



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การตรวจสอบเชิงตัวเลขกระบวนการล้างในถังอัลตราโซนิกด้วยพลศาสตร์ของไหล
เชิงคำนวณเพื่อหาแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพ

Numerical Investigation of Cleaning Process in Ultrasonic Tank Using
Computational Fluid Dynamics to Find Ways to Improve the
Efficiency

ผศ.ดร.จตุพร ทองศรี

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2561

วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)...การตรวจสอบเชิงตัวเลขกระบวนการล้างในถังอัลตราโซนิกด้วยพลศาสตร์ของไหล

เชิงคำนวณเพื่อหาแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพ

แหล่งเงิน...รายได้...

ประจำปีงบประมาณ...2561...จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน...175,000...บาท

ระยะเวลาการทำวิจัย...1...ปี ตั้งแต่...1...ตุลาคม 2560...ถึง...30...กันยายน 2561...

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ พร้อมระบุหน่วยงานต้นสังกัด

ผศ.ดร.จตุพร ทองศรี วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ถึงทำความเข้าใจอัลตราโซนิกเป็นอุปกรณ์ที่โรงงานอุตสาหกรรมใช้สำหรับทำความสะอาดชิ้นงานกันอย่างแพร่หลาย มีปัญหาเกิดขึ้นในกระบวนการล้างของโรงงานแห่งหนึ่ง ชิ้นงานที่ล้างไม่สะอาดทั้งหมด และยังมีบางอันเกิดการแตกหัก สิ่งที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากการกระจายตัวที่ไม่เหมาะสมของคาวิตีชัน ซึ่งเกิดมาจากการเปลี่ยนเฟสของสภาวะความดันอะคูสติกในถังทำความสะอาดอัลตราโซนิก ส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพการล้างของถังนี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของถัง งานวิจัยนี้เราจะใช้ การวิเคราะห์ผลตอบสนองฮาร์โมนิก (Harmonic Response Analysis) ใน ANSYS จำลองความแรงและการกระจายตัวของความดันอะคูสติกในถัง เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของคาวิตีชัน ประกอบไปด้วย ตำแหน่งการวางชิ้นงาน อุณหภูมิของสารละลายตัวกลาง กำลังไฟฟ้าที่ให้แก่ทรานสดิวเซอร์ ความถี่อัลตราโซนิก ชนิดวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและตำแหน่งการติดตั้งของทรานสดิวเซอร์ของถังอัลตราโซนิก และตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองด้วย วิธีการวิเคราะห์การกักต่อนบนแผ่นพอยล์ด้วยกระบวนการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย (Image Processing) ใน MATLAB, วิธีการวิเคราะห์ห้วงเวลาที่สูญเสียไปของแผ่นพอยล์จากการซังน้ำหนัก และวิธีการวิเคราะห์ความเข้มของกำลังอัลตราโซนิกจากหัววัดความเข้มอะคูสติก และเราพบว่า การวางชิ้นงานที่ตำแหน่งต่างกันจะได้รับความเข้มและรูปแบบการกักต่อนที่ต่างกัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความเข้มของคาวิตีชันลดลงแต่การกระจายตัวยังเหมือนเดิม เมื่อให้กำลังไฟฟ้ามากขึ้นความเข้มจะเพิ่มขึ้น แต่การกระจายยังเหมือนเดิม การเพิ่มความถี่ทำให้การกระจายตัวของคาวิตีชันทั่วถังมากขึ้น ทรานสดิวเซอร์ชนิด PZT4 ให้ความดันอะคูสติกดีกว่าชนิด PZT8 การเปลี่ยนชนิดของทรานสดิวเซอร์นี้ไม่ส่งผลต่อรูปแบบการกระจายตัวของความดันอะคูสติก วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT4 จึงเหมาะสมในการนำมาใช้ในถังนี้ ผลการจำลองเมื่อติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ได้ถังและด้านข้างมีการกระจายตัวของความดันอะคูสติกสม่ำเสมอทั่วถัง ผลการจำลองถูกส่งให้กับโรงงาน และต่อมาพบว่ามันสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้จริง ข้อมูลเกี่ยวกับปัญหานี้ยังใช้ในการพัฒนาการออกแบบถังทำความสะอาดเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

คำสำคัญ คาวิตีชัน ความดันอะคูสติก ถังทำความสะอาดอัลตราโซนิก วัสดุเพียโซอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Numerical Investigation of Cleaning Process in Ultrasonic Tank Using Computational Fluid Dynamics to Find Ways to Improve the efficiency

Researcher: Asst. Prof. Dr. Jatuporn Thongsri

Address: College of Advanced Manufacturing Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

Ultrasonic cleaning tank is a machine that many factories widely used to clean objects. At one factory, a problem occurred in the cleaning process, resulting in the factory not being able to clean objects, but cracks also appeared on some objects. It was anticipated that these were caused by uneven acoustic pressure distribution which resulted in unsuitable cavitation. This directly affected cleaning performance within the tank. In order to improve the tank's efficacy, in this research, we use Harmonic Response Analysis in ANSYS simulate the occurrence of acoustic pressure in the tank to find the appropriate conditions of factors affected the intensity and the distribution pattern of acoustic pressure in ultrasonic tank, including the position of object, temperature of medium, power, ultrasonic frequency and a suitable type and placing position of the transducer for the tank. Reliability of the simulate results was validate by the actual result from the foil corrosion test and the ultrasonic power probe. We found that objects receive different pattern of corrosion at each location. When temperature increasing the intensity of cavitation was increased. When we increase the ultrasonic frequency, acoustic pressure that is evenly dispersed throughout the tank. Transducers made from PZT4 gives greater acoustic pressure than those made from PZT8. Changing the transducer type does not affect the acoustic pressure pattern. PZT4 is therefore the most suitable type of transducer for this tank. Simulation results also suggested that placing the transducer under and beside the tank will result in intense acoustic pressure that is evenly dispersed throughout the tank. Results from this simulation were then passed to the manufacturing factory, and was later accepted that it could truly enhance the tank's efficacy. Information regarding the issue was also used in the development of improved design of ultrasonic cleaning tank to have greater performance levels.

KEYWORD Cavitation, Acoustic pressure, Ultrasonic cleaning tank, Piezoelectric material.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินวิจัยจากวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สำหรับสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ การใช้เครื่องมือ เครื่องคอมพิวเตอร์ และการประสานงาน ได้รับเอื้อเฟื้อเป็นอย่างดีจากเจ้าหน้าที่ประจำวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง แรงงานและความเอาใจใส่ช่วยทำวิจัยจากนักศึกษาในกลุ่มวิจัยคอมพิวเตอร์ช่วยงานจำลองทางวิศวกรรม ทั้งหมดนี้ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้วิจัย

สิงหาคม 2561



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
อักษรย่อ.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเนื้อหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ความสำคัญของงานวิจัย.....	2
1.4 กรอบแนวคิดในงานวิจัย.....	2
1.5 คำถามในการวิจัยและสมมุติฐานการวิจัย.....	2
1.6 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.2.1 สมการคลื่นอะคูสติก.....	6
2.2.2 เกณฑ์การเกิดควาเวตชันจากคลื่นอะคูสติก.....	6
2.2.3 รัศมีฟองควาเวตชัน.....	7
2.2.4 อุณหภูมิและความดันขณะฟองยุบสลาย.....	7
2.2.5 การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	7
2.2.6 ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับโดเมนของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	14
2.2.7 ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับโดเมนของผนังถัง.....	15
2.2.8 ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับโดเมนตัวกลางสารละลาย.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.9 แบบจำลองโครงสร้างตาข่าย.....	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินการ.....	22
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	22
3.2 การทดลองในถังทำความสะอาดอัลตราโซนิก.....	23
3.2.1 การทดลองการกัดกร่อนบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์.....	23
3.2.2 การทดลองหัววัดอัลตราโซนิก.....	25
3.3 สร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ผลความดันอะคูสติก.....	26
3.4 การวิเคราะห์เปรียบเทียบการกัดกร่อนจากการทดลองจริงกับผลการจำลอง.....	30
3.5 สร้างแบบจำลองเพื่อปรับปรุงกระบวนการล้าง.....	30
3.5.1 แบบจำลองเปรียบเทียบเงื่อนไขการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า.....	31
3.5.2 แบบจำลองเปรียบเทียบความถี่.....	31
3.5.3 แบบจำลองเปรียบเทียบการติดตั้งทรานสดิวเซอร์.....	32
บทที่ 4 ผลการทำวิจัยและการอภิปราย.....	34
4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างตาข่าย.....	34
4.2 ผลการทดลองพื้นที่การกัดกร่อนบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์.....	38
4.3 ผลการทดลองเปรียบเทียบผลการกัดกร่อนเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำ.....	41
4.4 ผลการทดลองการเปรียบเทียบผลการกัดกร่อนเมื่อเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า.....	44
4.5 ผลการจำลองเมื่อเพิ่มความถี่อัลตราโซนิก.....	45
4.6 การเปลี่ยนแปลงการติดตั้งหัวทรานสดิวเซอร์.....	51
4.7 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	51
บทที่ 5: สรุปผลการวิจัย.....	52
บทที่ 6: ผลผลิตที่ได้จากการวิจัย.....	53
เอกสารอ้างอิง.....	54
ภาคผนวก.....	57
เอกสารหมายเลข1.....	57
เอกสารหมายเลข2.....	68
ประวัติผู้วิจัย.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
2.1 3D beam element.....	9
2.2 การกระจัดที่จุดต่อ(nodal displacement).....	9
2.3 เมชสามเหลี่ยมใน 2 มิติ แบบ 3 และ 6 จุดเชื่อมต่อ	17
2.4 เมชสี่เหลี่ยมใน 2 มิติ แบบ 4 และ 8 จุดเชื่อมต่อ	17
2.5 เมชทรงสี่หน้า แบบ 4 และ 10 จุดเชื่อมต่อ	17
2.6 เมชทรงพีระมิด แบบ 5 และ 13 จุดเชื่อมต่อ	18
2.7 เมชปริซึม แบบ 6 และ 15 จุดเชื่อมต่อ.....	18
2.8 เมชทรงหกหน้า แบบ 8 และ 20 จุดเชื่อมต่อ.....	18
2.9 การคำนวณ skewness แบบการเบี่ยงเบนปริมาตรเท่ากันหมด.....	20
2.10 การคำนวณ skewness แบบค่าเบี่ยงเบนมุมปกติ.....	21
3.1 อุปกรณ์ทำความสะอาดอัลตราโซนิก	23
3.2 แผนผังขั้นตอนในกระบวนการกระบวนการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย	24
3.3 เครื่องชั่งน้ำหนักสำหรับหามวลที่สูญเสียไปของแผ่นพอยล์	25
3.4 การวัดกำลังที่เกิดขึ้นในสารละลาย	26
3.5 แผนผังสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ผลความดันอะคูสติก.....	26
3.6 แบบจำลองอัลตราโซนิกในระนาบต่าง ๆ	28
3.7 แบบจำลองตาข่าย (mesh model).....	29
3.8 แบบจำลองจากถึง 28 กิโลเฮิร์ต และ 48 กิโลเฮิร์ต	31
3.9 แบบจำลองการเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งทรานสดิวเซอร์.....	32
3.10 แบบจำลองการเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต	33
4.1 จำนวนเอลิเมนต์เมื่อเพิ่มเกณฑ์เอลิเมนต์เทียบกับความยาวคลื่น	36
4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างตาข่าย.....	37
4.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริงและผลการจำลอง	40
4.4 แผนภูมิเปรียบเทียบการกักร่อนจากการทดลองจริงและค่าความดันอะคูสติก.....	42
ทางลบสูงสุดจากการจำลอง	
4.5 แผนภูมิเปรียบเทียบความดันในหน่วยวัตต์ต่อลิตรและค่าความดันอะคูสติก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ทางลบสูงสุดจากการจำลอง.....	42
4.6 แผนภูมิเปรียบเทียบผลกระทบจากการเปลี่ยนอุณหภูมิระหว่างมวลที่ สูญเสียไปของแผ่นพอยล์และผลจากการจำลอง.....	43
4.7 รูปแบบความดันอะคูสติกเมื่อเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้า	45
4.8 รูปแบบความดันอะคูสติกที่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มความถี่ให้กับทรานสดิวเซอร์	46
4.9 ผลการจำลองความดันอะคูสติกเมื่อเพิ่มหัวทรานสดิวเซอร์	47
4.10 ผลการจำลองความดันอะคูสติกเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งหัวทรานสดิวเซอร์	48
4.11 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง Modify3 จาก PZT4 กับ PZT8	49
4.12 ผลการจำลองความดันอะคูสติกเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้ง หัวทรานสดิวเซอร์ที่ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต	50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าคุณภาพของเมชแบบ skewness.....	19
3.1 ค่าคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุที่กำหนดในการจำลอง	28
3.2 ค่าคุณสมบัติของน้ำเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิต่างๆ.....	29
3.3 ค่าความต่างศักย์เมื่อเปลี่ยนเงื่อนไขกำลัง.....	31
3.4 ค่าคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุ PZT8.....	33
4.1 ขนาดของเอลิเมนต์จากการคำนวณจากเกณฑ์ความยาวคลื่น.....	34
4.2 จำนวนเอลิเมนต์และจุดเชื่อมต่อของแบบจำลองโครงสร้างตาข่ายตามเกณฑ์ความยาวคลื่น.....	35



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

a	van der Waals hard core of gas
A	พื้นที่หน้าตัดของเอลิเมนต์(m^2)
c	ความเร็วเสียงในสารละลาย
C	ความหน่วงของโครงสร้าง
$[C_F]$	เมทริกซ์ความหน่วงของโดเมนของไหลที่คลื่นอะคูสติกผ่าน
C_{uv}	ความหน่วงของโครงสร้าง
C_{vw}	การกระจายตัวทางไฟฟ้า
d	ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก
D	การกระจัดไดอิเล็กทริก
ds	อนุพันธ์พื้นผิวของโดเมนที่เสียงผ่าน Γ_F
dv	อนุพันธ์ของปริมาตรโดเมนที่เสียงผ่าน Ω_F
$[D]$	เมทริกซ์อีลาสติคซิติ
e	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
E	ค่าสนามไฟฟ้า
f	ความถี่
f_a	ค่าแรงภายนอกที่กระทำที่จุดต่อใด ๆ ที่ทราบค่า
f_b	ค่าแรงที่จุดต่อใด ๆ ที่ไม่ทราบค่า
I_{yy}	โมเมนต์ที่สองของพื้นที่เทียบกับแกน yy
K	ดัชนีโพสิทีฟของก๊าซ
k_e	เมทริกซ์ความแข็งแกร่งที่เอลิเมนต์ใด ๆ
$[K_F]$	เมทริกซ์ความแข็งแกร่งของโดเมนของไหลที่คลื่นอะคูสติกผ่าน
K_{uv}	ค่าโครงสร้างความแข็งแกร่ง
K_{vw}	ความนำสนามไฟฟ้าไดอิเล็กทริก
$K_{uv}(K_{vw})$	เมทริกซ์ของเอลิเมนต์อันตรกิริยาจากเพียโซอิเล็กทริก
L	ความยาวของเอลิเมนต์
m_e	เมทริกซ์มวลของเอลิเมนต์ที่ e^{th}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์

$[M_f]$	เมทริกซ์มวลของโดเมนของไหลที่เคลื่อนอะคูสติกผ่าน
M_{UU}	เมทริกซ์ของมวล
η	เวกเตอร์ขอบเขต
P	ความดันอะคูสติก
P_0	ความดันอะคูสติกเริ่มต้นที่ทำให้เกิดฟอง
P_a	ความดันอะคูสติกที่กระทำต่อฟอง
$P_{collapse}$	ความดันอะคูสติกขณะฟองยุบสลาย
P_h	ความดันบรรยากาศในสารละลาย
P_t	ความดันเกณฑ์ของการเกิดควิเตชัน
P_v	ความดันฟอง
P_∞	ความดันรอบ ๆ ฟองควิเตชัน
q_a	ค่าการกระจัดที่จุดของเอลิเมนต์ใด ๆ ที่ไม่ทราบค่า
q_b	ค่าของการกระจัดที่จุดของเอลิเมนต์ใด ๆ ที่ทราบค่า
q_e	เวกเตอร์ของการกระจัดที่จุดของเอลิเมนต์ใด ๆ เทียบกับแกนสัมบูรณ์
q_i	การกระจัดเฉือนของโครงสร้าง
Q_i	แรงภายนอกที่กระทำสอดคล้องกับการกระจัด q_i
R, R_t	รัศมีขณะฟองควิเตชันที่เวลาใด ๆ
R_0	รัศมีฟองเริ่มต้น
r_a	ค่าขอบเขตที่ไม่ทราบค่า
r_b	ค่าขอบเขตที่ทราบค่า
r_e	เวกเตอร์ของการกระจัดที่จุดต่อ
R_e	รัศมีฟองควิเตชันที่สภาวะสมดุล
$[R^T]$	เมทริกซ์ขอบเขตของโดเมนของไหลที่เคลื่อนอะคูสติกผ่าน
s	ค่าการให้ตัวของวัสดุ
S	ความเครียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์

T	พลังงานจลน์รวมของโครงสร้าง
T_0	อุณหภูมิของสารละลาย
T_e	พลังงานจลน์ของอิเล็กเมนต์
T_g	อุณหภูมิขณะพองยุบสลาย
U	พลังงานศักย์ยืดหยุ่นของโครงสร้าง
$\{V\}$	เวกเตอร์ความต่างศักย์ทางไฟฟ้า
ω	ความเร็วเชิงมุม ($\omega = 2\pi f$)
σ	ความเค้น
$\{\sigma\}$	เวกเตอร์ความเค้น
σ_i	แรงตึงผิวของสารละลาย
γ	อัตราความจุความร้อนจำเพาะ
μ_i	ความหนืดของสารละลาย
$\{\epsilon\}$	เวกเตอร์ความเครียด
$\delta_{xyz,i}$	เวกเตอร์การกระจัดของจุดต่อที่ i^{th}
δ_{xyz}	เวกเตอร์การกระจัดที่จุดต่อของระบบพิกัดสมบูรณ์
θ_{max}	มุมที่ใหญ่ที่สุดในอิเล็กเมนต์
θ_{min}	มุมที่เล็กที่สุดในอิเล็กเมนต์
θ_e	มุมของด้านที่เท่ากันในแต่ละประเภทของอิเล็กเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเนื้อหา

การทำความสะอาดอัลตราโซนิกคือการใช้คลื่นอัลตราโซนิกซึ่งมีความถี่อยู่ในช่วง 20 - 20,000 กิโลเฮิร์ต ผ่านสารละลายตัวกลางทำให้เกิดคาวิเทชัน เพื่อทำความสะอาดวัสดุ หรือสิ่งของต่าง ๆ เช่น เลนส์, เครื่องประดับ, นาฬิกา, เครื่องมือทันตกรรม และอุปกรณ์ผ่าตัด ฯลฯ ในโรงงานอุตสาหกรรมก็ใช้ถึงทำความสะอาดอัลตราโซนิกเช่นกัน ยกตัวอย่างในอุตสาหกรรมการผลิต ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนทุกชิ้นต้องมีการตรวจสอบการปนเปื้อนของอนุภาคที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการผลิต หากนำชิ้นส่วนที่มีการปนเปื้อนไปประกอบเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าอาจทำให้สินค้าที่ผลิตไม่ได้มาตรฐาน ทำงานผิดพลาด ไม่สามารถส่งขายได้ ในกระบวนการผลิตหากชิ้นส่วนใดที่ตรวจสอบแล้วไม่ผ่านมาตรฐานมีการปนเปื้อนจะถูกนำมาทำความสะอาดในถังทำความสะอาดอัลตราโซนิก ซึ่งเมื่อชิ้นส่วนสะอาดปราศจากการปนเปื้อนของอนุภาคแล้วก็จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการผลิตต่อไป

งานวิจัยนี้เป็นความร่วมมือระหว่างคณะผู้วิจัยกับโรงงานผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แห่งหนึ่ง โรงงานแห่งนี้ใช้ถึงทำความสะอาดอัลตราโซนิก ทำความสะอาดชิ้นส่วนที่มีการปนเปื้อนอนุภาค ที่ผ่านมาก่อปัญหา บางครั้งชิ้นส่วนที่นำมาล้างแล้วไม่สะอาดต้องนำกลับมาล้างใหม่ ชิ้นส่วนเกิดการเสียหายบางครั้งหลังการล้างแต่ละปีนับเป็นมูลค่าความเสียหายหลายร้อยล้านบาท ที่ผ่านมากเพื่อแก้ปัญหาทางโรงงานได้มีการทำการทดลองตัวอย่างเพื่อตรวจสอบชิ้นงานที่เกิดปัญหา แต่ผลที่ได้ยังไม่เป็นที่น่าพอใจ ใช้ได้เป็นบางกรณีเท่านั้น ยังไม่สามารถแก้ปัญหาได้อย่างยั่งยืน ปัญหานี้จึงเป็นปัญหาเร่งด่วนที่ต้องได้รับการแก้ไข จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อจำลองการเกิดปฏิกิริยาคาวิเทชันที่เกิดขึ้นในถังทำความสะอาดอัลตราโซนิก

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการเกิดปฏิกิริยาคาวิเทชันจากเงื่อนไขตำแหน่งการวางชิ้นงาน อุณหภูมิของสารละลาย ความถี่ กำลังไฟฟ้าที่ให้กับทรานสดิวเซอร์ และผลเมื่อเปลี่ยนชนิดและตำแหน่งการติดตั้งทรานสดิวเซอร์

1.2.3 เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของตำแหน่งการวางชิ้นงาน อุณหภูมิของสารละลาย ความถี่และกำลังไฟฟ้าที่ให้กับทรานสดิวเซอร์ และการเปลี่ยนชนิดและตำแหน่งการติดตั้งทรานสดิวเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ความสำคัญของงานวิจัย

อุปกรณ์ทำความสะอาดอัลตราโซนิก ถูกใช้ในการล้างชิ้นงานในหลายประเภท โดยเฉพาะในอุตสาหกรรม อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในแต่ละปีมีการสูญเสียงบประมาณจากเงื่อนไขการล้างที่ไม่เหมาะสม หากผู้วิจัยสามารถหาเงื่อนไขในการล้างที่เหมาะสมได้ก็จะสามารถลดงบประมาณต้นทุนในส่วนนี้ได้

1.4 กรอบแนวคิดในการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เราจะใช้วิธีตรวจสอบพารามิเตอร์ของปฏิกิริยาคาวิตേഷันคือ การทดสอบการกัดกร่อนบนแผ่นฟอยล์ และแปลงผลการตรวจสอบเป็นค่าตัวเลขด้วยกระบวนการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย ในโปรแกรม MATLAB, การวัดค่ามวลที่สูญเสียไปของแผ่นฟอยล์, การวัดค่าความดันอะคูสติกจากหัววัดกำลังอัลตราโซนิก เพื่อนำผลการกัดกร่อนจากการทดสอบการกัดกร่อนบนแผ่นฟอยล์และกำลังอัลตราโซนิกมาเปรียบเทียบกับผลการกระจายตัวของความดันอะคูสติกจากการจำลอง โดยแบบจำลองจะใช้การวิเคราะห์ผลตอบสนองฮาร์โมนิก ในโปรแกรม ANSYS ทำการจำลองการกระจายตัวของความดันอะคูสติก เพื่อศึกษาพฤติกรรมของปรากฏการณ์คาวิตേഷัน เพื่อนำไปปรับปรุงพัฒนาการล้างชิ้นงานในไลน์การผลิตจริงต่อไป

1.5 คำถามในการวิจัยและสมมติฐานการวิจัย

ในงานวิจัยเพื่อปรับปรุงการล้างด้วยอุปกรณ์ทำความสะอาดอัลตราโซนิก สิ่งทีก่อให้เกิดกระบวนการล้างนั้นคือ คาวิตേഷัน ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดคาวิตേഷันนั้นมีหลายปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยส่งผลต่อคาวิตേഷันและส่งผลต่อการล้างแตกต่างกัน

1.6 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.6.1 ทำการจำลองจากถึงทำความสะอาดอัลตราโซนิกความถี่ 28 กิโลเฮิร์ตที่เกิดปัญหาในโรงงาน
- 1.6.2 ในเงื่อนไขการทดลองเปลี่ยนอุณหภูมิ จะใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องขึ้นไปจนถึงอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส
- 1.6.3 ได้แบบจำลองการกระจายตัวของความดันอะคูสติกที่เหมาะสมเพื่อไปใช้ปรับปรุงในไลน์การผลิตจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ถึงทำความเข้าใจความสะอาดอัลตราโซนิก คือ อุปกรณ์ที่ใช้ทำความสะอาดชิ้นงานที่มีความบอบบางจากสิ่งปนเปื้อนหรือสิ่งสกปรกให้สะอาดมากขึ้นเช่น เลนส์ เครื่องประดับ อุปกรณ์ทางทันตกรรม และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ความดันอะคูสติกเกิดขึ้นจากทรานสดิวเซอร์ ได้รับกระแสไฟฟ้าไปทำให้เกิดการสั่นและปล่อยคลื่นอัลตราโซนิกเข้าไปสู่ตัวกลางสารละลายโดยความถี่จะอยู่ในช่วง 20 - 20,000 กิโลเฮิร์ต[1,2] ทำให้ตัวกลางเกิดการเปลี่ยนแปลงความดันตามพัลส์(pulse) ของคลื่นฮาร์โมนิก เฟสขยายเกิดขึ้นเมื่อความดันต่ำหรือติดลบ เฟสบีบอัดเกิดขึ้นเมื่อความดันสูงหรือความดันเป็นบวก เมื่อตัวกลางอยู่ในเฟสขยายจะมีฟองขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมาก เมื่อตัวกลางสารละลายอยู่ในบริเวณเฟสบีบอัด ฟองอากาศจะย่อเล็กลงและดูดซับพลังงานไว้ ฟองอากาศจะย่อและขยายตามวัฏจักรไปจนกระทั่งพวกมันไม่สามารถดูดซับพลังงานมากขึ้นได้อีกแล้ว มันจะยุบสลายในเฟสบีบอัดและปล่อยลำพลังงานออกมาเรียกว่า liquid jet โดยมีอุณหภูมิประมาณ 5,500 องศาเซลเซียส ความดัน 60 เมกะพาสคาล และความเร็ว 280 เมตรต่อวินาที[3] เข้าไปชนอนุภาคปนเปื้อนที่ติดอยู่บนชิ้นงานบริเวณใกล้เคียง และเกิดกระบวนการล้างบนพื้นผิวของชิ้นงาน

งานวิจัยนี้เกิดขึ้นจากการร่วมมือกันระหว่างโรงงานผลิตถึงทำความสะอาดอัลตราโซนิก โรงงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์แห่งหนึ่ง และกลุ่มวิจัยของเรา ถึงทำความสะอาดอัลตราโซนิกนี้ถูกใช้ในกระบวนการทำความสะอาดจริงและพบปัญหาหลังจากล้างเสร็จ พบว่าชิ้นงานที่นำมาล้างส่วนใหญ่มีความสะอาด แต่บางอันยังมีอนุภาคปนเปื้อนหลงเหลืออยู่และบางอันเกิดการแตกหัก สำหรับชิ้นงานที่ไม่สะอาดจะต้องถูกนำไปล้างใหม่จนกว่าจะสะอาด ในขณะที่ชิ้นที่โดนแรงกระทำให้เสียหาย ถูกนำไปทำลายทิ้ง ทางโรงงานที่ใช้ถึงทำความสะอาดอัลตราโซนิก นี้ต้องเสียงบประมาณให้กับกระบวนการที่เกิดปัญหานี้ราว ๆ 100 ล้านบาทต่อปี ดังนั้นปัญหานี้ต้องได้รับการแก้ไขโดยด่วน

Osterman [4] และคณะได้ทำการศึกษาบริเวณรอบข้างผนังฟองควิเตชันที่กำลังยุบสลายในสนามอัลตราโซนิก โดยได้ทำการจำลองโดยใช้ ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัดแบบ 2 มิติ เปรียบเทียบกับการทดลองจริงวิธี Volume-Of-Fluid และภาพลักษณะฟองควิเตชันจากการทดลองของ Philipp และ Lauterbom [5] ในถึงทำความสะอาดอัลตราโซนิก 33 กิโลเฮิร์ต จากวิธี Volume-Of-Fluid ผลที่ได้คือ ความดัน, อุณหภูมิ และความเร็ว เกิดขึ้นสูงที่สุดขณะที่เกิดการยุบสลาย และรูปร่างของฟองควิเตชันจากการจำลองมีความสอดคล้องกับการทดลองจริง

Baoji และคณะ [6] ได้ศึกษารูปแบบการกักกรองของปฏิกิริยาควิเตชัน โดยวิธีการกักกรองผ่านแผ่นอลูมิเนียมพอยล์ผ่านกระบวนการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย ในโปรแกรม MATLAB โดยเปลี่ยนตำแหน่งการวางแผ่นอลูมิเนียมพอยล์ เวลาในการล้าง โหมดของความถี่ และอุณหภูมิของตัวกลาง เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดควิเตชันสำหรับนำไปปรับปรุงกระบวนการทำความสะอาดของถัง พบว่าวิธีการตรวจสอบด้วยรอยกักกรองบนแผ่นอลูมิเนียมพอยล์สามารถช่วยในการศึกษาปัจจัยในการเกิดควิเตชันได้เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย สามารถแปลงภาพรอยกักกรองค่าออกมาเป็นตัวเลข เมื่อเพิ่มเวลาในการล้างพบว่าแผ่นพอยล์จะถูกกักกรองมากขึ้นตามเวลา การล้างด้วยโหมดความถี่แบบ sweep เกิดการกักกรองสูงกว่าแบบปกติแต่การกระจายตัวมีค่าน้อยกว่า

Vetrimurugan [7] ใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม(Atomic Force Microscope technique: AFM) เพื่อศึกษาการจัดการปนเปื้อนจากหัวอ่าน ความเสียหายของหัวอ่านและการป้องกันหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ภายใต้เงื่อนไขการทดลอง ความถี่อัลตราโซนิกที่ใช้(40-132 กิโลเฮิร์ต), เวลา, กำลังอัลตราโซนิก(100-500 วัตต์) และเปรียบเทียบผลการกักกรองจากสารละลาย Acetone อย่างเดียว กับสารผสม Acetone กับ N-Methyl Pyrolidone ในอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส โดยเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการล้างคือ ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต ที่เวลา 5 นาที และรองลงมา 58 กิโลเฮิร์ต ที่เวลา 5 นาที, 132 กิโลเฮิร์ต เวลา 4 นาที, 58/132 กิโลเฮิร์ต เวลา 4 นาที ตามลำดับ เมื่อเพิ่มกำลังจะทำให้ความแรงในการกักกรองเพิ่มขึ้นและสารละลายผสมเกิดการกักกรองสูงที่สุด

Yusof และคณะ[8] ศึกษาผลกระทบทางกายภาพและทางเคมีของการเกิดคลื่นเสียงอัลตราโซนิกสำหรับการประยุกต์ใช้งานทำความสะอาดอัลตราโซนิก โดยทดลองผลกายภาพและทางเคมีจากคลื่นอัลตราโซนิกที่เกิดขึ้นในการทำความสะอาดของเยื่อกรอง(membrane) ที่ใช้ในการกรองผลจากผลิตภัณฑ์นม การทำลายของเชื้อโรคในน้ำเสียและการย่อยสลายของสารมลพิษอินทรีย์ในน้ำที่เป็นสภาพแวดล้อม พบว่าผลกระทบทางกายภาพสามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มพลังของเยื่อกรองและทำลายเชื้อโรคอยู่ในน้ำและผลิตภัณฑ์นมโซลูชันผลกระทบของสารเคมีเกิดขึ้นในระหว่างการเกิดโพรงอากาศอะคูสติกสามารถนำมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารพิษอินทรีย์ในสภาพแวดล้อมของน้ำ

Bretz และคณะ[9] ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ(Computational Fluid Dynamic: CFD) จำลองการเกิดควิเตชัน ในของเหลวเปรียบเทียบกับกรทดลองจริงผ่านการกักกรองบนแผ่นอลูมิเนียมพอยล์ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน แต่ในงานวิจัยดังกล่าวนี้เป็นเพียงงานวิจัยเบื้องต้นเท่านั้น เนื่องจากผู้วิจัยใช้การจำลองแบบสองมิติ และถึงทำความสะอาดอัลตราโซนิกที่ใช้มีเพียงทรานสดิวเซอร์ เพียงตัวเดียว ทำให้มีข้อจำกัดค่อนข้างมากในการนำไปประยุกต์ใช้จริง

Tiwaril, และคณะ[10] ได้ทำการศึกษา Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers ในรูปแบบเฮกซาโกนอล(Hexagonal) โดยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์(Finite Element Method: FEM) เพื่อตรวจวัด ค่าการกระจัด และค่าการกระจายตัวของความเค้นที่ดีที่สุดและหาค่าความถี่สั่นพ้อง(natural

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

resonance frequency) ของทรานสดิวเซอร์ในถังทำความสะอาดอัลตราโซนิก พบว่า เมื่อเปลี่ยนค่าความถี่ที่ให้แกทรานสดิวเซอร์ ค่าความถี่ที่อยู่ในช่วงความถี่ธรรมชาติจะให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด

Kim และคณะ[11,12] ได้พัฒนาท่อนำคลื่นอัลตราโซนิกความถี่สูง(Megasonic) โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ในการดูการกระจายตัวของความดันอะคูสติก และใช้เซ็นเซอร์วัดเสียง(acoustic sensor) วัดค่าความดันอะคูสติกพบว่า ท่อนำคลื่นที่ถูกพัฒนามีค่าความดันอะคูสติกสูงสุด(maximum acoustic pressure) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับท่อนำคลื่นทั่วไป หมายความว่าความดันอะคูสติกมีการกระจายตัวดีขึ้น และเมื่อใช้เครื่องนับอนุภาค(particle counter) วัดค่าอนุภาคปนเปื้อนหลังการล้างด้วยท่อนำคลื่นนี้พบว่าอนุภาคลดลง 91.3 % แสดงให้เห็นถึงท่อนำคลื่นนี้มีประสิทธิภาพในการทำทำความสะอาด

Niazi และคณะ[13] ได้ศึกษาบริเวณการเกิดปฏิกิริยาควิเตชันเพื่ออัฟเกรดน้ำมันดิบ(Crude oil) โดยใช้การจำลองเชิงตัวเลขพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งพบว่าสามารถแสดงพื้นที่ความดันอะคูสติก และการแตกของฟองอากาศเกิดขึ้นบริเวณที่มีค่าความดันอะคูสติกทางลบมาก

Leong และคณะ[14] ทำการศึกษาการกระจายตัวของความดันอะคูสติกของทรานสดิวเซอร์แบบความถี่ 400 กิโลเฮิร์ต กับ 2 เมกะเฮิร์ต เมื่อดำเนินการในท่อยาว 2 เมตร ตรวจวัดการกระจายตัวโดยใช้แผ่นสะท้อนวางที่ระยะต่าง ๆ และวัดด้วยไฮโดรโฟน และแมพการกระจายตัวโดย MATLAB ซึ่งปรากฏว่าที่ความถี่ 400 กิโลเฮิร์ตมีการกระจายตัวได้ดีกว่า 2 เมกะเฮิร์ต

Kauer และคณะ[15] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการเกิดปฏิกิริยาควิเตชันโดยทำการถ่ายภาพการกระจายตัวของฟองควิเตชันในตัวกลางสารละลายเรืองแสงและทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลองการกระจายตัวของค่าความดันอะคูสติกโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

ไม่นานมานี้ Li et al. [16] ได้ปรับปรุงงานวิจัยให้มีความสมจริงยิ่งขึ้นโดยใช้โปรแกรม COMSOL จำลองความดันอะคูสติก ในถังอัลตราโซนิกแบบสามมิติ เพื่อศึกษาผลของความถี่และระดับของสารละลาย ต่อความสามารถในการเกิดควิเตชัน

จากงานวิจัยทั้งหมดนี้ทำให้สรุปได้ว่าความสามารถในการล้างด้วยอัลตราโซนิกขึ้นอยู่กับระดับอุณหภูมิของ ตัวกลางสารละลาย, ความถี่, ตำแหน่งของการล้าง, กำลังที่ให้กับทรานสดิวเซอร์ รูปร่างของถัง, ซึ่งตัวแปรทั้งหมดนี้เป็นสมบัติเฉพาะของถังอัลตราโซนิกแต่ละอัน หากต้องการให้เกิดกระบวนการล้างที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ในถังควรจะมีการศึกษาถึงเงื่อนไข และตัวแปรต่าง ๆ ให้เหมาะสม ความเข้มของควิเตชัน เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังที่ให้ในตัวกลาง[7] ประสิทธิภาพในการทำทำความสะอาดขึ้นอยู่กับขนาดของความดันอะคูสติก การล้างในบริเวณที่มีความดันอะคูสติก ขนาดใหญ่จะมีประสิทธิภาพที่ดีและในบริเวณที่มีความดันอะคูสติก ขนาดเล็ก ความถี่สูงเหมาะสำหรับทำความสะอาดชิ้นงานขนาดเล็ก แต่ตรงข้ามกันในความถี่ต่ำ[17] เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของตัวกลางประสิทธิภาพในการล้างจะลดลง และช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการล้างคือ 20 – 40 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส ให้ประสิทธิภาพในการล้างสูงที่สุด [18,19] เมื่อเพิ่มเวลาในการล้างการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นควิเตชันจะเพิ่มด้วย[20] ประสิทธิภาพของทรานสดิวเซอร์ ที่ทำจาก PZT4 และ PZT8 ได้รับการพิจารณาโดยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ และการทดลอง[21] ได้รับการรายงานว่ PZT4 ดีกว่า PZT8 อย่างไรก็ตาม งานวิจัย[21] พิจารณาเฉพาะประสิทธิภาพของทรานสดิวเซอร์ โมเดลถังทำความสะอาดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะอาดและเงื่อนไขสิ่งแวดลอมอื่นไม่ได้รับการพิจารณา โดยงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์เงื่อนเหล่านี้เพื่อนำมาปรับปรุงถึงทำความสะอาดอัลตราโซนิกให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานในสายการผลิตจริงในโรงงาน

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 สมการคลื่นอะคูสติก (Acoustic wave equation) คาวิตชันเกิดจากการสั่นของทรานสดิวเซอร์ทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิกไปยังสารละลายตัวกลาง เป็นผลให้เกิด เฟสความดันสูง(บีบอัด) และเฟสความดันต่ำ(ขยาย) ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่การสั่นของ ทรานสดิวเซอร์ระหว่างเฟสความดันต่ำ คลื่นอัลตราโซนิกความเข้มสูง สร้างฟองอากาศขนาดเล็กในตัวกลางสารละลาย เมื่อฟองอากาศขยายขนาดถึงจุดที่ไม่สามารถดูดซับพลังงานได้อีกต่อไปได้ ฟองอากาศจะยุบสลายอย่างรุนแรงในระหว่างเฟสความดันสูง ในระหว่างการระเบิดจะทำให้เกิดอุณหภูมิสูงมาก(ประมาณ 5000 เคลวิน) และ ความดันสูงมาก(ประมาณ 60 เมกะพาสกาล) บริเวณรอบ ๆ ผลของการระเบิดจะทำให้เกิด liquid jet ซึ่งมีความเร็วประมาณ 280 เมตรต่อวินาที ไปกระแทกอนุภาคหรือสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ในวัตถุทำให้เกิดกระบวนการล้างขึ้นนั่นเอง ยังไม่มีสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการเกิดปฏิกิริยาคาวิตชันได้โดยตรง แต่ในงานวิจัยส่วนใหญ่จะใช้ ความดันอะคูสติกเพื่ออธิบายตำแหน่งการเกิดคาวิตชันรวมทั้งระดับความแรงที่เกิดขึ้น [17,18] ซึ่ง โมเดลความดันอะคูสติก ในโดเมนของน้ำสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (2.1)

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho_l} \nabla \cdot P \right) - \frac{\omega^2}{\rho_l c^2} P = 0 \quad (2.1)$$

โดยที่ $P = P_0 \exp(i\omega t)$ คือ ความถี่เชิงมุมของเสียง ส่วน c คือความเร็วเสียง ρ_l คือความหนาแน่นของสารละลาย ตามลำดับ

2.2.2 เกณฑ์การเกิดคาวิตชันจากคลื่นอะคูสติก (Acoustic cavitation threshold)

เมื่อฟองคาวิตชันเริ่มก่อตัวเป็นนิวเคลียสอิน ฟันผิวของมันต้องประกอบไปด้วยการปนเปื้อนและฟองขนาดไมครอน ซึ่งทั้งสองอย่างนี้ไม่ละลายในตัวกลางสารละลาย ฟองขนาดไมครอนเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสอินให้กับฟองอันอื่นต่อ ๆ ไป เมื่อฟองเริ่มโตขึ้นจะมีความดันสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนเข้าใกล้กับความดันเกณฑ์ (threshold pressure: P_t) ซึ่งความดันเกณฑ์นี้เองเป็นเกณฑ์ที่ใช้พิจารณา เสถียรภาพการโตของฟอง (stability of growth bubble) ความดันเกณฑ์ขึ้นอยู่กับความถี่ของก๊าซและขนาดของสิ่งปนเปื้อน, ความถี่และความเข้มของอัลตราโซนิก โดยทั่วไปความสัมพันธ์ระหว่าง รัศมีนิวเคลียสอิน (radius of nuclei: R_t), ความถี่ และความดันเกณฑ์ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.2) (Apfel 1984)[27]

$$R_t = \begin{cases} \frac{0.13 \left(\frac{P_\infty}{\rho_l} \right)^{1/2} \left\{ \frac{P-1}{\sqrt{P}} \left[1 + \frac{2}{3}(P-1) \right]^{1/3} \right\}}{f} & \text{for } \dots P \leq 11 \\ \frac{0.3 \left(\frac{P_\infty}{\rho_l} \right)^{1/2} \left[\frac{2}{3}(P-1) \right]^{1/2}}{f} & \text{for } \dots P \geq 11 \end{cases} \quad (2.2)$$

สมการนี้ใช้สำหรับหาค่าขนาดของเกณฑ์ของการเกิดคาวิตชัน(magnitude of cavitation threshold)

เมื่อทราบค่าความถี่และรัศมีของนิวเคลียสโดยประมาณ โดย $P = P_t/P_\infty$ เมื่อ P_t คือ ความดันอะคูสติกเกณฑ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการเกิดคาวิตีเตชัน(threshold pressure) P_∞ คือความดันรอบ ๆ ฟองคาวิตีเตชัน(ambient pressure) ในสารละลาย

2.2.3 รัศมีฟองคาวิตีเตชัน(Cavitation bubble radius) คลื่นเสียงจะทำให้ภายในตัวกลาง สารละลายเกิดความดันทางลบ ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดฟองคาวิตีเตชันขึ้นจำนวนมาก เมื่อหน้าคลื่นเคลื่อนที่ผ่าน ฟองคาวิตีเตชันเหล่านี้จะเกิดการสั่น (oscillate) ด้วยอิทธิพลของความดันทางบวก แล้วจะโตขึ้น(growth) จนมี ขนาดสูงสุด หลังจากนั้นมันยุบสลาย(collapse) ด้วยการระเบิด(implosion) ออก เรียกว่าปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์คาวิตีเตชัน(cavitation effect)” การโตขึ้นและยุบสลายของฟองคาวิตีเตชันที่เวลาใด ๆ สัมพันธ์ กับรัศมีฟองคาวิตีเตชัน(cavitation bubble radius: R) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการการเคลื่อนที่ของผิวฟองคา วิเตชัน(motion of the cavity interface) ของ Rayleigh-Plasset (Hilgenfeldt et al. 1998)[23] ซึ่งแสดง ดังสมการ (2.3)

$$P\ddot{R} + \left(\frac{3}{2}\right)\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho_l} \left[\left(P_h + \frac{2\sigma}{R_e} - P_v \right) \left(\frac{R_e}{R} \right)^{3K} - \frac{2\sigma}{R} - 4\mu \frac{\dot{R}}{R} - (P_h - P_a) \right] \quad (2.3)$$

เมื่อ R_e คือ รัศมีฟองคาวิตีเตชันที่สภาวะสมดุล(bubble radius at equilibrium conditions), σ คือ แรงตึง ผิวของสารละลาย, คือความหนืดของสารละลาย, P_h คือ ความดันบรรยากาศ(atmospheric pressure), P_v คือ ความดันภายในฟอง(vapor pressure), P_a คือ ความดันอะคูสติกที่กระทำต่อฟอง(exerted acoustic pressure) โดย $P_a = P \sin \omega t$, γ คือ อัตราความจุความร้อนจำเพาะ และ K คือ ดัชนีโพลีโทรปิกของ ก๊าซ (gas polytropic index)

2.2.4 อุณหภูมิและความดันขณะฟองยุบสลาย อุณหภูมิและความดันของฟองที่ยุบสลายก็เป็นอีก หนึ่งปัจจัยที่สำคัญซึ่งที่ผลต่อกระบวนการล้าง เมื่อฟองโตจนมีขนาดสูงสุด ที่บริเวณรอบ ๆ ฟอง จะมีอุณหภูมิ สูงขึ้นมากกว่า 10,000 องศาฟาเรนไฮต์ ด้วยความดันที่มากกว่า 69 เมกะพาสคาล[3] การยุบสลายจะเกิดขึ้น อย่างรวดเร็วมากในหน่วยของไมโครวินาที ทำให้ความร้อนไม่สามารถหนีออกจากฟองได้ทัน จนถือได้ว่า ฟอง ยุบสลายแบบอะเดียแบติก(adiabatically) และเกิดกระบวนการล้างขึ้น สมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ ระหว่างความดันขณะยุบสลาย(pressure collapse: $P_{collapse}$), อุณหภูมิขณะฟองยุบสลาย(temperature collapse: T_g) และรัศมีฟอง สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.3) และ (2.4) (Hilgenfeldt 1999)[23]

$$P_{collapse} = \left(P_0 + \frac{2\sigma_l}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu_l}{R} \left(\frac{dR}{dt} \right) \quad (2.4)$$

$$T_g(R) = \frac{T_0 R_0^{3(\gamma-1)}}{(R^3 - a^3)^{\gamma-1}} \quad (2.5)$$

เมื่อ P_0 คือ ความดันอะคูสติกในสารละลาย R_0 คือรัศมีฟองเริ่มต้น R คือ รัศมีฟองขณะที่ยุบสลาย T_0 คือ อุณหภูมิของสารละลาย สมการนี้แสดงถึงความเกี่ยวข้องระหว่างรัศมีของฟองอากาศกับความดันอะคูสติก และเมื่อเพิ่มความดันอะคูสติกก็จะเพิ่มความเข้มของการล้าง

2.2.5 การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการออกแบบโครงสร้างสำหรับรับภาระของวัสดุต่าง ๆ นั้นจำเป็นต้องรู้คุณสมบัติทางกายภาพของโครงสร้าง เช่น ความเครียด ความเค้น ระยะการโก่งตัว หรือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานความเครียดของโครงสร้าง เพื่อนำคุณสมบัติต่าง ๆ มากำหนดเป็นเป้าหมายและเงื่อนไขในการออกแบบโครงสร้าง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นวิธีที่สามารถนำมาวิเคราะห์และอธิบายพฤติกรรมของโครงสร้าง ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ สมการเหล่านี้สามารถนำมาวิเคราะห์ได้เฉพาะโครงสร้างที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อนเท่านั้น แต่โครงสร้างที่ใช้งานจริงส่วนใหญ่จะมีลักษณะโครงสร้างที่ซับซ้อน อย่างไรก็ตามวิธีการในการคำนวณเชิงตัวเลข เราสามารถวิเคราะห์โครงสร้างที่ซับซ้อนเหล่านี้ได้ด้วยการประมาณโดยใช้ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลขและวิธีที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางคือ ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีเชิงตัวเลขสำหรับหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์

การวิเคราะห์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์[28] จะเกิดประโยชน์สูงสุดเมื่อนำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ที่มีโดเมน(หรือรูปทรงของโครงสร้าง)สลับซับซ้อน หลักการเบื้องต้นคือการประมาณโดเมนนั้นด้วยโดเมนย่อยที่มีรูปทรงอย่างง่ายหลาย ๆ อันซึ่งเรียกว่า เอลิเมนต์ ผลเฉลยโดยประมาณสำหรับโดเมนย่อยนั้นแสดงในรูปของฟังก์ชันอย่างง่ายเช่นฟังก์ชันพหุนาม เมื่อทำการพิจารณาผลกระทบของเอลิเมนต์เหล่านั้นในภาพรวมต่อพลวัตของโครงสร้าง ทำให้ได้ผลเฉลยเชิงอนุพันธ์โดยประมาณจากการแก้ระบบสมการพีชคณิต

การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์นี้คือ การวิเคราะห์ด้วยวิธีการกระจัด(displacement-based approach) โดยยึดกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน(Newton's laws of motion) และพิจารณาเป็นการวิเคราะห์การกระจัดแบบเส้นตรงขนาดเล็ก(linear small-displacement analysis) โดยเมื่อนำมาประยุกต์กับโครงสร้างที่ถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ สามารถเขียนในรูปสมการลากรางจ์ดังนี้

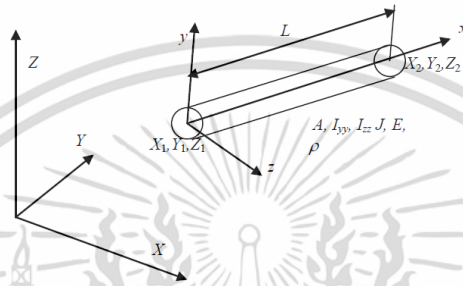
$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} - Q_i = 0 \quad (2.6)$$

เมื่อ	q_i	คือ การกระจัดเฉือนของโครงสร้าง
	T	คือ พลังงานจลน์รวมของโครงสร้าง
	U	คือ พลังงานศักย์ยืดหยุ่นของโครงสร้าง
	Q_i	คือ แรงภายนอกที่กระทำสอดคล้องกับการกระจัด q_i

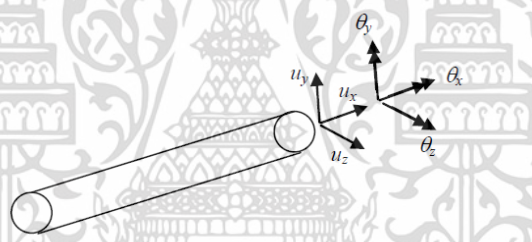
เอลิเมนต์ใด ๆ จะมีลักษณะพื้นฐานแตกต่างกันตามชนิดรูปทรงเอลิเมนต์ เช่น รูปทรงเส้นตรงสำหรับเอลิเมนต์ของโครงข้อหมุน รูปสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมสำหรับโครงสร้างแบบแผ่น เป็นต้น ในแต่ละเอลิเมนต์จะมีจุดต่อ (node) และขอบเขต(boundary) การคำนวณด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์เป็นการทำนายค่าการกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์เหล่านั้น รูปที่ 2.1 แสดงภาพเอลิเมนต์แท่งเอกรูปชนิด 2 จุดต่อ (2-node bar element) สำหรับโครงข้อหมุนในปริภูมิสามมิตินี้ ใช้ระบบแกนอ้างอิงสำหรับการคำนวณ 2 ระบบคือ แกนสัมพัทธ์ xyz และแกนสัมบูรณ์ XYZ จากรูปจะเห็นได้ว่าถ้าอ้างอิงเอลิเมนต์เทียบกับแกนสัมพัทธ์ เอลิเมนต์นี้จะเป็นเอลิเมนต์แบบหนึ่งมิติโดยมีแกน x เป็นแกนหลัก แต่ถ้าอ้างอิงกับแกนสัมบูรณ์จะกลายเป็นโครงสร้างในปริภูมิสามมิติ คุณสมบัติเบื้องต้นของเอลิเมนต์ที่จำเป็นต้องทราบเพื่อสามารถวิเคราะห์โครงสร้างและการออกแบบทั่ว ๆ ไปคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- L ความยาวของเอลิเมนต์
- A พื้นที่หน้าตัดของเอลิเมนต์
- I_{yy} โมเมนต์ที่สองของพื้นที่เทียบกับแกน yy
- I_{zz} โมเมนต์ที่สองของพื้นที่เทียบกับแกน zz
- J โมเมนต์ที่สองของพื้นที่เทียบกับแกน yz
- E ค่าโมดูลัสของยัง
- ρ ค่าความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้



รูปที่ 2.1 3D beam element



รูปที่ 2.2 การกระจัดที่จุดต่อ (nodal displacement)

รูปที่ 2.2 แสดงเวกเตอร์การกระจัดที่จุดต่อ ในเอลิเมนต์ใด ๆ สามารถแสดงเวกเตอร์ของการกระจัดที่จุดต่อได้ดังนี้

$$r_e = \begin{Bmatrix} \delta_{xyz,1} \\ \delta_{xyz,2} \end{Bmatrix} \quad (2.7)$$

เมื่อ $\delta_{xyz,i}$ คือเวกเตอร์การกระจัดของจุดต่อที่ i^{th} แสดงได้ดังนี้

$$\delta_{xyz} = \{u_x \quad u_y \quad u_z \quad \theta_x \quad \theta_y \quad \theta_z\}^T \quad (2.8)$$

การประมาณค่าของเวกเตอร์การกระจัดที่จุดต่อสามารถทำได้โดย การประยุกต์ใช้การอินเตอร์โพลชันด้วย ฟังก์ชันพหุนาม ค่าการกระจัดที่จุดใด ๆ ภายในเอลิเมนต์ สามารถแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\{\delta\}_{xyz} = [P]\{a\} \quad (2.9)$$

จาก (2.7) และ (2.9) จะได้

$$r_e = [C]\{a\} \quad (2.10)$$

ดังนั้น

$$\{\delta\}_{xyz} = [P][C]^{-1} r_e = [N]r_e \quad (2.11)$$

เราสามารถแสดงค่าเวกเตอร์ความเครียด $\{\varepsilon\}$ ที่จุดใด ๆ ได้ดังนี้(พิจารณาตามเงื่อนไข small-displacement analysis)

$$\{\varepsilon\} = [P][C]^{-1} r_e = [B]r \quad (2.12)$$

และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น $\{\sigma\}$ และความเครียดดังนี้(constitutive equation)

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (2.13)$$

เมื่อ $[D]$ คือเมทริกซ์อีลาสติคซิติฟลังงานความเครียดหรือพลังงานศักย์ยืดหยุ่นของเอลิเมนต์สามารถคำนวณได้จากสมการ(2.14)

$$U_e = \frac{1}{2} \iiint_{\Omega} \sigma^T \varepsilon dV = \frac{1}{2} r_e^T \left(\iiint_{\Omega} B^T D B dV \right) r_e \quad (2.14)$$

อย่างไรก็ตามการคำนวณต้องแสดงผลการกระจัดอ้างอิงกับระบบพิกัดสัมบูรณ์ XYZ ซึ่งสามารถเขียนเวกเตอร์การกระจัดที่จุดต่อได้เป็น

$$\delta_{XYZ} = \{u_x \quad u_y \quad u_z \quad \theta_x \quad \theta_y \quad \theta_z\}^T \quad (2.15)$$

การแปลงระหว่างเวกเตอร์การกระจัดในพิกัดสัมพัทธ์และพิกัดสัมบูรณ์สามารถทำได้โดยใช้เมทริกซ์การแปลงแบบออร์โธโกนัล(orthogonal matrix) T หรือโดยทั่วไปเรียกว่า (orthogonal tensor)

$$\delta_{xyz} = [T]\delta_{XYZ} \quad (2.16)$$

หรือ

$$\delta_{XYZ} = [T]^T \delta_{xyz} \quad (2.17)$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{q}_e = \begin{Bmatrix} \delta_{XYZ,1} \\ \delta_{XYZ,2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{T} \end{bmatrix} \mathbf{r}_e = \mathbf{T}_e \mathbf{r}_e \quad (2.18)$$

เมื่อ \mathbf{q}_e คือเวกเตอร์ของการกระจัดที่จุดของเอลิเมนต์ใด ๆ เทียบกับแกนสัมบูรณ์ แทนค่า (2.18) ลงใน (2.15) จะได้

$$U_e = \frac{1}{2} \mathbf{q}_e^T [\mathbf{T}_e^T (\iiint_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV) \mathbf{T}_e] \mathbf{q}_e = \frac{1}{2} \mathbf{q}_e^T [\mathbf{k}_e] \mathbf{q}_e \quad (2.19)$$

ในขณะเดียวกัน เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์ของการกระจัดของเอลิเมนต์ \mathbf{q}_e กับเวกเตอร์การกระจัดทั้งหมดของระบบโครงสร้าง \mathbf{q} ดังนี้

$$\mathbf{q}_e = [\mathbf{R}_e] \mathbf{q} \quad (2.20)$$

ดังนั้น จะได้พลังงานศักย์ยืดหยุ่นของเอลิเมนต์ที่ e^{th} ดังนี้

$$U_e = \frac{1}{2} \mathbf{q}^T [\mathbf{R}_e^T \mathbf{k}_e \mathbf{R}_e] \mathbf{q} \quad (2.21)$$

เมื่อ \mathbf{k}_e เรียกว่าเมทริกซ์ความแข็งแรงแรงของเอลิเมนต์ (element stiffness matrix) ในทำนองเดียวกันจะได้พลังงานจลน์ของเอลิเมนต์ดังนี้

$$T_e = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_e^T [\mathbf{T}_e^T (\rho \iiint_{\Omega} \mathbf{N}^T \mathbf{N} dV) \mathbf{T}_e] \dot{\mathbf{q}}_e = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_e^T [\mathbf{m}_e] \dot{\mathbf{q}}_e = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T [\mathbf{R}_e^T \mathbf{m}_e \mathbf{R}_e] \dot{\mathbf{q}} \quad (2.22)$$

เมื่อ \mathbf{m}_e เรียกว่าเมทริกซ์มวลของเอลิเมนต์ที่ e^{th} (element mass matrix)

พลังงานศักย์และพลังงานจลน์รวมของระบบสามารถเขียนได้ดังนี้

$$U = \sum_{e=1}^N U_e = \frac{1}{2} \mathbf{q}^T \sum_{e=1}^N [\mathbf{R}_e^T \mathbf{k}_e \mathbf{R}_e] \mathbf{q} \quad (2.23)$$

และ

$$T = \sum_{e=1}^N T_e = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \sum_{e=1}^N [\mathbf{R}_e^T \mathbf{m}_e \mathbf{R}_e] \dot{\mathbf{q}} \quad (2.24)$$

เมื่อแทนค่าพลังงานศักย์และพลังงานจลน์จาก (23) และ (24) ลงใน (6) จะได้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสองดังนี้

$$\mathbf{M}_0 \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_0 \mathbf{q} = \mathbf{Q} \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (2.25) คือสมการพลวัตหรือสมการการสั่นสะเทือนของระบบโครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างในรูปแบบต่าง ๆ ดังนี้

การวิเคราะห์เชิงสถิต

คือการวิเคราะห์กลศาสตร์ของโครงสร้างที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงการกระจัดหรือพลังงานต่าง ๆ ตามเวลา หรือกล่าวได้ว่าเป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างในกรณีที่วัตถุไม่มีการเคลื่อนที่ จึงไม่พิจารณาเมทริกซ์ของมวล ดังนั้นจากสมการ (2.25) จะได้

$$Kq = Q \quad (2.26)$$

ในปัญหาการวิเคราะห์เชิงสถิต เวกเตอร์การกระจัดและแรงภายนอกจะมีขนาดเท่ากับระดับองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) ของโครงสร้าง โดยทั่วไปมักจะรู้ค่าขอบเขตหรือรู้ค่าการกระจัดบางจุดต่อซึ่งเขียนแทนด้วย r_b ซึ่ง ณ จุดต่อเหล่านี้เราจะไม่รู้ค่าแรงกระทำ ค่าแรงที่เป็นตัวแปรเหล่านี้คือแรง ปฏิกริยาที่จุดต่อเงื่อนไขขอบเขต (f_b) หรือกล่าวได้ว่าบริเวณ b คือ บริเวณที่เรารู้ขอบเขตแน่นอนก่อนจะจำลองแต่โปรแกรมต้องคำนวณหาแรงปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้ ในขณะที่เดียวกัน f_a คือแรงภายนอกที่จุดต่อส่วนที่เหลือ และมีการกระจัดที่จุดต่อเหล่านี้เป็นตัวแปรที่จะต้องหาผลเฉลย r_a หรือกล่าวได้ว่าบริเวณ a คือ บริเวณที่เราใส่แรงภายนอก (f_b) เข้าไปและโปรแกรมต้องคำนวณหาการกระจัดที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้ เมื่อทำการจัดรูปเมทริกซ์ใน (2.26) ให้สอดคล้องกับเวกเตอร์เหล่านี้จะได้ ระบบสมการเชิงเส้น

$$\begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

ทำการแก้สมการจะได้การกระจัดโครงสร้าง

$$q_a = K_{aa}^{-1}(Q_a - K_{ab}q_b) \quad (2.28)$$

และแรงปฏิกริยา

$$Q_b = K_{ba}q_a + K_{bb}q_b \quad (2.29)$$

เมื่อทราบค่าการกระจัดทุกจุดต่อแล้วสามารถคำนวณหาค่าความเครียดและความเค้นที่ทุกจุดของโครงสร้างได้ การวิเคราะห์เชิงสถิตสามารถขยายผลไปยังการทำนายอายุการล้าของชิ้นงาน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งในการออกแบบได้

การวิเคราะห์เชิงพลวัต

การวิเคราะห์เชิงพลวัตหรือการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนคือการแก้ระบบสมการ (2.25) โดยตรง แรงภายนอกในที่นี้หมายถึงแรงพลวัตที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ส่วนแรงสถิตจะไม่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของระบบ เมื่อมีเงื่อนไขขอบเขตเหมือนในกรณีการวิเคราะห์เชิงสถิต สามารถจัดกลุ่มสมการได้เป็น

$$\begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ab} \\ M_{ba} & M_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_a \\ \ddot{q}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

สมมติให้เงื่อนไขขอบเขต การสั่นสะเทือนของระบบ เมื่อมีเงื่อนไขขอบเขตเหมือนในกรณีการวิเคราะห์เชิงสถิต สามารถจัดกลุ่มสมการได้เป็น $r_b = 0$ จะได้ระบบสมการดังนี้

$$M_{aa} \ddot{q}_a + K_{aa} q_a = Q_a \quad (2.31)$$

และ

$$M_{ba} \ddot{q}_a + K_{ba} q_a = Q_b \quad (2.32)$$

การหน่วงที่นิยมใช้ในการออกแบบเชิงพลวัตของโครงสร้างในขั้นต้นคือการหน่วงแบบสัดส่วน (Proportional damping) โดยที่ความหน่วงนี้จะขึ้นกับความถี่ของระบบ ในสมการที่ (2.31) สามารถเพิ่มสภาวะการสูญเสียพลังงานหรือการหน่วงเข้าไปในระบบ สามารถเขียนได้เป็น

$$C_{aa} = \alpha M_{aa} + \beta K_{aa} \quad (2.33)$$

ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ (2.31) เมื่อพิจารณาผลของความหน่วงในระบบจะได้

$$M_{aa} \ddot{q}_a + C_{aa} \dot{q}_a + K_{aa} q_a = Q_a \quad (2.34)$$

ในงานวิจัยนี้ เมื่อให้กระแสไฟฟ้ากับทรานสดิวเซอร์ชนิด PZT4 จะสั่นด้วยความถี่ 28 กิโลเฮิรต์ การสั่นของทรานสดิวเซอร์จะทำให้ผนังของถังซึ่งทำจากสแตนเลส (stainless steel) สั่นด้วยทำให้เกิดคลื่นเสียงในตัวกลางสารละลาย เกิดเป็นควิเทชันในที่สุด ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าในถังทำความสะอาดอัลตราโซนิก ประกอบไปด้วย 3 โดเมนได้แก่ วัสดุเพียโซอิเล็กทริก, ผนังถังและตัวกลางสารละลาย ซึ่งจะได้สมการไฟไนท์เอลิเมนต์ของแต่ละสมการจะแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6 ไฟไนท์เอลิเมนต์สำหรับโดเมนของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าสิ่งที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์คาวิตีชันคือการสั่นจากทรานสดิวเซอร์และตัวกลางที่เกิดปฏิกิริยาคือสารละลาย โดยตัวทรานสดิวเซอร์เป็นทรานสดิวเซอร์ชนิดสารประกอบเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric transducer) ซึ่งกลไกหลักของทรานสดิวเซอร์คือ คุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริก มี 2 รูปแบบคือ รูปแบบแรกคือผลทางตรง (direct effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดประจุไฟฟ้าจากการให้แรงทางกล เช่น เครื่องกำเนิดสัญญาณ (generator) และผลย้อนกลับ (converse effect) ซึ่งการเคลื่อนที่หรือการทำงานทางกลจะเกิดจากการที่ให้สนามไฟฟ้าเข้าไปเช่น มอเตอร์ (motor)

สมการพื้นฐานที่ใช้อธิบายคุณสมบัติทั้ง 2 แบบมีดังนี้

$$D = d_e + \epsilon^T E \quad (2.35)$$

และ

$$S = s^E \sigma + dE \quad (2.36)$$

เมื่อ D คือ การกระจัดไดอิเล็กทริก (dielectric displacement), σ คือ ความเค้น (stress), E คือ สนามไฟฟ้า (Electric field), S คือ ความเครียด (strain), d_e คือ ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric coefficient), ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) และ s คือ ค่าการให้ตัวของวัสดุ (material compliance (modulus of elasticity)) ซึ่งในทรานสดิวเซอร์นี้จะใช้เพียงคุณสมบัติทางตรง จากคุณสมบัติทางตรงการสั่นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะเกิดจากการทำอันตรกิริยากันเนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงกลของโครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ เมื่อให้ความต่างศักย์ แก่เพียโซอิเล็กทริกมันจะสั่นทำให้เกิดเวกเตอร์การกระจัด ดังนั้นจะได้ไฟไนท์เอลิเมนต์สำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ดังสมการที่ (2.32) [24]

$$\begin{pmatrix} M_{uu} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{v} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} C_{uu} & 0 \\ 0 & -C_{vv} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} K_{uu} & K_{uv} \\ K_{uv} & -K_{vv} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ Q \end{Bmatrix} \quad (2.37)$$

เมื่อ K_{uu} , K_{vv} , K_{uv} (K_{vu}) คือค่าโครงสร้างความแข็งแก็ง (structural stiffness), ความนำสนามไฟฟ้าไดอิเล็กทริก (dielectric permittivity) และ เมทริกซ์ของเอลิเมนต์อันตรกิริยาจากเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric coupling element matrices) ตามลำดับ, C_{uu} , C_{vv} คือความหน่วงของโครงสร้าง (structural damping) และการกระจายตัวทางไฟฟ้า (dielectric dissipation) ตามลำดับ, $[M_{uu}]$ คือเมทริกซ์ของมวล, $\{u\}$ คือเวกเตอร์การกระจัด และ $\{v\}$ คือเวกเตอร์ความต่างศักย์ที่ให้ระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.7 ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับโดเมนของผนังถัง ในโดเมนของผนังถัง $\{u\}$ จากสมการที่ (2.37) จะถูกส่งต่อมายังพื้นถังทำให้เกิดการสั่น เมื่อผนังสั่นจะทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิกส่งต่อไปยังโดเมนน้ำ สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับโดเมนของผนังถัง สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.33)[25]

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (2.38)$$

เนื่องจากไม่มีอันตรกิริยาจากไฟฟ้ามาเกี่ยวข้องเหมือนกับสมการที่ (2.37) จะเห็นได้ว่าสมการที่ (2.38) จะเหลือเพียงพจน์จากการวิเคราะห์เชิงพลวัตอย่างเดียว

2.2.8 ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับโดเมนตัวกลางสารละลาย ในโดเมนของน้ำ เมื่อคลื่นเสียง เคลื่อนที่เข้ามาในโดเมนของน้ำ ความดันอะคูสติกสามารถหาได้จากการแก้สมการเชิงอนุพันธ์อันดับสอง(second order partial differential equation) ดังสมการ (2.1) เมื่อพิจารณาว่าการแพร่ของคลื่นเสียงผ่านตัวกลางเป็นแบบเส้นตรง, เกิดความเค้นเฉือนเล็กน้อย, ความหนาแน่นและการบีบอัดของสารละลายตัวกลางเป็นค่าคงที่ และความดันอะคูสติกเปลี่ยนตามเวลาฮาร์โมนิก (2.3)[21] การวิเคราะห์การตอบสนองจากฮาร์โมนิก (HRA) ใน ANSYS สร้างสมการคำนวณโดยอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(Finite Element Method) เพื่อคำนวณความดันอะคูสติกจากโดเมนของสารละลาย ในสมการ (2.1) จะถูกเปลี่ยนจากโดเมนของไหลให้เป็นโดเมนของเสียง ด้วยหลักการของ Galerkin procedure [26] โดยการคูณสมการ (2.1) ด้วยฟังก์ชันทดสอบ (testing function; w)(2.39) แล้วอินทิเกรตตลอดทั้งปริมาตร ทำให้ได้สมการ (2.40) ใช้สำหรับคำนวณความดันอะคูสติก เมื่อกำหนดคุณสมบัติทางวัสดุและเงื่อนไขต่าง ๆ ครบถ้วน โปรแกรม ANSYS จะคำนวณความดันอะคูสติกของแต่ละตำแหน่งในถังทำความสะอาดอัลตราโซนิก ในรูปของตัวเลขแล้วจึงแสดงผลออกมาในแบบแถบสีกราฟิกเพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์

$$\begin{aligned} & \iiint_{\Omega_F} \frac{1}{\rho_0 c^2} w \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} dv + \iiint_{\Omega_F} \nabla w \cdot \left(\frac{4\mu}{3\rho_0^2 c^2} \nabla \frac{\partial p}{\partial t} \right) dv + \iiint_{\Omega_F} \nabla w \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) dv \\ & - \iint_{\Gamma_F} w \left(\frac{1}{\rho_0} + \frac{4\mu}{3\rho_0^2 c^2} \frac{\partial}{\partial t} \right) \hat{n} \cdot \nabla p ds + \iint_{\Gamma_F} w \frac{4\mu}{3\rho_0^2} \hat{n} \cdot \nabla Q ds \quad (2.39) \\ & = \iiint_{\Omega_F} w \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial Q}{\partial t} dv + \iiint_{\Omega_F} \nabla w \cdot \left(-\frac{4\mu}{3\rho_0^2} \nabla Q \right) dv \end{aligned}$$

เมื่อ dv ปริพันธ์ของปริมาตรโดเมนที่เสียงผ่าน Ω_F , ds อนุพันธ์พื้นผิวของโดเมนที่เสียงผ่าน Γ_F และ \hat{n} เวกเตอร์ขอบเขต จากสมการที่ (3) น้ำคือโดเมนของของเหลว ได้รับการปรับให้เข้ากับโดเมนอะคูสติกซึ่งสามารถคำนวณความดันอะคูสติกโดย ANSYS

$$[M_f]\{\ddot{p}\} + [C_f]\{\dot{p}\} + [K_f]\{p\} + \rho_l [R]^T \{\ddot{u}_{f,e}\} = \{F_f\} \quad (2.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

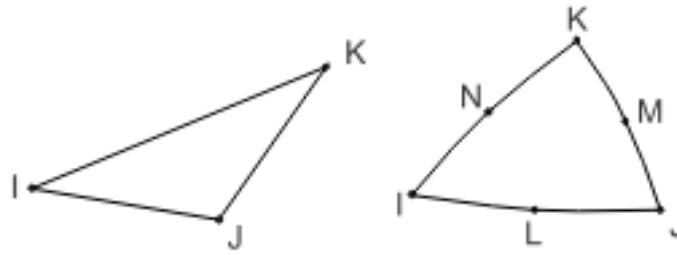
เมื่อ $[M_F]$ คือ เมทริกซ์มวลของโดเมนของไหลที่คลื่นอะคูสติกผ่าน(acoustic fluid mass matrix), $[C_F]$ คือ เมทริกซ์ความหน่วงของโดเมนของไหลที่คลื่นอะคูสติกผ่าน(acoustic fluid damping matrix), $[K_F]$ คือ เมทริกซ์ความแข็งแก่งของโดเมนของไหลที่คลื่นอะคูสติกผ่าน(acoustic fluid stiffness matrix), $[R^T]$ คือ เมทริกซ์ขอบเขตของโดเมนของไหลที่คลื่นอะคูสติกผ่าน(acoustic fluid boundary matrix), $\{f_F\}$ คือ ความถี่คลื่นอะคูสติกที่ผ่านโดเมนของเหลว อาศัยสมการ (2.1)-(2.40) ทำให้เราทราบเงื่อนไขเบื้องต้นที่จะทำให้ถึงอัลตราโซนิกได้ผลดี เช่น ในตัวกลางสารละลายควมเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ, ลดความหนืด, การเพิ่มกำลังไฟฟ้าจะทำให้ความเข้มของคาวิตะชันสูงขึ้น แต่จะสูงขึ้นเพียงช่วงที่ไม่เกินค่าเกณฑ์การเกิดคาวิตะชัน(cavitation threshold) เท่านั้นซึ่งค่านี้ขึ้นกับปัจจัยอื่นๆประกอบด้วยเช่นชนิด และประสิทธิภาพของทรานสดิวเซอร์ที่ใช้กับถัง การเพิ่มความถี่จะทำให้ขนาดของฟองคาวิตะชันลดลง จึงเหมาะสำหรับการล้างวัสดุชิ้นเล็ก ๆ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือสมการที่ (2.5) ใช้สำหรับเลือกความถี่อัลตราโซนิกที่จะทำให้เกิดคาวิตะชันที่เหมาะสมกับขนาดวัสดุและสิ่งปนเปื้อนที่ต้องการล้าง ตัวอย่างซึ่งนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเช่น ความถี่ 132 กิโลเฮิร์ต ใช้ล้างอนุภาคขนาดเล็กที่ติดอยู่ใน Head Stack Assembly (HSA) ในกระบวนการผลิต HDD และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ. ความถี่ 42 กิโลเฮิร์ต เหมาะสำหรับการล้างเครื่องประดับในอุตสาหกรรมอัญมณี ความถี่ 37 กิโลเฮิร์ต เหมาะสำหรับการล้างอุปกรณ์ทางทันตกรรม และเครื่องมือผ่าตัด ความถี่ 28 กิโลเฮิร์ต เหมาะสำหรับการล้างนาฬิกา และแว่นตา รวมถึงวัสดุอื่น ๆ ที่มีขนาดประมาณ 1-10 เซนติเมตร ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ต เหมาะสำหรับการล้างสินแร่รวมถึงน้ำมันดิบเพื่อให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ เราจะจำลองการเกิดความดันอะคูสติก ในถังทำความสะอาดอัลตราโซนิกจากโรงงานที่เกิดปัญหาดังที่กล่าวมาแล้ว โดยใช้การวิเคราะห์ผลตอบสนองฮาร์โมนิก(Harmonic Response Analysis) ในโปรแกรม ANSYS เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดคาวิตะชัน ในถังทำความสะอาดอัลตราโซนิกอันนี้ คาดว่าผลการจำลองที่ได้จะนำไปใช้วิเคราะห์เพื่อหาวิธีการปรับปรุงกระบวนการล้างให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้ต่อไป

2.2.9 แบบจำลองโครงสร้างตาข่าย การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ เป็นการจำลองโดยการหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสองของแต่ละเอลิเมนต์ย่อย ๆ ในโดเมน โดยความแม่นยำของผลเฉลยจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของการแบ่งเอลิเมนต์ในโดเมนหรือวัตถุ หรือเราเรียกว่าการสร้างโครงสร้างตาข่ายหรือเรียกว่าการเมช การเมชคือการแบ่งวัตถุหรือโดเมนใหญ่ ๆ ให้เป็นองค์ประกอบย่อย ๆ เรียกว่าเอลิเมนต์ และจุดที่เชื่อมกันระหว่างเอลิเมนต์เราเรียกว่าจุดเชื่อมต่อ(node) โดยการสร้างโครงสร้างตาข่ายให้มีความเหมาะสมจะขึ้นอยู่กับประเภทในการสร้างโครงสร้างตาข่ายให้เหมาะสมกับรูปร่างของวัตถุหรือสมการที่จะใช้ในการคำนวณด้วย เราสามารถแบ่งชนิดของเมชตามรูปร่างได้ดังต่อไปนี้

2.2.9.1 ชนิดของเมช(Mesh Type) เมชใน 2 มิติประกอบไปด้วย

1. เมชสามเหลี่ยม(triangle mesh)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 เมชสามเหลี่ยมใน 2 มิติ แบบ 3 และ 6 จุดเชื่อมต่อ

2. เมชสี่เหลี่ยม(quadrilateral mesh)

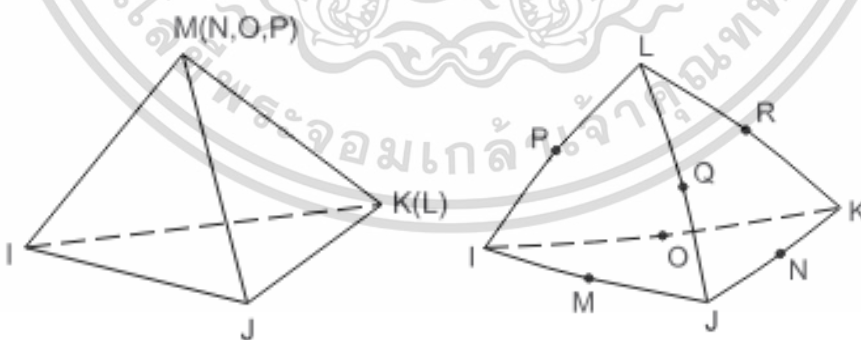


รูปที่ 2.4 เมชสี่เหลี่ยมใน 2 มิติ แบบ 4 และ 8 จุดเชื่อมต่อ

จากรูปที่ 2.3 เมชสามเหลี่ยมเป็นเมชที่ถูกนำมาใช้มากที่สุด เนื่องจากง่ายต่อการบรรจุในวัตถุทุกรูปแบบ สามารถบรรจุในวัตถุที่มีรูปทรงซับซ้อนได้ ใช้เวลาในการสร้างที่รวดเร็ว แต่คำตอบที่ได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าเมชสี่เหลี่ยมในรูป 2.4 เนื่องจากจำนวนจุดเชื่อมต่อที่น้อยกว่า

2.2.9.2 ชนิดของเมช(Mesh Type) เมชใน 3 มิติประกอบไปด้วย

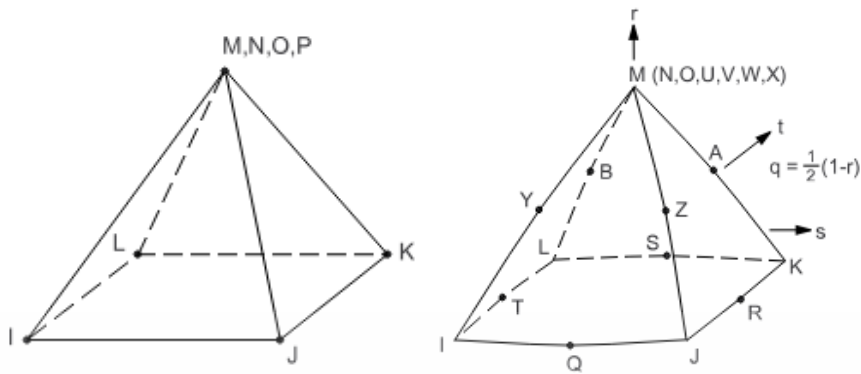
1. ทรงสี่หน้า(tetrahedron mesh)



รูปที่ 2.5 เมชทรงสี่หน้า แบบ 4 และ 10 จุดเชื่อมต่อ

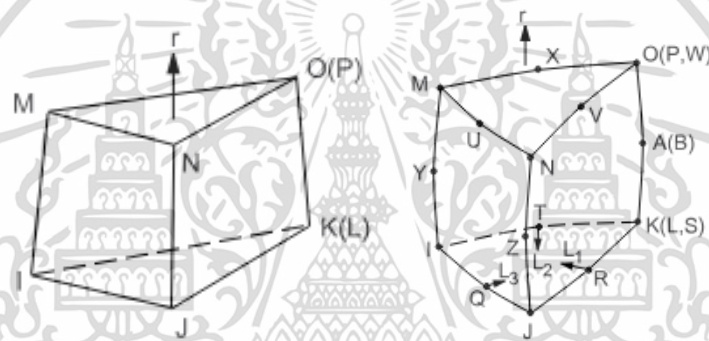
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. พีระมิด (pyramid mesh)



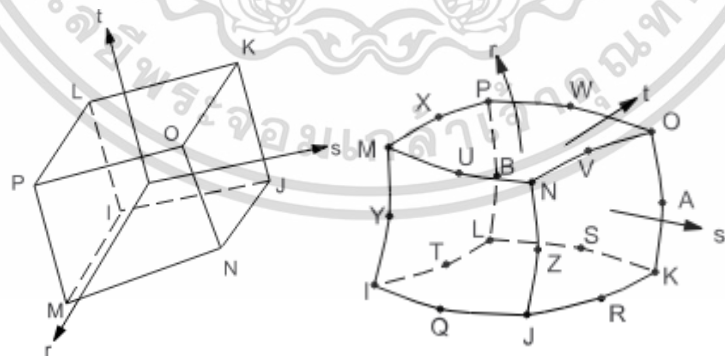
รูปที่ 2.6 เมชพีระมิด แบบ 5 และ 13 จุดเชื่อมต่อ

3. ปริซึม(prism or wedge)



รูปที่ 2.7 เมชปริซึม แบบ 6 และ 15 จุดเชื่อมต่อ

4. ทรงหกหน้า(hexahedron)



รูปที่ 2.8 เมชทรงหกหน้า แบบ 8 และ 20 จุดเชื่อมต่อ

เมชทรงสี่หน้าจะสร้างง่ายที่สุด หาคำตอบได้เร็ว และเข้ากันได้ง่ายกับวัตถุที่มีรูปร่างซับซ้อน แต่มีข้อจำกัดคือ เรื่องความถูกต้องของผลเฉลย ในการจำลอง เราจะต้องใช้เมชชนิดต่าง ๆ ร่วมกันอย่างเหมาะสมกับบริเวณที่เราสนใจ เพื่อจะทำให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด โดยจากรูปที่ 2.3 ถึง 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าเมชในแต่ละรูปทรงจะมีจำนวนจุดเชื่อมต่อที่แตกต่างกันเนื่องด้วยการนำไปใช้ในการวิเคราะห์ที่ต่างกัน เช่น เมช 2 มิติ ชนิดสามเหลี่ยมแบบ 3 จุดเชื่อมต่อ ใช้สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้าง ส่วนแบบ 6 จุดเชื่อมต่อ ใช้สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิ ดังนั้นในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ เราจำเป็นต้องจัดสรรประเภทเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับหัวข้อและรูปร่างของวัตถุที่เราวิเคราะห์ เพื่อให้ผลจากการจำลองที่ได้ที่ความถูกต้อง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่

2.2.9.3 คุณภาพของเมช(Mesh Quality) โดยทั่วไปแล้ว ปัญหาที่มีจำนวนเอลิเมนต์ และจุดเชื่อมต่อมาก จะต้องใช้เวลา และคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการคำนวณ ซึ่งไม่จำเป็นเสมอไป การสร้างเมชที่มีคุณภาพดีเกิดจากการวางตำแหน่ง ขนาด และชนิดของเมชที่เหมาะสม สิ่งเหล่านี้จะช่วยให้ผลการคำนวณดี ในเวลาการคำนวณที่สั้นลง

ในโปรแกรม ANSYS คุณภาพของเมชสามารถบอกได้โดยดูจาก mesh metric ซึ่งภายในจะมีค่าต่าง ๆ ที่สามารถใช้งบ่งบอกคุณภาพของเมชหลายค่า โดยในงานวิจัยของเราจะใช้เฉพาะค่า skewness เท่านั้นซึ่งเป็นค่าที่ได้รับความนิยมในปัญหาทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ ค่า skewness ของเมชที่สร้างขึ้น ยังมีค่าน้อยยิ่งบ่งบอกถึงเอลิเมนต์มีลักษณะตรงตามเอลิเมนต์สมบูรณ์หรือคุณภาพที่ดีและให้คำตอบที่แม่นยำ ควรมีค่าไม่เกิน 0.95 ถ้าค่า skewness มีค่ามากกว่า 0.98 อาจจะไม่สามารถหาคำตอบได้ โดยตารางที่ 2.1 แสดงคุณภาพเมชเมื่อพิจารณาจากค่า skewness

ตารางที่ 2.1 ค่าคุณภาพของเมชแบบ skewness

คุณภาพเมช	ยอดเยี่ยม	ดีมาก	ดี	ยอมรับได้	แย่มาก	รับไม่ได้
ค่า skewness	0-0.25	0.25-0.50	0.5-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

2.2.9.4 การคำนวณค่า skewness สามารถทำได้จาก 2 วิธี คือ

1. ค่าเบี่ยงเบนปริมาตรเท่ากันหมด(Equilateral Volume Deviation) วิธีนี้จะใช้สำหรับตรวจสอบเอลิเมนต์ สามเหลี่ยมในสองมิติ และทรงสี่หน้าในสามมิติเท่านั้น โดยทำการตรวจสอบจากการสมมุติเอลิเมนต์สมบูรณ์ทรงสี่หน้าที่มีด้านเท่ากันทุกด้าน แล้วคำนวณความแตกต่างของขนาดเอลิเมนต์สมบูรณ์เปรียบเทียบกับเอลิเมนต์ที่ถูกสร้างขึ้นจริง

$$\text{skewness} = \frac{\text{optimal cell size} - \text{cell size}}{\text{optimal cell size}} \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Optimal cell size คือ ความยาวด้านต่าง ๆ ของรูปสามเหลี่ยม หรือทรงสี่หน้าที่มีด้านเท่ากันทุกด้าน
Cell size คือ ความยาวของด้านต่าง ๆ ของรูปสามเหลี่ยม หรือรูปทรงสี่หน้าจริงที่ถูกสร้างขึ้น



รูปที่ 2.9 การคำนวณ skewness แบบการเบี่ยงเบนปริมาตรเท่ากันหมด

จาก (2.41) และรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงหากเอลิเมนต์ที่เราสร้างขึ้นมีด้านเท่ากันหมดทุกเอลิเมนต์ก็จะให้ค่า skewness ต่ำ ซึ่งเหมาะกับการนำมาใช้ในการจำลองในงานวิจัย ถ้าเอลิเมนต์มีลักษณะบิดเบี้ยวหรือแบน บางด้านยาวมากไป บางด้านยาวน้อยไป หลาย ๆ เอลิเมนต์ ก็จะทำให้ค่า skewness สูงไม่เหมาะสมในการนำมาใช้จำลอง ดังรูปที่ 2.9b เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมมีความยาวด้านเท่ากันหมด และรูปที่ 2.9c ความยาวในแต่ละด้านไม่เท่ากัน ดังนั้นเอลิเมนต์ในรูป 2.9b จะมีค่า skewness ที่ต่ำกว่าและเหมาะสำหรับการนำมาสร้างแบบจำลองโครงสร้างเมช

2. ค่าเบี่ยงเบนมุมปกติ (Normal Angle Deviation)

วิธีนี้จะใช้สำหรับตรวจสอบเอลิเมนต์แบบ ทรงพีระมิด, ทรงปริซึม และทรงหกหน้า โดยตรวจสอบจากความแตกต่างของมุมกว้างสุดและมุมแคบสุดกับมุมของเอลิเมนต์สมบูรณ์ และสามารถตรวจสอบเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมได้และให้ค่าที่เหมือนกับวิธีก่อนหน้านี้เนื่องจากหากเอลิเมนต์สามเหลี่ยมมีความยาวด้านที่ต่างกัน มุมมีความแตกต่างกันด้วย แต่ในเอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยมนั้นความยาวของด้านไม่ส่งผลต่อขนาดของมุมจึงตรวจสอบได้จากวิธีนี้เท่านั้น

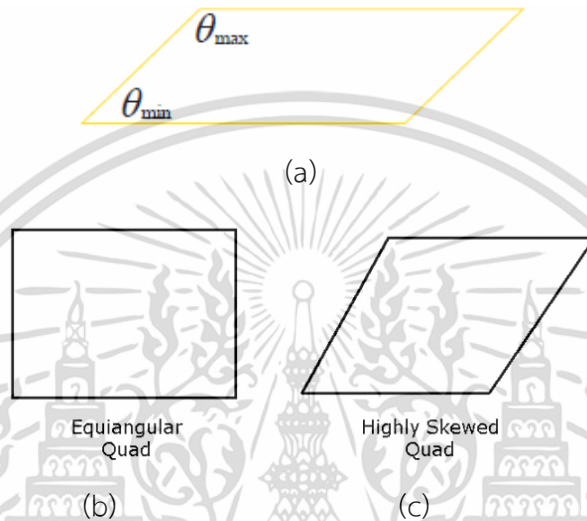
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{skewness} = \max\left[\frac{\theta_{\max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{\min}}{\theta_e}\right] \quad (2.42)$$

เมื่อ θ_{\max} คือ มุมที่ใหญ่ที่สุดในเอลิเมนต์

θ_{\min} คือ มุมที่เล็กที่สุดในเอลิเมนต์

θ_e คือ มุมของด้านที่เท่ากันได้แก่ 60° สำหรับเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม และทรงสี่หน้า, 90° สำหรับเอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยม และทรงหกหน้า



รูปที่ 2.10 การคำนวณ skewness แบบค่าเบี่ยงเบนมุมปกติ

จาก (2.42) และรูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นว่าหากเอลิเมนต์ที่เราสร้างขึ้นมามีรูปทรงบิดเบี้ยวขนาดมุมกว้างสุดและแคบสุดมีค่าเบี่ยงเบนแตกต่างจากมุมสมบรูณ์หรือมุมปกติมากจะทำให้ค่า skewness มากตามดังแสดงในรูปที่ 2.10c และหากเอลิเมนต์ที่สร้างหากเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่ไม่บิดเบี้ยวมากจะทำให้มีค่าเบี่ยงเบนของมุมแตกต่างกันน้อยค่า skewness จะน้อยตาม และหากเอลิเมนต์ที่เราสร้างเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีมุมฉากเหมือนกันทั้งหมดจะทำให้งานของเราที่มีค่าตอบที่ถูกต้องหน้าเชื่อถือ

ดังนั้นจากที่กล่าวมาข้างต้นหากเราต้องการผลการจำลองที่ถูกต้องจำเป็นต้องใช้แบบจำลองเมชที่มีคุณภาพสูง แต่อย่างไรก็ตามเราต้องคำนึงถึงทรัพยากรคอมพิวเตอร์ที่เราใช้และระยะเวลาในการคำนวณอีกด้วย ดังนั้นเราจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เมชที่เหมาะสม(Mesh Analysis) ในการจำลองของเรา โดยวิธีการนี้จะทำการวิเคราะห์หาแบบจำลองเมชที่ให้คำตอบใกล้เคียงกับแบบจำลองเมชที่ถูกต้อง เพื่อประหยัดเวลาในการคำนวณและทรัพยากรคอมพิวเตอร์

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้เราจะนำเสนอวิธีการดำเนินงานวิจัย โดยแบ่งการวิจัยออกเป็น 4 ขั้นตอนหลักคือ 1) การทดลองจริงในถังทำความสะอาดอัลตราโซนิกตัวอย่าง 2) การสร้างแบบจำลองความดันอะคูสติก 3) เปรียบเทียบผลการจำลองและทดลอง 4) สร้างแบบจำลองเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการล้าง โดยงานอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- 3.1.1 ชุดอุปกรณ์ทำความสะอาดอัลตราโซนิก
- 3.1.2 ตัวจับ(clamp) สำหรับยึดแผ่นฟอยล์
- 3.1.3 แผ่นฟอยล์
- 3.1.4 กล้อง
- 3.1.5 เครื่องชั่งมวลสาร
- 3.1.6 หัววัดกำลังอัลตราโซนิก
- 3.1.7 คอมพิวเตอร์
- 3.1.8 โปรแกรม ANSYS
- 3.1.9 โปรแกรม MATLAB
- 3.1.10 โปรแกรม Origin

ในงานวิจัยนี้เราใช้ถังทำความสะอาดอัลตราโซนิก มีขนาด 244 มิลลิเมตร(กว้าง) x340 มิลลิเมตร (ยาว) x220 มิลลิเมตร(ลึก) ภายในบรรจุน้ำได้ 18 ลิตร ใต้ถังมีทรานสดิวเซอร์ 8 หัว สำหรับสร้างคลื่นอัลตราโซนิก ความถี่ 28 กิโลเฮิร์ต โดยทรานสดิวเซอร์ทุกหัวปล่อยกำลังรวมกัน 400 วัตต์ รูปที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์สำหรับทดลอง โดยเราจะทำการศึกษาโดยแบ่งกระบวนการวิจัยออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ 1) ทำการทดลองการกัดกร่อนบนแผ่นฟอยล์และประมวลโดยกระบวนการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย, ตรวจสอบมวลที่สูญเสียไปจากแผ่นฟอยล์ที่ถูกกัดกร่อน และทำการตรวจวัดค่าความดันอะคูสติกโดยใช้หัววัดวัดความดัน 2) สร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ผลความดันอะคูสติก 3) เปรียบเทียบค่าการกัดกร่อนจากการทดลองจริง 4) ใช้โปรแกรมจำลองหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดเพื่อปรับปรุงกระบวนการล้าง โดยแบ่งเงื่อนไขการวิจัยเป็น 1) กำลังไฟฟ้า 2) ความถี่อัลตราโซนิก 3) ผลจากทรานสดิวเซอร์ (ชนิดวัสดุและตำแหน่งการติดตั้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ทำความสะอาดอัลตราโซนิก

3.2 การทดลองในถังทำความสะอาดอัลตราโซนิก

3.2.1 การทดลองการกัดกร่อนบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์

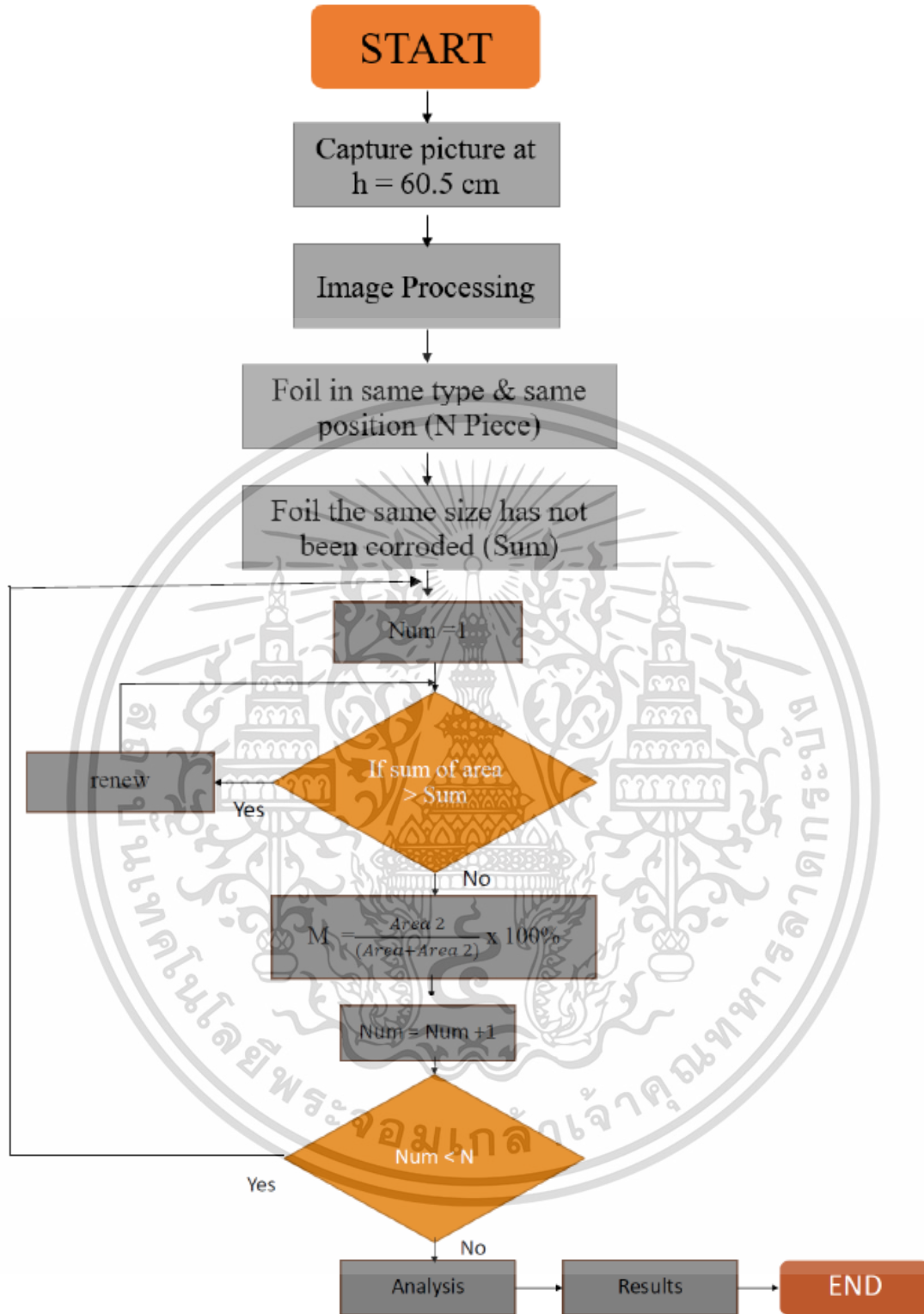
3.2.1.1 ติดตั้งอุปกรณ์ทำความสะอาดและแผ่นฟอยล์ให้ได้ตามเงื่อนไขที่ต้องการทดลอง

3.2.1.2 เปิดอุปกรณ์ทำความสะอาดเพื่อให้เกิดการกัดกร่อนจากปรากฏการณ์คาวิตีชันบนแผ่นฟอยล์เป็นเวลา 3 นาที โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งที่เงื่อนไขต่าง ๆ

3.2.1.3 นำแผ่นฟอยล์ที่ถูกกัดกร่อนมาถ่ายภาพ ด้วยความสูง 60.5 เซนติเมตร แล้วนำภาพแผ่นฟอยล์ไปประมวลผลในกระบวนการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก

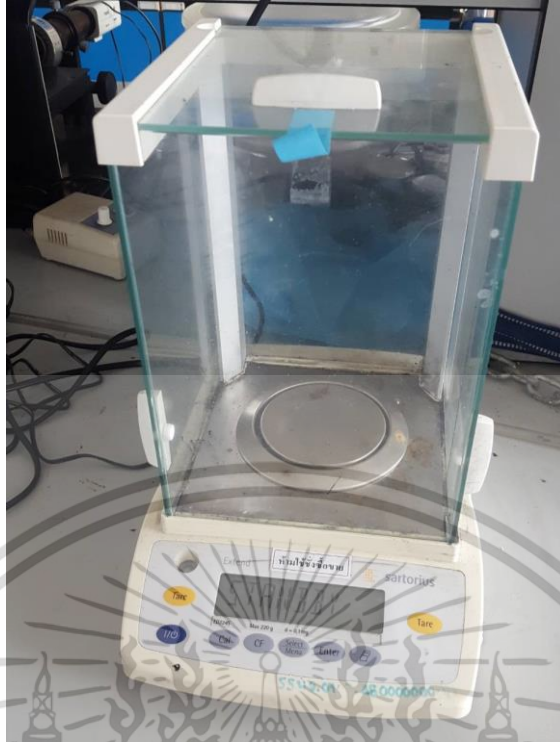
3.2.1.4 ได้ค่าพื้นที่การกัดกร่อนจากกระบวนการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย และมวลที่สูญเสียไปของแผ่นฟอยล์เพื่อนำไปศึกษาต่อไป

ในการทดลองการกัดกร่อนบนแผ่นฟอยล์นี้ เราทำการทดลองที่เงื่อนไขต่าง ๆ จาก 2 ปัจจัยคือ ตำแหน่งการวางชิ้นงาน และอุณหภูมิของสารละลาย เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของแบบจำลองและศึกษาปัจจัยทั้งสองนี้ โดยมีเงื่อนไขดังนี้ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ 5 ตำแหน่ง และที่อุณหภูมิ 27, 35, 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ไม่เกิดการกัดกร่อนต่อชิ้นงานก่อนจะปล่อยคลื่นอัลตราโซนิก ในขั้นตอนของกระบวนการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย เราได้ทำการใช้ฟังก์ชันใน MATLAB เพื่อหาพื้นที่ของแผ่นฟอยล์ที่ถูกกัดกร่อน โดยการคำนวณผ่านจำนวนพิกเซลของแผ่นฟอยล์ในรูปภาพโดยประมาณ โดยมีกระบวนการวิเคราะห์ดังแสดงในแผนผังรูปที่ 3.2 ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนี้จะนำไปเปรียบเทียบผลการจำลองต่อไป



รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนในกระบวนการกระบวนการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 เครื่องชั่งน้ำหนักสำหรับหามวลที่สูญหายไปของแผ่นพอลิ

เพื่อความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น เราจึงใช้เครื่องน้ำหนักเพื่อมาตรวจสอบผลจากการจำลองด้วย โดยรูปที่ 3.3 แสดงเครื่องชั่งมวลที่ใช้ โดยเมื่อถ่ายรูปเพื่อนำไปวิเคราะห์โดยกระบวนการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายเรียบร้อยแล้ว เราจะนำแผ่นพอลิมาตัดให้เหลือเฉพาะบริเวณที่นำไปสร้างแบบจำลอง และเมื่อชั่งเสร็จจึงนำมาคำนวณหามวลที่สูญหายไปจาก $M_{\text{loss}} = M_{\text{before}} - M_{\text{after}}$

3.2.2 การทดลองโดยหัววัดกำลังอัลตราโซนิก

3.2.2.2 ติดตั้งอุปกรณ์ทำความสะอาดปรับอุณหภูมิให้ได้ตามที่ต้องการทดลองและยึดหัววัดให้ตรงกับตำแหน่งที่ต้องการวัด

3.2.2.2 เมื่อได้เงื่อนไขตามที่ต้องการแล้ว กดเปิดหัววัดเป็นเวลา 10 วินาที แล้วกดหยุด

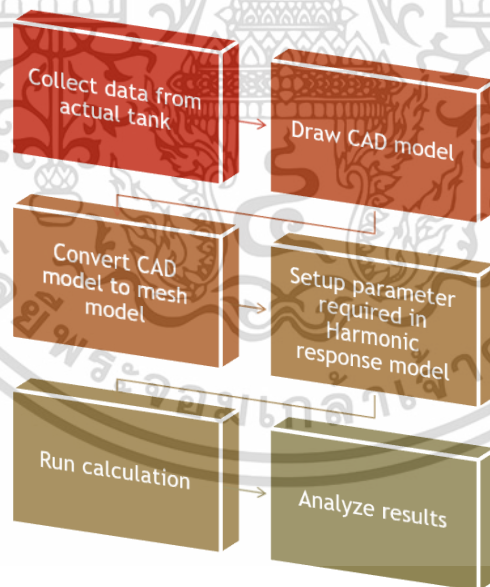
3.2.2.3 บันทึกผลที่ได้จากจอแสดงผลของหัววัด และนำไปสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองต่อไป



รูปที่ 3.4 การวัดกำลังที่เกิดขึ้นในสารละลาย

เมื่อได้ข้อมูลตัวเลขจากกระบวนการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย แล้วเพื่อประสิทธิภาพการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น ผู้วิจัยจึงใช้หัววัดวัดความดันมาวัดกำลังที่เกิดขึ้นในจุดต่าง ๆ ของสารละลายที่อุณหภูมิ 35, 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส โดยรูปที่ 3.4 แสดงอุปกรณ์และการดำเนินการในการทดลอง

3.3 สร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ผลความดันอะคูสติก



รูปที่ 3.5 แสดงแผนผังสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ผลความดันอะคูสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 วัดและคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการสร้างแบบจำลองจากถังทำความสะอาดที่ใช้ในการทดลอง

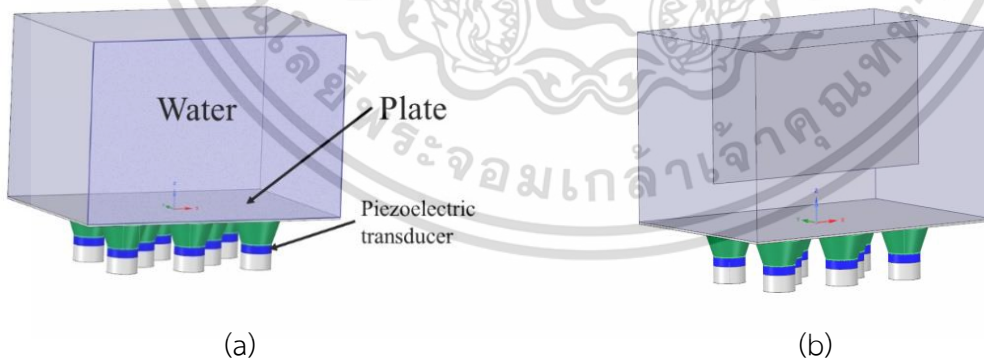
3.3.2 สร้างแบบจำลองอุปกรณ์ทำความสะอาดอัลตราโซนิก ซึ่งประกอบด้วยน้ำซึ่งใช้เป็นของเหลวสำหรับการเกิดคาวิตีชัน, ทรานสดิวเซอร์จำนวน 8 หัวอยู่ใต้แผ่นกั้นถัง ซึ่งแผ่นกั้นถัง ซึ่งใช้เป็นฐานของถังอัลตราโซนิก และแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ซึ่งจะวางตามเงื่อนไขตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.6

3.3.3 นำแบบจำลองอุปกรณ์ทำความสะอาดอัลตราโซนิกที่ได้ มาแปลงเป็นแบบจำลองตาข่าย (mesh models) โดยกำหนดให้ 1 ความยาวคลื่นสามารถบรรจุองค์ประกอบตาข่ายรูปทรงหกเหลี่ยมได้ 6 เอลิเมนต์ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.7

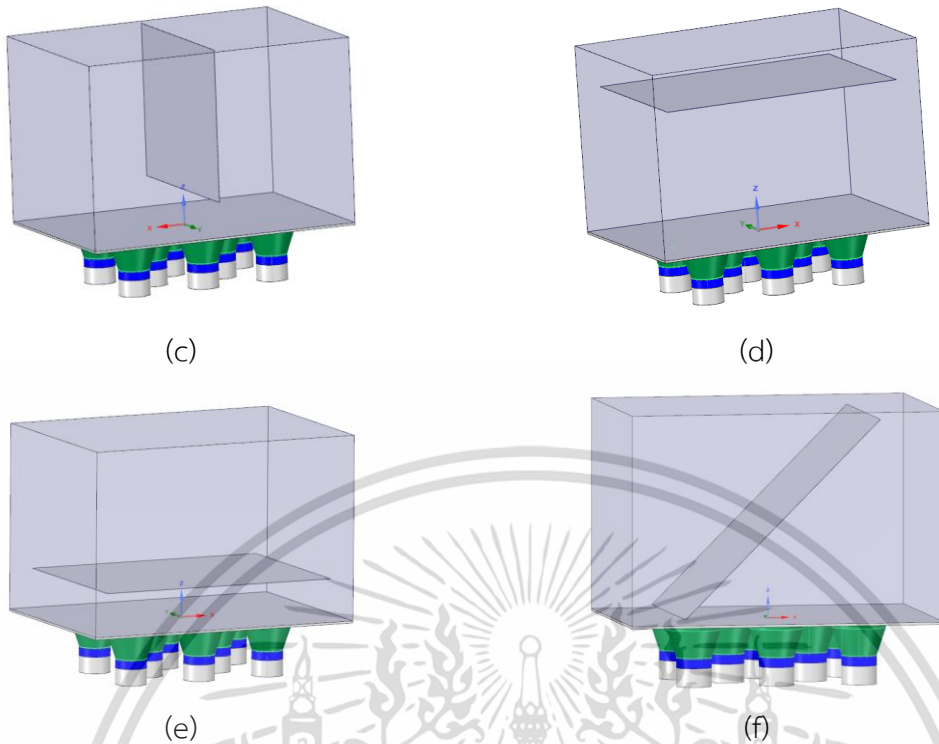
3.3.4 กำหนดค่าคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของของแข็งและของเหลว ตามคุณสมบัติจริงดังตารางที่ 1 และใส่ค่าความต่างศักย์ไปที่แผ่นเพียโซอิเล็กทริกโดยกำหนดค่าตามเงื่อนไขของกำลังในตารางที่ 2

3.3.5 วิเคราะห์เปรียบเทียบการกระจายตัวและความแรงของความดันอะคูสติกจากผลการจำลองของเงื่อนไขต่าง ๆ และหาวิธีปรับปรุงให้ดีขึ้น

จากข้อ 3.3.1 หลักของการเกิดคลื่นอัลตราโซนิก คือ เครื่องให้กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก (ultrasonic generator) จะให้กระแสไฟฟ้าไปที่ทรานสดิวเซอร์จะทำให้แผ่นสแตนเลส ซึ่งอยู่ติดกับทรานสดิวเซอร์สั่นด้วยความถี่อัลตราโซนิก 28 กิโลเฮิร์ต ซึ่งคลื่นอัลตราโซนิกที่เกิดขึ้นก็จะไปทำให้น้ำทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสของความดันและทำให้เกิดฟองคาวิตีชันขึ้น อ้างอิงจากสมการที่ 2.1 และ 2.4 บริเวณที่เกิดคาวิตีชันก็คือบริเวณที่เกิดความดันอะคูสติกสูงนั่นเอง ดังนั้นเราจึงสามารถนำค่าความดันอะคูสติกมาศึกษาปรากฏการณ์คาวิตีชันได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงแบบจำลองอัลตราโซนิกในระนาบต่าง ๆ (a) แบบจำลองจากถังทำความสะอาด ตัวอย่าง และแบบจำลองวางแผ่นฟอยล์ที่ตำแหน่ง (b) Plane1 (c) Plane2 (d) Plane3 (e) Plane4 และ (f) Plane5

ในเงื่อนไขการเปรียบเทียบผลกระทบจากอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีขั้นนี้ เราได้ทำการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองด้วยกัน 3 วิธี คือ ค่าการกักความร้อนบนแผ่นฟอยล์จากกระบวนการวิเคราะห์ด้วย ภาพถ่าย, ผลของมวลที่สูญหายไปของแผ่นฟอยล์ และค่ากำลังอัลตราโซนิกจากหัววัดจาก 3.2 โดยตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองและการจำลอง

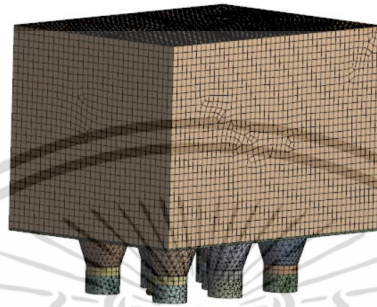
ตารางที่ 3.1 แสดงค่าคุณสมบัติของน้ำเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิต่างๆ

Temperature of water	Velocity (m/s)	Density (kg/m ³)	Dynamic viscosity (kg/m.s)
18 °C	1481	998.2	0.1002
27 °C	1501.901	995.5	0.8509
36 C°	1521.763	994.0	0.7191
45 C°	1536.427	990.2	0.5958
55 C°	1547.401	985.7	0.5036
65 C°	1553.457	980.6	0.4329

(ที่มา: www.engineeringtoolbox.com)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยรูปที่ 3.6b เป็นระนาบที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าการกักความร้อนบนแผ่นพอยล์จากกระบวนการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย กับผลของมวลที่สูญเสียไป และรูปที่ 3.6d เป็นระนาบที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัลตราโซนิกจากหัววัด โดยจะจุ่มหัววัดและยึดให้ปลายหัววัดอยู่ที่จุดกึ่งกลางของระนาบพอดี ซึ่งสาเหตุที่ใช้ตำแหน่งนี้เนื่องจากเป็นที่อยู่ใกล้ผิวน้ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระนาบอื่น ๆ และเมื่อตรวจผลจากการกักความร้อนบนแผ่นพอยล์แล้วบริเวณจุดกึ่งกลางมีความแรงจากคาวิตีชันมากที่สุด



รูปที่ 3.7 แสดงแบบจำลองตาข่าย (mesh model)

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุที่กำหนดในการจำลอง

Domain	Type	Value
Water (45 °C)	Water density	990.15 kg/m ³
	Acoustic velocity	1,533.5 m/s
	Dynamic viscosity	5.7977x10 ⁻⁴ kg/m*s
Aluminum alloy	Density	2,770 kg/m ³
	Young's modulus	7.1x10 ¹⁰ Pa
	Poisson's ratio	0.33
	Bulk modulus	6.9608x10 ¹⁰ Pa
Stainless steel	Shear modulus	2.6692x10 ¹¹ Pa
	Density	7,750 kg/m ³
	Young's modulus	1.93x10 ¹¹ Pa
	Poisson's ratio	0.31
Piezoelectric (PZT4)	Bulk modulus	1.693 x10 ¹⁰ Pa
	Shear modulus	7.3664x10 ¹¹ Pa
	Density	7,500 kg/m ³
	Permittivity constant (ϵ_0)	8.854e-12 F/m
	Stiffness matrix [C ^f]	C ₁₁ =C ₂₂ =1.39x10 ¹¹ , C ₂₁ =7.78x10 ¹⁰ , C ₃₁ =C ₃₂ =7.43x10 ¹⁰ , C ₄₄ =3.06x10 ¹⁰ ,

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตเห็นาไปเซประเษนดำนการค้ำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		$C_{55}=C_{66}=2.56 \times 10^{10}$ Pa
	Piezoelectric stress [e]	$e_{31} = 5.2$ c/m ² , $e_{33} = 15.1$ c/m ² , $e_{15} = 12.7$
	Relative permittivity(ϵ_r)	$K_{11} = 1,475$, $K_{33} = 1,300$

(ที่มา: http://www.efunda.com/materials/piezo/material_data/matdata_output.cfm?Material_ID=PZT-4)

3.4 การวิเคราะห์เปรียบเทียบการกักต่อนจากการทดลองจริงกับผลการจำลอง

3.4.1 นำผลพื้นที่การกักต่อนของแผ่นอลูมิเนียมพอยล์ที่ได้จากกระบวนการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับรูปแบบการกระจายตัวของความดันอะคูสติกบนแผ่นพอยล์จากแบบจำลอง

3.4.2 นำผลค่าพื้นที่การกักต่อนของแผ่นอลูมิเนียมพอยล์ที่ได้จากกระบวนการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย, ผลของมวลที่สูญเสียไปของแผ่นพอยล์ และผลจากค่ากำลังอัลตราโซนิกจากหัววัดกำลังอัลตราโซนิก มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าความดันอะคูสติกมากที่สุดทางลบบนแผ่นพอยล์จากแบบจำลอง

3.4.3 สร้างแบบจำลองความดันอะคูสติกของแต่ละเงื่อนไขขึ้นมาใหม่ โดยตั้งค่าทุกอย่างในโปรแกรมจำลองเหมือนกับแบบจำลองที่มีรูปแบบการกระจายตัวเหมือนกับการทดลองจริงที่เปรียบเทียบแล้ว นอกจากนี้เปลี่ยนจำนวนเอลิเมนต์ในแบบจำลองโครงสร้างตาข่าย และนำผลการจำลองมาวิเคราะห์โครงสร้างตาข่ายเพื่อหาแบบจำลองโครงสร้างตาข่ายที่เหมาะสมที่สุด

จากที่กล่าวไปแล้วในข้อ 3.3 เราจึงทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างร่องรอยการกักต่อนบนแผ่นพอยล์และรูปแบบการกระจายตัวของความดันอะคูสติกบนแผ่นพอยล์ในแบบจำลอง หากรูปแบบการกระจายตัวและค่าความแรงของทั้งสองมีความสอดคล้องกันจะแสดงถึงความถูกต้องของแบบจำลอง และสามารถนำไปวิเคราะห์หาเงื่อนไขในปัจจัยต่าง ๆ ได้ แต่หากผลที่ได้ยังไม่ถูกต้องเราจะใช้วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างตาข่าย (Mesh Analysis) โดยทำการเพิ่มความละเอียดของเอลิเมนต์ โดยจาก [26] ซึ่งเป็นเอกสารแนะนำการจำลองวิเคราะห์ผลจากคลื่นอะคูสติกด้วยโปรแกรม ANSYS โดยในเงื่อนไขของการสร้างแบบจำลองโครงสร้างตาข่ายในโดเมนอะคูสติก หากใช้เอลิเมนต์ประเภททรงสี่หน้า (Tetrahedron mesh) ในหนึ่งความยาวคลื่นต้องบรรจุด้วยเอลิเมนต์อย่างน้อยจำนวน 12 เอลิเมนต์ หากใช้เอลิเมนต์ประเภททรงหกหน้า (Hexagonal mesh) ในหนึ่งความยาวคลื่นต้องบรรจุด้วยเอลิเมนต์อย่างน้อยจำนวน 6 เอลิเมนต์ โดยในงานวิจัยของเราใช้เอลิเมนต์ประเภททรงหกหน้าในโดเมนอะคูสติก (โดเมนน้ำ) ดังนั้นเราจึงได้ทำการวิเคราะห์ผลการจำลองความดันอะคูสติกเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองจริง เพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลองเรา โดยเปลี่ยนขนาดเอลิเมนต์ให้มีจำนวน 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 และ 13 เอลิเมนต์ในหนึ่งความยาวคลื่น

3.5 สร้างแบบจำลองเพื่อปรับปรุงกระบวนการล้าง

จาก 3.4 ทำให้เรามั่นใจว่าแบบจำลองที่ใช้มีความน่าเชื่อถือ และได้ผลจากเงื่อนไขการเปลี่ยนตำแหน่งการวางชิ้นงาน จากนั้นเราสร้างแบบจำลองสำหรับปรับปรุงกระบวนการล้าง จาก 5 เงื่อนไขต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น โดยใช้พื้นฐานจากแบบจำลองใน 3.3 ในการสร้างแบบจำลองเหล่านี้ โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

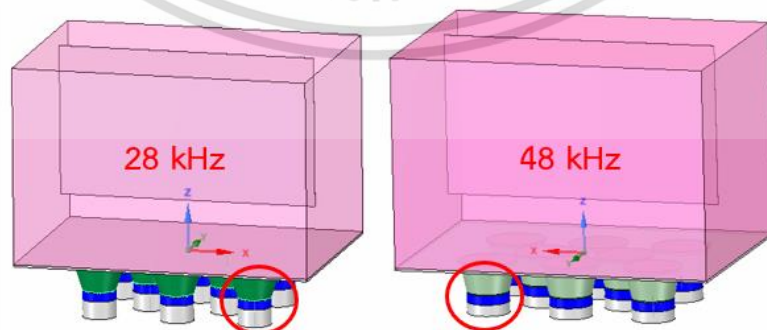
3.5.1 แบบจำลองเปรียบเทียบเงื่อนไขการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า จากงานวิจัย[6] ได้ทำการจำลองในการล้าจากถึงจริง และพบว่าความแรงในการล้าจะเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้า ดังนั้น ผู้วิจัยจึงทำการจำลองเพื่อตรวจสอบและขยายผลจากเงื่อนไข โดยใช้แบบจำลองจาก 3.3 ใน Plane1 โดยทำการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ทรานสดิวเซอร์ ซึ่งโปรแกรมจะคำนวณจากค่าความต่างศักย์(voltage) ที่ให้ไป แต่ความเป็นจริงความต่างศักย์นั้นจะคงที่เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้า

ดังนั้นจึงใช้สูตรคำนวณพื้นฐาน $P = IV$ มาคำนวณและเทียบบัญญัติไตรยางค์เพื่อหาค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้า ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความต่างศักย์ที่กำลังต่าง ๆ

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความต่างศักย์เมื่อเปลี่ยนเงื่อนไขกำลัง

Power	Voltage
400 Watt	220 V
350 Watt	192.5 V
300 Watt	165 V

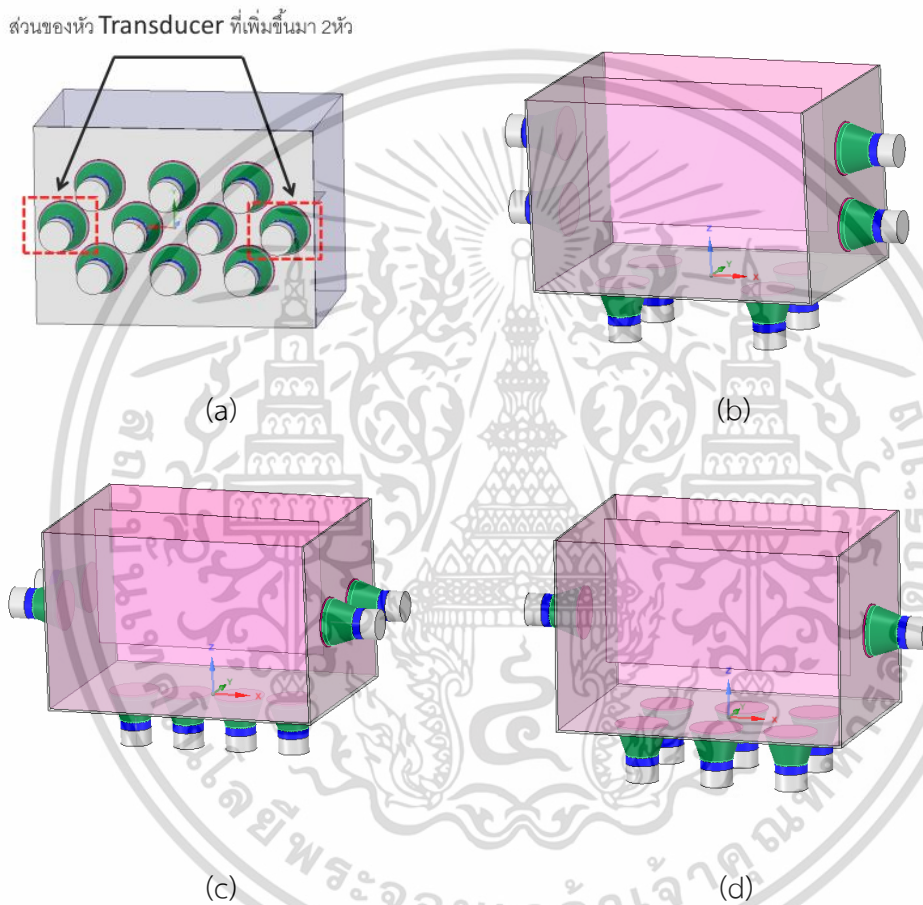
3.5.2 แบบจำลองเปรียบเทียบความถี่ จากงานวิจัย [16] ได้วิจัยผลกระทบจากการใช้ถึงทำความสะอาดอัลตราโซนิคที่ความถี่ช่วงกิโลเฮิร์ตกับเมกะเฮิร์ต พบว่าให้ผลการล้าที่ต่างกัน ดังนั้นเราจึงทำการจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลจากความถี่ในช่วงกิโลเฮิร์ตได้แก่ 28 กิโลเฮิร์ต , 48 กิโลเฮิร์ต และ 68 กิโลเฮิร์ต ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้จริงในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยจะใช้พื้นฐานแบบจำลองจาก 3.3 ที่ระนาบ Plane1 ในการเปลี่ยนความถี่นั้น รูปแบบและขนาดของทรานสดิวเซอร์จะไม่เหมือนกันโดยรูปที่ 3.8 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองของถึงความถี่ 28 กิโลเฮิร์ต กับ 48 กิโลเฮิร์ต เมื่อเพิ่มความถี่จำเป็นต้องเพิ่มความละเอียดของเมชเพื่อรองรับความถี่ด้วย โดยมีเงื่อนไขคือ ในหนึ่งความยาวคลื่นต้องบรรจุเมชไว้จำนวนอย่างน้อย 6 เอลิเมนต์ โดยเรากำหนดหาขนาดของเอลิเมนต์ โดยแบบจำลองทุกความถี่จะมีจำนวนเอลิเมนต์เท่ากันจากการคำนวณของความถี่ 68 กิโลเฮิร์ต



รูปที่ 3.8 แบบจำลองจากถึง 28 กิโลเฮิร์ต และ 48 กิโลเฮิร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 แบบจำลองเปรียบเทียบการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ จากการทดลองใน 3.2 เราได้พบว่าเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งการวางแผ่นพอลิเมอร์จะทำให้แต่ละตำแหน่งมีรูปแบบการกระจายตัวของความดันอะคูสติกแตกต่างกัน ซึ่งมาจากการวางที่ตรงกับรูปแบบการวางทรานสดิวเซอร์ที่ต่างกัน ดังนั้นเราจึงศึกษาผลการกระจายตัวของความดันอะคูสติกเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งการวางทรานสดิวเซอร์ โดยเบื้องต้นเราทำการเพิ่มทรานสดิวเซอร์ไป 2 หัวเพื่อง่ายต่อการจำลอง และเพื่อปรับปรุงการกระจายตัวของความดันอะคูสติกเราจึงทำการเปลี่ยนการติดตั้งทรานสดิวเซอร์แบบหลายทิศทาง โดยรูปที่ 3.9a ถึง 3.9d แสดงแบบจำลองการเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งทรานสดิวเซอร์



รูปที่ 3.9 แบบจำลองการเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ (a) เมื่อเพิ่มทรานสดิวเซอร์ 2 หัว, ย้ายตำแหน่งทรานสดิวเซอร์ไปด้านข้าง (b) Modify1, (c) Modify2 และ (d) Modify3

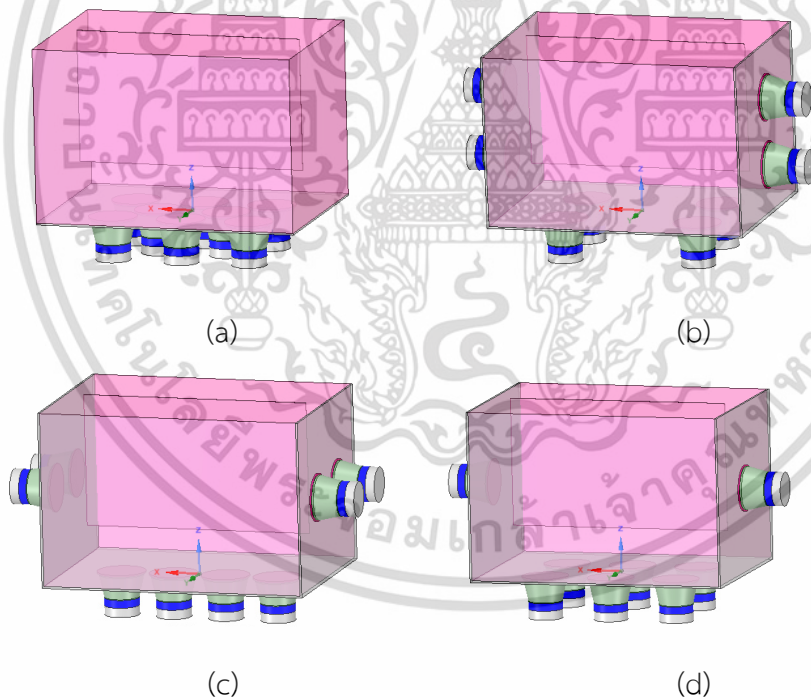
จากงานวิจัย [20] ได้ทำการจำลองเปรียบเทียบผลตอบสนองต่อความดันระหว่างการใช้ทรานสดิวเซอร์จากวัสดุ PZT4 กับ PZT8 เราจึงทำการจำลองผลตอบสนองต่อการกระจายตัวและความแรงของความดันอะคูสติกในถังทำความสะอาด โดยค่าผลตอบสนองทางกลของวัสดุ PZT4 แสดงในตารางที่ 1 และของ PZT8 แสดงในตารางที่ 3.4 ด้านล่าง โดยจะใช้แบบจำลองจากรูปที่ 3.6b, 3.9b, 3.9c และ 3.9d และเปลี่ยนเฉพาะค่าผลตอบสนองทางกลต่อไฟฟ้าจากตารางที่ 4 เพื่อเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุ PZT8

Piezoelectric (PZT8)	Density	7,600 kg/m ³
	Permittivity Constant (ϵ_0)	8.854x10 ⁻¹² F/m
	Stiffness (c ^E)	$C_{11}=1.47 \times 10^{11}=C_{22}$, $C_{21}=8.11 \times 10^{10}$, $C_{31}=8.10 \times 10^{10}=C_{32}$, $C_{44}=3.29 \times 10^{10}$, $C_{55}=3.13 \times 10^{10}=C_{66}$ Pa
	Piezoelectric stress (e)	$e_{31} = -3.9$ c/m ² , $e_{33} = 13.9$ c/m ² , $e_{15} = 10.3$ c/m ²
	Relative Permittivity (ϵ_r)	$K_{11} = 1,290$, $K_{33} = 1,000$

จากการเปรียบเทียบผลการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ พบว่าเมื่อติดตั้งหลายทิศทางสามารถช่วยให้การกระจายตัวและความแรงของความดันอะคูสติกดีขึ้น และจาก 3.4.2 เมื่อเปลี่ยนความถี่ก็ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเช่นกัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการจำลองเพื่อหารูปแบบการติดตั้งที่ให้ผลการกระจายตัวและความแรงของความดันอะคูสติกที่เหมาะสมของแต่ละความถี่ ซึ่งเราทำการจำลองในความถี่เดิม 28 กิโลเฮิร์ต โดยใช้แบบจำลองเดียวกับการเปลี่ยนตำแหน่งในรูปที่ 3.6b, 3.9b, 3.9c, 3.9d และ 40 กิโลเฮิร์ต จะใช้แบบจำลองในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แบบจำลองการเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต (a) จากแบบจำลองถึงอัลตราโซนิกตัวอย่าง (b) Modify1F40, (c) Modify2F40 และ (d) Modify3F40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปราย

เราได้ทำการทดลองการกักกรองบนแผ่นอลูมิเนียมพอยล์และสร้างแบบจำลองการกักกรองเพื่อใช้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการเกิดปฏิกิริยาควาเวชัน โดยผลการเปรียบเทียบของการทดลองจริงกับการจำลองและใช้การจำลองในการปรับปรุงกระบวนการล้าง โดยแบ่งเป็น

- 4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างตาข่าย
- 4.2 เปรียบเทียบจากตำแหน่งของการวางแผ่นอลูมิเนียมพอยล์
- 4.3 เปรียบเทียบจากอุณหภูมิของน้ำ
- 4.4 ศึกษาผลจากการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไป
- 4.5 ศึกษาผลจากการเปลี่ยนความถี่อัลตราโซนิก
- 4.6 ศึกษาผลจากการเปลี่ยนแปลงการติดตั้งหัวทรานสดิวเซอร์

4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างตาข่าย

การจำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS โครงสร้างตาข่ายที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของผลการจำลอง ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์หาโครงสร้างตาข่ายทุกครั้ง โดยงานวิจัยของเราเป็นการจำลองผลจาก 3 โดเมน คือ เพียโซอิเล็กทริก ผงงัง และน้ำ โดยโดเมนของน้ำเป็นโดเมนที่ใช้สมการคลื่นเสียงคำนวณ ซึ่งมีข้อกำหนดสำหรับโครงสร้างตาข่าย คือ หากใช้เอลิเมนต์ประเภททรงสี่หน้า(Tetrahedron mesh) ในหนึ่งความยาวคลื่นต้องบรรจุด้วยเอลิเมนต์อย่างน้อยจำนวน 12 เอลิเมนต์ หากใช้เอลิเมนต์ประเภททรงหกหน้า(Hexagonal mesh) ในหนึ่งความยาวคลื่นต้องบรรจุด้วยเอลิเมนต์อย่างน้อยจำนวน 6 เอลิเมนต์ โดยในงานวิจัยนี้เอลิเมนต์ประเภททรงหกหน้าในโดเมนน้ำจากการคำนวณหาจำนวนเอลิเมนต์ 6 เอลิเมนต์ต่อหนึ่งความยาวคลื่น พบว่าจะได้ขนาดของเอลิเมนต์เท่ากับ 0.009128 เมตร ซึ่งเรานำมาใช้กับโดเมนอื่น ๆ ในทุกแบบจำลองโครงสร้างตาข่าย เพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะขนาดเอลิเมนต์ของโดเมนน้ำเพียงอย่างเดียว โดยจากการคำนวณขนาดของเอลิเมนต์ต่อความยาวคลื่นแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดของเอลิเมนต์จากการคำนวณจากเกณฑ์ความยาวคลื่น

Element/wavelength	Element size(m)
3	0.018256
4	0.013692
5	0.010954

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6	0.009128
7	0.007824

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ขนาดของเอลิเมนต์จากการคำนวณจากเกณฑ์ความยาวคลื่น

Element/wavelength	Element size(m)
8	0.006846
9	0.006085
10	0.005477
11	0.004979
12	0.004564
13	0.004213

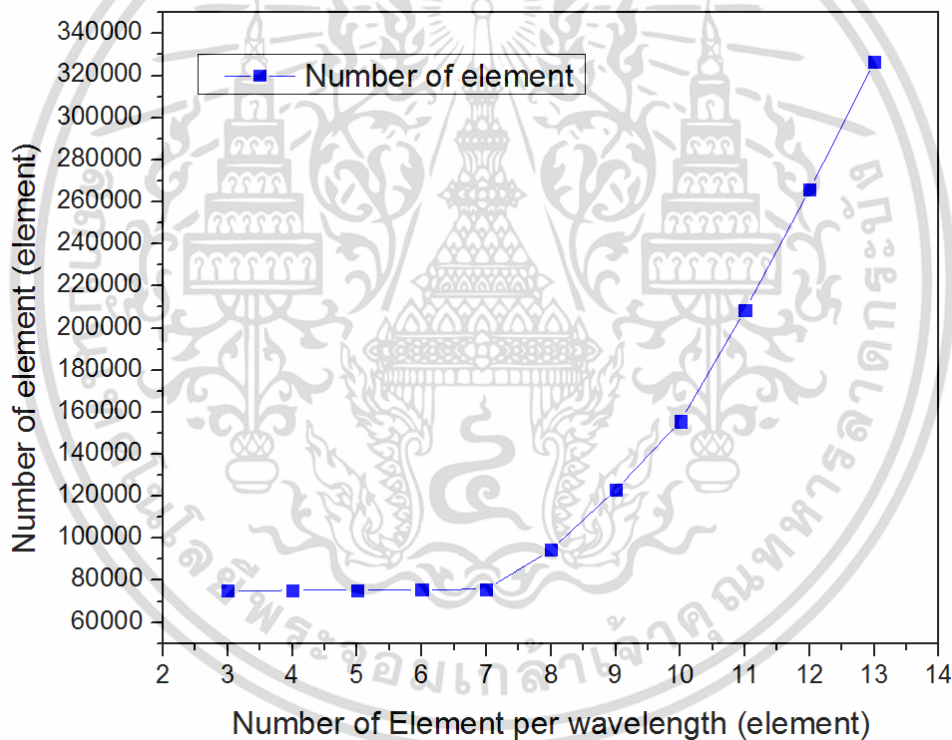
ตารางที่ 4.2 จำนวนเอลิเมนต์และจุดเชื่อมต่อของแบบจำลองโครงสร้างตาข่ายตามเกณฑ์ความยาวคลื่น

Element/wavelength	Number of element	Number of node
3	75,187	264,252
4	75,267	264,768
5	75,347	264,939
6	75,655	265,526
7	75,732	265,755
8	94,460	327,182
9	123,131	426,646
10	155,597	562,651
11	208,500	739,491
12	265,850	953,776
13	326,544	1,173,044

หลังจากได้ขนาดเอลิเมนต์ในโดเมนน้ำของแต่ละแบบจำลองแล้ว เราจึงนำไปสร้างแบบจำลองโครงสร้างตาข่าย และผลของจำนวนเอลิเมนต์และจุดเชื่อมต่อดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.1 พบว่าจำนวนเอลิเมนต์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

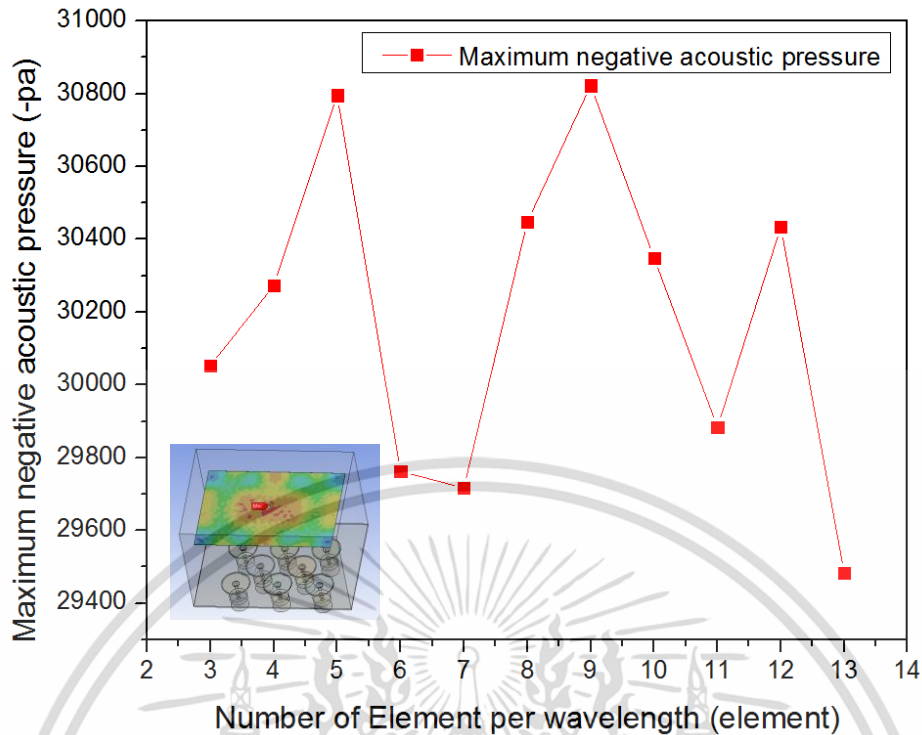
เมนต์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อกำหนดให้จำนวนเอลิเมนต์ในหนึ่งความยาวคลื่นเท่ากับ 3 – 6 เอลิเมนต์ โดยเพิ่มจากจำนวน 75,187 เอลิเมนต์ไปจนถึง 94,460 เอลิเมนต์ และเมื่อกำหนดจำนวนเอลิเมนต์ในหนึ่งความยาวคลื่นเท่ากับ 7 – 13 เอลิเมนต์ จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดในแบบจำลองมีจำนวนสูงชันมาก โดยที่ 7 เอลิเมนต์ มีจำนวนทั้งหมด 123,131 เอลิเมนต์ และเมื่อเพิ่มไปที่ 13 เอลิเมนต์ต่อความยาวคลื่น มีจำนวนเอลิเมนต์ถึง 326,544 เอลิเมนต์ โดยการเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์นี้จะส่งผลต่อเวลาในการคำนวณที่มากขึ้น แต่จะให้ผลเฉลยของแบบจำลองที่ถูกต้องขึ้นด้วย

เราจึงใช้การวิเคราะห์โครงสร้างตาข่ายเพื่อหาแบบจำลองที่ให้ผลเฉลยที่ถูกต้องและเหมาะสมกับทรัพยากรที่มีอยู่ โดยผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 จำนวนเอลิเมนต์เมื่อเพิ่มเกณฑ์เอลิเมนต์เทียบกับความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



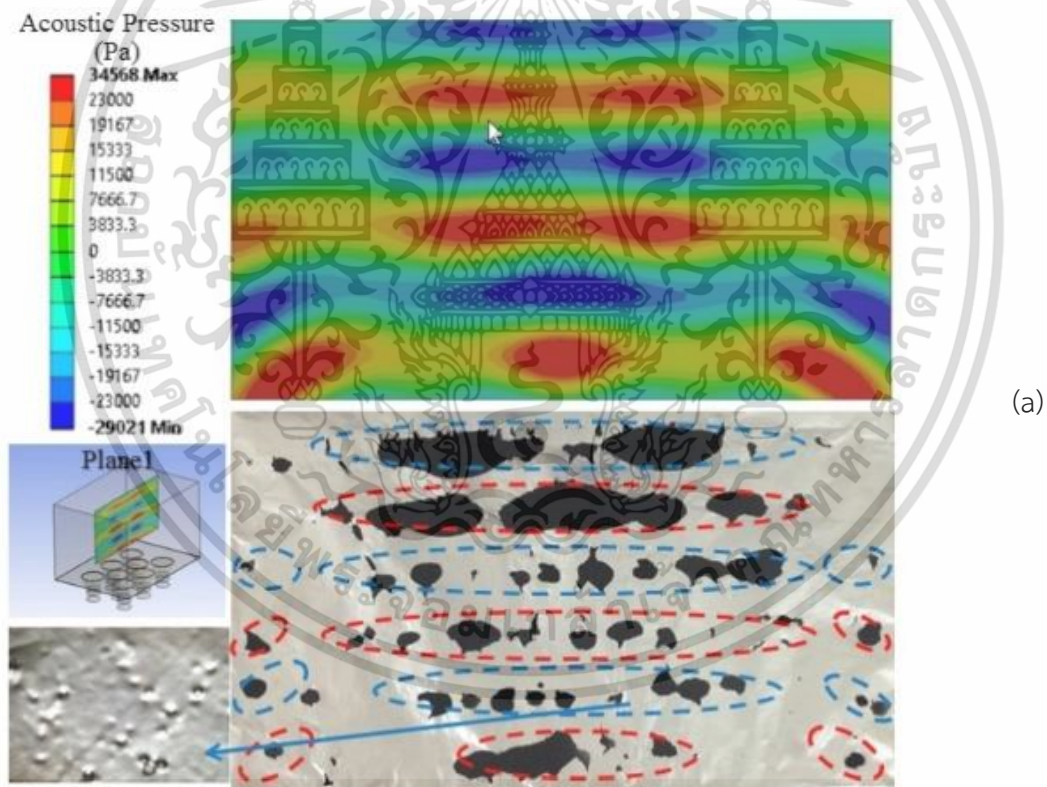
รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างตาข่าย

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบผลระหว่างการเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์ต่อหนึ่งความยาวคลื่น กับกับความดันอะคูสติกที่บริเวณกึ่งกลางถัง พบว่าหลังจากเพิ่มปริมาณเอลิเมนต์รูปแบบการกระจายตัวของความดันอะคูสติกไม่เปลี่ยนแปลงและในทุกแบบจำลองสอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์การกระจายตัวของการกักร้อนบนแผ่นพอยล์ แต่สิ่งที่เปลี่ยนคือค่าความแรงของความดันอะคูสติก ซึ่งผลมีค่าใกล้เคียงกันทุกแบบจำลอง โดยเมื่อคำนวณค่าเฉลี่ยของทุกแบบจำลองแล้วมีค่าความดันอะคูสติกเท่ากับ 30,184 پاسคาล และมีความคาดเคลื่อนสูงสุดที่ 2.32 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่รับได้ ดังนั้นแบบจำลองโครงสร้างตาข่ายทั้งหมดสามารถนำมาวิเคราะห์ผลได้ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบในเรื่องเวลาและทรัพยากรที่เรามี พบว่าแบบจำลองโครงสร้างตาข่ายที่ใช้เกณฑ์จำนวนเอลิเมนต์ต่อความยาวคลื่นเท่ากับ 3 – 6 เอลิเมนต์ใช้เวลาในการคำนวณไม่เกิน 30 นาที และแบบจำลองที่ใช้เกณฑ์ 7 – 13 เอลิเมนต์ใช้เวลาอย่างน้อย 120 นาที จากการค้นคว้าจาก [26] และการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างตาข่ายเราจึงเลือกแบบจำลองโครงสร้างตาข่ายที่ใช้เกณฑ์จำนวนเอลิเมนต์ต่อความยาวคลื่นเท่ากับ 6 เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองความดันอะคูสติกต่อไป

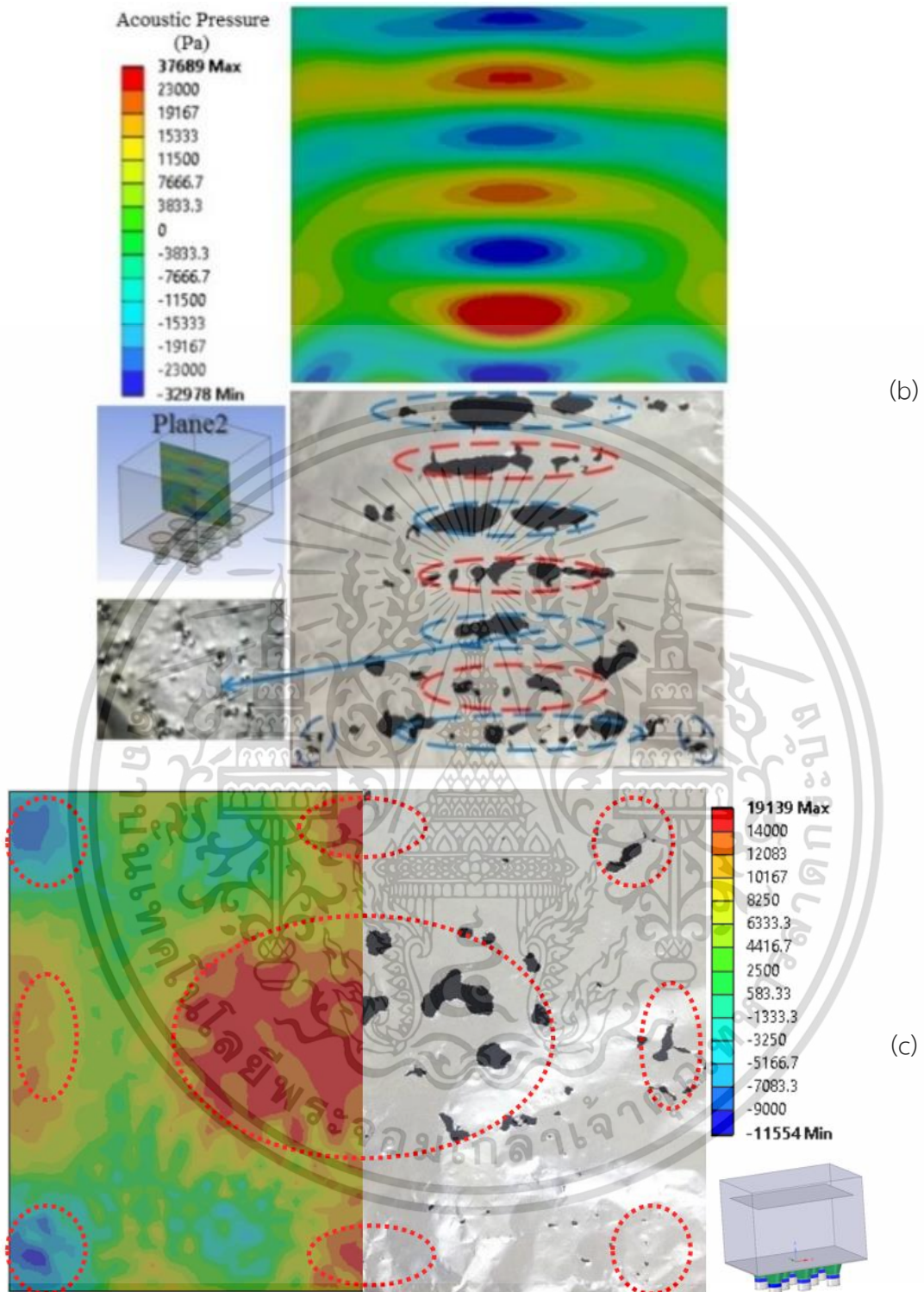
4.2 ผลการเปรียบเทียบพื้นที่การกักถ่วงบนแผ่นอลูมิเนียมพอยล์กับแบบจำลอง

ในการทดลองจริงเราได้ใช้วิธีการทดสอบการกักถ่วงบนแผ่นอลูมิเนียมพอยล์เพื่อทราบพฤติกรรมของการเกิดควาวิตชัน โดยการเปลี่ยนตำแหน่งของแผ่นอลูมิเนียมพอยล์ แล้วนำเข้ากระบวนการกระบวนการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย เพื่อหาเปอร์เซ็นต์พื้นที่การกักถ่วง และทำการจำลองรูปแบบการเกิดความดันอะคูสติกที่ระนาบเดียวกันกับจากการทดลอง เพื่อดูพฤติกรรมของการเกิดควาวิตชันและเพื่อนำแบบจำลองไปใช้ประโยชน์ต่อไป

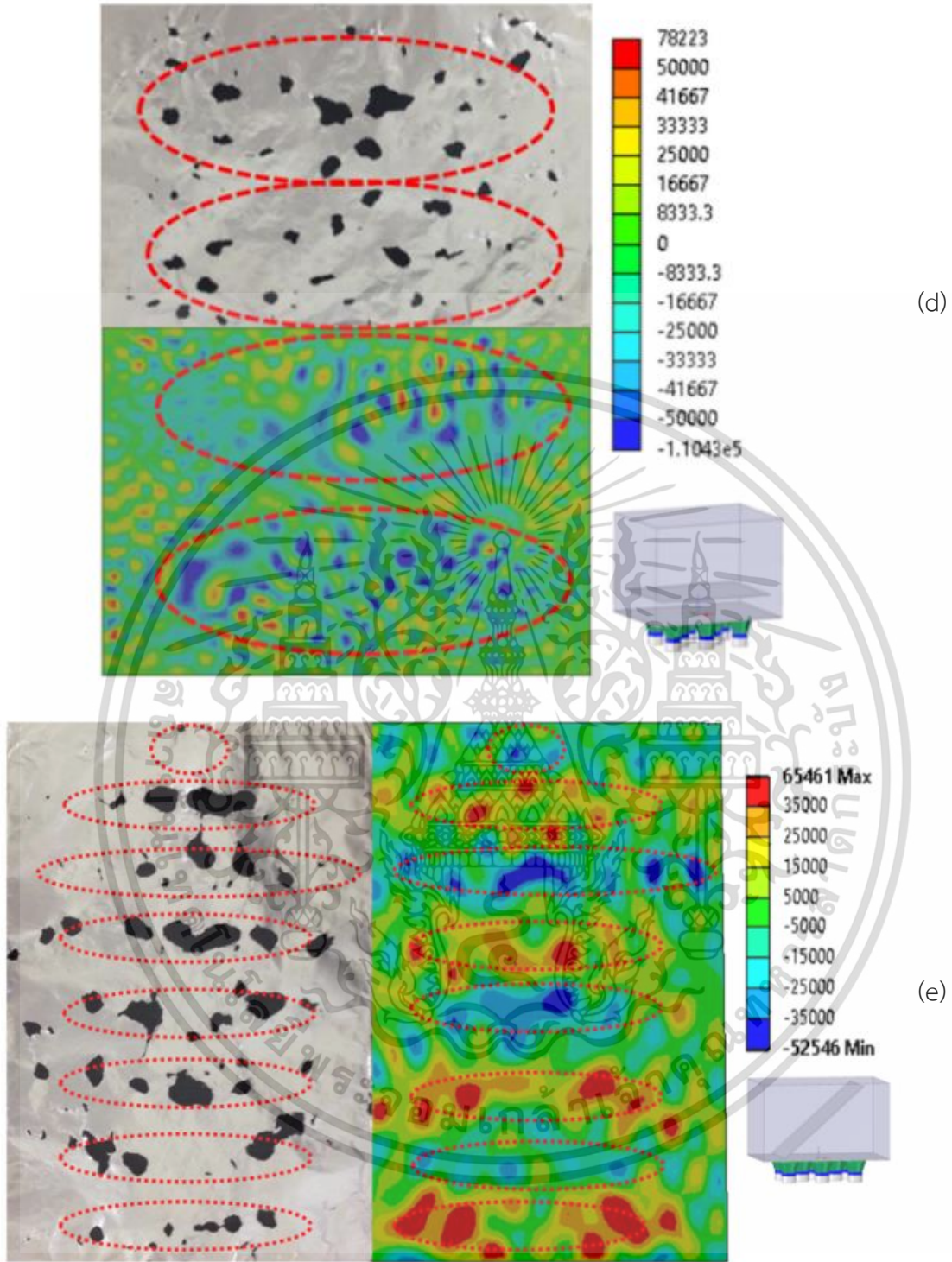
เราได้ตรวจสอบผลการจำลองการกระจายตัวของความดันอะคูสติกโดยเทียบกับการทดลองการกักถ่วงบนแผ่นพอยล์ รูปที่ 4.3a ถึง 4.3e แสดงผลการเปรียบเทียบที่ Plane1, Plane2, Plane3, Plane4 และ Plane5 ตามลำดับ ในแต่ละระนาบมีรูปแบบการกระจายตัว, จำนวนชั้น และความแรงของความดันอะคูสติก จากผลการจำลองสอดคล้องกับผลการกักถ่วงบนแผ่นพอยล์ จะเห็นได้ว่าผลการจำลองและผลการทดลองมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ด้วยเหตุนี้ทำให้เรามั่นใจว่าผลการจำลองของเรามีความน่าเชื่อถือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



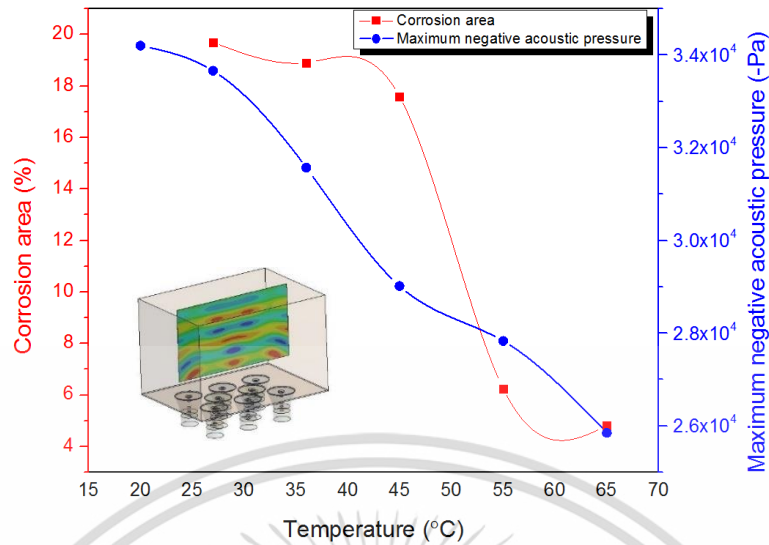
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริงและผลการจำลองการกักความร้อนที่ตำแหน่ง (a) Plane1, (b) Pane2, (c) Plane3, (d) Plane4 และ (e) Plane5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3a จนถึง 4.3e หากพิจารณาจากความแรงของความดันอะคูสติก จะเห็นได้ว่าที่ Plane4 จะให้ค่าความดันอะคูสติกทางบวกและทางลบสูงที่สุดและในทางกลับกันที่ Plane3 จะต่ำที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบทุกระนาบพบว่า แต่ละระนาบมีรูปแบบการกระจายตัวแตกต่างกันและบริเวณจุดกึ่งกลางของทุกระนาบมีความแรงของความดันอะคูสติกมากที่สุด ซึ่งนี่เป็นคำตอบของปัญหาที่เกิดขึ้น ชิ้นงานเมื่อล้างแล้วเกิดการแตกหักเนื่องมาจาก ชิ้นงานถูกวางในบริเวณที่ได้รับแรงระเบิดจากคาวีเตชันที่มากเกินไป ชิ้นงานที่ไม่สะอาดเนื่องจากรับแรงระเบิดน้อยเกินไป และชิ้นงานที่สะอาดได้รับแรงระเบิดที่พอดี ซึ่งความแรงจากการระเบิดของฟองคาวีเตชันมาจากแอมพลิจูดความดันอะคูสติกที่ตำแหน่งต่างๆ ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงวิเคราะห์สาเหตุของการกระจายตัวที่ไม่เท่าเทียมกันนี้ และพบสาเหตุคือแผ่นฟอยล์แต่ละระนาบถูกกัดกร่อนจากคาวีเตชันที่มาจากแหล่งกำเนิดทรานสดิวเซอร์ที่จัดวางแตกต่างกัน ปัญหานี้จึงได้รับการตรวจสอบต่อไปใน 4.6

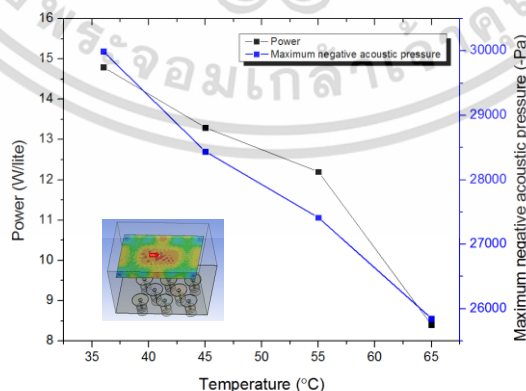
4.3 ผลการทดลองเปรียบเทียบผลการกัดกร่อนเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำ

เพื่อหาผลกระทบของอุณหภูมิต่อกระบวนการล้าง เราได้ทำการทดลองและจำลองเพื่อวิเคราะห์จากปัจจัยนี้ จากถึงทำความสะอาดอัลตราโซนิก โดยเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำจาก 20, 27, 36, 45, 55, และ 65 องศาเซลเซียส ใช้กำลังไฟฟ้า 400 วัตต์ ความถี่อัลตราโซนิก 28 กิโลเฮิร์ต และได้ใช้กระบวนการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย คำนวณหาเปอร์เซ็นต์พื้นที่การกัดกร่อน, ใช้เครื่องวัดน้ำหนักเพื่อหามวลที่สูญเสียบนแผ่นฟอยล์, ใช้หัววัดความดันอะคูสติกวัดกำลังอัลตราโซนิก และใช้โปรแกรมจำลองทางวิศวกรรม ANSYS จำลองหาการกระจายตัวของความดันอะคูสติกและได้ค่าความดันเสียงสูงสุดทางลบ(maximum negative acoustic pressure) เมื่อได้ผลจากการทดลองจริงทั้ง 3 วิธี จะนำมาเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองเพื่อเพิ่มความมั่นใจในแบบจำลองและได้วิเคราะห์ถึงผลกระทบที่ไปในแนวทางเดียวกันหรือไม่ โดยการวิเคราะห์จากกระบวนการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย เราจะใช้ผลการกัดกร่อนและผลการจำลองจาก Plane1 โดยผลการเปรียบเทียบจะแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าการกัดกร่อนจากการทดลองจริงและค่าความดันอะคูสติกทางลบสูงสุดจากการจำลอง

จากรูปที่ 4.4 เส้นกราฟสีแดงแสดงผลการกัดกร่อนเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำ และเส้นกราฟสีน้ำเงินแสดงค่าความดันอะคูสติกทางลบสูงสุดเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำ พบว่าเมื่อเราเพิ่มอุณหภูมิของตัวกลางจะทำให้พื้นที่การกัดกร่อนและค่าความดันอะคูสติกลดน้อยลง ซึ่งเมื่อย้อนกลับไปดูค่าคุณสมบัติของน้ำเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจากตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าค่า ความเร็วเสียงในตัวกลางเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของตัวกลาง ค่าความหนืดในตัวกลางลดลงตามอุณหภูมิ ทางผู้วิจัยจึงได้ค้นคว้างานวิจัยอื่นๆ [13] และพบว่าตัวแปรสำคัญที่ทำให้การเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นลดลงคือ ค่าความหนืด และเมื่อสังเกตจากกราฟ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 45 องศาเซลเซียสเป็น 55 องศาเซลเซียสมีการกัดกร่อนน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ และจากผลการจำลองเมื่ออุณหภูมิของตัวกลางต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ทำให้ค่าการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น

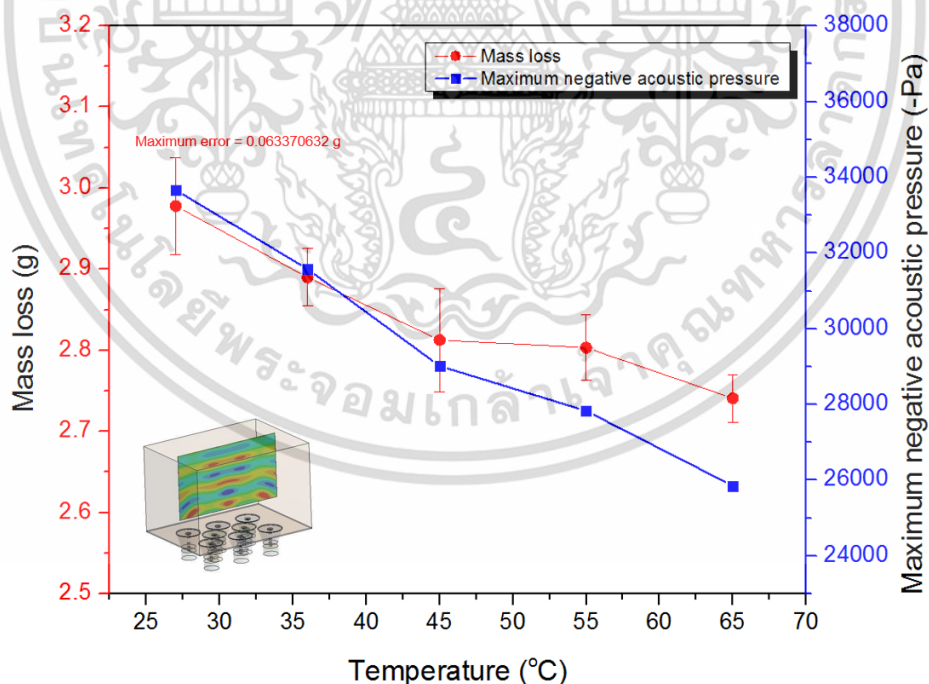


รูปที่ 4.5 แผนภูมิเปรียบเทียบค่ากำลังต่อปริมาตรในหน่วยวัตต์ต่อลิตรและค่าความดันอะคูสติกทางลบสูงสุดจากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของการจำลองมากขึ้นเราได้ใช้ หัววัดเพียโซอิเล็กทริกในการตรวจวัดความดันอะคูสติกในถังทำความสะอาดในตำแหน่งจุดกึ่งกลางถึงทำความสะอาดที่ความสูงจากกันถึง 17.5 เซนติเมตร ที่ 4 อุณหภูมิคือ 35, 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียสเพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.5 พบว่ามีความสอดคล้องกันกับการทดลองก่อนหน้านี้คือ ยิ่งอุณหภูมิของตัวกลางสารละลาย ยิ่งน้อยยิ่งทำให้ความแรงของความดันอะคูสติกหรือการกักกร่อนมีค่ามากขึ้น

จากการวิเคราะห์ผลด้วยกระบวนการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย ซึ่งเป็นการคำนวณค่าจากพื้นที่ที่ถูกกัดกร่อนไป ในทำนองเดียวกันการวิเคราะห์ผลด้วยการชั่งน้ำหนัก ควรจะให้ผลที่สอดคล้องกันกับกระบวนการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย และเป็นวิธีการตรวจที่ง่ายและแม่นยำ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการทดลองผลของมวลที่สูญเสียไปของแผ่นฟอยล์ โดยจะใช้แผ่นฟอยล์ขึ้นเดียวกับกระบวนการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย มาชั่งน้ำหนัก และเปรียบเทียบกับผลการจำลองจาก Plane1 เช่นเดียวกัน โดยจะทำการตรวจสอบผลที่อุณหภูมิ 27, 36, 45, 55, และ 65 องศาเซลเซียส โดยผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลจากการทดลองวิธีอื่น ๆ คือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายจะให้ความเข้มของควิเทชันลดลง จากการทดลองและจำลองทำให้เราทราบว่าหากต้องการความแรงในการล้างมากที่สุดคืออุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการล้างคือ อุณหภูมิของน้ำที่ต่ำกว่า 45 องศาเซลเซียส

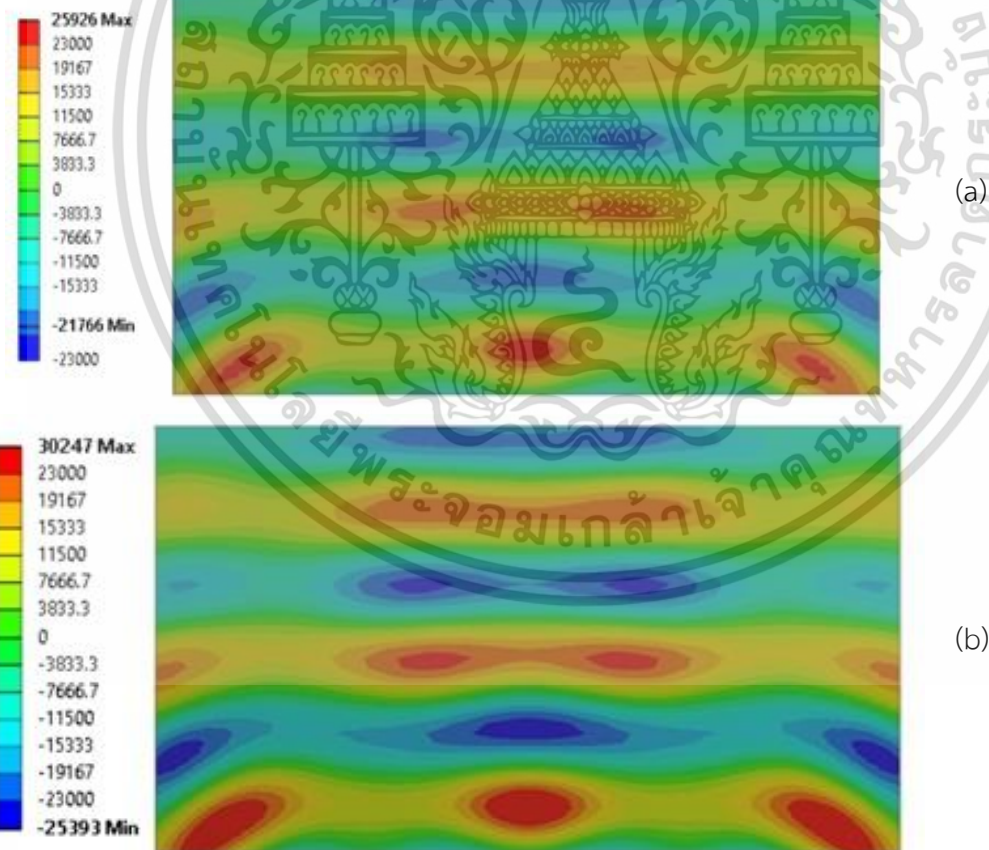


รูปที่ 4.6 แผนภูมิเปรียบเทียบผลกระทบจากการเปลี่ยนอุณหภูมิระหว่างมวลที่สูญเสียไปของแผ่นฟอยล์และผลจากการจำลอง

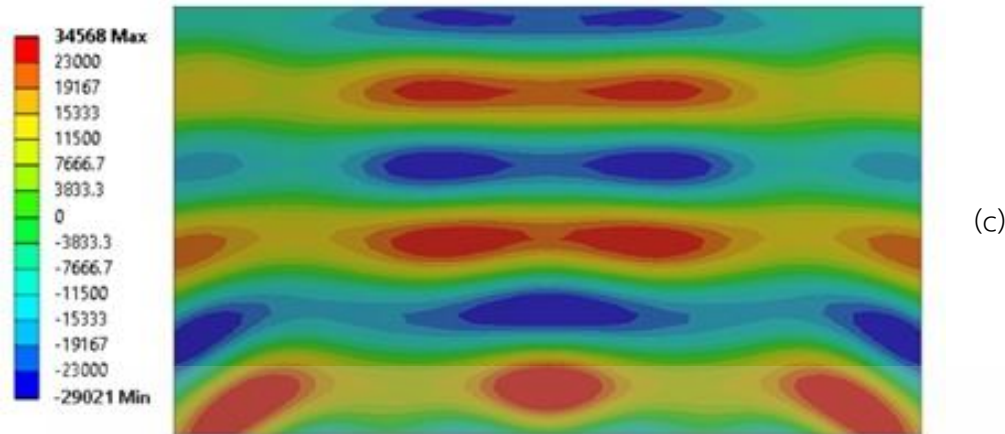
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการทดลองการเปรียบเทียบผลการกักกรองเมื่อเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า

เราได้จำลองการกระจายตัวของความดันอะคูสติกในถังทำความสะอาดโดยเปลี่ยนกำลังที่ให้กับทรานสดิวเซอร์เป็น 300, 350 และ 400 วัตต์ ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อกำลังที่ให้แก่ทรานสดิวเซอร์สูงขึ้นความแรงของความดันอะคูสติกจะเปลี่ยนไป สอดคล้องกับงานวิจัย [6] และรูปแบบของการกระจายตัวของความดันอะคูสติกยังคงเดิม ยิ่งกำลังสูง จะให้ความดันอะคูสติกที่สูงขึ้นทำให้คาวิตชันเกิดขึ้นมีความแรงมากขึ้นตามไปด้วย จากรูปนี้จะเห็นได้ว่าถังทำความสะอาดอัลตราโซนิกนี้มีความสามารถในการล้างได้ดีในบางบริเวณเท่านั้นคือบริเวณกึ่งกลางของถัง ซึ่งตรงกับที่ทางบริษัทได้รายงานมา ชิ้นส่วนบางชิ้นล้างได้สะอาด บางชิ้นล้างไม่สะอาด จากการวางตำแหน่งการล้างชิ้นส่วนกระจายทั่วทั้งถัง นอกจากนี้การลดกำลังที่ให้กับ ถังอัลตราโซนิก นอกจากจะลดจำนวนชิ้นส่วนที่เกิดการแตกหัก ซึ่งเป็นปัญหาของโรงงานแล้ว ยังเป็นการประหยัดพลังงานอีกด้วย อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาเพื่อหากำลังที่ดีที่สุดที่ให้คาวิตชันที่เหมาะสมสำหรับการล้างต่อไป



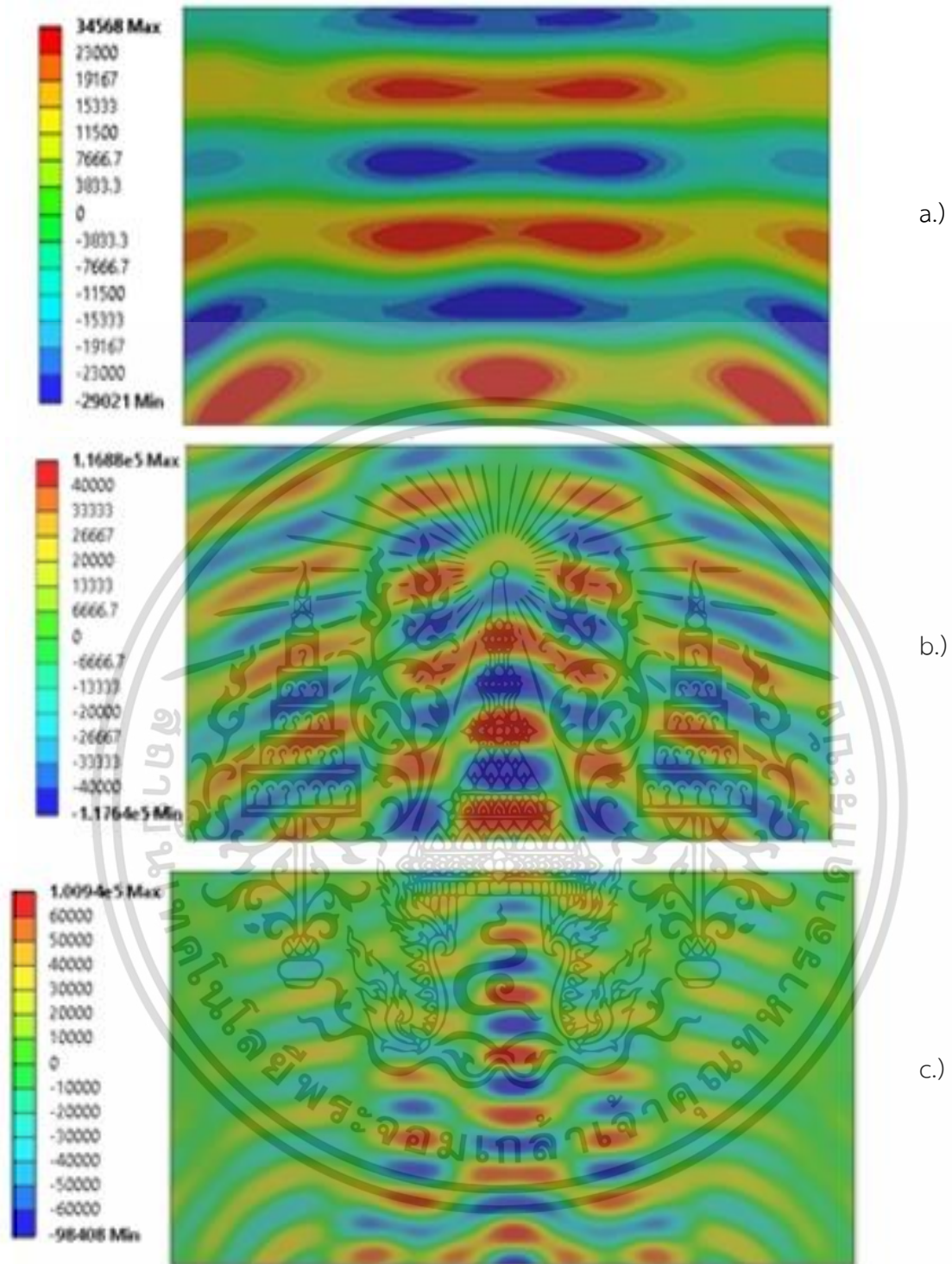
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 รูปแบบความดันอะคูสติกเมื่อเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้า (a) 300 วัตต์ (b) 350 วัตต์ และ (c) 400 วัตต์

4.5 ผลการจำลองเมื่อเพิ่มความถี่อัลตราโซนิก

เพื่อที่จะศึกษาผลของความถี่ต่อการกระจายตัวของความดันอะคูสติกรูปที่ 4.8 แสดงผลการจำลอง ความดันอะคูสติก เมื่อความถี่ของทรานสดิวเซอร์เป็น 28 กิโลเฮิร์ต, 48 กิโลเฮิร์ต และ 68 กิโลเฮิร์ต ซึ่งเป็นความถี่ของ ถังทำความสะอาดอัลตราโซนิกที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด เราพบว่า เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ความดันอะคูสติกสูงที่สุดก็เพิ่มขึ้นด้วย โดยการกระจายตัวของความดันอะคูสติกจะเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการเพิ่มความถี่จะทำให้ความยาวคลื่นน้อยลงส่งผลให้ระยะระหว่างแอมพลิจูดความดันอะคูสติก เมื่อนำผลจากงานวิจัยนี้ไปเทียบกับที่ รายงานไว้โดย Li et al. [6] พบว่าผลมีความสอดคล้องกัน แต่การกระจายตัวของความดันอะคูสติกมีรูปแบบที่ต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากรูปร่างลักษณะของถังทำความสะอาดอัลตราโซนิกไม่เหมือนกันกับงานของเรา การเพิ่มจำนวนและทิศทางการติดตั้งหัวทรานสดิวเซอร์จะทำให้รูปแบบของการเกิดความดันอะคูสติกกระจายตัว และสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งเหมาะสมกับการนำไปใช้ในการล้างทางอุตสาหกรรมซึ่งต้องการการล้างในปริมาณมาก ๆ ได้ดียิ่งขึ้น บริเวณตรงกลางของถังจะเป็นบริเวณที่ความดันอะคูสติกสูง จึงเหมาะที่จะเป็นบริเวณที่วางวัสดุที่ต้องการล้างมากที่สุด แต่บริเวณอื่นต้องได้รับการปรับปรุง

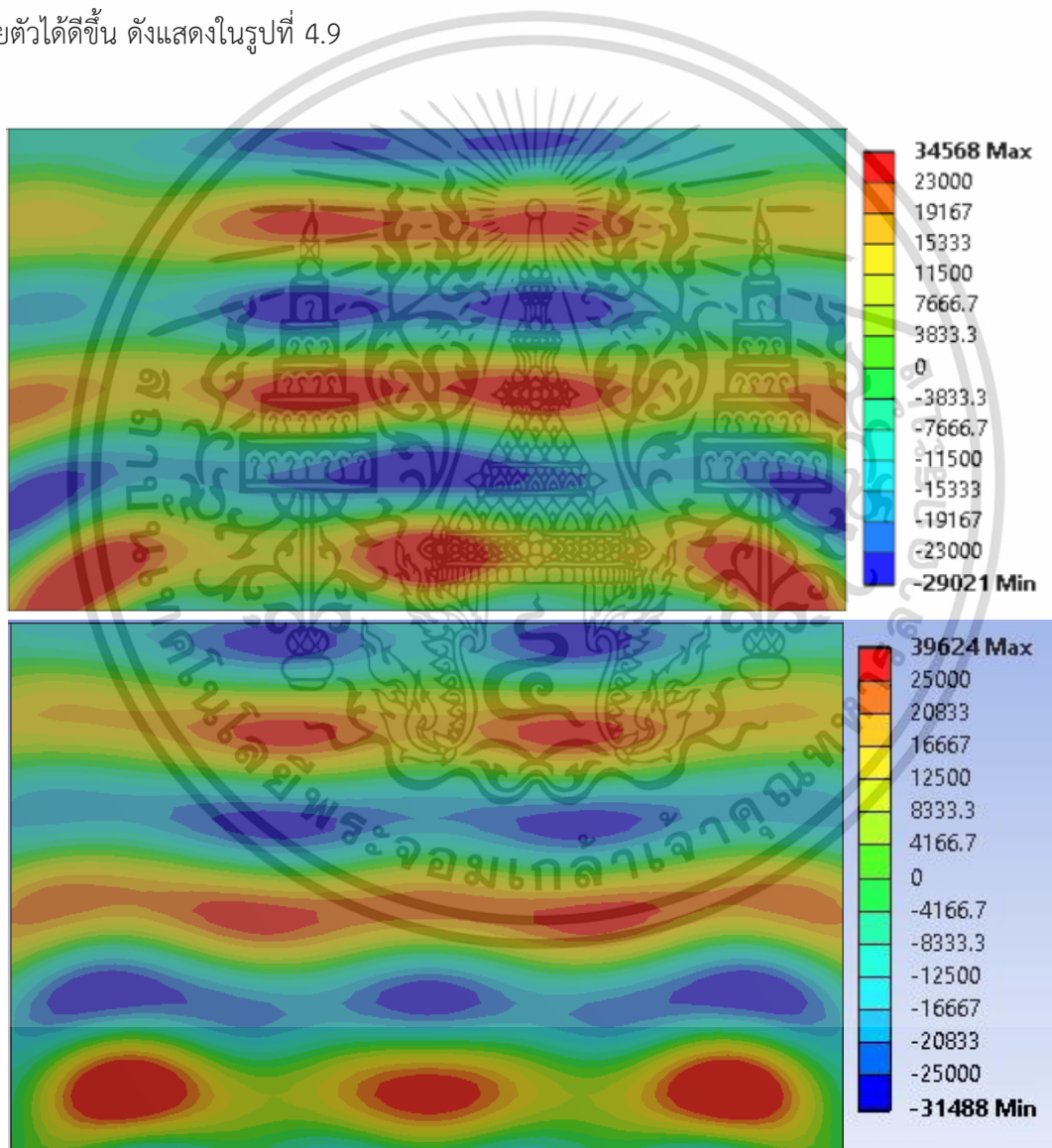


รูปที่ 4.8 รูปแบบความดันอะคูสติกที่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มความถี่ให้กับทรานสดิวเซอร์ (a) ความถี่ 28 กิโลเฮิร์ต (b) ความถี่ 48 กิโลเฮิร์ต และ (c) ความถี่ 68 กิโลเฮิร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การเปลี่ยนแปลงการติดตั้งหัวทรานสดิวเซอร์

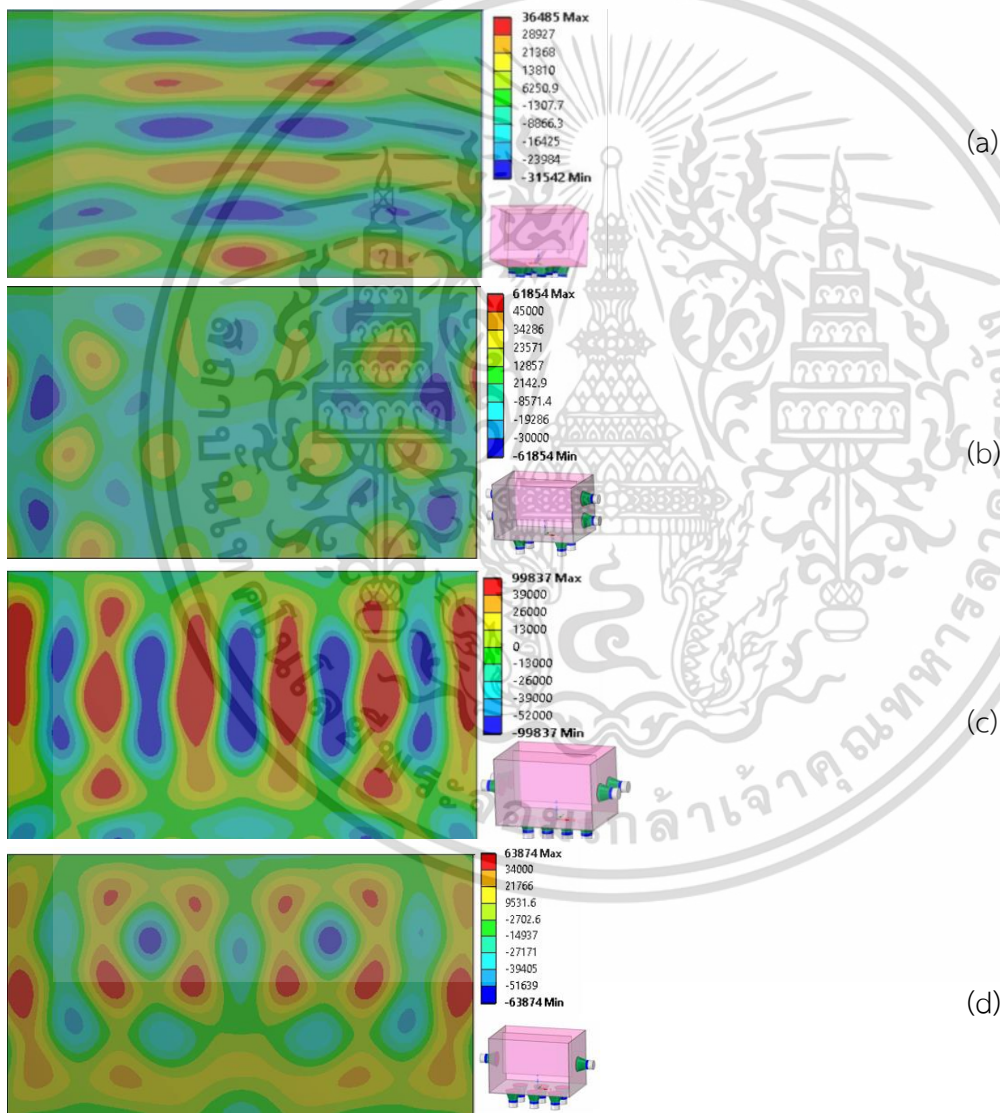
จากการศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่า การวางตำแหน่งของชิ้นงาน การเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า การเปลี่ยนอุณหภูมิ และเปลี่ยนความถี่มีผลต่อการเกิดควาวิตชัน และเกิดกระบวนการล้างจากควาวิตชันได้ดีที่สุดในบริเวณกลางถึงทำความสะอาด ซึ่งการเปลี่ยนความถี่และการเปลี่ยนตำแหน่งการวางชิ้นงานมีผลต่อรูปแบบการกระจายตัวของความดันอะคูสติก และผลการจำลองการเปลี่ยนตำแหน่งการวางชิ้นงานมีรูปแบบการเกิดควาวิตชันตามการติดตั้งทรานสดิวเซอร์อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นเราจึงทำการจำลองผลการกระจายตัวความดันอะคูสติกจากการเปลี่ยนแปลงการติดตั้งของทรานสดิวเซอร์จากรูป 3.9a ปรากฏว่า รูปแบบของความดันอะคูสติกกระจายตัวได้ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองความดันอะคูสติกเมื่อเพิ่มหัวทรานสดิวเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

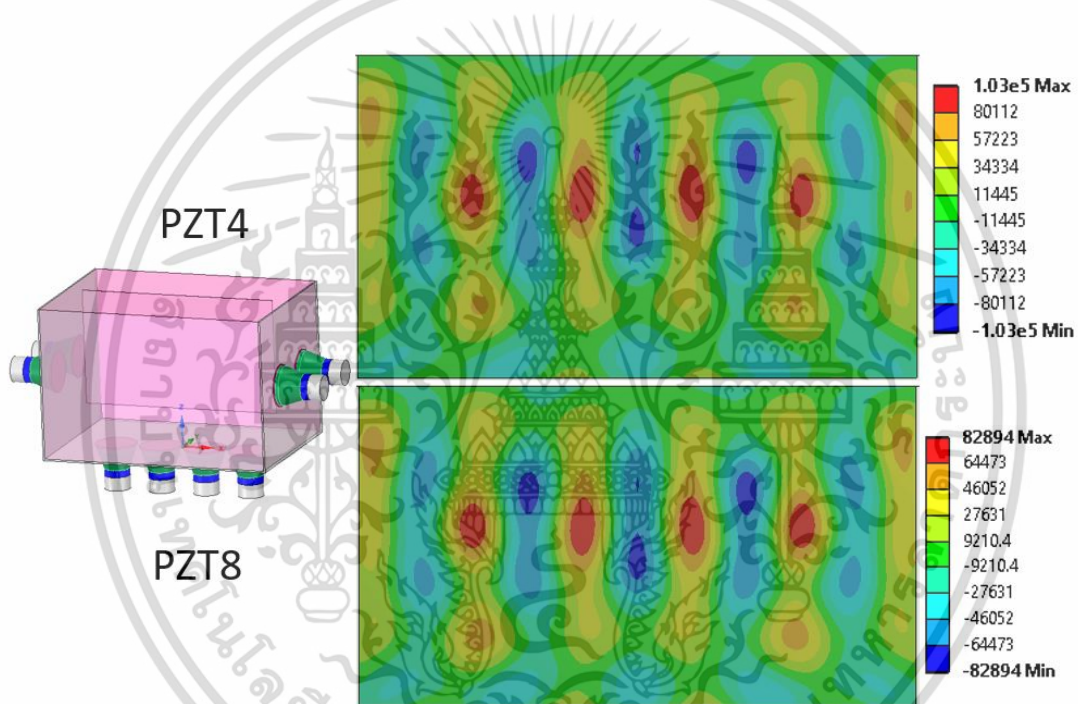
จากการติดตั้งหัวทรานสดิวเซอร์เพิ่มเข้าไปนั้น มีผลทำให้รูปแบบการกระจายตัวของความดันอะคูสติกและความแรงของความดันอะคูสติกเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นเราจึงทำการศึกษาเกี่ยวกับหัวทรานสดิวเซอร์ที่เงื่อนไขต่างๆ เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการนำมาปรับใช้ในถังทำความสะอาดจริงที่ใช้ทำความสะอาดชิ้นงาน HDD โดยมีเงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้ เปรียบเทียบผลความแรงจากชนิดวัสดุเพียโซอิเล็กทริกของหัวทรานสดิวเซอร์จากวัสดุ PZT4 เปรียบเทียบกับ PZT8 การเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งหัวทรานสดิวเซอร์ และการนำไปประยุกต์ใช้ในถังที่มีความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต ซึ่งเป็นความถี่ที่เหมาะสมในการทำสะอาดอนุภาคปนเปื้อนที่ติดกับชิ้นงาน HGA โดยผลการจำลองจากการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ใน 3 ทิศทางในความถี่ 28 กิโลเฮิร์ต แสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองความดันอะคูสติกเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งหัวทรานสดิวเซอร์ (a) แบบจำลองถังทำความสะอาดเงื่อนไขจริง และเมื่อย้ายตำแหน่งทรานสดิวเซอร์ (b) Modify1 (c) Modify2 และ (d) Modify3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

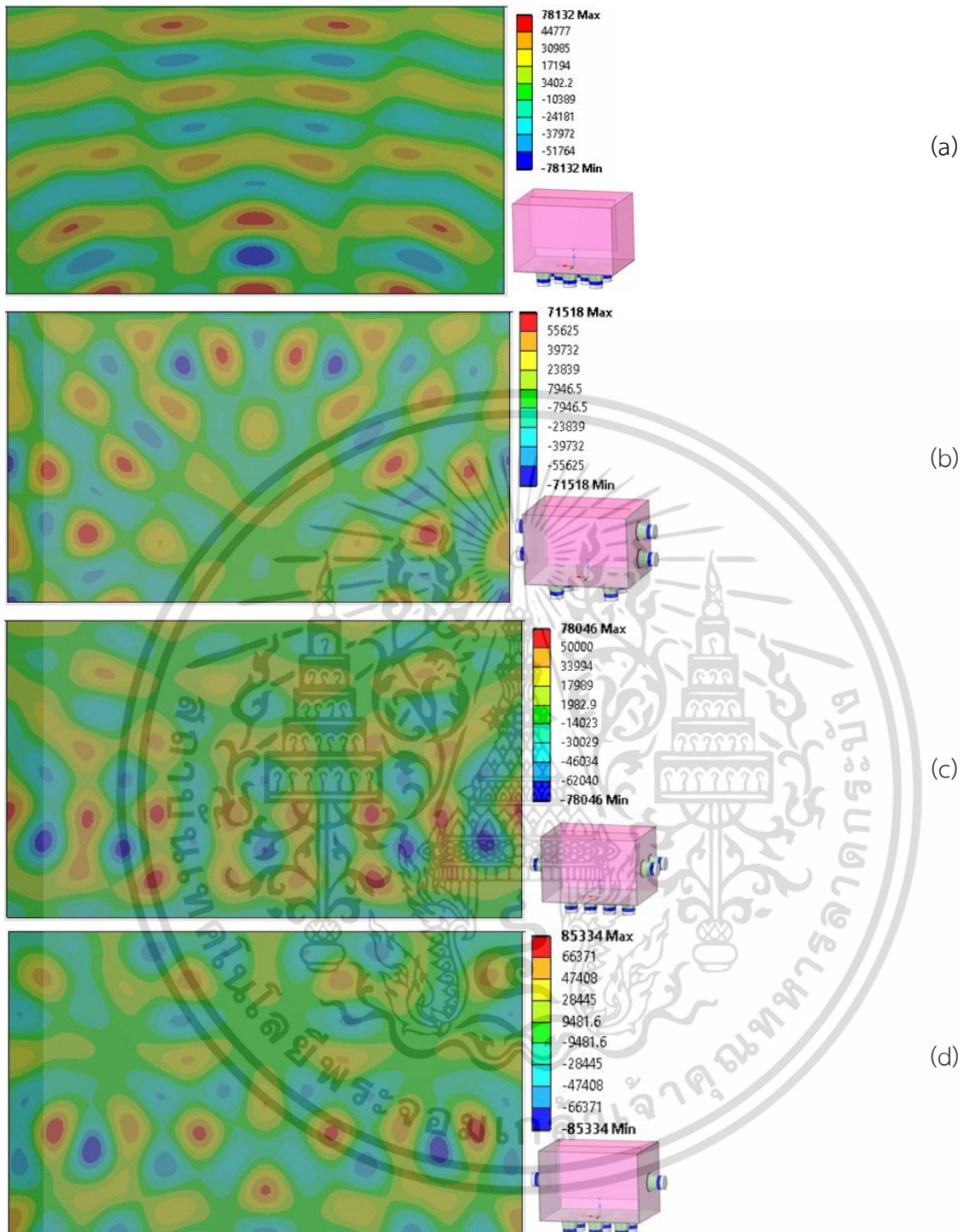
เมื่อวิเคราะห์ผลการกระจายตัวและค่าความแรงของความดันอะคูสติกจากรูปที่ 4.10 เราพบว่าเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งการวางทรานสดิวเซอร์การกระจายตัวของความดันอะคูสติกจะเปลี่ยนแปลงไป แบบ 4.10b) 4.10c) และ 4.10d) ความดันอะคูสติกจะกระจายทั่วถึงมากยิ่งขึ้น การเปลี่ยนแปลงกระจายตัวของความดันอะคูสติกเกิดจากการเปลี่ยนตำแหน่งของทรานสดิวเซอร์ จะทำให้ตำแหน่งที่เกิดการแทรกสอด แบบเสริมและหักล้างเปลี่ยนไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบบ 4.10c) ความดันอะคูสติกนอกจากจะกระจายทั่วถึงแล้ว ยังมีค่าความดันอะคูสติกสูงชันเป็นปริมาตรที่กว้างกว่าแบบอื่นทุกแบบอีกด้วย จึงเหมาะจะพัฒนาเป็นเครื่องล้างอันใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และแก้ปัญหาวัตถุล้างไม่สะอาด ดังนั้นเราจึงนำแบบจำลอง Modify3 มาจำลองกับวัสดุ PZT8 โดยผลการจำลองแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง Modify3 จาก PZT4 กับ PZT8

จากรูปที่ 4.11 เมื่อเราเปลี่ยนวัสดุจาก PZT4 เป็น PZT8 จะเห็นได้ว่ารูปแบบการกระจายตัวของความดันอะคูสติกของทั้งสองวัสดุนี้เหมือนกัน แต่สิ่งที่เปลี่ยนไปคือความแรงของค่าความดันอะคูสติกสูงสุดทางลบจาก PZT8 นั้นน้อยกว่า PZT4 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [20] โดยมีสาเหตุมาจากค่าตอบสนองทางกลต่อไฟฟ้าของ PZT8 นั้นน้อยกว่า PZT4 จากผลจำลองนี้สามารถสรุปได้ว่าถึงอัลตราโซนิกที่ทรานสดิวเซอร์ทำจากวัสดุ PZT4 เหมาะสมกว่า PZT8

จากการจำลองผลกระทบต่อความดันอะคูสติกจากความถี่ใน 4.5 ผู้วิจัยจึงทำการจำลองเพื่อหาเงื่อนไขการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ 3 ทิศทางที่เหมาะสมของอัลตราโซนิกความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต โดยรูปที่ 4.12 แสดงผลการจำลองในเงื่อนไขนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ผลการจำลองความดันอะคูสติกเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งหัวทรานสดิวเซอร์ที่ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต จากแบบจำลอง (a) ถึงอัลตราโซนิกตัวอย่าง, (b) Modify1F40, (c) Modify2F40 และ (d) Modify3F40

เมื่อนำผลการจำลองจากรูปที่ 4.10a) เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.8a) พบว่าถึง 40 กิโลเฮิร์ต มีการกระจายตลอดทั่วทั้งถังมากขึ้น ผลนี้สอดคล้องกับ 4.4 ที่จำลองผลการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อสนามเสียง(acoustic) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

pressure) ในถังอัลตราโซนิก จากรูปที่ 4.10 เราพบว่าแบบ 4.10b, 4.10c และ 4.10d มีการกระจายตัวของความดันอะคูสติกกระจายตลอดทั่วถึง คล้ายคลึงกัน และยังมีแรงของความดันอะคูสติกสูงขึ้นไปกว่าแบบ 4.10a อีกด้วย เมื่อรวมกับผลกรณีถึง 28 กิโลเฮิร์ต เราจึงสรุปว่า การวางทรานสดิวเซอร์แบบ 4.10c โดยมีทรานสดิวเซอร์ 2 ข้าง ข้างละ 2 ตัว และมี 4 ตัวอยู่ด้านล่างเรียงตามแนวยาว มีความเหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาสร้างเป็นถังอัลตราโซนิกสำหรับความถี่ 28 กิโลเฮิร์ต และ 48 กิโลเฮิร์ต ที่มีประสิทธิภาพในการล้างสูง แก้ปัญหาวัตถุล้างไม่สะอาดได้ ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ได้ถูกส่งให้บริษัทผู้ผลิตถังอัลตราโซนิก ได้มีการยอมรับและได้นำไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับการผลิตถัง รุ่นใหม่เพื่อวางจำหน่าย

4.6 การจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

เราได้จำลองความดันอะคูสติกในถังด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วย แต่ผลการจำลองยังไม่เป็นที่น่าพอใจ จำเป็นต้องได้รับการพัฒนามากขึ้นกว่านี้ ในงานวิจัยนี้จึงใช้การตอบสนองฮาร์โมนิกจะมีความแม่นยำกว่า



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้จำลองความดันอะคูสติกโดยใช้ Ansys Harmonics Response ของถังทำความสะอาดอัลตราโซนิก ตัวอย่างที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความถี่ 28 กิโลเฮิร์ต ซึ่งเคยเกิดปัญหาการล้างที่ไม่มีประสิทธิภาพ เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดควิเวชันหรือความดันอะคูสติก เราได้ทำการตรวจสอบผลการล้างจากตำแหน่งการวางชิ้นงาน ผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงรูปแบบการเกิดการกระจายตัวของความดันอะคูสติกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของน้ำภายในถังทำความสะอาดอัลตราโซนิกตัวอย่าง ซึ่งสอดคล้องกับที่ทำการทดลอง การกักร้อนบนแผ่นฟอยล์ โดยชิ้นงานที่วางจากตำแหน่งต่างกันจะถูกล้างด้วยความแรงควิเวชันที่ต่างกัน ตามค่าแอมพลิจูดความดันอะคูสติก การเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ให้แก่ทรานสดิวเซอร์ทำให้ความดันอะคูสติกเพิ่มขึ้นในทุก ๆ ตำแหน่ง แต่ไม่มีผลต่อรูปแบบของการกระจายตัวของความดันอะคูสติก เนื่องจากการเพิ่มกำลังไฟฟ้าส่งผลให้แอมพลิจูดการกระจัด(สันสะเทือน)ของทรานสดิวเซอร์เพิ่มขึ้นไม่มีการเปลี่ยนตำแหน่งแหล่งกำเนิดคลื่น ทำให้ค่าแอมพลิจูดความดันอะคูสติกเพิ่มขึ้นตามแต่ตำแหน่งการกระจายตัวยังเหมือนเดิม อุณหภูมิที่เหมาะสมในการล้างชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์คือ อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 45 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้ความแรงที่พองควิเวชันระเบิดลดลงโดยแปรผันตามค่าความหนืดของสารละลาย การเพิ่มความถี่จะทำให้การกระจายตัวของความดันอะคูสติกมีการกระจายตัวดีขึ้น ขนาดความกว้างของสนามความดันอะคูสติกเล็กลง ระยะห่างระหว่างแต่ละสนามความดันอะคูสติกละเอียดขึ้น เหมาะสำหรับการล้างชิ้นงานที่ละเอียด ๆ ซึ่งผลนี้มีความสอดคล้องกับสมการที่ 2.2 อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องทำการตรวจสอบความเหมาะสมระหว่างความถี่กับขนาดอนุภาคที่เกาะอยู่บนชิ้นงานด้วย สาเหตุที่ทำให้ล้างวัตถุไม่สะอาดหรือเกิดการแตกร้าวเนื่องจากความดันอะคูสติกในถังไม่สม่ำเสมอ โดยจะมีพฤติกรรมการเกิดรูปแบบที่แน่นอนขึ้นอยู่กับตำแหน่งการวางทรานสดิวเซอร์ วัตถุที่ล้างไม่สะอาดเกิดจากการล้างโดยวางในตำแหน่งที่ความดันอะคูสติกต่ำเกินไป ในทางตรงข้ามวัตถุที่แตกร้าวเกิดจากการวางวัตถุในตำแหน่งที่ความดันอะคูสติกสูงเกินไป เราได้เสนอแบบแผนสำหรับการพัฒนาถังอัลตราโซนิกสำหรับการล้างชิ้นงานแก่โรงงานอุตสาหกรรมอีกด้วย การจำลองความดันอะคูสติก โดยการเปลี่ยนตำแหน่งการวางทรานสดิวเซอร์ แบบใหม่อีก 3 แบบ โดยใช้เงื่อนไขเดิม เราพบว่า การวางทรานสดิวเซอร์ไว้ทางด้านข้าง ข้างละ 2 ตัว และทางด้านล่าง 4 ตัวแบบเรียงกันตามยาว จะทำให้ความดันอะคูสติกกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งถัง ดีขึ้นกว่าดังเดิม วิธีการนี้จะทำให้ความดันอะคูสติกมีค่าสูงขึ้นยังทำให้ประสิทธิภาพในการล้างสูงขึ้นด้วย เรายังได้จำลองความดันอะคูสติกสำหรับถัง 40 กิโลเฮิร์ต โดยใช้การวางตำแหน่ง ทรานสดิวเซอร์แบบใหม่ พบว่าให้ผลที่ตรงกันกับถัง 28 กิโลเฮิร์ต ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ได้ถูกส่งให้บริษัทผลิตถังทำความสะอาดอัลตราโซนิก บริษัทให้การยอมรับและยืนยันว่านอกจากจะแก้ปัญหาได้แล้ว ยังนำไปเป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนาถังทำความสะอาดอัลตราโซนิก รุ่นใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเดิมเพื่อต่อยอดในเชิงพาณิชย์ได้จริง และในอนาคตเราจะทำการศึกษาการล้างด้วยถังอัลตราโซนิกแบบหลายทิศทางหลายความถี่ที่เหมาะสม เพื่อนำผลการศึกษาไปพัฒนากระบวนการล้างให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

ในข้อเสนอโครงการเพื่อขอทุนวิจัย ผู้ขอทุนได้เขียนผลผลิตที่ได้จากงานวิจัยไว้ 3 อย่างคือ ผลงานตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ ISI Q1-Q2, นักศึกษาปริญญาโท และสื่อที่ใช้ประยุกต์ในการเรียนการสอน ซึ่งผู้ขอทุนได้ทำสำเร็จเรียบร้อยตามที่สัญญาไว้ในหัวข้อเสนอโครงการเรียบร้อยแล้ว ซึ่งประกอบด้วย

1. การตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ ISI Q1-Q2

งานวิจัยนี้ได้ตีพิมพ์ในวารสาร Ultrasonics ซึ่งเป็นวารสารที่อยู่ใน ISI Q1 มี Impact Factor = 2.377 โดยมี Ranking อันดับ 4 จาก 100 อันดับแรกของฐานข้อมูล SJR ดังในเอกสารแนบหมายเลข 1

2. นักศึกษาปริญญาโท

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งในวิทยานิพนธ์ของ นายวรพล แดงโสภา ซึ่งได้ใช้จบการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมระบบและข้อมูล วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง ภาคการศึกษา 2/2560

3. สื่อใช้ประยุกต์ในการเรียนการสอน

ส่วนหนึ่งที่ได้จากงานวิจัยนี้ถูกใช้ในการเขียนเป็นตำราเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยเทคโนโลยีการผลิต 12026212 ซึ่งปัจจุบันนักศึกษาก็ใช้ประกอบการเรียนเรียบร้อยแล้ว ดังในเอกสารแนบหมายเลข 2 แสดงหน้าปกของตำราเรียนดังกล่าว

ผลผลิตที่ได้จากงานวิจัยนี้ทั้งหมดสอดคล้องกับสัญญาทุนวิจัย ดังนั้นผู้เขียนจึงขอปิดโครงการทุนวิจัยพร้อมกับรายงานฉบับสมบูรณ์เล่มนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Khmelev, A. Shalunov, V. Nesterov, R. Dorovskikh, and R. Golykh, "Development of the rectangular ultrasonic radiator of the stair-step form," *Proc. Int. Conf. on Micro Nanotechnologies and Electron Devices (Novosibirsk, Russia)*, p. 187-193, 2014.
- [2] V. Khmelev, A. Shalunov, V. Nesterov, R. Dorovskikh, and R. Golykh, "Ultrasonic radiators for the action on gaseous media at high temperatures," *Proc. Int. Conf. of Young Specialists on Micro Nanotechnologies and Electron Devices (Novosibirsk, Russia)*, p 224-228, 2015.
- [3] F. John, "Ultrasonic Cleaning: Fundamental theory and application" p. 1-14, 2002.
- [4] A. Osterman, M. Dular, B. Sirok, "Numerical simulation of a near-wall bubble collapse in an ultrasonic field," *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 4, No. 1, p. 210-221, 2009.
- [5] A. Philipp and W. Lauterborn, "Cavitation Erosion by Single Laser-Preproduced Bubbles," *J.Fluid Mech.*, vol. 361, p. 75-116, 1998.
- [6] Y. Baoji, J. Yingzhan, Z. Lin, "Study on the processing methods of aluminum foil signals for ultrasonic cleaning parameters" Second International Conference on Digital Manufacturing & Automation, p. 1180-1183, 2011.
- [7] R. Vetrimurugan "Optimization of Hard Disk Drive Heads Cleaning by Using Ultrasonics and Prevention of Its Damage" *Procidia APCBEE*, V.3, 222-230, 2012.
- [8] NSM. Yusof, B. Babgi, Y. Alghamdi, M. Aksu, J. Madhavan, M. Ashokkumar, "Physical and chemical effects of acoustic cavitation in selected ultrasonic cleaning applications" *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol.29, p. 568-576, 2016.
- [9] N. Bretz, J. Strobel, M. Kaltenbacher, R. Lerch, "Numerical simulation of ultrasonic waves in cavitating fluids with special consideration of ultrasonic cleaning," *IEEE Ultrasonics Symposium*, p. 703-706, 2005.
- [10] S.K. Tiwaril, B.S. Satyanarayana, "Hexagonal Capacitance Micromachined Ultrasonic Transducer," *ICCCN*, p.1-4, 2008.
- [11] H. Kim, Y. Lee, E. Lim, "Fabrication and Performance Test of a Compact-type Megasonic Waveguide for Nano-particle Cleaning," *IEEE-NANO*, p. 1-4, 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] H. Kim, Y. Lee, E. Lim, Design, “ Fabrication and Performance test of a 3 MHz Megasonic Waveguide for Nano-particle Cleaning,” *IEEE-NANO*, p. 1-4, 2013
- [13] S. Niazi, S.H. Hashemabadi, M.M. Razi, “CFD Simulation of Acoustic Cavitation in Crude Oil Upgrading Sonoreactor and Prediction of Collapse Temperature and Pressure of a Cavitation Bubble,” *Chem Eng Res Des*, p. 166-173, 2014.
- [14] T. Leong, M. Coventry, P. Swiergon, K. Knoerzer, P. Juliano, “ Ultrasound Pressure Distributions Generated by High Frequency Transducers in Large Reactors,” *Ultrason Sonochem*, p. 22-29, 2015.
- [15] M. Kauer, V. Belova-Magri, C. Cairós, H.J. Schreier, R. Mettin, “Visualization and Optimization of Cavitation Activity at A Solid Surface in High Frequency Ultrasound Fields,” *Ultrason Sonochem*, p. 474-483, 2015.
- [16] F. Li, S. Ge, S. Qin, Q. Hao, “simulation of ultrasonic cleaning and experimental study of the liquid level adjusting method” 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Singapore, 2013.
- [17] J. Kim, S. Choi, and J. Kim, “Vibroacoustic characteristics of ultrasonic,” *Apply Acoustics*, vol. 58, p. 211-218, 1999.
- [18] B. Niemczewski, “ Observations of water cavitation intensity under practical ultrasonic cleaning conditions,” *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 14, p. 13-18, 2007.
- [19] G. Overton, P. Williams, and D. Trevena, “The influent of cavitation history and entrained gas on liquid tension strength,” *J. Phys. D. Apply. Phys.*, vol. 17, p. 979-987, 1984.
- [20] M. Azhdast, H. Haleh, P. Pouladzadeh, A. Azhdast, and M. Soltanabadi, “Theoretical and Experimental Analysis of beating and cavitation phenomenon on erosion in ultrasonic cleaning process,” *Proc. Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics Suntec Convention and Exhibition Center*, (Singapore), p. 624-629, 2009.
- [21] D. DeAngelis, G. Schulze, “ Performance of PZT8 versus PZT4 piezoceramic materials in ultrasonic transducers,” *Physics Procedia*, vol. 87, p. 85-92, 2016.
- [22] W. Tangsopa, J. Thongsri, and W. Busayaporn, “Simulation of ultrasonic uleaning and ways to improve the efficiency,” *Prof. Int. Conf. Electrical Engineering Congress (Pattaya, Thailand)*, 2017.
- [23] S. Hilgenfeldt, M. Brenner, S. Grossmann, and D. Lohse, “Anslsysis of Reyleigh-Plesset dynamics for sonoluminescing bubbles,” *J. of Fluid Mechanics*, vol. 365, p. 171-204, 1998.
- [24] ANSYS, Inc, “Piezoelectric & MEMS exposure in ANSYS WorkBench using ACT,” 2015.
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] P. Boonkaew, and J. Thongsri, “The optimum design of micro gripper for lifetime improvement based on fatigue analysis and six sigma analysis,” *Int. J. of Applied Engineering Research*, vol. 12, No. 20, p. 10233-10241, 2017.
- [26] ANSYS, Inc, “Acoustic ACTxR170: Introduction to Acoustic,” 2017.
- [27] Apfel, R. E. “Acoustic cavitation inception,” *Ultrasonics*, vol. 22, p.167–173, 1984.
- [28] S. Burirut, J. Benjapiyaporn and K. Wongmanee “ Finite element analysis of an ultrasonic cleaner for hard disk drives,” 2015



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารหมายเลข 1

Worapol Tangsopa, Jatuporn Thongsri, Development of an industrial ultrasonic cleaning tank based on harmonic response analysis, Ultrasonics, vol. 91, pp. 68-76, 2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Development of an industrial ultrasonic cleaning tank based on harmonic response analysis

Worapol Tangsopa, Jatuporn Thongsri*

Computer Simulation in Engineering Research Group, College of Advanced Manufacturing Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand



ARTICLE INFO

Keywords:

Acoustic pressure
ANSYS
Cavitation
Harmonic response analysis
Simulation
Ultrasonic cleaning

ABSTRACT

A small industrial ultrasonic cleaning tank, which is one of the best-selling models, had cleaning problems. Customers sometimes complained that the tank did not completely clean all objects, or that some objects got damaged, so a solution to the problem was urgently needed. The tank has a volume of 18 L, frequency of 28 kHz, eight horn style PZT4 transducers, and a total electric power of 400 W. The cleaning occurs from the cavitation effect which corresponds to an increase in the acoustic pressure. A computer simulation is presented using a harmonic response analysis (HRA) in ANSYS to resolve and improve the efficacy of the tank. From the simulation, we found that the acoustic pressure within the tank was uneven. The distribution of acoustic pressure had a characteristic pattern depending on the placement of the transducers. When the temperature was increased, the acoustic pressure was decreased leading to a cleaning efficacy drop as well. All simulation results were correlated to the foil corrosion test and power concentration experiment. The HRA was used to redesign the tank for higher cleaning efficacy. The simulation results indicated that more suitable placement of the transducers lead to a more intensified acoustic pressure, and a better distribution throughout the tank. This research not only resolved the cleaning problems that occurred in the 28 kHz tank, but was also demonstrated that it can be applied to a 40 kHz tank as well. Results from this research were accepted and approved by the manufacturer, and were used by them to develop smarter industrial ultrasonic tanks with higher cleaning efficacy for commercial sale.

1. Introduction

Ultrasonic cleaning is transferring ultrasonic waves at a frequency between 20 and 400 kHz in an appropriate cleaning solution to create large quantities of tiny bubbles called the cavitation effect. The rapid collapse and implode of these bubbles generates great heat and pressure energy that cleans off any impurities from the object placed within. Ultrasonic cleaning started to play an important role in the manufacturing industry since the 1950s [1]. It is popularly used in the manufacturing industry of electronics, food, medical instruments, clothing and textiles, petroleum, etc. The ultrasonic frequency has effects upon the object intended for cleaning. Higher frequencies produce smaller bubbles with less acoustic pressure, and lower frequencies produce larger bubbles with higher acoustic pressure that can cause more damage to objects. Cleaning efficiency also depends on the type of solvent, temperature, sonication time, and power of transducers used in the cleaning process as well [2–4]. The efficacy of ultrasonic cleaning can be assessed from visual inspection, gravimetric analysis,

calorimetry, cavitation, power and removal of deliberating soiling.

From research review related to ultrasonic cleaning, we learned that most focus their research on improving the cleaning process e.g. as in Baoji et al. [5] which reported that the repositioning of aluminum foils and temperature solution change directly affect the corrosion due to the change of cavitation. Vetrumurugan et al. [6,7] verified the effects of ultrasonic frequency, sonication time, solvent and power towards cleaning capacity of hard disk drive components. They found that a suitable circumstance of ultrasonic frequency, sonication time and cleaning solvent shall give highest cleaning efficacy. Verhaagen et al. [8] also proposed a technique for using ultrasonic cleaning for 3D printed objects from actual experience which can be applied for cleaning general objects efficiently. Yusof et al. [9] studied physical and chemical effects of acoustic cavitation to apply in the medical field. From their report, it may be confirmed that not only can ultrasonic be used in cleaning medical apparatus but can also be developed to deactivate different germs (pathogens) as well. Loranger et al. [10] studied and compared cavitation that occurred in experiments, both in

* Corresponding author.

E-mail address: jatuporn.th@kmitl.ac.th (J. Thongsri).

<https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.07.013>

Received 7 January 2018; Received in revised form 4 July 2018; Accepted 23 July 2018

Available online 25 July 2018

0041-624X/ © 2018 Elsevier B.V. All rights reserved.

Nomenclature

$[C_f]$	acoustic damping matrix (N s/Pa)
$[R]^T$	acoustic fluid boundary matrix (m^3)
$\bar{\rho}_0$	acoustic fluid mass density constant (kg/m^3)
$[M_f]$	acoustic fluid mass matrix ($\text{N s}^2/\text{Pa}$)
$[K_f]$	acoustic fluid stiffness matrix (N/Pa)
$\{F_f\}$	acoustic load vector (N)
p	acoustic pressure (Pa)
ω	angular frequency (rad/s)
ρ	density of liquid (kg/m^3)
μ	liquid viscosity (Pa s)
$\{F\}$	load vector (N)

$\{\ddot{u}\}$	nodal acceleration vector (m/s^2)
$\{\dot{u}\}$	nodal velocity vector (m/s)
$\{u\}$	nodal displacement vector (m)
$\{\ddot{u}_f\}$	nodal acceleration vector of fluid (m/s^2)
$\{p\}$	nodal displacement vector of acoustic pressure (Pa)
$\{\dot{p}\}$	nodal velocity vector of acoustic pressure (Pa/s)
$\{\ddot{p}\}$	nodal acceleration vector of acoustic pressure (Pa/s^2)
$[C]$	structural damping matrix (N s/m)
$[K]$	structural stiffness matrix (N/m)
$[M]$	structural mass matrix (kg)
t	time (s)
c	velocity of sound in medium (m/s)

ultrasonic bath and large-scale of sonoreactor. Their research results can be applied to enhance large-scale cleaning efficacy on industrial levels. Computer simulation is widely used to simulate ultrasonic cleaning to study, verify and seek conditions for the best cleaning process because it is cost-saving, consumes lesser time and gives quite credible results. Bretz et al. [11] used computational fluid dynamics (CFD) in 2D to simulate the position which cavitation occurs in liquid and compare the corrosion position on aluminum foil in accurately in actual experiment. Osterman et al. [12] used CFD to simulate the occurrence of near-wall bubble collapsed in an ultrasonic field. This helped them understand the basics of cavitation occurrence in ultrasonic cleaner even well. Acoustic pressure can be used to analyze the cavitation occurrence. Li et al. [13] simulated acoustic pressure in a 3D ultrasonic tank to study the frequency and level of solution in an ultrasonic tank towards the ability of cavitation occurrence using the COMSOL program. Tiong et al. [14] simulated acoustic pressure occurrence to enhance the performance of dental endosonic file. Niazi et al. [15] used CFD to simulate acoustic cavitation in sonoreactor to apply the results in improving the quality of crude oil in the petrochemical industry. Recently, harmonic response analysis (HRA) in ANSYS was primarily used to simulate acoustic pressure in an ultrasonic tank [16]. It predicted the accurate position where cavitation should occur. All mentioned researches assure the benefits of ultrasonic cleaning and indicate that computer simulation is an important tool for developing smart ultrasonic cleaning tank for the highest efficacy.

This research aims to solve an actual problem of a major ultrasonic tank manufacturer in Thailand who would like to improve their products. This manufacturer designs, develops and manufactures ultrasonic tank as requested by their customers in the industries. This tank has volume of 18 L and frequency of 28 kHz. It is the manufacturer's most popular tank due to its small size, lightweight and easily handled, suitable for cleaning 1–10 cm objects. In the past, the manufacturer received complaints from customers who used this tank to clean their products. Sometimes the tank did not clean thoroughly and sometimes it damaged their products. Therefore, this article reports the successful attempt of manufacturer to find the cause and solution to the problem, along to research methodology of developing the tank model for higher efficacy by using a computer simulation with the HRA in ANSYS program. The challenge of this research is that, normally HRA is used for solid materials [17–19]. Yet in this research, though the tank structure is solid, the solution is liquid and transducers are piezoelectric material. Since it is multiphysics simulation, the experiment is difficult, different and more complex than the other researches mentioned above. No existing research had used HRA to simulate acoustic pressure in the ultrasonic tank under actual conditions to resolve the mentioned problems, nor designed the experiment to confirm obtained simulation results. Thus, the methodology of this research is novel, fast, convenient and cost-saving. The authors are positive that this shall benefit engineers, researchers along to manufacturers who would like to develop and design ultrasonic tanks with better performance.

2. Theoretical background

2.1. Cavitation effect

When ultrasonic waves move into water, negative acoustic pressure occurs, creating lots of bubbles. When ultrasonic waves still pass through these bubbles, oscillation shall occur from the influence of positive pressure before growing to maximum negative acoustic pressure. Afterwards it will collapse and implode, called the cavitation effect [11–16]. The temperature of the bubble's pressure while it collapses is another important factor that affects the cleaning process. When the bubble grows to its maximum size, the area surrounding the bubble's temperature will rise to over 5500 °C with a pressure of over 70 MPa. The collapse shall rapidly occur in microsecond. The heat will not escape the bubble in time, and thus regarded that the bubble collapses adiabatically, resulting in the cleaning process [20,21].

2.2. Finite element equations

Acoustic pressure directly affects cavitation intensity [11–16]. The higher the acoustic pressure, the greater the cavitation intensity. In this research, once electric currents are applied to the PZT4 transducers, they will vibrate at a frequency of 28 kHz. The transducers' vibration will shake the tank's wall made of stainless steel and resulting in acoustic waves into the water and eventually cavitation. Therefore, it may be said that the ultrasonic tank consists of 3 domains: transducers, wall and water. The finite element equation of each equation differs from one another.

As for the transducers domain, the vibration of piezoelectric material causes coupling between the structure and electric properties. When voltage is applied to piezoelectric, it will vibrate causing displacement vector $\{u\}$ to occur as in Eq. (1) [22].

$$\begin{pmatrix} M_{uu} & 0_{uv} \\ 0_{vu} & 0 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{v} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} C_{uu} & 0_{uv} \\ 0_{vu} & -C_{vv} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} K_{uu} & K_{uv} \\ K_{vu} & -K_{vv} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ Q \end{Bmatrix} \quad (1)$$

where K_{uu} , K_{vv} , K_{uv} (K_{vu}) are structural stiffness, dielectric permittivity and piezoelectric coupling element matrices, respectively. C_{uu} , C_{vv} are structural damping and dielectric dissipation, respectively. $[M_{uu}]$ is mass matrix. $\{u\}$ is displacement vector and $\{v\}$ is an applied voltage vector.

In wall domain, $\{u\}$ from Eq. (1) will be passed to the wall causing vibration. When the wall vibrates, ultrasonic waves shall occur and passed to water domain. The finite element equation in wall domain can be written as in Eq. (2) [23].

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (2)$$

In water domain, when acoustic waves moves into the water domain, acoustic pressure may be found from solving the second order partial differential equation as in Eq. (3). Once considered that the propagation of sound waves through medium is linear, shear stress is negligible, density and compressibility of liquid medium are constant,

and pressure is time harmonic with $p = p_0 \exp(i\omega t)$ [24]:

$$\nabla \left(\frac{1}{\rho} \nabla p \right) - \frac{\omega^2}{\rho c^2} p = 0 \quad (3)$$

HRA in ANSYS is employed to determine the steady-state response of a linear structure to load that varies harmonically with time. The idea is to calculate the structural response at several frequencies and obtain the nodal displacement vector versus frequency. The HRA in ANSYS gives a calculation equation based on the finite element method. To calculate acoustic pressure, the domain of water in Eq. (3) is changed from normal fluid domain to acoustic domain from Galerkin procedure principles [25] by multiplying Eq. (3) with testing function (w) and integrating throughout the volume resulting in Eq. (4) used to calculate the acoustic pressure $\{p\}$

$$[M_f]\{\ddot{p}\} + [C_f]\{\dot{p}\} + [K_f]\{p\} + \bar{\rho}_0 [R]^T \{\ddot{u}_{f,e}\} = \{F_f\} \quad (4)$$

Once all material properties and boundary conditions are set, ANSYS will calculate the acoustic pressure $\{p\}$ of each position in the tank using Eqs. (1)–(4) and then will report $\{p\}$ in the form of numerical results before displaying the calculated results into graphical color for easy analysis.

3. Methodology

In this section, we will explain simulation and experiment methods in detail. The results will be analyzed to find causes of the tank's problems and to find development methods and improvements, so the tank has better cleaning efficacy.

3.1. An industrial ultrasonic tank

The ultrasonic tank used in this research is an actual one used in the industry. It is 245 mm × 340 mm × 225 mm (W × L × D) in size, has a volume of 18 L. Under the tank are 8 horn PZT4 transducers that generate ultrasonic waves at a frequency of 28 kHz. The generator's power can be adjusted from 0 to 400 W. The tank's wall is made of stainless steel. Fig. 1 shows the actual industrial ultrasonic tank and Fig. 2 shows a diagram and dimension.

3.2. Fluid and mesh model

We used the ultrasonic tank in Fig. 1 as a prototype and its dimension in Fig. 2 to create a simplified CAD model as in Fig. 3(a). It consists of water as the solution, and transducers beneath the tank as PZT4 piezoelectric material, and the wall as stainless steel. The wall is also the tank's structure containing the water. Generator supplies electricity to the transducers which make the adjacent wall vibrate at a frequency of 28 kHz. The occurred ultrasonic waves will be passed to the water causing the cavitation and cleaning. The wavelength of the ultrasonic will determine the element amount of the mesh model, thus giving accurate simulation results. As for the hexahedron, there should be at least 6 elements per wavelength [25]. Therefore, for this tank we created the mesh model all in hexahedron elements. There is a total of 0.64 million nodes and 0.20 million elements. Fig. 3(b) shows the mesh model which is proper for simulation. From mesh analysis we found that this mesh model gives accurate results in short computational time.

3.3. Harmonic response setting

We used the HRA in ANSYS version 17.0, which has been upgraded with an additional acoustic package called Acoustics ACTxR170 [25]. It is used to specifically study the results of the response of objects from sound. We set aluminum alloy and stainless steel to be solid domains as normal. For the transducers and water, we changed from solid and fluid domains to piezoelectric [22] and acoustic domains [25], respectively.

This action gives more accurate results than normal HRA without upgrading [25]. The PZT4 transducer properties and specifications were set following Tables 1 and 2, respectively. The water's properties were set according to Table 3. All information was given by the manufacturer. Other values were set as the default setting. Once all values are completely set, ANSYS will display the acoustic pressure results in all positions throughout the tank.

3.4. Experiment

To confirm the validation of simulation results, we divided the experiment into 2 parts; foil corrosion (erosion) test and power concentration measurement. In the foil corrosion test, 18 L of water is used as the solution in the tank as seen in Fig. 4(a). The rectangular aluminum foil with a size of 20 cm × 29 cm and 0.038 mm thick will be tensely fixed using a metal structure. The foil sheet is submerged into the water at the level required in the experiment. We used power 400 W with 3 min of sonication time, at a temperature of 45 °C. Results from the corrosion test were analyzed to determine characteristic pattern of acoustic pressure distribution and aluminum mass loss.

For power concentration measurement, we used an NGL measurer model UPC3000 (Ultrasonic Process Controller) with resolution of measured power concentration of ± 0.1% W/liter and temperature of ± 0.2 °C. We measured the points at center, 17.5 cm above the bottom of tank as shown in Fig. 4(b) for temperature of 35, 45, 55 and 65 °C. Results of the experiment will be explained along with the simulation results in the next section. All experiments were repeated 5 times. Since this tank did not have a cooling system, the experiments regarding temperature could not be carried out at lower than room temperature. During the experiment, the water temperature was not constant, but always slightly changing and ranging between ± 1 °C in all experiments.

4. Results and discussion

4.1. Validation and cause of unclean object

In order to verify the validation of simulated acoustic pressure, Fig. 5 shows characteristic patterns of acoustic pressure distribution compared to results from foil corrosion test when water temperature was 45 °C. Since results were symmetry, we showed compared half from both symmetrical results. It was clear that both results were consistent to one another. The area marked at the foil sheets did not tear but a lot of tiny corroded holes were distributed here. Therefore, acoustic pressure distribution using HRA in ANSYS can predict the position of corrosion and cavitation. These results were in agreement with the reports in references [5,15,16] and confirmed that acoustic pressure distribution has a characteristic pattern, which depends on the position of

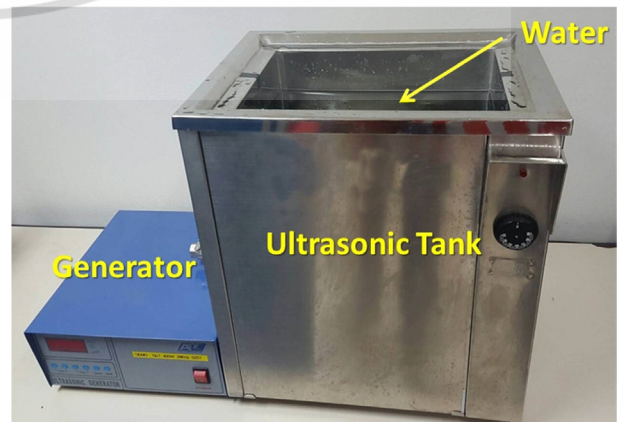


Fig. 1. The actual industrial ultrasonic tank.

Table 1
Material properties.

Material	Type	Value	
Aluminum alloy	Density	2770 kg/m ³	
	Young's modulus	7.1 × 10 ¹⁰ Pa	
	Poisson's ratio	0.33	
	Bulk modulus	6.961 × 10 ¹⁰ Pa	
	Shear modulus	2.669 × 10 ¹⁰ Pa	
Stainless steel	Density	7750 kg/m ³	
	Young's modulus	1.93 × 10 ¹¹ Pa	
	Poisson's ratio	0.31	
	Bulk modulus	1.693 × 10 ¹⁰ Pa	
	Shear modulus	7.366 × 10 ¹⁰ Pa	
Piezoelectric PZT4	Density	7500 kg/m ³	
	Permittivity constant (ϵ_0)	8.854 × 10 ⁻¹² F/m	
	Stiffness matrix [c^e] (× 10 ¹⁰)	$c_{11} = c_{22} = 13.9, c_{21} = 7.78,$ $c_{31} = c_{32} = 7.43, c_{44} = 3.06,$ $c_{55} = c_{66} = 2.56$ Pa	
	Stress matrix [e]	$e_{31} = -5.2, e_{33} = 15.1,$ $e_{15} = 12.7$ C/m ²	
	Relative permittivity [ϵ_r]	$\epsilon_{r11} = \epsilon_{r22} = 1475, \epsilon_{r33} = 1300$	
	Piezoelectric PZT8	Density	7600 kg/m ³
		Permittivity constant (ϵ_0)	8.854 × 10 ⁻¹² F/m
Stiffness matrix [c^e] (× 10 ¹⁰)		$c_{11} = c_{22} = 14.7, c_{21} = 8.11,$ $c_{31} = c_{32} = 8.10, c_{44} = 3.29,$ $c_{55} = c_{66} = 3.13$ Pa	
Stress matrix [e]		$e_{31} = -3.9, e_{33} = 13.9,$ $e_{15} = 10.3$ C/m ²	
Relative permittivity [ϵ_r]		$\epsilon_{r11} = \epsilon_{r22} = 1,290, \epsilon_{r33} = 1000$	

Table 2
PZT4 transducer specifications.

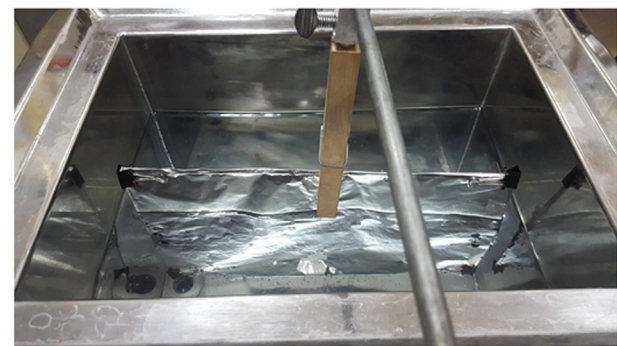
Type	BJC-2850T-45SS PZT4	BJC-4060T-48SS PZT4
Frequency	28 kHz ± 1 kHz	40 kHz ± 1 kHz
Power	50 w	60 w
Radiating surface	45 mm	48 mm
Length	82 mm	56 mm

Table 3
Water properties.

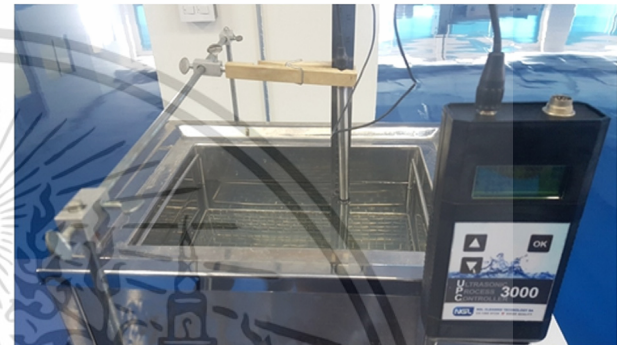
Temperature (°C)	Density (kg/m ³)	Acoustic velocity (m/s)	Dynamic viscosity (kg/m s)
27	996.45	1499.2	0.8592
35	993.60	1518.4	0.7191
45	990.15	1533.5	0.5958
55	985.36	1546.5	0.4903
65	980.35	1553.5	0.4221

change of acoustic pressure distribution results from changes of transducers' placements. This alters the positions both constructive and destructive interferences. Especially in model C, acoustic pressure not only was distributed throughout the tank but also had a higher value wider than all other models. This is suitable for developing a novel ultrasonic tank that has a higher efficacy and resolves the problem of objects not being cleaned well enough.

For even more confidence, we simulated by changing the transducer's frequency to 40 kHz, using information from Table 2. given by the transducers' manufacturer in China, who is a supplier of the manufacturer. Simulation results of the acoustic pressure are shown as in Fig. 10. Acoustic pressure distribution for all transducer placements of models A-D differ from the 28 kHz tank. The 40 kHz tank distributed throughout the tank more. This result agrees with the contents reported



(a)



(b)

Fig. 4. The experiments: (a) foil corrosion test and (b) power concentration measurement.

by Li et al. [13] that simulated the frequency change towards sound field in a larger ultrasonic tank. From Fig. 10, the legend scale was adjusted to identify the contrast of characteristic pattern of acoustic pressure distribution. We also found that models C and D have higher acoustic pressure than model A. Once added to the results from 28 kHz tank, we concluded that placing transducer as in model C with 2 transducers on both sides and 4 aligned in a row underneath, is the optimal model for developing into the new ultrasonic tank for both 28 kHz and 40 kHz with high cleaning efficacy. This can resolve the problem of an object not being properly cleaned. Results from this research were sent to the manufacturer, which were approved and applied to knowledge to develop smart ultrasonic tank for commercial sale.

Because PZT4 and PZT8 are favorite materials used as transducers of the ultrasonic tank, we therefore simulated the acoustic pressure of the proposed novel 28 kHz ultrasonic tanks for models A–D using PZT8 as transducers with the material properties in Table 1. The results reveal in Fig. 11. The acoustic pressure distributions were similar to those depicted in Fig. 9 using PZT4 transducers but using PZT4 gave the higher acoustic pressure than PZT8. Since high acoustic pressure gave the greater energy of cavitation and better cleaning performance, the PZT4 transducer was a proper material for developing novel ultrasonic tanks. This supports the work of DeAngelis and Schulze [26] who investigated the performance of PZT4 versus PZT8 piezoelectric materials in ultrasonic transducers.

Simulation for this research considered that the cleaning occurs in an empty tank with water as the solution. In real industry, an object shall be placed inside a tank, and surfactant solutions will be added into the water to decrease surface tension, and increase temperature to effectively clean oil contaminants from the object. If simulations were carried out with those circumstances, the research results will be even more beneficial and practical. Other than this, there are many types of contamination and sizes from 0.3 μm and above. The contamination

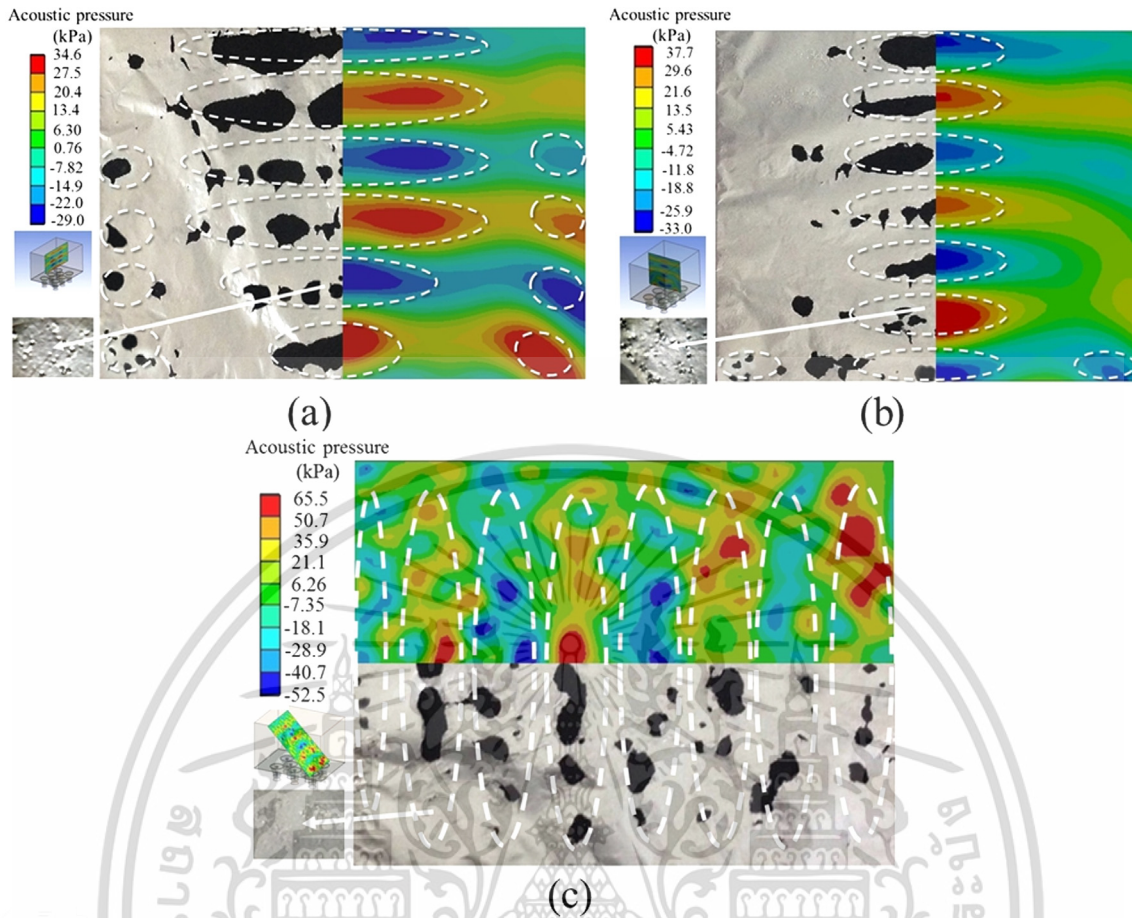


Fig. 5. Acoustic pressure distribution in some areas inside the tank compared to the results from foil corrosion test for water temperature of 45 °C.

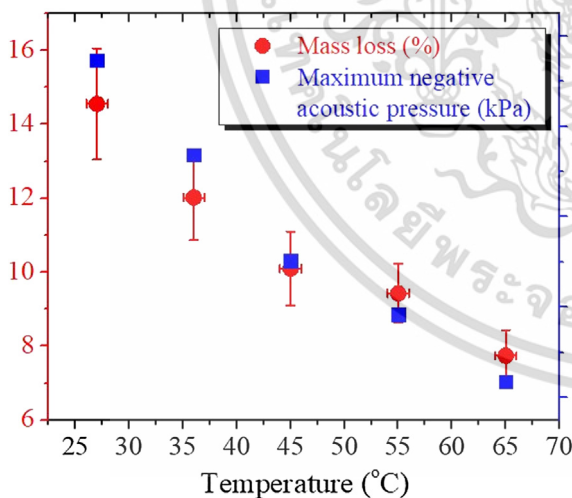


Fig. 6. Comparison between the maximum negative acoustic pressure and mass loss of foil sheet for water temperature of 45 °C.

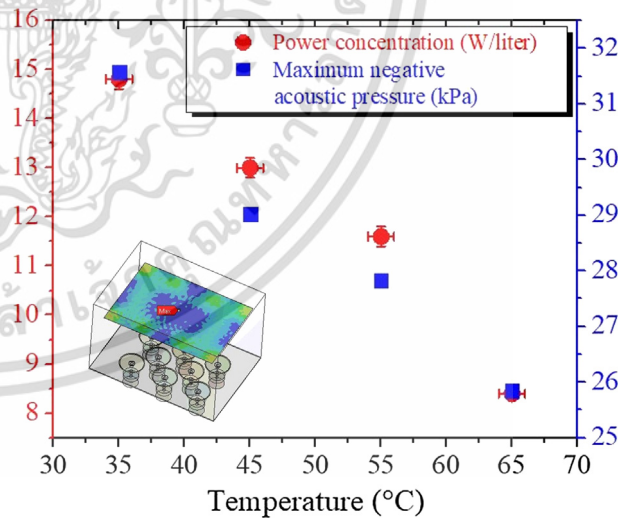


Fig. 7. Comparison between the maximum negative acoustic pressure and power concentration for water temperature of 45 °C.

particle size is affected by different frequencies. Efficient cleaning occurs when a tank consists of transducers with multi-frequency transducers within the tank as reported in the work of Manickham et al. [27], and the best conditions from simulation such as temperature, position of transducer, frequency and design of the tank as reported in this article. Therefore, it would be interesting to carry out the simulation as multi frequency, which will be even more beneficial and can be further developed for commercial purposes. At present, the

manufacturer requires the simulation results and the best conditions for multi-frequency transducers.

5. Conclusion

We used harmonic response analysis (HRA) in ANSYS 17.0 to simulate acoustic pressure occurred in this tank by using water as solution along with problematic condition from the manufacturer. We

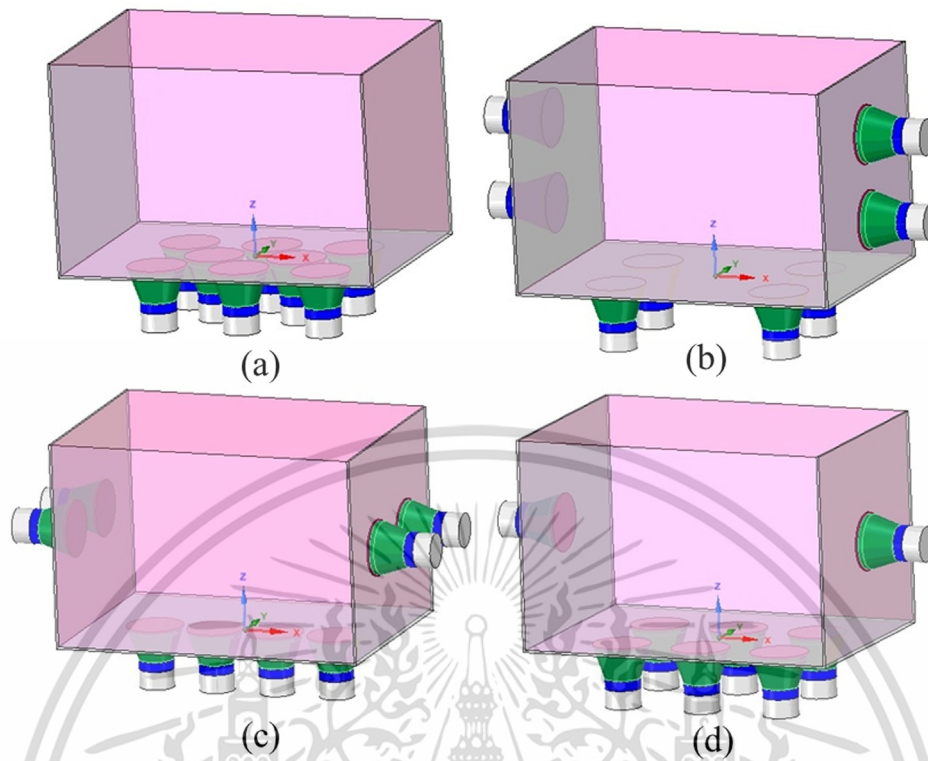


Fig. 8. Proposed novel models of ultrasonic tank: (a) model A, (b) model B, (c) model C, and (d) model D.

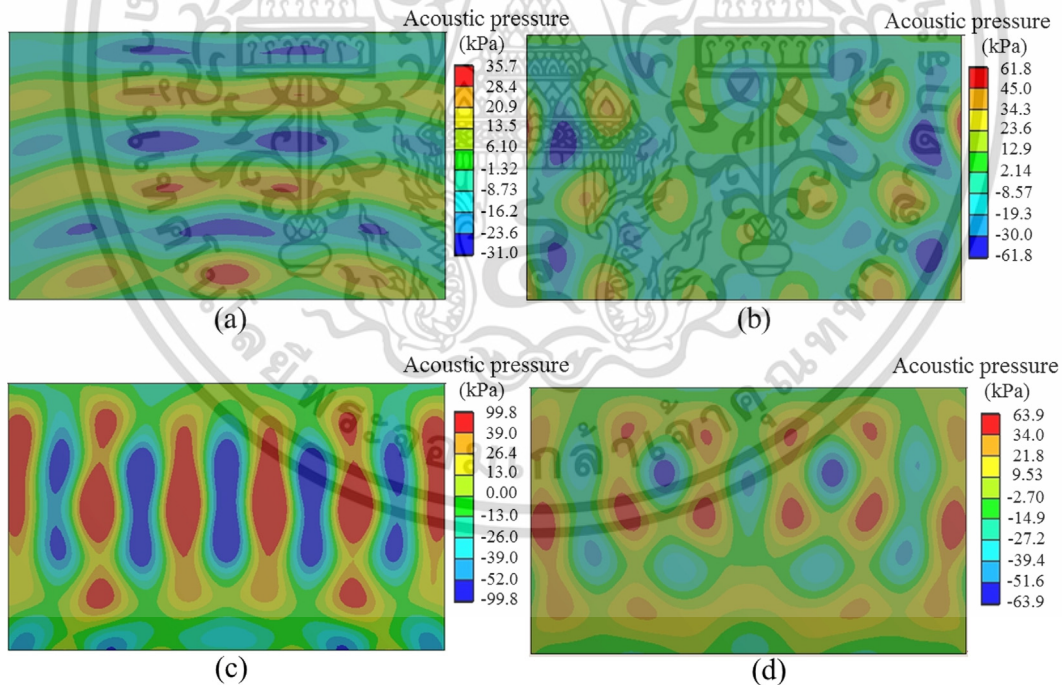


Fig. 9. Acoustic pressure distributions of the proposed novel 28 kHz ultrasonic tanks for: (a) model A, (b) model B, (c) model C, and (d) model D, using PZT4 as transducers.

proposed detailed methodology, which is new, cost-saving and gives accurate simulation results. Simulation results showed that acoustic pressure is well consistent to the foil corrosion test and power concentration measurement. From analyzing simulation results we found that acoustic pressure may explain occurred cavitation. The greater the acoustic pressure, the higher in cavitation. The increase of temperature lessens cleaning efficacy. The reason why objects were not thoroughly

cleaned or damaged is from uneven acoustic pressure in the tank and using water with temperatures that are too high in the cleaning process. Characteristic pattern of acoustic pressure distribution depends on the placement of the transducer. Unclean objects happened when they were cleaned at a position where the acoustic pressure was near 0 Pa. On the opposite hand, damaged objects were cleaned at a position where the acoustic pressure was too high and too low. For this tank, the PZT4 was

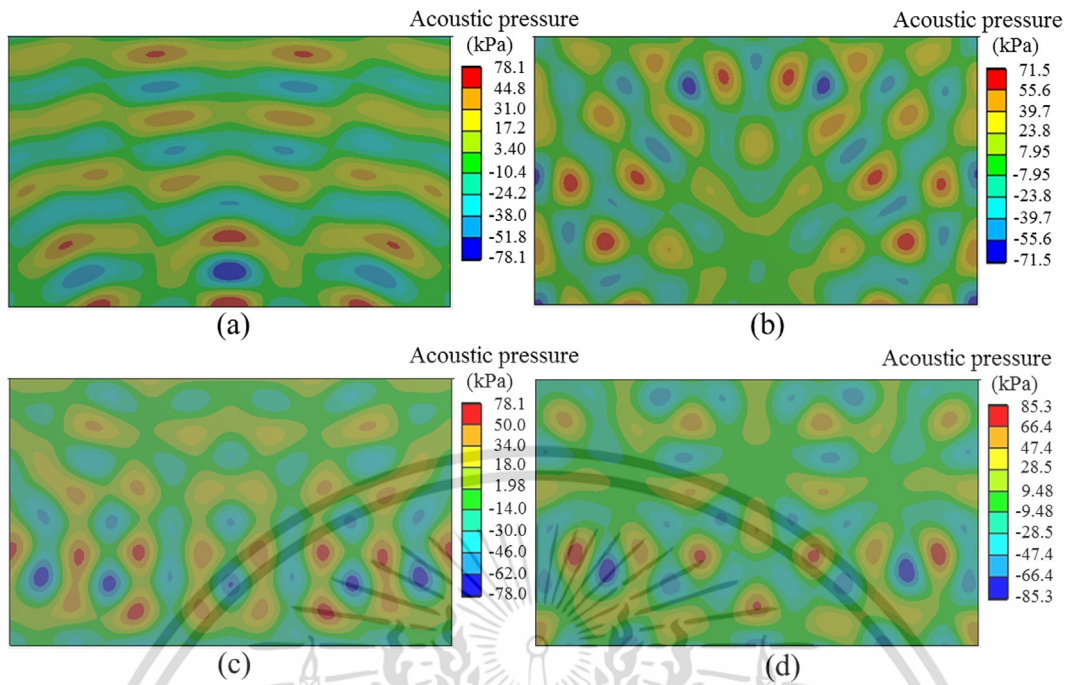


Fig. 10. Acoustic pressure distributions of the proposed novel 40 kHz ultrasonic tanks for: (a) model A, (b) model B, (c) model C, and (d) model D, using PZT4 as transducers.

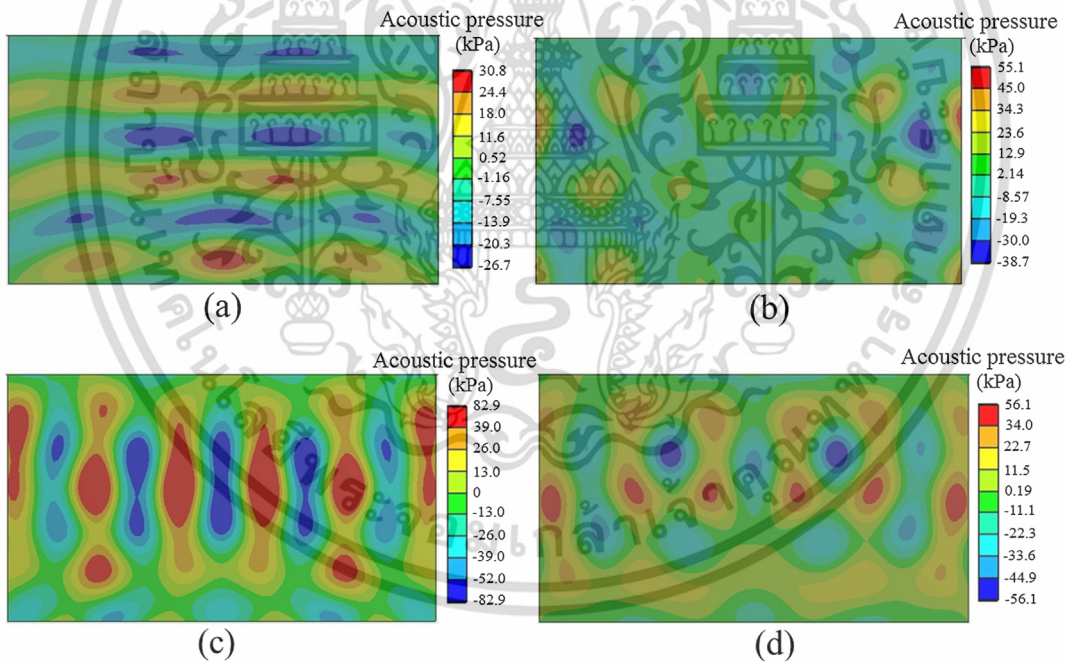


Fig. 11. Acoustic pressure distributions of the proposed novel 28 kHz ultrasonic tanks: (a) model A, (b) model B, (c) model C, and (d) model D, using PZT8 as transducers.

a proper material used as transducer since it gave higher acoustic pressure than the PZT8. We also proposed a scheme to develop the ultrasonic tank using simulation results of acoustic pressure by changing the placement of the transducer in 3 ways under the same conditions. We found that by placing the transducer at the side (2 per 1 side) and 4 underneath in a row, the acoustic pressure distribution is smoothly distributed throughout the entire tank, which is better than the original tank. This method increases the acoustic pressure level to be higher and improves cleaning efficacy as well. We have also simulated the acoustic pressure for the 40 kHz tank by repositioning the transducers. We found that the results aligned with the 28 kHz tank

Acknowledgements

This research was supported by Seagate Technology (Thailand) Ltd., Pasuda Supplies and Services Co., Ltd., College of Advanced Manufacturing Innovation, and King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang.

References

[1] T.J. Mason, *Ultrasonic cleaning: an historical perspective*, *Ultrason. Sonochem.* 29 (2016) 519–523. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.05.011>

- [2] O.A. Antony, Technical aspects of ultrasonic cleaning, *Ultrasonics* 1 (1963) 194–198.
- [3] M. Ibsi, B. Brown, Variation of the relative intensity of cavitation with temperature, *J. Acoust. Soc. Am.* 41 (1967) 568–572.
- [4] D.D. Nguyen, H.H. Ngo, Y.S. Yoon, S.W. Chang, H.H. Bui, A new approach involving a multi transducer ultrasonic system for cleaning turbine engines' oil filters under practical conditions, *Ultrasonics* 71 (2016) 256–263.
- [5] Y. Baoji, J. Yingzhan, Z. Lin, Study on the processing methods of aluminum foil measurement signals for ultrasonic cleaning parameters, in: *Proceeding of 2nd International Conference on Digital Manufacturing & Automation*, Hunan, China, 2011, pp. 1180–1183.
- [6] R. Vetrimerugan, Optimization of hard disk drive heads cleaning by using ultrasonics and prevention of its damage, *APCBEE Proc.* 3 (2012) 222–230.
- [7] R. Vetrimerugan, Ultrasonic and megasonic cleaning to remove nano-dimensional contaminants from various disk drive components, *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.* 2 (2013) 5971–5977.
- [8] B. Verhaagen, T. Zanderink, D.F. Rivas, Ultrasonic cleaning of 3D printed objects and cleaning challenge devices, *Appl. Acoust.* 103 (2016) 172–181.
- [9] N.S.M. Yusof, B. Babgi, Y. Alghamdi, M. Aksu, J. Madhavan, M. Ashokkumar, *Ultrason. Sonochem.* 29 (2016) 568–576.
- [10] E. Loranger, M. Paquin, C. Daneault, B. Chabot, Comparative study of sonochemical effects in an ultrasonic bath and in a large-scale flow-through sonoreactor, *Chem. Eng. J.* 178 (2011) 359–365.
- [11] N. Bretz, J. Strobel, M. Kaltenbacher, R. Lerch, Numerical simulation of ultrasonic waves in cavitating fluids with special consideration of ultrasonic cleaning, in: *Proceeding of IEEE Ultrasonics Symposium*, Rotterdam, Netherlands, 2005, pp. 703–706.
- [12] A. Osterman, M. Dular, B. Širok, Numerical simulation of a near-wall bubble collapse in an ultrasonic field, *J. Fluid Sci. Technol.* 4 (2009) 210–221.
- [13] F. Li, S. Ge, S. Qin, Q. Hao, Simulation of ultrasonic cleaning and experimental study of the liquid level adjusting method, in: *Proceeding of 20th CIRP International Conference on Life Circle Engineering*, Singapore, 2013, pp. 275–278.
- [14] T.J. Tiong, G.J. Price, S. Kanagasingam, A computational simulation study on the acoustic pressure generated by a dental endosonic file: effects of intensity, file shape and volume, *Ultrason. Sonochem.* 21 (2014) 1858–1865.
- [15] S. Niazi, S.H. Hashemabadi, M.M. Razi, CFD simulation of acoustic cavitation in a crude oil upgrading sonoreactor and prediction of collapse temperature and pressure of a cavitation bubble, *Chem. Eng. Res. Des.* 92 (2014) 166–173.
- [16] W. Tangsopa, J. Thongsri, W. Busayaporn, Simulation of ultrasonic cleaning and ways to improve the efficiency, in: *Proceeding of 5th International Electrical Engineering Congress*, Pattaya, Thailand, 2017.
- [17] Y. Yu, S. Zhang, H. Li, X. Wang, Y. Tang, Modal and harmonic response analysis of key components of ditch device based on ANSYS, *Proc. Eng.* 174 (2017) 956–964.
- [18] L. Gu, L. Chen, Z. Guo, Vibration characteristic analysis of axial fan shell based on ANSYS workbench, in: *Proceeding of International Conference on Logistics Engineering, Management and Computer Science*, Shenyang, China, 2015, pp. 221–225.
- [19] C.M. Ramesha, K.G. Abhijith, A. Singh, A. Raj, C.S. Naik, Modal analysis and harmonic response analysis of a crankshaft, *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.* 5 (2015) 323–327.
- [20] S. Hilgenfeldt, M. Brenner, S. Grossmann, D. Lohse, Analysis of Reyleigh-Plesset dynamics for sonoluminescing bubbles, *J. Fluid Mech.* 365 (1998) 171–204.
- [21] R.E. Apfel, Acoustic cavitation inception, *Ultrasonics* 22 (1984) 167–173.
- [22] Ansys, Inc., Piezo and MEMS ACTx R170, Piezoelectric and MEMS Exposure in ANSYS Workbench Using ACT, December 2015.
- [23] Ansys, Inc., Harmonic Analysis, Ansys Mechanical Linear and Nonlinear Dynamics, September 2016.
- [24] V.S. Sutkar, P.R. Gogate, L. Csoka, Theoretical prediction of cavitation activity distribution in sonochemical reactors, *Chem. Eng. J.* 158 (2010) 290–295.
- [25] Ansys, Inc., Introduction to Acoustics, Acoustics ACTxR170, September 2015.
- [26] D.A. DeAngelis, G.W. Schulze, Performance of PZT8 versus PZT4 piezoceramic materials in ultrasonic transducers, *Phys. Proc.* 87 (2016) 85–92.
- [27] S. Manickam, et al., Role of H₂O₂ in the fluctuating patterns of COD (chemical oxygen demand) during the treatment of palm oil mill effluent (POME) using pilot scale triple frequency ultrasound cavitation reactor, *Ultrason. Sonochem.* 21 (2014) 1519–1526.

ภาคผนวก 2

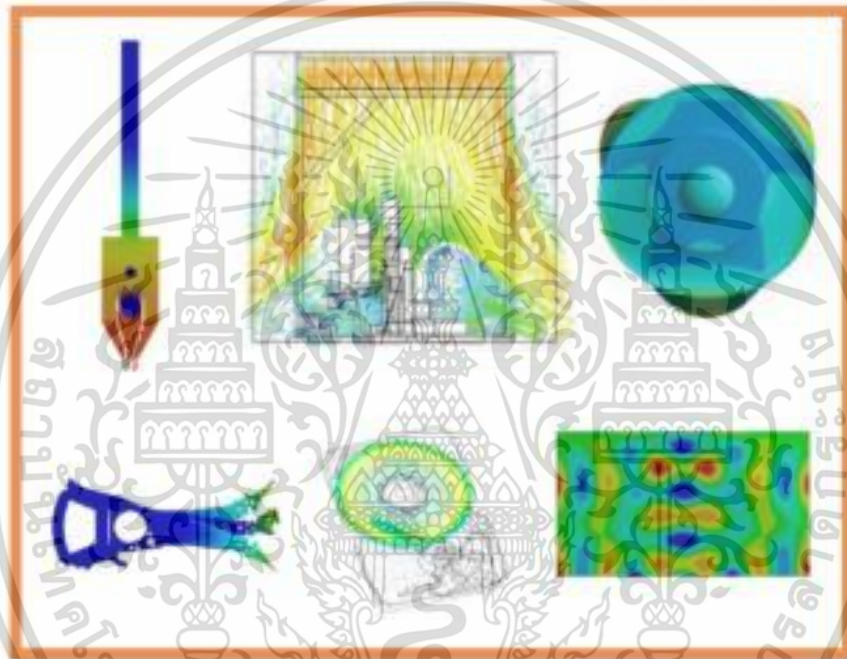
ตำราเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยเทคโนโลยีการผลิต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอมพิวเตอร์ช่วย เทคโนโลยีการผลิต

การจำลองทางวิศวกรรม



- ตำราประกอบการเรียนเชิงทฤษฎี
- เอกสารอ่านเพิ่มเติมสำหรับผู้สนใจทั่วไป
- ตัวอย่างงานวิจัยที่นำไปใช้จริงสำหรับวิศวกร
ในโรงงาน



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จตุพร ทองศรี
วิทยาลัยวิศวกรรมการผลิตขั้นสูง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัตินักวิจัย

- ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย)...ผศ.ดร.จตุพร ทองศรี.....
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ)...Asst. Prof. Dr. Jatuporn Thongsri.....
เว็บไซต์ <http://ami.kmitl.ac.th/people/asst-prof-dr-jatuporn-thongsris-profile/>
- หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)
วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ซอย
ฉลองกรุง 1 เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร. 02-329-8271 Fax 02-329-8263 Email:
jatuporn.th@kmitl.ac.th
- ประวัติการศึกษา
ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ระดับปริญญาโท วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ระดับปริญญาเอก วิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
นักเรียนทุนโครงการส่งเสริมผู้มีความสามารถทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พสวท) พศ.2539-2553
- ความถนัดเฉพาะด้าน
เน้นงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics) และวิธีไฟไนต์เอลิ
เมนต์ (Finite Element Method) สำหรับการจำลองทางวิศวกรรมเพื่อแก้ไขปัญหา ออกแบบ พัฒนา กระบวนการ
ผลิต โดยเน้นงานวิจัยที่มาจากโจทย์ปัญหาจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม
- ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ/หรือที่ผ่านมา

Titles	Fund by	Start /Expired Year	Finished Year
1.Development of high performance multi frequency ultrasonic tank for electronic components cleaning	Research and Researcher for Industry (RRI)	2561/2563	In Progress
2.Theoretical and numerical investigation of heat transfer in material domain of reflow process for hard disk drive factory	Research and Researcher for Industry (RRI)	2561/2562	In Progress
3.Study and development of heat transfer in reflow process for hard disk	Research and Researcher for Industry	2561/2562	In Progress

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

drive factory using hot air	(RRI)		
4. 3D Simulation of Aerodynamics of Light Aircraft SAAB 340B	AVIA Satcom Co. Ltd.	2561/2561	2561 Complete
5. Aerodynamic Simulation of Compressor Blade to Determine the Optimal Design for Solving a Fracture Problem	Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT)	2561/2561	In Progress
6. Evaluation and Improvement of Air Ventilation System inside Low Cost Automation (LCA) Line to Reduce Particle Contamination	Research and Researcher for Industry (RRI)	2560/2562	In Progress
7. Design and Development of Particle Suction Tool for Cleaning HDD Components	Research and Researcher for Industry (RRI)	2560/2562	In Progress
8. ANSYS Training and Technology Transfer of Computer Aided Engineering	Seagate Technology (Thailand) Ltd.	2560/2560	2560 Complete
9. CFD Analysis of Airflow through aircraft antennas	AVIA Satcom Co. Ltd.	2560/2560	2560 Complete
10. Using the CFD and Simple Experiment to Find a Solution of Particle Contamination in an HDD Production Line	College of Advanced Manufacturing Innovation	2560/2560	2560 Complete
11. Simulation of Ultrasonic Cleaning for Head Gimbal Assembly Cleaning Process	College of Advanced Manufacturing Innovation	2560/2560	2561 Complete
12. Investigation of Heat Transfer in Reflow Tip using Finite Element Method	Seagate Technology (Thailand) Ltd.	2560/2560	2561 Complete
13. Simulation, Validation and Evaluation of Cleaning Process in Ultrasonic Cleaning Tank	Seagate Technology (Thailand) Ltd.	2559/2560	2560 Complete
14. Finite Element Analysis of Micro-Gripper for Handling Slider of Hard Disk Drive	Research and Researcher for Industry (RRI)	2558/2560	2561 Complete
15. Airflow Simulation in Clean Room for Hard Disk Drive Manufacturing Process	Research and Researcher for Industry (RRI)	2558/2560	2561 Complete
16. An Experiment and Simulation	Seagate Technology	2558/2558	2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study of Airflow and Temperature Distribution in Seagate Teeparuk's Cleanroom	(Thailand) Ltd.		Complete
17. Thermal Study on a Printed Circuit Board (PCB) Applicable to Hard Disk Drive	Cal-Comp Electro (Thai) Pub. Co. Ltd.	2557/2559	2559 Complete
18. Study of Airflow Characteristics inside a Computer Case and Its Application for Reducing Particle Contamination using CFD	Cal-Comp Electro (Thai) Pub. Co. Ltd.	2557/2559	2559 Complete
19. Numerical investigation of airflow behavior inside a DSTAR clean room	Development and Promotion of Science and Technology Talents Project (DPST)	2557/2559	2559 Complete
20. Study of Vibration Characteristics of a Thai Traditional Brass Gong	College of Data Storage Innovation	2557/2558	2558 Complete
21. VENA Behavior Study Based on Hard Disk Drive Environment Test using FEM	Seagate Technology (Thailand) Ltd.	2557	2557 Complete
22. Airflow Simulation for Reflow, ULRT and ATAAP Machines using FEM	Seagate Technology (Thailand) Ltd.	2557	2557 Complete
23. Effect of Environment on Airflow Simulation in Hard Disk Drive	KMITL	2556	2558 Complete
24. Numerical Simulation of Particle Trajectory inside Automation	College of Data Storage Innovation	2556	2558 Complete
25. Parametric Study of Head Stack Assembly (HSA) Vibration Characteristics	KMITL, NSTDA and Seagate Technology (Thailand) Ltd.	2556	2558 Complete
26. Humidity and Temperature Behavior in VENA Chamber using FEM	Seagate Technology (Thailand) Ltd	2556	2556 Complete

International Publications

- [1] J. Thongsri. Comparison of k-e turbulent model for predicting airflow in 3.5-inch dual platter hard disk drive, in Proc. International Conference on Engineering Applied Science and Technology, Bangkok, Thailand, 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [2] J. Thongsri, V. Pongkom, A simulation of the Number of Particle Trapped by Circulating Filter of a Hard Disk Drive and Their Trajectories, *Appl. Mech. Mater.* Vol. 548-549, pp. 953-957, 2014.
- [3] J. Thongsri, W. Suksawaeng, Numerical Investigation of Airflow Behavior inside Environmental Chamber, *Adv. Mater. Res.* Vol. 931-932, pp.1048-1052, 2014.
- [4] J. Thongsri, V. Pongkom, Simulated Trajectories of Particles and the Number of Particles Trapped by the Circulating Filter in a Hard Disk Drive, *Adv. Mater. Res.* Vol. 931-932, pp.1058-1062, 2014.
- [5] J. Thongsri, A. Kaokom, Successful Simulation of Airflow in the Microenvironment of an Assembly Automation Machine and its Implication, *Adv. Mater. Res.* Vol. 931-932, pp.1063-1067, 2014.
- [6] J. Thongsri, Effect of Grain Size on Effective Permittivity of Ferroelectric Films based on Effective Medium Theory, *Appl. Mech. Mater.* Vols. 619, pp. 188-192, 2014.
- [7] J. Thongsri, M. Pimsarn, Optimum Airflow to Reduce Particle Contamination Inside Welding Automation Machine of Hard Disk Drive Production Line, *Int. J. Precis. Eng. Man.*, Vol. 16, No.3, pp. 509-515, 2015, IF=1.502
- [8] V. Puengkhom, J. Thongsri, M. Pimsarn, On Finite Element Modeling Aspect of HDD's Head Stack Assembly Vibration Analysis, Proc. The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering, Chiang Mai, Thailand, AMM055, 2014.
- [9] J. Thongsri, Numerical Investigation of Airflow inside an Environmental Chamber for HGA Mechanical Test and a Scheme for Improving the Flow, *Int. J. Adv. Appl. Sci.* Vol.2, No. 12, Pp. 51-56, 2015.
- [10] J. Thongsri, M. Pimsarn, W. Tangsopha, Using CFD to Find the Best Placement of HDD Production Machinery for Major Renovation of Factory Clean Room, *KKU Eng. J.*, Vol.43(2), pp. 250-253, 2016.
- [11] W. Tangsopha, J. Thongsri, W. Bussayaporn, Ultrasonic Cleaning and Ways to Improve the Efficiency, Proc. 5th International Electrical Conference (IEECON), 8-10 May, Pattaya, Thailand, pp. 121-124, 2017.
- [12] J. Thongsri, A Successful CFD-Based Solution to a Water Condensation Problem in a Hard Disk Drive Factory, *IEEE Access*, Vol. 5, No. 1, pp. 10795-10804, 2017, IF=3.224.
- [13] P. Boonkaew and J. Thongsri, Effect of clamp structure on the compressive force behavior based on finite element method, proc. 32nd International Technical Conference on Circuit/System, Computer and Communications (ITC, CSCC), 2-5 July, Busan, Republic of Korea, pp. 361-364, 2017
- [14] A. Khaokom and J. Thongsri, Feasibility study for installing machine in production line to avoid particle contamination based on CFD simulation, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 241, 012011, 2017.
- [15] A. Khaokom, J. Thongsri, P. Kaewkhaw, A CFD Investigation of Airflow in a Hard Disk Drive Production Line to Detect the Cause(s) of Contamination and Its Mitigation, The 3rd International Conference on Engineering Technology and Social Science (ICETSS), 7-8 August, Bangkok, Thailand, 2017.
- [16] J. Thongsri, A problem of particulate contamination in an automated assembly machine successfully solved by CFD and simple experiments, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2017, Article ID 6859852, pages 1-9, 2017, IF.0.802.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [17] P. Boonkaew, J. Thongsri, The optimum design of micro gripper for lifetime improvement based on fatigue analysis and six sigma analysis, *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 17, no. 20, pp. 10233-10241, 2017
- [18] J. Naosungnoen and J. Thongsri, Simulation of airflow in a cleanroom to solve contamination problem in an HDD production line, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotic Research*, vol. 7, no. 1, pp. 41-45, 2018.
- [19] W. Tangsopa, T. Keawklan, K. Kesngam, S. Ngaochai and J. Thongsri, Improved design of ultrasonic cleaning tank Using Harmonic Response Analysis in ANSYS, in Proc. The 4th International Conference on Environment and Renewable Energy (ICERE), 25-27 Feb. Da nang, Vietnam, 2018
- [20] J. Naosungnoen and J. Thongsri, Airflow and temperature simulation in a big clean room to reduce contamination in an HDD manufacturing factory, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 361, 012025, 2018.
- [21] T. Jansaengsuk, S. Po-ngern and J. Thongsri, Simulation of thermoelectric effect in reflow tip for hard disk drive factory, *The 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information (ECTI-CON)*, 18-21 July, Chiang Rai, Thailand, 2018
- [22] W. Tangsopa, J. Thongsri, Development of an industrial ultrasonic cleaning tank based on harmonic response analysis, *Ultrasonics*, vol. 91, pp. 68-76, 2019. (IF=2.377)

National Publications

- [1] J. Thongsri, Airflow simulation inside automation machine using Computational Fluid Dynamics and its Application for reducing particle contamination, *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 31, no. 1, pp. 1-6, 2014.
- [2] J. Thongsri, A. Khaokhom, W. Susuganjana, Numerical investigation of using airflow inside automation machine to reduce particle contamination for HDD manufacturing process, *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 3, no. 3, pp. 13-18, 2014.
- [3] T. Jansaengsuk, S. Po-ngern and J. Thongsri, Simulation and Investigation of heat transfer in a hotbar for hard disk drive factory, *the 10th ECTI-CARD*, 26-29 June, Pitsanulok, Thailand, 2018.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้