



การศึกษาเบื้องต้นการกระตุ้นปฏิกิริยาออกซิเดชัน  
ระบบของน้ำ โฟแทสเทียมไอโอไดด์ และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ด้วยคลื่นเหนือเสียง



นายทวีทรัพย์ เลาคมรพาณิชย์

นางสาววาลิกา ขจรวิทยา

วัน เดือน ปี.....	4 ค.ศ. 2541
เลขทะเบียน.....	038631
เลขเรียกหนังสือ.....	T. 2005.15. 5ก.

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำใบใช้

038631

Sonochemical oxidation of the water-KI-CCl<sub>4</sub> System



Mr. Thaveesub Laoamompanich

Miss Valika Kachornvitaya

A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Bachelor of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1997

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาเบื้องต้นการกระตุ้นปฏิกิริยาออกซิเดชันระบบของน้ำ  
โพแทสเซียมไอโอไดด์ และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ด้วยคลื่นเหนือเสียง

โดย นายทวิทรัพย์ เลออมรพานิษฐ์  
นางสาววาลิกา ขจรวิทยา

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

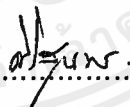
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ประกอบ กิจไชยา


อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. สมนึก ศิริสุนทร

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(ดร. ประกอบ กิจไชยา)

  
.....กรรมการ  
(ดร. สมนึก ศิริสุนทร)

  
.....กรรมการ  
(อ. สุธาสินี แก้วพวงงาม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง การศึกษาเบื้องต้นการกระตุ้นปฏิกิริยาออกซิเดชันระบบของน้ำ โฟแทสเทียมไอโอไดด์  
และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ด้วยคลื่นเหนือเสียง

โดย นายทวิทรัพย์ เลออมรพานิชย์  
นางสาววาลิกา ขจรวิทยา  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ประกอบ กิจไชยา  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. สมนึก ศิริสุนทร  
ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาการกระตุ้นปฏิกิริยาออกซิเดชันระบบของน้ำ โฟแทสเทียมไอโอไดด์ และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ด้วยคลื่นเหนือเสียงซึ่งจะได้สารผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นไอโอดีน สิ่งที่ทำการศึกษา คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นรวมทั้งปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยา การศึกษาจะเริ่มต้นจากการทดลองปฏิกิริยาโดยทำในอ่างอัลตราโซนิก (Ultrasonic Bath) จากนั้นจึงทำการศึกษาและประดิษฐ์เครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียงทดลองปฏิกิริยาและทำการเปรียบเทียบกับอ่างอัลตราโซนิก จากผลการทดลอง ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยา ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการกระตุ้นหากใช้เวลานานจะทำให้ได้สารผลิตภัณฑ์มากขึ้น ความเข้มข้นของสารละลาย โฟแทสเทียมไอโอไดด์หากมีความเข้มข้นน้อยกว่า 40%โดยน้ำหนัก จะไม่มีผลต่อปฏิกิริยามากนัก แต่เมื่อความเข้มข้นสูงกว่า 40%โดยน้ำหนัก จะมีผลต่อปฏิกิริยา ปริมาตรของคาร์บอนเตตระคลอไรด์จะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยาโดยตรงและปริมาตรที่มีเหมาะสม คือ 35 มิลลิลิตร อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา คือ 30 องศาเซลเซียส ปริมาตรของสารในระบบนั้นมีความสัมพันธ์กับระดับของสารภายในภาชนะบรรจุซึ่งจะส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาอันเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงผ่านเข้าไปในระบบที่มีปริมาตรต่างกัน สำหรับเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ประดิษฐ์ขึ้นนั้นยังให้ผลในการทดลองที่ไม่แน่นอน ซึ่งจะต้องได้รับการพัฒนาต่อไป

Report Title    Sonochemical Oxidation of the water-KI-CCl<sub>4</sub> System  
By                Mr. Thaveesub Laoamompanich  
                    Miss. Valika    Kachornvitaya  
Advisor        Dr. Prakob     Kitchaiya  
Co-Advisor    Dr. Somnuk    Sirisoonthorn  
Report for     Bachelor Degree of Chemical Engineering  
                    Department of Chemical Engineering Faculty of Engineering  
                    King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

### Abstract

This project is the study of the sonochemical oxidation of the water-KI-CCl<sub>4</sub> system, which produces iodine as a reaction product. The scope of this project is dealing with the reaction rate and the factors affect the sonochemical reaction. Therefore, an ultrasonic equipment is designed and invented. Then the results of the reaction are compared between that from the ultrasonic bath and the ultrasonic equipment. The experimental data showed the suitable temperature of the reaction is 30 °C. With an increasing in time, the reaction product occurs more. The concentration of KI at lower than 40%wt. has no effect on the reaction rate, but higher than 40%wt. makes the reaction rate increases. The amount of CCl<sub>4</sub> plays an important role on the reaction rate and the optimum volume is 35 ml. The volume of the system which relates to the liquid level in the flask affects the transferring of the ultrasound into the liquid. However the results of the ultrasonic equipment has a degree of uncertainly. The equipment needs some more improvements.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณอุยธรรม ตีระจินดา และบริษัท ดี. เอส. ซี. กรุ๊ป จำกัด ที่ได้ให้คำแนะนำในการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ตลอดจนการจำหน่ายอุปกรณ์ในราคาถูกและเชื่อเพื่ออุปกรณ์สำหรับการสร้างเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ขอขอบคุณ คุณนพ พุทธวิบูลย์ และบริษัท ดาด้า เอ็นทีวี กรุ๊ป จำกัด ที่ได้เชื่อเพื่ออุปกรณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณ ดร.สมนึก ศิริสุนทร นักวิจัยประจำศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ในการให้ความรู้ข้อแนะนำตลอดจนคำปรึกษาต่าง ๆ และอนุญาตให้ผู้จัดทำได้ทดลองสังเคราะห์สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ณ ห้องทดลองประจำศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และขอขอบคุณ ดร. หทัยชนก ดุริยะบรรเลง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการให้คำปรึกษาเกี่ยวกับวิธีการทำการทดลอง

ขอขอบคุณ ดร.ประกอบ กิจไชยา อาจารย์ที่ปรึกษาซึ่งได้ให้ความไว้วางใจและให้คำปรึกษาแก่ผู้จัดทำในการดำเนินโครงการถึงแม้ว่าจะมีอุปสรรคมากในการทำงาน และขอขอบคุณ อ. สุธาสินี แก้วพวงงาม ซึ่งให้ความเมตตาในการตรวจสอบตัวเนื้อหาวิทยานิพนธ์เพื่อให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ ขอขอบคุณ คุณรัชพิชญ์ เดชไทยที่ช่วยเหลือโครงการอยู่ตลอดเวลาเสมือนหนึ่งเป็นโครงการที่รับผิดชอบร่วมกัน ขอขอบคุณเพื่อนนักศึกษาชั้นปีที่ 4 ทุกคน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือตามความสามารถที่จะช่วยเหลือได้ ท้ายที่สุดขอขอบคุณผู้ร่วมทำโครงการนี้ที่ช่วยกันฟันฝ่าอุปสรรคเป็นกำลังใจให้กันและทำให้ได้เรียนรู้ไม่เฉพาะตัวทฤษฎีเท่านั้นแต่ได้เรียนรู้การทำงานร่วมกันซึ่งทำให้การทำโครงการลุล่วงไปได้

ผู้จัดทำ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญภาพ	ฅ
สารบัญตาราง	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ญ
<b>บทที่</b>	
1. บทนำ	1
2. Sonochemistry	4
กลไกการเกิดโพรงช่องว่าง	4
ลักษณะของโพรงช่องว่าง	6
ปัจจัยที่มีผลต่อโพรงหรือช่องว่าง	6
ชนิดของปฏิกิริยา	7
การประยุกต์ใช้ Sonochemistry	10
3. เพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	13
ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก	13
Poling	14
กระบวนการผลิตสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	15
คุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	16
ลักษณะเด่นของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	16
แผนภาพวัฏภาคของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	17
4. การทดลองผลิตสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	19
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของผงออกไซด์ของโลหะชนิดต่าง ๆ	19
การอัดขึ้นรูป	20
การเผา	21
การตัดชิ้นงาน	21

การขัดชิ้นงาน	22
การทำ Silver Paste	23
Poling	23
แผนผังกระบวนการผลิตเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	24
ตารางแสดงข้อมูลผลการทดลอง	34
5. เครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	41
หลักการทํางาน	41
6. การทดลอง	44
วิธีการทดลองด้วยอ่างอัลตราโซนิก	44
วิธีการทดลองด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	46
7. ผลการทดลอง	48
ผลการทดลองด้วยอ่างอัลตราโซนิก	48
ผลการทดลองด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	53
8. สรุปผลและข้อเสนอแนะ	54
เอกสารอ้างอิง	56
ภาคผนวก ก	ก-1
ภาคผนวก ข	ข-1
ภาคผนวก ค	ค-1
ภาคผนวก ง	ง-1
ภาคผนวก จ	จ-1

## สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	การเกิดโพรงช่องว่าง	5
2.2	ปฏิกิริยาเอกพันธ์ในของเหลว	8
2.3	ปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ที่บริเวณพื้นผิวรอยต่อของของแข็งซึ่งมีลักษณะเป็นผงกับของเหลว	9
2.4	ปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ที่บริเวณพื้นผิวของของแข็งซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นสัมผัสกับของเหลว	10
2.5	ปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ที่บริเวณพื้นผิวรอยต่อของของเหลวกับของเหลว	10
3.1	ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก	14
3.2	การจัดชั้นของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	15
3.3	แผนภาพวัฏภาคองค์ประกอบ	17
4.1	การอบผงเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	22
4.2	แผนผังกระบวนการผลิตสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	23
4.2	แผนผังกระบวนการผลิตสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (ต่อ)	24
4.3	แผนผังกระบวนการผลิตสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจากผง PZT-PC5	25
4.4	การตวงสาร	28
4.5	การอัดแบบพิมพ์ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก	28
4.6	การถอดชิ้นงานออกจากแบบพิมพ์	29
4.7	การวัดขนาดของชิ้นงาน	29
4.8	เตาอบชนิดท่อ (Tube Furnace)	30
4.9	เครื่องตัดชิ้นงาน (Struers Accutom-5)	30
4.10	กระบวนการ Silver Paste	31
4.11	ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ Silver Paste	31
4.12	การนำชิ้นงานเข้าเตาอบ	32
4.13	ชิ้นงานที่ผ่านการอบ	32
4.14	การทำ Poling ชิ้นงานขนาดบาง	33
4.15	เครื่องมือวัดการทำ Poling	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า	
4.16	โครงสร้างจุลภาคของ $Fe_2O_3$	37
4.17	โครงสร้างจุลภาคของ $PbO$	37
4.18	โครงสร้างจุลภาคของ $Nd_2O_5$	38
4.19	โครงสร้างจุลภาคของ $ZrO_2$	38
4.20	โครงสร้างจุลภาคของ $TiO_2$	39
4.21	โครงสร้างจุลภาคของผงเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (PZT-PC5)	39
5.1	แผนผังขั้นตอนการทำงานของวงจร	40
5.2	วงจรของเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	42
5.3	วงจรขับของเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	43
7.1	ปริมาณไอโอดีนที่ได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรรวม	48
7.2	ปริมาณไอโอดีนที่ได้ต่อปริมาตรรวมหนึ่งหน่วยหน่วย	49
7.3	ปริมาณไอโอดีนที่ได้เมื่อมีการเปลี่ยนระยะเวลาที่ทำการทดลอง	50
7.4	ปริมาณไอโอดีนที่ได้เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำในอ่างทดลอง	51
7.5	ปริมาณไอโอดีนที่ได้เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณของโพแทสเซียมไอโอไดด์	52
7.6	ปริมาณไอโอดีนที่ได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรรวม	53
ก-1	ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงที่มีผลกระทบต่อของเหลว	ก-1
ก-2	การสลายตัวของฟองภายใต้สภาวะความดันภายนอกคงที่ ( $P_h$ )	ก-4
ก-3	การเคลื่อนที่ของของเหลวเข้าไปแทนช่องว่างเมื่อขนาดของรัศมีเล็กลง	ก-4
ก-4	การลดขนาดของผนังฟองจากขนาดรัศมี ( $R_0$ ) ไปเป็น ( $R$ )	ก-6
ข-1	ตำแหน่งขูดรูปชมพู่ในอ่างอัลตราโซนิก	ข-4

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	การอบชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	21
4.2	ผลการวัดขนาดของชิ้นงานหลังขึ้นรูปครั้งที่ 1 และ 2	34
4.3	ผลการวัดขนาดของชิ้นงานหลังขึ้นรูปครั้งที่ 3 และ 4	34
4.4	ผลการวัดขนาดของชิ้นงานหลังขึ้นรูปครั้งที่ 5 และ 6	35
4.5	ร้อยละของการหดตัวของชิ้นงานหลังผ่านการเผา	35
4.6	ผลของชิ้นงานที่ผ่านการทำ Poling	36
ง-1	ผลการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรรวมของสารภายในระบบ	ง-1
ง-2	ผลการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียง	ง-1
ง-3	ผลการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำในอ่างอัลตราโซนิก	ง-2
ง-4	ผลการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮโอไดด์	ง-2
ง-5	ผลการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคาร์บอนเตตระคลอไรด์	ง-3
ง-6	ผลการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรรวมของสารภายในระบบ (เครื่อง)	ง-3

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

- a : ความเร่งของอนุภาค (เมตร/วินาที<sup>2</sup>)
- A : พื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร)
- c : ความเร็วของคลื่นเสียง (เมตร/วินาที)
- F : แรงที่กระทำต่ออนุภาค (นิวตัน)
- K : ค่าดรรชนีของก๊าซ
- KE : พลังงานจลน์ (กิโลกรัม\*เมตร<sup>2</sup>/วินาที<sup>2</sup>)
- m : มวลของอนุภาค (กิโลกรัม)
- P : ความดัน (นิวตัน/ตารางเมตร)
- P<sub>a</sub> : ความดันที่เกิดจากคลื่นเหนือเสียง (นิวตัน/ตารางเมตร)
- P<sub>bub</sub> : ความดันของการขยายตัวของฟอง (นิวตัน/ตารางเมตร)
- P<sub>g</sub> : ความดันของก๊าซภายในฟอง (นิวตัน/ตารางเมตร)
- P<sub>h</sub> : ความดันของของเหลว (นิวตัน/ตารางเมตร)
- P<sub>L</sub> : ความดันของการหดตัวของฟอง (นิวตัน/ตารางเมตร)
- P<sub>m</sub> : ความดันของของเหลวในระยะเริ่มต้นในการสลายตัวของฟอง (นิวตัน/ตารางเมตร)
- P<sub>max</sub> : ความดันสูงสุด (นิวตัน/ตารางเมตร)
- P<sub>v</sub> : ความดันไอของของเหลว (นิวตัน/ตารางเมตร)
- P'<sub>bub</sub> : ความดันใหม่ของการขยายตัวของของเหลว (นิวตัน/ตารางเมตร)
- P'<sub>g</sub> : ความดันใหม่ของก๊าซภายในฟอง (นิวตัน/ตารางเมตร)
- P'<sub>h</sub> : ความดันใหม่ของของเหลว (นิวตัน/ตารางเมตร)
- R : รัศมีของฟอง (เซนติเมตร)
- R<sub>0</sub> : รัศมีของฟองในสภาวะสมดุล (เซนติเมตร)
- R<sub>k</sub> : รัศมีวิกฤตของฟอง (เซนติเมตร)
- R<sub>m</sub> : รัศมีเริ่มต้นในการสลายตัวของฟอง (เซนติเมตร)
- R<sub>min</sub> : รัศมีของฟองที่มีขนาดเล็กที่สุด (เซนติเมตร)
- R' : รัศมีของฟองที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลา (เซนติเมตร/วินาที)
- T : อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
- T<sub>max</sub> : อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียส)
- v : ความเร็วของอนุภาค (เมตร/วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- V : ปริมาตรของฟอง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
- V' : ปริมาตรของฟองใหม่ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
- $V_{\min}$  : ปริมาตรของฟองที่มีขนาดเล็กที่สุด (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
- $\rho$  : ความหนาแน่นของของเหลว (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
- $\omega_A$  : ความเร็วรอบ (รอบ/วินาที)
- z : ตัวแปรที่กำหนดให้มีค่า  $= (R_m/R)^3$  (ไม่มีหน่วย)



## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความเป็นมา

การนำคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic Wave) มาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะทางด้านเคมี หรือที่เรียกว่า "Sonochemistry" เป็นการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอันเป็นผลเนื่องมาจากการกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียง ซึ่งสามารถนำมาใช้ในงานด้านต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการทำความสะอาดอุปกรณ์หรือเครื่องมือต่าง ๆ การกระตุ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพื่อช่วยในการสังเคราะห์สารเคมีต่าง ๆ เช่น สารอินทรีย์ที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำ ๆ ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization) การบำบัดน้ำเสียและการกำจัดสารเคมีที่เป็นอันตรายจำพวกสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถระเหยได้ (Volatile Organic Compound:VOC) รวมทั้งการนำมาใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor) เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้สูงขึ้น

อย่างไรก็ดีทฤษฎีและความรู้เกี่ยวกับบทบาทของคลื่นเหนือเสียงที่มีต่อปฏิกิริยาทางเคมียังคงมีทำการศึกษาวิจัยกันอยู่ในขณะนี้ เพื่อที่จะทราบถึงกลไกที่เกิดขึ้นตลอดจนปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาขณะที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงเป็นตัวกระตุ้น

สำหรับตัวเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจำเป็นที่จะต้องมีส่วนทำหน้าที่กำเนิดคลื่นเหนือเสียงออกมาซึ่งวัสดุที่ใช้ในส่วนนี้จะทำมาจากสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (Piezoelectric Ceramic) โดยมีคุณสมบัติพิเศษ คือ เมื่อให้แรงดันหรือแรงกลกระทำต่อตัวเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าออกมา ในทางกลับกันเมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ตัวเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกก็จะสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นแรงดันออกมา

สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ชนิดที่นำมาใช้ในการศึกษาในโครงการนี้จะเป็นชนิดเลด-เซอร์โคเนต-ไททานเนต (Lead-Zirconate-Titanate:PZT) ซึ่งเป็นชนิดที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

## วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาและสังเคราะห์สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกในการนำมาใช้ประกอบเป็นเครื่องมือกำเนิดคลื่นเหนือเสียง
2. ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคลื่นเหนือเสียงต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันระบบของน้ำ-โพแทสเซียมไอโอไดด์-คาร์บอนเตตระคลอไรด์

## ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาถึงส่วนประกอบที่สำคัญต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ได้แก่ ตัวหัวขับ (Transducer) เพียโซอิเล็กทริกเซรามิก วงจรไฟฟ้า และสร้างเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง
2. ทดลองปฏิกิริยาภายใต้การกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียงทั้งจากอ่างอัลตราโซนิก (Ultrasonic Bath) และเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ประดิษฐ์ขึ้น

## ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาและสังเคราะห์ตัวเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกโดยทำการทดลอง ณ ห้องทดลองประจำศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (National Metal and Material Technology Center: MTEC) เพื่อที่จะนำมาใช้ประกอบเป็นเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง สำหรับการสังเคราะห์ตัวเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่ทำการทดลอง จะให้คลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ 28.5 กิโลเฮิร์ตซ์
2. ศึกษาและทดลองปฏิกิริยาของระบบของน้ำ-โพแทสเซียมไอโอไดด์-คาร์บอนเตตระคลอไรด์ในอ่างอัลตราโซนิก รวมทั้งปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยา
3. สร้างเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง โดยใช้แบบวงจรไฟฟ้าและอุปกรณ์รวมทั้งการสร้างเครื่อง ณ บริษัท ดี. เอส. ซี. กรุ๊ป จำกัด
4. ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทำการทดลองในอ่างอัลตราโซนิกและเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ประดิษฐ์ขึ้น

## ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับปัจจัยซึ่งมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา
2. นำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการควบคุมสภาวะให้เกิดความเหมาะสมกับปฏิกิริยา
3. สามารถทำการประดิษฐ์เครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียงขึ้นใช้เองและนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการได้โดยการปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับงาน



## บทที่ 2 Sonochemistry

### Sonochemistry

Sonochemistry เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมี อันเป็นผลเนื่องมาจากการถูกกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียง [1] การนำคลื่นเหนือเสียงมาใช้จะทำให้เกิดโพรงช่องว่างขึ้น (Cavitation) ซึ่งเป็นตัวสำคัญในการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยคลื่นเสียงจะถ่ายทอดพลังงานเชิงกลไปยังโมเลกุลของสารทำให้โมเลกุลมีการสั่นตามจังหวะของคลื่นเสียง คือ จังหวะอัด (Compression) และจังหวะขยาย (Rarefaction) เมื่อระดับพลังงานสูงพอในจังหวะขยายของคลื่นเสียง โมเลกุลของสารก็จะเกิดเป็นโพรงช่องว่างขึ้น และขยายขนาดต่อไปจนเกิดการสลายตัวซึ่งจะให้อนุมูลและความดันที่สูงมากออกมา

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดขึ้นในสารที่มีสถานะเป็นของเหลวอย่างน้อย 1 วัฏภาค เนื่องจากสามารถเกิดเป็นโพรงช่องว่างได้ดี ปฏิกริยาที่เกิดจากปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างโพรงช่องว่างกับของเหลว ซึ่งการเกิดปฏิกริยาจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงในช่วงเวลาสั้น ๆ แต่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาที่มีการกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียง

### กลไกการเกิดโพรงช่องว่าง (Mechanisms of Cavitation)

#### ขั้นตอนที่ 1 การก่อตัว (Nucleation)

เมื่อโมเลกุลของสารได้รับการถ่ายทอดพลังงานเชิงกลจากคลื่นเหนือเสียงแล้ว โมเลกุลจะเกิดการสั่นสะเทือนตามจังหวะของคลื่นเสียงที่ให้เข้าไปคือ จังหวะอัด (Compression) และจังหวะขยาย (Rarefaction) สลับกันไป

---

[1] McGraw-Hill Concise Encyclopedia of Science & Technology, 2<sup>nd</sup> ed.

(McGraw-Hill Inc, 1989) p.1721

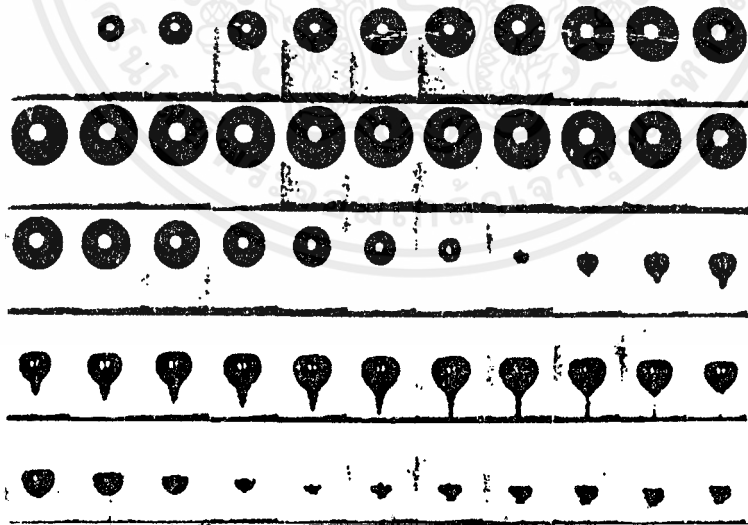
จนเมื่อถึงระดับพลังงานหนึ่ง การสั่นตามจังหวะของคลื่นเสียงในจังหวะขยาย จะสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลโดยการแยกโมเลกุลออกจากกันจนทำให้เกิดเป็นโพรงช่องว่างขึ้น โพรงช่องว่างขนาดเล็กจำนวนมากที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า นิวเคลียส (Nucleus) ซึ่งจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-10 ไมโครเมตร

### ขั้นตอนที่ 2 การเติบโต (Growth)

โพรงช่องว่างขนาดเล็กจำนวนมากที่เกิดขึ้นจะได้รับการถ่ายทอดพลังงานต่อไป และมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ จนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 60-200 ไมโครเมตรทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นเสียงที่ให้เข้าไป ซึ่งจะมีลักษณะเป็นฟอง (Bubble) จำนวนมาก

### ขั้นตอนที่ 3 การสลายตัว (Collapse)

เมื่อฟองได้รับการถ่ายทอดพลังงานจนถึงขนาดวิกฤติแล้วก็จะเกิดการสลายตัวของฟอง ซึ่งจะทำให้เกิดความดันตั้งแต่ระดับร้อยจนถึงหลายพันบรรยากาศ และอุณหภูมิในระดับตั้งแต่พันองศาเคลวินขึ้นไป ระยะเวลาในการสลายตัวจะใช้เวลาเพียงไม่กี่ไมโครวินาทีเท่านั้น



รูปที่ 2.1 การเกิดโพรงช่องว่าง

## ลักษณะของโพรงช่องว่าง

1. โพรงช่องว่างที่ไม่เสถียร (Transient Cavitation) คือ โพรงช่องว่างที่มีการก่อตัวและการเติบโตจนกระทั่งการสลายตัวในช่วงของการสั่นตามจังหวะของคลื่นเสียงเพียง 1-2 รอบเท่านั้น ซึ่งเป็นช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก

2. โพรงช่องว่างที่เสถียร (Stable Cavitation) คือ โพรงช่องว่างที่มีการก่อตัวและการเติบโตจนกระทั่งการสลายตัวในการสั่นหลายรอบ โดยเกิดจากการที่โพรงช่องว่างที่เกิดขึ้นนั้นมีขนาดที่สมดุลกับการสั่นตามจังหวะของคลื่นเสียงที่ให้ ทำให้ไม่สลายตัวไปในทันทีเหมือนกับโพรงช่องว่างที่ไม่เสถียร

## ปัจจัยที่มีผลต่อโพรงช่องว่าง

1. คลื่นเหนือเสียง เป็นสิ่งที่มีผลสำคัญต่อโพรงช่องว่างที่เกิดขึ้น ปัจจัยที่มีผลกระทบได้แก่ ความถี่ของคลื่นเสียง และกำลังของคลื่นเสียง กล่าวคือ

1.1) ความถี่ของคลื่นเสียง จะต้องมีความเหมาะสม หากมีความถี่สูงจนเกินไป จะทำให้อัตราการเกิดโพรงช่องว่างน้อยลง เนื่องจากความถี่ของคลื่นเสียงที่มีความถี่สูง จังหวะการอัดและจังหวะการขยายจะมีช่วงเวลาสั้นลงจึงเป็นผลทำให้ไม่มีระยะเวลาเพียงพอในการที่จะแยกโมเลกุลออกจากกันเพื่อที่จะเกิดเป็นโพรงช่องว่างขึ้น

1.2) กำลังของคลื่นเสียง จะต้องอยู่ในระดับที่สูงพอที่จะทำให้เกิดโพรงช่องว่างได้ และจะต้องสูงพอที่จะรักษาระดับการเกิดโพรงหรือช่องว่างอีกด้วย การเพิ่มกำลังของคลื่นเสียงจะกระทำได้โดยการเพิ่มแอมพลิจูดหรือจากการสั่นสะเทือนของอุปกรณ์ที่ให้คลื่นเหนือเสียงออกมานั้นคือ Horn แต่การเพิ่มกำลังของคลื่นเสียงจะทำให้เกิดผลดังนี้

(1) การเกิด Phase Lag ระหว่างการสั่นสะเทือนของของเหลวและการสั่นสะเทือนของ Horn หรือที่เรียกว่า Coupling Effect

(2) การเพิ่มกำลังของคลื่นเสียงจะทำให้มีอัตราการเกิดโพรงช่องว่างสูง อาจทำให้เกิดการรวมตัวกันกลายเป็นฟอง ซึ่งจะลดการสลายตัวของฟองได้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีไม่ดีพอ

2. คุณสมบัติทางฟิสิกส์ จะมีผลต่อของเหลวซึ่งเป็นตัวกลางที่ทำให้เกิดโพรงช่องว่าง ในการทำให้โพรงช่องว่างเกิดขึ้นนั้นจำเป็นที่จะต้องเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุลให้ได้ เช่น

ความหนืดของของเหลว ของเหลวที่มีความหนืดมากจะทำให้เกิดโพรงช่องว่างได้ยากกว่าของเหลวที่มีความหนืดน้อย ของเหลวที่มีแรงตึงผิวต่ำจะทำให้เกิดโพรงหรือช่องว่างได้ง่ายขึ้น

การเกิดโพรงช่องว่างจะมีความเกี่ยวข้องกับความดันไอของของเหลวที่ใช้ ถ้าของเหลวที่ใช้มีความดันไอต่ำการเกิดโพรงช่องว่างจะเกิดขึ้นได้ไม่ตื้นัก เนื่องจากความดันไอของของเหลวจะมีส่วนช่วยในการทำให้เกิดโพรงได้ดีขึ้นหากมีความดันไอน้อยการเกิดโพรงหรือช่องว่างจะเกิดขึ้นได้ไม่ตื้นัก ในทางกลับกันหากของเหลวที่ใช้มีความดันไอสูงการสลายตัวของฟองจะมีความรุนแรงน้อยลง เนื่องจากจะมีความดันบางส่วนเป็นตัวรองรับหรือซับแรงของการสลายตัวของฟองที่เกิดขึ้น ดังนั้นการเลือกตัวกลางที่ใช้ในการเกิดโพรงช่องว่างนั้นจะต้องเลือกของเหลวที่มีความดันไอไม่ต่ำหรือสูงจนเกินไป

3. อุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ของเหลวตัวกลางมีความดันไอสูงขึ้น ซึ่งจะลดความรุนแรงในการสลายตัวของฟอง ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิต่ำที่อยู่ล้อมรอบฟองจะสูงกว่าภายในฟองทำให้ความดันไอด้านนอกฟองสูงกว่าความดันไภายในฟอง ดังนั้นอุณหภูมิต่ำใช้จึงควรจะใช้อุณหภูมิต่ำ เพื่อไม่ให้เกิดความดันไอที่สูงมากจนเกินไป

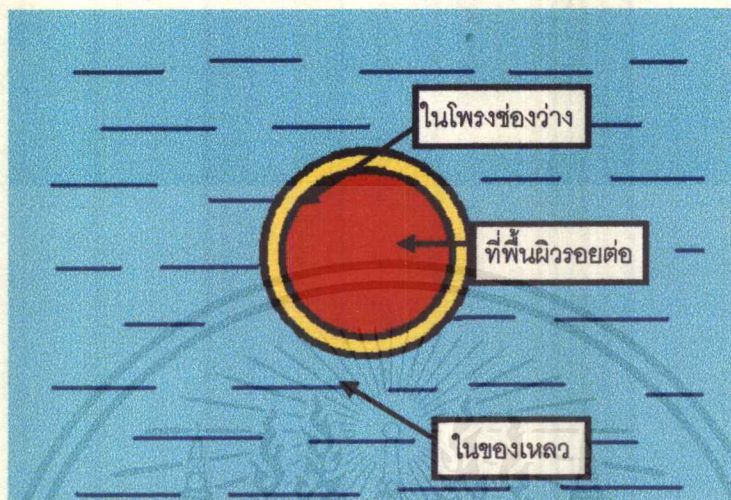
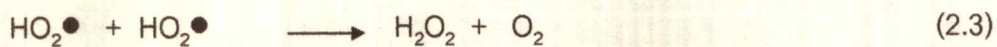
4. ก๊าซที่ละลายอยู่ ก๊าซที่ละลายอยู่ในของเหลวตัวกลางจะมีผลสำคัญต่อการสลายตัวของฟองถ้าหากเป็นก๊าซที่มีการถ่ายเทความร้อนได้น้อยจะทำให้การสลายตัวนั้นให้ความร้อนที่สูงมากกว่าปกติ เช่น ก๊าซซีนอน (Xenon) แต่ถ้าหากเป็นก๊าซที่มีการถ่ายเทความร้อนได้ดี อาจทำให้การเกิดปฏิกิริยาหยุดลงได้ เช่น ก๊าซฮีเลียม (Helium)

## ชนิดของปฏิกิริยา

1. ปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous Reaction) ได้แก่ปฏิกิริยาที่สารมีสถานะเป็นของเหลว 2 ชนิดผสมกันอยู่ หรือในบางครั้งอาจเป็นสารชนิดเดียว เมื่อสารที่มีสถานะเป็นของเหลวถูกกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียง พันธะระหว่างโมเลกุลจะถูกสลายออกกลายเป็นตัวฟรีแรดิคัล (Free Radical)

ตัวอย่างปฏิกิริยาที่แสดงนี้เป็นปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากน้ำเมื่อถูกกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียง และได้ออกมาเป็นฟรีแรดิคัลและรวมตัวกันเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังสมการด้านล่าง

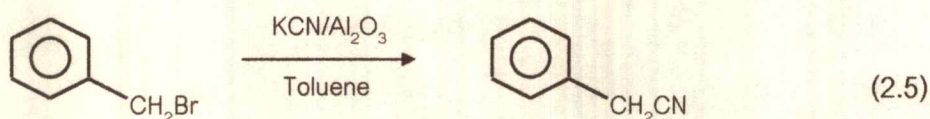




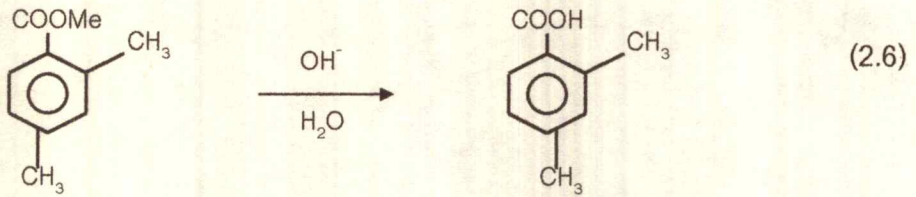
รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาเอกพันธ์ในของเหลว

2. ปฏิกิริยาวิวิพันธ์ (Heterogeneous Reaction) ได้แก่ปฏิกิริยาที่สารมีสถานะเป็นของเหลวกับของเหลว 2 ชนิดที่ไม่ละลายกัน หรือปฏิกิริยาที่สารมีสถานะเป็นของเหลวกับของแข็ง 2 ชนิด

ตัวอย่างปฏิกิริยาต่อไปนี้ จะเป็นปฏิกิริยาของ สารที่มีสถานะเป็นของเหลวกับของเหลว และของแข็งกับของเหลว ปฏิกิริยา (2.5) เป็นปฏิกิริยาการผลิตสารเบนซิลไซยาไนด์ (Benzyl Cyanide) จากเบนซิลโบรไมด์ (Benzyl Bromide) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างสารที่เป็นของเหลวกับของแข็ง



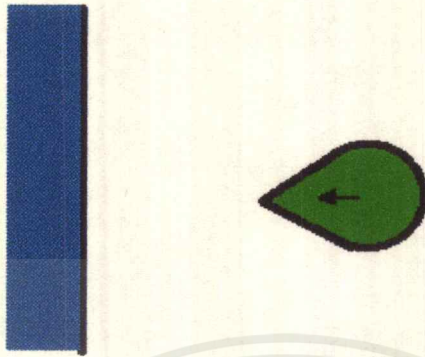
ปฏิกิริยา (2.6) เป็นปฏิกิริยาเอสเทอร์ไฮโดรไลซิสซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างสารที่เป็นของเหลวกับของเหลว



### รูปที่ 2.3 ปฏิกริยาวิวิธพันธ์ที่บริเวณพื้นผิวยอดของของแข็งซึ่งมีลักษณะเป็นผงกับของเหลว

#### หมายเหตุ

การเกิดโพรงช่องว่างขึ้นในปฏิกริยาวิวิธพันธ์ของสารที่มีสถานะเป็นของเหลวกับของแข็ง จะมีลักษณะแตกต่างไปจากปฏิกริยาระหว่างของเหลวกับของเหลว กล่าวคือเมื่อเกิดเป็นโพรงช่องว่างขึ้นและพัฒนาจนเป็นฟองแล้ว ฟองที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะเคลื่อนที่เข้าหาสารที่มีสถานะเป็นของแข็งด้วยความเร็วสูง (มากกว่า 400 กิโลเมตรต่อชั่วโมงขึ้นไป) เมื่อฟองเคลื่อนที่เข้าไปชนกระทบกับผิวของแข็งแล้วจะเกิดการสลายตัวและให้ความร้อนและอุณหภูมิสูงเช่นเดียวกับการเกิดโพรงช่องว่างในสารที่มีสถานะเป็นของเหลว



รูปที่ 2.4 ปฏิกริยาวิวิธพันธ์ที่บริเวณพื้นผิวของของแข็งซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นสัมผัสกับของเหลว



รูปที่ 2.5 ปฏิกริยาวิวิธพันธ์ที่บริเวณพื้นผิวรอยต่อของของเหลวกับของเหลว

### การนำ Sonochemistry มาประยุกต์ใช้

Sonochemistry สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านเคมีได้เป็นอย่างมาก โดยแบ่งออกเป็นด้านต่าง ๆ ดังนี้

1. งานทางด้านสารสังเคราะห์สารเคมี เช่นการสังเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาได้น้อย เมื่อถูกกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียงอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดได้มากขึ้นและใช้เวลาน้อยลง เช่น ในปฏิกิริยาการเตรียมกรีนยาร์ดรีเอเจนต์ (Grignard Reagent) อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเป็น 60 เท่าจากเดิมในปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างแมกนีเซียมและ 2-โบรโมบิวเทน (2-Bromo Butane) [2] ภายใต้การกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียง หรือการผลิตไบเฟนนิลด้วยการให้ความร้อนแก่ฮาโลเบนซีน (Halobenzene) ซึ่งมีการให้ทองแดงมากเกินไป ภายใต้การกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียง อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น 30 เท่าของปฏิกิริยาเดิม และปริมาณการใช้ทองแดงก็ลดลงด้วย [2]

นอกจากนี้ในกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) จะใช้คลื่นเหนือเสียงในการกำหนดและจัดเรียงสายพอลิเมอไรเซชันซึ่งจะมีผลทำให้มวลโมเลกุลของสารพอลิเมอไรเซชันและความหนืดของสารพอลิเมอไรเซชันลดลง

2. งานทางด้านชีวเคมีและชีววิทยา จะใช้คลื่นเหนือเสียงในกระบวนการโฮโมจีไนเซชัน (Homogenization) และการแตกตัวของเซลล์ (Cell Disruption) การใช้คลื่นเหนือเสียงไปทำลายผนังเซลล์เพื่อนำสารองค์ประกอบภายในมาทำการศึกษาวิจัยต่อไป

3. งานทางด้านวิศวกรรม เช่น การตัด การเชื่อม รวมทั้งการใช้คลื่นเหนือเสียงในเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor) แบบต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวปฏิกรณ์เดิมให้สูงขึ้นตามลักษณะการใช้งานของเครื่องปฏิกรณ์นั้น ๆ เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพในการลดขนาดของสารที่ต้องการลดขนาด การเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารที่ต้องการผลิต เป็นต้น

นอกจากนี้ยังสามารถใช้คลื่นอัลตราโซนิคทำความสะอาดเครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ และใช้ในการ Reactivity ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ได้อีกด้วย รวมทั้งเป็นตัวกระตุ้นให้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วย การนำมาใช้งานจะมีข้อดี เช่น จะช่วยลดอุณหภูมิที่ใช้ตามปกติให้ต่ำลงหรือการเพิ่มตัวที่มีพลังงานสูง (High energy species) ซึ่งไม่สามารถกระตุ้นได้ด้วยการใช้แสงหรือการใช้อุณหภูมิโดยทั่วไป

---

[2] A. B. Pandit, and V. S. Mohoklar, "Harness Cavitation to Improve Processing": Chemical Engineering Progress (July 1996): 57-69

[3] Ashish Bhatnagar and H. Michael Cheung, "Sonochemical Destruction of Chlorinated C1 and C2 Volatile Organic Compounds in Dilute Aqueous Solution": Environmental Science and Technology (Vol. 28, No. 8, 1994): p.1481-1488

4. งานทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การบำบัดน้ำเสียโดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำที่ปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์ที่ระเหยเป็นไอ (Volatile Organic Compound:VOC) เช่น คลอโรฟอร์ม, คาร์บอนเตตระคลอไรด์ เป็นต้น [3] รวมทั้งยังสามารถกำจัดสารคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbon:CFC) [4] ได้อีกด้วย



---

[4]H. Michael Cheung and Shreekumar Kurup, "Sonochemical Destruction of CFC11 and CFC13 in Dilute Aqueous Solution": Environmental Science and Technology (Vol. 28, No. 9, 1994): p. 161-1622

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3 เพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectricity) ถูกค้นพบโดย Piere and Jacques Curie ในปี ค.ศ.1892 คำว่า เพียโซ (piezo) มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก คือ "Piezin" ซึ่งแปลว่า แรงดันหรือแรงกด เมื่อให้แรงกดต่อผลึกบางชนิด เช่น ควอตซ์ (Quartz) หรือสารเพียโซอิเล็กทริก ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าออกมาจากวัสดุนั้น ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเพราะแรงกลที่กระทำต่อผลึกจะกระตุ้นให้เกิดสภาพขั้วทางไฟฟ้า (Electrical Dipole) ในผลึกที่ไม่มีจุดกึ่งกลางของสมมาตร (Anisotropic Crystals) การที่แรงกลเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นเมื่อมีการให้แรงกระทำทางกลต่อวัสดุนั้น หรือในทางกลับกัน สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดได้แรงดันออกมาเมื่อมีการให้กระแสไฟฟ้าเข้าไป ซึ่งจำนวนประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นหรือขนาดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และองค์ประกอบของวัสดุนั้น

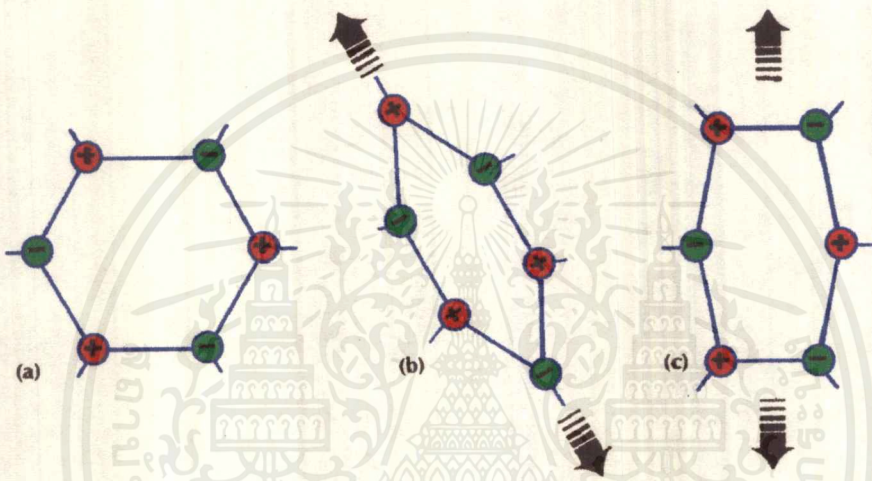
ในกรณีของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกส์ ชนิดเลด-เซอร์โคเนต-ไททานต (Piezoelectric Ceramics - PZT) มักจะประกอบไปด้วยเลดออกไซด์ (PbO) ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) เซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO<sub>2</sub>) และสารตัวเติม (Additives) ที่เป็นออกไซด์ของ Rare Earths ทั้งนี้ ส่วนผสม ขนาดและรูปร่างของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจะมีความแตกต่างกันออกไป โดยขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน นอกจากนี้ก่อนที่จะนำเอาเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกมาใช้งานนั้น จะต้องผ่านกระบวนการทำขั้ว (Electroding) โดยใช้ Silver Paste และกระบวนการ (Poling) ด้วยสนามไฟฟ้าแรงสูงก่อน เพื่อให้ Electrical Domain มีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของสนามไฟฟ้า จึงจะได้คุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกออกมา

#### ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

เงื่อนไขที่สำคัญในการเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก คือ การที่โครงสร้างของผลึกเกิดความไม่สมมาตรที่บริเวณกึ่งกลางของผลึก เมื่อมีแรงดันหรือแรงกดมากระทำต่อผลึกก็จะแสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีของผลของความเค้น 2 มิติที่กระทำบนโครงสร้างผลึกรูปหกเหลี่ยม รูปที่ 3.1(a) แสดงถึง Unit Cell ที่ยังไม่มี ความเค้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระทำต่อผลึก จุดศูนย์กลางของประจุบวกและประจุลบจะเหมือนกัน รูปที่ 3.1(b) เมื่อให้ความดันกระทำต่อผลึก ผลึกจะเกิดการเสียรูปและจะเกิดการแยกจุดศูนย์กลางของประจุบวกและประจุลบออกจากกัน ทำให้เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก รูปที่ 3.1(c) ถ้าความดันที่ใส่เข้าไปมีทิศทางไม่ถูกต้อง การเสียรูปจะไม่ทำให้จุดศูนย์กลางของประจุบวกและประจุลบเกิดการเคลื่อน จึงทำให้ไม่เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกขึ้น



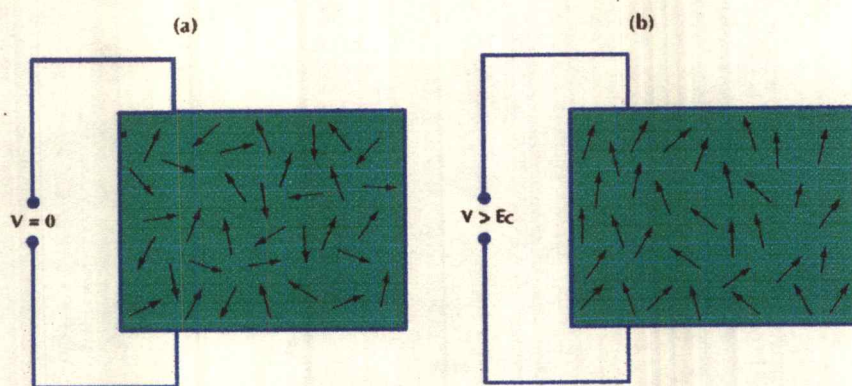
รูปที่ 3.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

## Poling

การทำให้ผลึกของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกส์เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกขึ้นได้นั้น จำเป็นต้องทำการจัดสภาพขั้วภายในแต่ละเกรน (Grain) ก่อน โดยทั่วไปสภาพขั้วภายในของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจะมีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบทำให้มีค่าผลรวมของสภาพขั้วเป็นศูนย์ หรือไม่เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก ดังนั้นจึงทำการจัดเรียงสภาพขั้วให้เป็นระเบียบเสียก่อน เรียกว่า "Poling"

กระบวนการ Poling จะประกอบไปด้วย การให้ความร้อนแก่เซรามิกเพื่อทำให้เกรนหรือกลุ่มของเกรนเคลื่อนที่อย่างอิสระ หลังจากนั้นทำการให้สนามไฟฟ้าแก่เซรามิก การจัดสภาพขั้วจะทำให้แต่ละเกรนมีแนวโน้มในการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า เมื่อเซรามิกเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องทิศทางของสภาพขั้วภายในเกรนจะคงที่ ทำให้เซรามิกนั้นเปลี่ยนเป็นเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การจัดตัวของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

### กระบวนการผลิตสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

กระบวนการผลิตเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจะมีขั้นตอนในการผลิตทั้งหมดประมาณ 16 ขั้นตอนด้วยกัน คือ เริ่มตั้งแต่การชั่งน้ำหนัก (Weighing) การผสม (Blending) การบด (Milling) สารตั้งต้นอันประกอบไปด้วย เลดออกไซด์ (PbO) ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) เซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO<sub>2</sub>) และสารตัวเติม (Additives) ที่เป็นออกไซด์ของ Rare Earths เข้าด้วยกัน หลังจากนั้นจะนำเอาสารที่ได้มาทำการเผาแคลไซน์ (Calcined) เพื่อให้สารเริ่มทำปฏิกิริยาในการจัดตัวเป็นองค์ประกอบของเลดเซอร์โคเนทไททาเนท (Lead Zirconate Titanate) หลังจากนั้นจึงนำมาสวมสารยึดเกาะ (Binder) และสารหล่อลื่น (Lubricant) แล้วนำมาบดเปียก (Wet Mill) เพื่อให้ได้สารที่มีขนาดอนุภาคเล็กละเอียด แล้วจึงผ่านกระบวนการพ่นละอองแห้ง (Spray Dried) เพื่อให้ได้ผงที่มีลักษณะของอนุภาคไหลได้อย่างอิสระ (Free Flowing Particle) พร้อมทั้งจะทำการขึ้นรูปโดยการอัด โดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกหรือ Isotactic Pressing ที่ความดัน 6-100 ตัน

หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดสารยึดเกาะและสารหล่อลื่นที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปแล้วจึงนำเอาชิ้นงานมาวางเรียงกันในถ้วยอลูมินาที่มีฝาปิดแล้วนำมาเผาอีกครั้งที่อุณหภูมิประมาณ 1,250 องศาเซลเซียส ชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่ได้จะถูกนำมาตกแต่งด้วยการขัดและการตัดเพื่อให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ แล้วจึงทำการปรับค่าความถี่สั่นพ้อง (Resonance Frequency) และค่าการเก็บประจุ (Capacitance) ให้มีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงของมาตรฐานอุตสาหกรรม สำหรับการใช้งานของเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นงานจะถูกนำมาทำซ้ำโดยใช้เงิน ทอง นิกเกิล แพลทินัม พาลาเดียม มาพิมพ์ (Screen Printing) ลงบนชิ้นงาน แล้วจึงนำเอาชิ้นงานที่ผ่านการทำซ้ำแล้วมาเผาอีกครั้งหนึ่งที่อุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำเอาชิ้นงานไปทำกระบวนการ Poling ที่อุณหภูมิสูงโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (Direct Current High Voltage) ชิ้นงานที่ผ่านการ Poling แล้วจะมีคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริก แล้วจึงนำเอาชิ้นงานไปผ่านการทดสอบและวัดคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Coefficient) เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพตามมาตรฐานที่ต้องการซึ่งจะได้ออกมาเป็น เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่สมบูรณ์พร้อมใช้งาน

### คุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกสามารถจะนำมาใช้เป็นตัวทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ซึ่งเป็นตัวแปลงพลังงานเชิงกลให้เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานเชิงกล ความเหมาะสมสำหรับตัวเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับการทำตัวทรานสดิวเซอร์ จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าและฟิสิกส์ดังต่อไปนี้

ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coefficient) เป็นความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสภาพซ้ำ หรือความเครียดที่เกิดขึ้นในทิศทางหนึ่ง อันเป็นผลเนื่องมาจากความเค้นของเซรามิก หรือจากสนามไฟฟ้าในอีกทิศทางหนึ่ง

ค่าแฟกเตอร์คัปปลิงเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coupling factor) เป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพของตัวเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล หรือการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า

อัตราการคงสภาพเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric aging rate) เป็นอัตราเร็วของปริมาณการเสื่อมคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกกับเวลา อันเนื่องมาจากกระบวนการผันกลับตามธรรมชาติของกระบวนการทำซ้ำ

### ลักษณะเด่นของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่ประกอบไปด้วย เลดเซอร์โคเนียมออกไซด์ ( $\text{PbZrO}_3$ ) - เลดไทเทเนียมออกไซด์ ( $\text{PbTiO}_3$ ) ในรูปของสารละลายของแข็ง (Solid Solution) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีดังนี้

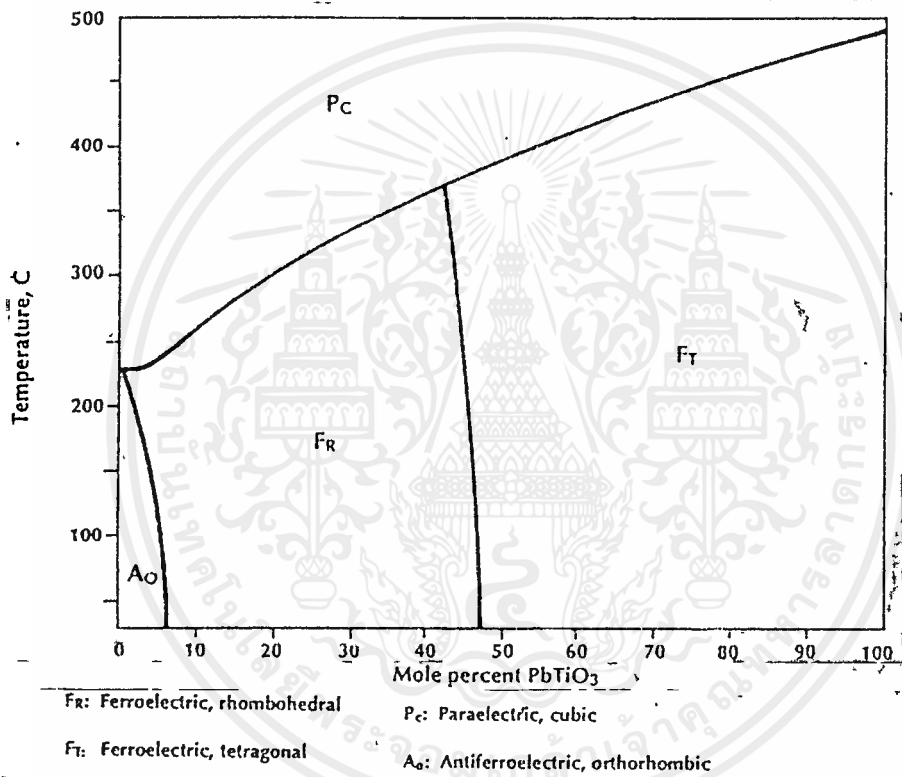
-มีจุด Curie point สูง ซึ่งเป็นจุดอุณหภูมิที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นแม่เหล็กของสาร (ประมาณ 360 องศาเซลเซียส) ทำให้สามารถนำมาใช้ในงานอุณหภูมิสูงได้

-มีประสิทธิภาพในการทำขั้วสูง

-มีค่าค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกและค่าแฟกเตอร์คัปปลิงเพียโซอิเล็กทริกสูง

-มีความสะดวกในการปรับแต่งคุณสมบัติและส่วนประกอบของสาร

### แผนภาพวัฏภาคของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก



รูปที่ 4.3 แผนภาพวัฏภาคองค์ประกอบ

สารละลายของแข็ง (Solid Solution) เกิดจากการจัดรูปของสารระหว่าง เลดเซอร์โคเนียมออกไซด์ ( $\text{PbZrO}_3$ ) และเลดไทเทเนียมออกไซด์ ( $\text{PbTiO}_3$ ) ตามแผนผังที่แสดงอยู่ ซึ่งจะแสดงส่วนประกอบของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกส์ที่นำมาใช้ประโยชน์ได้ ส่วนประกอบของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกส์ที่นำมาใช้ประโยชน์มากที่สุดจะอยู่บริเวณใกล้กับ 47 โมลเปอร์เซ็นต์ของเลดไทเทเนียมออกไซด์ ( $\text{PbTiO}_3$ ) บริเวณนี้จะเรียกว่า Morphotropic ซึ่งหมายถึงบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่าง Tetragonal และ Rhombohedral ของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกส์ที่องค์ประกอบเดิมโดยไม่คำนึงถึงอุณหภูมิ



#### บทที่ 4

### การทดลองผลิตสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

#### การตรวจดูโครงสร้างจุลภาคของผงออกไซด์ของโลหะชนิดต่าง ๆ

##### อุปกรณ์และสารเคมี

1. ขวดแก้วขนาดเล็ก 6 ขวด
2. สารเคมีตัวอย่างดังต่อไปนี้ [ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{Nd}_2\text{O}_5$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  และผงเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก(PZT-5)]
3. อะซีโตน
4. Aluminum Mount จำนวน 6 ชิ้น
5. หลอดหยด (Dropper)
6. อ่างอัลตราโซนิก (Ultrasonic Bath)
7. Fine Coater (JEOL JFC-1200)
8. Scanning Electron Microscope (JEOL JSM-5410)

##### ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับตรวจสอบดูโครงสร้างด้วย Scanning Electron Microscope

1. ใส่อะซีโตนปริมาตรประมาณ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรลงในขวดแก้ว
2. บรรจุสารตัวอย่างที่ต้องการส่องผลึกลงไปอย่างละ 1 ขวด แล้วปิดฝา
3. นำขวดที่บรรจุสารตัวอย่างทั้ง 6 ขวดลงไปในอ่างอัลตราโซนิก (เพื่อทำให้สารตัวอย่างกระจายตัวดี)
4. ดูดสารตัวอย่างแล้วหยดลง Aluminum Mount ตัวอย่างละชิ้นจนครบ
5. นำ Aluminum Mount เข้าเครื่อง Fine Coater เพื่อการฉาบ Aluminum Mount ด้วยทองเพื่อให้มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าในบรรยากาศของอาร์กอน (Ar) เป็นเวลา 150 วินาที
6. นำ Aluminum Mount ที่ฉาบด้วยทองใส่ลงในที่จับ (Holder) หลังจากนั้นนำเข้าเครื่อง Scanning Electron Microscope เพื่อส่องดูลักษณะผลึกของสารตัวอย่างต่อไป

## วิธีการทดลองผลิตสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

### ขั้นที่ 1 การอัดขึ้นรูป

#### อุปกรณ์

1. ผงเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกสำเร็จรูป (PZT PC5)
2. แม่พิมพ์ (Die) มีส่วนประกอบทั้งหมด 5 ชั้น
3. เครื่องอัดไฮดรอลิก (Hydraulic Press: Graseby Specac)
4. อุปกรณ์วัดเวอร์เนีย

#### ขั้นตอน

1. ชั่งน้ำหนักผงเพียโซเซรามิกสำเร็จรูป (PZT-PC5) 55 กรัม
2. นำผงที่ชั่งแล้วใส่ลงในแม่พิมพ์ซึ่งมีส่วนประกอบทั้งหมด 5 ชั้น
3. นำแม่พิมพ์เข้าเครื่องอัดไฮดรอลิกด้วยความดัน 7 ตัน เป็นเวลา 2 นาที แล้วจึง

#### คลายออก

4. นำแม่พิมพ์ออกมาแล้วกลับหัว ถอดแม่พิมพ์ขึ้นบนออก ใส่ที่ครอบใหม่เพื่อทำการอัดแม่พิมพ์ให้หลุดออกจากชิ้นงานได้ง่ายขึ้น
5. ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1-4 อีกครั้งหนึ่งเพื่อให้ได้ชิ้นงาน 2 ชิ้น
6. ทำการวัดขนาดของชิ้นงานและทำการชั่งน้ำหนักทั้ง 2 ชิ้น

### ขั้นที่ 2 การเผา

#### อุปกรณ์

1. ภาดอลูมินา และฝาครอบ (ทนไฟและทนความร้อนได้ประมาณ 1600 องศาเซลเซียส)
2. เตาอบชนิดท่อ (Tube Furnace: Lenton Furnaces)

#### ขั้นตอน

1. นำชิ้นงานทั้ง 2 ชิ้นวางลงบนภาดอลูมินาซึ่งมีผงเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่เผาแล้วรองอยู่ด้านล่างของภาด (ต้องเกลี่ยผงให้มีผิวหน้าเรียบเสมอกัน) และปิดฝาครอบอลูมินา
2. นำภาดอลูมินาใส่เข้าไปในเตาอบชนิดท่อ ซึ่งประกอบด้วย แท่งความร้อน 4 แท่ง และบริเวณให้ความร้อน (Heating Zone) อยู่บริเวณกลางท่อ ทำการตั้งโปรแกรมการอบแล้วเดินเครื่อง

## หมายเหตุ

การรองด้านล่างของภาคอุณหภูมิด้วยผงเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่เผาแล้ว เนื่องจากในการเผาจะต้องเผาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 4,250 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้ตะกั่วที่เป็นส่วนประกอบของผงเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกระเหยออกมา (ตะกั่วจะระเหยกลายเป็นไอที่อุณหภูมิสูงกว่า 888 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของส่วนประกอบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากตะกั่วได้ระเหยออกไปในระหว่างการเผา ดังนั้นจึงต้องทำการอบด้วยสภาพบรรยากาศของตะกั่ว และการใช้ผงเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่อบแล้วก็เพื่อเป็นการป้องกันการหดตัวของผงเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่ไม่ได้ผ่านการอบ

### ตารางที่ 4.1 การอบชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

รายการ	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3
อัตราการใช้ความร้อน (P <sub>r</sub> ) [องศาเซลเซียส/ชั่วโมง]	300	300	300
Holding Temperature (P) [องศาเซลเซียส]	500	1250	29
Dwell Time (P <sub>d</sub> ) [นาที]	60	60	-

## ขั้นที่ 3 การตัดชิ้นงาน

### อุปกรณ์

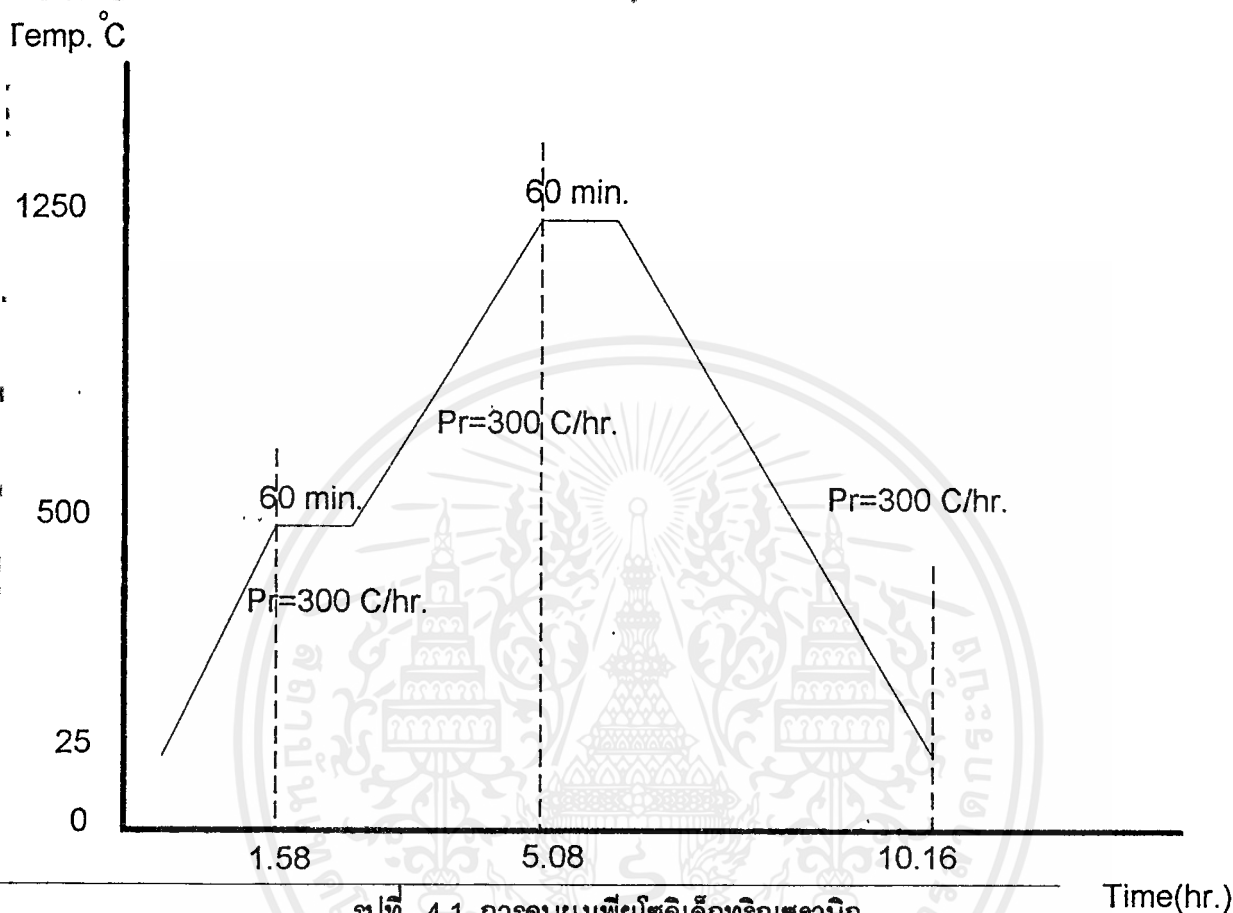
1. Adhesion Wax
2. เครื่องตัด Struers Accutom-5

### ขั้นตอน

1. ทำการวัดชิ้นงานโดยเปรียบเทียบกับตัวทราบนสตีลเซอร์ติฟายด์อย่าง จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปทำการตัด
2. ทาชิ้นงานด้วย Adhesion Wax แล้วนำไปติดกับแท่นตัด
3. นำแท่นตัดไปติดที่เครื่องตัด (Struers Accutom-5) ทำการตัดใบมีดซึ่งด้านปลายใบมีดจะเคลือบด้วยเพชรไว้ หลังจากนั้นทำการตั้งเครื่องโดยกำหนดให้ความเร็วของใบมีดขณะ

ทำการตัดมีความเร็ว 0.05 มิลลิเมตรต่อวินาที และที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที

4. เดินเครื่องตัดโดยตัดชิ้นงานทั้ง 2 ชั้น



รูปที่ 4.1 การอบผงเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

ขั้นที่ 4 การขัดชิ้นงาน

อุปกรณ์

1. เครื่องขัด Struers Rotopol-25
2. กระดาษทราย เบอร์ 800 หรือ 1000
3. สเปรย์ผงขัดเพชรขนาด 6 ไมครอน และแอลกอฮอล์

ขั้นตอน

1. ภายหลังจากการเผาเสร็จสิ้นแล้ว ให้นำชิ้นงานมาวัดขนาด และชั่งน้ำหนักเพื่อเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของชิ้นงานก่อนและหลังการเผา รวมทั้งหาความหนาแน่นของชิ้นงานด้วย
2. นำชิ้นงานทั้ง 2 ชั้นไปขัดผิวให้เรียบด้วยเครื่องขัด (Struers Rotopol-25) โดยทำการขัด 2 ครั้ง การขัดครั้งที่ 1 เป็นการขัดหยาบโดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 800 ที่ความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

150 รอบต่อนาที การขัดครั้งที่ 2 เป็นการขัดละเอียดโดยใช้สเปรย์ซึ่งมีผงเพชรขนาด 6 ไมครอน ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที

3. ทำการวัดขนาดของชิ้นงานภายหลังการขัดอีกครั้ง

## ขั้นที่ 5 การทำ Silver Paste

### อุปกรณ์

1. Silver Paste และ ฟูกัน
2. ไดรเปาผสม

### ขั้นตอน

1. นำชิ้นงานมาวัดขนาด ภายหลังจากการขัด
2. ทา Silver Paste (ประกอบด้วยผงเงิน,ผงแก้ว และสารละลายทินเนอร์หรือ แอลกอฮอล์) ลงบนชิ้นงานให้เรียบเสมอกันทั้ง 2 ด้านโดยทาทีละด้าน
3. ใช้ไดรเปาเพื่อให้ความร้อนแก่ Silver Paste แห้งติดกับชิ้นงาน แล้วจึงกลับด้านทา อีกด้านหนึ่ง
4. ใช้ กระดาษทรายขัด ตกแต่งชิ้นงานให้เรียบร้อย
5. วางลงบนถาดเซอร์โคเนียออกไซด์ ( $ZrO_2$ )
6. นำถาดเข้าเตาเผา เเผาที่ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

## ขั้นที่ 6 การทำ Poling

### อุปกรณ์

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง (High-Voltage)
2. อ่างน้ำมันซิลิโคน
3. เทอร์โมมิเตอร์
4. ขาดั่ง

### ขั้นตอน

1. นำชิ้นงานที่ผ่านการทำขั้วแล้วต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง ( High-Voltage) โดยมีแผ่นทองเหลืองประกบอยู่ 2 ด้าน และนำไปจุ่มลงในอ่างน้ำมันซิลิโคน
2. จากนั้นให้ความร้อนแก่น้ำมันซิลิโคนจนถึงอุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส
3. ให้แรงดันไฟฟ้าแก่ตัวชิ้นงาน ประมาณ 2.5 กิโลโวลท์ เป็นเวลา 30 นาที

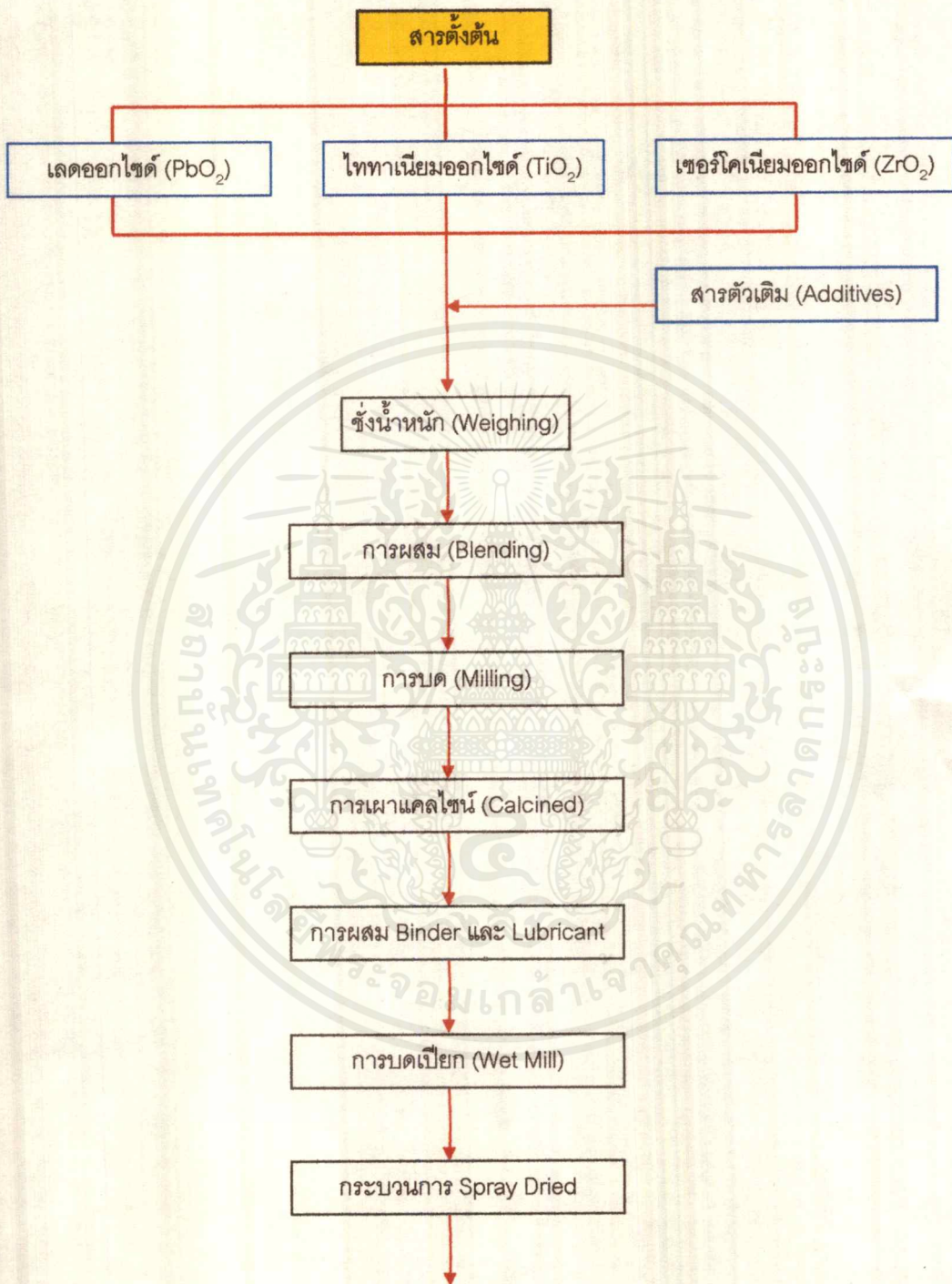
### หมายเหตุ

การนำชิ้นงานไปจุ่มลงในน้ำมันซิลิโคนเพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟ (Spark) เนื่องจากไฟฟ้าแรงดันสูงในอากาศที่มีความชื้นอยู่ และการให้ความร้อนแก่ตัวชิ้นงานเซรามิกเพื่อช่วยในการทำ Poling เนื่องจากสภาพผิวจะมีอิสระในการจัดเรียงตัว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

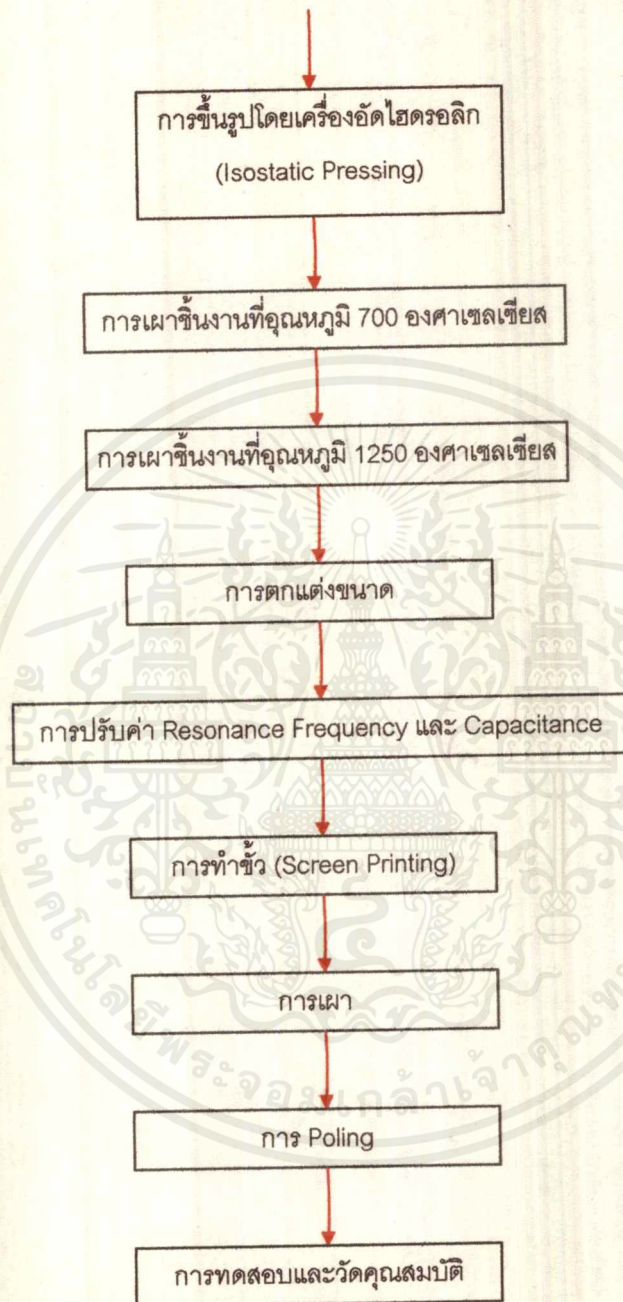
## กระบวนการผลิตสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก



รูปที่ 4.2 แผนผังกระบวนการผลิตสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

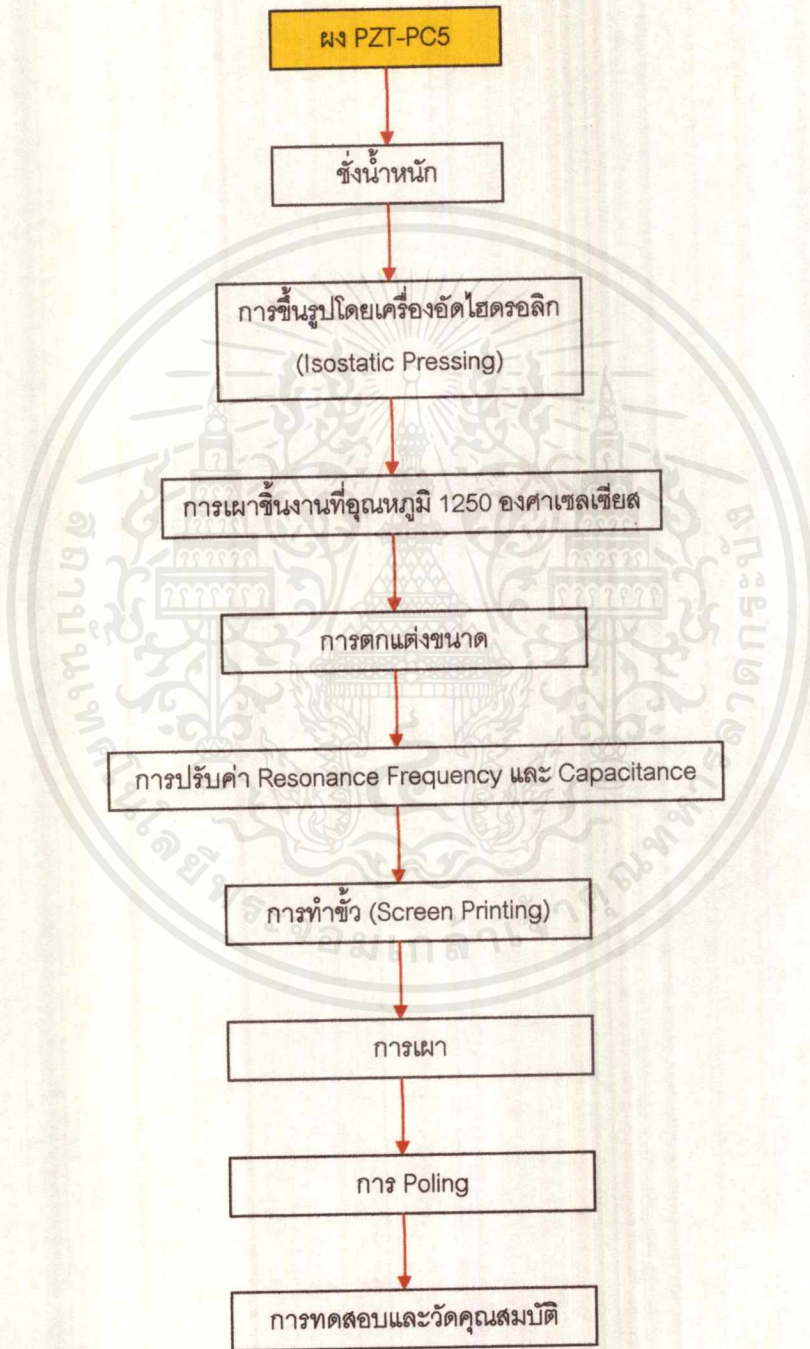
## กระบวนการผลิตสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (ต่อ)



รูปที่ 4.2 แผนผังกระบวนการผลิตสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การผลิตสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจากผง PZT-PC5



รูปที่ 4.3 แผนผังกระบวนการผลิตสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจากผง PZT-PC5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

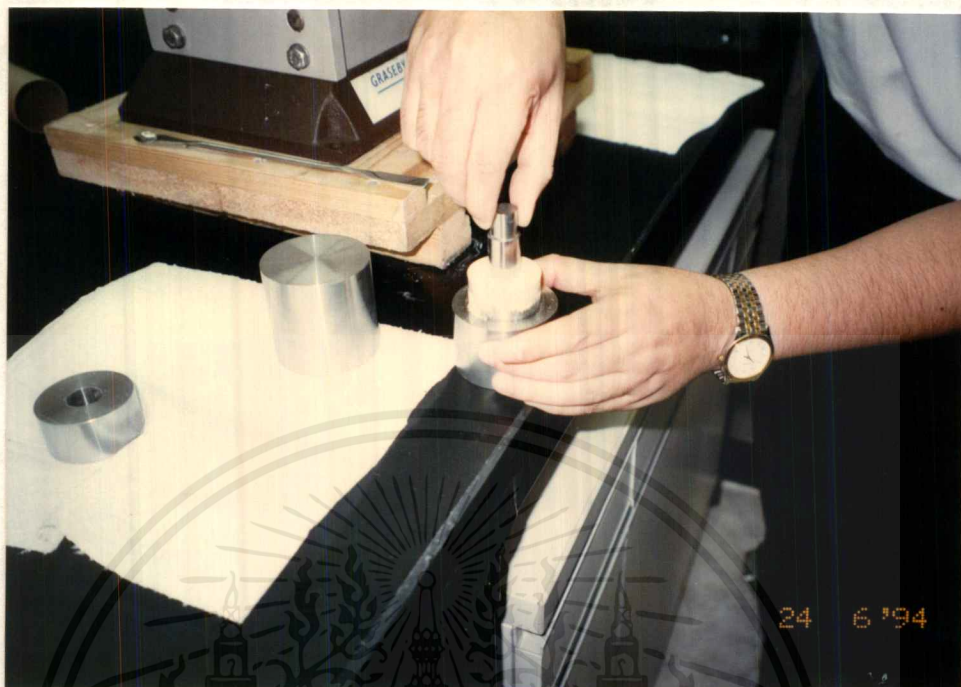


รูปที่ 4.4 การตวงสาร



รูปที่ 4.5 การอัดแบบพิมพ์ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

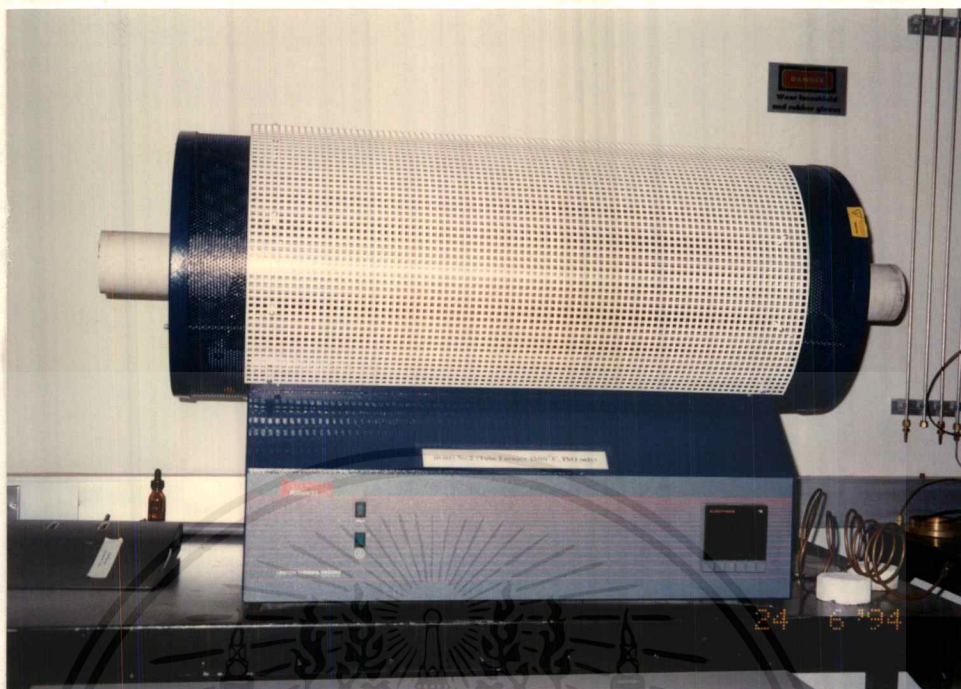


รูปที่ 4.6 การถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์



รูปที่ 4.7 การวัดขนาดของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

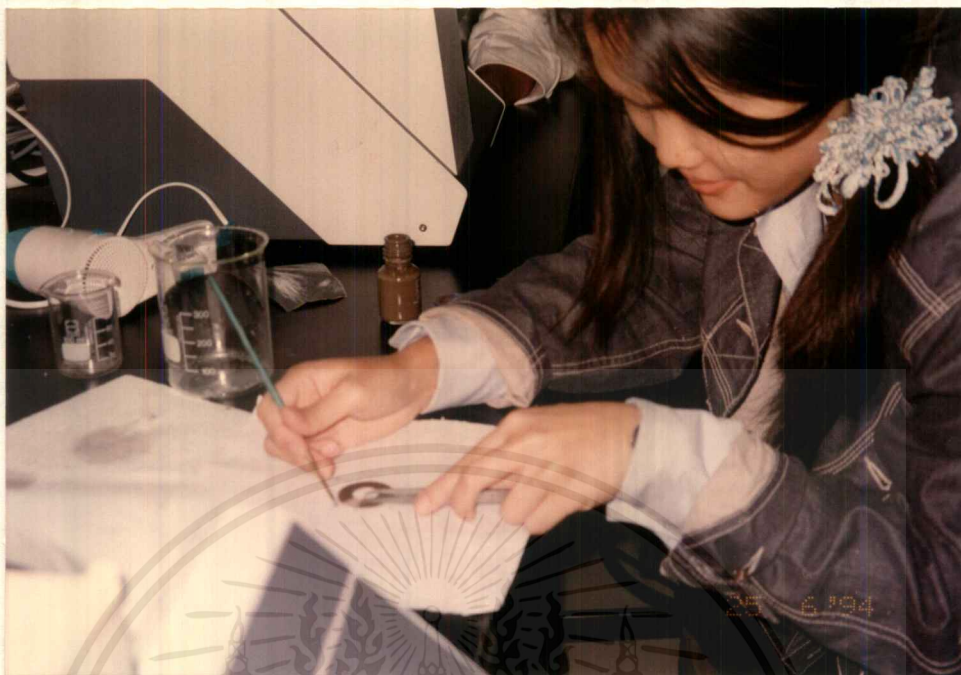


รูปที่ 4.8 เตาอบชนิดท่อ (Tube furnace)

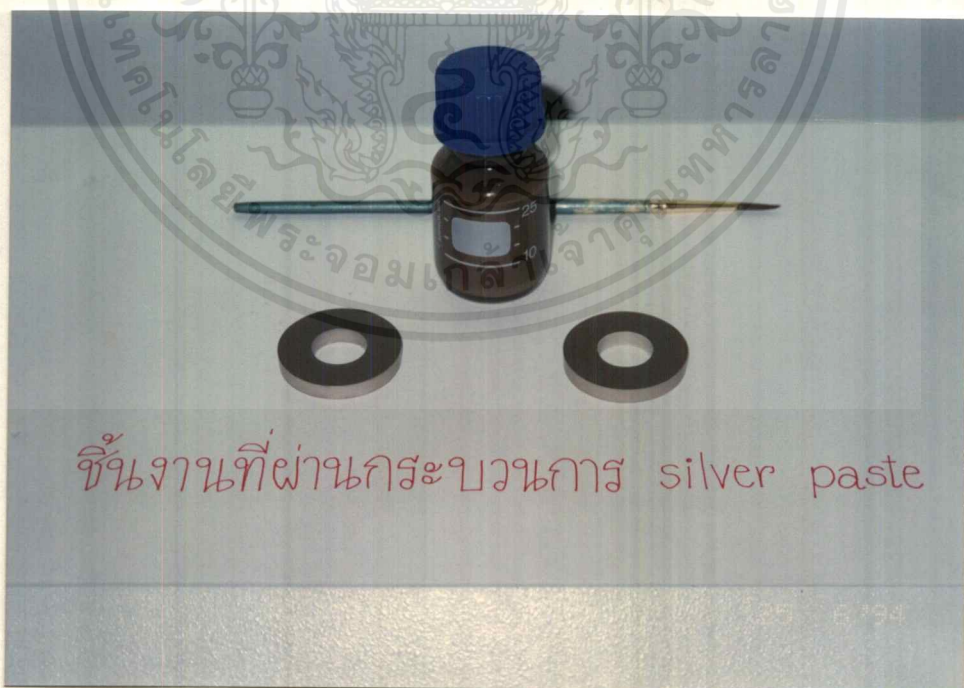


รูปที่ 4.9 เครื่องตัดชิ้นงาน (Struers Accutom-5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



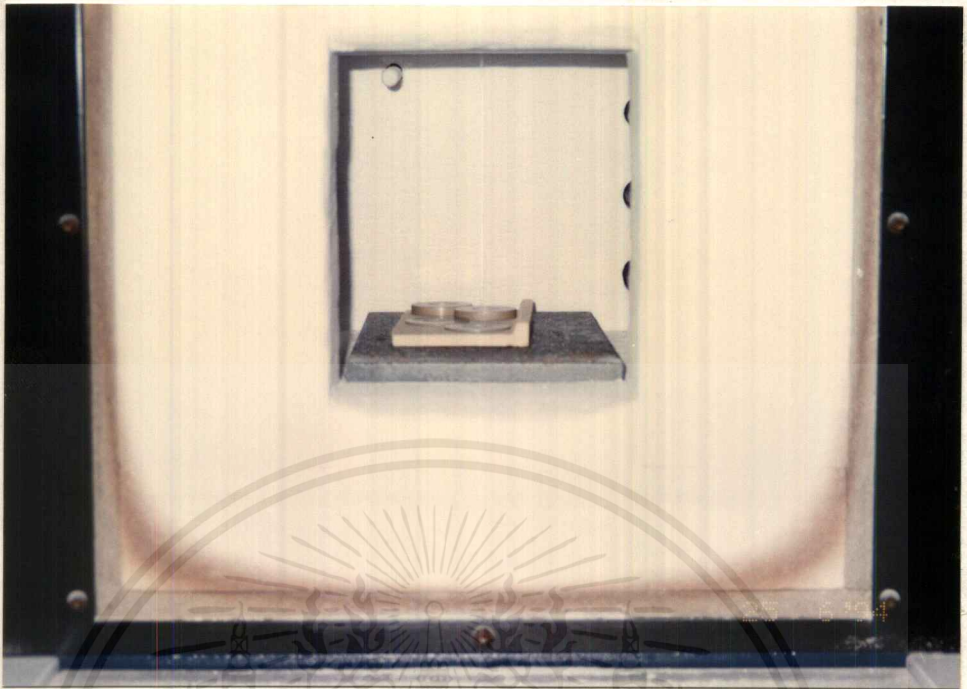
รูปที่ 4.10 กระบวนการ Silver Paste



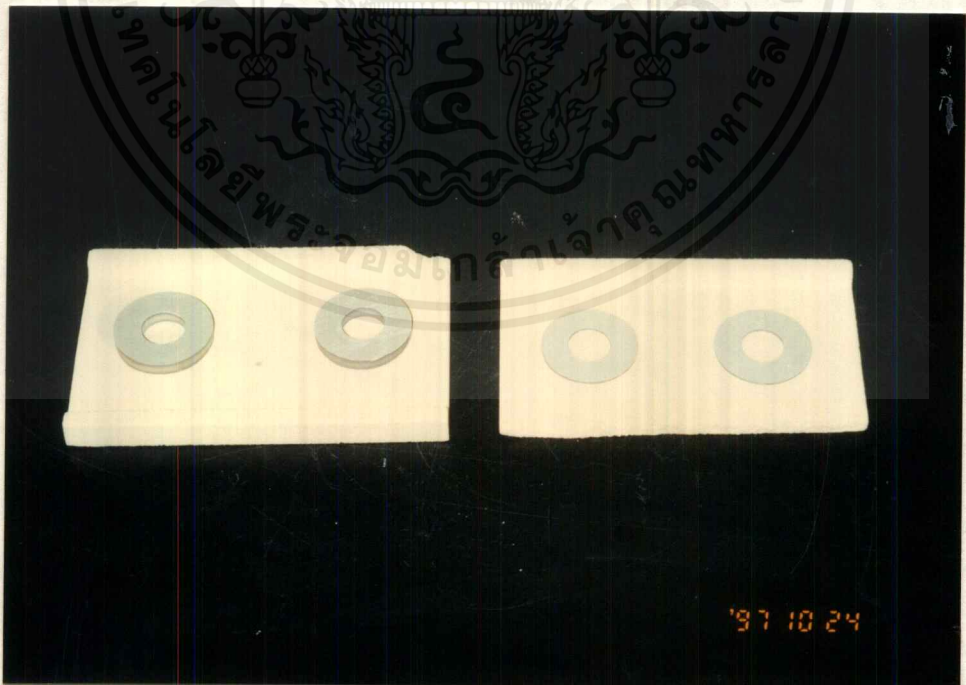
ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ silver paste

รูปที่ 4.11 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ Silver Paste

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

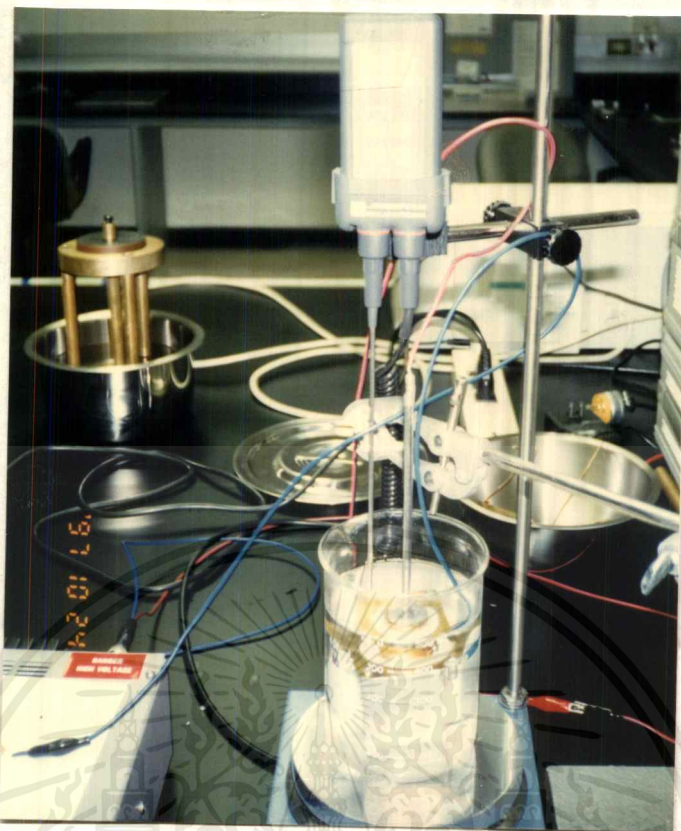


รูปที่ 4.12 การนำชิ้นงานเข้าเตาอบ

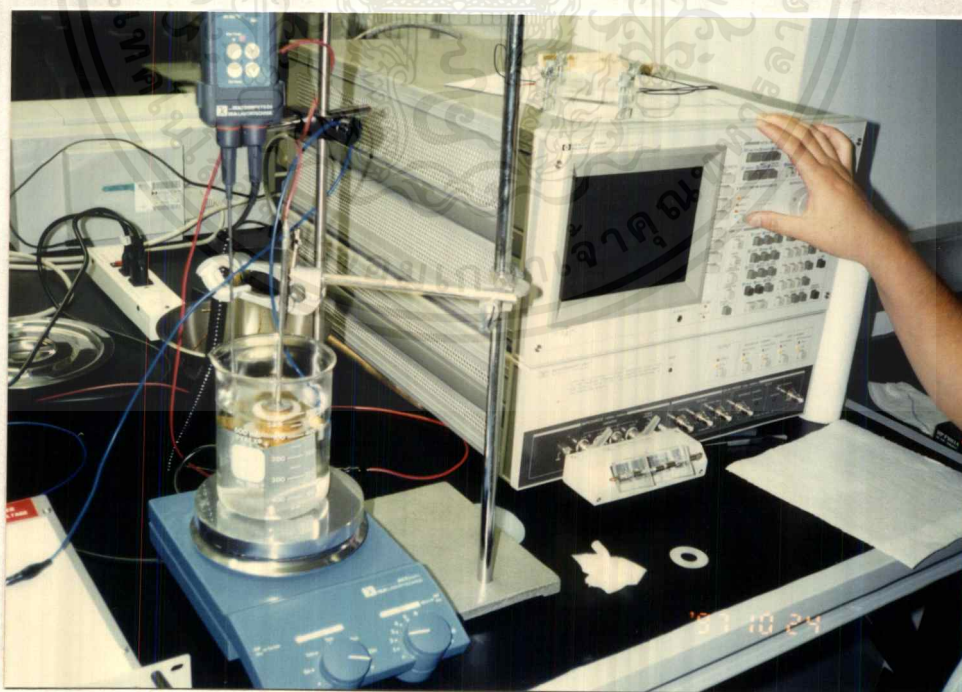


รูปที่ 4.13 ชิ้นงานที่ผ่านการอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 การทำ Poling ชั้นงานขนาดบาง



รูปที่ 4.15 เครื่องมือวัดการทำ Poling

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานหลังขึ้นรูปครั้งที่ 1 และ 2

การวัด	ครั้งที่ 1				ครั้งที่ 2			
	ก่อนอบ	หลังอบ	ผลต่าง	การหดตัว (%)	ก่อนอบ	หลังอบ	ผลต่าง	การหดตัว (%)
น้ำหนัก (กรัม)	54.97	53.45	1.52	2.77	54.99	53.46	1.53	2.78
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (มิลลิเมตร)	41.7	36.12	5.58	13.38	41.7	36.38	5.32	12.76
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (มิลลิเมตร)	18	15.74	2.26	12.56	18	15.99	2.01	11.17
ความหนาของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	9.73	8.64	1.09	11.2	9.77	8.94	0.83	8.5
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	-	7.727	-	-	-	7.73	-	-

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานหลังขึ้นรูปครั้งที่ 3 และ 4

การวัด	ครั้งที่ 3				ครั้งที่ 4			
	ก่อนอบ	หลังอบ	ผลต่าง	การหดตัว (%)	ก่อนอบ	หลังอบ	ผลต่าง	การหดตัว (%)
น้ำหนัก (กรัม)	54.95	53.43	1.51	2.75	54.96	53.44	1.52	2.77
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (มิลลิเมตร)	41.86	36.39	5.47	13.07	41.97	36.32	5.65	13.46
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (มิลลิเมตร)	17.91	15.77	2.14	11.95	18.09	15.71	2.38	13.16
ความหนาของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	9.63	8.45	1.18	12.25	9.74	8.54	1.2	12.32
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	-	7.73	-	-	-	7.73	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานหลังขึ้นรูปครั้งที่ 5 และ 6

การวัด	ครั้งที่ 5				ครั้งที่ 6			
	ก่อนอบ	หลังอบ	ผลต่าง	การหดตัว (%)	ก่อนอบ	หลังอบ	ผลต่าง	การหดตัว (%)
น้ำหนัก (กรัม)	54.81	53.28	1.53	2.79	54.92	53.41	1.51	2.75
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (มิลลิเมตร)	41.69	36.22	5.47	13.12	41.68	36.23	5.45	13.08
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (มิลลิเมตร)	18.05	15.82	2.23	12.35	18.09	15.75	2.34	12.94
ความหนาของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	9.77	8.45	1.32	13.51	9.78	8.5	1.28	13.09
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	-	7.716	-	-	-	7.722	-	-

ตารางที่ 4.5 ร้อยละของการหดตัวของชิ้นงานหลังผ่านการเผา

PZT-PC5 ชิ้นงานที่	ร้อยละของ น้ำหนักที่หายไป	ร้อยละของการหดตัวของ เส้นผ่านศูนย์กลาง		ร้อยละของ การหดตัวของความหนา	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
		ภายนอก	ภายใน		
1	2.77	13.38	12.56	11.2	7.727
2	2.78	12.76	11.17	8.5	7.73
3	2.75	13.07	11.95	12.25	7.73
4	2.77	13.46	13.16	12.32	7.73
5	2.79	13.12	12.35	13.51	7.716
6	2.75	13.08	12.94	13.09	7.722

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลของชิ้นงานที่ผ่านการ Poling

ชิ้นงานที่	Resonance Frequency (กิโลเฮิรตซ์)	Anti-resonance Frequency (กิโลเฮิรตซ์)	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอก (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายใน (มิลลิเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)
1	37.3	38.2	35.871	15.8	1.08
2	36.8	37.65	36.36	16.22	1.07

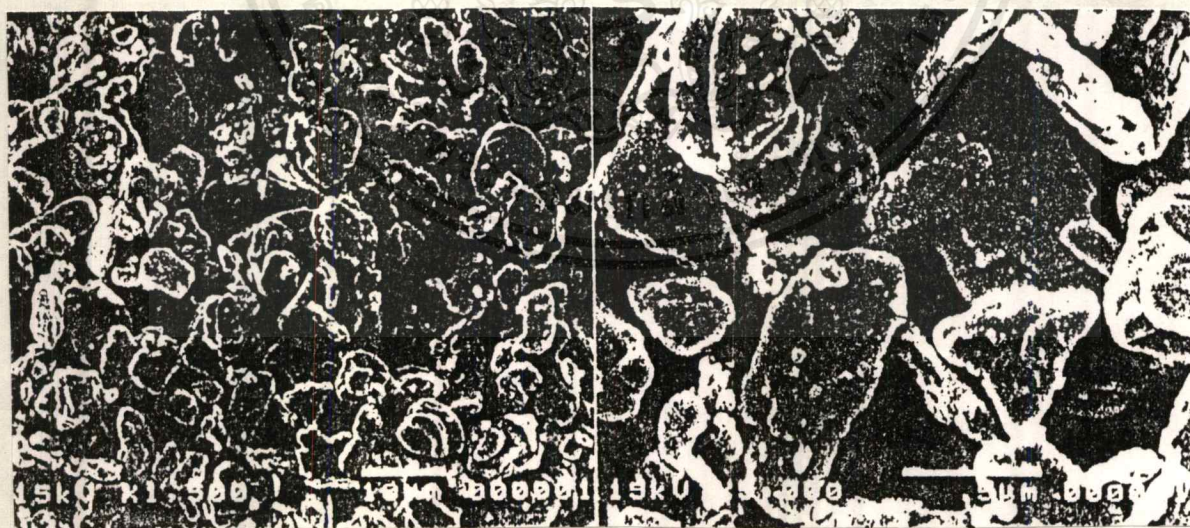
### สรุปผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลอง เมื่อทำการ Poling แล้ว สามารถนำชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกทั้งสอง มาต่อกับวงจรขับ (High Voltage) เพื่อผลิตคลื่นเหนือเสียงได้ และช่วงความถี่ที่เหมาะสม สำหรับการใช้งานของชิ้นงาน คือ ค่าความถี่ที่อยู่ระหว่าง Resonance Frequency และ Anti-resonance Frequency ซึ่งจะให้แรงดันออกมาอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

แต่เนื่องจากยังมีข้อจำกัดในการ Poling นั่นคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีอยู่ (High-Voltage) ที่ใช้ในการ Poling ยังมีกำลังไม่สูงพอ โดยเครื่องใหม่อยู่ในระหว่างการสั่งซื้อ จึงผลิตได้เพียงชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่มีกำลังน้อยและความถี่สูงประมาณ 37 กิโลเฮิรตซ์ การทำการทดลองจึงยุติถึงขั้นตอนการ Poling เท่านั้น

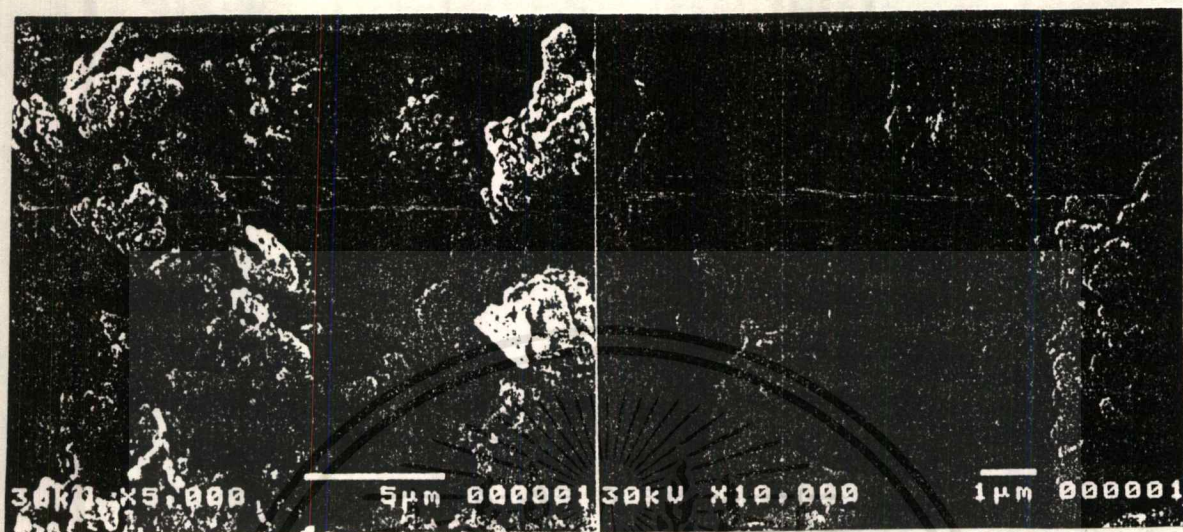


รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

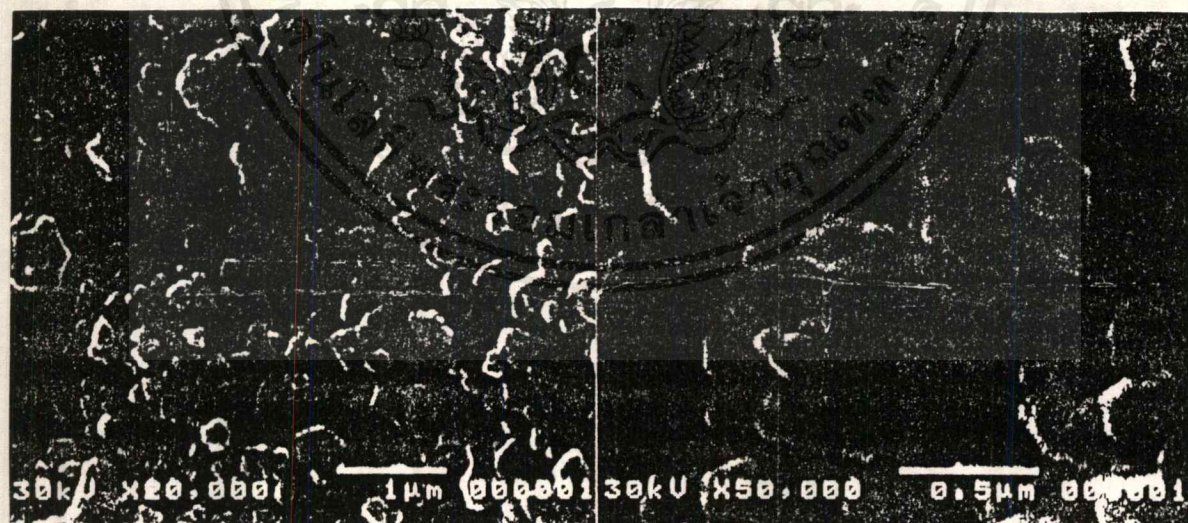


รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของ PbO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

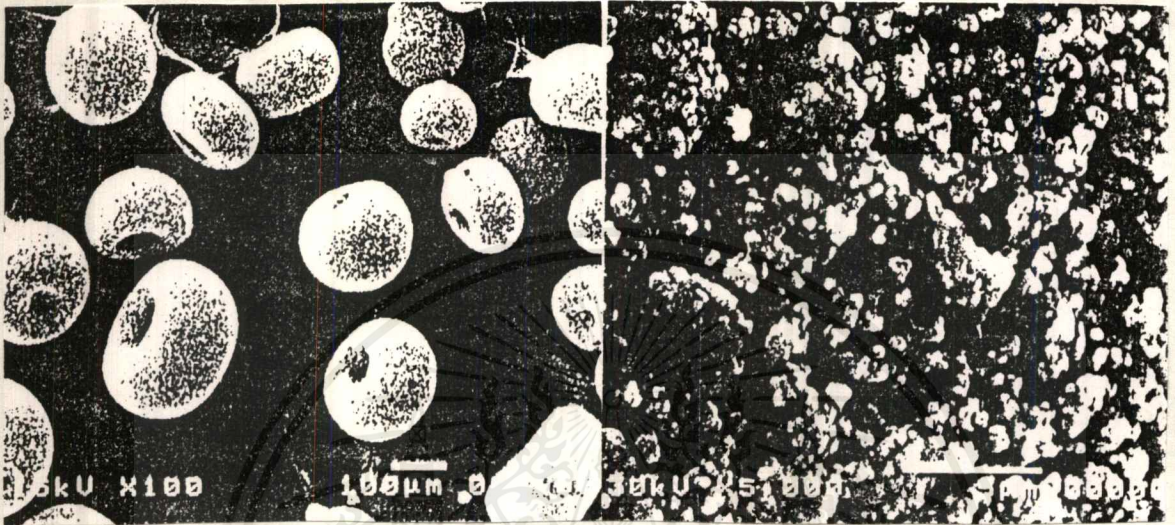


รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของ  $\text{Nd}_2\text{O}_5$



รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของ  $\text{ZrO}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคของ TiO<sub>2</sub>



รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคของผงเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (PZT-PC5)

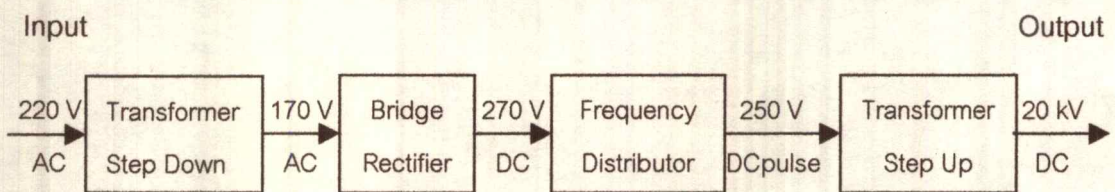
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5 เครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

### อุปกรณ์

1. หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์/ 170 โวลต์ กระแสไฟ 3 แอมแปร์	1	ตัว
2. Diode Bridge (1N5408)	4	ตัว
3. ตัวเก็บประจุ (Capacitor Filter) 3.3 ไมโครฟารัด 250 โวลต์	1	ตัว
4. ตัวเก็บประจุ (Capacitor) 1 ไมโครฟารัด 250 โวลต์	4	ตัว
5. ไดโอด (Diode) (1N4001)	4	ตัว
6. ตัวต้านทาน 33 กิโลโอห์ม 2 วัตต์	2	ตัว
7. ตัวต้านทาน 0.2 โอห์ม 5 วัตต์	2	ตัว
8. ตัวต้านทาน 100 กิโลโอห์ม 2 วัตต์	1	ตัว
9. ทรานซิสเตอร์ (2SC1942)	2	ตัว
10. Matching Reactance Ferrite Core	1	ตัว
11. Step up Coil	1	ตัว
12. Matching EE 19	1	ตัว
13. หัวขับ (Transducer)	1	หัว

### หลักการทำงาน



รูปที่ 5.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ส่วนที่ 1 การแปลงแรงดันไฟฟ้าขาลง

ส่วนที่ 1 เป็นส่วนของการแปลงแรงดันไฟฟ้า ในการทำงานของวงจรนี้จะต้องทำการแปลงกระแสไฟฟ้าขาเข้าจากไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ทำการแปลงกระแสไฟฟ้าลงเป็น 170 โวลต์ กระแสไฟประมาณ 3 แอมแปร์ จากนั้นกระแสไฟจะไหลเข้าสู่ส่วนที่ 2 คือ Diode Bridge Rectify

### ส่วนที่ 2 การเปลี่ยนแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

ส่วนที่ 2 คือ Diode Bridge Rectify ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับ (Accuracy Current) ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) จากนั้นจึงทำการปรับสภาพของกระแสไฟฟ้าให้มีความสม่ำเสมอและมีเสถียรภาพ โดยการใช้ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ทำหน้าที่เก็บกระแสไฟฟ้าไว้เพื่อให้กระแสไฟมีการไหลอย่างสม่ำเสมอ กระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากตัวเก็บประจุจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรงมีแรงดันไฟฟ้าประมาณ 270 โวลต์ การปรับแรงดันไฟฟ้าให้มีความสม่ำเสมอและมีเสถียรภาพนั้นจะส่งผลให้หัวขับสามารถกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เที่ยงตรงและแม่นยำทำให้มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด

### ส่วนที่ 3 การสร้างควมถี่

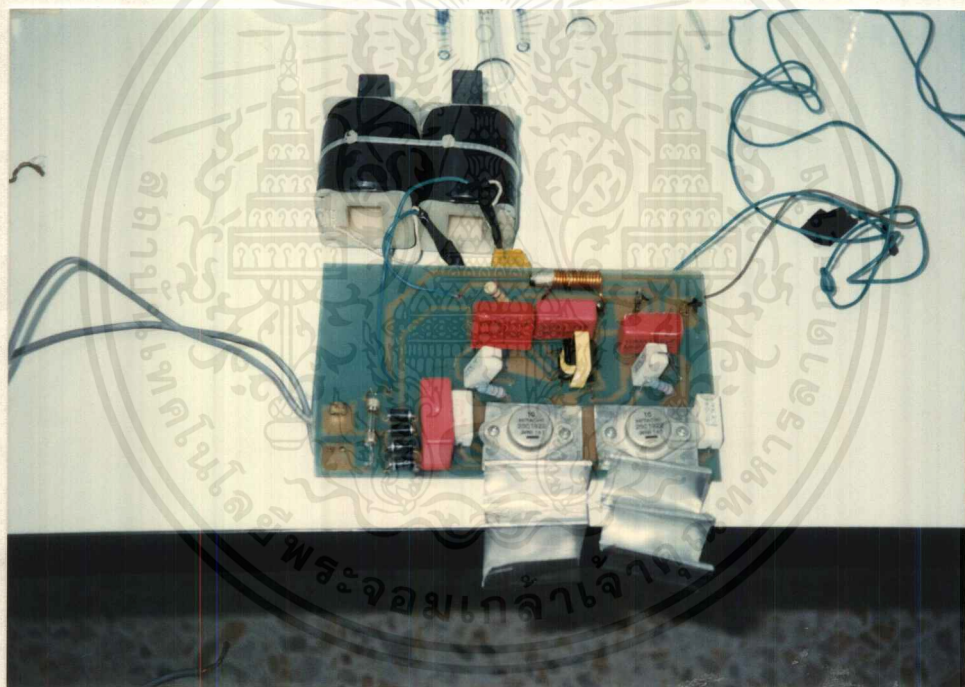
เมื่อทำการปรับแรงดันไฟฟ้าให้มีความสม่ำเสมอและมีเสถียรภาพแล้ว กระแสไฟฟ้าจะผ่านไปยังส่วนที่ 3 คือ ส่วนกำเนิดควมถี่ ซึ่งจะประกอบไปด้วย ทรานซิสเตอร์ (Transistor) ตัวแปลงควมถี่ (Matching Transformer Wave) และตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ (Tuner Reactance) ส่วนที่ 3 นี้จะทำหน้าที่ในการกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นจังหวะควมถี่ (Pulse) ตามที่ต้องการคือ ที่ควมถี่ 28.5 กิโลเฮิรตซ์ และสามารถปรับแต่งควมถี่จากตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ ซึ่งจะมีแม่เหล็กอยู่บริเวณแกนกลาง

### ส่วนที่ 4 การแปลงแรงดันไฟฟ้าขาขึ้น

แรงดันไฟฟ้าขาออกจากส่วนที่ 3 จะมีแรงดันไฟฟ้าประมาณ 250 โวลต์ ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สูงพอเพื่อจะใช้ขับหัวขับให้สั่นได้ จึงจำเป็นต้องทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าด้วยการใช้ Step-up Coil กระแสไฟฟ้าที่ออกจาก Step-up Coil จะมีแรงดันไฟฟ้าประมาณ 20 กิโลโวลต์ และมีกระแสไฟประมาณ 0.25 มิลลิแอมแปร์

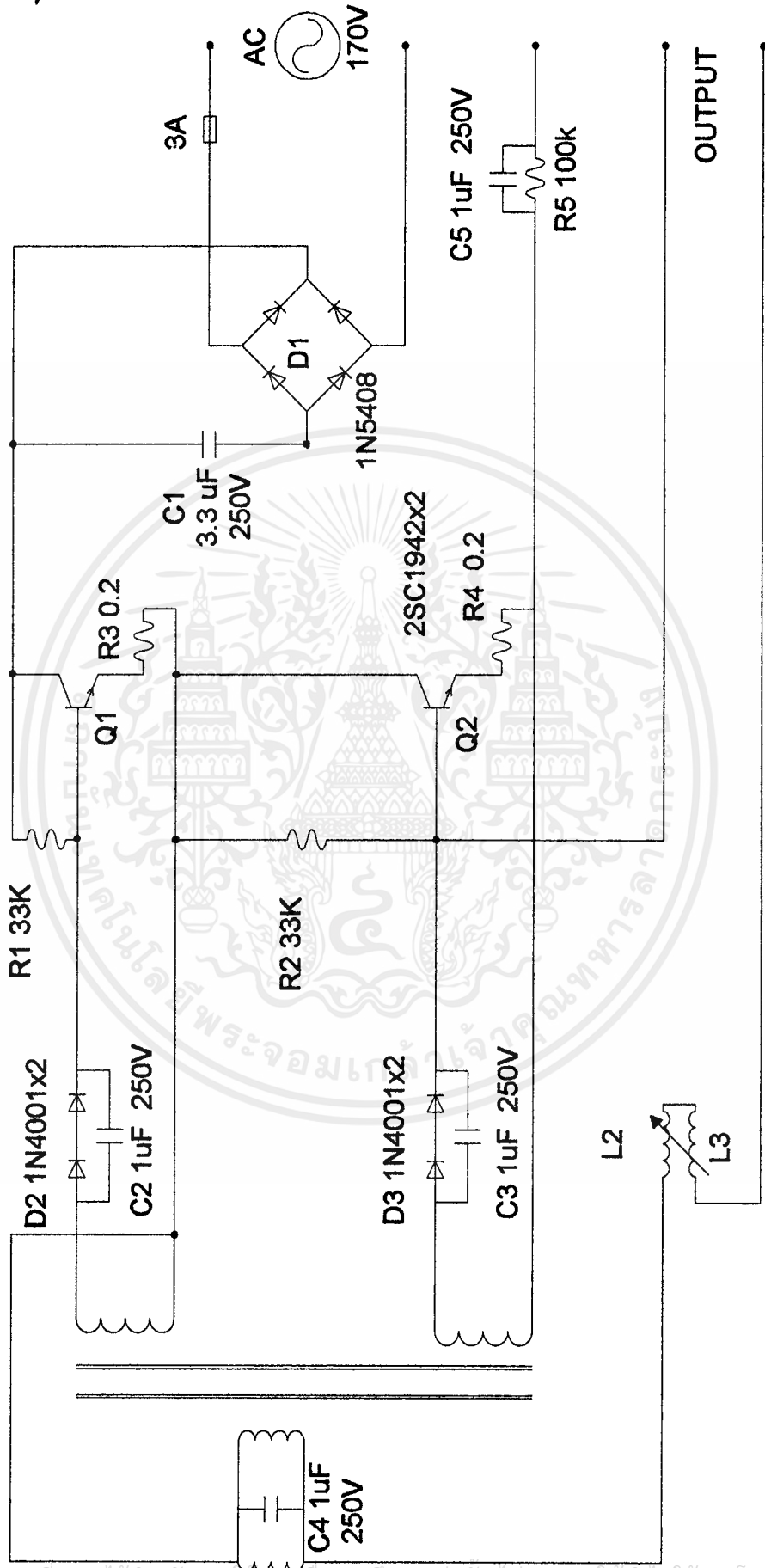
## เครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

เครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ประดิษฐ์ขึ้นประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนของวงจรขับและส่วนหัวขับ ส่วนของวงจรขับจะกำเนิดแรงดันกระแสไฟฟ้าประมาณ 20 กิโลโวลต์และกระแสไฟประมาณ 0.25 มิลลิแอมแปร์ ในส่วนของหัวขับจะกำเนิดคลื่นเหนือเสียงซึ่งมีความถี่ 28.5 กิโลเฮิรตซ์และมีกำลังขับขาออก 0.7 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตัวหัวขับจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 เซนติเมตรสูง 8 เซนติเมตรวัสดุที่ใช้ทำหัวขับทำมาจากอลูมิเนียมอัลลอยด์



รูปที่ 5.2 วงจรของเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ULTRASONIC CIRCUIT MAP



รูปที่ 5.3 วงจรขับของเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6  
การทดลอง

วิธีการทดลองด้วยอ่างอัลตราโซนิค

อุปกรณ์และสารเคมี

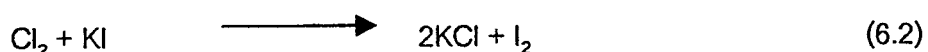
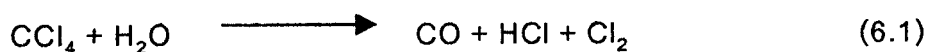
อุปกรณ์

1. ขวดรูปกลมฟลูออรีน 250 มิลลิลิตร
2. กระบอกตวงปริมาตร 100 มิลลิลิตร
3. ปีกเกอร์ปริมาตร 250 มิลลิลิตร
4. บิวเรตปริมาตร 25 มิลลิลิตร
5. แท่งแก้วคนสาร
6. นาฬิกาจับเวลา
7. พาราฟิล์ม
8. แขนจับพร้อมขาตั้ง
9. อ่างอัลตราโซนิค (Ultrasonic Bath :Ultrawave U2200)

สารเคมี

1. โซเดียมไฮโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) เกรตวิเคาระห์ บริษัท เมอร์ค จำกัด
2. โพแทสเซียมไอโอไดด์ เกรตวิเคาระห์ บริษัท เมอร์ค จำกัด
3. คาร์บอนเตตระคลอไรด์ เกรตวิเคาระห์ บริษัท เมอร์ค จำกัด
4. น้ำกลั่น (Distilled Water)

ในการทดลองจะเป็นการทดลองปฏิกิริยาออกซิเดชันระบบของน้ำ-โพแทสเซียมไอโอไดด์-คาร์บอนเตตระคลอไรด์ด้วยการกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียงซึ่งมีสมการปฏิกิริยาดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับปฏิกิริยาที่เลือกมาใช้ในการทดลองนั้นเป็นปฏิกิริยาที่มีการศึกษาอย่างแพร่หลาย ทำให้มีข้อมูลในการอ้างอิงสำหรับใช้ในการทดลอง [1] นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยาสามารถสังเกตได้ง่าย เนื่องจากสารผลิตภัณฑ์ คือ ไอโอดีนที่เกิดขึ้นจะมีสีเหลืองละลายอยู่ในสารละลายซึ่งจะเป็นอินดิเคเตอร์ไปในตัว และเมื่อทำการไทเทรตด้วยโซเดียมไฮโอซัลเฟตจนถึงจุดยุติสีเหลืองของไอโอดีนในสารละลายก็จะเปลี่ยนเป็นไม่มีสีทำให้สามารถสังเกตจุดยุติได้ง่ายเช่นกัน

ปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้สารตั้งต้นจะประกอบไปด้วย น้ำ โฟแทสเซียมไอโอไดด์ คาร์บอนเตตระคลอไรด์ สำหรับสารผลิตภัณฑ์ คือ ไอโอดีน ซึ่งจะเป็นตัวแสดงถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยจะทำการวิเคราะห์ปริมาณไอโอดีนที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการไทเทรตกับโซเดียมไฮโอซัลเฟต การทดลองปฏิกิริยาจะทำการทดลองภายในอ่างอัลตราโซนิกโดยจะทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันระบบของน้ำ-โพแทสเซียมไอโอไดด์-คาร์บอนเตตระคลอไรด์และมีการกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียง สำหรับปัจจัยที่จะทำการศึกษาด้วยอ่างอัลตราโซนิก ได้แก่

### 1. ปริมาตรของสารภายในระบบ

ทำการเปลี่ยนแปลงปริมาตรภายในระบบโดยเริ่มต้นที่ปริมาตร 30 มิลลิลิตรซึ่งประกอบไปด้วย น้ำ 5 มิลลิลิตร โพแทสเซียมไอโอไดด์ 5 กรัม และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ 25 มิลลิลิตร การเปลี่ยนแปลงปริมาตรภายในระบบจะเพิ่มปริมาตรครั้งละ 30 มิลลิลิตรโดยคงอัตราส่วนเดิมไว้ และทำการเพิ่มปริมาตรเป็น 60, 90, 120, 150 มิลลิลิตรตามลำดับ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 30 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทดลองกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียง คือ 10 นาที

### 2. เวลาที่ใช้ในการกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียงของระบบ

การทดลองจะใช้ปริมาตรของสารภายในระบบคือ 30 มิลลิลิตรซึ่งประกอบไปด้วย น้ำ 5 มิลลิลิตร โพแทสเซียมไอโอไดด์ 5 กรัม และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ 25 มิลลิลิตรและทำการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในปฏิกิริยาซึ่งถูกกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียง คือ ทำการทดลองที่เวลา 10, 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 นาทีตามลำดับ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง คือ 30 องศาเซลเซียส

---

[1] Alfred Weissler, Herbert W. Cooper and Stuart Snyder, "Chemical Effect of Ultrasonic Waves: Oxidation of Potassium Iodide Solution by Carbon Tetrachloride":

The Journal of American Chemical Society (April 1950):p. 1769-1775

### 3. คุณภูมิของระบบ

การทดลองผลกระทบจากคุณภูมิของน้ำภายในอ่างอัลตราโซนิกจะกระทำโดยการเปลี่ยนแปลงคุณภูมิของน้ำให้มีความแตกต่างกันประมาณ 15 องศาเซลเซียส คือ ที่คุณภูมิ 15, 30, 45 และ 60 องศาเซลเซียสตามลำดับ สำหรับปริมาตรของสารในระบบที่ใช้ในการทดลองจะใช้ปริมาตรที่ 30 มิลลิลิตรซึ่งประกอบไปด้วย น้ำ 5 มิลลิลิตร โฟแทสเซียมไอโอไดด์ 5 กรัมและคาร์บอนเตตระ-คลอไรด์ 25 มิลลิลิตรและใช้เวลาในการทดลองกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 10 นาที

### 4. ความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดภายในระบบ

#### 4.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโฟแทสเซียมไอโอไดด์

ความเข้มข้นของโฟแทสเซียมไอโอไดด์ที่ใช้ในการทดลอง คือ 9, 25, 40, 45, 50, 55 และ 60% โดยน้ำหนัก

#### 4.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคาร์บอนเตตระคลอไรด์

ปริมาตรของคาร์บอนเตตระคลอไรด์ที่ใช้ในการทดลอง คือ 5, 15, 25 35, 45 และ 50 มิลลิลิตรตามลำดับ

ในการทดลองเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารภายในระบบ คุณภูมิที่ใช้ในการทดลอง คือ 30 องศาเซลเซียสและใช้เวลาในการทดลองกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 10 นาที

### วิธีการทดลองด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

#### อุปกรณ์และสารเคมี

##### อุปกรณ์

- 1) กระจกตวงปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- 2) บีกเกอร์ปริมาตร 250 มิลลิลิตร
- 3) บิวเรตปริมาตร 25 มิลลิลิตร
- 4) แท่งแก้วคน
- 5) นาฬิกาจับเวลา
- 6) พาราฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 7) แขนจับพร้อมขาตั้ง
- 8) เครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

### สารเคมี

- 1) โซเดียมไฮโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท เมอร์ค จำกัด
- 2) โพแทสเซียมไอโอไดด์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท เมอร์ค จำกัด
- 3) คาร์บอนเตตระคลอไรด์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท เมอร์ค จำกัด
- 4) น้ำกลั่น (Distilled Water)

ในการทดลองจะทดลองปฏิกิริยาภายในระบบโดยการจุ่มหัวขั้วลงไปในสารละลายโดยตรงโดยใช้แขนจับจับหัวขั้วไว้

### วิธีการทดลอง

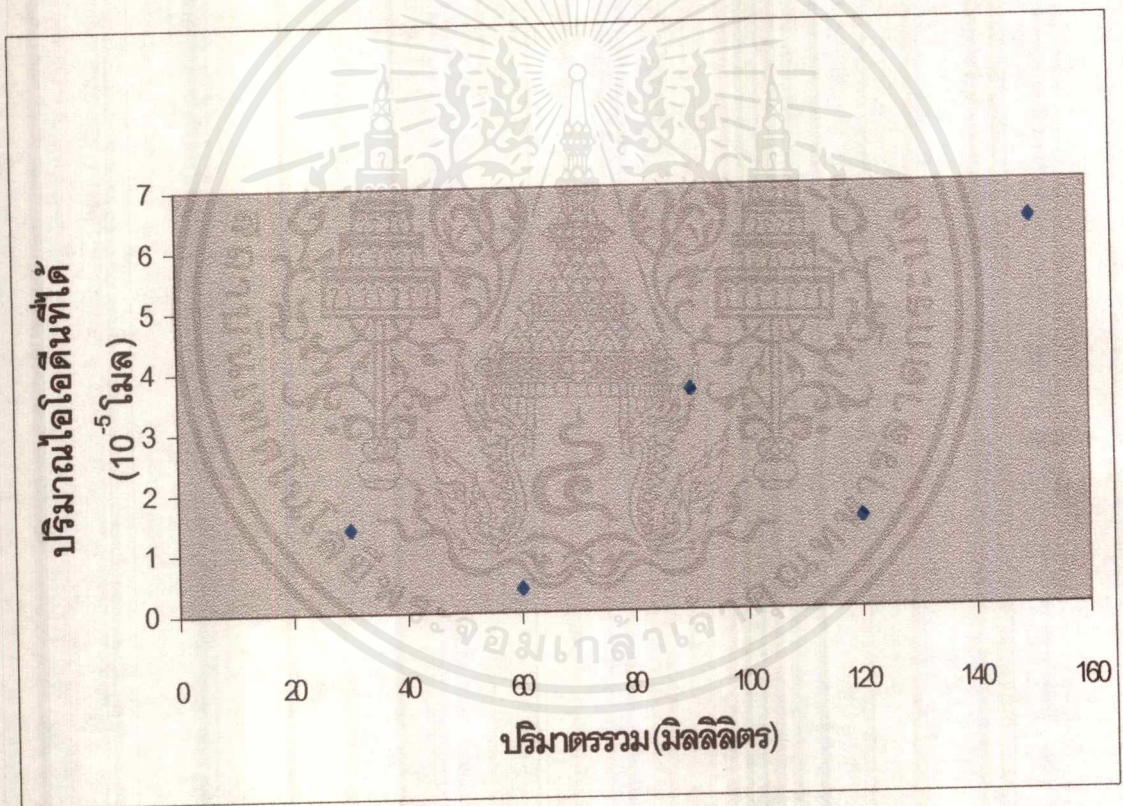
#### 1. การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของสารภายในระบบ

ทำการเปลี่ยนแปลงปริมาตรภายในระบบโดยเริ่มต้นที่ปริมาตร 30 มิลลิลิตรซึ่งประกอบไปด้วย น้ำ 5 มิลลิลิตร โพแทสเซียมไอโอไดด์ 5 กรัม และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ 25 มิลลิลิตร การเปลี่ยนแปลงปริมาตรภายในระบบจะเพิ่มปริมาตรครั้งละ 30 มิลลิลิตรโดยคงอัตราส่วนเดิมไว้ และทำการเพิ่มปริมาตรเป็น 60, 90, 120, 150 มิลลิลิตรตามลำดับ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 30 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทดลองกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียง คือ 10 นาที

## บทที่ 7 ผลการทดลอง

### วิธีการทดลองด้วยอ่างอัตราไซนิก

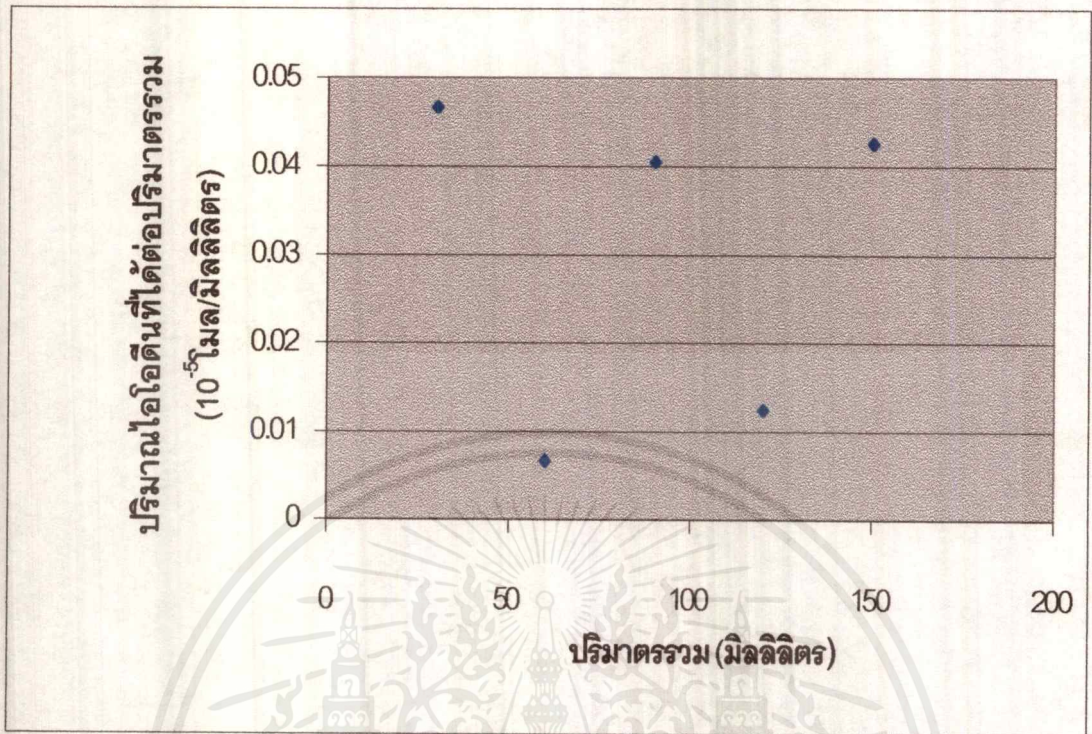
#### 7.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารภายในระบบ



รูปที่ 7.1 ปริมาณไอโอดีนที่ได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรรวม

จากผลการทดลองซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของสารในระบบจะมีผลทำให้ปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ คือ ไอโอดีนมีค่าสลับขึ้นลง และเมื่อนำปริมาณของไอโอดีนที่เกิดขึ้นหารด้วยปริมาตรรวมของสารในระบบจะพบว่า ปริมาณของไอโอดีนที่เกิดขึ้นนั้นจะค่าเข้าใกล้อยู่ 2 ค่าด้วยกันโดยจะมีค่าเข้าใกล้ปริมาณของไอโอดีน  $0.01 \times 10^{-5}$  และ  $0.04 \times 10^{-5}$  มิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.2 ปริมาณไอโอดีนที่ได้ต่อปริมาตรรวมหนึ่งหน่วยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรรวม

ผลการทดลองที่เกิดขึ้นนั้นอาจเกิดจากระดับของของเหลวในภาชนะบรรจุเกิดการเปลี่ยนแปลงอันเป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของสารในระบบนั่นเอง เมื่อระดับของของเหลวเกิดการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อการเดินทางของคลื่นเสียงในของเหลว 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

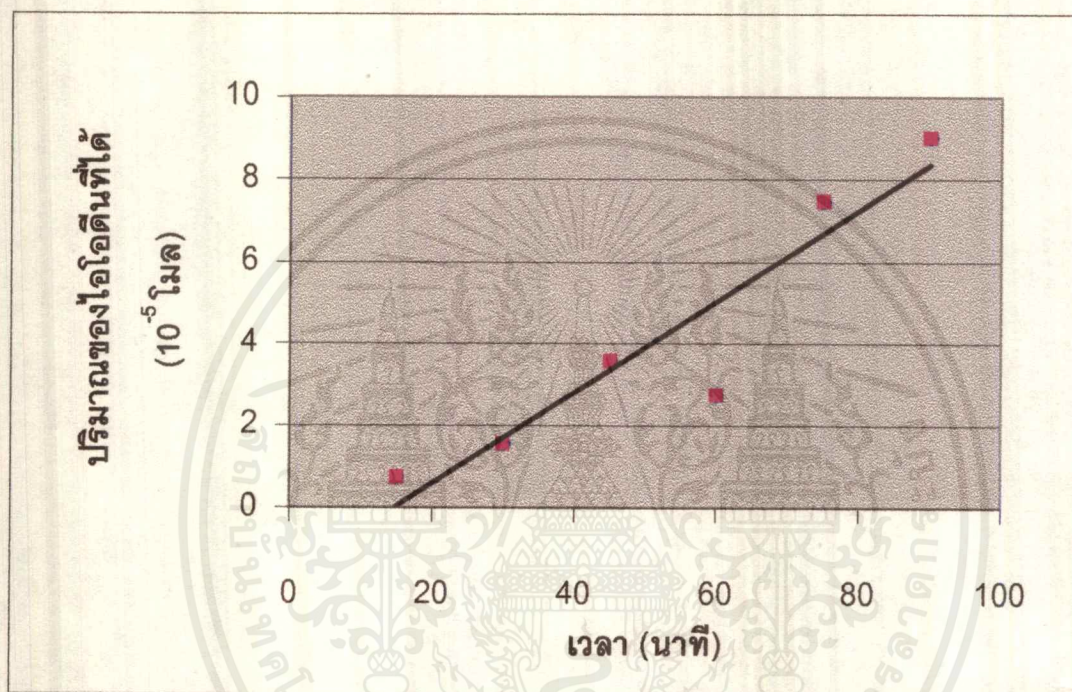
1. เนื่องจากคลื่นเสียงที่ปล่อยออกมาได้จากแหล่งกำเนิดหลายแหล่ง ในที่นี้อ่างอัลตราโซนิกมีหัวทรานสดิวเซอร์ทั้งหมด 6 หัว ทำให้การเดินทางของคลื่นเสียงในของเหลวเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันและหักล้างกันตามระยะทางที่คลื่นเสียง สามารถเดินทางผ่านไปได้ ระยะทางที่คลื่นเสียงเดินทางในการทดลองนี้ก็คือ ระดับของของเหลวในภาชนะบรรจุนั่นเอง ถ้าหากระดับของของเหลวอยู่ในระดับที่เหมาะสมในการเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันก็จะช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดมากขึ้นได้ แต่ถ้าเป็นแบบหักล้างกันก็จะลดปฏิกิริยาให้เกิดได้น้อยลง

2. การเดินทางของคลื่นเสียงผ่านตัวกลางหลายชนิดจะทำให้เกิดหักเหและสะท้อนกลับของคลื่นเสียง ในการทดลองสารภายในระบบจะอยู่ในรูปของสารซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวและมีอากาศซึ่งมีสถานะเป็นก๊าซ เมื่อคลื่นเสียงเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลวและเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นก๊าซ คลื่นเสียงบางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ (Reflection) คลื่นที่สะท้อนกลับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำการแทรกสอดกับคลื่นที่เดินทางมาใหม่ซึ่งจะมีทั้งการเสริมกันและหักล้างกันทำให้มีผลกระทบต่อปฏิกิริยา

## 7.2 การเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียง

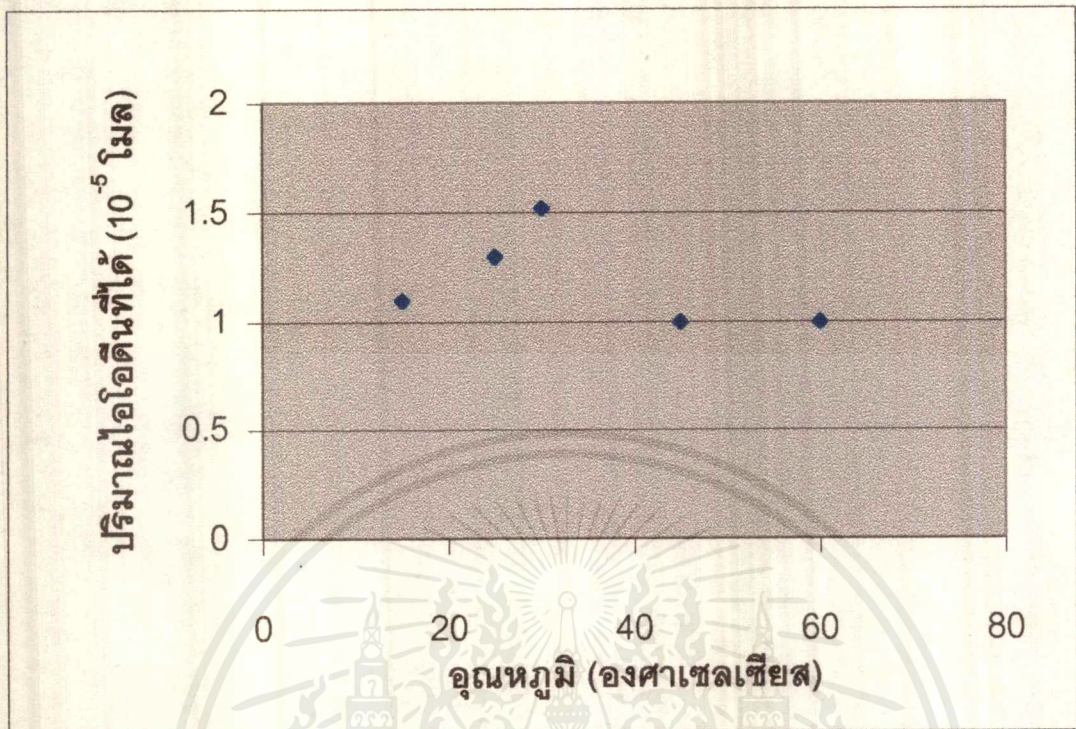


รูปที่ 7.3 ปริมาณไอโอดีนที่ได้เมื่อมีการเปลี่ยนระยะเวลาที่ทำกรทดลอง

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงเวลาในการใช้คลื่นเหนือเสียงช่วยเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ปริมาณของสารไอโอดีนที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นสมการเส้นตรง กล่าวคือ เมื่อใช้เวลาในการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยคลื่นเหนือเสียงนานมากขึ้น ปริมาณของสารไอโอดีนก็จะเกิดขึ้นมากเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากกลไกในการเกิดโพรงช่องว่างเกิดได้นานขึ้นซึ่งจะทำให้มีฟองจำนวนมากเกิดขึ้น และเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น

## 7.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของปฏิกิริยา

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิของน้ำในอ่างอัลตราโซนิกที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลกระทบต่อปริมาณของสารไอโอดีนไม่มากนัก และอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยา คือ มีอุณหภูมิประมาณ 30-40 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการดำเนินด้านการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.4 ปริมาณไอไอโอดีนที่ได้เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ  
ในอ่างทดลอง

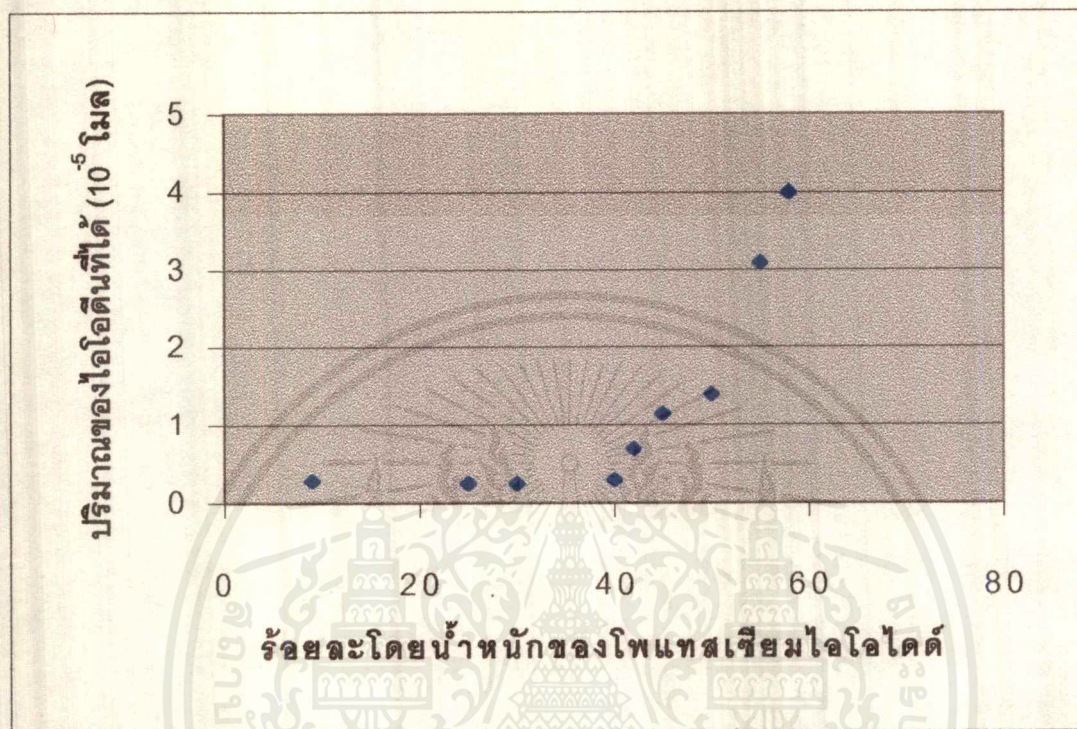
ปริมาณของสารไอไอโอดีนเกิดมาก ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส สาเหตุที่อุณหภูมิมีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่มากนักเป็นผลมาจากคุณสมบัติของสารตั้งต้นในระบบ คือ คาร์บอนเตตระคลอไรด์ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่มีปริมาณมากที่สุดในระบบ คาร์บอนเตตระคลอไรด์มีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ มีความดันไอสูง (High Vapour Pressure) ทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไม่มีผลกับความดันไอนัก [1]

## 7.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารในระบบ

### 7.4.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอโอไดด์

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ผลของความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอโอไดด์ซึ่งมีความเข้มข้นต่ำกว่า 40 % โดยน้ำหนักจะไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่าใด แต่ถ้าความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอโอไดด์มีความเข้มข้นสูงกว่า 40 % โดยน้ำหนัก จะทำให้เกิดสารไอไอโอดีนใน

ปริมาณมากขึ้น นั่นคือ หากโพแทสเซียมไอโอไดด์มีความเข้มข้นไม่สูงมากพอก็จะไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่าที่ควร



รูปที่ 7.5 ปริมาณของไอโอดีนที่ได้เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณของโพแทสเซียมไอโอไดด์

#### 7.4.2 การเปลี่ยนแปลงความปริมาตรของคาร์บอนเตตระคลอไรด์

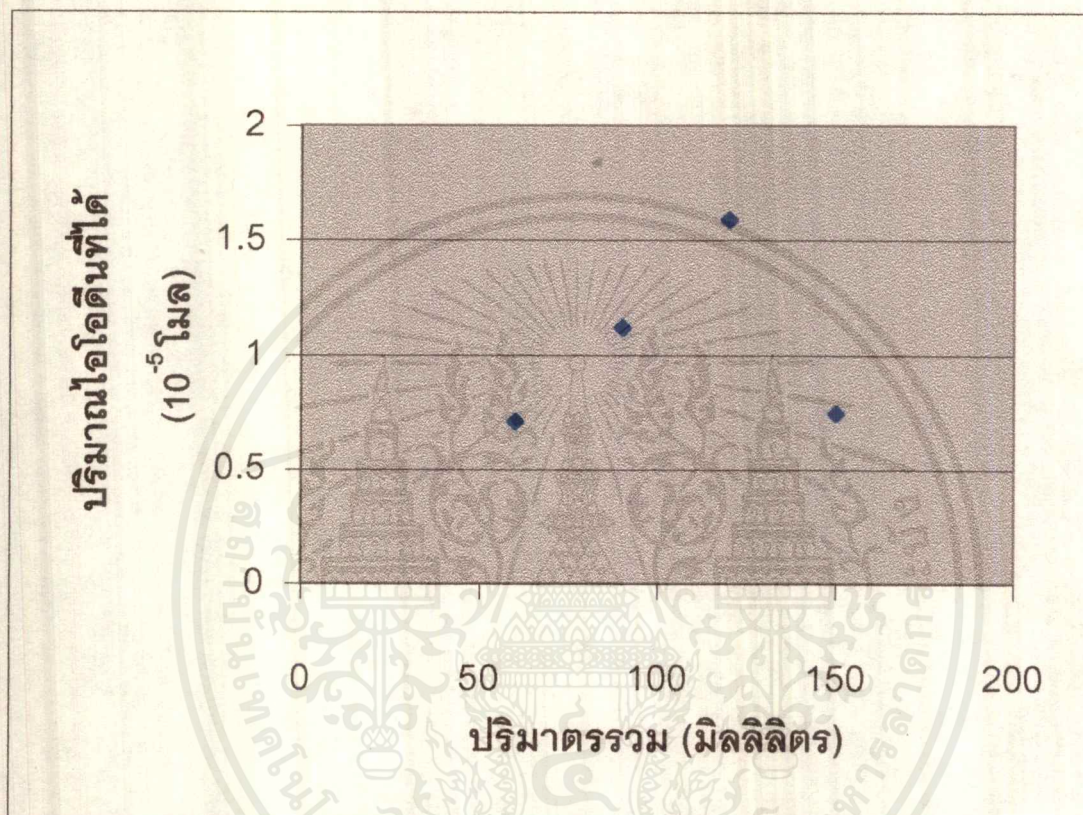
ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาตรของคาร์บอนเตตระคลอไรด์ที่เปลี่ยนแปลงไปจะมีผลกระทบต่อปริมาณของสารไอโอดีน ปริมาตรของคาร์บอนเตตระคลอไรด์ที่เหมาะสมโดยให้ปริมาณของสารไอโอดีนสูงสุดคือ 35 มิลลิลิตร การใช้ปริมาตรของคาร์บอนเตตระคลอไรด์ในปริมาณที่สูงจะส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาโดยจะทำให้พลังงานของคลื่นเหนือเสียงกระจายตัวออกไป อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดน้อยลง [2]

[1] Timothy J. Mason, *Advances in Sonochemistry*, 1<sup>st</sup> ed. (United States of America: Jai Press Ltd., 1991):126

[2] Alfred Weissler, Herbert W. Cooper, and Stuart Snyder, "Chemical Effect of Ultrasonic Waves: Oxidation of Potassium Iodide Solution by Carbon Tetrachloride":

## การทดลองด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

### 7.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของสารภายในระบบ



รูปที่ 7.6 ปริมาณไอไอโอดีนที่ได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรรวม

ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึง ปริมาณของสารไอไอโอดีนที่เกิดเพิ่มขึ้นตามปริมาตรที่เพิ่มขึ้นในระยะเวลาการทดลองช่วงแรก แต่หลังจากที่เดินเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียงไปได้ระยะหนึ่ง ประสิทธิภาพของเครื่องจะลดลงทั้งนี้เนื่องมาจากการระบายความร้อนยังไม่ได้เท่าที่ควร และความชื้นจากสารละลายจะมีผลต่อการสั่นของหัวขับด้วย

## บทที่ 8

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการทดลอง

1. จากผลการทดลองในอ่างอัลตราโซนิกทำให้ทราบว่า เวลาที่ใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยคลื่นเหนือเสียงนั้นหากใช้เวลานานก็จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้มากขึ้นตามไปด้วย
2. ปริมาตรของสารภายในระบบที่ใช้กันยังไม่สามารถสรุปผลได้แน่ชัดนัก โดยปริมาตรจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระดับของของเหลวภายในภาชนะบรรจุซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการเดินทางของคลื่นเสียงในของเหลว
3. อุณหภูมิมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา เนื่องจากสารละลายในระบบมีปริมาตรของคาร์บอนเตตระคลอไรด์เป็นปริมาตรหลัก และคุณสมบัติของคาร์บอนเตตระคลอไรด์ประการหนึ่ง คือ มีความดันไอสูง (High Vapour Pressure) ทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไม่มีผลกับความดันไอนัก
4. สำหรับความเข้มข้นของสารภายในระบบนั้น ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮไดรด์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาสูงสุด คือ ที่ความเข้มข้นประมาณ 60 % โดยน้ำหนัก ปริมาตรของคาร์บอนเตตระคลอไรด์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาสูงสุด คือ ปริมาตร 35 มิลลิลิตร
5. ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองจากเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ประดิษฐ์ขึ้นยังให้ผลการทดลองที่ไม่ดีนัก ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่และประสิทธิภาพของเครื่องยังไม่สูงพอเนื่องจากเมื่อทำการทดลองซ้ำแล้วให้ผลที่แตกต่างกัน

#### ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดลองปฏิกิริยาจะมีตัวแปรจำนวนมากที่ไม่สามารถควบคุมได้ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยา เช่น การสั่นของหัวขั้วที่ไม่คงที่เนื่องมาจากเวลาที่ใช้งาน ความร้อนจากการใช้งาน ความชื้น จึงหวั่นการสั่นที่ไม่คงที่ตามธรรมชาติของหัวขั้ว การเคลื่อนที่ของตำแหน่งแขนจับและแท่นยึดอันเป็นผลมาจากการสั่นสะเทือน เป็นต้น ดังนั้นในการทดลองจึงต้องทำการ

ทดลองซ้ำหลายครั้ง และในบางครั้งจะต้องทำการสุ่มทำการทดลองอีกครั้งเพื่อให้ทราบผลการทดลองและจำเป็นต้องทำการตัดผลการทดลองในบางครั้งที่มีความคลาดเคลื่อนสูงออกไป

2. ข้อมูลเอกสารอ้างอิงที่มีอยู่ในประเทศไทยมีค่อนข้างจำกัด ทำให้เกิดความยากลำบากในการรวบรวมข้อมูล การแก้ไขสามารถกระทำได้โดยการข้อมูลผ่านทาง Internet ทั้งจาก Web Site ต่าง ๆ และจากการส่งจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ (E-mail) ไปยังผู้ที่ทำการศึกษาซึ่งเป็นชาวต่างชาติ นอกจากนี้ยังมีการขอความร่วมมือในการส่งเอกสารและหนังสือจากต่างประเทศเพื่อนำมาใช้ประกอบทำรายงานอีกด้วย

3. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองมีราคาแพงและหาได้ยากทำให้มีปัญหาความล่าช้าในการทำโครงการ การแก้ไขจึงใช้วิธีขอความอนุเคราะห์จากหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนในการขอใช้อุปกรณ์และเครื่องมือ ซึ่งทำให้โครงการมีความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก

4. เครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ประดิษฐ์ขึ้นนั้นยังต้องทำการแก้ไขปรับปรุงต่อไป แต่ยังมีอุปสรรคสำคัญ คือ ข้อมูลในการออกแบบตัว Horn และหัวขับ ตลอดจนโลหะผสม (Alloy) ที่จะใช้มีราคาแพงและหาได้ยาก แต่หากได้มีการศึกษาและพัฒนาเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียงอย่างต่อเนื่องแล้วประสิทธิภาพของเครื่องจะอยู่ในระดับที่สามารถใช้งานได้จริงและมีราคาถูกกว่าที่สั่งซื้อจากต่างประเทศมาก

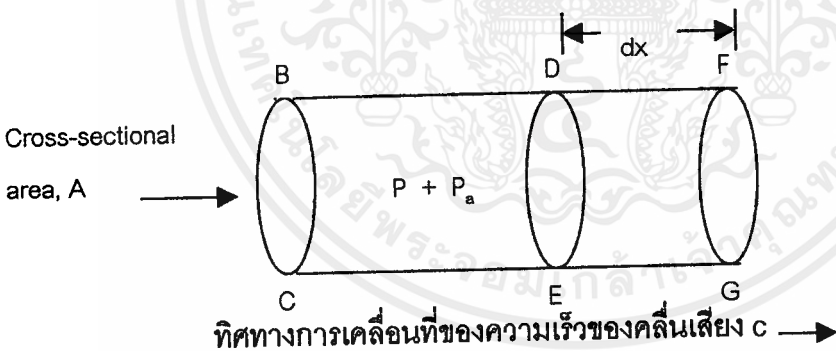
## เอกสารอ้างอิง

1. Kenneth S. Suslick. Sonochemistry. Science. (March 1990) : 1439-1445.
2. Kenneth S. Suslick. The Chemical Effects of Ultrasound. Scientific American. (February 1989) : 62-68.
3. Pandit A. B., Moholkar V. S. Harness Cavitation to Improve Processing. Chemical Engineering Progress. (July 1996) : 57-69.
4. Timothy J. Mason, J. Phillip Lorimer. Sonochemistry: Theory, Application and Uses of Ultrasound in Chemistry. 1 st.ed. England : Ellis Horwood Limited, 1988.
5. Heinrich Kuttruff. Ultrasonics Fundamentals and Applications. England : Elsevier Science Publishers Ltd., 1991.
6. สมนึก ศิริสุนทร. อุตสาหกรรมเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกส์. เซรามิกส์. ปีที่ 3 (เดือนกันยายน-ธันวาคม 2540) : 72-75.
7. John, P., Bentley. Principle of Measurement Systems. 2 nd.ed.
8. McGraw-Hill Concise Encyclopedia of Science&Technology. 2 nd.ed. : McGraw-Hill Inc., 1989.
9. Ashish Bhatnagar and H. Michael Cheung. Sonochemical Destruction of Chlorinated C1 and C2 Volatile Organic Compounds in Dilute Aqueous Solution. Environmental Science and Technology. (Vol.28, No.8, 1994) : 1481-1488.
10. Shreekumar Kurup and H. Michael Cheung. Sonochemical Destruction of CFC11 and CFC13 in Dilute Aqueous Solution. Environmental Science and Technology. (Vol.28, No.9, 1994) : 1611-1622.
11. Alfred Weissler, Herbert W. Cooper and Stuart Snyder. Chemical Effect of Ultrasonic Waves. The Journal of American Chemical Society. (April 1950) : 1769-1775.
12. Timothy J. Mason, J. Phillip Lorimer. Advances in Sonochemistry. 1 st.ed. England : JAI PRESS LTD, vol 2, 1991.

**ภาคผนวก ก**  
**การคำนวณเกี่ยวกับโพรงช่องว่าง**

**1. ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอนุภาคและความดันจากการกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียง**

พิจารณาของเหลวปริมาตรขนาดหนึ่งตามภาพ ที่ความดันปรกติ ( $P$ ) ความหนาแน่นของของเหลว ( $\rho$ ) และความดันที่เกิดจากคลื่นเหนือเสียง ( $P_a$ ) ภายใต้สภาวะการให้ความดันที่เกิดจากคลื่นเหนือเสียงในขนาดที่มากเกินไปพอ อนุภาคในของเหลว ณ บริเวณ BC จะมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของคลื่นเสียง ความเร็วของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นจากศูนย์ที่ตำแหน่ง BC ไปจนถึงความเร็ว  $v$  ที่ตำแหน่ง DE คลื่นเสียงซึ่งมีความเร็ว  $c$  จะเคลื่อนที่ผ่านจาก ตำแหน่ง DE ไปยังตำแหน่ง FG เป็นระยะทาง  $dx$  ในเวลา  $dx / c$  วินาที ดังนั้นความเร่งของอนุภาคจะมีค่าเป็น  $vc / dx$  สำหรับในปริมาตรขนาดเล็กนั้นสามารถกำหนดให้  $v$  คงที่ได้



รูปที่ ก-1 ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงที่มีผลกระทบต่อของเหลว

การพิจารณาแรงที่กระทำเพื่อการเร่งอนุภาคให้เคลื่อนที่สามารถคำนวณหาได้จากความดันที่ตกลงบนพื้นที่ทั้งหมด (ความดัน  $\times$  พื้นที่หน้าตัด)

$$F = P_a A = ma \tag{1}$$

$$m = \rho A dx \tag{2}$$

$$a = vc / dx \tag{3}$$

นำสมการ (2) และ (3) แทนลงในสมการ (1)

$$P_a A = (\rho A dx)(vc / dx) \tag{4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ความสัมพันธ์ระหว่างความดันวิกฤต ( $P_c$ ) และรัศมีของฟอง ( $R_c$ )

พิจารณาฟองในของเหลวในสภาวะสมดุล ซึ่งหมายถึง สภาวะที่ฟองไม่มีการขยายตัวหรือหดตัว ซึ่งฟองจะมีรัศมีของ ( $R_c$ ) คงที่ นั่นคือ แรงหรือความดันที่กระทำต่อผนังของฟองเพื่อให้ฟองแตกตัวจะเท่ากับแรงหรือความดันที่พยายามทำให้ผนังของฟองขยายตัว

ในกรณีของการขยายตัว ความดันของการขยายตัว ( $P_{bub}$ ) จะเกิดจากความดันของก๊าซที่ละลายอยู่ภายในของเหลว ( $P_g$ ) และความดันไอของของเหลว ( $P_v$ )

$$(P_{bub}) = P_v + P_g \quad (6)$$

ในกรณีของการหดตัว ความดันของการหดตัว ( $P_L$ ) จะเกิดจากความดันของของเหลว (Hydrostatic Pressure :  $P_h$ ) และแรงตึงผิวของของเหลว ( $2\sigma / R_c$ )

$$P_L = P_h + (2\sigma / R_c) \quad (7)$$

ณ สภาวะสมดุล ซึ่งไม่มีการขยายตัวหรือหดตัวจะได้ว่า  $P_{bub} = P_L$

$$P_v + P_g = P_h + (2\sigma / R_c) \quad (8)$$

สมมติให้รัศมีของฟอง ( $R_c$ ) มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเป็นขนาดรัศมีของฟองขนาดใหญ่ ( $R$ ) อันเป็นผลเนื่องมาจากความดันของของเหลวเป็นความดันใหม่ ( $P'_h$ ) และกำหนดให้ฟองมีลักษณะพฤติกรรมเหมือนก๊าซอุดมคติ ดังนั้นความดันใหม่ของก๊าซที่ละลายอยู่ภายในของเหลว คือ ( $P'_g$ ) ดังนั้นความดันใหม่ภายในฟอง ( $P'_{bub}$ ) คือ

$$P'_g = nRT / V' \quad (9)$$

$$V' = 4 / 3 \pi R^3 \quad (10)$$

นำสมการ (10) แทนในสมการ (9)

$$P'_g = nRT / (4 / 3 \pi R^3) \quad (11)$$

ณ สภาวะสมดุล

$$P_g = nRT / V \quad (12)$$

$$V = 4 / 3 \pi R_c^3 \quad (13)$$

นำสมการ (13) แทนในสมการ (12)

$$P_g = nRT / (4 / 3 \pi R_c^3) \quad (14)$$

นำสมการ (11) หาดด้วยสมการ (14)

$$P'_g = P_g (R_c / R)^3 \quad (15)$$

ดังนั้นความดันของการขยายตัวใหม่ ( $P'_{bub}$ ) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ ( $P'_{bub}$ ) จะเท่ากับ  $P'_v$  งาน + การที่  $P'_g$  เท่ากัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (16) การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการ (15) แทนในสมการ (16)

$$(P'_{bub}) = P_v + P_o (R_o / R)^3 \tag{17}$$

การเปลี่ยนแปลงขนาดรัศมีของฟองความดันของการหดตัวใหม่ ( $P'_L$ ) จะได้เป็น

$$(P'_L) = P'_h + (2\sigma / R) \tag{18}$$

ณ สภาวะสมดุลใหม่

$$P'_{bub} = P'_L \tag{19}$$

$$P_v + P_o (R_o / R)^3 = P'_h + (2\sigma / R) \tag{20}$$

$$P'_h = P_v + P_o (R_o / R)^3 - (2\sigma / R) \tag{21}$$

จากสมการ (21) ความดันของของเหลวใหม่ ( $P'_h$ ) จะไม่เป็นสมการเส้นตรง โดยจะขึ้นอยู่กับส่วนกลับรัศมีของฟองยกกำลังสาม นั่นคือ เมื่อความดันของของเหลวลดลงเพียงเล็กน้อย รัศมีของฟองจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นหากลดความดันของเหลวให้มิต่ำน้อยลงจะทำให้รัศมีของฟอง ( $R$ ) เพิ่มขึ้นอย่างมากจะทำให้ฟองไม่เสถียรและจะระเบิดแตกตัวในที่สุด รัศมีของฟองขณะที่เกิดการแตกตัวจะเรียกว่า รัศมีวิกฤต ( $R_k$ ) ซึ่งจะปรากฏเมื่อ  $dP'_h / dR$  มีค่าเท่ากับศูนย์

การประมาณค่าของรัศมีวิกฤต ( $R_k$ ) หาได้จากวิธีดิฟเฟอเรนเชียลด้านขวาของสมการ (21) โดยเทียบกับรัศมีของฟอง ( $R$ ) และให้มีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้ว่า

$$dP'_h / dR = P_v dR + P_o (R_o / R)^3 dR - (2\sigma / R) dR \tag{22}$$

กำหนดให้  $dP'_h / dR = 0$

$$0 = -3 P_o (R_o^3 / R^4) - (2\sigma / R^2) \tag{23}$$

แทนค่ารัศมีของฟอง ( $R$ ) ด้วยรัศมีวิกฤต ( $R_k$ ) และจัดรูปใหม่จะได้เป็น

$$R_k^2 = (3 / 2\sigma) P_o R_o^3 \tag{24}$$

ความดันวิกฤต ( $P_k$ ) จะเกิดขึ้นเมื่อรัศมีของฟอง ( $R$ ) นั้นขยายตัวจนมีค่าเท่ากับรัศมีวิกฤต ( $R_k$ ) เมื่อเทียบกับสมการ (21)

$$P_k = P_v + P_o (R_o / R_k)^3 - (2\sigma / R_k) \tag{25}$$

นำสมการ (24) แทนในสมการ (25)

$$P_k = P_v - (2 / 3) \{ (2\sigma / R_o)^3 / P_o \}^{1/2} \tag{26}$$

นำค่า  $P_o$  จากสมการ (8) แทนในสมการ (26)

$$P_k = P_v - (2 / 3) \{ (2\sigma / R_o)^3 / 3 (P_h - P_v + (2\sigma / R_o)) \}^{1/2} \tag{27}$$

ถ้าไม่นำความดันไอของของเหลว ( $P_v$ ) มาพิจารณาด้วยเพราะถือว่ามีค่าน้อยมากจะได้

ค่าความดันวิกฤต ( $P_k$ ) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_k = - (2/3) \{ (2\sigma / R_0)^3 / 3 (P_h + (2\sigma / R_0)) \}^{1/2} \quad (28)$$

ค่าความดันมีค่าติดลบเนื่องจากเป็นค่าความดันที่จะถูกใช้ไปในการเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวภายในของเหลวเพื่อให้ได้รัศมีของฟอง ณ สภาวะสมดุล ( $R_0$ ) โดยกำหนดให้

$$P_k = P_h - P_B \quad (29)$$

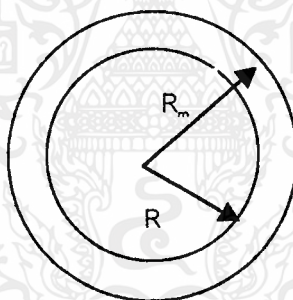
$P_B$  เป็นค่าความดันติดลบเนื่องจากเป็นความดันที่เกิดขึ้นในจังหวะขยายของคลื่นเสียง เพื่อที่จะใช้ในการสร้างรัศมีของฟอง ณ สภาวะสมดุล ( $R_0$ ) ในกรณีฟองขนาดใหญ่ซึ่งจะมีแรงตึงผิวน้อยกว่าความดันของของเหลวมาก [ $(2\sigma / R_0) \ll P_h$ ] จะได้ว่า

$$P_B \sim P_h + (8\sigma / 9) \{ 3\sigma / (2P_h R_0^3) \}^{1/2} \quad (30)$$

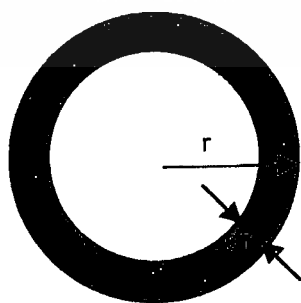
ในกรณีฟองขนาดเล็ก

$$P_B \sim P_h + (0.77\sigma / R_0) \quad (31)$$

### 3. เวลาในการสลายตัวของฟอง



รูปที่ ก-2 การสลายตัวของฟองภายใต้สภาวะความดันภายนอกคงที่ ( $P_h$ )



รูปที่ ก-3 การเคลื่อนที่ของของเหลวเข้าไปแทนช่องว่างเมื่อขนาดรัศมีของฟองเล็กลง

พิจารณาฟองที่ว่างเปล่าซึ่งสลายตัวภายใต้สภาวะความดันภายนอกคงที่ ( $P_h$ ) จากรัศมีเริ่มต้น ( $R_m$ ) จนกระทั่งถึงรัศมีสุดท้าย ( $R$ ) (รูปที่ 2) งานที่ได้เกิดขึ้นจากความดันของของเหลวซึ่งเป็นผลมาจากความดันและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของฟอง โดยไม่คำนึงถึงผลจากแรงตึงผิวของฟอง โดยจะได้สมการออกมาเป็น

$$\int_R^{R_m} P_h 4\pi R^2 dR = P_h (4\pi/3) [R_m^3 - R^3] \tag{32}$$

งานที่ได้นี้จะมีค่าเท่ากับค่าพลังงานจลน์ของของเหลว ( $mv^2 / 2$ ) ที่ใช้ในการเคลื่อนที่เข้าไปแทนช่องว่างภายหลังการสลายตัวของฟอง โดย

$(dr / dt)$  คือความเร็วในการเคลื่อนที่

$4\pi r^2 dr$  คือปริมาตรของของเหลวที่เคลื่อนที่

$(1 / 2) \rho 4\pi r^2 dr (dr / dt)^2$

ดังนั้น จะได้รูปสมการคือ

$$P_h (4\pi/3) [R_m^3 - R^3] = 2\pi\rho \int_R^{R_m} r^2 dr (dr / dt)^2 \tag{33}$$

จากสมการ (33) จะมีทั้ง  $dr$  และ  $(dr / dt)$  ซึ่งทำให้ยากในการอินทิเกรต ดังนั้นจึงกำหนดให้ของเหลวเป็นของเหลวที่ไม่สามารถกดอัดได้ และปริมาตรของเหลวที่หายไปเนื่องจากการสลายตัว ( $4\pi R^2 dR$ ) จะมีค่าเท่ากับปริมาตรของของเหลวที่เคลื่อนที่เข้าไปแทนที่ ( $4\pi r^2 dr$ )

$$R^2 dR = \pi r^2 dr \tag{34}$$

จากนั้นนำ  $dt$  มาหารทั้งสองข้างของสมการ (33) แล้วจัดรูปจะได้

$$(dr / dt) = (R^2 / r^2)(dR / dt) \tag{35}$$

นำสมการ (35) แทนในสมการ (33)

$$\begin{aligned} P_h (4\pi / 3) [R_m^3 - R^3] &= 2\pi\rho \int_R^{R_m} r^2 dr (R^4 / r^4) (dR / dt)^2 \\ &= 2\pi\rho R^4 (dR / dt)^4 \int_R^{R_m} dr / r^2 \end{aligned} \tag{36}$$

อินทิเกรตสมการ

$$\begin{aligned} (4\pi / 3) P_h (R_m^3 - R^3) &= 2\pi\rho R^4 (dR / dt)^2 [-1 / r]_R^{R_m} \\ (4\pi / 3) P_h (R_m^3 - R^3) &= 2\pi\rho R^4 (dR / dt)^2 \end{aligned} \tag{37}$$

จัดรูปได้

$$dR / dt = (2P_h / 3\rho)^{1/2} [(R_m^3 / R^3) - 1]^{1/2} \tag{38}$$

$$dt = dR / \{(2P_h / 3\rho) [(R_m^3 / R^3) - 1]\}^{1/2} \tag{39}$$

เวลาที่ใช้ในการสลายตัวของฟองสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีเกรตทางด้านขวาของสมการที่ (39) จาก  $R_m$  ถึง 0 จะได้

$$\tau \cong 0.915R_m(\rho / P_h)^{1/2} \tag{40}$$

ในกรณีที่มีการกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียง ความดันในของเหลว ( $P_m$ ) จะสูงขึ้นกว่าความดันปกติเป็นปริมาณ  $P_a$  นั่นคือ  $P_m = (P_h + P_a)$  เมื่อ  $P_a = P_A \sin 2\pi ft$  และ  $P_m$  เป็นความดันในของเหลวในระยะเริ่มต้นการสลายตัวของฟอง ดังนั้นสามารถจัดรูปสมการ (40) ได้ว่า

$$\tau \cong 0.915R_m(\rho / P_m)^{1/2} \tag{41}$$

สมการที่ (41) มีสมมติฐานว่า

$$\tau = 0.915R_m(\rho / P_m)^{1/2}(1+P_a/P_m) \tag{42}$$

#### 4. การเคลื่อนที่ของผนังฟอง

จากหัวข้อที่ 3 สมการที่ (31) ได้แสดงให้เห็นว่า งานที่ได้มาจากความดันภายนอก  $P_h$  ทำให้ฟองสลายตัวจากรัศมี  $R_m$  ไปยัง  $R$  สามารถเขียนได้ว่า

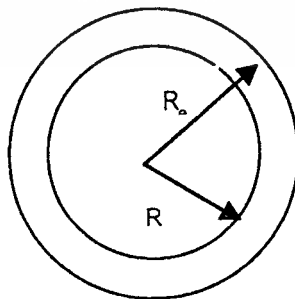
$$\int_R^{R_m} P_h 4\pi R^2 dR \tag{43}$$

งานดังกล่าวมีค่าเท่ากับพลังงานจลน์ในการเคลื่อนที่ของของเหลว

$$KE = 2\pi\rho R^3 \tag{44}$$

$$\text{เมื่อ } R \cdot = dR / dt$$

สมการดังกล่าวข้างต้นจะใช้ในกรณีที่เป็นโพรงช่องว่างหรือฟองที่ไม่มีก๊าซ หรือไอของของเหลว และไม่พิจารณาผลกระทบจากแรงตึงผิว ( $\sigma$ )



รูปที่ n-4 การลดขนาดของผนังฟอง จากขนาดรัศมี  $R_m$  ไปเป็น  $R$

พิจารณาการเคลื่อนที่ของฟองที่มีก๊าซและไอของของเหลวอยู่ โดยเริ่มต้นที่ขนาดรัศมี  $R_0$  ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความดันของของเหลว ( $P_h$ ) บริเวณรอบ ๆ อันเกิดจากการให้คลื่นเหนือเสียงเข้าไป

ช่วงเวลาใดๆ ของจังหวะการกดอัดของคลื่นเสียง ความดันของของเหลวใหม่  $P'_h$  ( $P'_h = P_h + P_a$ ) จะทำให้รัศมีของฟองมีขนาดลดลงจาก  $R_0$  ไปเป็น  $R$  (ในรูปที่ 4)

ความดันทั้งหมดในการทำให้เกิดการสลายตัวของฟองคือ  $P'_h + (2\sigma / R)$  ซึ่งการสลายตัวของฟองนี้ จะมีความรุนแรงเพิ่มขึ้นหากแรงตึงผิวมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ฟองจะมีขนาดเล็กลง แต่จะมีความรุนแรงลดลงหากมีการเพิ่มความดันในฟอง ( $P'_{bub}$ ) เนื่องจากการกดอัดของก๊าซ ซึ่งเป็นผลให้ฟองขยายตัวใหญ่ขึ้น

ในทำนองเดียวกันกับการคำนวณของฟองที่ว่างเปล่า งานจะได้จากความดันของของเหลวใหม่ ( $P'_h$ ) ลบด้วยค่าความดันของของเหลวในบริเวณใกล้เคียง ซึ่งมีค่าเท่ากับพลังงานจลน์ของของเหลว

$$-\int_R^{R_0} [(P'_h + 2\sigma / R - P'_{bub}) 4\pi R^2 dR] = 2\pi \rho R^3 R'^2 \quad (45)$$

อินทิเกรตสมการที่ (43) จะได้

$$(P'_{bub} - P'_h - 2\sigma / R) 4\pi R^2 dR = 2\pi \rho [3R^2 R'^2 dR + R^3 2R'' dR] \quad (46)$$

นำสมการที่ (46) หารตลอดด้วย  $2\pi R^2 dR$  และจัดรูปจะได้

$$RR'' + 3R'^2 / 2 = 1/\rho [P'_{bub} - P'_h - 2\sigma / R] \quad (47)$$

จากหัวข้อที่ 1 และ 2

$$P'_{bub} = P_v + P_g (R_0 / R)^3 \quad (17)$$

และ

$$P_g = (P_h + 2\sigma / R_0) - P_v \quad (16)$$

แทนค่าลงในสมการ (47) และแทนค่า  $P'_h$  ด้วย  $(P_h + P_a)$  โดยสมมติให้ความดันไอของของเหลวมีค่าน้อยมาก ( $P_v = 0$ ) จะได้

$$RR'' + 3R'^2 / 2 = 1/\rho [(P_h + 2\sigma / R) (R_0 / R)^3 - 2\sigma / R - P_h - P_a] \quad (48)$$

ถ้าความดันที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียง  $P_a$  ถูกแทนด้วย  $P_A \sin \omega t$  ซึ่งเป็นรูปแบบที่เหมาะสมกับ sinusoidal wave ที่มีความดัน  $P_A$  และ ความเร็วรอบ  $\omega_A = 2\pi R$  ดังนั้นจากสมการที่ (48) จะได้

$$RR'' + 3R'^2 / 2 = 1/\rho [(P_h + 2\sigma / R) (R_0 / R)^3 - 2\sigma / R - P_h + P_A \sin \omega t]$$

$$RR'' + 3R'^2 / 2 = 1/\rho (P_h + 2\sigma / R) (R_0 / R)^3 - 2\sigma / R - P_h + P_A \sin \omega t \quad (49)$$

เมื่อค่า K เป็นดรรชนีของก๊าซ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง ค่าอัตราส่วนความจุความร้อนจำเพาะของสาร  $\gamma$  และ 1 เมื่อเป็นระบบอะไดแบติก (adiabatic) และไอโซเทอร์มอล (isothermal)

5. อุณหภูมิ  $T_{max}$  และความดัน  $P_{max}$  สูงสุด

ในหัวข้อที่ 4 เราได้สมการของการเคลื่อนที่ของผนังโพรงช่องว่างในการสลายตัวเนื่องจากความดันภายนอก  $P'_h$  คือ

$$RR'' + 3R^2/2 = 1 / \rho [P'_{bub} - P'_h - 2\sigma / R] \tag{50}$$

เมื่อความดันในฟองที่มีรัศมี R คือ  $P'_{bub}$  นิยามโดย

$$P'_{bub} = P_v + P_g (R_g / R)^3$$

โดย  $P_g$  เป็นความดันของก๊าซที่มีอยู่ในฟองที่มีรัศมีเริ่มต้น  $R_0$

ในกรณีที่มีการให้คลื่นเหนือเสียงมากระตุ้นให้เกิดฟอง กำหนดให้เวลาที่ใช้ในการสลายตัวของฟองที่มีรัศมีเริ่มต้น  $R_0$  สั้นกว่าช่วงเวลา 1 คาบของอัดและขยายของคลื่นเสียง โดยมีสมมติฐานดังนี้

- ความดันภายนอกซึ่งมีค่า  $P'_h = P_a + P_h$  จะกำหนดให้เป็นค่าคงที่ ( $P_m$ ) ในช่วงของการสลายตัว
- ไม่พิจารณาผลกระทบจากแรงตึงผิวและความดันไอ
- ระบบเป็นการกดอัดแบบอะไดแบติก (Adiabatic Compression) ในช่วงการกดอัดสั้นๆ นั่นคือ ไม่มีความร้อนถ่ายเทออกนอกระบบ
- แทนค่ารัศมี  $R_0$  ด้วย  $R_m$  ซึ่งเป็นขนาดรัศมีของฟองขณะที่เริ่มมีการสลายตัว

จากสมมติฐานดังกล่าว จะได้ว่า การเคลื่อนที่ของผนังฟองมีสมการ

$$RR'' + 3R^2/2 = 1 / \rho [P_g (R_m / R)^3 - P_m] \tag{51}$$

ในการสลายตัวของฟองภายใต้สภาวะที่มีการกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียง ฟองนี้จะลดขนาดลงจนมีขนาดเล็กที่สุด ( $R_{min}$ ) ในจังหวะการกดอัดของคลื่นเสียง หลังจากนั้นรัศมีของฟองจะขยายใหญ่ขึ้นจนถึงขนาดรัศมี ( $R_m$ ) และจะมีขนาดเล็กและใหญ่ขึ้นสลับกันไปเรื่อย ๆ ดังนั้นขนาดของรัศมีจะอยู่ในช่วงรัศมีระหว่าง ( $R_m$ ) ถึง ( $R_{min}$ ) ในช่วงเวลาที่ฟองมีขนาดเท่ากับรัศมีสูงสุด ( $R_m$ ) หรือต่ำสุด ผนังของฟองจะไม่มีการเคลื่อนที่ นั่นคือ  $R'$  มีค่าเป็นศูนย์ ( $R'=0$ )

กำหนดให้  $Z = (R_m / R)^3$  อินทิเกรตสมการ (52) จะได้

$$\rho R^2 / 2 = [P_m (Z - 1)] - [P_g (Z - Z^{\gamma}) / (1 - \gamma)] \tag{52}$$

เมื่อกำหนดค่าของ  $R' = 0$  และจัดรูปสมการจะได้

$$P_m(Z-1)(\gamma-1) = P_o(Z^\gamma - Z) \tag{53}$$

สำหรับขนาดรัศมี  $R$  ที่มีค่าน้อยๆ เช่น  $R_{min}$  จะทำให้ค่า  $Z$  มีค่ามากและค่า  $(Z-1) \sim Z$  เนื่องจาก 1 มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่า  $Z$  ดังนั้นสมการ (53) เขียนใหม่ได้เป็น

$$P_m(\gamma-1) \sim P_o Z^{\gamma-1} \tag{54}$$

จัดรูปได้

$$Z = [P_m(\gamma-1)/P_o]^{\gamma/(\gamma-1)} \tag{55}$$

ในกรณีที่ปริมาตรของฟองมีค่าน้อยที่สุด ( $V_{min}$ ) ก๊าซจะมีความดันสูงสุด ( $P_{max}$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$P_{max} V_{min}^\gamma = P_{min} V_{max}^\gamma \tag{56}$$

และเนื่องจากปริมาตรของฟอง ( $V$ ) มีความสัมพันธ์กับขนาดรัศมี ( $R$ ) โดย

$$V = 4\pi R^3 / 3$$

ดังนั้น

$$V_{max} / V_{min} = (R_m / R_{min})^3 = Z \tag{57}$$

และ

$$(V_{max} / V_{min})^\gamma = P_{max} / P_o = Z \tag{58}$$

แทนค่า  $Z$  ลงในสมการที่ (54) แล้วจัดรูปจะได้

$$P_{max} = P_o [P_m(\gamma-1)/P_o]^{\gamma/(\gamma-1)} \tag{59}$$

ในขณะที่ฟองสลายตัว ความดันสูงสุดนี้จะถูกปล่อยออกสู่ของเหลวภายนอก ทำให้ของเหลวมีความดันสูงมาก อาจทำให้เกิดผลกระทบ เช่น การกัดเซาะ การกระจายตัว และการลดขนาดของโมเลกุล เป็นต้น

ในการหาอุณหภูมิสูงสุดของก๊าซ ในขณะที่มีปริมาตรน้อยที่สุด  $V_{min}$  ใช้ความสัมพันธ์

$$T_{max} V_{min}^{\gamma-1} = T_{min} V_{max}^{\gamma-1} \tag{60}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส.ท.ส. ใช้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{\max} = T_{\min} [P_m (\gamma - 1) / P_o] \quad (61)$$

ในการนำการคำนวณนี้ไปใช้ประโยชน์ โดยทั่วไปกำหนดให้  $T_{\min}$  คือ อุณหภูมิของเหลวที่อยู่ล้อมรอบอยู่และ  $P_o$  คือ ความดันไอของของเหลว ณ อุณหภูมินั้น ถึงแม้ว่าฟองจะไม่สลายตัว แต่อุณหภูมิและความดันก็ยังคงมีค่าสูง ทั้งนี้เนื่องมาจากการสิ้นของผนังฟองระหว่างรัศมี  $R_{\min}$  ถึง  $R_m$  อุณหภูมิและความดันที่สูงนี้เองที่มีผลต่อการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเมื่อมีการกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียง

สารตั้งต้นที่สามารถระเหยได้จะระเหยเข้าไปในฟอง แต่ถ้าสารตั้งต้นไม่สามารถระเหยเข้าไปได้ การเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดจากการเพิ่มการสัมผัสระหว่างโมเลกุลที่จะเข้าทำปฏิกิริยา อันเป็นผลเนื่องมาจากความดันสูงที่บริเวณผนังของฟอง และถ้าฟองไม่สลายตัวอย่างสมบูรณ์ ความดันบริเวณผนังฟองจะมีค่าเท่ากับความดันของของเหลวที่บริเวณรอยต่อระหว่างของเหลวและฟอง

## ภาคผนวก ข

### วิธีการเตรียมการทดลองสำหรับการทดลองด้วยอ่างอัลตราโซนิก

#### การเตรียมสารละลายสำหรับการทดลองด้วยอ่างอัลตราโซนิก

##### การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.01 โมล

ชั่งสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.25 กรัมและนำไปละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตรที่ผ่านการต้มแล้วคนให้ละลาย ใส่คอลลอยด์ลงไป 2-5 หยด จากนั้นนำไปเก็บในขวดสีชา

##### การเตรียมสารละลายระบบของน้ำ-โพแทสเซียมไอโอไดด์-คาร์บอนเตตระคลอไรด์

ปริมาตรรวมของระบบที่ใช้ปริมาตร 30 มิลลิลิตร จะใช้ในการทดลองสำหรับศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันระบบของน้ำ-โพแทสเซียมไอโอไดด์-คาร์บอนเตตระคลอไรด์ใน 2 ปัจจัยด้วยกัน คือ

#### 1. การเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียง

ชั่งสารโพแทสเซียมไอโอไดด์ 5 กรัม ตวงปริมาตรน้ำ 5 มิลลิลิตรจากนั้นนำโพแทสเซียมไอโอไดด์และน้ำมาละลายเข้าด้วยกัน ตวงปริมาตรคาร์บอนเตตระคลอไรด์ 25 มิลลิลิตรแล้วนำมาผสมรวมกับสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ปริมาตรรวมของระบบที่ใช้ในการทดลองคือ 30 มิลลิลิตร เวลาที่ใช้เดินเครื่องอ่างอัลตราโซนิก คือ 10, 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 นาทีตามลำดับ

#### 2. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของปฏิกิริยา

ชั่งสารโพแทสเซียมไอโอไดด์ 5 กรัม ตวงปริมาตรน้ำ 5 มิลลิลิตรจากนั้นนำโพแทสเซียมไอโอไดด์และน้ำมาละลายเข้าด้วยกัน ตวงปริมาตรคาร์บอนเตตระคลอไรด์ 25 มิลลิลิตรแล้วนำมาผสมรวมกับสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ปริมาตรรวมของระบบที่ใช้ในการทดลองคือ 30 มิลลิลิตร และทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองปฏิกิริยา คือ 15, 30, 45, 60 องศาเซลเซียสตามลำดับ

สำหรับปัจจัยอื่น ๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและปริมาตรของสารที่ใช้ในระบบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของสารภายในระบบ

ซึ่งสารโพแทสเซียมไฮไดรด์ 5 กรัม ตวงปริมาตรน้ำ 5 มิลลิลิตรนำโพแทสเซียมไฮไดรด์ และน้ำมาละลายเข้าด้วยกัน ตวงปริมาตรคาร์บอนเตตระคลอไรด์ 25 มิลลิลิตรแล้วนำมาผสมรวมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮไดรด์ ดังนั้นปริมาตรรวมของระบบที่ใช้ในการทดลองปริมาตรที่ 1 คือ 30 มิลลิลิตรจากนั้นทำการเพิ่มปริมาตรขึ้นครั้งละ 30 มิลลิลิตรโดยคงอัตราส่วนเดิมไว้ และเพิ่มปริมาตรเป็น 60, 90, 120 และ 150 มิลลิลิตรตามลำดับ

### 4. การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮไดรด์

ซึ่งสารโพแทสเซียมไฮไดรด์ 0.5, 1.67, 2.14, 3.33, 3.62, 4.09, 5, 6.11 และ 6.90 กรัม ตามลำดับเพื่อให้สารละลายมีความเข้มข้นเป็น 9, 25, 40, 45, 50, 55 และ 60% โดยน้ำหนักโดยยังคงปริมาตรของน้ำไว้ที่ 5 มิลลิลิตร และปริมาตรคาร์บอนเตตระคลอไรด์ 25 มิลลิลิตร

### 5. การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคาร์บอนเตตระคลอไรด์

ตวงปริมาตรคาร์บอนเตตระคลอไรด์ 5, 10, 15, 20, 25, 35, 45 และ 50 มิลลิลิตรตามลำดับ โดยคงปริมาตรของน้ำไว้ที่ 5 มิลลิลิตร และโพแทสเซียมไฮไดรด์ 5 กรัม

### การเตรียมอ่างอัลตราโซนิก

#### ปริมาตรและอุณหภูมิของน้ำในอ่าง

ใส่น้ำสะอาดลงในอ่างให้มีปริมาตร 14 ลิตร อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยทั่วไปคือ 30 องศาเซลเซียส ยกเว้นจะเป็นการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวกับเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งจะเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิครั้งละ 15 องศาเซลเซียส ในการทดลองขณะที่กำลังทำการเดินเครื่องอยู่นั้นจะเกิดความร้อนจากตัวหัวขับ ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิในการทดลองเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงต้องทำการควบคุมอุณหภูมิของน้ำในอ่างให้คงที่ด้วยการใส่น้ำแข็งลงไป เมื่อใส่น้ำแข็งลงไปจะทำให้ปริมาตรของน้ำในอ่างมีการเปลี่ยนแปลงจึงต้องทำการระบายน้ำส่วนที่เกินออกด้วย

#### ตำแหน่งของขวดปฐมพู

การตั้งขวดปฐมพูซึ่งบรรจุสารละลายของระบบจะตั้งอยู่บริเวณกึ่งกลางของอ่างและอยู่สูงจากบริเวณก้นอ่าง 10 เซนติเมตร โดยใช้แขนจับพร้อมแท่นเป็นตัวกำหนดตำแหน่งของขวดปฐมพู

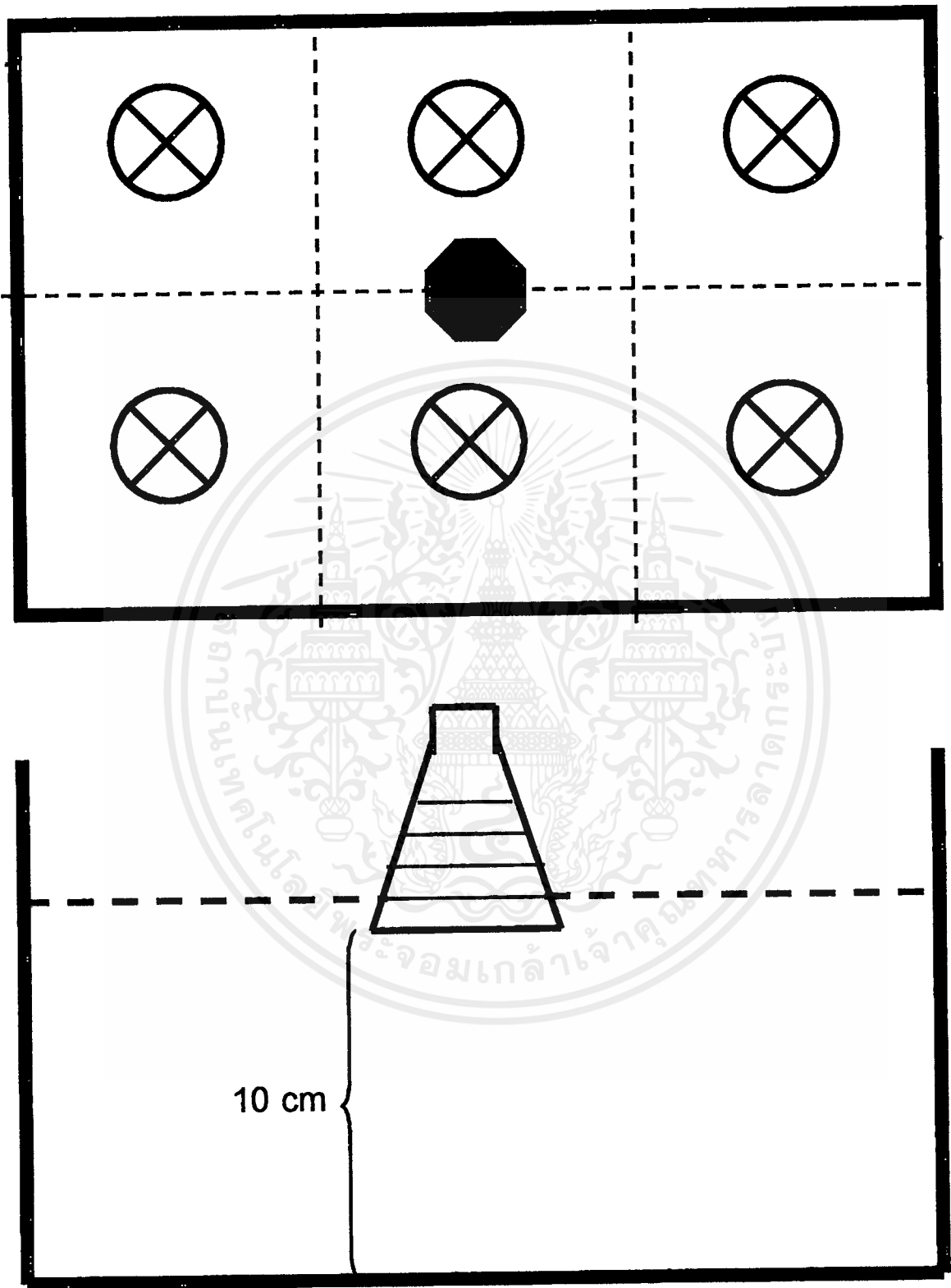
ขมพู่ ข้อควรระวังในการจัดตำแหน่งของขมรูปขมพู่ คือ จะต้องทำการวางตำแหน่งให้ถูกต้องตาม ที่กำหนดไว้ทุกครั้ง เนื่องจากจะมีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงได้

### การเดินเครื่องอ่างอัลตราโซนิก

การเดินเครื่องอ่างอัลตราโซนิกนั้นโดยทั่วไปจะเดินเครื่องไม่ใช้เวลาเกิน 15 นาที ในการ ทดลองทั่วไปจะเดินเครื่อง 10 นาทียกเว้นเป็นการศึกษาเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยาซึ่ง จะใช้เวลาในการเดินเครื่องนานขึ้น และก่อนจะเริ่มทำการทดลองจะต้องเดินเครื่องทิ้งไว้ก่อน ประมาณ 1-2 นาที เพื่อเป็นการเตรียมความพร้อมของเครื่องก่อน หากต้องใช้เวลาในการเดิน เครื่องนานกว่า 15 นาที จะต้องทำการพักเครื่องก่อนการใช้ครั้งต่อไปประมาณ 15 นาที เพื่อระบาย ความร้อนของตัวหัวขับและปล่อยให้ตัวหัวขับเย็นลงเสียก่อน มิฉะนั้นจะทำให้ประสิทธิภาพของตัว หัวขับลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-1 ตำแหน่งของขวดรูปขมพูในอ่างอัลตราโซนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ 69

## ภาคผนวก ค

### วิธีการเตรียมการทดลองสำหรับการทดลองด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

#### การเตรียมสารละลายสำหรับการทดลองด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

##### การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.01 โมล

ชั่งสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.25 กรัมและนำไปละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตรที่ผ่านการต้มแล้วคนให้ละลาย ใส่คอลลอยด์ลงไป 2-5 หยด จากนั้นนำไปเก็บในขวดสีชา

##### การเตรียมสารละลายระบบของน้ำ-โพแทสเซียมไฮไดรด์-คาร์บอนเตตระคลอไรด์ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของสารภายในระบบ

ชั่งสารโพแทสเซียมไฮไดรด์ 5 กรัม ตวงปริมาตรน้ำ 5 มิลลิลิตรนำโพแทสเซียมไฮไดรด์ และน้ำมาละลายเข้าด้วยกัน ตวงปริมาตรคาร์บอนเตตระคลอไรด์ 25 มิลลิลิตรแล้วนำมาผสมรวมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮไดรด์ นั้นปริมาตรรวมของระบบที่ใช้ในการทดลองปริมาตร คือ 30 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเพิ่มปริมาตรขึ้นครั้งละ 30 มิลลิลิตรโดยคงอัตราส่วนเดิมไว้ ปริมาตรรวมของระบบที่ใช้ในการทดลองปริมาตรที่ 1 คือ 60 มิลลิลิตร และเพิ่มปริมาตรเป็น 90, 120 และ 150 มิลลิลิตรตามลำดับ

#### การเดินเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

การเดินเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจะใช้เวลาในการเดินเครื่อง 10 นาที การทดลองจะใช้วิธีการนำหัวขั้วไปจุ่มโดยตรงกับสารละลายปริมาตรที่แตกต่างกัน และใช้แขนจับพร้อมแทนยึดไว้ และให้ตัวหัวขั้วอยู่สูงจากกันบีกเกอร์ประมาณ 3 เซนติเมตร หลังจากการเดินเครื่องแล้วจะต้องพักเครื่องให้เย็นเสียก่อนโดยเฉพาะตัวหัวขั้วจะต้องพักให้เย็นและระวังอย่าให้ตัวหัวขั้วขึ้น

ข้อควรระวังอีกประการหนึ่งคือ เครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียงเป็นเครื่องมือที่จะให้ไฟฟ้ากระแสแรงดันค่อนข้างสูง คือ 20 กิโลโวลต์ ดังนั้นในการใช้เครื่องมือต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ

## ภาคผนวก ค

### วิธีการเตรียมการทดลองสำหรับการทดลองด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

#### การเตรียมสารละลายสำหรับการทดลองด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

##### การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.01 โมล

ชั่งสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.25 กรัมและนำไปละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตรที่ผ่านการต้มแล้วจนให้ละลาย ใส่คลอโรฟอร์มลงไป 2-5 หยด จากนั้นนำไปเก็บในขวดสีชา

##### การเตรียมสารละลายระบบของน้ำ-โพแทสเซียมไอโอไดด์-คาร์บอนเตตระคลอไรด์ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของสารภายในระบบ

ชั่งสารโพแทสเซียมไอโอไดด์ 5 กรัม ตวงปริมาตรน้ำ 5 มิลลิลิตรนำโพแทสเซียมไอโอไดด์ และน้ำมาละลายเข้าด้วยกัน ตวงปริมาตรคาร์บอนเตตระคลอไรด์ 25 มิลลิลิตรแล้วนำมาผสมรวมกับสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ นั้นปริมาตรรวมของระบบที่ใช้ในการทดลองปริมาตร คือ 30 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเพิ่มปริมาตรขึ้นครั้งละ 30 มิลลิลิตรโดยคงอัตราส่วนเดิมไว้ ปริมาตรรวมของระบบที่ใช้ในการทดลองปริมาตรที่ 1 คือ 60 มิลลิลิตร และเพิ่มปริมาตรเป็น 90, 120 และ 150 มิลลิลิตรตามลำดับ

#### การเดินเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

การเดินเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจะใช้เวลาในการเดินเครื่อง 10 นาที การทดลองจะใช้วิธีการนำหัวขับไปจุ่มโดยตรงกับสารละลายปริมาตรที่แตกต่างกัน และใช้แขนจับพร้อมแท่นยึดไว้ และให้ตัวหัวขับอยู่สูงจากก้นบีกเกอร์ประมาณ 3 เซนติเมตร หลังจากการเดินเครื่องแล้วจะต้องพักเครื่องให้เย็นเสียก่อนโดยเฉพาะตัวหัวขับจะต้องพักให้เย็นและระวังอย่าให้ตัวหัวขับขึ้น

ข้อควรระวังอีกประการหนึ่งคือ เครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียงเป็นเครื่องมือที่จะให้ไฟฟ้ากระแสแรงดันค่อนข้างสูง คือ 20 กิโลโวลต์ ดังนั้นในการใช้เครื่องมือต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ

**ภาคผนวก ง**  
**ตารางแสดงผลการทดลอง**

**การทดลองด้วยอ่างอัลตราโซนิก**

**ตารางที่ ง-1 ผลการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรรวมของสารภายในระบบ**

ชนิดที่	ปริมาตรรวม (มิลลิลิตร)	ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์เฟด (มิลลิลิตร)	ปริมาณไฮโดรเจนที่ได้ ( $10^{-5}$ โมล)	ปริมาณไฮโดรเจนที่ได้ ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรรวม ( $10^{-5}$ โมล/มิลลิลิตร)
1	30	1.4	1.4	0.04667
2	60	0.4	0.4	0.00667
3	90	3.65	3.65	0.04056
4	120	1.5	1.5	0.0125
5	150	6.4	6.4	0.04267

**ตารางที่ ง-2 ผลการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นด้วยคลื่นเหนือเสียง**

เวลา (นาที)	ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เฟด (มิลลิลิตร)	ปริมาณของไฮโดรเจนที่ได้ ( $10^{-5}$ โมล)
15	1.5	0.75
30	3.12	1.56
45	7.2	3.6
60	5.5	2.75
75	14.97	7.465
90	18.05	9.025

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-3 ผลการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำในอ่างทดลอง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เฟต (มิลลิลิตร)	ปริมาณของไอโอดีนที่ได้ (10 <sup>5</sup> ไมล)
15	1.1	1.1
25	1.3	1.3
30	1.52	1.52
45	1	1
60	1	1

ตารางแสดงผลการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารในระบบ

ตารางที่ ง-4 ผลการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโพแทสเซียม-ไอโอดีน

โพแทสเซียมไอโอดีนในน้ำ (% โดยน้ำหนัก)	น้ำหนักของโพแทสเซียมไอโอดีน (กรัม)	ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์เฟต (มิลลิลิตร)
9	0.5	0.28
25	1.667	0.25
30	2.1428	0.25
40	3.33	0.3
42	3.6207	0.7
45	4.0909	1.15
50	5	1.4
55	6.1111	3.1
58	6.9048	4.0

**ตารางที่ ง-5 ผลการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของคาร์บอนเตตระ-คลอไรด์**

ปริมาณคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (มิลลิลิตร)	ปริมาตรไซเตียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ (มิลลิลิตร)	ปริมาณไอโอดีนที่ได้ (10 <sup>-5</sup> โมล)
5	0.72	0.36
10	0.9	0.45
15	0.8	0.4
20	0.72	0.36
25	1.4	0.7
35	1.63	0.815
45	1.37	0.685
50	1.05	0.525

**การทดลองด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง**

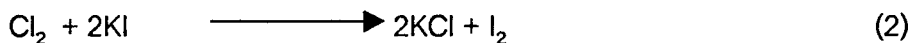
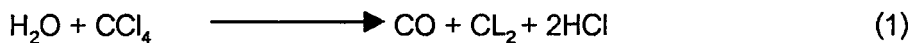
**ตารางที่ ง-6 ผลการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรรวมของสารภายในระบบ**

ปริมาตรรวม (มิลลิลิตร)	ปริมาตรไซเตียมไฮโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)
60	0.71
90	1.12
120	1.59
150	0.75

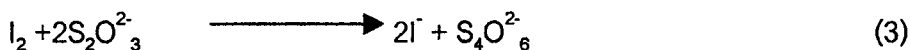
ภาคผนวก จ

การคำนวณหาปริมาณของสารไอโอดีน

สมการของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของระบบน้ำ-โพแทสเซียมไอโอไดด์-คาร์บอนเตตระคลอไรด์



การไทเทรตหาปริมาณของสารไอโอดีนด้วยโซเดียมไธโอซัลเฟต



กำหนดให้

V เป็นปริมาตรของโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตหาปริมาณของสารไอโอดีน  
ความเข้มข้นของโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ในการทดลอง คือ 0.01 โมลต่อลิตร

ปริมาตร 1000 มิลลิลิตรจะมีโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.01 โมล

ปริมาตร V มิลลิลิตรจะมีโซเดียมไธโอซัลเฟต  $V \times 10^{-5}$  โมล

จากสมการ (3) จำนวนของ  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$  จะเป็น 2 โมลสมมูลกับจำนวนโมลของ  $\text{I}_2$  ดังนั้นจะสามารถหาจำนวนโมลของ  $\text{I}_2$  จาก

$$[\text{ความเข้มข้นของ } \text{I}_2] = 1/2 [\text{ความเข้มข้นของ } \text{S}_2\text{O}_3^{2-}] \quad \text{โมล}$$

$$= 1/2 [V \times 10^{-5}] \quad \text{โมล}$$

$$= V [5 \times 10^{-6}] \quad \text{โมล}$$

ดังนั้นปริมาณความเข้มข้นของสารไอโอดีนจะหาได้จากปริมาตรของโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ไปในการไทเทรตคูณกับ  $[5 \times 10^{-6}]$  จะได้ออกมาเป็นความเข้มข้นของสารไอโอดีน

ตารางที่ จ-3 ผลการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำในอ่างอัลตราโซนิก

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณโซเดียมไฮโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)	ปริมาณของไอโอดีนที่ได้ ( $10^{-5}$ โมล)
15	1.1	1.1
25	1.3	1.3
30	1.52	1.52
45	1	1
60	1	1

ตารางแสดงผลการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารในระบบ

ตารางที่ จ-4 ผลการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอโอดेट์

โพแทสเซียมไอโอดेट์ในน้ำ (% โดยน้ำหนัก)	น้ำหนักของโพแทสเซียมไอโอดेट์ (กรัม)	ปริมาตรของโซเดียมไฮโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)
9	0.5	0.28
25	1.667	0.25
30	2.1428	0.25
40	3.33	0.3
42	3.6207	0.7
45	4.0909	1.15
50	5	1.4
55	6.1111	3.1
58	6.9048	4.0