

การศึกษาการยกระดับสุรากลั่นชุมชนโดยใช้เทคโนโลยีอัลตราโซนิก

Study on the Enhancement of Community-Distilled Spirits Using Ultrasonic Technology

นพดล ภูสุม¹ จิตรลดา อินต๊ะนนท์¹ ธัญญา มุลอา¹ ประพิชญา ยะยม¹ อรัญญา สวัสดิ์สินธุ์¹ วัชรภรณ์ สิงห์หล้า¹ และ ธนกันต์ สวนกัน^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ph.nopphadon@gmail.com l.jitladaa@gmail.com
moonartananya21@gmail.com prapitchaya.yayom64@gmail.com s.orachanya@gmail.com watcharaphon1445@gmail.com
thanakarn.su@up.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและประเมินประสิทธิภาพของเทคโนโลยีคลื่นอัลตราโซนิกกำลังสูง ซึ่งถูกสร้างขึ้นจากระบบไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ในการปรับปรุงคุณภาพสุรากลั่นชุมชน โดยมุ่งเน้นการลดปริมาณสารคอนจีเนอรัส (Congeners) ที่เป็นอันตราย และเร่งกระบวนการบ่มสุรา การทดลองได้ประยุกต์ใช้ระบบอัลตราโซนิก 2 รูปแบบ ได้แก่ อ่างอัลตราโซนิก (Ultrasonic Bath) และหัวอัลตราโซนิก (Ultrasonic Probe) กับตัวอย่างสุรา 4 ชนิด รวมถึงสุรากลั่นชุมชนในท้องถิ่น เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและประสาทสัมผัส การวิเคราะห์เชิงปริมาณของสารคอนจีเนอรัสหลัก 3 ชนิด คือ Propan-1-ol, 2-methylbutan-1-ol และ 3-methylbutan-1-ol ดำเนินการด้วยเทคนิค Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพของกระบวนการขึ้นอยู่กับรูปแบบของระบบและคุณสมบัติของสุราแต่ละชนิดอย่างมีนัยสำคัญ โดยการบำบัดด้วยหัวอัลตราโซนิกสามารถลดความเข้มข้นของ Propan-1-ol ในสุรากลั่นชุมชนศรีช้างได้สูงสุดถึง 98.76% ในขณะที่การบำบัดด้วยอ่างอัลตราโซนิกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส สามารถเร่งกระบวนการบ่มสุราให้มีคุณลักษณะทางกลิ่นและรสชาติเทียบเท่ากับการบ่มแบบดั้งเดิมนาน 2-3 เดือนได้สำเร็จ บทสรุปของงานวิจัยชี้ว่าเทคโนโลยีอัลตราโซนิก ซึ่งมีการเลือกพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและการกำหนดค่าระบบอย่างเหมาะสม เป็นแนวทางที่มีศักยภาพและมีประสิทธิภาพในการยกระดับคุณภาพและมูลค่าเชิงพาณิชย์ของสุรากลั่นชุมชน

คำสำคัญ: สุรากลั่นชุมชน, สารคอนจีเนอรัส, เทคโนโลยีอัลตราโซนิก, คาเวเทชัน, แก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี

Abstract

This research aims to study and evaluate the efficiency of high-power ultrasonic technology, generated from different electrical systems, in improving the quality of community-distilled liquor. The focus is on reducing harmful congeners and accelerating the aging process. The experiment applied two types of ultrasonic systems, an Ultrasonic Bath and an Ultrasonic Probe, to four types of liquor samples, including local community-distilled spirits, to analyze chemical and sensory

changes. Quantitative analysis of three main congeners Propan-1-ol, 2-methylbutan-1-ol, and 3-methylbutan-1-ol was performed using Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS). The results indicate that the process efficiency significantly depends on the system configuration and the properties of each liquor type. Treatment with the Ultrasonic Probe achieved a maximum reduction of 98.76% in Propan-1-ol concentration in Khiri Khan community-distilled liquor. Meanwhile, treatment with the Ultrasonic Bath at temperatures below 25°C successfully accelerated the aging process, achieving aroma and taste characteristics equivalent to 2-3 months of traditional aging. The research concludes that ultrasonic technology, with appropriately selected electrical parameters and system configurations, is a potential and effective approach to enhance the quality and commercial value of community-distilled liquor.

Keywords: Community-distilled liquor, Congeners, Ultrasonic technique, Cavitation, Gas Chromatography-Mass Spectrometry

1. บทนำ

สุรากลั่นชุมชนเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและวัฒนธรรมของประเทศไทย โดยเฉพาะในภาคเหนือซึ่งมีอัตราการบริโภคสูงที่สุดในประเทศ [1] อย่างไรก็ตาม สุรากลั่นชุมชนส่วนใหญ่ยังคงประสบปัญหาด้านคุณภาพและความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญในการแข่งขันทางการค้า หนึ่งในปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อคุณภาพคือการมีอยู่ของสารประกอบพลอยได้ (By-Products) ที่เรียกว่า "คอนจีเนอรัส" (Congeners) เช่น เมทานอลและกลุ่มแอลกอฮอล์ฟูเซล (Fusel Alcohols) ซึ่งรวมถึง Propan-1-ol, 2-methylbutan-1-ol และ 3-methylbutan-1-ol เกิดขึ้นตามธรรมชาติในระหว่างกระบวนการหมักและกลั่น [2] สารเหล่านี้ส่งผลเสียต่อกลิ่นและรสชาติของสุรา ทำให้เกิดความรู้สึกปวดคอและยังมีความสัมพันธ์กับความรุนแรงของอาการเมาค้าง (Veisalgia) มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) ได้กำหนดปริมาณสูงสุดของสารเหล่านี้ไว้อย่างชัดเจนเพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภค [4] ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อลดปริมาณสารคอนจีเนอรัสจึงเป็นแนวทางสำคัญในการยกระดับคุณภาพสุรากลั่นชุมชน

ในปัจจุบันมีการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีทางเลือกหลากหลายรูปแบบเพื่อเร่งกระบวนการบ่มและปรับปรุงคุณภาพของเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ [3] เทคโนโลยีเหล่านี้รวมถึงการใช้สนามไฟฟ้าพัลส์ (Pulsed Electric Field, PEF) ซึ่งเป็นกระบวนการแบบไม่ใช้ความร้อนที่อาศัยหลักการอิเล็กโทรพอเรชัน (Electroporation) เพื่อเพิ่มการกักเก็บสารประกอบโพลีฟีนอลและปรับปรุงสีของไวน์[5] การใช้ไมโครเวฟ (Microwave) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปแบบของไมโครเวฟพัลส์กำลังสูง (High-Power Pulsed Microwave, HPPM) ซึ่งสามารถเร่งปฏิกิริยาการเกิดเอสเทอร์และลดปริมาณกรดบางชนิดในไวน์ผลไม้ได้[7] นอกจากนี้ยังมีการใช้รังสีแกมมา (Gamma Irradiation) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่ต้องสัมผัสกับผลิตภัณฑ์โดยตรงและไม่ใช้ความร้อน เพื่อส่งเสริมการก่อตัวของอนุมูลอิสระและเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน เทคโนโลยีอื่นๆ เช่น การเติมออกซิเจนในปริมาณน้อย (Micro-Oxygenation) และการใช้ความดันไฮโดรสแตติกสูง (High Hydrostatic Pressure) ก็ถูกนำมาใช้เพื่อวัตถุประสงค์เดียวกัน[3]

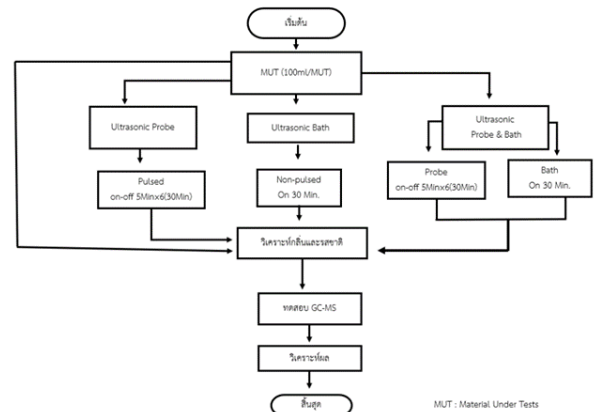
ท่ามกลางเทคโนโลยีเหล่านี้ เทคโนโลยีอัลตราโซนิกกำลังสูง (High-Power Ultrasonics) เป็นเทคโนโลยีเชิงกายภาพแบบไม่ใช้ความร้อน (Non-Thermal) ที่มีศักยภาพสูงในการแปรรูปอาหารและเครื่องดื่ม[9] หลักการทำงานพื้นฐานคือการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นเสียงความถี่สูง (โดยทั่วไปสูงกว่า 20 kHz) เมื่อคลื่นเสียงนี้แพร่กระจายผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลว จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ "คาวิเทชันอะคูสติก" (Acoustic Cavitation) ซึ่งคือการก่อตัว การขยายตัว และการยุบตัวอย่างรุนแรงของฟองอากาศขนาดเล็ก[11] การยุบตัวของฟองอากาศเหล่านี้จะสร้างสภาวะเฉพาะที่มีอุณหภูมิและความดันสูงมาก ส่งผลให้เกิดแรงเฉือนระดับจุลภาคและอนุมูลอิสระ ซึ่งสามารถขับเคลื่อนปฏิกิริยาเคมี (Sonochemistry) ที่นำไปสู่การแตกตัวของสารประกอบอินทรีย์ได้[11]

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบอัลตราโซนิก 2 รูปแบบที่แตกต่างกันในเชิงวิศวกรรมไฟฟ้า ได้แก่ อ่างอัลตราโซนิก และหัววัดอัลตราโซนิก รวมถึงหาคำแนะนำการทำงานทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน (แบบต่อเนื่องและแบบพัลส์) ต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารคอนเจเนอรัลและคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของสุรากลั่นชุมชนและสุราประเภทอื่น ๆ เพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุดในการปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์

2. ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลของคลื่นอัลตราโซนิกต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังแสดงในแผนผังรูปที่ 1 เริ่มจากการเตรียมสารตัวอย่างซึ่งเป็นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ 4 ชนิด ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมี (คีรีซาล, สุรากลั่นชุมชนอำเภอเมืองพะเยา (จำปาทอง), และสุราขาว 35 ดีกรี (ยี่ห้อข้าวหอม) โดยการเลือกใช้ชนิดนี้เป็นหนึ่งในตัวอย่างทดสอบนั้น มีเหตุผลเนื่องจากเป็นสุราที่ผ่านกระบวนการบ่มที่ซับซ้อนและมีปริมาณสารคอนเจเนอรัลหลายชนิดในปริมาณสูง จึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะใช้เป็น

ตัวอย่างอ้างอิง (benchmark) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของเทคโนโลยีอัลตราโซนิกในการลดสารประกอบเหล่านี้ เมื่อเปรียบเทียบกับเริ่มต้นที่สุรากลั่นชุมชนซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีที่ซับซ้อนน้อยกว่าจากนั้นนำตัวอย่างสุราแต่ละชนิดปริมาณ 100 มิลลิลิตร บรรจุในขวดแก้วที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว มาบำบัดด้วยระบบอัลตราโซนิก 2 ระบบ (ดังแสดงในรูปที่ 2) ที่มีการกำหนดค่าทางวิศวกรรมไฟฟ้าและลักษณะการส่งผ่านพลังงานที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังแสดงในตารางที่ 1 การเลือกกระบวนการระหว่างอ่าง (Bath) และหัววัด (Probe) เป็นการตัดสินใจเชิงวิศวกรรมที่สำคัญ



แผนผังรูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงาน



(ก)



(ข)

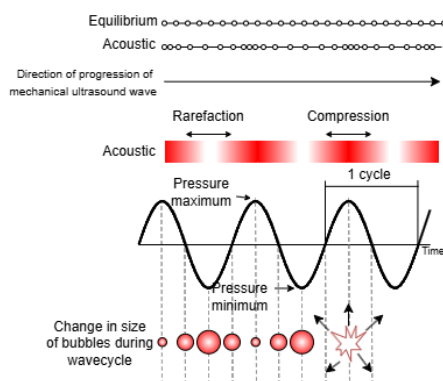
รูปที่ 2 เครื่องมืออัลตราโซนิก Probe (ก) และอัลตราโซนิก Bath (ข) เนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อรูปแบบของคาวิเทชันที่เกิดขึ้น หัววัดอัลตราโซนิกซึ่งส่งพลังงาน 80 W ไปยังพื้นที่ขนาดเล็ก ทำให้เกิดความหนาแน่นของพลังงานสูง ส่งผลให้เกิด Transient Cavitation ที่รุนแรงและมีประสิทธิภาพในการทำลายพันธะเคมี ในทางตรงกันข้าม อ่างอัลตราโซนิกที่ส่งพลังงาน 200 W กระจายไปทั่วปริมาตร 6 ลิตร ทำให้เกิดความหนาแน่นของพลังงานต่ำ ซึ่งนำไปสู่ Stable Cavitation ที่มีความรุนแรงน้อยกว่า แต่ส่งผลต่อปฏิกิริยาทางเคมีในรูปแบบที่แตกต่างออกไป[9] สำหรับการทดลองในอ่างอัลตราโซนิก จะมีการควบคุมอุณหภูมิของน้ำในอ่างไม่ให้เกิน 25 องศาเซลเซียส โดยใช้น้ำแข็ง

การควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในระดับต่ำที่ 25 องศาเซลเซียสเป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโซโนเคมี เนื่องจาก

อุณหภูมิมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลว เช่น ความดันไอและความหนืด หากอุณหภูมิสูงเกินไป ความดันไอที่เพิ่มขึ้นจะเข้าไปในฟองควิเทชัน ทำให้เกิด "ผลกระทบกันกระแทก" (cushioning effect) ซึ่งลดความรุนแรงของการยุบตัวของฟองอากาศ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเคมีลดลง[11] ในทางกลับกัน การรักษาอุณหภูมิให้ต่ำและคงที่ จะช่วยลดการระเหยของแอลกอฮอล์และสารประกอบที่ไวต่อความร้อนที่พึงประสงค์ และส่งเสริมให้เกิดการยุบตัวของฟองควิเทชันที่รุนแรงและมีประสิทธิภาพสูงสุดในการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของสสาร[13]

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและการปฏิบัติการของระบบอัลตราโซนิก

ข้อมูลจำเพาะทางไฟฟ้า	อ่างอัลตราโซนิก (Ultrasonic Bath)	หัวอัลตราโซนิก (Ultrasonic Probe)
กำลังไฟฟ้า (Power)	200 W	80 W
แรงดันไฟฟ้า (Voltage)	220-240 V, 50 Hz	220-240 V, 50 Hz
ความถี่ (Frequency)	40 kHz	40 kHz
โหมดการทำงาน		
รูปแบบคลื่น (Waveform)	ต่อเนื่อง (Non-pulsed)	พัลส์ (Pulsed, 5 นาที่ เปิด / 5 นาที่ ปิด)
การส่งผ่านพลังงาน	ทางอ้อม (ผ่านตัวกลางน้ำ)	โดยตรง (ผ่านปลายหัววัด)
กลไกทางฟิสิกส์		
ความหนาแน่นพลังงาน	ต่ำ (กระจายตัว)	สูง (เฉพาะจุด)
รูปแบบควิเทชัน (อนุมาณ)	Stable Cavitation	Transient Cavitation



รูปที่ 3 การทำงานของคลื่นอัลตราโซนิกในของเหลว

หัวใจสำคัญของเทคโนโลยีอัลตราโซนิกคือปรากฏการณ์ที่เรียกว่าควิเทชันอะคูสติก (Acoustic Cavitation) ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเสียงความถี่สูงเดินทางผ่านของเหลวทำให้เกิดวัฏจักรการอัด (compression) และการขยายตัว (rarefaction) สลับกันไป [11] ในช่วงการขยายตัวความดันในของเหลวจะลดลงอย่างรวดเร็วทำให้เกิดฟองอากาศหรือโพรงสุญญากาศขนาดเล็ก (cavitation bubbles) ขึ้นฟองอากาศเหล่านี้จะขยายขนาดขึ้นเรื่อยๆ จากการดูดซับพลังงานของคลื่นเสียงจนกระทั่งถึงจุดที่ไม่เสถียรและยุบตัวลง[12]อย่างรุนแรงในช่วงการอัดตัว[11]การยุบตัวนี้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและรุนแรงทำให้เกิดสภาวะเฉพาะที่ที่มีอุณหภูมิสูงถึง 5,000 เคลวินและความดันสูงถึง 1,000 บรรยากาศ [11] พร้อมทั้งสร้างคลื่นกระแทก (shock waves) และกระแสของเหลวระดับจุลภาค (micro-jets)

ที่มีความเร็วสูง[11]พลังงานมหาศาลที่ปลดปล่อยออกมานี้เองที่เป็นกลไกหลักในการขับเคลื่อนปฏิกิริยาเคมี (sonochemistry) และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพในตัวอย่างสสารในเชิงกลไกการถ่ายเทพลังงานอัลตราโซนิกจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังตัวอย่างสสารเป็นกระบวนการทางฟิสิกส์ที่ซับซ้อนเริ่มต้นที่ทรานสดิวเซอร์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Transducer) ซึ่งทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้า (Electrical Energy, P_e) ให้เป็นพลังงานกลในรูปแบบของการสั่นสะเทือนเชิงกลความถี่สูง (Acoustic Energy (P_a)) [14]

ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานนี้เรียกว่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้า-อะคูสติก (η_{ea}) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (1) [15]

$$\eta_{ea} = \frac{P_a}{P_e} \quad (1)$$

เมื่อพลังงานเสียงถูกสร้างขึ้นแล้ว จะต้องเดินทางผ่านตัวกลางต่างๆ ก่อนถึงตัวอย่างสสารประสิทธิภาพในการส่งผ่านพลังงานนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติที่เรียกว่า ความต้านทานเชิงเสียง (Acoustic Impedance, Z) ของแต่ละตัวกลาง ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2) [16]

$$Z = \rho c \quad (2)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง และ c คือความเร็วของเสียงในตัวกลางนั้น [16] ความแตกต่างของค่า Z ระหว่างตัวกลางสองชนิดจะเป็นตัวกำหนดปริมาณพลังงานที่จะถูกสะท้อนกลับและส่งผ่านไปซึ่งอธิบายความแตกต่างของระบบทั้งสองได้คือ ในระบบหัวอัลตราโซนิกพลังงานถูกส่งโดยตรงจากปลายหัววัดไปยังตัวอย่างสสารทำให้มีการสูญเสียพลังงานน้อยและมีความเข้มของพลังงานสูงในบริเวณเฉพาะจุด[6]ในขณะที่ระบบอ่างอัลตราโซนิกพลังงานต้องเดินทางผ่านตัวกลางหลายชั้น(น้ำในอ่าง,ผนังขวดแก้ว)ทำให้เกิดการสะท้อนและลดทอนของพลังงานส่งผลให้พลังงานที่ไปถึงตัวอย่างสสารมีความเข้มต่ำกว่าและกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ[6]ความเข้มของพลังงานอัลตราโซนิก (Acoustic Intensity, I) ที่ส่งไปยังของเหลวซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ขับเคลื่อนปรากฏการณ์ควิเทชัน สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (3) [17]

$$I = \frac{1}{2} \rho c (2\pi f \xi)^2 \quad (3)$$

โดยที่ f คือความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิก และ ξ คือแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนสมการนี้แสดงให้เห็นว่าความเข้มของพลังงานที่สูงขึ้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนซึ่งเป็นเหตุผลว่าทำไมหัวอัลตราโซนิกจึงมีประสิทธิภาพในการทำลายพันธะเคมีได้ดีกว่าหลังจากกระบวนการบำบัดเสร็จสิ้นการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของสารคอนจิวเนตในตัวอย่างสสารก่อนและหลังการบำบัด

ดำเนินการโดยใช้เทคนิค Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)[18] ก่อนการวิเคราะห์ ตัวอย่างทั้งหมดจะถูกกรองผ่าน Syringe Filter เพื่อกำจัดอนุภาคแขวนลอย[2] พารามิเตอร์ของ GC-MS ถูกตั้งค่าให้เหมาะสมกับการแยกและตรวจวัดสารประกอบแอลกอฮอล์ระเหยง่ายโดยใช้คอลัมน์ยาว 30 เมตรและแก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สพา[18]ผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่อง GCMS จะแสดงในรูปแบบของโครมาโทแกรม (Chromatogram) ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเป็นกราฟระหว่างความเข้มของสัญญาณ

(แกน Y) กับเวลาที่สารใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ หรือที่เรียกว่า เวลาการคงอยู่(RetentionTime) (แกนX)[19] สารแต่ละชนิดจะมีเวลาการคงอยู่ที่จำเพาะทำให้สามารถแยก และระบุชนิดของสารประกอบได้จากตำแหน่งของพีคบนกราฟจากนั้น ปริมาณของสารแต่ละชนิดจะถูกคำนวณจากพื้นที่ใต้พีค(PeakArea) ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของสารนั้นๆ[19]การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารจะถูกคำนวณเป็น ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ (Relative Change %) โดยใช้สมการดังนี้

$$RC(\%) = \frac{(C_{final}-C_{initial})}{C_{initial}} \times 100 \quad (4)$$

โดยที่ RC คือค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์, C_{final} คือความเข้มข้นสุดท้าย และ $C_{initial}$ คือความเข้มข้นเริ่มต้น

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลอภิปราย

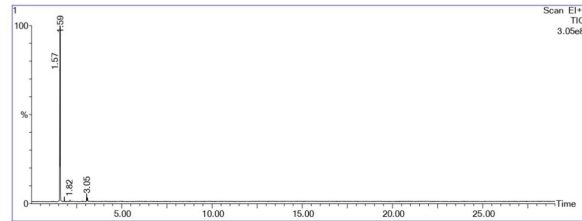
3.1 การวิเคราะห์เชิงปริมาณของสารคอนจินเนอส์

ตารางที่ 2 สรุปผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารคอนจินเนอส์หลัก 3 ชนิด หลังจากการบำบัดด้วยอัลตราโซนิคส์เป็นเวลา 30 นาที ผลลัพธ์ที่โดดเด่นที่สุดคือการบำบัดสุราศิริซาลด้วยหัววัดอัลตราโซนิคส์ (Probe) ซึ่งสามารถลดปริมาณ Propan-1-ol ได้ถึง 98.76% และ 2-methylbutan-1-ol ได้ 63.85% แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ *Transient Cavitation* ที่มีความหนาแน่นพลังงานสูงในการทำลายสารประกอบเหล่านี้ในเมทริกซ์ของสุรากรุ่นที่ไม่ซับซ้อนในทางตรงกันข้ามการบำบัดบรันดีซึ่งเป็นสุราที่มีความซับซ้อนทางเคมีสูงกว่าด้วยหัววัดอัลตราโซนิคส์กลับให้ผลตรงกันข้ามโดยทำให้ความเข้มข้นของ Propan-1-ol เพิ่มขึ้น 7.41% ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสภาวะรุนแรงของ *Transient Cavitation* อาจไปกระตุ้นปฏิกิริยาข้างเคียงที่ไม่พึงประสงค์ในเมทริกซ์ที่ซับซ้อนอย่างไรก็ตาม เมื่อใช้การบำบัดแบบผสมผสาน (Bath & Probe) กับบรันดีและสุราจำปาทองกลับให้ผลลัพธ์ในการลดสารคอนจินเนอส์ได้ดีที่สุดโดยสามารถลดสารทั้งสามชนิดในบรันดีได้พร้อมกันแสดงให้เห็นว่าการใช้ *Stable Cavitation* จากอ่างอัลตราโซนิคส์ในเบื้องต้นอาจช่วยปรับสภาพทางเคมีของสุราก่อนที่จะถูกบำบัดด้วย *Transient Cavitation* จากหัววัด ซึ่งนำไปสู่ผลลัพธ์โดยรวมที่ดีกว่าสำหรับสุราที่มีความซับซ้อนสูงผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าไม่มีวิธีการบำบัดแบบ "one-size-fits-all" การเลือกใช้ระบบอัลตราโซนิคส์ต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบทางเคมีเริ่มต้นของสุราแต่ละชนิด เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในการลดสารคอนจินเนอส์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

3.1 การวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า-เคมีของกระบวนการ

ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างการทำนายค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของระบบอัลตราโซนิคส์และผลลัพธ์ทางเคมีที่เกิดขึ้นในสุราแต่ละชนิด ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

3.2.1. หัววัดอัลตราโซนิคส์ (Probe): การส่งผ่านกำลังไฟฟ้า 80 วัตต์ โดยตรงไปยังพื้นที่ขนาดเล็ก ทำให้เกิดความหนาแน่นของพลังงานสูง



รูปที่ 4 กราฟระหว่างความเข้มข้นของสัญญาณGC-MS

ตารางที่ 2 ค่าการเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ (%) ของความเข้มข้นสารคอนจินเนอส์หลังการบำบัดด้วยอัลตราโซนิคส์

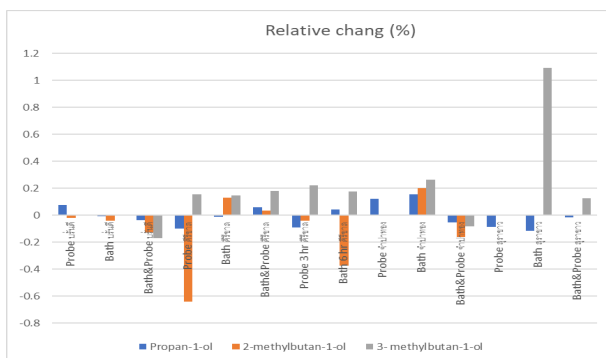
(Sample)	(Congener)	Treatment: Probe	Treatment: Bath	Treatment: Bath & Probe
บรันดี	Propan-1-ol	+7.41%	-0.86%	-3.74%
	2-methylbutan-1-ol	-	-	-17.12%
	3-methylbutan-1-ol	-1.91%	-4.04%	-12.95%
สุราศิริซาล	Propan-1-ol	-98.76%	-1.29%	+5.82%
	2-methylbutan-1-ol	-63.85%	+13.11%	+3.36%
	3-methylbutan-1-ol	+15.31%	+14.59%	+18.10%
จำปาทอง	Propan-1-ol	+12.14%	+15.60%	-5.20%
	2-methylbutan-1-ol	-	+26.43%	-8.25%
	3-methylbutan-1-ol	-	+20.05%	-16.31%
สุราขาว	Propan-1-ol	-8.52%	-11.57%	-1.35%
	3-methylbutan-1-ol	-	+109.37%	+12.72%

ซึ่งนำไปสู่ปรากฏการณ์ *Transient Cavitation* ที่รุนแรง การยุบตัวของฟองอากาศอย่างรวดเร็วสร้างสภาวะอุณหภูมิและความดันสูงเฉพาะจุดซึ่งมีพลังงานมหาศาลพอที่จะทำลายพันธะเคมีของสารประกอบอินทรีย์ได้ ในมุมมองทางเคมี พลังงานที่เข้มข้นนี้ส่งผลอย่างยิ่งต่อสุราศิริซาลซึ่งมีเมทริกซ์ไม่ซับซ้อน ทำให้สามารถลดปริมาณ Propan-1-ol และ 2-methylbutan-1-ol ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด อย่างไรก็ตาม ในกรณีของบรันดีซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีซับซ้อนกว่า พลังงานที่รุนแรงนี้กลับกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ไม่พึงประสงค์ ส่งผลให้ความเข้มข้นของ Propan-1-ol เพิ่มขึ้น สิ่งนี้ชี้ให้เห็นว่าการป้อนพลังงานไฟฟ้าในระดับสูงอาจไม่ใช่วิธีที่ดีที่สุดเสมอไป และผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับเมทริกซ์ทางเคมีของตัวกลางเป็นอย่างมาก ในการทดลองนี้ หัววัดอัลตราโซนิคส์ถูกใช้งานในโหมดพัลส์ (Pulsed mode) ซึ่งกำหนดจังหวะการทำงานแบบเปิด 5 นาที

สลับกับปิดพัก 5 นาที การทำงานแบบไม่ต่อเนื่องนี้เป็นกลยุทธ์สำคัญเพื่อควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างไม่ให้สูงเกินไป ป้องกันการสูญเสียกลืนรังสีที่พร้อมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพของปรากฏการณ์ควิเทนซึ่งเป็นกลไกหลักในการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และช่วยประหยัดพลังงาน ดังนั้น การทำงานแบบพัลส์จึงเป็นเทคนิคที่ช่วยให้เกิดการปรับปรุงคุณภาพทางเคมีอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ควบคู่ไปกับการรักษาคุณลักษณะอันพึงประสงค์ของสุราไว้

3.2.2. อ่างอัลตราโซนิก (Bath): แม้จะมีกำลังไฟฟ้าสูงถึง 200 วัตต์ แต่การส่งผ่านพลังงานเป็นไปอย่างทางอ้อมและกระจายตัวทั่วทั้งปริมาตร 6 ลิตร ทำให้เกิดความหนาแน่นของพลังงานต่ำ ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ Stable Cavitation ที่มีความรุนแรงน้อยกว่า ในเชิงเคมีพลังงานระดับนี้ไม่เพียงพอที่จะทำให้ลายพันธะของสารคอนจินเนอส์ได้อย่างมีนัยสำคัญในสุราทุกชนิด แต่ก็ไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่รุนแรงเช่นกัน จึงเหมาะสำหรับกระบวนการที่ต้องการการเปลี่ยนแปลงอย่างนุ่มนวลมากกว่าการทำลายโครงสร้างทางเคมีโดยตรง

3.3.3. การบำบัดแบบผสมผสาน (Bath & Probe): วิธีการนี้ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสำหรับสุราที่มีความซับซ้อนสูงอย่างบรันดีและสุราจำปาทอง ซึ่งชี้ให้เห็นถึงผลกระทบเชิงซ้อนระหว่างไฟฟ้าและเคมี การบำบัดด้วยอ่างอัลตราโซนิกในขั้นตอนแรกอาจทำหน้าที่เป็นการปรับสภาพ (pre-treatment) โดยใช้พลังงานต่ำเพื่อเปลี่ยนแปลงสภาวะทางเคมีของสุราอย่างนุ่มนวล อาจเป็นการสลายพันธะที่ซับซ้อนบางส่วนหรือปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของตัวทำละลาย ซึ่งเป็นการเตรียมเมทริกซ์ให้พร้อมสำหรับการบำบัดด้วยพลังงานสูงในขั้นตอนถัดไป จากนั้น เมื่อนำมาบำบัดด้วยหัวอัลตราโซนิก พลังงานที่เข้มข้นจาก Transient Cavitation จึงสามารถทำปฏิกิริยาต่อสารคอนจินเนอส์เป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพและจำเพาะเจาะจงมากขึ้น โดยไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ไม่พึงประสงค์ดังเช่นที่พบในการใช้หัววัดเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 5 เปรียบเทียบค่า Relative change ของสุรา

จากรูปที่ 5 ซึ่งแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของสารคอนจินเนอส์ในรูปแบบกราฟแท่ง ทำให้เห็นภาพรวมของประสิทธิภาพในแต่ละวิธีการบำบัดได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จะเห็นได้ว่าวิธีการบำบัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุคนั้นแตกต่างกันไปในแต่ละชนิดของสุรา สำหรับบรันดีและสุราจำปาทองซึ่งมีความซับซ้อนทางเคมี การบำบัดแบบผสมผสาน (Bath & Probe) ให้ผลดีที่สุดในการลดสารคอนจินเนอส์ทั้งสามชนิดพร้อมกัน ในขณะที่สุราศรีخالและสุรา

ขาวซึ่งมีองค์ประกอบไม่ซับซ้อน การบำบัดด้วยหัววัด (Probe) เพียงอย่างเดียวกลับให้ผลในการลดสาร Propan-1-ol ได้ดีที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ การแสดงผลด้วยกราฟนี้ช่วยยืนยันข้อสรุปที่ว่า การเลือกเทคนิคการบำบัดด้วยอัลตราโซนิกจำเป็นต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับคุณลักษณะเฉพาะของสุราแต่ละชนิด เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

3.2 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพและการเร่งกระบวนการบ่ม

นอกเหนือจากการลดสารพิษแล้ว หนึ่งในผลประโยชน์ที่สำคัญที่สุดของงานวิจัยนี้คือการค้นพบว่าเทคโนโลยีอัลตราโซนิกสามารถเร่งกระบวนการบ่มสุราได้ จากการประเมินทางประสาทสัมผัสร่วมกับผู้ประกอบการสุรากลั่นชุมชน พบว่าการบำบัดด้วยหัวอัลตราโซนิกให้ผลลัพธ์ที่ไม่เป็นที่ยอมรับ โดยทำให้เกิดรสชาติที่บาดคอและกลิ่นของวัตถุดิบหลักหายไป ในทางกลับกัน การบำบัดด้วยอ่างอัลตราโซนิก (Ultrasonic Bath) ที่ควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 25 องศาเซลเซียส ให้ผลลัพธ์ที่เป็นที่น่าพอใจอย่างยิ่ง โดยพบว่าการบำบัดเป็นเวลา 3 ชั่วโมงสามารถให้กลิ่นหอมของข้าวที่ชัดเจน เทียบเท่ากับการบ่มแบบดั้งเดิมนาน 2-3 เดือน ในขณะที่การบำบัดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ให้รสชาติที่ดีที่สุด มีความขมน้อยลงและหวานปลายลิ้นตามที่ผู้ประกอบการต้องการ ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่แสดงให้เห็นว่าคลื่นอัลตราโซนิกสามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันและเอสเทอริฟิเคชันที่เกิดขึ้นระหว่างการบ่ม ซึ่งช่วยพัฒนากลิ่นและรสชาติของเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ให้มีความนุ่มนวลและซับซ้อนขึ้นในระยะเวลาที่สั้นลงอย่างมาก การค้นพบนี้แสดงให้เห็นถึงความจำเป็นในการสร้างสมดุลระหว่างการลดสารเคมีที่ไม่พึงประสงค์และการปรับปรุงคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ต้องการ ซึ่งสำหรับสุรากลั่นชุมชนแล้ว การบำบัดด้วยอ่างอัลตราโซนิกที่สภาวะควบคุมถือเป็นแนวทางที่เหมาะสมที่สุด

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้พิสูจน์ให้เห็นว่าเทคโนโลยีอัลตราโซนิกเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพสุรากลั่นชุมชน โดยสามารถลดปริมาณสารคอนจินเนอส์และเร่งกระบวนการบ่มได้อย่างมีนัยสำคัญ การเลือกใช้ระบบที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสุราและเป้าหมายที่ต้องการ สำหรับการลดสารคอนจินเนอส์ในสุราที่ไม่ซับซ้อน การใช้หัวอัลตราโซนิก (Probe) ให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยสามารถลด Propan-1-ol ได้ถึง 98.76% ในขณะที่การบำบัดแบบผสมผสาน (Bath & Probe) เหมาะสำหรับสุราที่มีความซับซ้อนสูง เช่น บรันดี โดยสามารถลดสารคอนจินเนอส์ได้หลายชนิดพร้อมกัน ในด้านการเร่งกระบวนการบ่ม การใช้อ่างอัลตราโซนิก (Bath) ที่อุณหภูมิต่ำ สามารถพัฒนากลิ่นและรสชาติให้เทียบเท่ากับการบ่มแบบดั้งเดิม 2-3 เดือนได้ภายในเวลาเพียง 3-5 ชั่วโมง ดังนั้น การเลือกใช้เทคโนโลยีอัลตราโซนิกอย่างเหมาะสมจึงเป็นแนวทางที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพสำหรับผู้ผลิตสุรากลั่นชุมชนในการยกระดับคุณภาพและมูลค่าของผลิตภัณฑ์

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา และผู้ประกอบการสุรากลั่นชุมชนศรีช้าง อำเภอลี้ จังหวัดพะเยา สำหรับการอนุเคราะห์ตรวจสอบและให้ตัวอย่างสำหรับทดสอบ รวมถึงทุนสนับสนุนการพัฒนานวัตกรรมเชิงพาณิชย์ตามแนวคิดโมเดล BCG ประจำปีงบประมาณ 2568

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์ความเป็นเลิศด้านวิทยาศาสตร์ข้อมูลเพื่อวิทยาการสุขภาพ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์, "แสดงสถิติผู้ที่ตีพิมพ์ในประเทศไทย คิดเป็นเปอร์เซ็นต์," 2564. [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ: 2 ก.พ. 2567
- [2] L. Cai, S. Rice, J. A. Koziel, W. S. Jenks, and J. H. Van Leeuwen, "Further purification of food-grade alcohol to make a congener-free product," *J. Inst. Brew.*, vol. 122, no. 1, pp. 84-92, 2016, doi: 10.1002/jib.295.
- [3] R. T. Krüger, A. Alberti, and A. Nogueira, "Current Technologies to Accelerate the Aging Process of Alcoholic Beverages: A Review," *Beverages*, vol. 8, no. 4, p. 65, 2022, doi: 10.3390/beverages8040065.
- [4] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, "มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน สุรากลั่นชุมชน (มผช. 32/2567)," 2567. [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ: 18 พ.ย. 2567.
- [5] N. I. Barba, N. Grimi, and E. Vorobiev, "Pulsed electric fields as a grape-destemming method: The effect on the phenolic composition and chromatic characteristics of syrah red wines," *Food Chem.*, vol. 310, p. 125916, 2020, doi: 10.1016/j.foodchem.2019.125916.
- [6] J. Li, F. Liu, Y. Wang, and Z. Zhang, "The state-of-the-art research of the application of ultrasound to winemaking: A critical review," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 101, p. 106673, 2023, doi: 10.1016/j.ultsonch.2023.106673.
- [7] Y. Wang, et al., "High-power pulsed microwave accelerated aging of blueberry wine," *Front. Nutr.*, vol. 8, p. 766576, 2021, doi: 10.3389/fnut.2021.766576.
- [8] J. A. M. Pereira, et al., "Gamma irradiation for accelerating the aging of wines: A review," *Food Res. Int.*, vol. 107, pp. 166-173, 2018, doi: 10.1016/j.foodres.2018.02.023.
- [9] Q.-A. Zhang, et al., "Ultrasound as an effective technique to reduce higher alcohols of wines and its influencing mechanism investigation by employing a model wine," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 61, p. 104813, 2020, doi: 10.1016/j.ultsonch.2019.104813.
- [10] M. Singla and N. Sit, "Application of ultrasound in combination with other technologies in food processing: A review," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 73, p. 105506, 2021, doi: 10.1016/j.ultsonch.2021.105506.
- [11] F. Chemat, et al., "Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 34, pp. 540-560, 2017, doi: 10.1016/j.ultsonch.2016.06.035.
- [12] I. Majid, G. A. Nayik, and V. Nanda, "Ultrasonication and food technology: A review," *Cogent Food Agric.*, vol. 1, no. 1, p. 1071022, 2015, doi: 10.1080/23311932.2015.1071022.
- [13] Y. Deng, et al., "Combined ultrasound and low temperature pretreatment improve the content of anthocyanins, phenols and volatile substance of Merlot red wine," *LWT*, vol. 154, p. 112739, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.lwt.2021.112739.
- [14] G. A. Nayik, I. Majid, and V. Nanda, "A Comprehensive Review of Piezoelectric Ultrasonic Motors: Classifications, Characterization, Fabrication, Applications, and Future Challenges," *Micromachines*, vol. 15, no. 9, p. 1170, 2024, doi: 10.3390/mi15091170.
- [15] J. Kim and J. S. Lee, "Acoustic and Thermal Characterization of Therapeutic Ultrasonic Langevin Transducers under Continuous- and Pulsed Wave Excitations," *Sensors*, vol. 22, no. 23, p. 9049, 2022, doi: 10.3390/s22239049.
- [16] A. K. P. Kumar and P. S. T. D. S. Kumar, "Sonochemistry: The effect of sonic waves on chemical systems," *J. Chem. Pharm. Res.*, vol. 7, no. 4, pp. 1366-1371, 2015.
- [17] Y. Mao, et al., "The acoustic velocity and intensity fields of rotating sound sources," *Acta Acust.*, vol. 107, no. 1, pp. 66-78, 2021.
- [18] G. E. Martin, J. M. Burggraff, R. H. Dyer, and P. C. Buscemi, "Gas-Liquid Chromatographic Determination of Various Congeners in Alcoholic Products," *J. Assoc. Off. Anal. Chem.*, vol. 64, no. 1, pp. 186-190, 1981.
- [19] P. Wisniewska, T. Dymerski, W. Wardencki, and J. Namiesnik, "Application of Gas Chromatography to Analysis of Spirit-Based Alcoholic Beverages," *Crit. Rev. Anal. Chem.*, vol. 45, no. 3, pp. 201-225, 2015, doi: 10.1080/10408347.2014.945898.