสร้างโพรงอากาศ ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Zhao และ Sun [6] เพื่อใช้ผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด ซึ่งโฟมอะลูมิเนียมที่ผลิตโดยวิธีนี้จะมีรูปร่างใกล้เคียงกับรูปร่างของแบบที่ต้องการ ขั้นตอนในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยวิธี SDP เริ่มจากการนำผงอะลูมิเนียมและผง NaCl มาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วนำมาอัดขึ้นรูปโดยใช้ความดัน 200 MPa หลังจากนั้นนำไปเผาผนึกที่อุณหภูมิ 680°C แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง และนำไปล้างด้วยน้ำอุ่นเพื่อให้ NaCl ที่ฝังอยู่ในเนื้อพื้นอะลูมิเนียมให้ละลายออกมาจึงได้ชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียม ข้อดีของวิธี SDP คือทำให้ขนาดของโพรงอากาศมีความสม่ำเสมอสามารถควบคุมขนาดของ

โพรงอากาศและปริมาณรูพรุนได้อย่างแม่นยำ ขนาดของโพรงอากาศที่ได้จะอยู่ในช่วง 100-5,000 μm ซึ่งโฟมอะลูมิเนียมที่ได้มีความหนาแน่นระหว่าง 0.15-0.5 g/cm^3 และขั้นตอนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยวิธีนี้ แสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วิธี Sintering and dissolution process ของการผลิตโฟมอะลูมิเนียม [6]

อย่างไรก็ตามอาจมี NaCl ที่เหลือค้างอยู่ในโฟมอะลูมิเนียมที่ยังละลายไม่หมด ซึ่งการหาสัดส่วน NaCl ที่เหลือค้างอยู่ในโฟมอะลูมิเนียมสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของ NaCl ทั้งหมดในชิ้นงาน Al/NaCl เริ่มต้น ดังแสดงในสมการที่ 2.1 และสามารถหาความหนาแน่นของโฟมโลหะ (ρ) ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$\varphi = \frac{W_f - W_p f_{Al}}{W_p (1 - f_{Al})} \quad (2.1)$$

โดยที่ φ คือ สัดส่วนของ NaCl ที่เหลือค้างในโฟมโลหะ

W_f คือ น้ำหนักของอะลูมิเนียม (Al) ก่อนการละลาย

W_p คือ น้ำหนักของ Al/NaCl ก่อนการละลาย

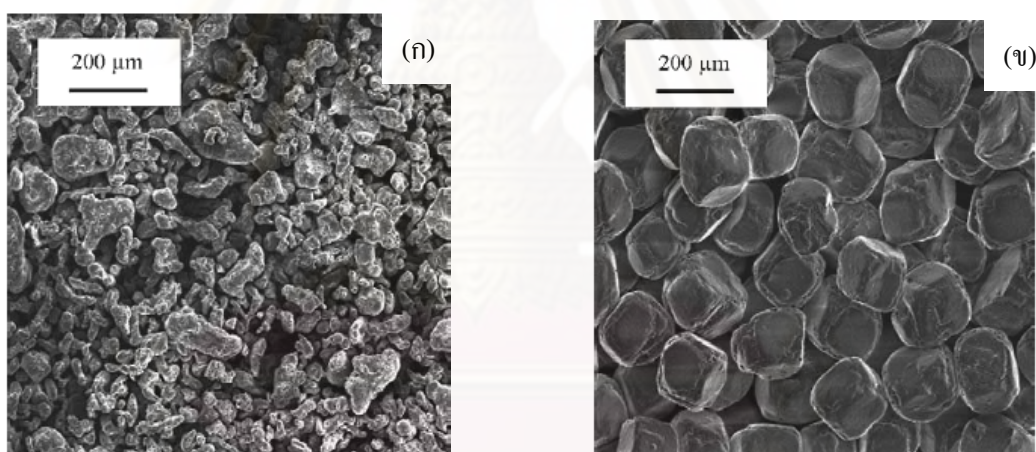
f_{Al} คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของ Al ในผงโลหะผสมเริ่มต้น Al/NaCl

$$\rho = \frac{f_{Al} \rho_{NaCl}}{f_{Al} \rho_{NaCl} + (1 - f_{Al}) \rho_{Al}} \quad (2.2)$$

โดยที่ ρ_{Al} คือ ความหนาแน่นของอะลูมิเนียม

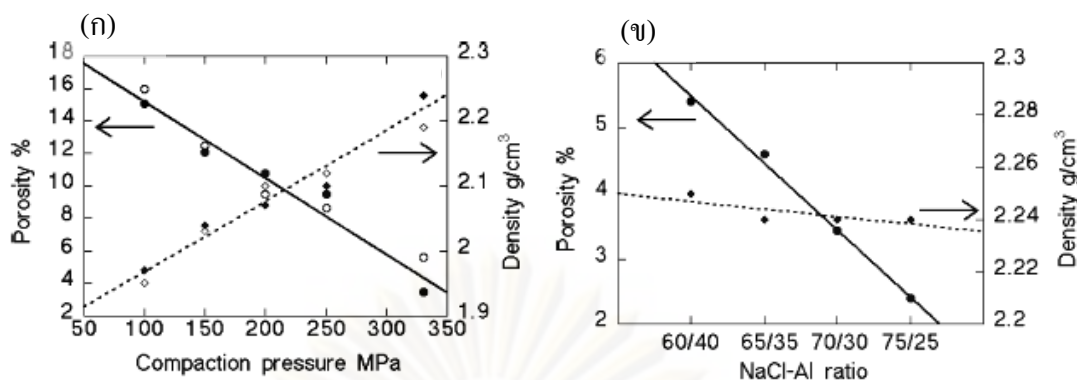
ρ_{NaCl} คือ ความหนาแน่นของ NaCl

Zhao และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาผลของการอัดขึ้นรูปและสภาวะการเผาผลาญในสถานะของเหลวต่อโครงสร้างของโพลีอะลูมิเนียมโดยวิธี Sintering and dissolution process ขั้นตอนของการผลิตนั้นได้นำผงอะลูมิเนียมผสมกับผงดีบุก (Sn) และผงแมกนีเซียม (Mg) แล้วจึงผสมกับผง NaCl ซึ่งลักษณะของผงอะลูมิเนียมและผง NaCl แสดงในรูปที่ 2.5 พบว่าอนุภาคของอะลูมิเนียมมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอและมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 50 μm ส่วนอนุภาคของ NaCl มีลักษณะเป็นลูกบาศก์ และได้ทำการคัดขนาดของ NaCl สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม คือ 250-425, 425-710, 710-1,000 และ 1,000-2,000 μm ขนาดอนุภาคของ NaCl แต่ละกลุ่มมีขนาดดังนี้ 338, 568, 855 และ 1,500 μm ตามลำดับ แล้วผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% จนเป็นเนื้อเดียวกันจึงนำไปทำการอัดขึ้นรูปที่ความดัน 100-350 MPa ในแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร สูง 80 มิลลิเมตร ขณะที่อัดขึ้นรูปขึ้นงานทำการให้อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปทำการเผาผลาญที่อุณหภูมิ 665°C และ 685°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นทำการละลาย NaCl ที่ฝังอยู่ในชิ้นงานออกด้วยการต้มในน้ำที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

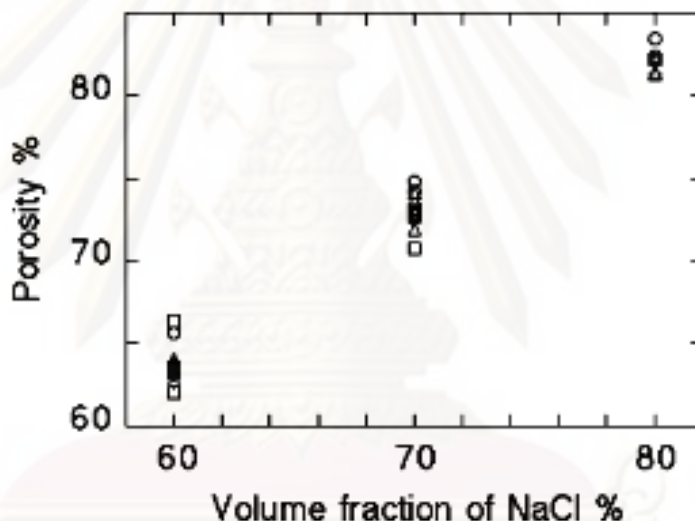


รูปที่ 2.5 ลักษณะของ (ก) ผงอะลูมิเนียม และ (ข) ผง NaCl [7]

เมื่อทำการหาปริมาณรูพรุนและความหนาแน่นของชิ้นงานอัดขึ้นรูปที่ความดันต่างๆ กับปริมาณรูพรุนและอัตราส่วนโดยปริมาตรของ NaCl/Al ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) และ (ข) จากรูปที่ 2.6 (ก) พบว่าปริมาณรูพรุนลดลงแบบเส้นตรงเมื่อความดันในการอัดขึ้นรูปเพิ่มขึ้นและในทางตรงกันข้ามพบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานอัดขึ้นรูปเพิ่มขึ้นเมื่อความดันในการอัดขึ้นรูปเพิ่มขึ้น และรูป 2.6 (ข) พบว่าปริมาณรูพรุนและความหนาแน่นของชิ้นงานอัดขึ้นรูปลดลงแบบเส้นตรงเมื่ออัตราส่วนโดยปริมาตรของ NaCl/Al เพิ่มขึ้น เมื่อหาปริมาณรูพรุนในโพลีอะลูมิเนียมกับ NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% ดังแสดงในรูปที่ 2.7 พบว่าเมื่อปริมาณของ NaCl เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณรูพรุนในโพลีอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น

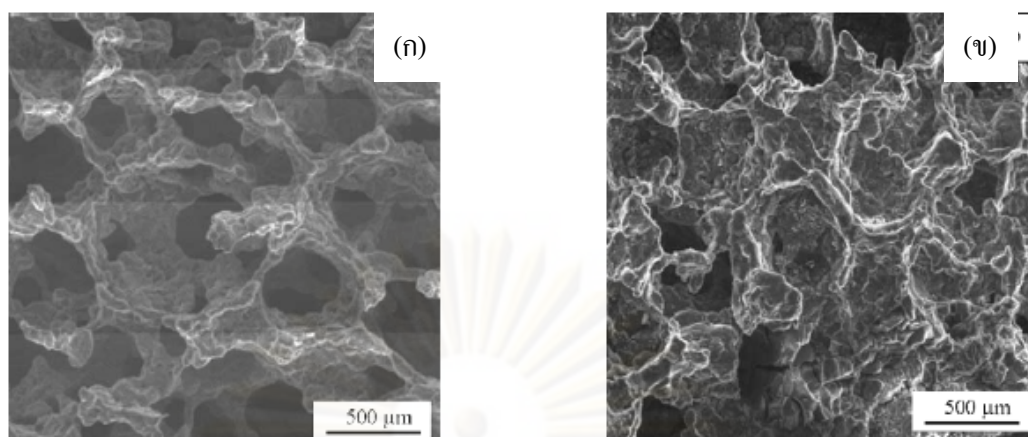


รูปที่ 2.6 ปริมาณรูพรุนและความหนาแน่นของชิ้นงานอัดขึ้นรูปที่ความดันต่างๆ (ก) ขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 338 และ 1,500 μm ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของ NaCl/Al, 70:30 และ (ข) ปริมาณรูพรุนและอัตราส่วนโดยปริมาตรของ NaCl/Al ขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 338 μm และความดันในการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน 330 MPa [7]



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% และปริมาณรูพรุนในโฟมอะลูมิเนียมที่มีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 338 μm (\diamond), 855 μm (\square), 1,500 μm (Δ) และ 3,000 μm (\circ) [7]

โครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมที่ผลิตโดยวิธี Sintering and dissolution process ที่มีปริมาณรูพรุน 85% และ 62% ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ก) และ (ข) พบว่าจากรูปที่ 2.8 (ก) ขนาดของอนุภาค NaCl อยู่ในช่วง 300-1,000 μm ทำให้การเชื่อมต่อกันของรูพรุนน้อยกว่าการที่ใช้ขนาดของอนุภาค NaCl อยู่ในช่วง 425-710 μm ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ข) จากการศึกษาการทดลองพบว่าช่วงความดันในการอัดขึ้นรูปที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 200-250 MPa และช่วงอุณหภูมิในการเผาผลาญที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 670-680°C



รูปที่ 2.8 ภาพโพลีเมอร์เมมเบรนที่มีปริมาณรูพรุน (ก) 85% และ (ข) 62% [7]

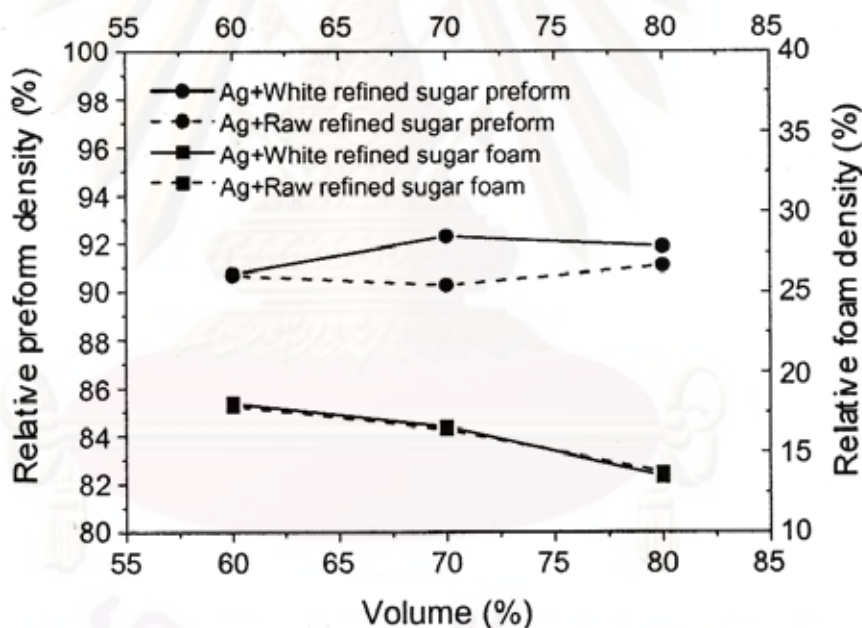
2.1 โพลีเมอร์เงิน

โพลีเมอร์เงินเป็นโพลีเมอร์ชนิดหนึ่งซึ่งใช้โลหะเงินเป็นโลหะหลักในการผลิต โดยโลหะเงินมีความหนาแน่นสูง จัดหาได้ง่าย มีความต้านทานการเกิดออกซิเดชันสูง มีความสามารถในการอัดขึ้นรูปที่ดี เนื่องจากสมบัติทางกลของโพลีเมอร์เงินสามารถควบคุมได้จากการควบคุมรูปร่างของโครงอากาศภายในโพลีเมอร์เงิน จึงได้มีการศึกษาการขึ้นรูปของโครงอากาศภายในโพลีเมอร์เงินเพื่อให้ได้สมบัติทางกลตามที่ต้องการ ซึ่ง S. Asavavisithchai และ E. Nisaratanaporn [9] ได้ผลิตโพลีเมอร์เงินโดยเริ่มจากการผลิตผงเงินก่อน แล้วนำผงเงินที่ได้ไปผลิตโพลีเมอร์เงินด้วยกรรมวิธีการถอดแบบ (Replication process) เพื่อให้ได้โพลีเมอร์เงินตามที่ต้องการ ดังต่อไปนี้

2.3.1 การผลิตโพลีเมอร์เงิน

กระบวนการผลิตเริ่มจากการทำโลหะเงินให้เป็นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) ก่อนเพื่อที่จะผลิตเป็นผงเงินต่อไป ซึ่งนำโลหะเงินมาผสมกับกรดไนตริก (HNO_3) แล้วนำไปให้ความร้อน ขณะเดียวกันต้องทำการกวนไปพร้อมกันเพื่อให้โลหะเงินละลายจนหมด หลังจากนั้นนำสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทไปกรองเพื่อแยกเม็ดเงินที่ไม่ละลายออกจากสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท แล้วนำไปให้ความร้อนอีกครั้งหนึ่ง จึงได้ซิลเวอร์ไนเตรทออกมาและนำซิลเวอร์ไนเตรทเป็นสารตั้งต้นแล้วใช้กลีเซอรอลเป็นตัวรีดิคซ์เพื่อผลิตเป็นผงเงิน โดยใช้อัตราส่วนโมลาร์ (R) ระหว่างซิลเวอร์ไนเตรทและกลีเซอรอลอยู่ระหว่าง 0.01-0.1 และเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้าไปในสารละลายเพื่อปรับค่า pH แล้วให้ความร้อน การตกผลึกของผงเงินเริ่มตกผลึกเมื่อผ่านไป 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นล้างด้วยเอทิลแอลกอฮอล์จนผงเงินสะอาดแล้วกรองแยกผงเงินออกมา และนำผงเงินไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

การผลิตโฟมเงินเริ่มจากการใช้ผงเงินและตัวสร้างโพรงอากาศ (Space holder) คือน้ำตาลทรายขาวหรือน้ำตาลทรายแดง นำมาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันในปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% ที่มีปริมาณรวม 10 กรัม แล้วนำไปอัดขึ้นรูปแบบเย็นโดยใช้การอัดแบบความดันแกนเดียวที่ความดัน 400 MPa หลังจากได้ชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแล้วนำไปต้มในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาผลึกที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้เนื้อพื้นของเงินแข็งแรงขึ้นและกำจัดตัวสร้างโพรงอากาศที่เหลือค้างอยู่ออกให้หมด ปล่อยให้โฟมเงินเย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้อง ทำให้ได้โฟมเงินที่มีโครงสร้างแบบเปิด การหาความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) ของชิ้นงาน (Preform) และโฟมจะสัมพันธ์กับปริมาณของน้ำตาล ซึ่งความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่มีน้ำตาลทั้ง 2 ชนิดนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของน้ำตาลเพิ่มขึ้นและอยู่ในช่วงระหว่าง 90% และ 92% ในทางกลับกันจะเห็นได้ว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมเงินลดลงเมื่อปริมาณของน้ำตาลเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการกำจัดน้ำตาลออกจากชิ้นงาน [8] ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานอัดขึ้นรูปและโฟมเงินที่สัมพันธ์กับปริมาณของน้ำตาล

[9]

2.3.2 เงิน (Silver (Ag))

เงินมีสมบัตินำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดีและมีความเสถียรสูง โครงสร้างผลึกเป็นแบบ FCC (Face-centered cubic) เงินแข็งกว่าทองเล็กน้อยมีสีขาวลักษณะมันวาว ความต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าโลหะอื่นๆ แต่มีความต้านทานการเกิดออกซิเดชันสูง เงินทั่วไปที่พบในสถานะออกซิเดชัน Ag^+ เช่น ซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) ในสถานะ Ag^{+2} ซิลเวอร์ไดฟลูออไรด์ (AgF_2) ในสถานะ Ag^{+3} ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) เงินสามารถนำไปทำเป็นเครื่องประดับ เครื่องเงินทำจากเงินสเตอร์ริง 92.5% (Sterling 92.5%) และการใช้เงินในเสื้อผ้าสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและเชื้อราได้ ซึ่งคุณสมบัติของเงิน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 [10]

ความหนาแน่น (Density)	10.47 g/cm ³
จุดหลอมเหลว (Melting point)	961 °C
จุดเดือด (Boiling point)	2162 °C
ความร้อนแฝง (Heat of fusion)	11.28 kJ/mol
ความร้อนกลายเป็นไอ (Heat of vaporization)	258 kJ/mol
ความจุความร้อน (Heat capacity)	25.35 J/mol K
ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus)	83 GPa
สภาพการนำความร้อน (Heat conduction)	418.68 W/m.K
ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength)	40 ksi
สัมประสิทธิ์การขยายตัว (Coefficient of expansion)	18.9 μm/m.K

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของเงิน [10]

2.4 การผลิตผงเงิน

การผลิตผงเงินเป็นกระบวนการทำให้ผงเงินมีความละเอียดและความบริสุทธิ์สูง ซึ่งลักษณะอนุภาคของผงเงินที่ได้มีความสม่ำเสมอ ผงเงินที่ได้เตรียมโดยกระบวนการกลีเซอรอลได้มีการนำผงเงินไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเคมีและเครื่องมือทางการแพทย์ เนื่องจากเงินมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าสูงและนำความร้อนได้ดี และมีความต้านทานการเกิดออกซิเดชันสูง สำหรับการผลิตผงเงินที่นิยมใช้มีอยู่ 4 วิธี ได้แก่ วิธีทางเคมี (Chemical methods) วิธีทางกายภาพ (Physical methods) วิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical methods) และวิธีทางเคมีความร้อน (Thermochemical methods) การผลิตผงเงินแต่ละวิธีมีลักษณะเฉพาะแตกต่างกันและผงเงินที่ได้มีความบริสุทธิ์แตกต่างกันออกไป การเตรียมผงเงินโดยวิธีทางเคมีจะแตกต่างจากวิธีอื่นๆ เนื่องจากสามารถทำได้ง่ายกว่าทำให้สามารถผลิตผงเงินได้

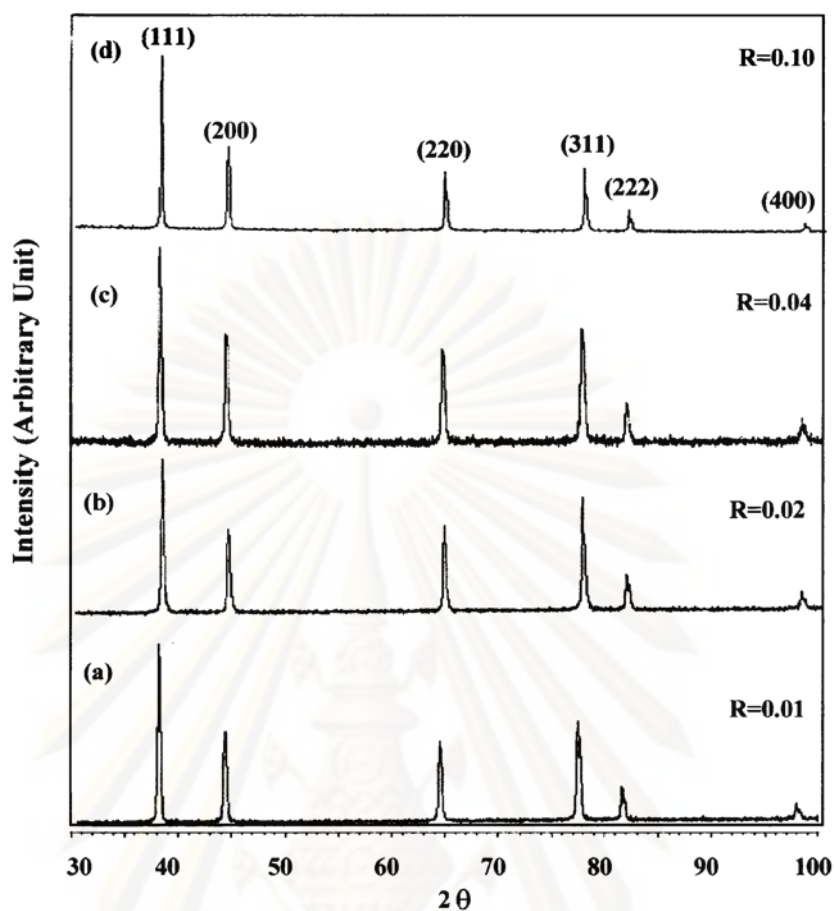
จำนวนมากและมีประสิทธิภาพในการผลิตผงเงิน ในการทำวิจัยนี้ได้ใช้กรรมวิธีกลีเซอรอลเพื่อผลิตผงเงิน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 การผลิตผงเงินโดยกระบวนการกลีเซอรอล

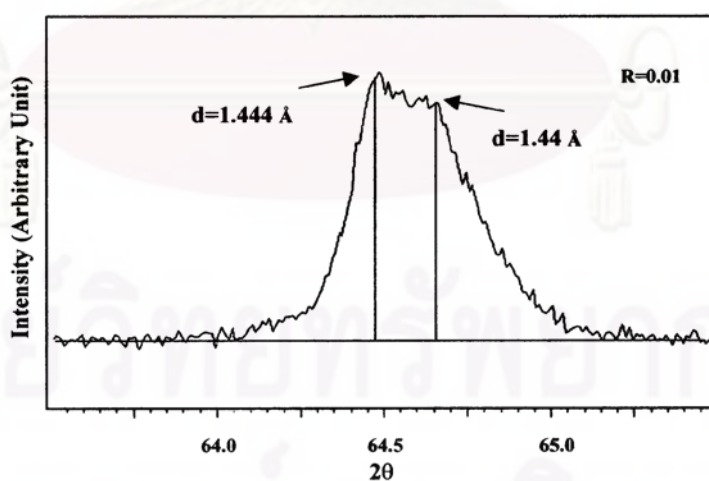
กระบวนการกลีเซอรอลเป็นกระบวนการทางเคมีที่นำมาใช้ในการผลิตผงเงิน ซึ่ง A. Sinha และ B.P. Sharma [11] ได้ผลิตผงเงิน โดยใช้ซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) เป็นสารตั้งต้น และใช้กลีเซอรอลเป็นตัวรีดิวซ์ โดยการละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) ในกลีเซอรอลที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจนซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) ละลายในกลีเซอรอลหมดที่อุณหภูมิ 70°C เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นที่ 140°C ผงเงินเริ่มตกตะกอนในสารละลายกลีเซอรอลและสิ้นสุดการตกตะกอนที่อุณหภูมิประมาณ 170°C

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วย XRD ของผงเงินที่ผลิตโดยกระบวนการกลีเซอรอล ที่อัตราส่วนโมลาร์ (R) = 0.01, 0.02, 0.04 และ 0.10 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (a) ถึง (d) แสดงความสัมพันธ์ของเฟสเงินที่เป็น FCC ซึ่งตามรูปแบบของผงทั้งหมดที่ผลิตโดยกระบวนการกลีเซอรอลแสดงยอดกราฟของ (220), (311) และ (222) ตามลำดับ การวิเคราะห์ด้วย XRD สามารถประมาณขนาดของผลึกได้โดยการลากเส้น X-Ray ให้ขยายออก ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ในช่วงมุม 2-Theta ตั้งแต่ 63.5 - 65.5 ของผงเงินที่อัตราส่วน โมลาร์ = 0.01 เป็นยอดกว้างและยอดกราฟ (220) แสดงเฟสที่มีลักษณะเป็นลูกบาศก์ (1.444 \AA) และยอดกราฟ (110) แสดงเฟสที่มีลักษณะเป็นเฮกซะโกนอล (1.44 \AA)

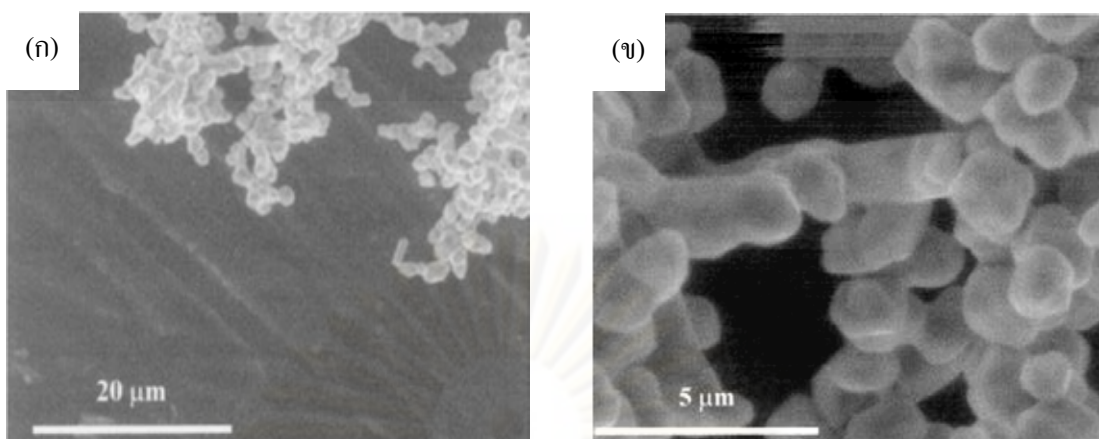
อัตราส่วนโมลาร์ระหว่างซิลเวอร์ไนเตรตและกลีเซอรอลอยู่ระหว่าง 0.01–0.1 การผลิตผงเงินโดยกระบวนการกลีเซอรอลทำให้ได้ผงเงินที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.9% ขนาดของอนุภาคที่ได้มีขนาด 1.5 - 11 \mu m จากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกพบว่าเฟสที่สองของเงินเป็นเฮกซะโกนอล (Hexagonal) อนุภาคของผงเงินมีทั้งแบบสม่ำเสมอและมีรูปร่างหลายเหลี่ยม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคของผงเงินขยายได้ทุกทิศทาง ขนาดอนุภาคของผงเงินโดยเฉลี่ยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ ซิลเวอร์ไนเตรตและกลีเซอรอล ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และ 2.13 การวิเคราะห์ธาตุผสมในผงเงินโดยกระบวนการกลีเซอรอล ดังแสดงในตารางที่ 2.2 พบว่าสิ่งเจือปน (Impurity) ทั้งหมดในผงเงินน้อยกว่า 0.1 wt\%



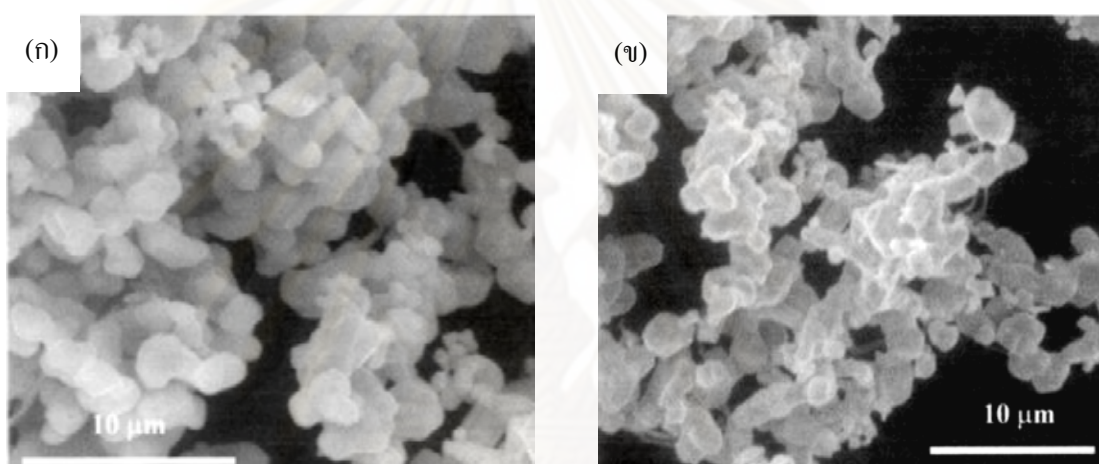
รูปที่ 2.10 (a) ถึง (d) การวิเคราะห์โครงสร้างด้วย XRD ของผงเงินโดยกระบวนการกลีเซอรอล ที่อัตราส่วนโมลาร์ = 0.01, 0.02, 0.04 และ 0.10 [11]



รูปที่ 2.11 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วย XRD ของผงเงินโดยกระบวนการกลีเซอรอล ที่อัตราส่วนโมลาร์ = 0.01 [11]



รูปที่ 2.12 (ก) และ (ข) ภาพ SEM ของผงเงินที่ผลิตโดยกระบวนการกลีเซอร์อล ($R=0.01$) [11]



รูปที่ 2.13 (ก) และ (ข) ภาพ SEM ของผงเงินที่ผลิตโดยกระบวนการกลีเซอร์อล ($R=0.02$) [11]

ธาตุผสม	คาร์บอน	ออกซิเจน	ไฮโดรเจน
Wt%	< 0.040	< 0.035	< 90 ppm

ตารางที่ 2.2 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุผสมในผงเงินโดยวิธีรีดิวซ์ด้วยกลีเซอร์อล [11]

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตโฟมโลหะโดยกรรมวิธีการถอดแบบ

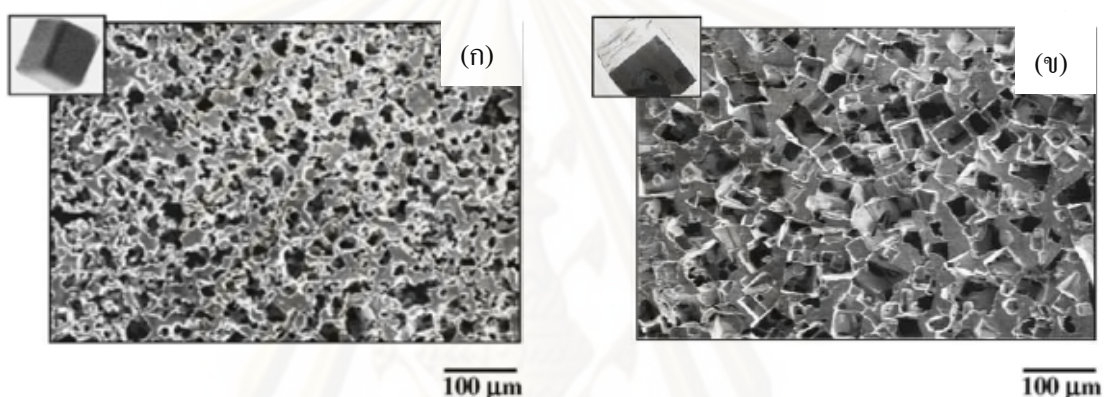
2.5.1 ประเภทของโลหะหลัก

ในการผลิตโฟมโลหะโดยทั่วไปนิยมใช้ผงอะลูมิเนียมเป็นโลหะหลัก เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำที่อุณหภูมิ 660°C และมีความเหนียวมาก (Ductility) ทำให้ยึดเกาะกันได้ดีเมื่อถูกอัดด้วยความดันสูง โลหะที่ใช้ผลิตโฟมโลหะไม่ควรมีจุดหลอมเหลวที่สูงมากจนเกินไป เพราะจะทำให้ใช้อุณหภูมิในการเผาผนึก (Sintering) สูงขึ้น เพื่อทำให้เกิดการเกาะตัวกันของผงโลหะ และทำให้ตัวสร้างโครงอากาศมีโอกาสเกิดการเผาไหม้หลอมละลายก่อนที่จะเกิดการเกาะตัวกัน เป็นผลทำ

ให้โครงสร้างของชิ้นงานพังได้ ดังนั้นโลหะที่ใช้ควรมีความสามารถในการยึดเกาะกันที่ดีหลังจากการอัดขึ้นรูปและอุณหภูมิในการเผาผนึกของโพลีโพลีเมอร์เหมาะสมด้วย

2.5.2 ขนาดและรูปร่างของตัวสร้างโพรงอากาศ

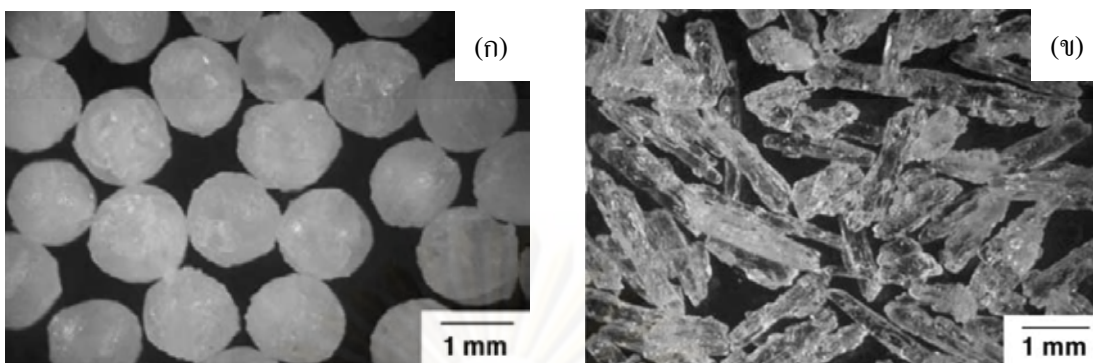
ขนาดและรูปร่างของตัวสร้างโพรงอากาศนั้นมีผลต่อการผลิตโพลีโพลีเมอร์ ถ้าขนาดและรูปร่างของตัวสร้างโพรงอากาศมีขนาดใหญ่จะทำให้โพรงอากาศของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ด้วย สำหรับรูปร่างของโพรงอากาศนั้นก็ยังมีลักษณะเปลี่ยนไปตามรูปร่างของตัวสร้างโพรงอากาศด้วย เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 (ก) และ (ข) โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง NaCl แบบอนุภาคลูกบาศก์ขนาดเล็ก และอนุภาคลูกบาศก์ขนาดใหญ่ [12]

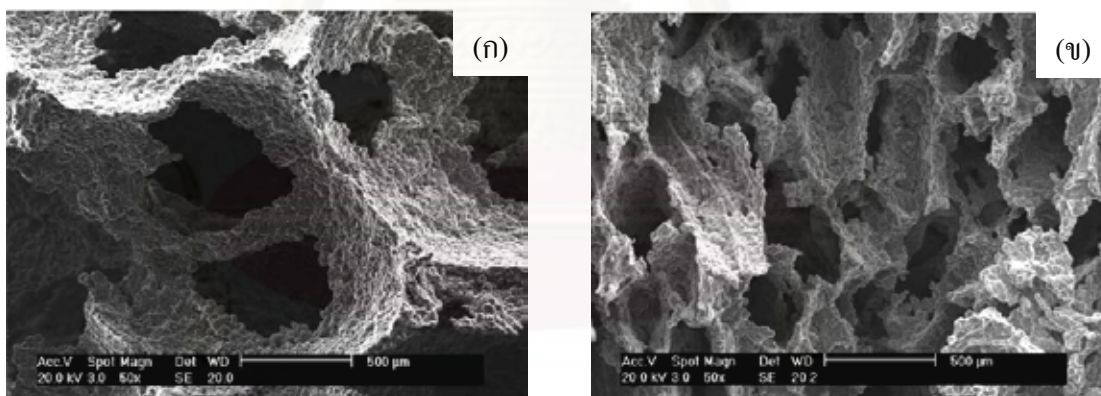
สำหรับผง NaCl ที่มีขนาดแตกต่างกันระหว่างขนาดอนุภาคลูกบาศก์ขนาดเล็ก $3.3 \mu\text{m}$ และขนาดอนุภาคลูกบาศก์ขนาดใหญ่ขนาด $44.3 \mu\text{m}$ จะเห็นได้ว่าอนุภาคลูกบาศก์ขนาดเล็กทำให้รูปร่างของโพรงอากาศในโพลีอะลูมิเนียมที่ผลิตออกมาได้นั้นมีลักษณะเรียบ และรูปร่างค่อนข้างกลม ขณะที่อนุภาคลูกบาศก์ขนาดใหญ่ทำให้รูปร่างของโพรงอากาศในโพลีอะลูมิเนียมที่ผลิตออกมาได้มีโพรงอากาศลักษณะเป็นเหลี่ยมอย่างเห็นได้ชัด และมีโพรงอากาศขนาดใหญ่ [12]

ขนาดและรูปร่างของโพรงอากาศขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวสร้างโพรงอากาศ ถ้าตัวสร้างโพรงอากาศมีขนาดใหญ่ทำให้โพรงอากาศที่ได้มีขนาดใหญ่ตามไปด้วย และรูปร่างของโพรงอากาศก็เปลี่ยนไปตามรูปร่างของตัวสร้างโพรงอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 รูปร่างของตัวสร้างโพรงอากาศ (ก) คาร์บอนาไมด์ที่มีรูปทรงแบบทรงกลม (ข) คาร์บอนาไมด์ที่มีรูปทรงแบบ Strip-shaped [8]

รูปร่างของคาร์บอนาไมด์ 2 แบบ คือ คาร์บอนาไมด์ที่มีรูปทรงแบบทรงกลม และคาร์บอนาไมด์ที่มีรูปทรงแบบ Strip-shaped ซึ่งมีขนาดของอนุภาคระหว่าง 0.9 และ 1.6 mm ตามลำดับ คาร์บอนาไมด์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm และ 2 mm ตามลำดับ จะเห็นว่าคาร์บอนาไมด์ที่มีรูปทรงแบบทรงกลมทำให้โฟมอะลูมิเนียมที่ได้มีโครงสร้างมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน และได้โครงสร้างของโฟมที่มีโพรงอากาศแบบเปิด สำหรับคาร์บอนาไมด์ที่มีรูปทรงแบบ Strip-shaped ทำให้โฟมอะลูมิเนียมที่ได้มีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ และทำให้ได้โครงสร้างของโฟมที่มีโพรงอากาศแบบเปิดเช่นกัน [8] ดังแสดงในรูปที่ 2.16

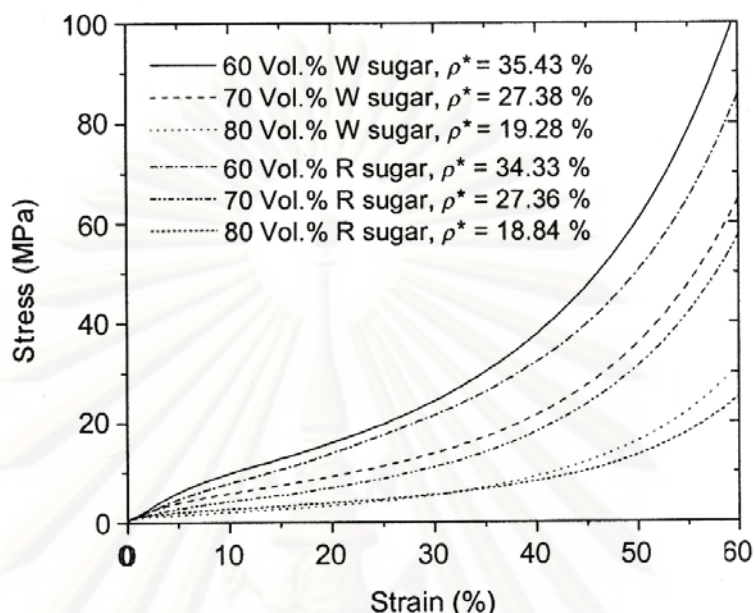


รูปที่ 2.16 ภาพ SEM ของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ตัวสร้างโพรงอากาศแบบ (ก) คาร์บอนาไมด์ที่มีรูปทรงแบบทรงกลม (ข) คาร์บอนาไมด์ที่มีรูปทรงแบบ Strip-shaped [8]

2.5.3 ปริมาณของตัวสร้างโพรงอากาศ

ปริมาณของตัวสร้างโพรงอากาศมีผลต่อความหนาแน่นหรือปริมาณรูพรุนของชิ้นงานในโฟมโลหะ จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนของปริมาณตัวสร้างโพรงอากาศมากทำให้โฟมโลหะมีความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนต่ำ เนื่องจากโพรงอากาศจะมีปริมาณมากขึ้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณ

ของตัวสร้างโพรงอากาศมากขึ้นทำให้ความหนาแน่นของโฟมโลหะลดลงและทำให้การรับแรงอัดลดลงมากกว่าโฟมโลหะที่มีความหนาแน่นสูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 กราฟความเค้นและความเครียดของโฟมเงินที่ทำด้วยน้ำตาลทรายขาวหรือน้ำตาลทรายแดงที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่างกัน [9]

2.5.4 ความดันในการอัดขึ้นงาน

ความดันในการอัดขึ้นงานมีผลต่อความหนาแน่นและความพรุนของขึ้นงาน ในการอัดขึ้นงานถ้าความดันที่ใช้ในการอัดสูงจะทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ปริมาณรูพรุนของขึ้นงานต่ำ การที่ใช้ความดันในการอัดสูงขึ้นนั้นช่วยลดช่องว่างระหว่างผงโลหะและตัวสร้างโพรงอากาศ ถ้าความดันในการอัดขึ้นงานสูงเกินไปจะทำให้เกิดรอยร้าวและแตกได้ภายในตัวสร้างโพรงอากาศ ทำให้โครงสร้างของโพรงอากาศไม่สม่ำเสมอ (Anisotropic) นอกจากนี้ความดันในการอัดขึ้นงานที่สูงยังทำให้แผ่นฟิล์มที่ปกคลุมผิวของโลหะเกิดการแตกร้าวได้ ถ้าความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นงานน้อยเกินไป ทำให้ผงโลหะและตัวสร้างโพรงอากาศไม่เกาะกันเกิดการพัง และหลุดออกของผงโลหะเมื่อนำไปเผาจึงเกิดการพังของโครงสร้าง ดังนั้นความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นงานไม่ควรมากหรือน้อยเกินไป ดังแสดงในรูปที่ 2.18



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 2.18 การพังของชิ้นงานเนื่องจากการใช้ความดันในการอัดชิ้นงานไม่เหมาะสม
 (ก) เกิดรอยร้าวและแตกหักที่ 300 MPa (ข) เกิดการหลุดของผงโลหะมากกว่า 100 MPa
 (ค) เกิดการหลุดของผงโลหะที่ 150 MPa [7]

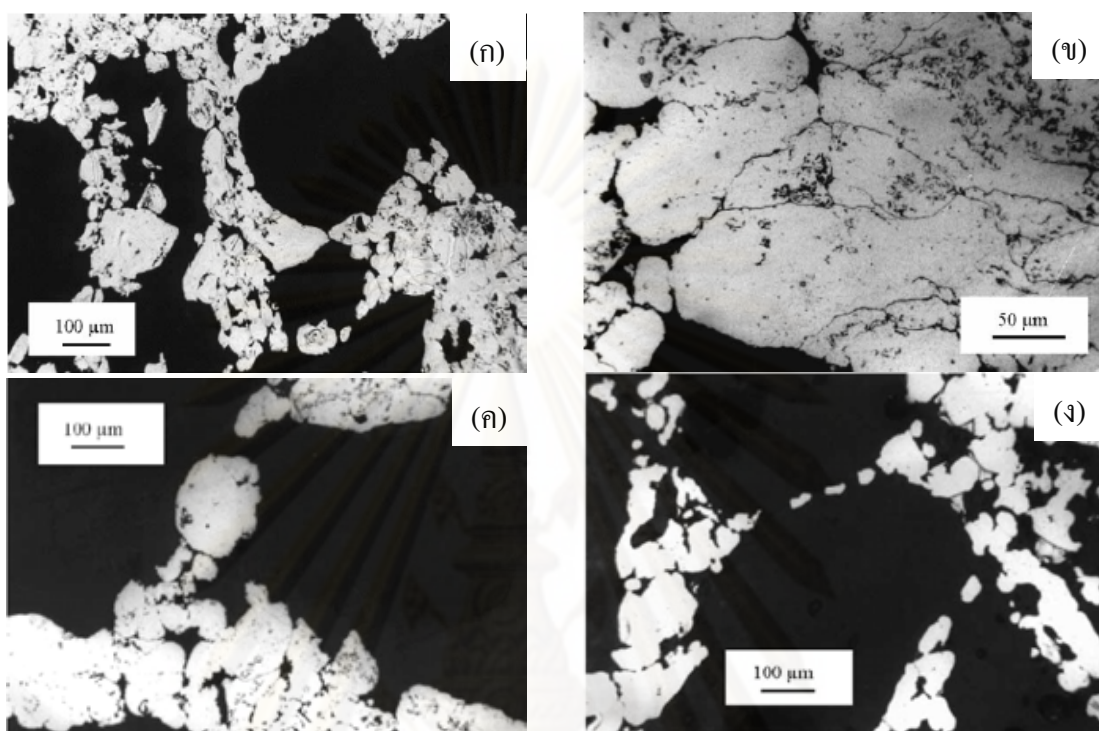
2.5.5 อุณหภูมิและเวลาในการเผาผนึก

อุณหภูมิและเวลาในการเผาผนึกมีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างโฟมโลหะ เช่น การเผาผนึกโฟมอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิสูงเกินจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมทำให้เกิดการเกาะกันของผงโลหะอย่างรวดเร็ว และเกิดการไหลของโลหะเหลวออกจากชิ้นงานได้ ในการเผาชิ้นงานต้องควบคุมการเกิดออกซิเดชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะที่ไวต่อการเกิดออกซิเดชัน เช่น อะลูมิเนียม ซึ่งจะเกิดเป็นแผ่นฟิล์มออกไซด์ปกคลุมที่ผิว และขัดขวางการเกาะกันระหว่างผงในชิ้นงาน การเผาผนึกอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมทำให้ชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมมีรูปทรงไม่เปลี่ยนแปลง สำหรับเวลาที่มีผลต่อโครงสร้างโฟมโลหะและเฟสที่เกิดในโฟมโลหะ เวลาที่ใช้ในการเผาผนึกมากเกินไปทำให้ผิวของโฟมโลหะเปลี่ยนสภาพเป็นเซรามิก ทำให้เปราะและเกิดการแตกหักได้ เวลาที่ใช้ในการเผาผนึกน้อยเกินไปทำให้โฟมโลหะไม่มีความแข็งแรงจากการเกาะกันของผงโลหะ และเกิดความเสียหายหลังการเผาผนึกหรือระหว่างการละลายของตัวสร้างโพรงอากาศ ในการควบคุมอุณหภูมิของการเผาผนึกชิ้นงานนั้นควรควบคุมให้อยู่ในช่วงที่อุณหภูมิไม่สูงกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะหลัก

2.5.6 ธาตุผสม

ธาตุผสมที่ใส่เพิ่มในโฟมอะลูมิเนียมที่พบบ่อยนั้น ได้แก่ แมกนีเซียม (Mg) และดีบุก (Sn) จุดประสงค์ก็เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาผนึกมากกว่าเพิ่มสมบัติทางกล การผสมแมกนีเซียมในปริมาณ 0.15 wt.% ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาผนึก เนื่องจากแมกนีเซียมจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ และช่วยลดการเกิดอะลูมินา (Al_2O_3) บนผิวของผงอะลูมิเนียม เกิดเป็น $MgAl_2O_4$ แทนที่ [13] การเติมดีบุกในปริมาณ 0.5 wt.% ทำให้เนื้อพื้นโลหะมีความ

ลมน้ำเสมอขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ โฟมอะลูมิเนียมที่ไม่ได้เติมดีบุกและแมกนีเซียม ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ผลของการเติมดีบุกและแมกนีเซียมในโครงสร้างเนื้อพื้นของอะลูมิเนียม (ก) และ (ข) โฟมอะลูมิเนียมไม่ได้เติมดีบุกและแมกนีเซียม (ค) 0.5 wt.%Mg (ง) 0.5 wt.% Sn + 0.5 wt.% Mg [7]

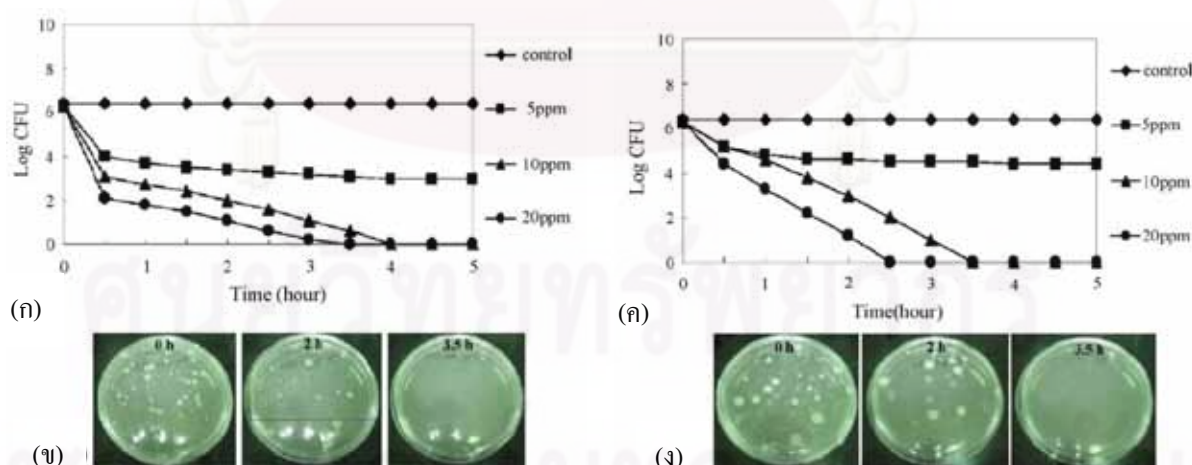
การเติมธาตุผสมแมกนีเซียมลงไปนั้นทำให้มีผลดีต่อคุณภาพของโฟมโลหะ การผสมแมกนีเซียมเพียงเล็กน้อยก่อนการอัดขึ้นรูปและเผาในวิธี SDP นั้น แมกนีเซียมสามารถช่วยลดการเกิดออกไซด์ของอะลูมิเนียมได้เพราะว่าแมกนีเซียมมีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยากับอะลูมินา (Al_2O_3) ได้ดีกว่าอะลูมิเนียมทำให้เนื้อพื้นของโฟมโลหะแน่นขึ้น ในขณะที่จำนวนโพรงอากาศมีปริมาณลดลงเนื่องจากเฟสของเหลวที่มีความหนืดต่ำ ความหนืดของโลหะหลอมเหลวนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของโลหะหลอมเหลว ซึ่งความหนืดของโลหะหลอมเหลวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลวของโลหะหลัก [13] การเติมธาตุผสมดีบุกที่มีจุดหลอมเหลวต่ำเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 670-680°C ทำให้ได้ความหนืดต่ำ อย่างไรก็ตามดีบุกยังคงเหลืออยู่ใน Al/NaCl เพราะว่ามีดีบุกหลอมเหลวไม่รวมตัวกับผงอะลูมิเนียม [7]

2.6 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย (Antimicrobial)

เป็นที่รู้กันดีว่าเงินมีสมบัติที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียได้ ซึ่งการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีนั้นสามารถตรวจสอบได้หลายวิธี เช่น วิธี Minimum Inhibitory Concentration (MIC) และวิธี Cup diffusion method เป็นต้น แต่ละวิธีมีการทดลองการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแตกต่างกันไป ในการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียได้อ้างอิงการทดสอบโดยใช้วิธีตามมาตรฐาน JIS Z 2801 จากเดิมที่ให้ชิ้นงานสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แต่ในการทดลองได้ทำการลดเวลาในการให้ชิ้นงานสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียลงเป็นเวลา 15 นาที ดังต่อไปนี้

2.6.1 วิธี Minimum Inhibitory Concentration (MIC)

วิธี MIC เป็นการศึกษากการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* (*S.aureus* KCTC1928) และ *Escherichia coli* (*E.coli* KCTC1041) ของ Silver nanoparticles (Ag-NPs) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 10 nm และ Platinum nanoparticles (Pt-NPs) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 3 nm ซึ่งเป็นสารละลายของเหลวในการทดลองได้ทำการเตรียมเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* ที่ความเข้มข้น 0, 5, 10, 50 และ 100 ppm สำหรับ Ag-NPs และ Pt-NPs แล้วจึงเติมลงไปในการเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย (LB medium) โดยทำการควบคุมความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรียให้อยู่ในช่วง 10^5 - 10^6 CFU/ml แล้วนำไปบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดลองด้วยวิธี MIC ของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* ดังแสดงในรูปที่ 2.20

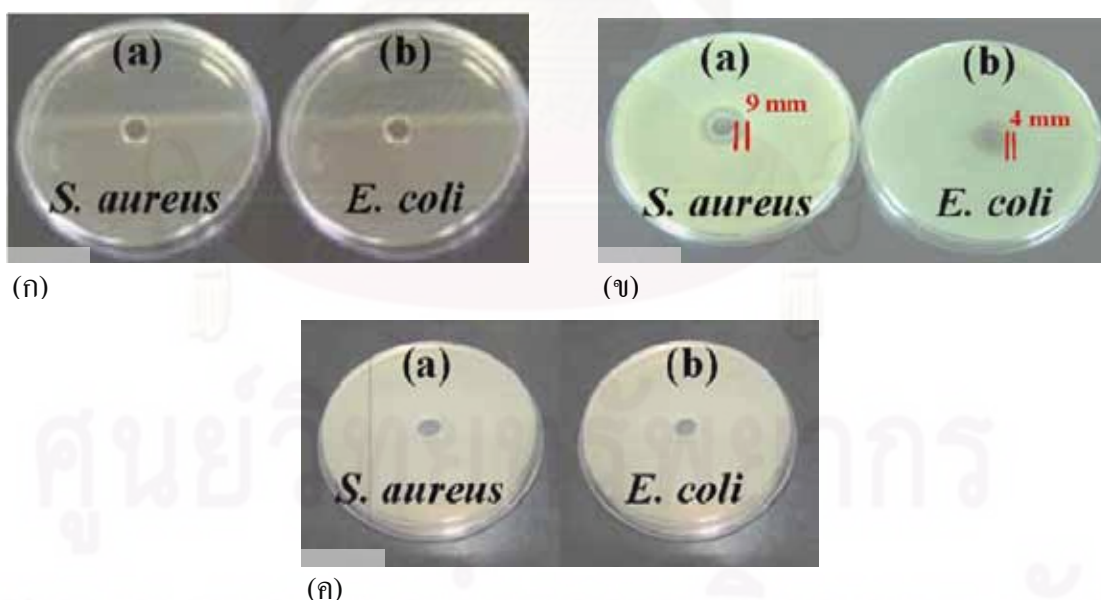


รูปที่ 2.20 (ก) และ (ค) แสดงการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* ในอาหารเลี้ยงเชื้อ (LB medium) ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Ag-NPs ต่างกัน (ข) และ (ง) 1 เซลล์ของแบคทีเรีย (โคโลนี) หลังจาก Ag-NPs มีความเข้มข้น 10 ppm หลังจากทำการบ่มเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 0, 2, 3.5 ชั่วโมง ของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* [14]

จากการทดลองด้วยวิธี MIC ของ Ag-NPs พบว่าที่มีความเข้มข้น 10 และ 20 ppm ของสารละลาย Ag-NPs ในการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ได้ในเวลา 3.3 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ และสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ได้ในเวลา 2.5 และ 3.5 ชั่วโมงตามลำดับ สำหรับความเข้มข้น 5 ppm ของสารละลาย Ag-NPs พบว่าสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* ได้ในเวลา 5 ชั่วโมง ดังนั้นความเข้มข้น 5 ppm สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ได้ดีที่สุด ส่วนความเข้มข้น 10 ppm สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ได้ดีที่สุด [14]

2.6.2 วิธี Cup diffusion method

วิธีนี้เป็นการหาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* ของ Ag-NPs และ Pt-NPs โดยการเตรียมสารช่วยเพิ่มความคงตัว (Stabilizer) ที่แตกต่างกันออกไป เช่น Sodium dodecylsulfate (SDS) และ Poly-(N-vinyl-2-pyrrolidone) (PVP) ที่มีความเข้มข้น 5.4 ppm (10 μ L) นำมาทำเป็นชิ้นงานทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm แล้วนำไปวางลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ (LB medium) แล้วนำไปบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 2.21



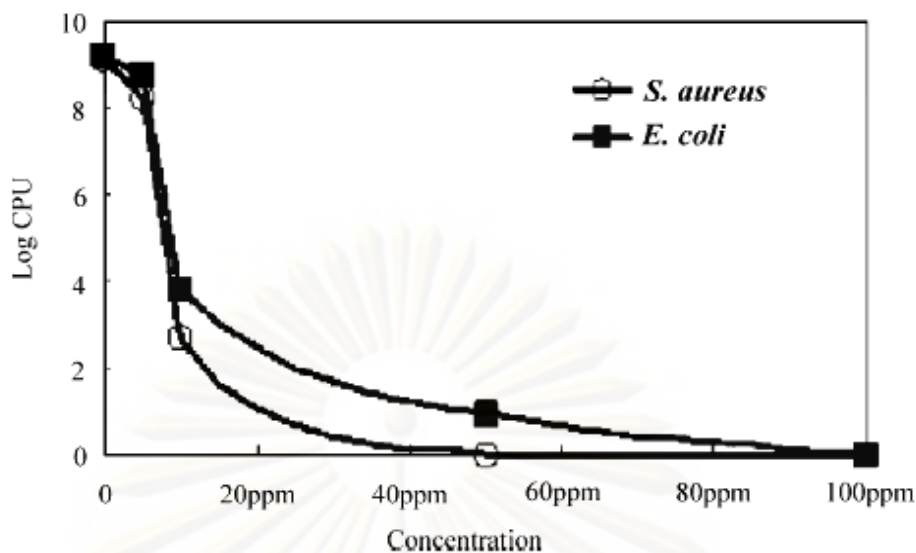
รูปที่ 2.21 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย (Antibacterial) (ก) สารละลาย Pt-NPs ที่มีสารช่วยเพิ่มความคงตัว PVP (ข) สารละลาย Ag-NPs ที่มีสารช่วยเพิ่มความคงตัว PVP (ค) สารละลาย Ag-NPs ที่มีสารช่วยเพิ่มความคงตัว SDS ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* โดย Ag-NPs และ Pt-NPs มีความเข้มข้น 5.4 ppm (10 μ L) [14]

การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของ Ag-NPs ที่มีสารช่วยเพิ่มความคงตัว PVP มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียได้ดีกว่า Pt-NPs จากรูปที่ 2.21 (ข) พบว่าวงกลมรอบของการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* โดยใช้ Ag-NPs ที่มีสารช่วยเพิ่มความคงตัว PVP มีขนาด 9 และ 4 mm ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของ Ag-NPs ที่มีสารช่วยเพิ่มความคงตัว PVP ดีกว่าการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของสารละลาย Ag-NPs ที่มีสารช่วยเพิ่มความคงตัว SDS และสารละลาย Pt-NPs ที่มีสารช่วยเพิ่มความคงตัว PVP ซึ่งสามารถแสดงผลได้ดังแสดงในตารางที่ 2.3

Sample	Growth inhibition rate (%)	
	<i>S.aureus</i> (Gram-positive)	<i>E.coli</i> (Gram-negative)
Ag-NPs ที่มีสารช่วยเพิ่มความคงตัว PVP(10 ppm)	99.99	99.99
Ag-NPs ที่มีสารช่วยเพิ่มความคงตัว SDS(10 ppm)	0	0
Pt-NPs ที่มีสารช่วยเพิ่มความคงตัว PVP(10 ppm)	0	0
Pt-NPs ที่มีสารช่วยเพิ่มความคงตัว SDS(10 ppm)	0	0

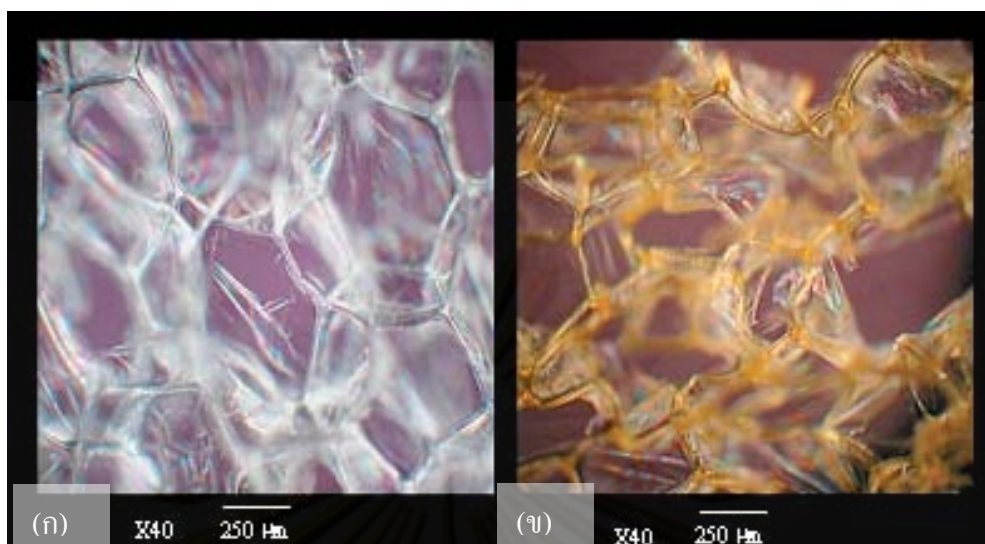
ตารางที่ 2.3 แสดง Growth inhibition rate ของ Ag-NPs ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* [14]

จากตารางพบว่าสารละลาย Ag-NPs ที่มีสารช่วยเพิ่มความคงตัว PVP มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียมากกว่าสารละลาย Ag-NPs และ Pt-NPs ที่มีสารช่วยเพิ่มความคงตัว SDS และ Pt-NPs ที่มีสารช่วยเพิ่มความคงตัว PVP สำหรับความเข้มข้นต่างกันของสารละลาย Ag-NPs ที่มีสารช่วยเพิ่มความคงตัว PVP ของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* ดังแสดงในรูปที่ 2.22 พบว่าสารละลาย Ag-NPs ที่มีสารช่วยเพิ่มความคงตัว PVP ความเข้มข้น 50 ppm และ 100 ppm สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* ตามลำดับ

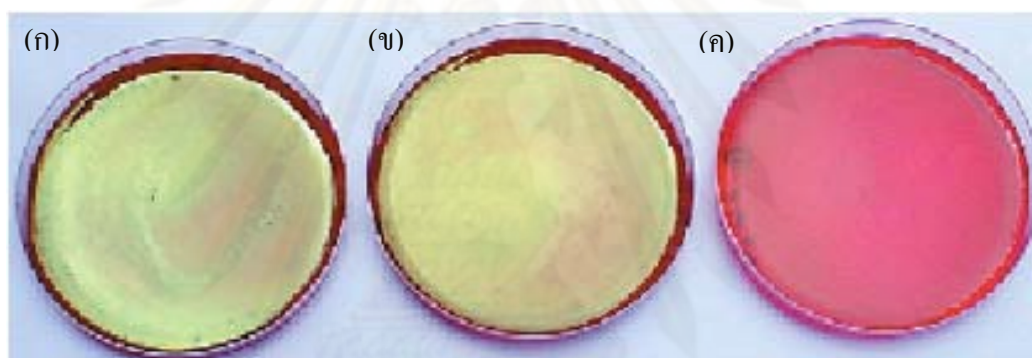


รูปที่ 2.22 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียสำหรับความเข้มข้นที่ต่างกันของสารละลาย Ag-NPs ที่มีสารช่วยเพิ่มความคงตัว PVP ของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* [14]

และได้มีการศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* โดย Prashant Jain และ T.Pradeep ได้นำโพลียูรีเทน (Polyurethane) และ โพลียูรีเทนเคลือบอนุภาคซิลเวอร์นาโน ดังแสดงในรูปที่ 2.23 สำหรับการทดสอบแบบ Test tube ได้นำโฟมมีขนาด 20×25 cm หน้า 8 mm มาตัดให้มีขนาด 1×9×0.6 cm และนำเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ATCC 25922 และ *E.coli* MTCC 1302 มาใช้ในการทดสอบ โดยนำอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย (Nutrient broth และ m-Endo agar) มาใช้ในการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย และนำเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ไปบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ปริมาณ 10 ml ใส่ลงไปในหลอดทดลอง พร้อมทั้งใส่ชิ้นงานโฟมลงไปในหลอดทดลองที่มีเชื้อแบคทีเรีย โดยให้ชิ้นงานโฟมสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 5 และ 10 นาที หลังจากนั้นก็ทำการเจือจางเชื้อแบคทีเรียที่ความเข้มข้น 10^0 , 10^{-2} และ 10^{-4} แล้วทำการเทลงไปในจานเพาะเชื้อแบคทีเรียที่ได้เตรียมไว้และนำไปบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 2.24 พบว่ารูป (ก) และ (ข) มีเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* เกิดขึ้นที่อาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย สำหรับรูป (ค) หลังจากใช้โพลียูรีเทนเคลือบอนุภาคซิลเวอร์นาโนแล้วไม่มีเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* เกิดขึ้นที่อาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย [15]



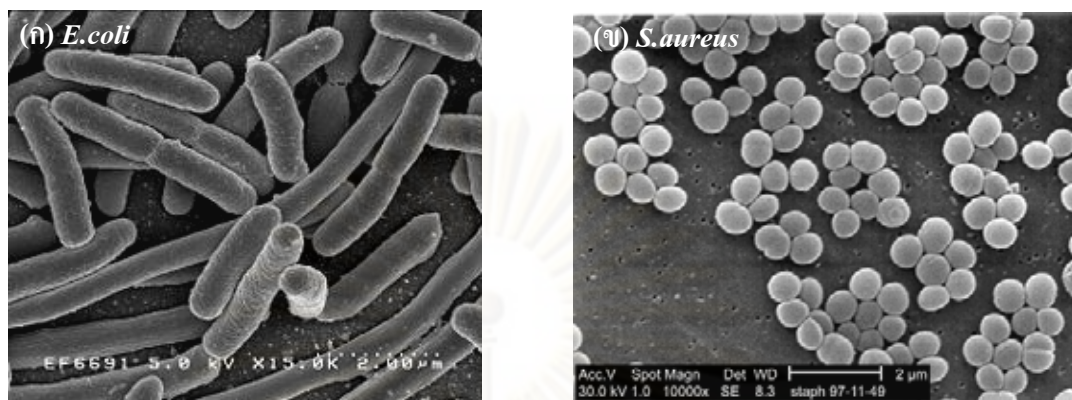
รูปที่ 2.23 ภาพโครงสร้าง (ก) โพลียูรีเทน (ข) โพลียูรีเทนเคลือบอนุภาคชิลเวอร์นาโน [15]



รูปที่ 2.24 แสดงการเกิดเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ที่มีความเข้มข้น 10^{-2} บนอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย (ก) Control (ข) หลังจากสัมผัสกับโพลียูรีเทน และ (ค) หลังจากสัมผัสกับโพลียูรีเทนเคลือบอนุภาคชิลเวอร์นาโน [15]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7 ลักษณะของเชื้อแบคทีเรีย



รูปที่ 2.25 ลักษณะของเชื้อแบคทีเรีย (ก) แบคทีเรีย *E.coli* และ (ข) แบคทีเรีย *S.aureus* [16]

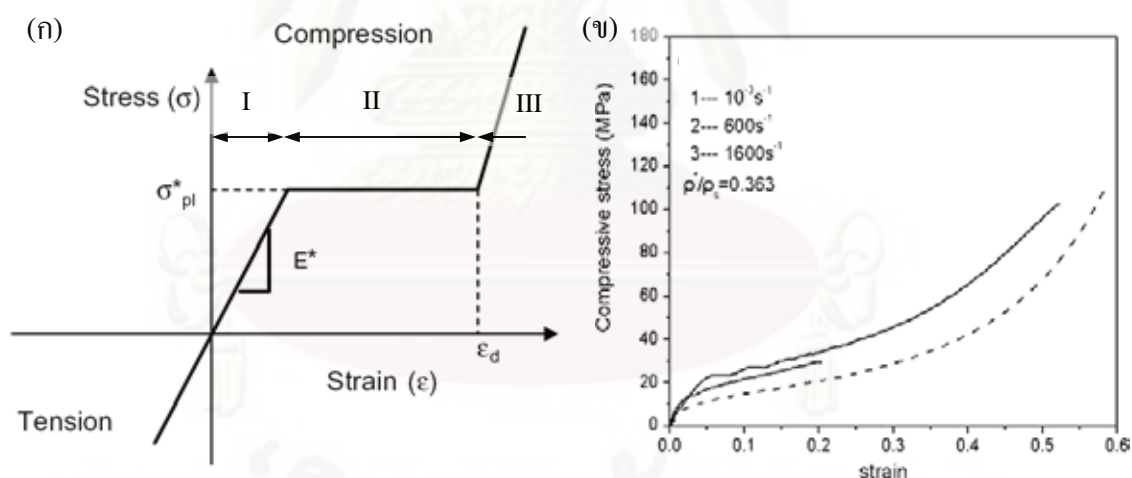
รูปที่ 2.25 (ก) แสดงลักษณะของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* เป็นแบคทีเรียแกรมลบมีลักษณะเป็นรูปท่อน (Rod shape) มีขนาดกว้าง 1.1 ถึง 1.5 μm และยาว 2 ถึง 6 μm สามารถเคลื่อนที่ได้ไม่สร้างสปอร์ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวเดี่ยว ๆ แบคทีเรียชนิดนี้สามารถพบได้ในลำไส้ของคนและสัตว์เป็นสาเหตุทำให้เกิดอาการท้องร่วง ทางเดินปัสสาวะอักเสบ ซึ่งสามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงอุณหภูมิ 22°C - 50°C สามารถใช้สารอาหารอินทรีย์แบบง่ายเพียงชนิดเดียว เช่น กรดอะมิโน เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน แหล่งคาร์บอนและแหล่งไนโตรเจนในการเจริญเติบโตได้ โดยไม่ต้องการปัจจัยเสริมในการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* มีความสามารถในการเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่มีอากาศและเจริญเติบโตได้ในสภาวะที่มีอากาศเพียงเล็กน้อย ลักษณะโคโลนิที่มีสีขาวขุ่น รูปที่ 2.25 (ข) แสดงลักษณะของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* เป็นแบคทีเรียแกรมบวกมีลักษณะเป็นทรงกลม (Cocci shape) เส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดน้อยกว่า 2 μm ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวเป็นกลุ่มคล้ายพวงองุ่น แบคทีเรียชนิดนี้สามารถพบได้ตามผิวหนังและส่วนต่างๆ ของร่างกายเป็นสาเหตุทำให้เกิดอาการติดเชื้อในแผลพุพอง ผิวหนังฝีหนองและที่บริเวณอื่นๆ ของผิวหนัง สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพมีออกซิเจนมากกว่าในสภาพไม่มีออกซิเจน เจริญเติบโตได้ในช่วงอุณหภูมิ 35°C - 40°C ลักษณะโคโลนิมีสีเหลืองหรือสีทอง [17]

2.8 สมบัติทางกลของโฟมโลหะ

สมบัติทางกลของโฟมโลหะนั้นขึ้นอยู่กับโลหะที่ใช้ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ ชนิดของธาตุผสม (Alloying elements) และลักษณะของรูพรุน (Pore morphology) ซึ่งสมบัติทางกลของโฟมโลหะสามารถแบ่งได้เป็น สมบัติทางกลของโฟมโลหะที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดและสมบัติทางกลของโฟมโลหะที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิด ส่วนการนำไปใช้งานของโฟมโลหะที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดส่วนใหญ่มักใช้เกี่ยวกับการทำหน้าที่ เช่น ตัวคัดกรองอนุภาคนาขนาดต่างๆ (Filter) หรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) เป็นต้น

2.8.1 ความสามารถในการรับแรงอัดของโฟม

สำหรับโฟมโลหะที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดและปิดที่อยู่ภายใต้การรับแรงอัดนั้นเกิดการเปลี่ยนรูป (Deformation) 3 ช่วง คือ ช่วงการเปลี่ยนรูปอีลาสติกแบบเส้นตรง (Linear elastic deformation) ช่วงบริเวณที่ราบ (Plateau regions) และช่วงการอัดแน่น (Densification regions) ดังแสดงในรูปที่ 2.26 (ก) สำหรับกราฟความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบจริงของโฟมอะลูมิเนียมที่อัตราความเครียดต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.26 (ข)



รูปที่ 2.26 (ก) กราฟความเค้นและความเครียดของโฟมโลหะในอุดมคติ [18] (ข) กราฟความเค้นและความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.363 [19]

เมื่อโฟมรับแรงอัดแล้วเกิดการเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติกในช่วงแรก ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นของความเค้นต่อความเครียดเป็นแบบเชิงเส้น สำหรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นและความเค้นแรงอัดจะลดลงเมื่อปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น แล้วเข้าสู่ช่วงบริเวณที่เส้นกราฟความเค้นกับความเครียดมีค่าคงที่ (Plateau regions) ความเค้นมีค่าคงที่ในขณะที่ความเครียดมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเกิดการขยายตัวของแถบการเปลี่ยนรูป (Deformation band) ภายในโฟมโลหะ ซึ่งในช่วงนี้จะเกิดความเค้นพลาโต

ขึ้น (Plateau stress) และเข้าสู่ช่วงการอัดแน่นของโฟมโลหะ (Densification regions) ในช่วงสุดท้ายของการเปลี่ยนรูปนั้นความเค้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้น โพรงอากาศที่เปลี่ยนรูปแบบพลาสติกจะส่งผลให้โพรงอากาศข้างเคียงรับแรงได้น้อยลง นำไปสู่การพังของโพรงอากาศข้างเคียงได้

สำหรับพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปของโฟมโลหะภายใต้แรงอัดของโฟมโลหะที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดนั้นสามารถหาค่าความเครียด (ε_d) ในช่วงการอัดแน่นได้โดย Ashby [2] สำหรับโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดในช่วงพลาสติกสามารถหาได้ ดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$\varepsilon_d = \alpha \left(1 - 1.4 \frac{\rho^*}{\rho} + \left(\frac{\rho^*}{\rho} \right)^3 \right) \quad (2.3)$$

- โดยที่ ε_d คือ ค่าความเครียดในช่วงการอัดแน่น
 ρ^* คือ ค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะ
 ρ คือ ค่าความหนาแน่นของผนังโพรงอากาศ
 α คือ ค่าคงที่ของวัสดุอยู่ระหว่าง 0.9-1.0

สำหรับพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปของโฟมโลหะภายใต้แรงอัดในช่วงพลาสติกสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงในการรับแรงอัด (Compressive strength) ของโฟมโลหะและความแข็งแรงจุดคราก (Yield strength) ของผนังโพรงอากาศ ซึ่งสัมพันธ์กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ (ρ^*/ρ) ดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$\sigma_c = C \sigma_{c.s} \left(\frac{\rho^*}{\rho} \right)^{3/2} \quad (2.4)$$

- โดยที่ σ_c คือ ค่าความเค้นในช่วงพลาสติก
 $\sigma_{c.s}$ คือ ค่าความแข็งแรงจุดครากของผนังโพรงอากาศ
 ρ^* คือ ค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะ
 ρ คือ ค่าความหนาแน่นของผนังโพรงอากาศ
 C คือ ค่าคงที่ที่อยู่ระหว่าง 0.1-1.0 มีค่าประมาณ 0.3

ค่าความแข็งแรงจุดคราก (Yield strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นที่จุดตัดระหว่างกราฟจากผลการทดสอบแรงอัดกับเส้นตรงขนานเส้นกราฟช่วงแรก โดยตัดแกนที่ 0.2% ความเครียด มีหน่วยเป็น MPa

ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน (Energy absorption, E) หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด สามารถหาได้จากสมการ 2.5 โดยมีหน่วยเป็น MJ/cm³

$$E = \int_0^{\varepsilon_a} \sigma \cdot \varepsilon \cdot d\varepsilon \quad (2.5)$$

โดยที่ σ คือ ความเค้น หน่วย MPa

ε คือ ความเครียด

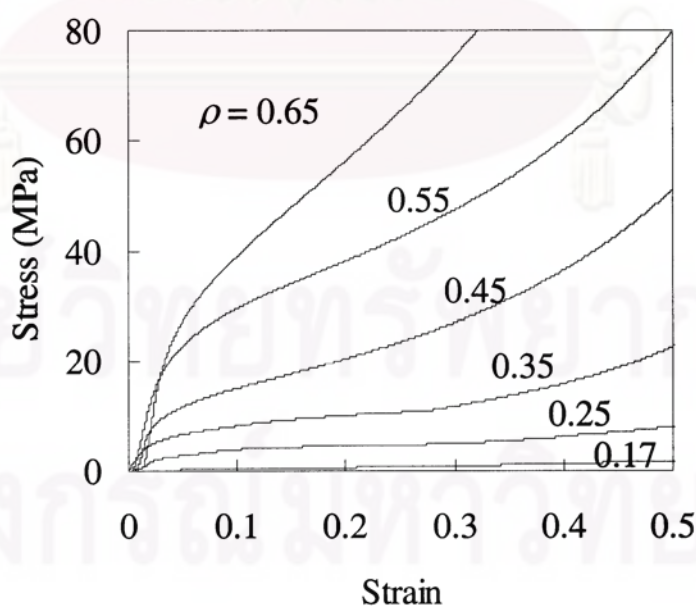
ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงาน (Energy absorption efficiency, η) เป็นค่าที่หาได้จากสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเทียบกับพื้นที่สี่เหลี่ยมของกราฟ ณ จุดสิ้นสุดของเส้นกราฟ ดังสมการ 2.6

$$\eta = \frac{E}{\sigma \cdot \varepsilon} \Big|_{\varepsilon = \varepsilon_a}, \quad 0 < \varepsilon_a \leq 1 \quad (2.6)$$

โดยที่ E คือ ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน หน่วย MJ/cm³

2.8.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงในการรับแรงอัดและการดูดซับพลังงาน

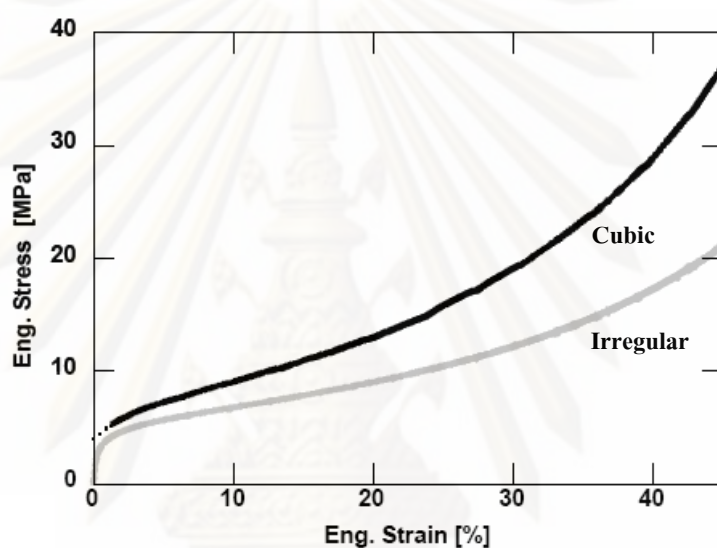
2.8.2.1 ความหนาแน่น



รูปที่ 2.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโฟมอะลูมิเนียม [20]

รูปที่ 2.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโพลีเอทิลีนที่ ได้จากการทดสอบจริง พบว่าโพลีเอทิลีนที่มีความหนาแน่นมากทำให้ความสามารถในการรับ แรงอัดและความสามารถในการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากโพลีเอทิลีนมีความหนาแน่น สูงทำให้มีปริมาณรูพรุนในโพลีเอทิลีนลดลงและมีเนื้อพื้นของโลหะมากเมื่อเทียบกับ โพลีเอทิลีนที่มีความหนาแน่นซึ่งมีปริมาณรูพรุนมาก ดังนั้นโพลีเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูงจะทำให้เกิด การกระจายของแรงมากกว่าส่งผลให้มีความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น [20]

2.8.2.2 ขนาดและรูปร่างของตัวสร้างโพรงอากาศ



รูปที่ 2.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโพลีเอทิลีน [12]

รูปที่ 2.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโพลีเอทิลีนที่มี รูปร่างไม่สม่ำเสมอและมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาค NaCl ประมาณ $10\ \mu\text{m}$ และโพลีเอทิลีนที่มี รูปร่างลูกบาศก์และมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาค NaCl ประมาณ $3.3\ \mu\text{m}$ พบว่าโพลีเอทิลีนที่มี รูปร่างลูกบาศก์มีความสามารถในการรับแรงอัดและความสามารถในการดูดซับพลังงานมากกว่า โพลีเอทิลีนที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากอนุภาคของ NaCl ที่มีรูปร่างลูกบาศก์นั้นมีค่าความ โค้งใกล้เคียงกับรูปร่างทรงกลมมากกว่าอนุภาคของ NaCl ที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอจึงสามารถ รับแรงอัดและความสามารถในการดูดซับพลังงานมาก และโพลีเอทิลีนที่มีขนาดเฉลี่ยของ อนุภาค NaCl ขนาดใหญ่ในปริมาณที่เท่ากันจะมีความสามารถในการรับแรงอัดและสามารถในการ ดูดซับพลังงานได้มากกว่าโพลีเอทิลีนที่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาค NaCl ขนาดเล็ก เนื่องจากโพลี เอทิลีนที่ผสมอนุภาค NaCl ขนาดใหญ่ทำให้โพลีเอทิลีนมีความหนาแน่นมากจึงสามารถ รับแรงอัดและดูดซับพลังงานได้มากกว่า [12]

2.8.2.3 ปริมาณของโพรงอากาศ

ปริมาณของโพรงอากาศสามารถพิจารณาได้จากความหนาแน่นของโฟมโลหะ ถ้าความหนาแน่นของโฟมโลหะเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของโพรงอากาศลดลง ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงอัดและความสามารถในการดูดซับพลังงานที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากโครงสร้างของโฟมโลหะมีปริมาณของเนื้อพื้นโลหะมาก ถ้าความหนาแน่นของโฟมโลหะลดลงทำให้ปริมาณของโพรงอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงอัดและความสามารถในการดูดซับพลังงานที่ลดลงเนื่องจากโครงสร้างของโฟมโลหะมีปริมาณของโพรงอากาศมากกว่าปริมาณของเนื้อพื้น [9]

2.8.2.4 การกระจายตัวของโพรงอากาศ

โฟมโลหะที่มีการกระจายตัวของโพรงอากาศที่สม่ำเสมอส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงอัดและความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมโลหะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความสม่ำเสมอของโพรงอากาศทำให้การรับแรงอัดดีกว่าโฟมโลหะที่มีการกระจายตัวของโพรงอากาศที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากโฟมโลหะมีการกระจายตัวของโพรงอากาศที่สม่ำเสมอเมื่อรับแรงอัดทำให้เกิดการกระจายของแรงที่สม่ำเสมอจึงรับแรงอัดได้ดีกว่า [9]

2.8.2.5 ทิศทางของโพรงอากาศ

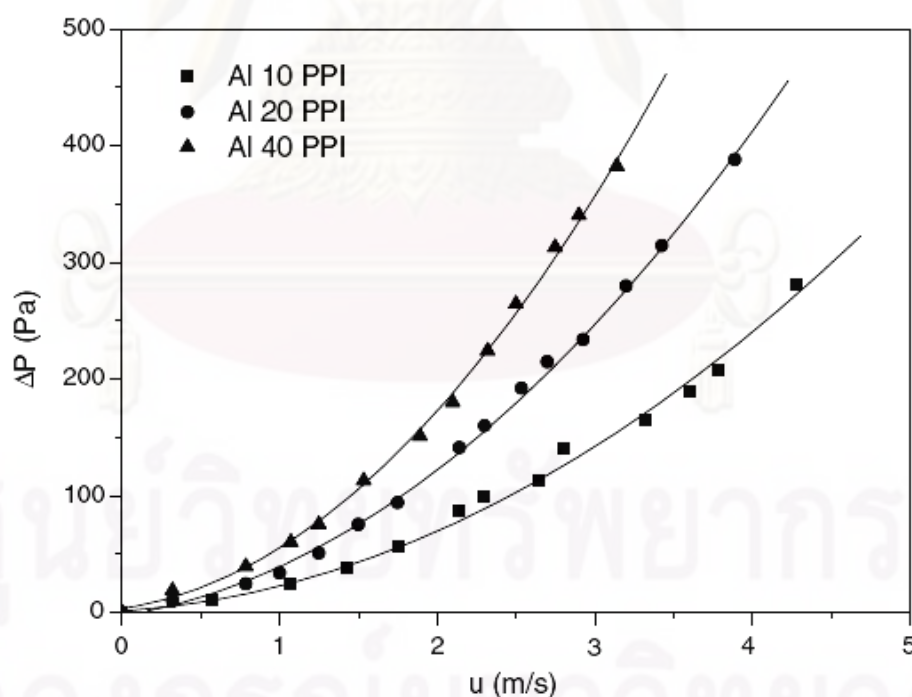
โฟมโลหะที่มีทิศทางของโพรงอากาศไม่ตั้งฉากกับทิศทางการอัดขึ้นรูปนั้นมีความสามารถในการรับแรงอัดได้น้อยกว่าโฟมโลหะที่มีทิศทางของโพรงอากาศตั้งฉากกับทิศทางการอัดขึ้นรูปที่สามารถรับแรงอัดและสามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่า เนื่องจากสามารถรับแรงอัดที่กระทำในแนวตั้งได้ดีและเกิดการถลอกการพังตัวของโพรงอากาศขึ้นจึงสามารถรับแรงและสามารถดูดซับพลังงานได้ดี [1]

2.8.2.6 คำหนิ

โฟมโลหะที่มีคำหนิเกิดขึ้นที่ผิวและขอบของโพรงอากาศ เช่น ความโค้งงอของโพรงอากาศที่มีลักษณะเป็นคลื่น ผงของโพรงอากาศเป็นรอยย่น ผิวของโฟมโลหะไม่เรียบ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขอบโพรงอากาศหรือรูปร่างของโพรงอากาศที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งคำหนิเหล่านี้ส่งผลต่อความแข็งแรงของโฟมโลหะที่ลดลง [1]

2.8.3 ความสามารถในการไหล (Fluidity)

สถานะของสสารแบ่งออกได้เป็นของแข็งและของไหล ซึ่งของไหล (Fluids) ก็คือสารซึ่งไหลได้ ของไหลจึงหมายถึงของเหลวและแก๊สต่างๆ สามารถเคลื่อนที่หรือไหลได้อย่างต่อเนื่องเมื่อถูกกระทำด้วยแรงเฉือน ซึ่งมีทิศทางขนานกับระนาบของไหลที่เคลื่อนที่ ไม่ว่าแรงเฉือนจะมีขนาดเท่าใดก็ตาม ของแข็งมีขนาดและรูปร่างแน่นอนเพราะโมเลกุลอัดกันแน่นและมีแรงดึงดูดระหว่างกันมากแต่ของเหลวโมเลกุลอยู่ห่างกันมากกว่าของแข็งและมีแรงดึงดูดระหว่างกันน้อย จึงมีรูปร่างไม่แน่นอนแต่ปริมาตรยังคงที่ ความสามารถในการไหลของของไหลผ่านโพลีโธระ แสดงในรูปที่ 2.29 แสดงความเร็วเฉลี่ยของของไหลในช่องทางการไหลกับความดันตก (Pressure drop) ในโพลีเอทิลีนโครมโครงสร้างแบบเปิดที่มีความหนาแน่นของโพรงอากาศ 10, 20 และ 40 pores per linear inch (PPI) ความพรุนของโพลีเอทิลีนโครมคือ 0.91, 0.90 และ 0.90 ตามลำดับ ซึ่งช่วงของความเร็วโดยทั่วไปประมาณ 0-3.5 m/s และความดันตกของการไหลแบบสั่นประมาณ 0-450 Pa ดังนั้นผลของการไหลของของไหลสมมติให้อยู่ในสถานะแก๊สอุดมคติ (Ideal gas) ในการศึกษาพบว่าความดันตกในโพลีเอทิลีนโครมเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้นและวัสดุมีความหนาแน่นของโพรงอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.29 ความเร็วเฉลี่ยของของไหลกับความดันตกในโพลีเอทิลีนโครมโครงสร้างแบบเปิดที่มีความหนาแน่นของโพรงอากาศ 10, 20 และ 40 PPI [21]

การหาความสัมพันธ์ของความดันตกและความเร็วเฉลี่ยของของไหลในช่องทางการไหล ดังแสดงในสมการที่ 2.7 โดยให้ $A = \mu / K$ และ $B = \rho F / K^{1/2}$ และสามารถหาอัตราการไหลได้ (Flow rate) ดังแสดงในสมการที่ 2.8

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K}u + \rho \frac{F}{\sqrt{K}}u^2 \quad (2.7)$$

- โดยที่ ΔP คือ ความดันตก (Pressure drop)
 K คือ ความสามารถในการซึมผ่าน (Permeability) หน่วย m^2
 F คือ สัมประสิทธิ์แรงเฉือนของวัสดุ หน่วย m^{-1}
 L คือ ความยาวของวัสดุทดสอบ หน่วย m
 u คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหลในช่องทางการไหล หน่วย m/s
 A และ B คือ ค่าคงที่

อัตราการไหล (Flow rate: Q) คือ ปริมาตรต่อเวลา

$$Q = Av \quad \text{หรือ} \quad Q = \frac{V}{t} \quad (2.8)$$

- โดยที่ Q คือ อัตราการไหล หน่วย m^3/s
 V คือ ปริมาตรของของไหล หน่วย m^3
 A คือ พื้นที่ หน่วย m^2
 t คือ เวลา หน่วย s
 v คือ ความเร็ว หน่วย m/s

การไหลแบบลามินาร์ (Laminar flow)

การไหลแบบลามินาร์เป็นการไหลโดยที่อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงขนานกันไปคล้ายกับการไหลเป็นชั้นๆ โดยที่ผิวที่ติดกันไม่ผสมกัน การไหลแบบลามินาร์เป็นไปตามกฎของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานต่อการเฉือน ซึ่งก็คือผลคูณของความหนืดของของไหลกับการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว ดังแสดงในสมการที่ 2.9 [22]

$$\tau = \mu \left(\frac{dv}{dy} \right) \quad (2.9)$$

ความหนืดของของไหลมีผลทำให้เกิดการสูญเสียแรงดัน (Head loss) ซึ่งการเกิดการสูญเสียแรงดันในการไหลแบบลามินาร์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็ว แต่อย่างไรก็ตามความเร็วไม่ใช่สิ่งเดียวที่บอกได้ว่าเป็นการไหลแบบลามินาร์ สิ่งที่บอกได้แน่นอน คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number) ดังแสดงในสมการที่ 2.10

$$Re = \frac{DV\rho}{\mu} = \frac{DV}{\nu} \quad (2.10)$$

โดยที่ Re คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ หน่วย m

V คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหลในท่อ หน่วย m/s

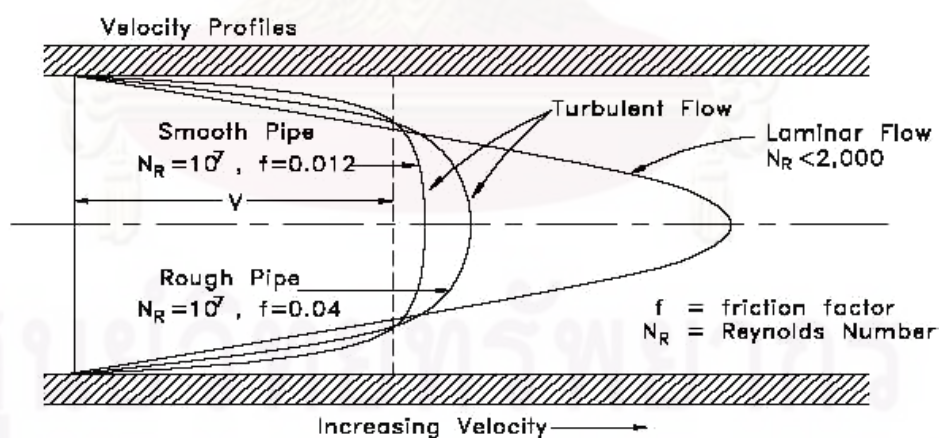
ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล หน่วย kg/m^3

μ คือ ความหนืดของของไหล หน่วย $Pa \cdot s$

ν คือ ความหนืดกินมาติกของของไหล หน่วย m^2/s

การไหลแบบลามินาร์ในท่อกลม

การไหลของของไหลแบบลามินาร์ในท่อกลมมี Velocity profile เป็นรูปพาราโบลา ดังแสดงในรูปที่ 2.30 ความเร็วในการไหลสูงสุดเกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางท่อ หาได้จากสมการที่ 2.11



รูปที่ 2.30 Velocity profile ของการไหล [23]

$$V = \frac{h_L \gamma}{4\mu L} r_o^2 = \frac{h_L \gamma}{16\mu L} D^2 \quad (2.11)$$

โดยที่ h_L คือ การสูญเสียแรงดัน (Head loss) หน่วย m/s

γ คือ น้ำหนักจำเพาะของของไหล หน่วย N/m^3

L คือ ความยาวท่อช่วงที่เกิด Head loss หน่วย m

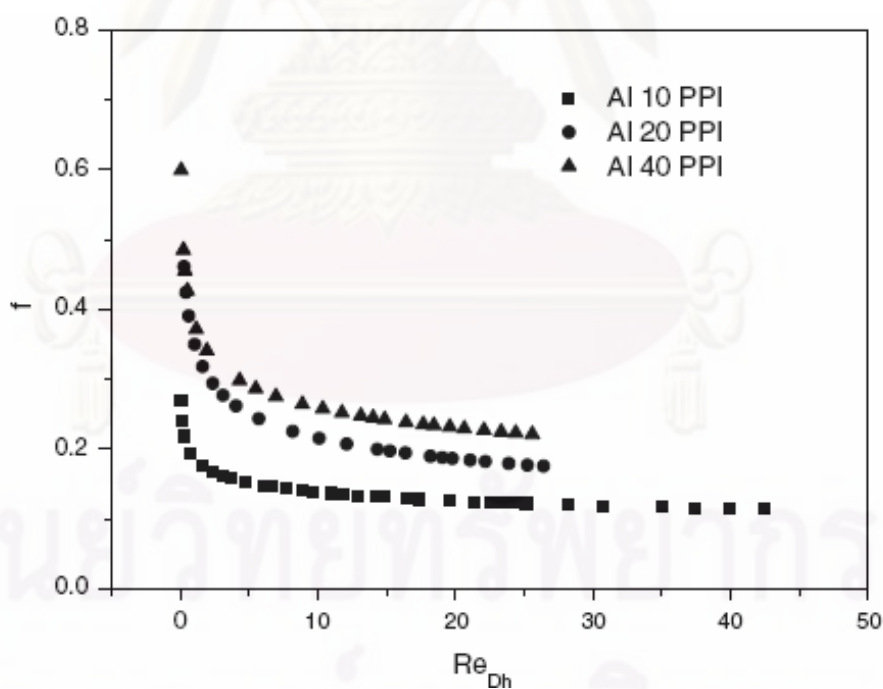
r คือ รัศมีของท่อ หน่วย m

อาจเขียนสมการได้ใหม่โดยแทนค่า $\gamma = \rho g$ และ $\mu / \rho = \nu$ เพื่อใช้ในการหาค่า Head loss เนื่องจากความเสียดทาน (Friction) ภายในท่อ ได้ดังสมการที่ 2.12 และ 2.13

$$h_L = \frac{32\mu LV}{\gamma D^2} = \frac{32\nu LV}{gD^2} \quad (2.12)$$

$$f = \frac{\Delta PD}{1/2L\rho V^2} \quad (2.13)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อการไหลของของไหลผ่านโฟมโลหะ คือความหนืดของของไหล ปริมาตรรูพรุนของโฟมโลหะ ความเสียดทานและปัจจัยอื่นๆ รูปที่ 2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์กับความเสียดทานของโฟมอะลูมิเนียมมีแนวโน้มลดลงเหมือนกัน ซึ่งความเสียดทานลดลงเมื่อโฟมโลหะมีขนาดของโพรงอากาศใหญ่ขึ้นและความสามารถในการซึมผ่านมากขึ้น



รูปที่ 2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์กับความเสียดทานของโฟมอะลูมิเนียม

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

- 3.1.1 เม็ดเงินความบริสุทธิ์ 99.9% บริษัท ยูนิคอร์ มาร์เก็ตติ้ง เซอร์วิสเซส (ประเทศไทย) จำกัด
- 3.1.2 ผง NaCl ยี่ห้อ Tesco
- 3.1.3 น้ำมันถั่วเหลือง ยี่ห้อ มรกต

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 3.2.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก
- 3.2.2 เครื่องผสมผงโลหะ แบบเขย่า 2 แกน ยี่ห้อ Seiwa giken
- 3.2.3 เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Sieve shaker) ยี่ห้อ Gilson
- 3.2.4 เครื่องอัดไฮดรอลิก แรงดันสูงสุด 3,000 กิโลกรัม ยี่ห้อ Masada Jack
- 3.2.5 แผ่นให้ความร้อน (Hot plate)
- 3.2.6 เทอร์โมมิเตอร์
- 3.2.7 เตาอบไล่ความชื้น
- 3.2.8 เตาอบชิ้นงาน
- 3.2.9 ปิเปตต์ (Pipette) ยี่ห้อ Gilson
- 3.2.10 เครื่องเขย่าผสมสารให้เข้ากัน (Vortex – genie 2) ยี่ห้อ Scientific industries
- 3.2.11 หม้อนึ่งอัดไอน้ำความร้อนสูง (Autoclave) ยี่ห้อ Tomy รุ่น SX-700
- 3.2.12 เครื่อง Auto spiral plate ยี่ห้อ Spiral biotech รุ่น Autoplate 4000
- 3.2.13 เครื่องวัดการดูดกลืน (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Thermo รุ่น Genesys 20
- 3.2.14 ตู้ปลอดเชื้อ (Biological safety cabinets) ยี่ห้อ Nuair
- 3.2.15 เครื่องบ่มเขย่าควบคุมอุณหภูมิ (Shaking incubator) ยี่ห้อ Vision
- 3.2.16 ตู้บ่มเชื้อ (Incubator) ยี่ห้อ Binder
- 3.2.17 หลอดทดลอง
- 3.2.18 เครื่อง Laser particle size distribution analyzer ยี่ห้อ Malvern instruments JEOL รุ่น Mastersizer s
- 3.2.19 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope (SEM)) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400 และ JSM-5410LV

- 3.2.20 เครื่องทดสอบพฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมเงิน Universal mechanical testing machine ยี่ห้อ Instron รุ่น 5567
- 3.2.21 เวอร์เนียร์คาลิเปอร์
- 3.2.22 แม่พิมพ์เหล็กกล้าเครื่องมือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 และ 11 มิลลิเมตร

3.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

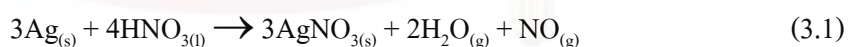
- 3.3.1 กรดไนตริก 65% (HNO₃)
- 3.3.2 กลีเซอรอล (C₃H₈O₃)
- 3.3.3 น้ำกลั่น
- 3.3.4 เอทิลแอลกอฮอล์
- 3.3.5 สารหล่อลื่น (Lithium stearate)
- 3.3.6 อะซีโตน

3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.4.1 การผลิตผงเงินโดยกระบวนการกลีเซอรอล

3.4.1.1 เทน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์ ปริมาณ 100 ml และตวงกรดไนตริก 65% ปริมาณ 100 ml เทลงในบีกเกอร์ขณะที่เทกรดไนตริกต้องกวนตลอดเวลา เพื่อให้กรดมีความเข้มข้นที่สม่ำเสมอ

3.4.1.2 นำเม็ดเงินผสมกับสารละลายที่เตรียมไว้ผสมให้เข้ากัน ซึ่งปฏิกิริยาทางเคมีของเงินสามารถแสดงได้ดังสมการ 3.1



จากสมการสามารถคำนวณน้ำหนักของเงินได้ 126.36 กรัม ต่อกรดไนตริก 65% ปริมาณ 100 ml

3.4.1.3 นำเม็ดเงินที่ผสมกับสารละลายที่ได้ตั้งบนแผ่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เพื่อเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้น เมื่อเม็ดเงินละลายหมดนำไปกรองแยกตะกอนของเงินในสารละลายและให้ความร้อนต่อไปอีก

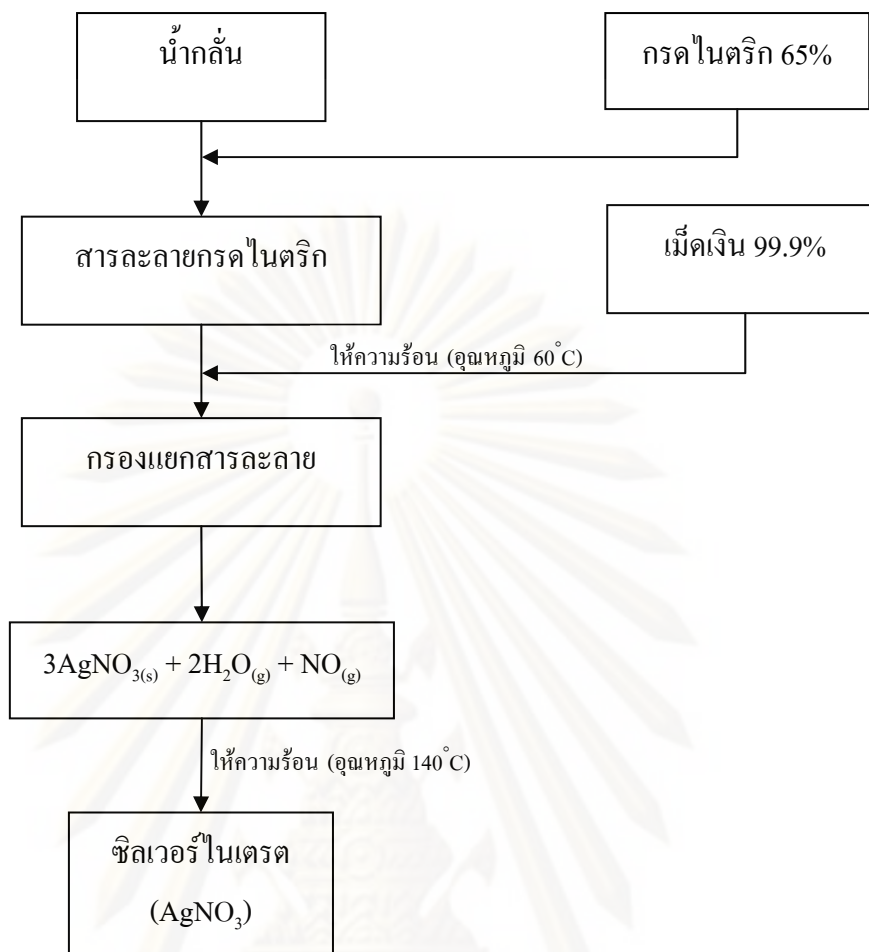
3.4.1.4 เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายต่อไปน้ำจะระเหยออกไปจนหมด และต้องทำการกวนสารละลายตลอดเวลาเพื่อให้สารละลายเริ่มอิมิตัว ซึ่งสารละลายจะเริ่มหนืดขึ้น หลังจากนั้น

ชกบีกเกอร์ลงจากแผ่นให้ความร้อน กวนจนกว่าจะเย็นและเกิดเป็นผลึกของซิลเวอร์ไนเตรตที่มีลักษณะสีขาวใส กระบวนการผลิตซิลเวอร์ไนเตรต แสดงไว้ในรูปที่ 3.1

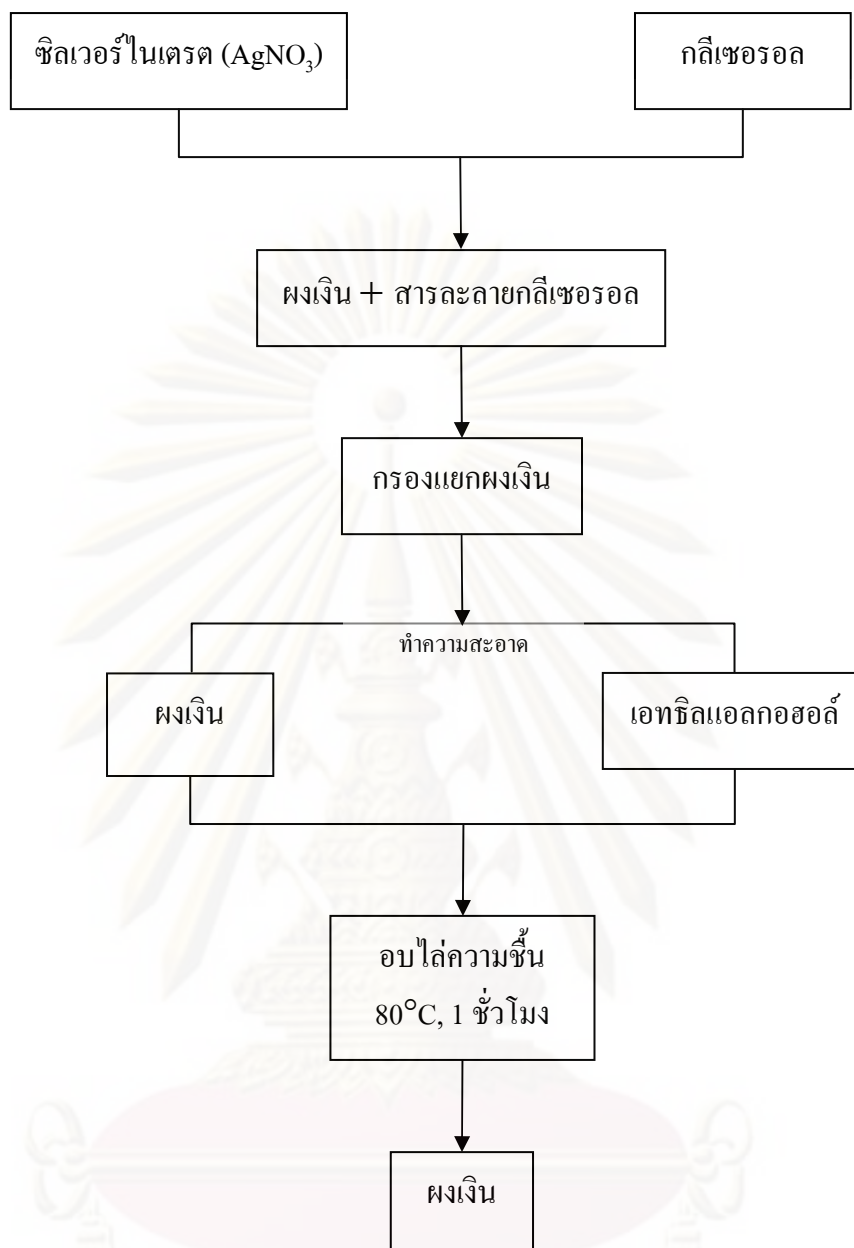
3.4.1.5 เตรียมกลีเซอรอลปริมาณ 200 ml ต่อซิลเวอร์ไนเตรตปริมาณ 10 กรัม เติลงในบีกเกอร์ และใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากัน หลังจากนั้นนำบีกเกอร์วางบนแผ่นให้ความร้อน เพื่อเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้น ซึ่งใช้เทอร์โมมิเตอร์จุ่มลงไปในการละลายเพื่อวัดอุณหภูมิของสารละลาย ซิลเวอร์ไนเตรตจะเริ่มละลายเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนอุณหภูมิของสารละลายสูงถึง 140°C การตกผลึกของผงเงินจากสารละลายเริ่มเกิดขึ้น ขณะที่อุณหภูมิสูงถึง 175°C ชกบีกเกอร์ลงจากแผ่นให้ความร้อน แล้วปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องการตกผลึกของผงเงินจึงสมบูรณ์

3.4.1.6 นำผงเงินที่ได้ไปกรองแยกผงเงินออกจากสารละลาย แล้วจึงนำผงเงินไปสู่ขั้นตอนการล้างต่อไป โดยการใช้เอทิลแอลกอฮอล์เทลงไปในบีกเกอร์ที่มีผงเงินอยู่เพื่อล้างกลีเซอรอลออกจากผงเงิน ซึ่งจะล้างจนกว่ากลีเซอรอลจะหมด ซึ่งสังเกตได้จากสีของเอทิลแอลกอฮอล์มีลักษณะใส

3.4.1.7 นำผงเงินไปอบไล่ความชื้นในเตาอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำผงเงินที่ได้ไปใช้ในการผลิตต่อไป รูปที่ 3.2 แสดงกระบวนการผลิตผงเงินโดยใช้ซิลเวอร์ไนเตรต



รูปที่ 3.1 กระบวนการผลิตซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO₃)



รูปที่ 3.2 การผลิตผงเงินโดยใช้ซิลเวอร์ไนเตรต

3.4.2 การเตรียมผง NaCl

นำผงของ NaCl ไปคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนคัดขนาด ซึ่งใช้ตะแกรงร่อนเบอร์ 40, 100 และ 325 ตามลำดับ โดยขนาดช่องว่างของตะแกรงร่อนแต่ละเบอร์มีรายละเอียดดังนี้

ตะแกรงร่อนเบอร์	40	มีขนาดช่องว่าง	420	μm
ตะแกรงร่อนเบอร์	100	มีขนาดช่องว่าง	149	μm
ตะแกรงร่อนเบอร์	325	มีขนาดช่องว่าง	44	μm

นำผง NaCl ที่ผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนคัดขนาดในแต่ละเบอร์ไปทำการวัดขนาดของอนุภาค NaCl ด้วยเครื่อง Laser particle size distribution analyzer เพื่อวัดขนาดเฉลี่ยของอนุภาค NaCl

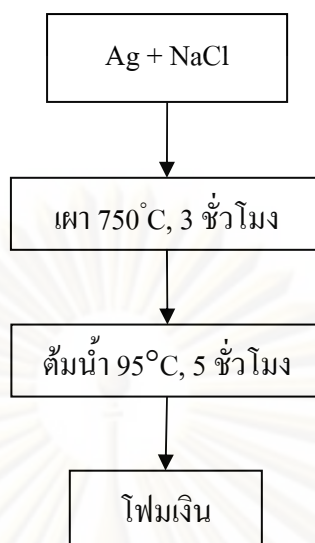
3.4.3 การผลิต Precursor

หลังจากผสมผงเงินกับ NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% และนำไปเขย่าด้วยเครื่องผสมผงโลหะเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ผงเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นนำผงที่ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันปริมาณ 4 และ 1.5 กรัม มาอัดแบบเย็นในแม่พิมพ์เหล็กกล้าเครื่องมือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 และ 11 mm ตามลำดับ โดยใช้แรงดันในการอัดขึ้นรูปแกนเดี่ยวที่ 397 MPa และ 207 MPa ในการผลิต Precursor ของการทดสอบการรับแรงอัดนั้นได้ผลิตชิ้นงาน 1 ชิ้นงานต่อ 1 เงื่อนไขการทดลอง เพราะวัสดุมีจำกัดและได้มีผู้ผลิตโคมแล้วนำไปทดสอบการรับแรงอัดแล้ว แนวโน้มของกราฟความเค้นและความเครียดที่ได้จึงสามารถคาดการณ์ได้ การทดสอบการรับแรงอัดจะทำซ้ำเมื่อกราฟความเค้นและความเครียดมีลักษณะผิดปกตินั่นเอง

3.4.4 การผลิตโคมเงิน

นำ Precursor มาเผาที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติและนำไปกำจัด NaCl ออกจากชิ้นงานโดยนำโคมเงินไปใส่น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศที่อุณหภูมิห้อง รูปที่ 3.3 แสดงกระบวนการผลิตโคมเงินจาก Precursor ที่ผสมผงเงินและ NaCl

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 การผลิตโฟมเงิน

3.4.5 การวัดความหนาแน่นของ Precursor และโฟมเงิน

นำ Precursor และ โฟมเงินมาวัดความหนาแน่นของชิ้นงาน โดยใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์วัดความหนาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาตรของชิ้นงาน หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักของชิ้นงานและนำมาหาความหนาแน่นของทั้ง Precursor และ โฟมเงิน โดยใช้สมการ 3.2

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.2)$$

โดยที่ m คือ น้ำหนักของ Precursor (g)

V คือ ปริมาตรของ Precursor (cm^3)

การหาความหนาแน่นของชิ้นงานสัมพันธ์กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) ของโฟมโลหะ (ρ^*) ซึ่งมีหน่วยเป็น % สามารถแสดงได้ในรูปของสัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) ของโลหะชนิดนั้นๆ ค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะที่แตกต่างกันจะนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานที่ต่างกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สามารถหาได้จากสมการที่ 3.3

$$\rho^* = \frac{\rho_f}{\rho_s} \times 100\% \quad (3.3)$$

โดยที่ ρ_f คือ ค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะ

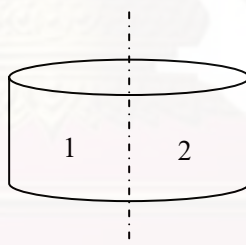
ρ_s คือ ค่าความหนาแน่นของโลหะชนิดนั้นๆ ตามลำดับ

การหาปริมาณรูพรุนของโฟมโลหะ (P) ขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวสร้างโพรงอากาศ และปริมาณของตัวสร้างโพรงอากาศและยังส่งผลต่อความหนาแน่นของชิ้นงานด้วย ซึ่งสามารถหาปริมาณรูพรุนได้ดังแสดงในสมการที่ 3.4

$$\%P = 100\% - \% \rho^* \quad (3.4)$$

3.4.6 การตรวจสอบโครงสร้างของโฟมเงิน

การตรวจสอบโครงสร้างของโฟมเงินมีความจำเป็นที่ต้องเลือกใช้อุปกรณ์ให้เหมาะสมกับชิ้นงาน เนื่องจากการเลือกเครื่องมือที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่ชิ้นงานได้ จึงได้ตัดชิ้นงานด้วย Electro discharge machining (EDM) ตามแนวขวางให้โฟมเงินแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังในรูปที่ 3.4 ส่วนที่ 1 นำโฟมเงินไปทำความสะอาดด้วยอะซิโตน แล้วนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) รุ่น JSM-6400 โดยใช้โหมด SE (Secondary Electron) เพื่อดูโครงสร้างมหภาคที่ผิวของชิ้นงาน สำหรับส่วนที่ 2 นำโฟมเงินไปทำความสะอาดด้วยอะซิโตนเช่นเดียวกัน แล้วนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) เพื่อดูโครงสร้างจุลภาคภายในชิ้นงานที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า



รูปที่ 3.4 ทิศทางการตัดชิ้นงาน

3.4.7 การทดสอบสมบัติทางกลของโฟมเงิน

ทำการทดสอบการอัด (Compression test) ด้วยเครื่อง Instron ซึ่งนำชิ้นงานโฟมเงินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 mm ที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% ใช้ความเร็วในการอัด 0.5 mm/min อัดจนถึง 60% ของความเครียด นำข้อมูลที่ได้ไปวาดกราฟความเค้นและความเครียดของแต่ละชิ้นงาน เมื่อได้ผลการทดสอบการรับแรงอัดของโฟมแล้ว นำข้อมูลที่ได้ไปหาค่าสมบัติทางกลของโฟมเงิน

3.4.8 การทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย

ในการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียนั้นได้อ้างอิงโดยใช้วิธีตามมาตรฐาน JIS Z 2801 จากเดิมที่ให้ชิ้นงานสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แต่ในการทดลองได้ทำการลดเวลาในการให้ชิ้นงานสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียลงเป็นเวลา 15 นาที เนื่องจากต้องการศึกษาการลดเวลาในการให้ชิ้นงานสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียลงแล้วประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียเป็นอย่างไร ขั้นตอนในการทดลองมีดังต่อไปนี้

3.4.8.1 เทอาหารเลี้ยงเชื้อ (Typing soy agar) ปริมาณ 20 กรัม ใส่ลงไปในขวดปริมาตร 1,000 ml และใช้น้ำกลั่นปริมาณ 500 ml นำไปผสมเข้ากันแล้วเขย่าให้เข้ากัน ปิดฝาพอหลวม ๆ แล้วนำไปทำกระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อ (Sterilization) ด้วยหม้อนึ่งอัดไอน้ำความ ร้อนสูง (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 121°C ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15-30 นาที เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์

3.4.8.2 นำอาหารเลี้ยงเชื้อที่ผสมกับน้ำกลั่นออกมาจากหม้อนึ่งอัดไอน้ำความ ร้อนสูง แล้วเทอาหารเลี้ยงเชื้อลงบนจานเพาะเชื้อที่เตรียมไว้ ปล่อยให้แห้งตัวในตู้ปลอดเชื้อ เป็นเวลา 30 นาที

3.4.8.3 นำโคโลนีเดียวของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* ใส่ในอาหารเลี้ยงเชื้อ (Nutrient broth) ที่เตรียมไว้ แล้วนำเข้าตู้บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.5 แสดงการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อและการเตรียมเชื้อแบคทีเรีย

3.4.8.4 ทำการฆ่าเชื้อชิ้นงานโดยนำชิ้นงานโคมเงินใส่เข้าไปในหม้อนึ่งอัดไอน้ำ ความ ร้อนสูง แล้วนำชิ้นงานโคมเงินไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60°C เพราะยังมีไอน้ำเกาะอยู่ บนชิ้นงาน

3.4.8.5 ทำการเตรียมน้ำเกลือซึ่งใช้ 0.9%NaCl(Normal saline) ละลายในน้ำกลั่น แล้ว เทลงในหลอดทดลองแต่ละหลอดทดลองที่มีปริมาณ 4.5 ml โดยใช้ปิเปตต์ดูดเชื้อแบคทีเรียปริมาณ 0.5 ml ใส่ลงไปในหลอดทดลองน้ำเกลือ โดยเจือจางจากความเข้มข้น 10^8 , 10^7 , 10^6 , 10^5 CFU/ml แล้วจึงใส่ชิ้นงานโคมเงินลงไปทุกหลอดทดลองที่ความเข้มข้น 10^5 CFU/ml

3.4.8.6 นำหลอดทดลองที่มีชิ้นงานโคมเงินอยู่ไปเขย่าด้วยเครื่องบ่มเขย่าควบคุม อุณหภูมิ (Shaking incubator) ที่ 100 RPM อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้ชิ้นงานสัมผัส กับเชื้อแบคทีเรียและทำให้เชื้อแบคทีเรียกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

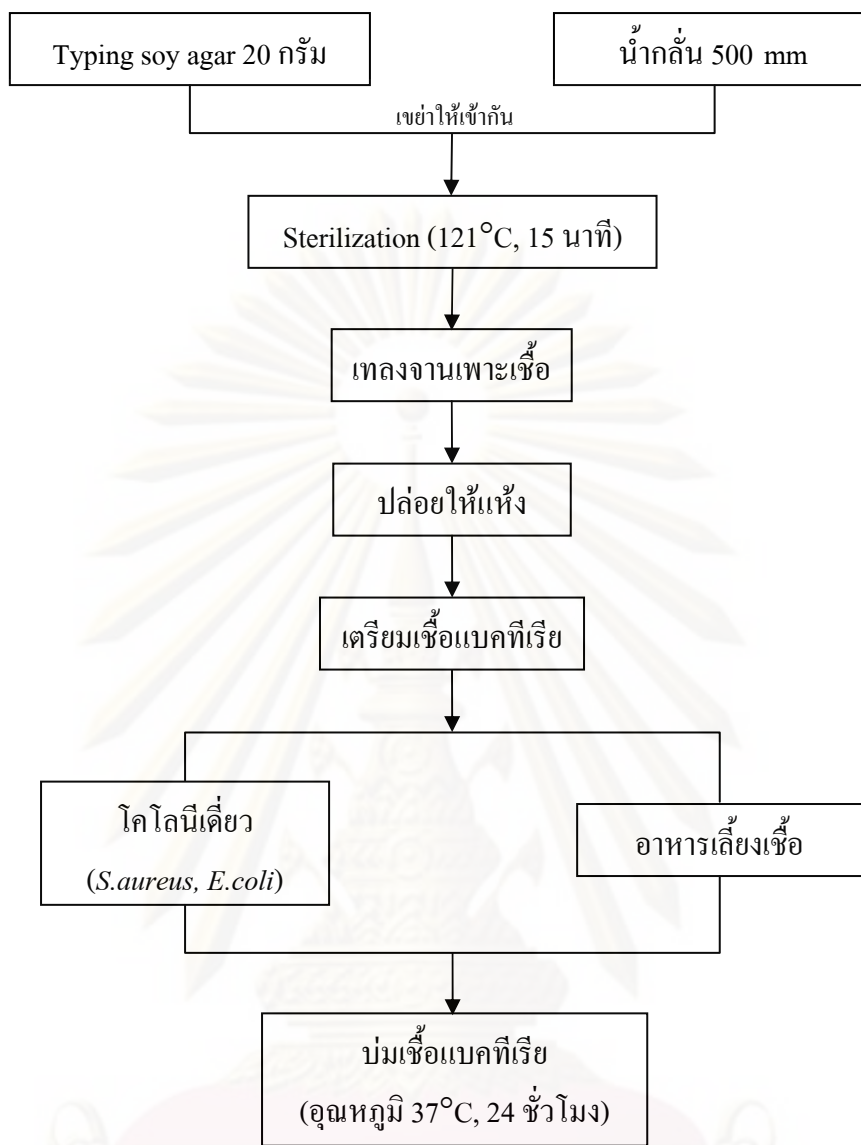
3.4.8.7 นำหลอดทดลองที่มีชิ้นงานอยู่ที่เชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* มาเจือจาง โดยให้มีความเข้มข้น 10^5 CFU/ml โดยเริ่มต้นเจือจางจาก 10^0 , 10^{-1} , 10^{-2} แล้วดูดเชื้อที่ผ่านการเจือจาง ปริมาณ 0.5 ml แล้วใส่ลงไปหลอดทดลองน้ำเกลือปริมาณ 4.5 ml

3.4.8.8 ทำการลงเชื้อแบคทีเรีย (Spread plate) ด้วยเครื่อง Auto spiral plate โดยใช้เชื้อแบคทีเรีย 0.1 ml หยดลงบนจานเพาะเชื้อที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อซึ่งแข็งตัวแล้ว แล้วนำทุกหลอดทดลองของเชื้อแบคทีเรียที่มีชิ้นงานโคมเงินอยู่ข้างในไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าผสมสารให้เข้ากันก่อน (Vortex) ก่อนที่จะทำการลงเชื้อแบคทีเรียบนจานเพาะเชื้อ หลังจากนั้นนำจานเพาะเชื้อใส่ในตู้บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมานับจำนวนโคโลนีต่อไป ดังรูปที่ 3.6 แสดงการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย ในการทำวิจัยนี้ตามมาตรฐาน JIS Z 2801 สำหรับการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย (% Reduction) สามารถหาได้ในสมการที่ 3.5

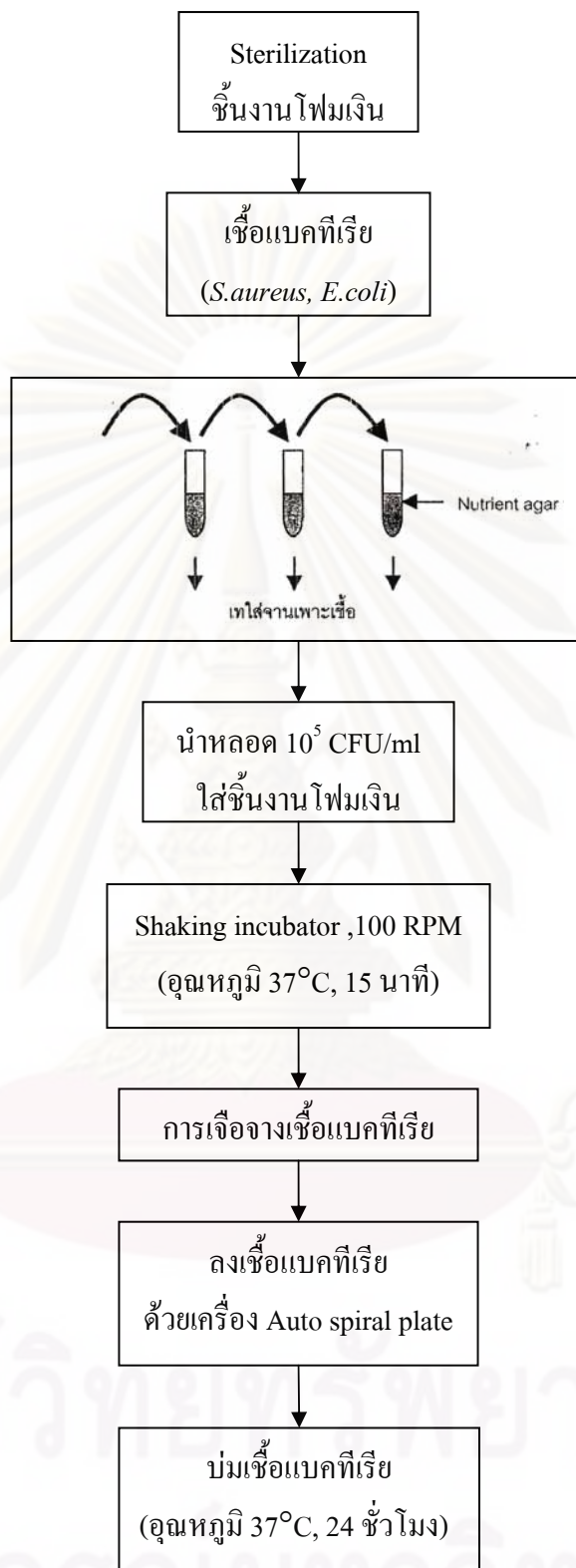
$$\% \text{ reduction} = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (3.5)$$

โดยที่ A คือ จำนวนของแบคทีเรียเริ่มต้น (CFU/ml)

B คือ จำนวนของแบคทีเรียในชิ้นงานหลังจากผ่านไป 24 ชั่วโมง (CFU/ml)



รูปที่ 3.5 การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อและการเตรียมเชื้อแบคทีเรีย



รูปที่ 3.6 การทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย

3.4.9 การตรวจสอบลักษณะของเชื้อแบคทีเรีย

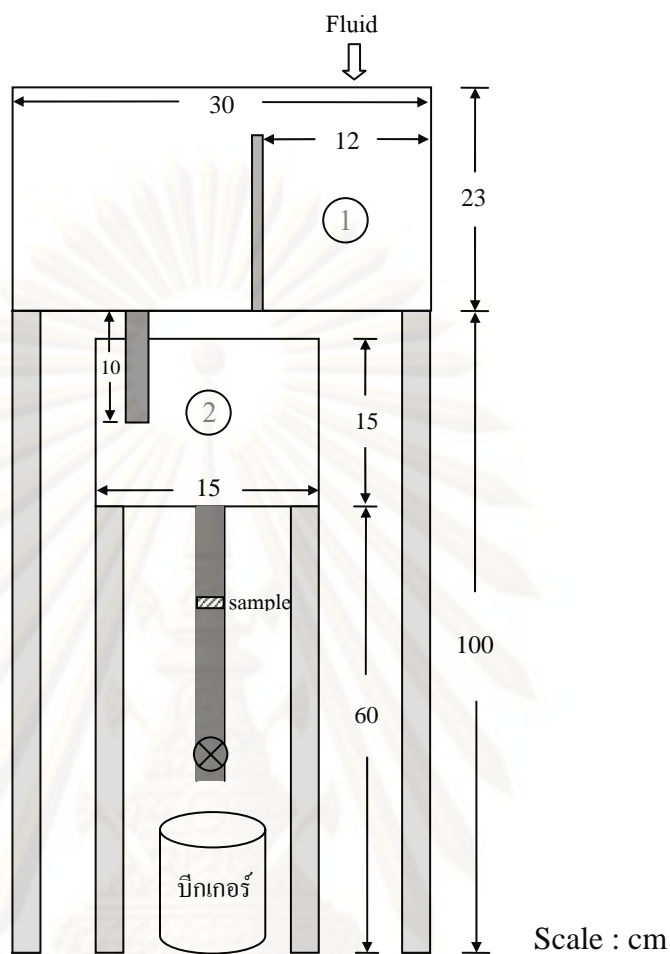
นำชิ้นงานโฟมเงินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 mm ที่สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นนำโฟมเงินไปทำการเตรียมตัวอย่างเพื่อให้เชื้อแบคทีเรียคงที่อยู่บนโฟมเงิน แล้วนำไปทำการตรวจสอบลักษณะของเชื้อแบคทีเรียที่อยู่บนผิวของโฟมเงินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) รุ่น JSM-5410LV โดยใช้โหมด SE (Secondary Electron)

3.4.10 การวัดอัตราการไหลของของเหลวผ่านโฟมเงิน

นำโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% NaCl โดยใช้ขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 494, 337, 126 และ 39 μm ตามลำดับ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 mm ในรูปที่ 3.7 แสดงการทดสอบการไหลของของเหลวผ่านโฟมเงิน จากนั้นนำท่อ Polyvinyl chloride (PVC) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 22 mm และมีรอยต่อของผนังที่ยื่นออกมารอบท่อ Polyvinyl chloride เพื่อป้องกันไม่ให้โฟมเงินหลุดลงไปในบีกเกอร์ แล้วนำมาทาวาสลินเพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำและน้ำมันถั่วเหลืองที่ขอบของโฟมเงิน และนำโฟมเงินใส่ลงไปในท่อ Polyvinyl chloride แล้วเทน้ำและน้ำมันถั่วเหลืองลงไปในส่วนที่ 1 และปล่อยให้ น้ำและน้ำมันถั่วเหลืองไหลผ่านแผ่นที่กั้นไว้ลงมาไปสู่ส่วนที่ 2 จนถึงระดับที่ต้องการ ในการทดสอบการไหลต้องควบคุมระดับน้ำและน้ำมันถั่วเหลืองให้คงที่เสมอ เพื่อรักษาพลังงานศักย์ของระบบให้คงที่อยู่เสมอ จากนั้นทำการเปิดวาล์วแล้วจับเวลาเมื่อน้ำและน้ำมันถั่วเหลืองไหลลงไปในบีกเกอร์เพื่อทำการวัดอัตราการไหลที่สามารถไหลผ่านโฟมเงินได้ นำข้อมูลที่ได้ไปหาอัตราการไหลกับเวลาของโฟมเงิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7 การวัดอัตราการไหลของของเหลวผ่านโพรเมจัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์จริงที่ใช้ในการวัดอัตราการไหลของของเหลวผ่านโฟมเงิน

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

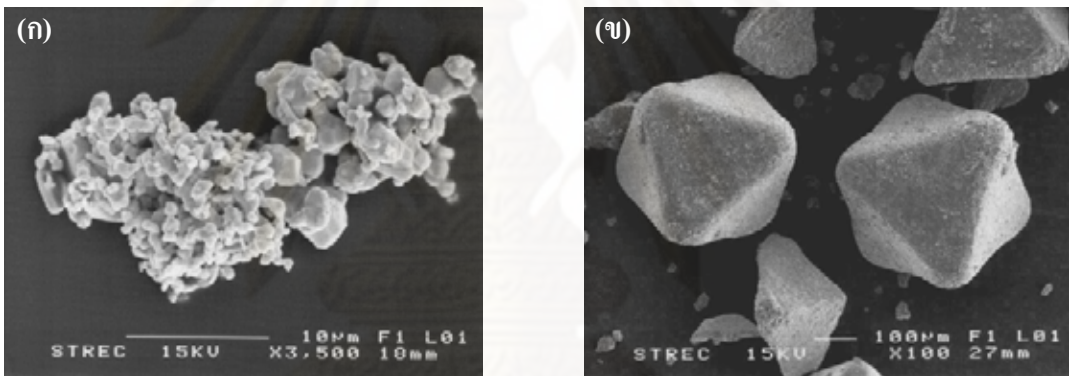
นำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์เปรียบเทียบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของโฟมเงินว่ามีลักษณะโครงสร้างอย่างไร และวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของปริมาณและขนาดของอนุภาค NaCl ในโฟมเงินที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงอัด การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียในโฟมเงิน และอัตราการไหลของของเหลวที่ไหลผ่าน โฟมเงิน

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 คุณลักษณะเฉพาะของวัสดุผง

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะรูปร่างของวัสดุผงและตารางที่ 4.1 แสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาควัสดุผง โดย D_{10} , D_{50} และ D_{90} คือ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ 10, 50 และ 90 % ของอนุภาค NaCl ทั้งหมด จากรูปที่ 4.1 (ก) ผงเงินมีลักษณะกลมและเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ โดยมีขนาดอนุภาค Ag ที่เกาะกันโดยเฉลี่ยประมาณ 21 μm รูปที่ 4.1 (ข) ผง NaCl มีลักษณะรูปร่างเป็นพีระมิดคู่สี่เหลี่ยม (Tetragonal dipyramid) ซึ่ง NaCl ได้ผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนคัดขนาด +35, 35, 100 และ 325 mesh โดยมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 494, 337, 126 และ 39 μm ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ลักษณะรูปร่างของวัสดุผง (ก) ผงเงิน (ข) ผง NaCl

Powder	D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)	Mean diameter (μm)
Ag	0.09	13	56	21
+35 mesh NaCl	325	512	660	494
35 mesh NaCl	207	334	482	337
100 mesh NaCl	56	119	210	126
325 mesh NaCl	17	37	65	39

ตารางที่ 4.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงเงินและผง NaCl

สำหรับตารางที่ 4.2 แสดงผลการหาธาตุผสมในผงเงินด้วยวิธี Inductively coupled Plasma Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) ที่อยู่ในรูปของสารละลาย พบว่าปริมาณของธาตุ Fe มีปริมาณมากที่สุด และมีปริมาณของธาตุ Cu, P, Mg, Ni ตามลำดับ ซึ่งในการคำนวณหาปริมาณของธาตุผสมในผงเงินสามารถดูได้ในภาคผนวก

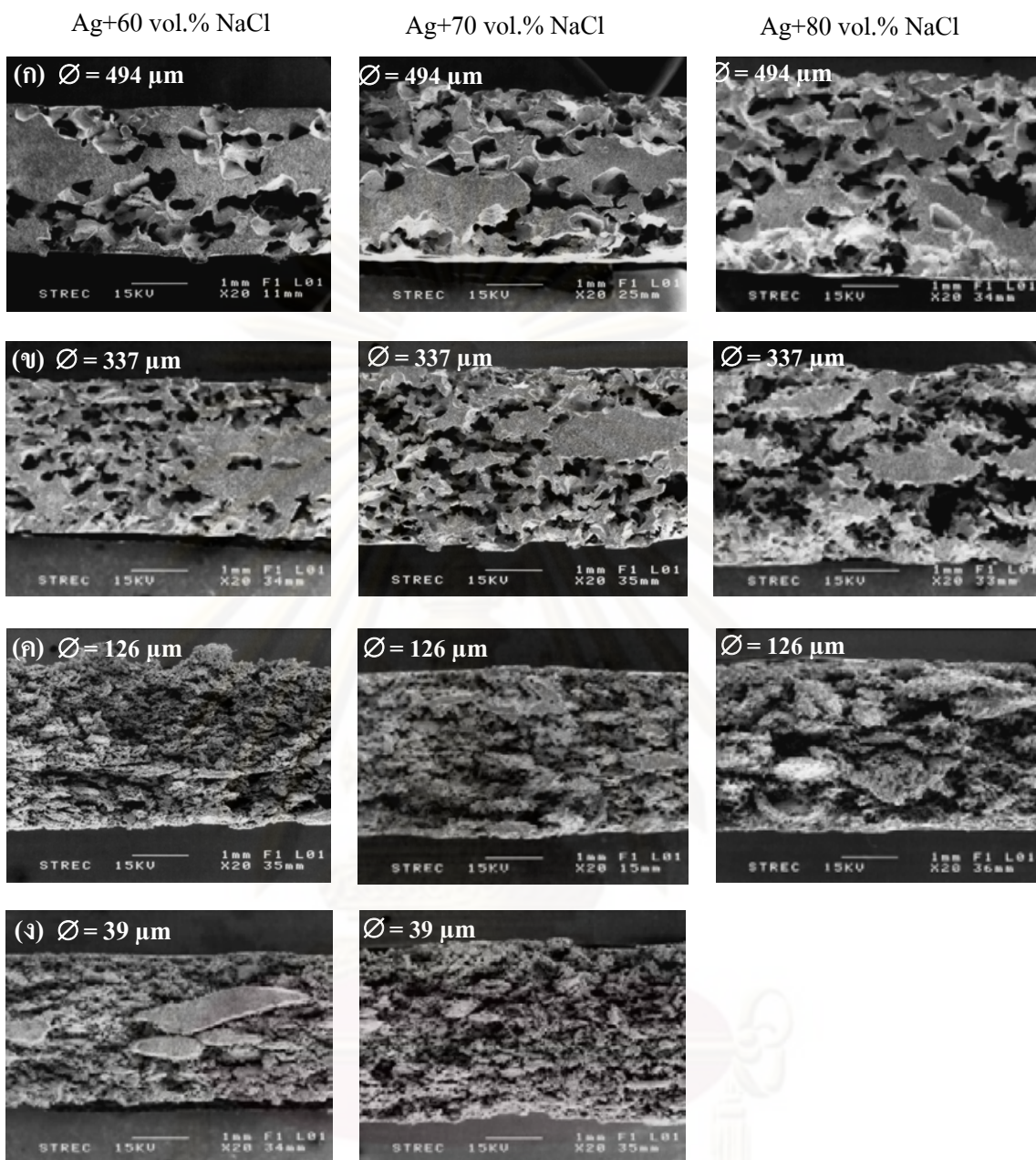
%wt. by ICP				
Cu	Mg	P	Ni	Fe
0.047	0.036	0.0425	0.0025	0.1195

ตารางที่ 4.2 ผลการหาธาตุผสมในผงเงินด้วยวิธี ICP

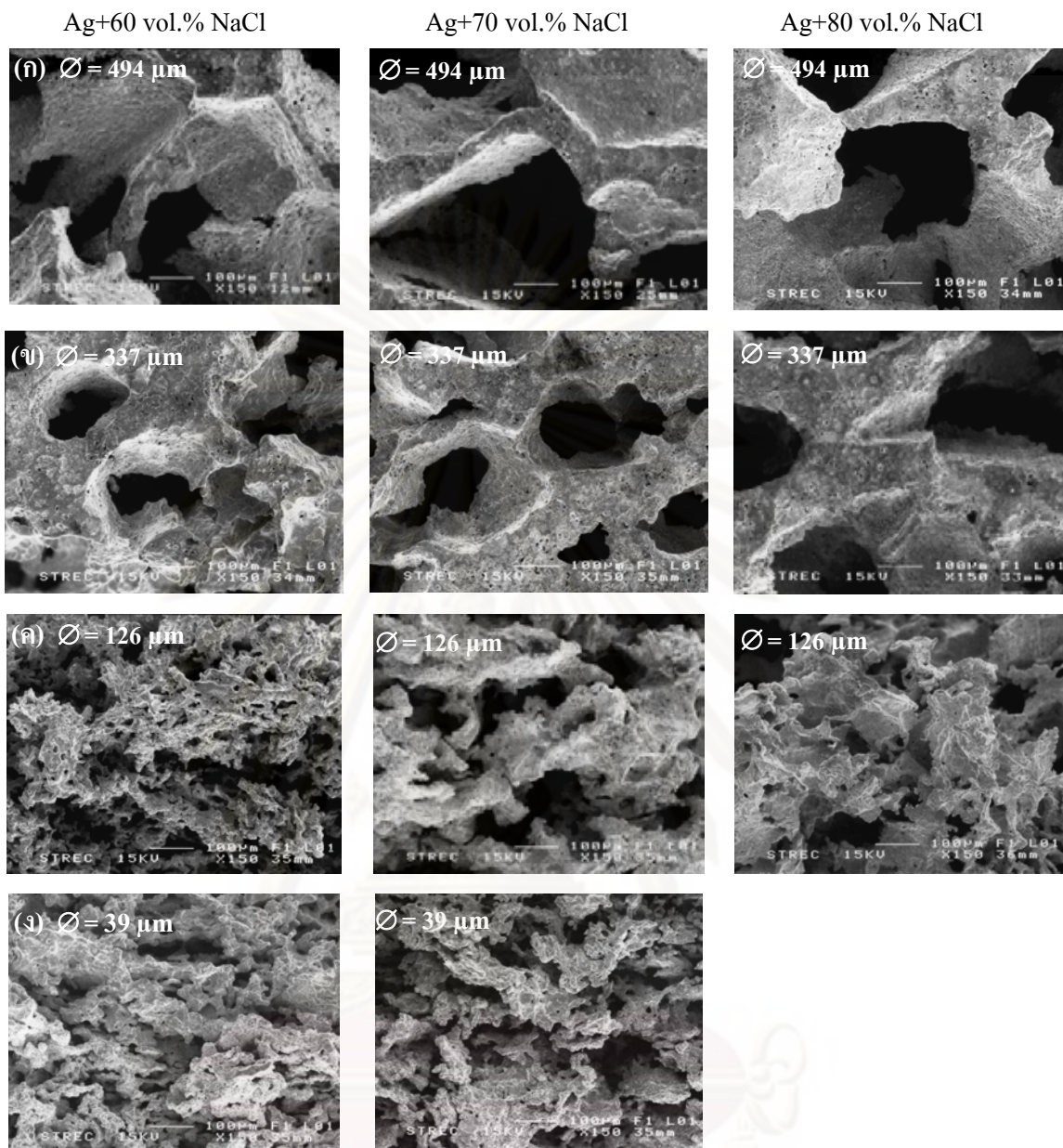
4.2 โครงสร้างมหภาคของโพลีเมอร์ (Macrostructure)

รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างมหภาคของโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% และมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 494, 337, 126 และ 39 μm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าโพลีเมอร์มีโครงสร้างที่สม่ำเสมอของรูพรุนเมื่อผสม NaCl ปริมาณเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ปริมาณรูพรุนของโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นด้วย เมื่อโพลีเมอร์ผสม NaCl ที่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเล็กลง พบว่าโพลีเมอร์มีความเป็นเนื้อเดียวกันของรูพรุนเพิ่มขึ้น ทำให้มีการเชื่อมต่อกันของรูพรุนเพิ่มขึ้นในขณะที่โพลีเมอร์ผสม NaCl ในปริมาณเท่ากัน พบว่าโครงสร้างของโพลีเมอร์มีความเป็นเนื้อเดียวกันของรูพรุนลดลงเมื่อโพลีเมอร์ผสม NaCl ที่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคใหญ่ ซึ่งโครงสร้างมหภาคของโพลีเมอร์ที่ได้ก็ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของ NaCl แต่ถ้าใช้ปริมาณของ NaCl มากขึ้นจะทำให้มีการเชื่อมต่อกันของรูพรุนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้อนุภาค NaCl ขนาดเล็กมากจะทำให้การอัดขึ้นรูปนั้นยากและการกำจัด NaCl ออกจากโครงสร้างโพลีเมอร์อย่างสมบูรณ์ทำได้ยากมากขึ้น

รูปที่ 4.3 แสดงภาพขยายของโครงสร้างมหภาคของโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% และมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 494, 337, 126 และ 39 μm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 60 vol.% มีแนวโน้มที่จะมีผนังของโพรงอากาศ (Cell wall) หนากว่าโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 70 และ 80 vol.% และความหนาของผนังโพรงอากาศของโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 70 vol.% มีแนวโน้มที่จะมีขนาดใหญ่มากกว่าความหนาของผนังโพรงอากาศของโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 80 vol.% สำหรับโพลีเมอร์ผสม NaCl ในปริมาณเท่ากันแต่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาค NaCl ต่างกัน พบว่าโพลีเมอร์ผสม NaCl ที่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคใหญ่ก็มีผนังของโพรงอากาศหนากว่าโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ที่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเล็ก



รูปที่ 4.2 โครงสร้างมหภาคของโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% และมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ (ก) 494 μm (ข) 337 μm (ค) 126 μm และ (ง) 39 μm
หมายเหตุ : โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 80 vol.% และขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 39 μm ไม่สามารถแสดงรูปโครงสร้างมหภาคได้เพราะว่าชิ้นงานแตกหักพังภายหลังการให้ความร้อน จึงไม่สามารถแสดงผลได้



รูปที่ 4.3 ภาพขยายโครงสร้างมหภาคของโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% และมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ (ก) 494 μm (ข) 337 μm (ค) 126 μm และ (ง) 39 μm หมายเหตุ : โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 80 vol.% และขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 39 μm ไม่สามารถแสดงรูปโครงสร้างมหภาคได้เพราะว่าชิ้นงานแตกหักพังภายหลังจากการให้ความร้อน จึงไม่สามารถแสดงผลได้

4.3 โครงสร้างจุลภาคของโฟมเงิน (Microstructure)

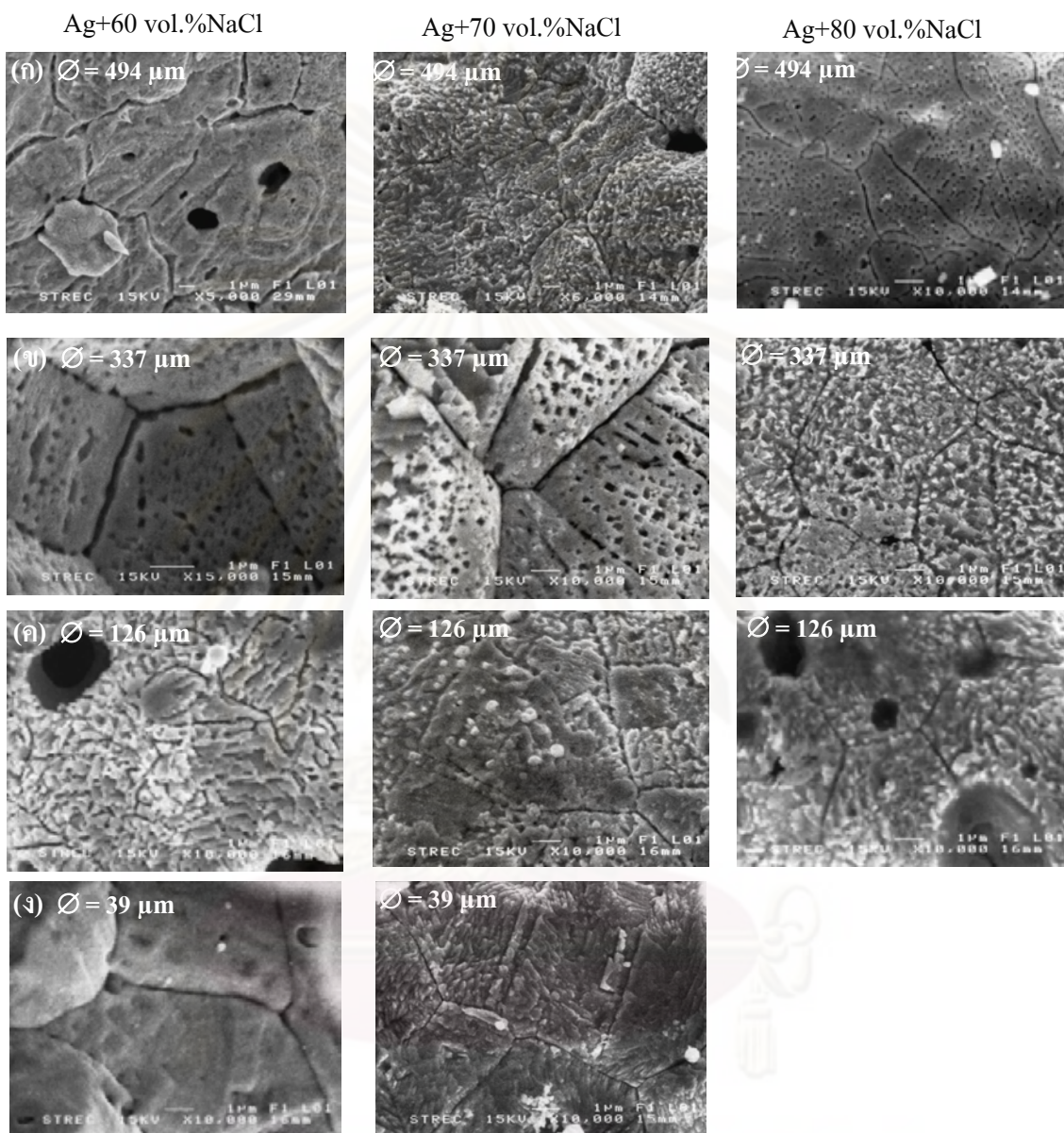
รูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% และมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 494, 337, 126 และ 39 μm ตามลำดับ จากรูปที่ 4.4 (ก) โฟมเงินที่ผสม NaCl ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 494 μm ปริมาณ 60 vol.% จะเห็นได้ว่าลักษณะโครงสร้างของโฟมเงินมีลักษณะเป็นเกรนของผงเงินเชื่อมต่อกันและพื้นผิวของโพรงอากาศมีลักษณะผิวค่อนข้างเรียบขนาดของเกรนมีขนาดใหญ่ประมาณเท่ากับผงเงิน แต่มีรูเกิดขึ้นที่ผิวของเนื้อพื้นบ้าง สำหรับโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 70 vol.% จะเห็นได้ว่าลักษณะโครงสร้างของโฟมเงินมีลักษณะเป็นเกรนของผงเงินเชื่อมต่อกัน ซึ่งพื้นผิวของผนังโพรงอากาศมีลักษณะผิวค่อนข้างขรุขระไม่เรียบ และโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 80 vol.% พบว่าลักษณะโครงสร้างของโฟมเงินมีลักษณะเป็นเกรนเชื่อมต่อกัน และพื้นผิวของโพรงอากาศมีลักษณะผิวค่อนข้างเรียบและมีรูขนาดเล็กล้อมรอบผิวโฟมเงิน

รูปที่ 4.4 (ข) โฟมเงินที่ผสม NaCl และมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 337 μm ปริมาณ 60 vol.% จะเห็นได้ว่าลักษณะโครงสร้างของโฟมเงินมีลักษณะเป็นเกรนเชื่อมต่อกันขนาดใหญ่และพื้นผิวของผนังโพรงอากาศมีลักษณะผิวค่อนข้างเรียบซึ่งที่พื้นผิวของโพรงอากาศเกิดรูขนาดเล็กล้อมรอบเห็นได้ชัด โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 70 vol.% จะเห็นได้ว่าลักษณะโครงสร้างของโฟมเงินมีลักษณะเป็นเกรนเชื่อมต่อกันและพื้นผิวของโพรงอากาศมีลักษณะผิวค่อนข้างเรียบซึ่งที่พื้นผิวของโพรงอากาศเกิดรูขนาดเล็กล้อมรอบมากกว่าโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60 vol.% สำหรับโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 80 vol.% จะเห็นได้ว่าลักษณะโครงสร้างของโฟมเงินมีลักษณะเป็นเกรนเชื่อมต่อกันและพื้นผิวของโพรงอากาศมีลักษณะค่อนข้างขรุขระที่มีลักษณะไม่เรียบมากกว่าที่ผสม NaCl ปริมาณ 60 และ 70 vol.%

รูปที่ 4.4 (ค) โฟมเงินที่ผสม NaCl และมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 126 μm ปริมาณ 60 vol.% จะเห็นได้ว่าลักษณะโครงสร้างของโฟมเงินมีลักษณะเป็นเกรนเชื่อมต่อกันและพื้นผิวของผนังโพรงอากาศมีลักษณะผิวที่เป็นคลื่นไม่เรียบ สำหรับโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 70 vol.% จะเห็นได้ว่าลักษณะโครงสร้างของโฟมเงินมีลักษณะเป็นเกรนเชื่อมต่อกันและพื้นผิวของโพรงอากาศมีลักษณะผิวไม่เรียบค่อนข้างขรุขระปรากฏขึ้นมา ส่วนโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 80 vol.% จะเห็นได้ว่าลักษณะโครงสร้างของโฟมเงินมีลักษณะเป็นเกรนเชื่อมต่อกันและพื้นผิวของโพรงอากาศมีลักษณะไม่เรียบค่อนข้างขรุขระ ซึ่งเกิดรูขนาดเล็กล้อมรอบที่ผิว

รูปที่ 4.4 (ง) โฟมเงินที่ผสม NaCl และมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 39 μm ปริมาณ 60 vol.% จะเห็นได้ว่าลักษณะโครงสร้างของโฟมเงินมีลักษณะเป็นเกรนเชื่อมต่อกันและพื้นผิวของโพรงอากาศมีลักษณะผิวค่อนข้างเรียบมาก สำหรับโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 70

vol.% จะเห็นว่าลักษณะโครงสร้างของโพลีเมอร์มีลักษณะเป็นเกรนเชื่อมต่อกันและพื้นผิวของโพลีเมอร์อากาศมีลักษณะค่อนข้างขรุขระมากกว่าโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 60 vol.%



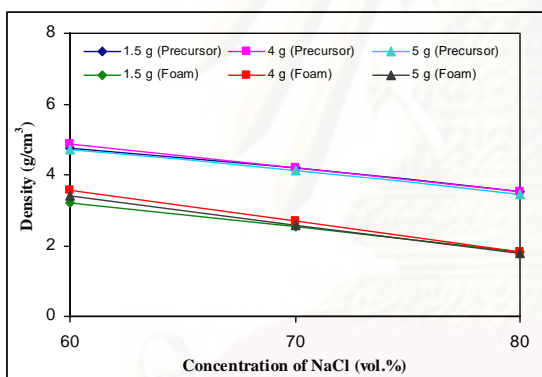
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% และมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ (ก) 494 μm (ข) 337 μm (ค) 126 μm และ (ง) 39 μm

หมายเหตุ : โพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 80 vol.% และขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 39 μm ไม่สามารถแสดงรูปโครงสร้างมหภาคได้เพราะว่าชิ้นงานแตกหักพังภายหลังการให้ความร้อน จึงไม่สามารถแสดงผลได้

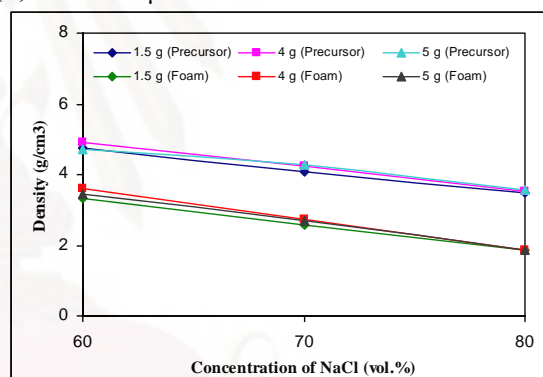
4.4 ปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหลังการอัดขึ้นรูปและหลังจากผลิตเป็นโฟม

รูปที่ 4.5 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการอัดขึ้นรูปและหลังจากผลิตเป็น โฟม ที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% และขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 494, 337, 126 และ 39 μm พบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการอัดขึ้นรูปมีความหนาแน่นลดลงเมื่อผสม NaCl ปริมาณเพิ่มขึ้น และหลังจากผลิตเป็น โฟมแล้วพบว่าความหนาแน่นของโฟมลดลงเมื่อผสม NaCl ปริมาณเพิ่มขึ้น แต่ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการอัดขึ้นรูปมีความหนาแน่นมากกว่า ความหนาแน่นของโฟมอย่างชัดเจน สำหรับรูปที่ 4.6 แสดงปริมาณรูพรุนของโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% และขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 494, 337, 126 และ 39 μm จากรูปที่ 4.6 (ก) ถึง (ง) พบแนวโน้มที่เหมือนกันคือโฟมเงินที่ผสม NaCl ในปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณรูพรุนใน โฟมเงินเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แม้ว่าชิ้นงานจะมีน้ำหนักไม่เท่ากันแต่โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณเท่ากัน พบว่าปริมาณรูพรุนมีค่าใกล้เคียงกัน

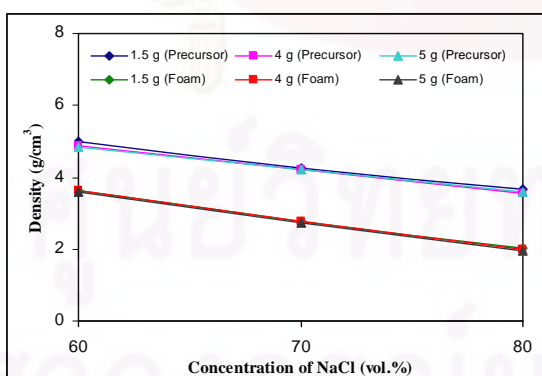
(ก) $\varnothing = 494 \mu\text{m}$



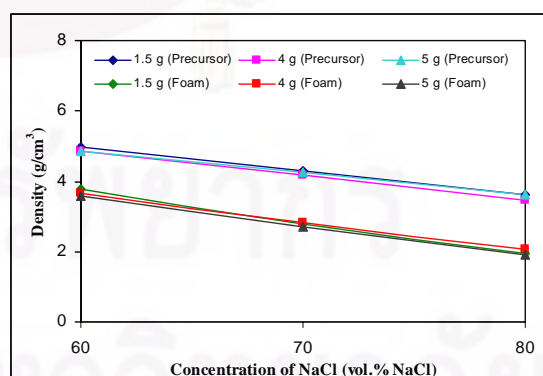
(ข) $\varnothing = 337 \mu\text{m}$



(ค) $\varnothing = 126 \mu\text{m}$

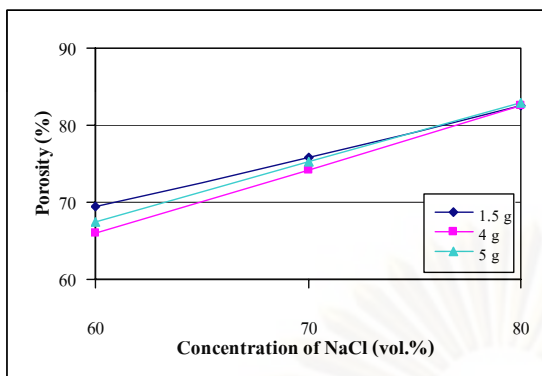
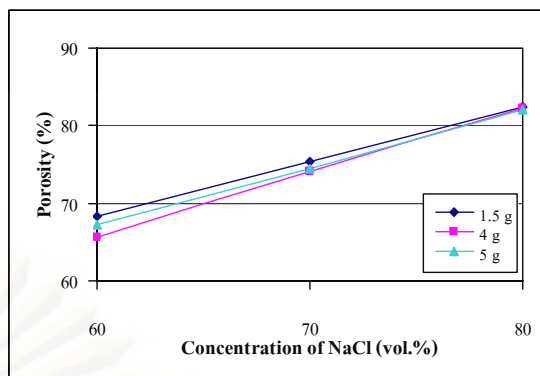
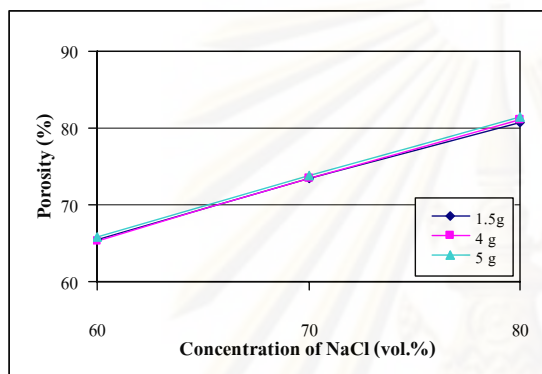
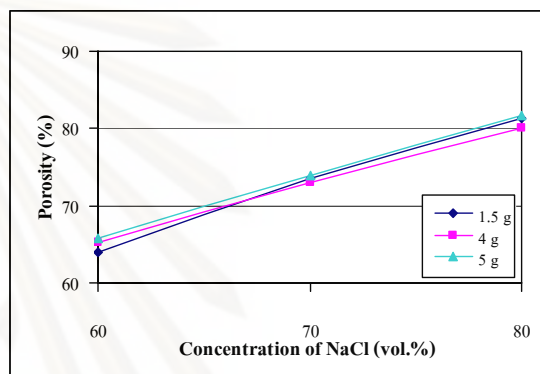


(ง) $\varnothing = 39 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.5 ความหนาแน่นของชิ้นงานอัดขึ้นรูปและผลิตเป็น โฟมที่มีขนาดเฉลี่ย

(ก) $\varnothing = 494 \mu\text{m}$ (ข) $\varnothing = 337 \mu\text{m}$ (ค) $\varnothing = 126 \mu\text{m}$ และ (ง) $\varnothing = 39 \mu\text{m}$

(ก) $\varnothing = 494 \mu\text{m}$ (ข) $\varnothing = 337 \mu\text{m}$ (ค) $\varnothing = 126 \mu\text{m}$ (ง) $\varnothing = 39 \mu\text{m}$ รูปที่ 4.6 ปริมาณรูพรุนของโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ที่มีขนาดเฉลี่ย (ก) $\varnothing = 494 \mu\text{m}$ (ข) $\varnothing = 337 \mu\text{m}$ (ค) $\varnothing = 126 \mu\text{m}$ และ (ง) $\varnothing = 39 \mu\text{m}$

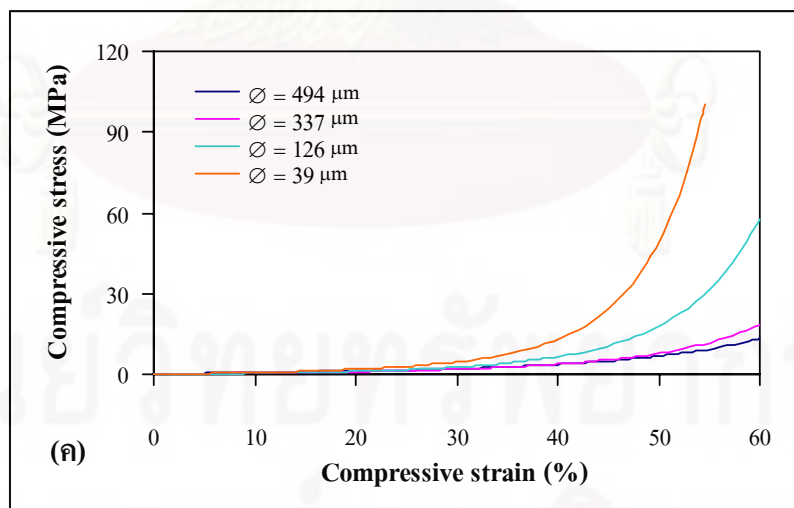
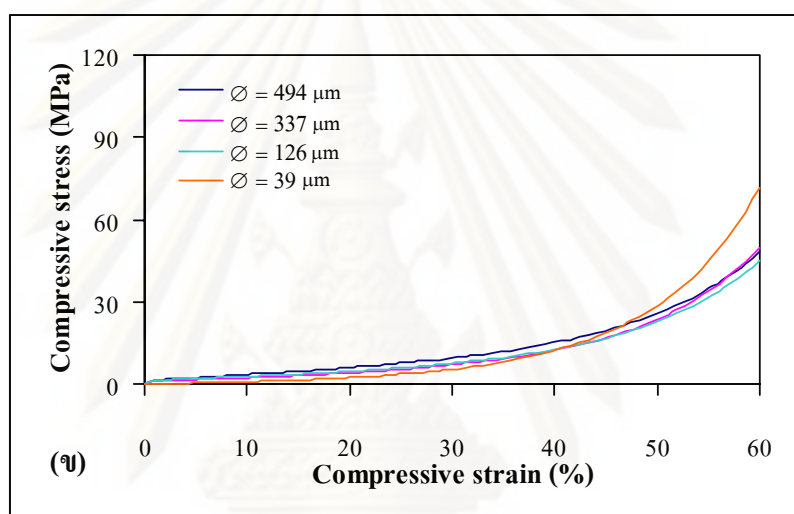
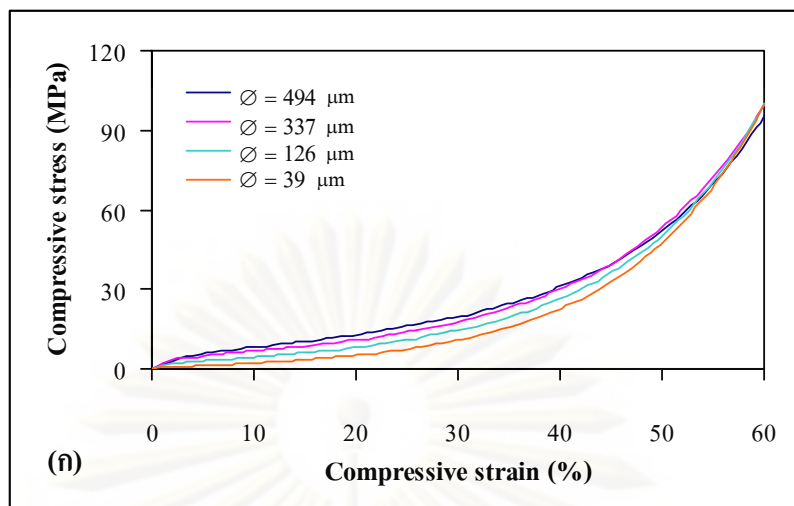
ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

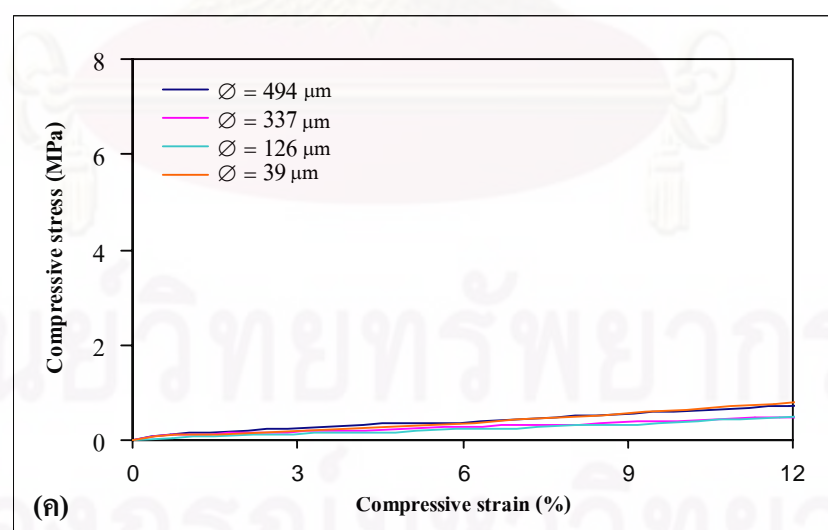
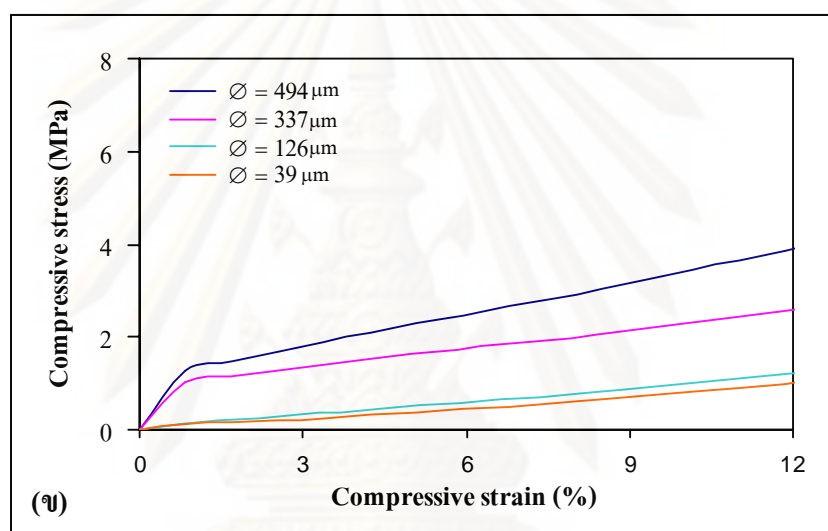
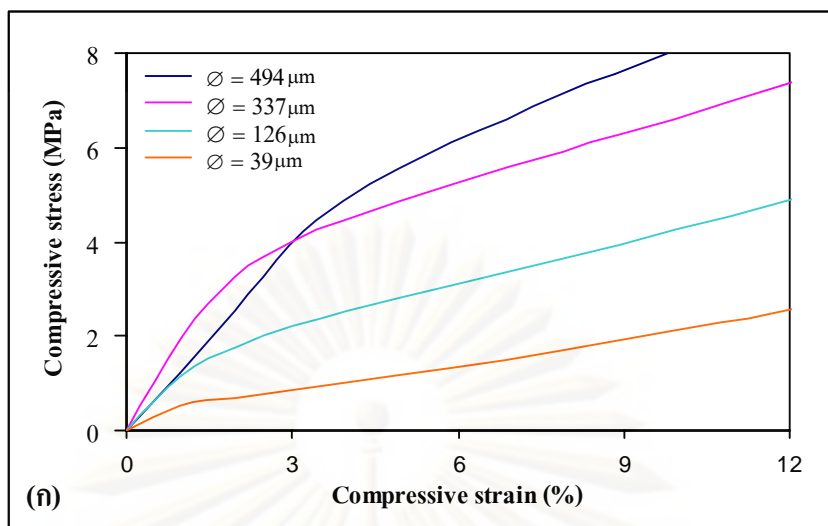
4.5 ความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมเงิน

รูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% ที่ความเร็วหัวกด 0.5 mm/min และสิ้นสุดการทดสอบที่ 60% ของความเครียด ผลการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปกราฟระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) จะพบว่าโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60 vol.% มีความแข็งแรงจุดคราก (Yield strength) และความเค้นพลาโต (Plateau stress) ต่ำกว่าโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 70 และ 80 vol.% จะเห็นว่าขนาดของอนุภาค NaCl ใหญ่ทำให้ความแข็งแรง ณ จุดครากและความเค้นพลาโตมากตามไปด้วย แต่โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60 vol.% ในช่วงการอัดแน่นที่หลังจาก 50% ของความเครียด จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของความแข็งแรงจุดคราก และความเค้นพลาโตลดลงเมื่อปริมาณของ NaCl มากขึ้น

เมื่อเติมปริมาณของ NaCl มากขึ้นทำให้ช่วงการอัดแน่นเลื่อนจากขวาทางซ้ายมากขึ้น จะเห็นได้ในโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 70 และ 80 vol.% ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ข) และ (ค) เมื่อพิจารณาโฟมเงินที่ผสม NaCl ในปริมาณที่เท่ากัน จะเห็นว่าโฟมเงินที่ผสม NaCl ที่มีขนาดของอนุภาค NaCl เล็กประมาณ 39 μm พบว่าค่าความแข็งแรงจุดครากและความเค้นพลาโตลดลง แต่ในทางกลับกันค่าความแข็งแรงจุดครากและความเค้นพลาโตเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาค NaCl ใหญ่ขึ้น ทำให้สมบัติทางกลของโฟมลดลงเมื่อใช้ NaCl ที่มีขนาดเล็กสำหรับความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 80 vol.% ที่มีขนาดของอนุภาค NaCl เล็กประมาณ 39 μm พบว่าชิ้นงานเริ่มเกิดการพังตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟความเค้นและความเครียดในการเปรียบเทียบระหว่างขนาดของอนุภาค NaCl กับปริมาณในการผสม NaCl (ก) 60 vol.% (ข) 70 vol.% (ค) 80 vol.%

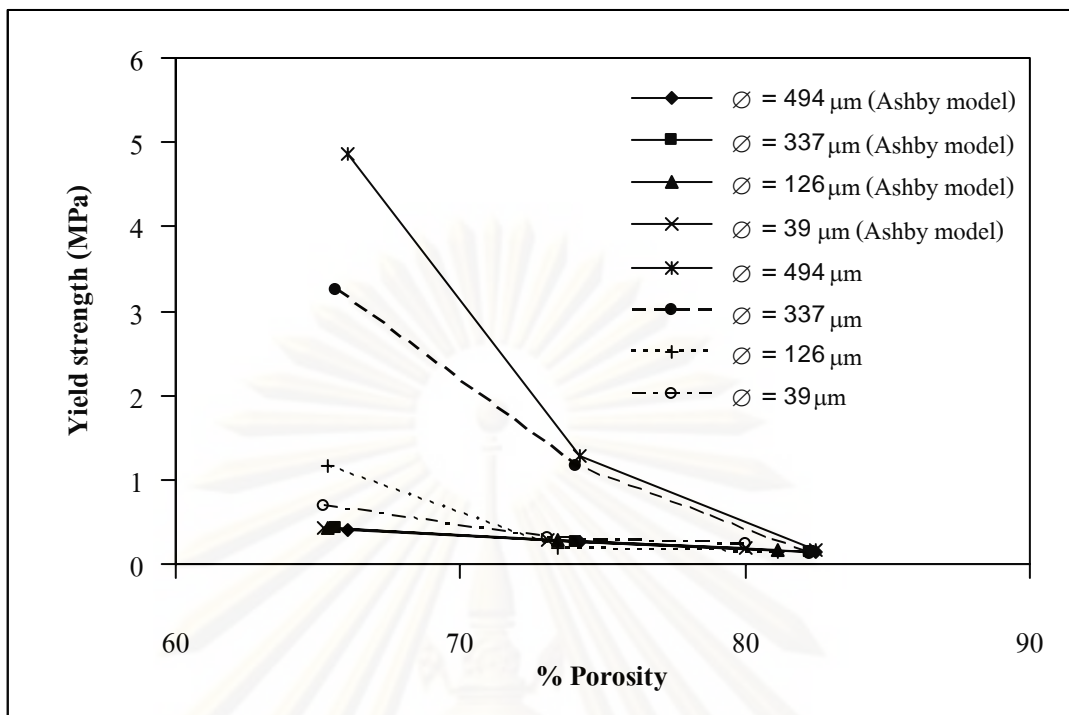


รูปที่ 4.8 ภาพขยายของกราฟความเค้นและความเครียดในการเปรียบเทียบระหว่างขนาดของอนุภาค NaCl กับปริมาณในการผสม NaCl (ก) 60 vol.% (ข) 70 vol.% และ (ค) 80 vol.%

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบความแข็งแรงจุดครากของโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% กับความแข็งแรงจุดครากของโพลีเมอร์จากการคำนวณในสมการที่ 2.7 ของ Ashby พบว่าความแข็งแรงจุดครากของโพลีเมอร์ที่ได้จากการทดลองเพิ่มขึ้นมากกว่าความแข็งแรงจุดครากของโพลีเมอร์ที่ได้จากการคำนวณในสมการของ Ashby เมื่อปริมาณรูพรุนลดลง ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด สำหรับโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl และมีขนาดอนุภาคของ NaCl เฉลี่ยประมาณ 494 μm มีความแข็งแรงจุดครากมากกว่าโพลีเมอร์ที่มีขนาดอนุภาคของ NaCl เฉลี่ยประมาณ 337, 126 และ 39 μm ตามลำดับ

ส่วนผสม		ความหนาแน่น (g/cm^3)	Yield strength (MPa)	Yield strength Ashby model (MPa)
Ag+NaCl ($\varnothing = 494 \mu\text{m}$)	60 vol.%	3.55	4.85	0.41
	70 vol.%	2.70	1.28	0.27
	80 vol.%	1.83	0.17	0.15
Ag+NaCl ($\varnothing = 337 \mu\text{m}$)	60 vol.%	3.60	3.24	0.42
	70 vol.%	2.72	1.16	0.27
	80 vol.%	1.86	0.13	0.15
Ag+NaCl ($\varnothing = 126 \mu\text{m}$)	60 vol.%	3.63	1.16	0.42
	70 vol.%	2.78	0.20	0.28
	80 vol.%	1.98	0.15	0.17
Ag+NaCl ($\varnothing = 39 \mu\text{m}$)	60 vol.%	3.65	0.68	0.43
	70 vol.%	2.82	0.31	0.29
	80 vol.%	2.09	0.24	0.18

ตารางที่ 4.3 สมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบการรับแรงอัดของโพลีเมอร์

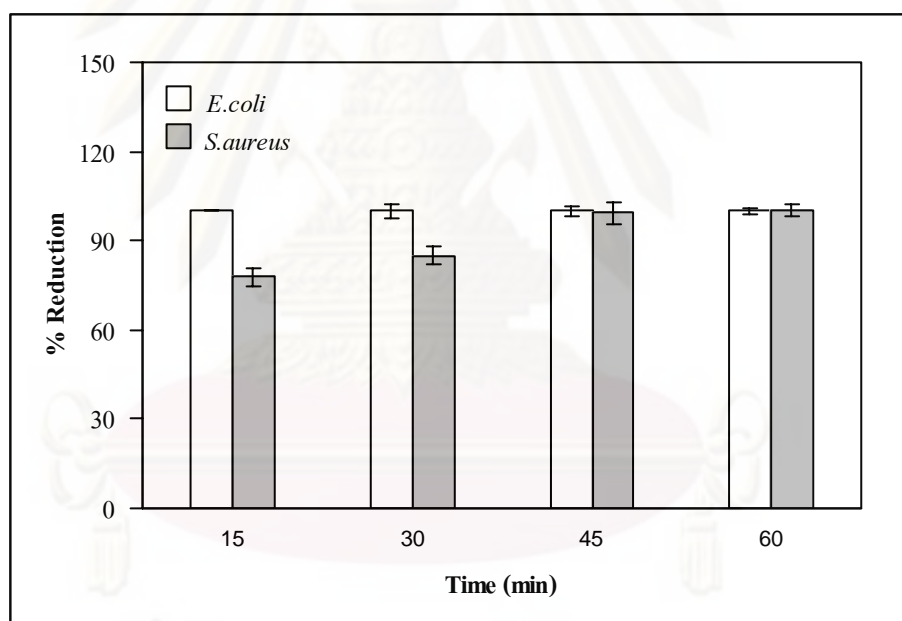


รูปที่ 4.9 ความแข็งแรงจุดครากของโฟมเงิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียหลังจากที่โพลีเมอร์สัมผัสเชื้อแบคทีเรียที่เวลาต่าง ๆ

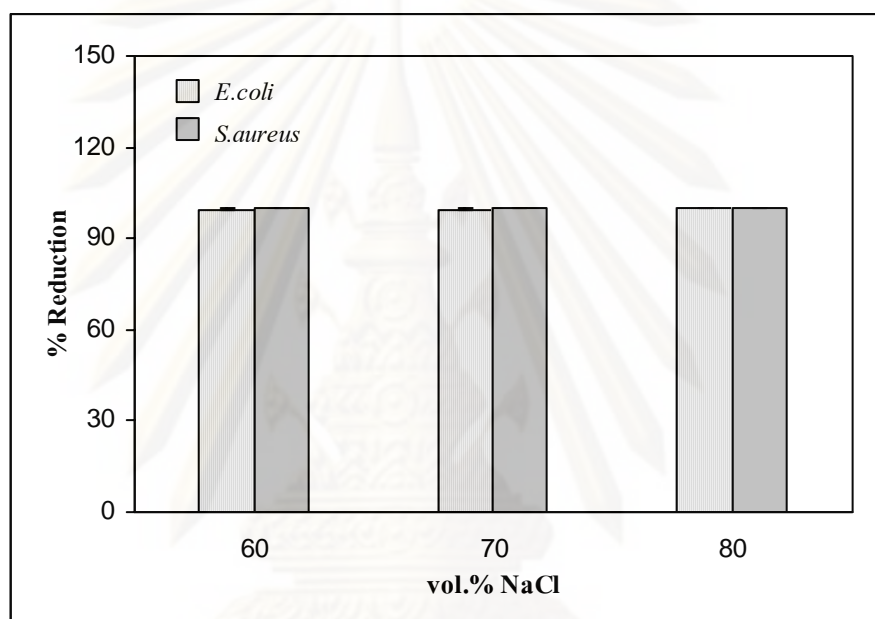
รูปที่ 4.10 แสดงการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ภายหลังจากที่โพลีเมอร์สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที ในโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 70 vol.% ซึ่งมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 494 μm และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าเมื่อเวลาที่โพลีเมอร์สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 และ 30 นาที โพลีเมอร์มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ได้มากกว่าเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* อย่างเห็นได้ชัด และการที่โพลีเมอร์สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 45 และ 60 นาที พบว่าโพลีเมอร์มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ได้ใกล้เคียงกับเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ดังนั้นเวลาที่โพลีเมอร์สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นทำให้โพลีเมอร์มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียทั้งสองเพิ่มขึ้นเกือบ 100% และลักษณะโคโลนีของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* สามารถดูได้ในภาคผนวก



รูปที่ 4.10 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ภายหลังจากที่โพลีเมอร์สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที ในโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 70 vol.% ซึ่งมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 494 μm และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

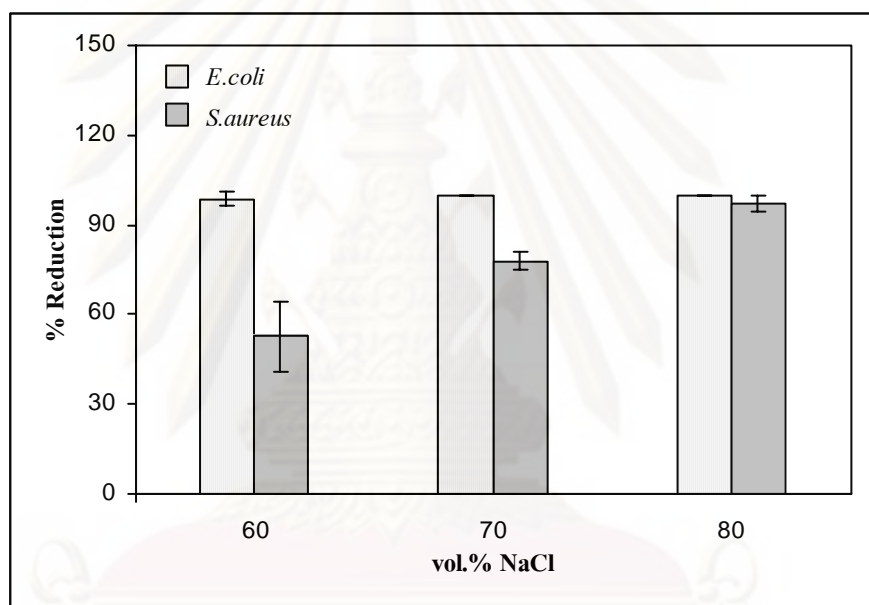
4.7 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย

รูปที่ 4.11 แสดงการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ภายหลังจากที่โฟมเงินสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% ซึ่งมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 447 μm และทำการบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าโฟมเงินที่มีปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* มีค่าใกล้เคียงกันเกือบ 100%



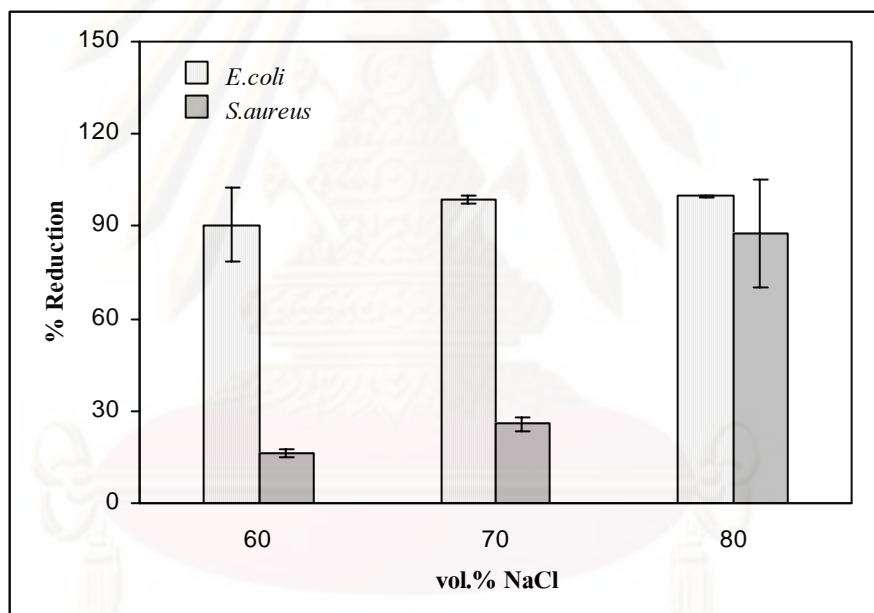
รูปที่ 4.11 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ภายหลังจากที่โฟมเงินสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% ซึ่งมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 447 μm และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

รูปที่ 4.12 แสดงการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ภายหลังจากที่โคมเงินสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โคมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% ซึ่งมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 494 μm ซึ่งผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนคัดขนาด +35 mesh และทำการบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าโคมเงินมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ดีกว่าเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* สำหรับโคมเงินที่มีปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ได้เกือบ 100% ในขณะเดียวกัน โคมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60 vol.% มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* น้อยกว่าโคมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 70 และ 80 vol.% อย่างเห็นได้ชัด



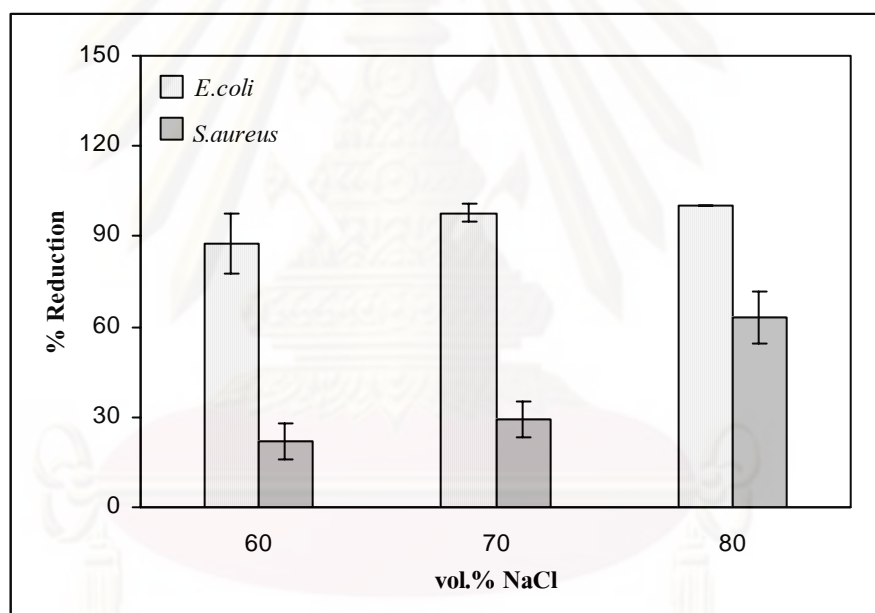
รูปที่ 4.12 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ภายหลังจากที่โคมเงินสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โคมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% ซึ่งมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 494 μm และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

รูปที่ 4.13 แสดงการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ภายหลังจากที่โพลีเมอร์สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% ซึ่งมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 337 μm ซึ่งผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนคัดขนาด 35 mesh และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าโพลีเมอร์มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ดีกว่าเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* สำหรับโพลีเมอร์ที่มีปริมาณของรูพรุนเพิ่มขึ้นมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ได้ใกล้เคียงกันเกือบ 100% ในขณะที่เดียวกันโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 60 vol.% มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* 16% ซึ่งน้อยกว่าโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 70 และ 80 vol.% แต่เมื่อเปรียบเทียบโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณต่างกันจะเห็นว่าโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 80 vol.% จะเห็นว่าโพลีเมอร์สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ได้ใกล้เคียงกันกับเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus*



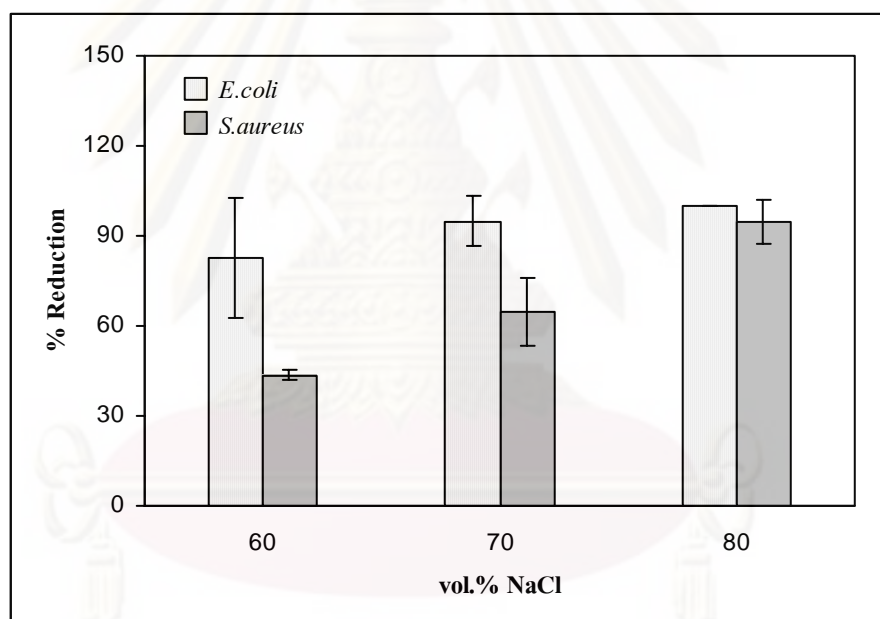
รูปที่ 4.13 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ภายหลังจากที่โพลีเมอร์สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% ซึ่งมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 337 μm และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

รูปที่ 4.14 แสดงการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ภายหลังจากที่โฟมเงินสัมผัสเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% ซึ่งมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 126 μm ซึ่งผ่านการคัดขนาดด้วย ตะแกรงร่อนคัดขนาด 100 mesh และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า โฟมเงินมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ดีกว่าเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* อย่างเห็นได้ชัด สำหรับโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60 vol.% มีประสิทธิภาพ ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ได้น้อยกว่าโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 70 และ 80 vol.% ตามลำดับ และโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60 vol.% มีประสิทธิภาพในการยับยั้ง การเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ได้ 22% น้อยกว่าโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 70 และ 80 vol.% ที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ได้ 29% และ 63% ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ภายหลังจากที่โฟมเงิน สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% ซึ่งมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 126 μm และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

รูปที่ 4.15 แสดงการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ภายหลังจากที่โพลีเมอร์สัมผัสเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% ซึ่งมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 39 μm ซึ่งผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนคัดขนาด 325 mesh และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าโพลีเมอร์มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ดีกว่าเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* สำหรับโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 60 vol.% มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ได้ 83% แต่สามารถยับยั้งได้น้อยกว่าโพลีเมอร์ที่มีปริมาณอนุภาคเพิ่มขึ้นที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ได้เกือบ 100% และโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 60 vol.% มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ได้ 44% และสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ได้เพิ่มขึ้นเมื่อโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 70 และ 80 vol.% ตามลำดับ



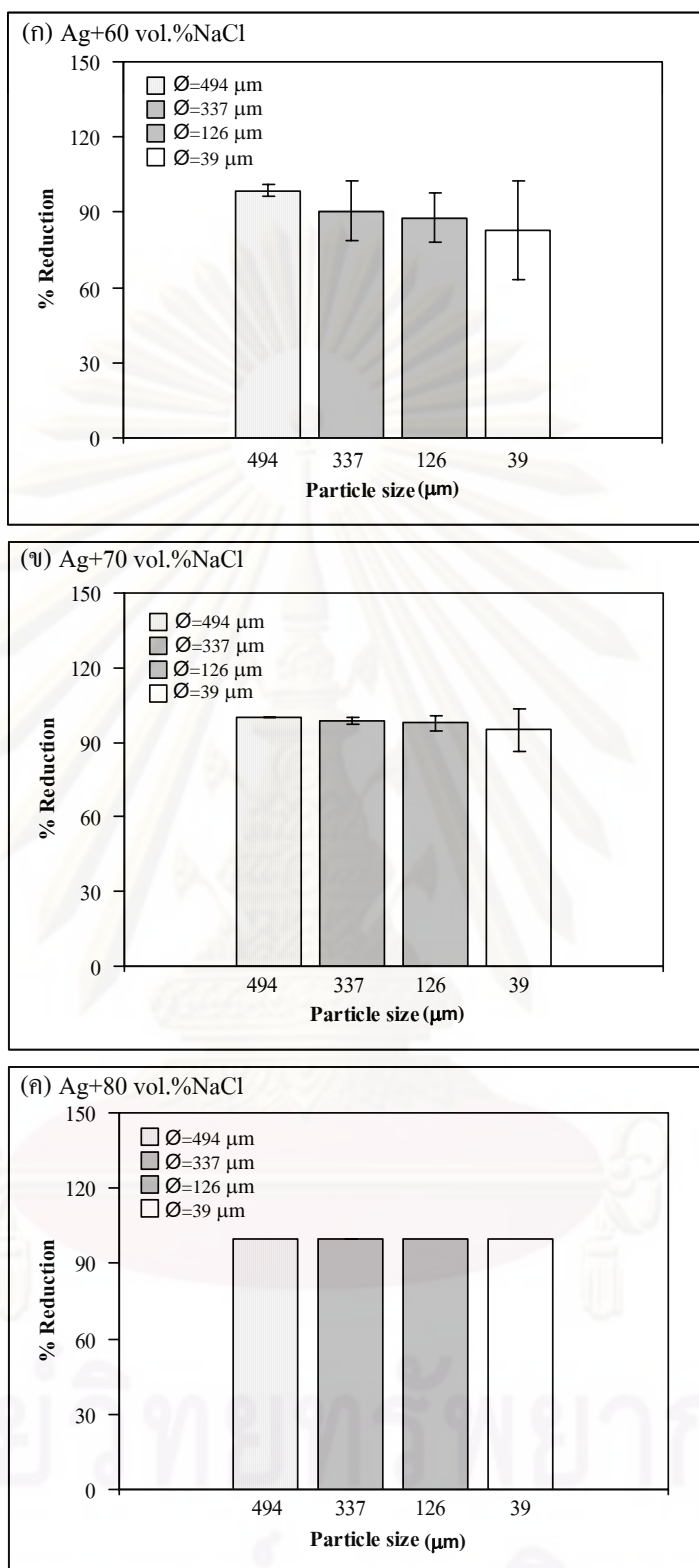
รูปที่ 4.15 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ภายหลังจากที่โพลีเมอร์สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% ซึ่งมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 39 μm และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.16 แสดงการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ภายหลังจากที่โพนเงินสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โพนเงินที่ผสม NaCl ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาค NaCl ต่าง ๆ และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในรูปที่ 4.13 (ก) พบว่าโพนเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60 vol.% มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ลดลงเมื่อขนาดของอนุภาค NaCl เล็กลง ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ลดลงจาก 99% ไปจนถึง 83% ในรูปที่ 4.13 (ข) พบว่าโพนเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 70 vol.% มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ลดลงเช่นเดียวกันแต่ต่างกันไม่มากเมื่อขนาดของอนุภาค NaCl เล็กลง ส่วนรูปที่ 4.13 (ค) พบว่าโพนเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 80 vol.% มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ใกล้เคียงกันเกือบ 100% เมื่อขนาดของอนุภาค NaCl เล็กลง

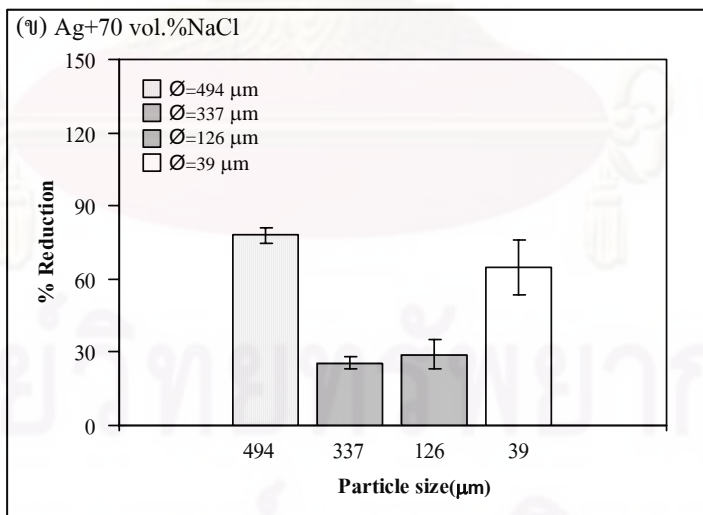
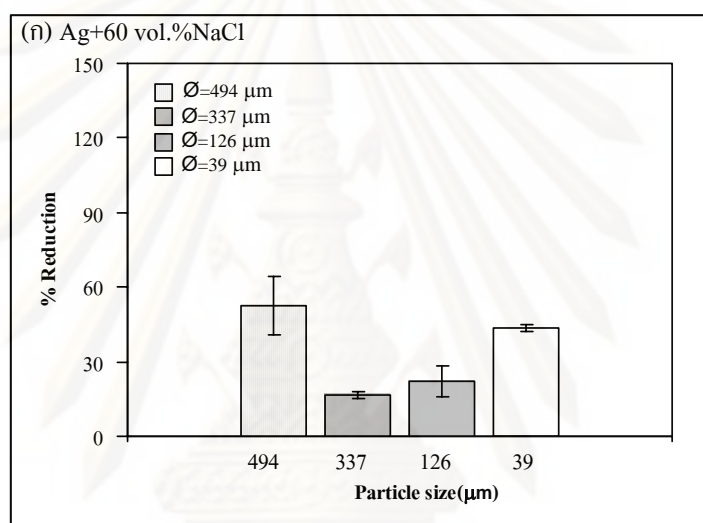


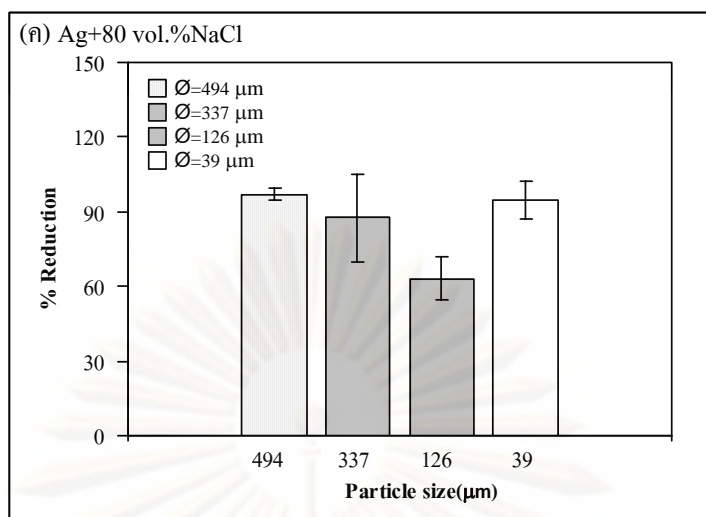
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.16 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ภายหลังจากที่โพลีเมอริสสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โพลีเมอริสที่ผสม NaCl ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาค NaCl ต่าง ๆ ที่ผสม NaCl ปริมาณ (ก) 60 vol.% (ข) 70 vol.% และ (ค) 80 vol.% และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

รูปที่ 4.17 แสดงการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ภายหลังจากที่ โฟมเงินสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โฟมเงินที่ผสม NaCl ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาค NaCl ต่าง ๆ และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าโฟมเงินที่ผสม NaCl ที่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาค NaCl ต่าง ๆ มีการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ที่ไม่เป็นแนวโน้มนัยเดียวกันในโฟมเงินที่ผสม NaCl ที่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคจากขนาดใหญ่ไปจนถึงขนาดเล็ก แต่โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณเพิ่มขึ้นสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* เพิ่มขึ้น

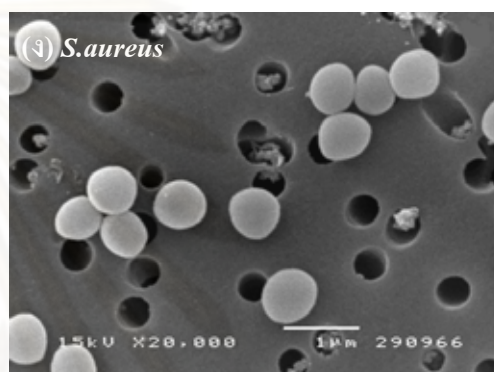
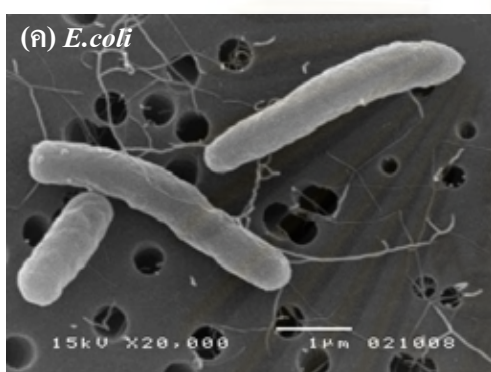
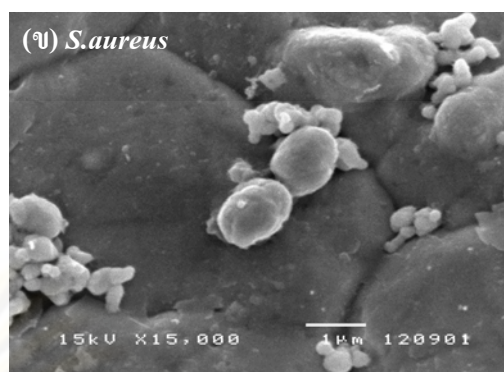
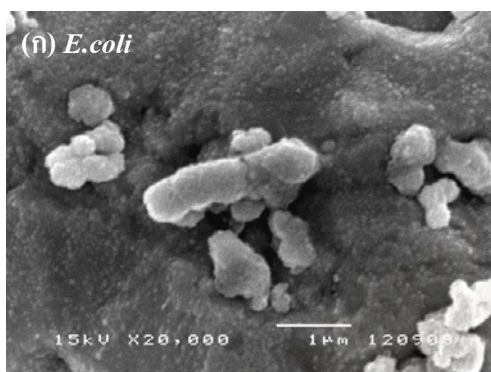




รูปที่ 4.17 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ภายหลังจากที่โพลีเมอร์สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาค NaCl ต่าง ๆ ที่ผสม NaCl ปริมาณ (ก) 60 vol.% (ข) 70 vol.% และ (ค) 80 vol.% และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4.8 ลักษณะของเชื้อแบคทีเรียบนชิ้นงาน

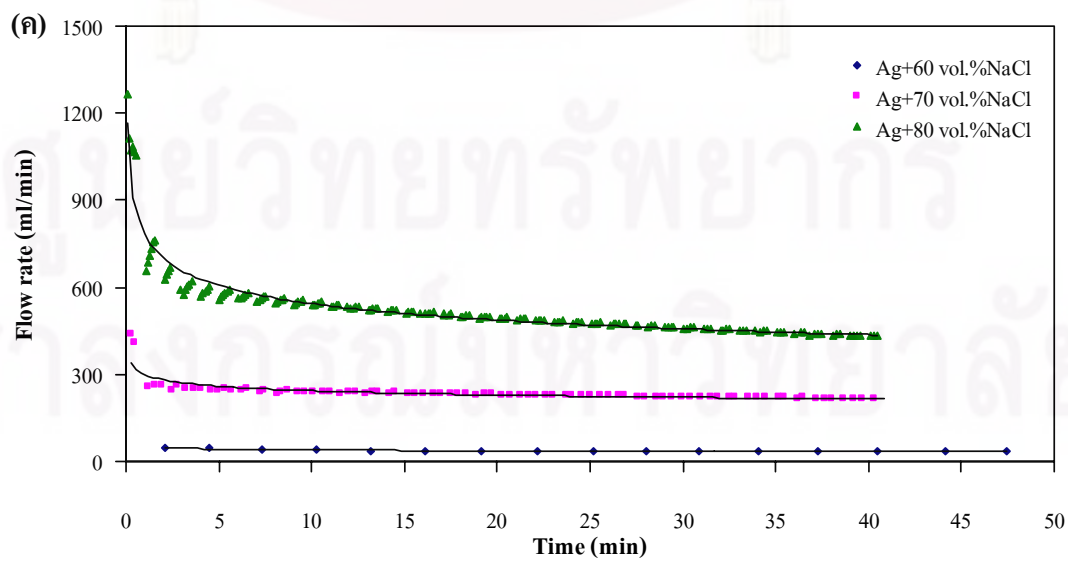
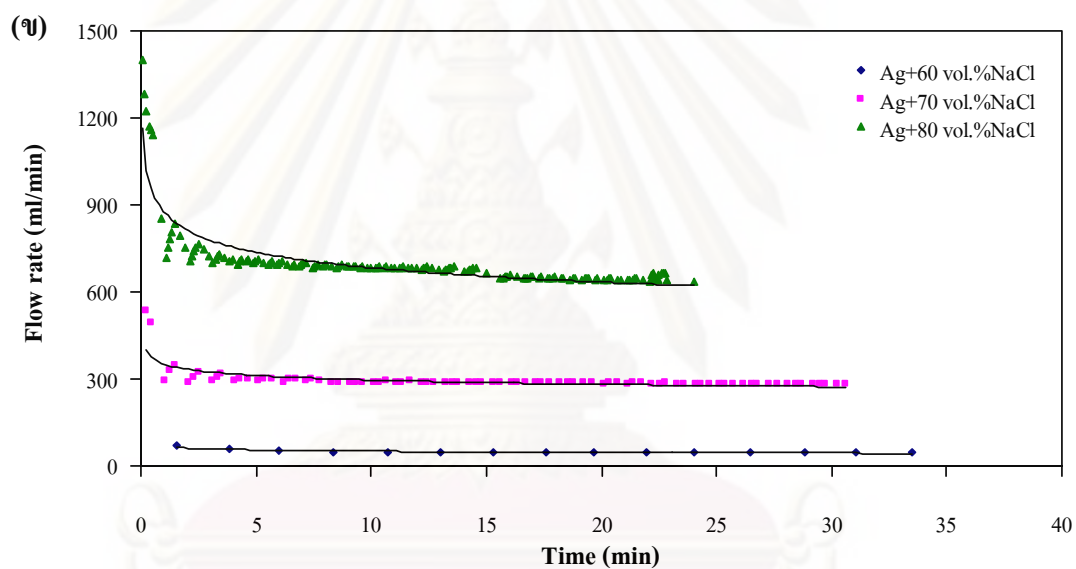
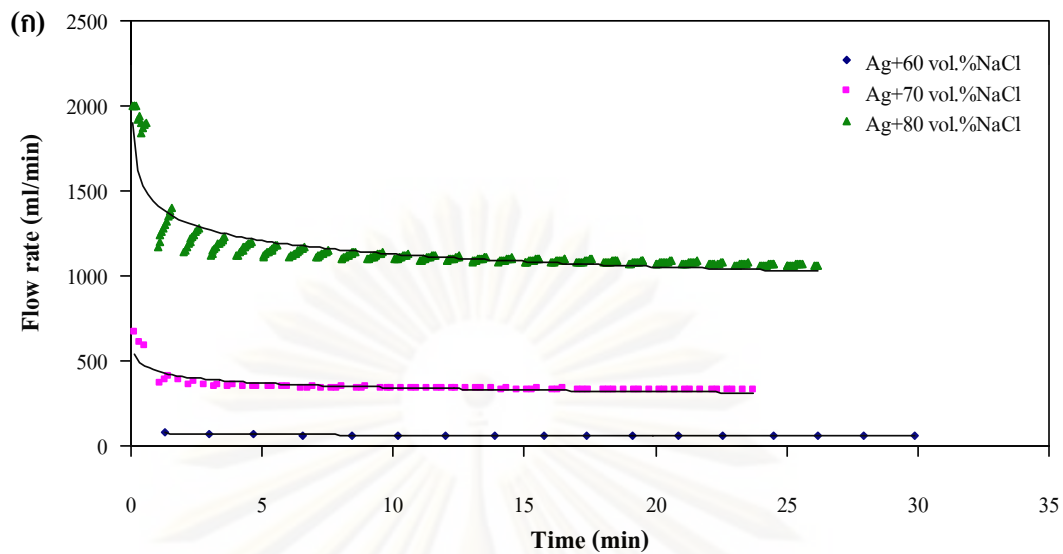
ลักษณะของเชื้อแบคทีเรียบนโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 80 vol.% ซึ่งมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 494 μm จากรูปที่ 4.18 (ก) แสดงลักษณะของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบมีลักษณะเป็นรูปท่อน (Rod shape) สามารถเคลื่อนที่ได้ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวเดี่ยว ๆ และเกาะอยู่บนผิวของโพลีเมอร์ แบคทีเรียชนิดนี้สามารถพบได้ในลำไส้ของคนและสัตว์ [17] จากรูปจะเห็นได้ว่าขนาดของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* มีขนาดมากกว่า 1 μm เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ในรูปที่ 4.18 (ค) ที่ไม่ได้ผ่านการสัมผัสกับโพลีเมอร์ พบว่าแบคทีเรียเปลี่ยนรูปร่างเล็กลงหลังจากที่ผ่านการสัมผัสกับโพลีเมอร์ แสดงว่าโพลีเมอร์สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *E.coli* ได้ รูปที่ 4.18 (ข) แสดงลักษณะของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวกมีลักษณะเป็นทรงกลม (Cocci shape) ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวเป็นกลุ่มคล้ายพวงอุ้งนอยู่บนผิวของโพลีเมอร์ แบคทีเรียชนิดนี้สามารถพบได้ในตามผิวหนังและส่วนต่างๆ ของร่างกาย [17] จากรูป 4.18 (ข) จะเห็นได้ว่าขนาดของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* หลังจากสัมผัสกับโพลีเมอร์มีขนาดใกล้เคียงกับเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ในรูปที่ 4.18 (ง) ที่ไม่ได้ผ่านการสัมผัสกับโพลีเมอร์

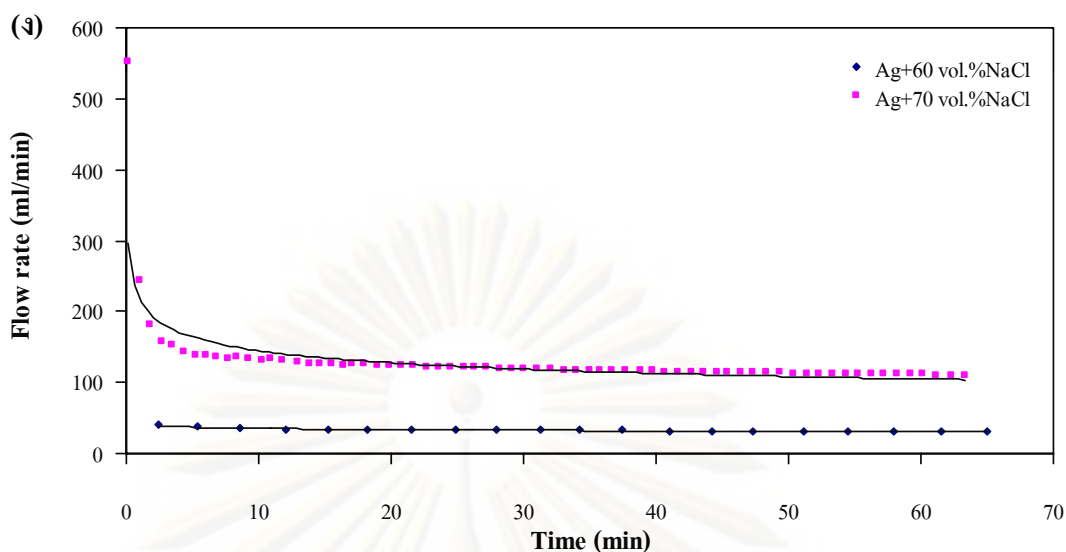


รูปที่ 4.18 ลักษณะของเชื้อแบคทีเรียบนชิ้นงาน ภายหลังจากที่ชิ้นงานสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 80 vol.% ซึ่งมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 494 μm (ก) *E.coli* (ข) *S.aureus* และ (ค) *E.coli* (ง) *S.aureus* ที่ไม่ได้ผ่านการสัมผัสกับโฟมเงิน

4.9 อัตราการไหลของโฟมเงิน

จากรูปที่ 4.19 แสดงอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% และมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 494, 337, 126 และ 39 μm พบว่ารูปที่ 4.17 (ก) ถึง (ง) มีแนวโน้มที่เหมือนกัน คือ โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 80 vol.% มีอัตราการไหลมากกว่าโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 70 และ 60 vol.% ตามลำดับ และโฟมเงินที่ผสม NaCl ที่มีขนาดของอนุภาค NaCl ใหญ่มีอัตราการไหลมากกว่าโฟมเงินที่ผสม NaCl ที่มีขนาดของอนุภาค NaCl เล็ก สำหรับโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60 vol.% มีอัตราการไหลที่คงที่ตลอดเมื่อเวลาผ่านไปเป็นเวลานาน แต่โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 70 และ 80 vol.% พบว่าในช่วงแรกมีอัตราการไหลเร็วมาก และหลังจากนั้นก็เริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ ดังนั้นอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านโฟมเงินค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของรูพรุนเพิ่มขึ้น



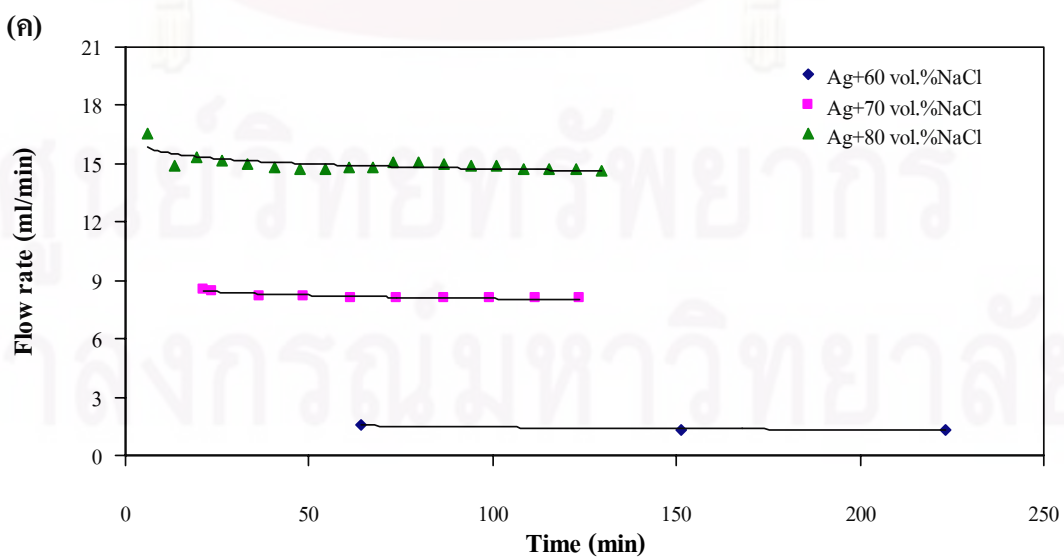
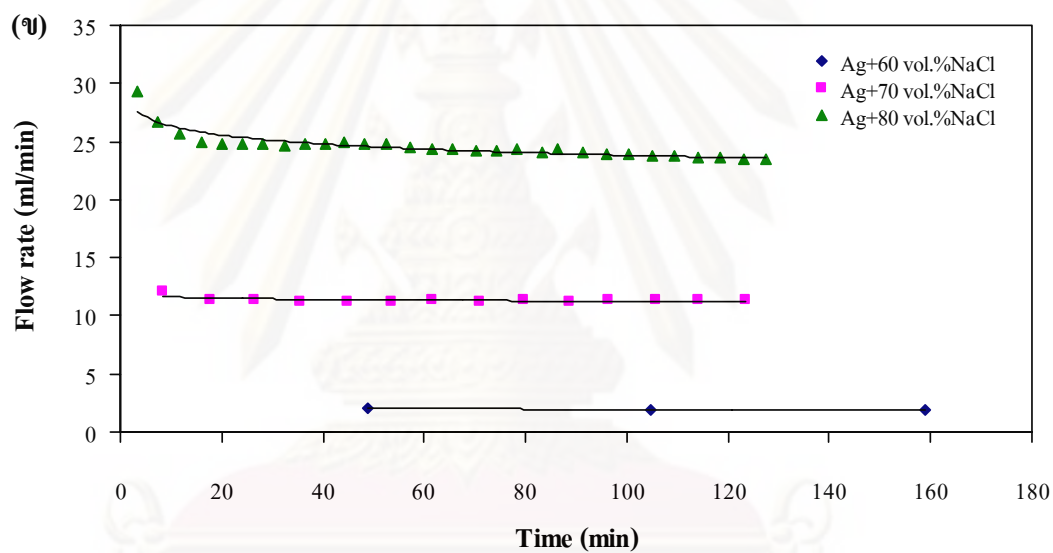
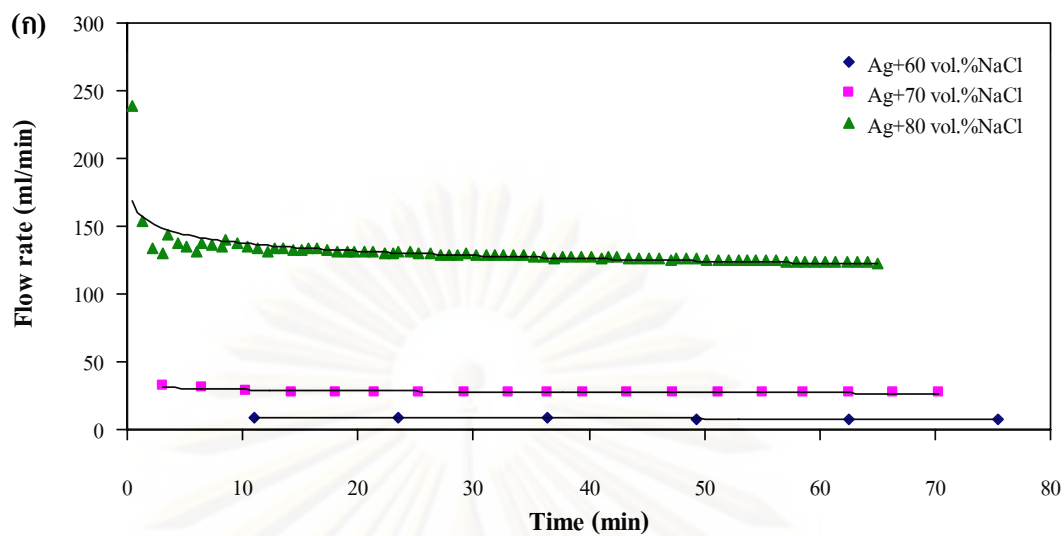


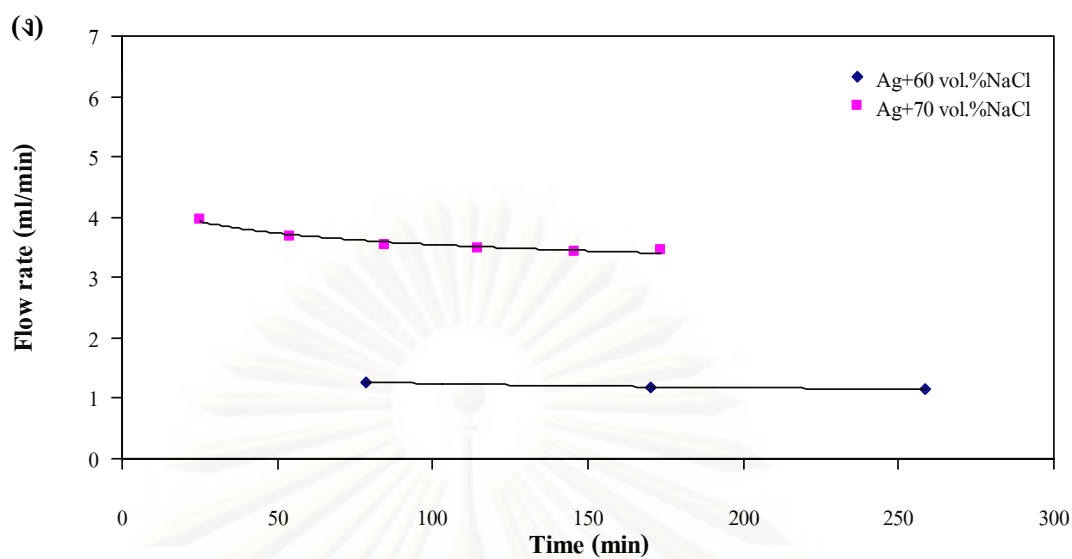
รูปที่ 4.19 การวัดอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% และมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ (ก) 494 μm (ข) 337 μm (ค) 126 μm และ (ง) 39 μm

จากรูปที่ 4.20 แสดงอัตราการไหลของน้ำมันถั่วเหลืองที่ไหลผ่านโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% และมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 494, 337, 126 และ 39 μm พบว่ารูปที่ 4.20 (ก) ถึง (ง) มีแนวโน้มที่เหมือนกัน คือโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 80 vol.% มีอัตราการไหลมากกว่าโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 70 และ 60 vol.% ตามลำดับ และโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ที่มีขนาดของอนุภาค NaCl ใหญ่มีอัตราการไหลมากกว่าโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ที่มีขนาดของอนุภาค NaCl เล็ก สำหรับโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 60 และ 70 vol.% มีอัตราการไหลที่ค่อนข้างคงที่จนกระทั่งเวลาผ่านไปเป็นเวลานานๆ แต่โพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 80 vol.% พบว่าในช่วงแรกมีอัตราการไหลเร็วและอัตราการไหลค่อยๆ ลดลงจนเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ เมื่อผ่านไปเป็นเวลานานๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 4.20 การวัดอัตราการไหลของน้ำมันถั่วเหลืองที่ไหลผ่าน โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% และมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ (ก) 494 μm (ข) 337 μm (ค) 126 μm และ (ง) 39 μm

บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 ผลของปริมาณ NaCl ต่อโครงสร้างของโฟมเงิน

ผงเงินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากกระบวนการทางเคมีที่ใช้ซิลเวอร์ไนเตรตที่ผ่านกระบวนการกลีเซอรอล ทำให้สามารถผลิตผงเงินที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.9% และนำ NaCl ในรูปที่ 4.1 (ข) มาใช้เป็นตัวสร้างโครงอากาศโดยมีการคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนเป็น 4 ขนาด ได้แก่ 494, 337, 126 และ 39 μm จากการตรวจสอบผลของปริมาณ NaCl ต่อโครงสร้างของโฟมเงิน ในรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อโฟมเงินผสมกับ NaCl ที่ปริมาณ 80 vol.% สำหรับขนาดของ NaCl เดียวกัน ทำให้โฟมเงินมีปริมาณรูพรุนมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมที่ผสม NaCl ในปริมาณ 60 และ 70 vol.% โดยปริมาณรูพรุนในโฟมเงินจะน้อยที่สุดเมื่อใช้ NaCl ที่ 60 vol.% การที่โฟมมีปริมาณรูพรุนมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับปริมาณของ NaCl ที่ใช้ เนื่องจาก NaCl นั้นเป็นตัวสร้างโครงอากาศภายในโฟม เมื่อกำจัด NaCl ออกจากโฟมก็จะได้รูพรุนที่มีขนาดและปริมาณใกล้เคียงกับขนาดและปริมาณของ NaCl ที่ใช้ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการวัดปริมาณรูพรุนในรูปที่ 4.4 จะพบว่าปริมาณรูพรุนจริงที่วัดได้ในโฟมเงินมีค่ามากกว่าปริมาณ NaCl ที่ใช้เล็กน้อยทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อทำการอัดขึ้นรูปชิ้นงานของผงเงินและ NaCl จะเกิดช่องว่างขนาดเล็ก (Voids) ตามรอยต่อระหว่างผงและช่องว่างเหล่านี้ก็ไม่ได้หายไปหมดภายหลังจากการอบให้ความร้อนแก่โฟมเงินในระหว่างการผลิต นอกจากนี้ด้วยลักษณะของผงเงินที่ผลิตได้ซึ่งมีขนาดเล็กมาก และมักเกาะกันเป็นกลุ่มทำให้มีลักษณะคล้ายฟองน้ำที่มีช่องว่างขนาดเล็กระหว่างผงเงินอยู่ เมื่อทำการอัดขึ้นรูปและแม้กระทั่งภายหลังจากการอบให้ความร้อนช่องว่างเหล่านี้ก็ยังคงหลงเหลืออยู่ ซึ่งส่งผลต่อปริมาณรูพรุนโดยรวมของชิ้นงาน

นอกจากนี้จากผลการทดลองในรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าโฟมเงินที่ผสม NaCl ในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้โฟมเงินมีการเชื่อมต่อกันของโครงอากาศมากกว่าโฟมเงินที่ผสม NaCl ในปริมาณที่น้อยกว่า เนื่องจากการที่ผสม NaCl ในปริมาณมากจะทำให้โฟมมีปริมาณของเนื้อพื้นโลหะลดลง ดังนั้นโฟมจึงมีปริมาณรูพรุนมาก และยังส่งผลต่อการกระจายตัวของโครงอากาศในโฟมด้วย จะเห็นว่าโฟมเงินที่ผสม NaCl ที่มีปริมาณต่างกันแต่มีขนาดของอนุภาค NaCl เท่ากันจะมีรูพรุนที่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงานและมีการกระจายตัวของโครงอากาศในโฟมเงินที่สม่ำเสมอเนื่องจากความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของเงิน (10.47 g/cm^3) และ NaCl (2.17 g/cm^3) มีมากกว่ารวมทั้งขนาดของผงเงินและ NaCl ก็แตกต่างกันมาก จึงมีโอกาสที่อนุภาคจะเกิดการแยกตัวกันในระหว่างการผสมผง ทำให้การกระจายตัวของ NaCl ในผงเงินมีโอกาสที่จะไม่สม่ำเสมอก่อให้เกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาคขึ้นได้ ดังนั้นการใช้ NaCl ในปริมาณที่มาก อย่างเช่น 80 vol.% จึงทำ

ให้ NaCl มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมากกว่าการใช้ NaCl ในปริมาณน้อยกว่า ทำให้เกิดรูพรุนที่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน อย่างไรก็ตามการใช้ปริมาณ NaCl ที่มากขึ้นก็ส่งผลต่อความแข็งแรงของโฟม ทำให้โฟมมีโอกาสเกิดการพังตัวได้มากในระหว่างการละลาย NaCl ออกจากโฟม

5.2 ผลของขนาด NaCl ต่อโครงสร้างของโฟมเงิน

ขนาดของอนุภาค NaCl ที่ผ่านการคัดขนาด ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าผงเงินที่ผลิตได้มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 21 μm และโฟมเงินที่ผสมอนุภาค NaCl ปริมาณเท่ากันแต่ผสม NaCl ขนาดใหญ่มีการเชื่อมติดกันของรูพรุนลดลงมากกว่า โฟมเงินที่ผสมอนุภาค NaCl ขนาดเล็ก เนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาคขนาดใหญ่จะไม่ดีเท่ากับการกระจายตัวของ NaCl ขนาดเล็ก เพราะความแตกต่างของขนาดของผงเงินและ NaCl ที่มีมากขึ้น ทำให้โอกาสที่จะเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเป็นไปได้ยากขึ้น ดังนั้นโอกาสที่จะเกิดการเชื่อมติดกันของรูพรุนจึงน้อยกว่า [7]

นอกจากนี้การใช้ NaCl ที่มีขนาดใหญ่ในปริมาณที่น้อย อย่างเช่นที่ 60 vol.% อาจทำให้เกิดปัญหาการตกค้างของ NaCl ในโฟมได้หลังจากการทำละลาย NaCl ในน้ำร้อน ทั้งนี้เป็นเพราะการเชื่อมติดกันของรูพรุนที่ลดลง จึงทำให้ NaCl มีโอกาสแยกตัวออกจากกันและถูกขังไว้ในโครงสร้างของชิ้นงานอัดขึ้นรูป ทำให้ตัวทำละลายไม่สามารถไหลเข้าไปทำละลาย NaCl ได้ การมี NaCl ตกค้างในโฟมในปริมาณมากอาจส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของโฟม เนื่องจาก NaCl อาจรวมตัวกับหมู่ Hydrogen จากความชื้นในอากาศหรือจากของเหลวกลายเป็นกรด HCl และกัดกร่อนโฟมเงินในภายหลัง

5.3 ความแข็งแรงของโฟม

ความแข็งแรงของโฟมเงินที่ผสม NaCl ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.6 (ก) ถึง (ค) พบว่าโฟมเงินที่ผสม NaCl ในปริมาณ 60 vol.% มีความแข็งแรงของโครงสร้างมากกว่าโฟมเงินที่ผสม NaCl ที่มีปริมาณ 70 และ 80 vol.% เนื่องจากโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณน้อยทำให้โฟมเงินมีปริมาณรูพรุนน้อย ดังนั้นจึงมีเนื้อพื้นของโลหะมากซึ่งเนื้อพื้นของโลหะจะเป็นส่วนที่รับแรงกระทำ ดังนั้นการที่มีปริมาณเนื้อพื้นโลหะมากจึงสามารถรับแรงอัดได้มากกว่า โฟมเงินที่มีความหนาแน่นสูงจะมีความเค้นพลาโตมากกว่าโฟมเงินที่มีความหนาแน่นต่ำ เพราะโฟมเงินมีปริมาณรูพรุนมากส่งผลให้โฟมเงินมีปริมาณเนื้อโลหะลดลง เมื่อนำโฟมเงินที่มีความหนาแน่นสูงไปทดสอบการรับแรงอัดส่งผลให้โพรงอากาศเกิดการยุบตัวและเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกได้ยากกว่าโฟมเงินที่มีปริมาณรูพรุนมาก เมื่อเปรียบเทียบโฟมเงินที่มีปริมาณของ NaCl เท่ากันพบว่าโฟมเงินที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่ทำให้ค่าความแข็งแรงจุดครากและความเค้นพลาโตมากกว่าโฟมเงินที่มีโพรงอากาศขนาดเล็ก เนื่องจากโฟมเงินที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่มีการเชื่อมต่อกันของเนื้อโลหะที่

มากกว่าส่งผลให้ผนังของโพรงอากาศหนาเพิ่มขึ้น ทำให้โฟมเงินเมื่อได้รับแรงอัดแล้วเกิดความเค้นที่เนื้อโลหะในบริเวณของการเชื่อมต่อกันของเนื้อโลหะ จึงทำให้โฟมเงินสามารถรับแรงอัดได้มากขึ้น เมื่อเทียบกับโฟมเงินที่มีโพรงอากาศขนาดเล็กพบว่าโพรงอากาศน้อย ซึ่งสามารถดูได้ในรูปที่ 4.3 ในการทดสอบการรับแรงอัดทำให้เกิดความเค้นและความเครียดขึ้นในชิ้นงานทดสอบ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ชิ้นงานถูกกดด้วยแรงอัดอย่างช้าๆ ในแนวแกนของแรงอัด โดยขนาดแรงอัดและพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นจะเปลี่ยนไปในการทดสอบ ดังสมการที่ 5.1

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (5.1)$$

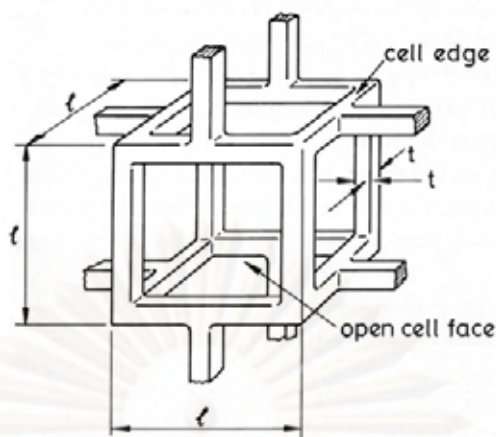
โดยที่ σ คือ ความเค้น
 F คือ แรงอัด
 A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน

สำหรับลักษณะของโพรงอากาศในโฟมเงินที่ผสม NaCl นั้นมีโพรงอากาศที่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) พบว่าโฟมเงินที่ผสม NaCl ขนาดใหญ่สามารถรับแรงอัด และมีค่าความแข็งแรงจุดครากเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ช่วงการอัดแน่นของโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60 vol.% (ทุกขนาด) เริ่มเข้าสู่ช่วงของการอัดแน่นหลังจาก 50% ของความเครียด สำหรับช่วงการอัดแน่นของโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 70 และ 80 vol.% เริ่มเข้าสู่ช่วงของการอัดแน่นประมาณ 43% และ 30% ของความเครียด ตามลำดับ จะเห็นว่าการที่โฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณมาก ทำให้ช่วงของการอัดแน่นย้ายมาทางซ้ายมากขึ้น เนื่องจากโฟมเงินมีปริมาณรูพรุนมากทำให้มีความหนาแน่นลดลง ส่งผลให้เกิดการเชื่อมต่อกันของเนื้อพื้นโลหะลดลง จึงทำให้ช่วงการอัดแน่นเปลี่ยนแปลงไป และการเปลี่ยนรูปในช่วงการอัดแน่นนั้นความเค้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้น โพรงอากาศที่เปลี่ยนรูปแบบพลาสติกจะส่งผลให้โพรงอากาศข้างเคียงรับแรงได้น้อยลงนำไปสู่การพังของโพรงอากาศข้างเคียงได้ [2] ทำให้การรับแรงอัดของโฟมเงินลดลงด้วย

ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับพลังงานนั้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและขนาดของโพรงอากาศในโฟมเงิน จะเห็นว่าโฟมเงินที่มีความหนาแน่นมากจะมีการดูดซับพลังงานมากกว่าโฟมเงินที่มีความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากโฟมเงินที่มีความหนาแน่นมากส่งผลให้โฟมเงินมีปริมาณรูพรุนน้อย ดังนั้นจึงมีการดูดซับพลังงานมาก สำหรับโฟมเงินที่มีขนาดของโพรงอากาศเล็กมีการดูดซับพลังงานมากกว่าโฟมเงินที่มีขนาดของโพรงอากาศใหญ่ เนื่องจากโฟมเงินที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่มีการเชื่อมต่อกันของเนื้อโลหะที่แข็งแรงมากกว่า ทำให้การรับแรงของผนังโพรงอากาศเกิดการยุบตัวจึงเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกได้ช้า และทำให้การดูดซับพลังงานมากตามไปด้วย สำหรับการกระจายตัวของโพรงอากาศ รูปร่างของโพรงอากาศและทิศทางของโพรงอากาศ

นั่นมีผลต่อการดูดซับพลังงานเล็กน้อย จะเห็นว่าโพลีเมอร์ที่มีการกระจายตัวของโพรงอากาศสม่ำเสมอทำให้การดูดซับพลังงานสูงขึ้น เพราะการกระจายตัวของโพรงอากาศที่สม่ำเสมอส่งผลให้การแทรกตัวในเนื้อพื้นโลหะมีความสม่ำเสมอและมีความแข็งแรงจากเนื้อพื้นโลหะด้วย การดูดซับพลังงานของโพลีเมอร์สามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของกราฟความเค้นและความเครียดในรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณน้อยมีเส้นกราฟทั้งหมดสูงกว่าโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณมาก เนื่องจากโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณน้อยนั้นมีปริมาณรูพรุนน้อยทำให้โพลีเมอร์มีความหนาแน่นมาก และส่งผลให้โพลีเมอร์มีเนื้อพื้นโลหะมาก เมื่อนำไปรับแรงอัดจึงสามารถรับการกระจายของแรงก่อนเกิดการเปลี่ยนรูปได้ดี และเมื่อเปรียบเทียบกับโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณที่เท่ากัน พบว่าโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ขนาดใหญ่มีเส้นกราฟทั้งหมดสูงกว่าโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ขนาดเล็ก เนื่องจากโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ขนาดใหญ่ทำให้เนื้อพื้นของโลหะเชื่อมต่อกันมากกว่าโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ขนาดเล็ก จึงมีผนังของโพรงอากาศหนาส่งผลให้โพลีเมอร์มีความแข็งแรงจากเนื้อพื้นโลหะสูง เมื่อนำไปทดสอบการรับแรงอัดค่าความแข็งแรงอัดและความสามารถในการดูดซับพลังงานที่ได้สูงขึ้น สำหรับโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณ 80 vol.% และมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 39 μm พบว่าโพลีเมอร์เกิดการพังตัวได้ง่าย เนื่องจากปริมาณของเนื้อพื้นโลหะน้อยเกินไป ทำให้การเชื่อมติดกันของเนื้อพื้นโลหะลดลง และตัวสร้างโพรงอากาศมีขนาดเล็กและเกิดโพรงอากาศจำนวนมาก ส่งผลให้เนื้อพื้นโลหะไม่แข็งแรงพอที่จะรับแรงอัดได้ดีและความสามารถในการดูดซับพลังงานไม่ดีด้วย

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าเมื่อโพลีเมอร์มีปริมาณรูพรุนลดลงทำให้ความแข็งแรงจุดครากของโพลีเมอร์ที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ 2.4 ของ Ashby เพราะค่าที่ได้จากการคำนวณเป็นค่าทางทฤษฎีและจากการหาค่าคงที่ (C) ที่ใช้ในการคำนวณพบว่าค่า C ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่า C ที่นิยมใช้ในสมการของ Ashby ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.3 (สามารถดูการหาค่า C ได้ในภาคผนวก) ซึ่งสมการนี้ใช้แบบจำลองรูปร่างของโพรงอากาศที่มีลักษณะเป็นแบบลูกบาศก์ (Cubic) ดังรูปที่ 5.1 เมื่อเนื้อพื้นของโลหะยึดติดกันทำให้ได้โพรงอากาศที่มีลักษณะสมมาตรกันทุกโพรงอากาศ สำหรับของโพรงอากาศที่ใช้ในการทดลองจริงมีรูปร่างเป็นพีระมิดคู่สี่เหลี่ยมส่งผลให้โพรงอากาศแต่ละโพรงเชื่อมติดกันได้มากขึ้นทำให้ปริมาณเนื้อโลหะในโครงสร้างเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โพลีเมอร์มีความแข็งแรงสูงขึ้น ดังนั้นค่าความแข็งแรงจุดครากของโพลีเมอร์ที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 5.1 แสดงรูปร่างของโพรงอากาศในแบบจำลองสำหรับโฟมที่มีโครงสร้างแบบเปิด [25]

5.4 ความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย

ประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* ในโฟมเงินหลังจากที่โฟมเงินสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในรูปที่ 4.8 พบว่าโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 60, 70 และ 80 vol.% และมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 447 μm มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* ใกล้เคียงกันเกือบ 100% เนื่องจากระยะเวลาในการสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียของโฟมเงินเป็นเวลา 24 ชั่วโมงนั้น ทำให้ Ag ไอออนปล่อยประจุบวกออกมาจากผิวของโฟมเงินและไปเกาะที่ผนังเซลล์ของเชื้อแบคทีเรียได้มาก จึงสามารถแทรกเข้าไปภายในเชื้อแบคทีเรียทำลายผนังเซลล์ของเชื้อแบคทีเรียและตายในที่สุด [14] สำหรับระยะเวลาของการสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียของโฟมเงินที่นานขึ้นส่งผลให้ Ag ไอออนเกิดการแทรกตัวเข้าไปทำลายผนังเซลล์ของเชื้อแบคทีเรียได้มากขึ้น

เมื่อทำการลดเวลาในการสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* ของโฟมเงินเป็นเวลา 15 นาที ในรูปที่ 4.9 ถึง 4.16 พบว่าประสิทธิภาพของโฟมเงินในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ดีกว่าเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และการที่โฟมเงินมีปริมาณของเงินน้อยทำให้การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ดีกว่า เนื่องจากเมื่อปริมาณของเงินลดลงทำให้ปริมาณรูพรุนของโฟมเงินเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สำหรับการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ในโฟมเงินที่มีปริมาณของเงินแตกต่างกัน พบว่าประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ใกล้เคียงกันเกือบ 100% [15] เนื่องจาก Ag ไอออนสามารถกระจายอยู่ตามผนังเซลล์และแทรกเข้าไปภายในเซลล์ของแบคทีเรีย และทำให้เกิดการรวมตัวของดีเอ็นเอภายในเซลล์ ทำให้เห็นว่ากลไกในการยับยั้งแบคทีเรียของ Ag ไอออน คือ Ag ไอออนจับกับโปรตีนที่ผนังเซลล์ของแบคทีเรียที่หมู่ thiol (-SH) ซึ่ง Ag ไอออนทำให้โปรตีนแปลงสภาพส่งผลให้การควบคุมการขนส่งสารเข้าและออกจากเซลล์ผิดปกติ Ag ไอออน จึงสามารถแทรกเข้าไปภายในเซลล์

แบคทีเรียได้ ซึ่ง Ag ไอออนที่แทรกเข้าไปภายในเซลล์แบคทีเรียทำให้ดีเอ็นเอภายในเซลล์ซึ่งประกอบด้วยฟอสฟอรัสจำนวนมากเกิดการรวมตัวและสูญเสียความสามารถในการเพิ่มจำนวนแบคทีเรียจึงไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้ [15] และ Ag ไอออนที่แทรกเข้าไปภายในเซลล์ยังสามารถจับกับโปรตีนที่สำคัญอื่นๆ อีก เช่น โปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการหายใจระดับเซลล์ เมื่อโปรตีนเหล่านั้นไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ แบคทีเรียก็จะตาย เนื่องจากแบคทีเรียแกรมลบมีชั้นเพปทิโดไกลแคน (Peptidoglycan) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของกรดเอ็นอะเซทิลกลูโคซาไมน์ (N-acetylglucosamine) และกรดเอ็นอะเซทิลมิวรามิก (N-acetylmuramic acid) ที่สลับโมเลกุลกันไป แต่ระหว่างแถวจะถูกเชื่อมด้วยกรดอะมิโน ซึ่งมีลักษณะที่บางกว่าแบคทีเรียแกรมบวก [17] นอกจากนี้การขนส่งสารเข้าออกเซลล์ที่ผิดปกตินี้จะทำให้เซลล์แตก ทำให้แบคทีเรียตายในที่สุดกลไกการทำงานของ Ag ไอออนข้างต้นมีประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ซึ่งเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ใช้เวลาในการแบ่งเซลล์ประมาณ 15-20 นาที จากการทดสอบที่ให้โพนเงินสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาทีนั้นทำให้มี Ag ไอออนจำนวนมากสามารถเข้าไปยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ได้ดี ดังนั้น โพนเงินมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ได้ดีในระยะเวลานั้นๆ [14] สำหรับเวลาในการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ใช้เวลาในการแบ่งเซลล์ประมาณ 27-30 นาที จะเห็นได้ว่าแบคทีเรีย *E.coli* ใช้เวลาในการแบ่งเซลล์น้อยกว่าเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ดังนั้น โพนเงินที่สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดเป็นเวลา 15 นาที ทำให้โพนเงินมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* มากกว่าเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus*

จากผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียในรูปที่ 4.16 และ 4.17 จะเห็นว่าโพนเงินที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่จะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ได้ดีกว่าโพนเงินที่มีโพรงอากาศขนาดเล็ก ซึ่งผลที่ได้นี้ไม่เป็นไปตามทฤษฎีที่ได้จากการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ที่แสดงให้เห็นว่า เมื่อพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุที่ใช้ทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียมีขนาดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* จะสูงขึ้น แต่จากการทดสอบที่ได้โพนที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยกว่าโพนที่มีโพรงอากาศขนาดเล็ก ซึ่งควรที่จะแสดงประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ที่ต่ำกลับมีประสิทธิภาพในการยับยั้ง การเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* สูงกว่า สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดจากการที่โพนที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่จะมีโอกาสมากกว่าที่ของเหลวจะไหลผ่านเข้าไปในโพรงอากาศ ทำให้ของเหลวสามารถสัมผัสผิวโพรงอากาศภายในได้ดีกว่า ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ได้ดีกว่า ในทางตรงกันข้ามโพนที่มีโพรงอากาศขนาดเล็กจะมีโอกาสที่ของเหลวไหลผ่านไปสัมผัสผิวโพรงอากาศภายในได้น้อยกว่า

เนื่องจากภายในโพรงอากาศขนาดเล็กอาจมีอากาศที่ยังค้างอยู่ข้างในที่ไม่ได้ถูกกำจัดออกไป นอกจากนี้ขนาดโพรงอากาศที่เล็กมากยังส่งผลต่อการไหลแบบแทรกซึม เนื่องจากแรงดูดซับ (Capillary force) ดังนั้นผลที่ได้จากการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของโฟมเงินที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่จึงมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ได้ดีกว่า

สำหรับเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* พบว่าประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* มีความผันผวนไม่เป็นไปตามแนวโน้มทางทฤษฎีและในลักษณะเช่นเดียวกับเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ซึ่งอาจมีสาเหตุเช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้การที่เชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* มีความแข็งแรงกว่าเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ก็อาจส่งผลต่อผลที่ได้จากการทดสอบด้วย ทำให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ไม่เป็นไปตามที่คาดไว้

จะเห็นได้ว่าเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* มีลักษณะที่ต่างกันทั้งขนาด และช่วงอุณหภูมิในการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย ได้แก่ น้ำ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย เวลาในการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งปริมาณของน้ำเป็นส่วนประกอบที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย [17] โดยที่เชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ต้องการปริมาณน้ำในการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียน้อยกว่าเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* แสดงให้เห็นว่าเชื้อแบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตได้ดีในที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ สำหรับอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียจะเห็นว่าเชื้อแบคทีเรียแต่ละชนิดมีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียต่างกัน ซึ่งเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิ 35°-40°C ในที่มีอากาศค่อนข้างร้อนเหมาะสำหรับการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* สำหรับเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิ 22°-50°C ซึ่งสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่มีอากาศเพียงเล็กน้อย สำหรับเวลาในการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ใช้เวลาในการแบ่งเซลล์ประมาณ 27-30 นาที ซึ่งเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ใช้เวลาในการแบ่งเซลล์ประมาณ 15-20 นาที จะเห็นได้ว่าแบคทีเรีย *E.coli* ใช้เวลาในการแบ่งเซลล์น้อยกว่าเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ดังนั้น โฟมเงินที่สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดเป็นเวลา 15 นาที ทำให้โฟมเงินมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* มากกว่าเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* นอกจากนี้ยังมีสภาวะแวดล้อมต่างๆ เช่น pH ของอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย เป็นต้น ซึ่งมีผลต่อเวลาในการแบ่งเซลล์ของเชื้อแบคทีเรียด้วย [15]

ประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* ในโฟมเงินที่ผสม NaCl ปริมาณ 70 vol.% และมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 494 μm

โดยให้โพลีเมอร์สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียในเวลาที่แตกต่างกันเป็นเวลา 30, 45 และ 60 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ในโพลีเมอร์ดีกว่าเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ในโพลีเมอร์ เมื่อเวลาในการที่โพลีเมอร์สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียมากขึ้น สำหรับเวลาในการที่โพลีเมอร์สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียมากขึ้นทำให้เชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* มีการแบ่งเซลล์การเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่โพลีเมอร์สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลานานทำให้ Ag⁺ ไอออนสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียมากขึ้น เป็นผลให้เชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* มีการแบ่งเซลล์ ดังนั้น Ag⁺ ไอออนในโพลีเมอร์สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียได้เพิ่มขึ้น

5.5 ความสามารถในการไหลของของไหลผ่านโพลีเมอร์

ความสามารถในการไหลของน้ำที่ไหลผ่านโพลีเมอร์นั้นจะเห็นว่าน้ำมีความหนืด 1 cP ซึ่งมีค่าความหนืดต่ำทำให้น้ำสามารถไหลผ่านโพลีเมอร์ได้อย่างรวดเร็ว ดังในรูปที่ 4.15 ถึง 4.18 มีแนวโน้มที่เหมือนกัน คือ โพลีเมอร์ที่ใช้ NaCl เป็นตัวสร้างโครงอากาศในปริมาณมากจะมีอัตราการไหลมากเนื่องจากโพลีเมอร์ที่มีปริมาณรูพรุนมาก ทำให้โพลีเมอร์มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับของเหลวมากเมื่อน้ำไหลผ่านโครงอากาศในโพลีเมอร์จะสามารถไหลผ่านได้ง่าย และโครงสร้างของโพลีเมอร์มีโครงอากาศที่สม่ำเสมอจึงทำให้น้ำที่ไหลผ่านโพลีเมอร์มีอัตราการไหลมาก จากผลการทดลองพบว่าโพลีเมอร์ที่มีโครงอากาศขนาดใหญ่มีอัตราการไหลสูงกว่าโพลีเมอร์ที่มีโครงอากาศขนาดเล็กในปริมาณที่เท่ากัน เนื่องจากโพลีเมอร์ที่มีโครงอากาศขนาดใหญ่ทำให้โพลีเมอร์มีช่องว่างขนาดใหญ่ส่งผลให้โพลีเมอร์มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับของเหลวมากด้วย จึงทำให้น้ำสามารถไหลผ่านโพลีเมอร์ได้ง่าย นอกจากนี้รูปร่างของโครงอากาศในโพลีเมอร์ยังส่งผลต่ออัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านโพลีเมอร์ด้วย จะเห็นว่าโพลีเมอร์ที่มีรูปร่างของโครงอากาศเป็นทรงกลม และมีโครงอากาศที่สม่ำเสมอทั่วทั้งโพลีเมอร์ทำให้มีอัตราการไหลมากกว่าโพลีเมอร์ที่มีรูปร่างของโครงอากาศที่มีลักษณะไม่เป็นทรงกลม เนื่องจากรูปร่างของโครงอากาศที่มีลักษณะเป็นทรงกลมทำให้ภายในโครงอากาศที่เป็นทรงกลมจะไม่มีเหลี่ยมและมุมเกิดขึ้นส่งผลให้น้ำสามารถไหลผ่านโครงอากาศในโพลีเมอร์ได้อย่างรวดเร็ว [21] จึงส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำ ที่สามารถไหลผ่านโพลีเมอร์มีค่าสูง

จากผลการทดลองความสามารถในการไหลของน้ำมันถั่วเหลืองที่ไหลผ่านโพลีเมอร์ จะเห็นว่าน้ำมันถั่วเหลืองมีความหนืด 79.1 cP ซึ่งมีความหนืดสูงทำให้น้ำมันถั่วเหลืองไหลผ่านโพลีเมอร์ได้ช้า ดังในรูปที่ 4.19 ถึง 4.22 พบว่ากราฟมีแนวโน้มเหมือนกัน คือ โพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณมากมีอัตราการไหลมากกว่าโพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ปริมาณน้อย เนื่องจากโพลีเมอร์ที่มีปริมาณรูพรุนมากส่งผลให้มีความหนาแน่นต่ำ เมื่อน้ำมันถั่วเหลืองไหลผ่านโครงอากาศจำนวนมากทำให้มีอัตราการไหลสูง จากผลการทดลองอัตราการไหลพบว่าโพลีเมอร์ที่มีโครงอากาศขนาด

ใหญ่มีอัตราการไหลสูงกว่าโคมเงินที่มีขนาดโพรงอากาศขนาดเล็ก เนื่องจากโคมเงินที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่ นั้นทำให้โคมเงินมีช่องว่างมาก เมื่อเวลาผ่านไปทำให้น้ำมันถั่วเหลืองไหลผ่านโพรงอากาศขนาดใหญ่จึงมีอัตราการไหลสูง โดยมีแรงโน้มถ่วงเป็นตัวขับเคลื่อนในการไหล สำหรับรูปร่างของโพรงอากาศในโคมเงินและการกระจายตัวของโพรงอากาศในโคมเงินยังส่งผลต่ออัตราการไหลของน้ำมันถั่วเหลืองด้วย เหตุผลเดียวกับการไหลของน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำมันถั่วเหลืองมีความหนืดสูงกว่าความหนืดของน้ำ ทำให้อัตราการไหลของน้ำมันถั่วเหลืองที่ไหลผ่านโคมเงินต่ำกว่าอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านโคมเงิน เพราะน้ำมันถั่วเหลืองมีความหนืดสูงทำให้มีค่าความต้านทานต่อการไหลสูง และค่าความต้านทานต่อการไหลแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในของเหลวเป็นผลมาจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล และการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมระหว่างโมเลกุลของของเหลว [24] ส่งผลให้ความเร็วของน้ำมันถั่วเหลืองลดลง ในสมการที่ 2.16 และ 2.17 พบว่าความหนืดของของไหล ปริมาตรรูพรุนของโคมโลหะ การสูญเสียแรงดันเนื่องจากความเสียดทานภายในท่อ น้ำหนักจำเพาะของของไหล เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความเร็ว ของของไหลที่ไหลโคมโลหะ และยังส่งผลต่อการสูญเสียแรงดันเนื่องจากความเสียดทานภายในท่อเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านท่อเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ในของไหลจะเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากความหนืด แรงต้านนี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็ว ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ต่างส่งผลต่อการไหลของของไหล จะเห็นว่าของเหลวไหลในท่อเล็กๆ ชั้นของของเหลวที่อยู่บริเวณกึ่งกลางของท่อจะมีความเร็วมากกว่าชั้นของของเหลวที่อยู่ถัดออกมาและอยู่ใกล้ท่อมากกว่า เนื่องจากระหว่างชั้นของของเหลวมีแรงต้านภายในเกิดขึ้น ส่งผลให้ความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านท่อเพิ่มขึ้น

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของปริมาณของเงินและขนาดของอนุภาค NaCl ที่มีต่อความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานของโฟมเงิน การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของโฟมเงินและความสามารถในการไหลของของไหลผ่านโฟมเงิน จากการทดลองสามารถได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

6.1 สรุปผลการทดลอง

6.1 โครงสร้างของโฟมเงินมีโพรงอากาศที่สม่ำเสมอและการเชื่อมต่อกันของรูพรุนมากขึ้นเมื่อปริมาณของ NaCl เพิ่มขึ้น และโฟมเงินที่มีขนาดของอนุภาค NaCl ขนาดเล็กมีการกระจายตัวของอนุภาคมากทำให้โพรงอากาศมีความสม่ำเสมอและการเชื่อมต่อกันของรูพรุนมากขึ้น

6.2 ความสามารถในการรับแรงอัดและการดูดซับพลังงานมากขึ้นเมื่อโฟมเงินผสมกับ NaCl ที่ปริมาณ 60 vol.% และโฟมเงินที่มีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 494 μm มีการรับแรงอัดและการดูดซับพลังงานมากที่สุด

6.3 โฟมเงินที่สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียที่เวลาต่าง ๆ กัน พบว่าที่เวลา 24 ชั่วโมง โฟมเงินมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* มากที่สุด และมีค่าใกล้เคียงกันเกือบ 100%

6.4 โฟมเงินที่สัมผัสเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาทีนั้นจะเห็นว่าโฟมเงินสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ดีกว่าเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* เมื่อโฟมเงินมีปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นซึ่งผสมกับ NaCl ที่ปริมาณ 80 vol.% ทำให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* เพิ่มขึ้นด้วย การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้นเมื่อโฟมเงินมีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 494 μm

6.5 โฟมเงินที่มีปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นโดยการผสมกับ NaCl ในปริมาณ 80 vol.% ส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำและน้ำมันถั่วเหลืองที่ไหลผ่านโฟมเงินเพิ่มขึ้น สำหรับโฟมเงินที่มีขนาดของอนุภาค NaCl เฉลี่ยประมาณ 494 μm มีอัตราการไหลของน้ำและน้ำมันถั่วเหลืองที่ไหลผ่านโฟมเงินเพิ่มขึ้นเช่นกัน

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาวิจัยนี้พบว่าการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมเงิน สามารถกำหนดปัจจัยต่างๆ เพิ่มเติมมาทำการทดลองโดยใช้ข้อมูลที่มากและครอบคลุมยิ่งขึ้น ซึ่งมีปัจจัยหลายอย่างที่ไม่ได้นำมาพิจารณา เช่น ความหนาของผิว บรรยากาศในเตาที่ใช้ในการผลิตโฟมเงิน และปฏิกิริยาระหว่างอนุภาค NaCl กับเนื้อพื้นโลหะ อีกทั้งการออกแบบการวัดอัตราการไหลของเหลวผ่านโฟมเงินที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมาให้เหมาะสมกับชิ้นงานทดสอบ ซึ่งผู้ที่สนใจสามารถพัฒนาอุปกรณ์ในการทดสอบได้เพื่อความแม่นยำยิ่งขึ้นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ การศึกษาวิจัยนี้จึงเป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้นเท่านั้น ซึ่งก็พอเพียงสำหรับการให้ความรู้พื้นฐานแก่ผู้ที่สนใจ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] M. F. Ashby, A. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson and H. N.G. Wadley. Metal Foams : A Design Guide. USA. Butterworth-Heinemann. 2000.
- [2] B. Jiang, N.Q. Zhao, C.S. Shi, X.W. Du, J.J Li, H.C. Man , A novel method for making open cell aluminum foams by powder sintering process aluminum foams by powder sintering process. Materials Letters 59 (2005): 3333-3336.
- [3] H.X. Peng, Z. Fan, Immiscible systems produced by squeeze casting of engineered metallic foams. Material Science Letters 20 (2001): 1769-1771.
- [4] A. Pual, U. Ramamurty, Strain rate sensitivity of a closed-cell aluminum foam. Materials Science and Engineering A 281 (2000): 1-7.
- [5] John Banhart, Manufacture, Characterization and application of cellular metals and metal foams. Progress in Materials Science 46 (2001): 618-621.
- [6] Y.Y. Zhao, D.X. Sun, A novel sintering-dissolution process for manufacturing Al foams. Scripta Materialia 44 (2001): 105-110.
- [7] Yuyuan Zhao, Fusheng Han, Thomas Fung, Optimisation of compaction and liquid-state sintering in sintering and dissolution process for manufacturing Al foams. Materials Science and Engineering A 364 (2004): 117-125.
- [8] B. Jiang, N.Q. Zhao, C.S. Shi, J.J. Li, Processing of open cell Aluminum foams with tailored porous morphology. Scripta Materialia 53 (2005): 781-785.
- [9] Asavavisithchai S and Nisaratanaporn E., Fabrication of Open-Cell Silver Foams Using a Replication Process, in Proceedings of the Fifth International Conference on Porous Metals and Metallic Foams, Montreal, Canada, 5-7 September (2007): 185-188.
- [10] Available from : <http://en.wikipedia.org/wiki/silver>
- [11] Amit Sinha and B.P. Sharma, Preparation of silver powder through glycerol process. Bulletin of Materials Science 28 (2005): 213-217.
- [12] C. Gaillard , J.F. Despois , A. Mortensen, Processing of NaCl powders of controlled size and shape for the microstructural tailoring of aluminium foams. Materials Science and Engineering A 374 (2004): 250-262.

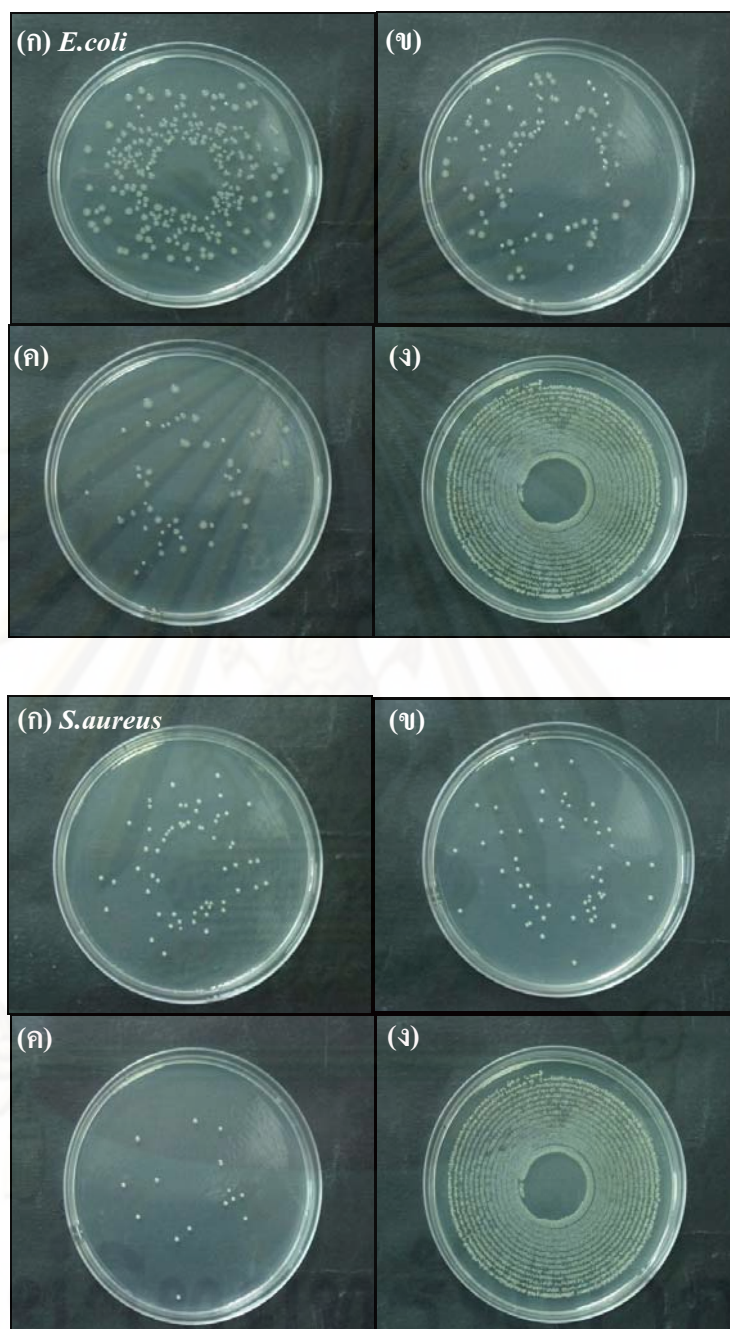
- [13] D.X. Sun, Y.Y. Zhao, Phase changes in sintering of Al/Mg/NaCl compacts for manufacturing Al foams by sintering and dissolution process. Materials Letters 59 (2005): 6-10.
- [14] Kyung-Hwan Cho, Jong-Eun Park, Tetsuya Osaka, Soo-Gil Park, The study of antimicrobial activity and preservative effects of nanosilver ingredient. Electrochimica Acta 51 (2005): 956-960.
- [15] Prashant Jain and T. Pradeep, Potential of silver nanoparticle-coated polyurethane foam as an antimicrobial water filter. Wiley Interscience (2005): 59-63.
- [16] Available from : <http://www.sci.waikato.ac.nz/farm/content/microbiology.html>
- [17] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นงลักษณ์ สุวรรณพินิจ. แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับโรค. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2547
- [18] A. Kim, M.A. Hasan, S.H. Nahm, S.S. Cho, Evaluation of compressive mechanical properties of Al-foams using electrical conductivity. Composite Structures 71 (2005): 191-198.
- [19] Fusheng Han, Hefa Cheng, Zhibin Li, and Qiang Wang, The strain rate effect of an open cell Aluminum foam. Metallurgical and Material Transactions A 36 (2005): 645-650.
- [20] D.X. SUN and Y.Y. ZHAO, Static and dynamic energy absorption of Al foams produced by the sintering and dissolution process. Metallurgical and Material Transaction B 34 (2003): 69-74.
- [21] L. W. Jin, K. C. Leong, Pressure drop and friction factor of steady and oscillating flows in open-cell porous media. Transport in Porous Media 72 (2008): 37-52.
- [22] Yunus A.Cengel and Roberth H. Turner, Fundamentals of thermal-fluid science. 2nded. New York: McGraw-Hill, 2001
- [23] Available from : http://www.engineersedge.com/fluid_flow/flow_velocity_profiles
- [24] รองศาสตราจารย์ ดร. ทวิช จิตรสมบูรณ์. กลศาสตร์ของไหล. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, 2546.
- [25] Gibson, L.J. and Ashby, M.F. Cellular solids: structure and properties. 2nd ed. UK: Cambridge University Press, 1997



ภาคผนวก

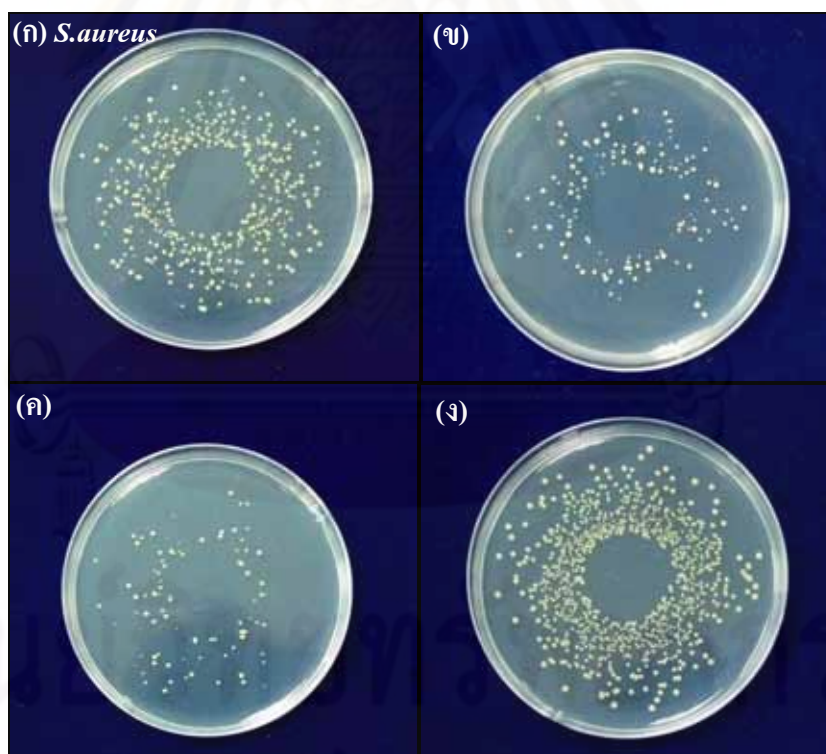
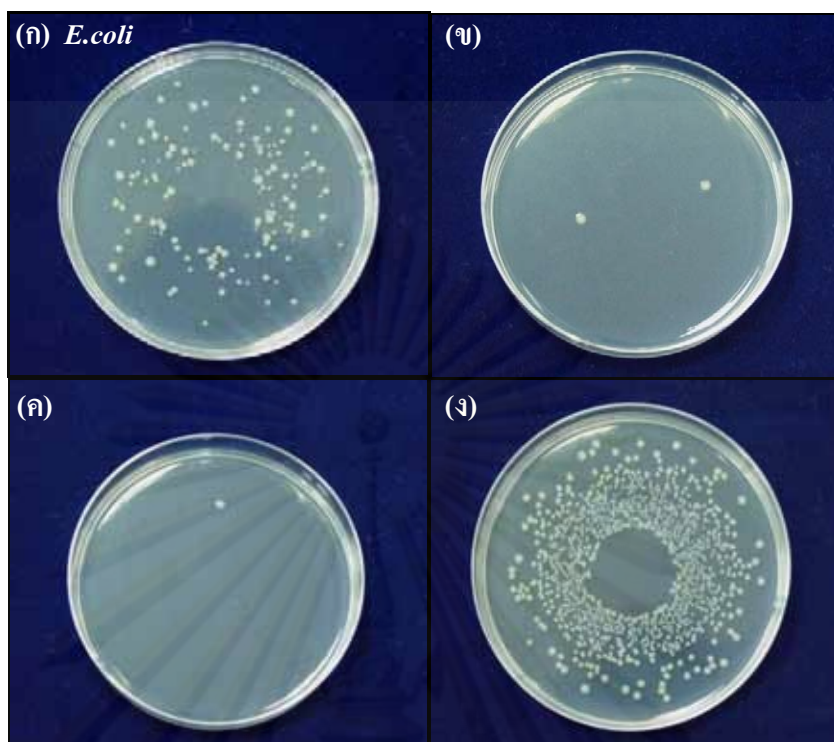
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลักษณะโคโลนีที่สัมผัสกับซิงงาน



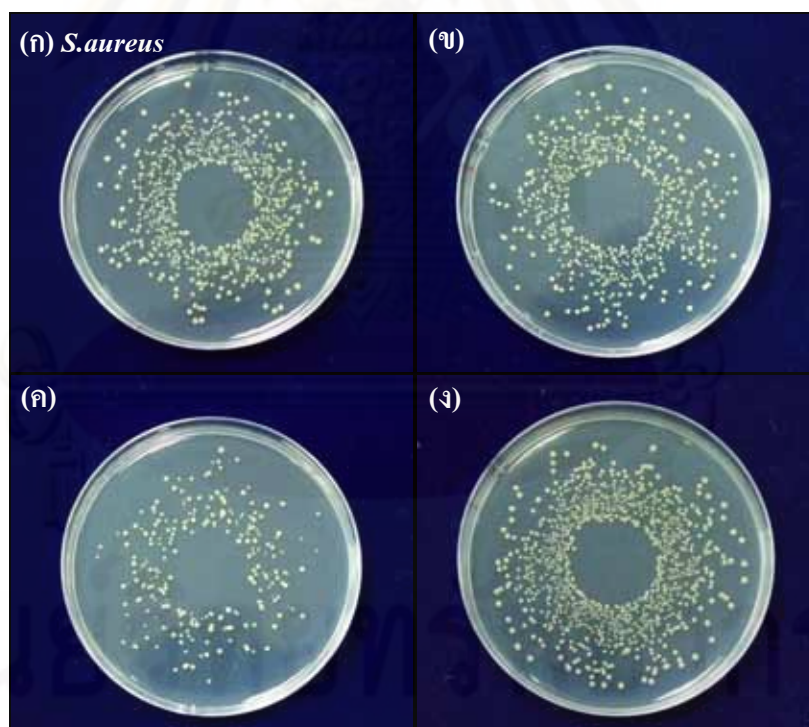
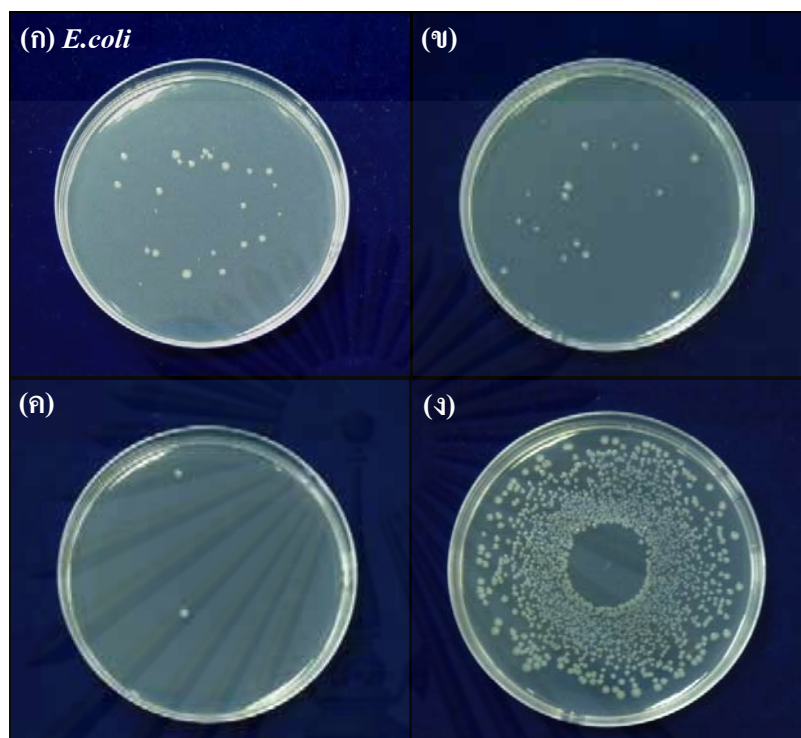
รูปที่ 1ก การยับยั้งของโคโลนีของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ตามลำดับ ภายหลังจากที่ซิงงานสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้โพลีเมอร์ที่ผสม NaCl ที่มีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 447 μm และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

(ก) 60 vol.% (ข) 70 vol.% (ค) 80 vol.% (ง) control



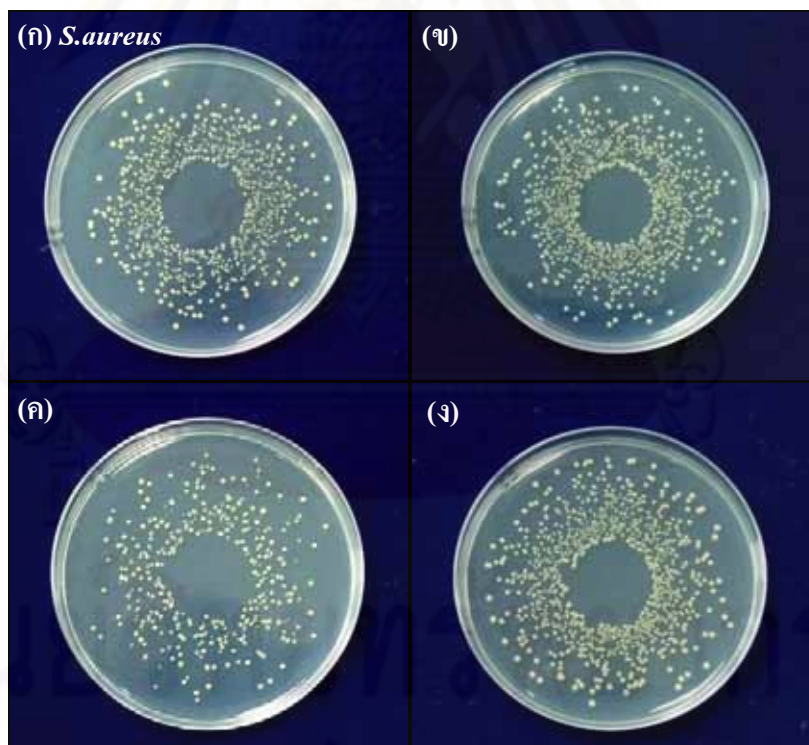
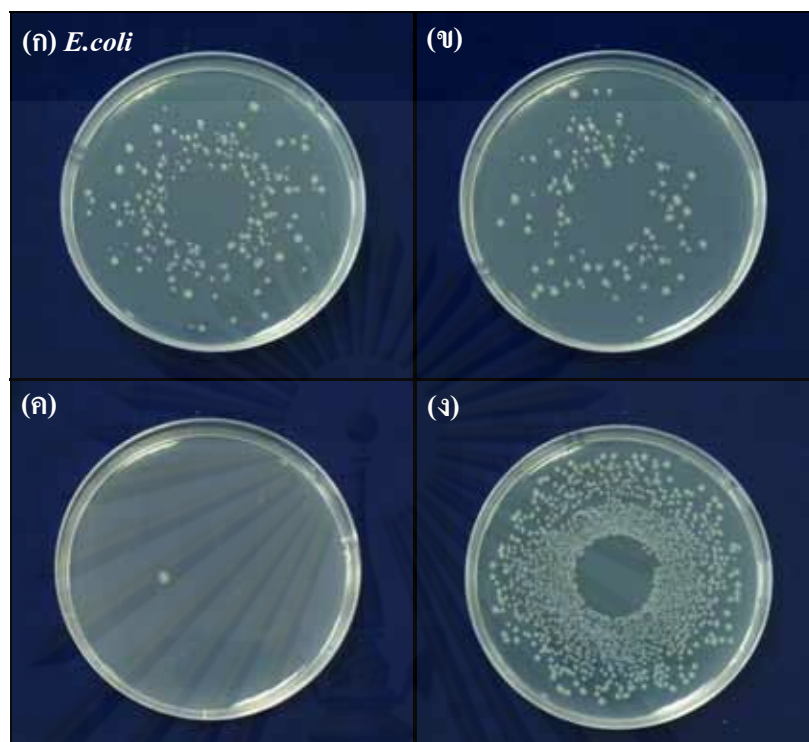
รูปที่ 2ก การยับยั้งของโคโลนีของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ตามลำดับ ภายหลังจากที่
 ชี้นงานสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โฟมเงินที่ผสม NaCl ที่มีขนาดของอนุภาค
 เฉลี่ยประมาณ 494 μm และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

(ก) 60 vol.% (ข) 70 vol.% (ค) 80 vol.% (ง) control



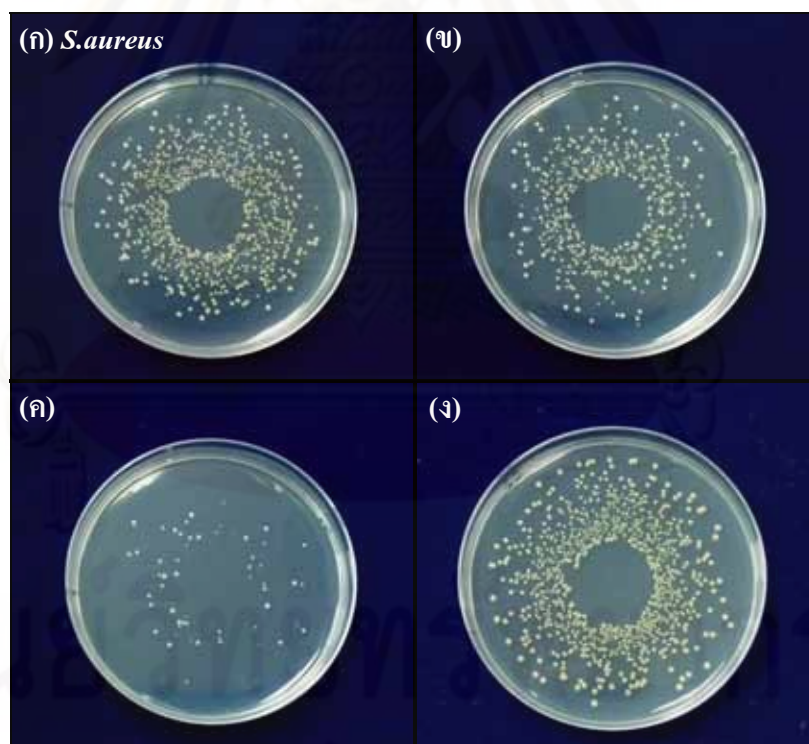
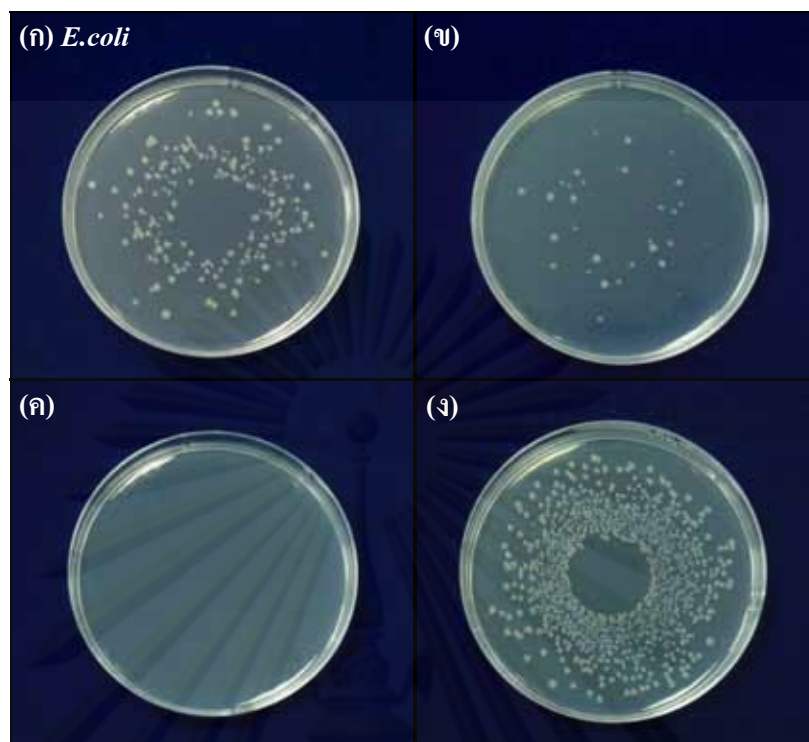
รูปที่ 3ก การยับยั้งของโคโลนีของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ตามลำดับ ภายหลังจากที่
 ชี้นงานสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้ฟอเมจินที่ผสม NaCl ที่มีขนาดของอนุภาค
 เฉลี่ยประมาณ 337 μm และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

(ก) 60 vol.% (ข) 70 vol.% (ค) 80 vol.% (ง) control



รูปที่ 4ก การยับยั้งของโคโลนีของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ตามลำดับ ภายหลังจากที่
 ชี้นงานสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้ฟองเงินที่ผสม NaCl ที่มีขนาดของอนุภาค
 เฉลี่ยประมาณ 126 μm และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

(ก) 60 vol.% (ข) 70 vol.% (ค) 80 vol.% (ง) control



รูปที่ 5ก การยับยั้งของโคโลนีของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ตามลำดับ ภายหลังจากที่
 ชี้นำสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้โฟมเงินที่ผสม NaCl ที่มีขนาดของอนุภาค
 เฉลี่ยประมาณ 39 μm และบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

(ก) 60 vol.% (ข) 70 vol.% (ค) 80 vol.% (ง) control

ผลการทดสอบ ICP

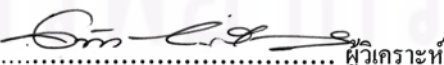
รายงานเลขที่ ICP-019 / 2551

หน้าที่ 1 / 1

รายงานผลการวิเคราะห์

ตัวอย่าง สารละลาย Silver รหัสใบส่งตัวอย่าง 510438
 เจ้าของตัวอย่าง นางสาวอัญมณี อุ่นประเดิม
 วัตถุประสงค์ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ Cu Mg P Ni และ Fe
 วิธีวิเคราะห์ ICP atomic emission spectrometry
 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer;
 Model Perkin Elmer PLASMA-1000
 วันที่วิเคราะห์ 14 กุมภาพันธ์ 2551
 ผลการวิเคราะห์

สารละลาย	ปริมาณธาตุ ($\mu\text{g/ml}$)				
	Cu	Mg	P	Ni	Fe
Silver	0.188	0.144	< 0.17	< 0.010	0.478


 ผู้วิเคราะห์
 (นายอุทัย ดิยะวิสุทธิศรี)

หมายเหตุ ผลการทดสอบฉบับนี้ เป็นผลการทดสอบเฉพาะตัวอย่างที่ส่งทดสอบ
 ณ. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เท่านั้น

วิธีการคำนวณหาปริมาณของธาตุผสม

จากผลการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ Cu, Mg, P, Ni และ Fe

ในสารละลาย 1000 ml มีปริมาณ Cu ละลายอยู่ 0.188 mg

ในสารละลาย 50 ml จะมีปริมาณ Cu ละลายอยู่ $\frac{0.188 \times 0.05}{1} = 0.0094$ mg

ดังนั้น ในปริมาณสารที่ใช้ในการละลาย 1 g มีปริมาณ Cu ละลายอยู่ 0.0094 mg

ปริมาณสารที่ใช้ 5 g จะมีปริมาณ Cu ละลายอยู่ $\frac{0.0094 \times 5}{1} = 0.047$ mg

สำหรับการคำนวณหา Mg, P, Ni และ Fe ก็คำนวณแบบเดียวกัน

%wt. by ICP				
Cu	Mg	P	Ni	Fe
0.047	0.036	0.0425	0.0025	0.1195

ตารางปริมาณรูพรุนของโฟมเงิน

ชิ้นงานน้ำหนัก 1.5 กรัม

ส่วนผสม	ปริมาณรูพรุน (%)			
	$\varnothing = 494 \mu\text{m}$	$\varnothing = 337 \mu\text{m}$	$\varnothing = 126 \mu\text{m}$	$\varnothing = 39 \mu\text{m}$
Ag+60 vol.% NaCl	69	68	65	64
Ag+70 vol.% NaCl	76	75	73	74
Ag+80 vol.% NaCl	83	82	81	81

ชิ้นงานน้ำหนัก 4 กรัม

ส่วนผสม	ปริมาณรูพรุน (%)			
	$\varnothing = 494 \mu\text{m}$	$\varnothing = 337 \mu\text{m}$	$\varnothing = 126 \mu\text{m}$	$\varnothing = 39 \mu\text{m}$
Ag+60 vol.% NaCl	66	66	65	65
Ag+70 vol.% NaCl	74	74	73	73
Ag+80 vol.% NaCl	82	82	81	80

ชิ้นงานน้ำหนัก 5 กรัม

ส่วนผสม	ปริมาณรูพรุน (%)			
	$\varnothing = 494 \mu\text{m}$	$\varnothing = 337 \mu\text{m}$	$\varnothing = 126 \mu\text{m}$	$\varnothing = 39 \mu\text{m}$
Ag+60 vol.% NaCl	67	67	66	66
Ag+70 vol.% NaCl	75	74	74	74
Ag+80 vol.% NaCl	83	82	82	82

% ความแตกต่างของปริมาณรูพรุนกับปริมาณ NaCl ที่ใช้

ชิ้นงานน้ำหนัก 1.5 กรัม

ส่วนผสม	% ความแตกต่างของปริมาณรูพรุนกับปริมาณ NaCl			
	$\varnothing = 494 \mu\text{m}$	$\varnothing = 337 \mu\text{m}$	$\varnothing = 126 \mu\text{m}$	$\varnothing = 39 \mu\text{m}$
Ag+60 vol.% NaCl	15	13.33	8.33	6.67
Ag+70 vol.% NaCl	8.57	7.14	4.29	5.71
Ag+80 vol.% NaCl	3.75	2.5	1.25	1.25

ชิ้นงานน้ำหนัก 4 กรัม

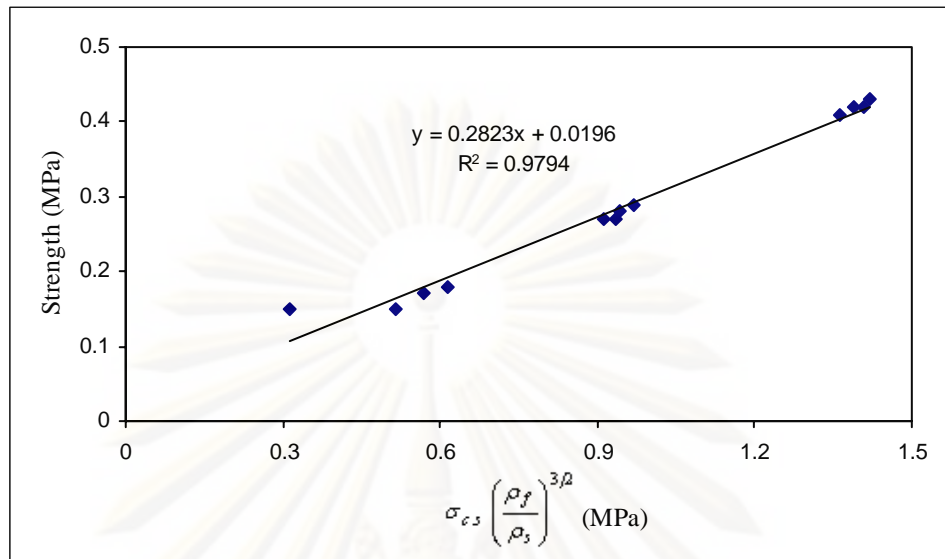
ส่วนผสม	% ความแตกต่างของปริมาณรูพรุนกับปริมาณ NaCl			
	$\varnothing = 494 \mu\text{m}$	$\varnothing = 337 \mu\text{m}$	$\varnothing = 126 \mu\text{m}$	$\varnothing = 39 \mu\text{m}$
Ag+60 vol.% NaCl	10	10	8.33	8.33
Ag+70 vol.% NaCl	5.71	5.71	4.29	4.29
Ag+80 vol.% NaCl	2.5	2.5	1.25	0

ชิ้นงานน้ำหนัก 5 กรัม

ส่วนผสม	% ความแตกต่างของปริมาณรูพรุนกับปริมาณ NaCl			
	$\varnothing = 494 \mu\text{m}$	$\varnothing = 337 \mu\text{m}$	$\varnothing = 126 \mu\text{m}$	$\varnothing = 39 \mu\text{m}$
Ag+60 vol.% NaCl	11.67	11.67	10	10
Ag+70 vol.% NaCl	7.14	5.71	5.71	5.71
Ag+80 vol.% NaCl	3.75	2.5	2.5	2.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการคำนวณหาค่า C ในสมการของ Ashby



รูปที่ 6 แสดงการหาค่าคงที่ (C) ในสมการของ Ashby

จาก $y = mx + c$

โดยที่

y คือ ความแข็งแรงจุดคราก หน่วย MPa จากตารางที่ 4.3

x คือ $\sigma_{c,s} \left(\frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^{3/2}$ หน่วย MPa จากตารางที่ 4.3

m = C คือ ค่าคงที่ เท่ากับ 0.28

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวอัญมณี อุ่นประเดิม
วัน เดือน ปีเกิด	วันอาทิตย์ที่ 27 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2526
ที่อยู่	39 หมู่ 8 ต.กลาง อ.เสลภูมิ จ.ร้อยเอ็ด 45120
ประวัติการศึกษา	ระดับประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลพระกุมารร้อยเอ็ด ปี พ.ศ. 2539 ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย โรงเรียนขอนแก่นวิทยายน ปี พ.ศ.2545 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี พ.ศ.2549 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ.2552
โทรศัพท์	086-720-7573

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย