BSJ
BURAPHA SCIENCE JOURNAL
ISSN 2985-0983 (online)

วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ 30 (ฉบับที่ 1) มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2568
BURAPHA SCIENCE JOURNAL Volume 30 (No.1) January – April 2025 บทความวิจัย

# ผลของการแปรรูปด้วยความร้อนและคลื่นเสียงความถี่สูงต่อคุณภาพบางประการของน้ำมะเกี๋ยง (*Cleistocalyx nervosum* var. *paniala*)

# Effects of Heat and Ultra-Sonic Processing on Some Qualities of *Ma-Kiang* (*Cleistocalyx nervosum* var. *paniala*) Juice

ศุภวัฒน์ นามคำ[1], สุทธิพงศ์ ยุสเปรมานนท์[2], จรัสสินี สุวีรานนท์[3] และ พิทยา ใจคำ[4*]

Supawat Namkham[1], Suttipong Yutsapremanon[2], Jaratsinee Suweeranon[3] and Pittaya Chaikham[4*]

[1]*สาขาวิชาการโรงแรม คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ประเทศไทย*

[2]*สาขาวิชาธุรกิจอาหาร คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ประเทศไทย*

[3]*สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา ประเทศไทย*

[4]*สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และการจัดการเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา ประเทศไทย*

[1]*Division of Hospitality, Faculty of Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand*

[2]*Division of Food Business, Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand*

[3]*Division of Home Economics, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University, Thailand*

[4]*Division of Food Science and Technology Management, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University, Thailand*

Received : 27 January 2025, Received in revised form : 11 February 2025, Accepted : 12 February 2025

Available online : 3 March 2025

## บทคัดย่อ

**วัตถุประสงค์และที่มา** : *Cleistocalyx nervosum* var. *paniala* ซึ่งรู้จักกันในชื่อ “มะเกี๋ยง” อยู่ในวงศ์ Myrtaceae พืชชนิดนี้ เป็นต้นไม้ขนาดเล็กถึงขนาดกลางที่พบในเขตร้อนและเขตร้อนชื้น โดยเฉพาะในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เป็นพืชที่ได้รับความสนใจเนื่องจากเป็นผลไม้ที่กินได้และอุดมไปด้วยสารชีวภาพที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพหลายประการ อาทิเช่น สารต้านอนุมูลอิสระและสารต้านการอักเสบ การแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (ultra-sonic processing) โดยปกติจะอยู่ในช่วงคลื่นความถี่ 20 กิโลเฮิร์ต ถึงหลายเมกะเฮิร์ต เพื่อสร้างคลื่นความถี่ที่เข้มข้นภายในตัวกลางที่เป็นของเหลว เทคนิคนี้มีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหารอย่างมาก รวมถึงการผลิตน้ำผลไม้ เนื่องจากสามารถปรับปรุงในด้านการสกัด ด้านรสชาติและช่วยยืดอายุการเก็บรักษาอาหารได้ดียิ่งขึ้น แรงเฉือนที่รุนแรงและความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงยังสามารถทำลายหรือยับยั้งจุลินทรีย์ (แบคทีเรีย ยีสต์ และรา) ในน้ำผลไม้ได้ ทำให้คุณภาพทางจุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์ดีขึ้นและช่วยยืดอายุการเก็บรักษา อย่างไรก็ตามขึ้นอยู่กับความเข้มข้น ระยะเวลา และความถี่ของคลื่นเสียงความถี่สูงที่ใช้ ในภาพรวมการใช้ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการแปรรูปน้ำผลไม้ เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่สามารถคงรักษาสารสำคัญและประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระของน้ำผลไม้ไว้ได้ดีกว่าการแปรรูปด้วยความร้อน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงต่อคุณภาพด้านต่าง ๆ ของเครื่องดื่มน้ำมะเกี๋ยงเปรียบเทียบกับการแปรรูปด้วยความร้อน

**วิธีดำเนินการวิจัย** : ในการเตรียมน้ำมะเกี๋ยงทำได้โดยนำผลมะเกี๋ยงล้างทำความสะอาดและสะเด็ดน้ำออก จากนั้นนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนนำไปแปรรูป การสกัดน้ำมะเกี๋ยงทำได้โดยนำผลมะเกี๋ยงมาสกัดด้วยเครื่องคั้นน้ำผลไม้ ปรับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (total soluble solids) เท่ากับ 16 องศาบริกซ์ด้วยน้ำตาลฟรุกโตส นำน้ำมะเกี๋ยงที่เตรียมได้มาแปรรูปด้วยเครื่อง High Intensity Ultra-Sonic Processor โดยใช้ความถี่คลื่นเสียงที่ 20 กิโลเฮิร์ต ผันแปรระดับความเข้มของคลื่นความถี่เสียงตั้งแต่ 20 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 30 นาที สำหรับการแปรรูปด้วยความร้อน นำน้ำมะเกี๋ยงที่เตรียมได้มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นทำให้เย็นทันทีโดยการแช่ในอ่างน้ำผสมน้ำแข็ง เป็นเวลา 5 นาที นำตัวอย่างที่ผ่านการแปรรูปทั้งหมดไปเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปวิเคราะห์คุณภาพ วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและเคมีของตัวอย่าง ได้แก่ ค่าสี เช่น *L* (ค่าความสว่าง), *a** (ค่าความเป็นสีแดง/ค่าความเป็นสีเขียว), *b** (ค่าความเป็นสีเหลือง/ค่าความเป็นสีน้ำเงิน), *C** (ค่าความเข้มของสี) และค่าความแตกต่างของสีทั้งหมด ($\Delta E$) ค่าความหนืด ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ทั้งหมด (total titratable acidity) เพื่อศึกษาประโยชน์ต่อสุขภาพของตัวอย่างจึงได้ดำเนินการวิเคราะห์หาปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมด ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging activity, ferric-reducing antioxidant power (FRAP) และ 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ($ABTS^{\bullet+}$) radical scavenging activity รวมทั้งวิเคราะห์หาค่ากิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase, PPO) และเปอร์ออกซิเดส (peroxidase, POD) และคำนวณหาปริมาณของเอนไซม์ทั้ง 2 ชนิดที่หลงเหลืออยู่ นอกจากนั้นเพื่อความปลอดภัยในการบริโภคจึงได้ทำการวิเคราะห์หาจำนวนจุลินทรีย์บ่งชี้ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนสำหรับน้ำมะเกี๋ยง (มผช. 484/2557) ได้แก่ จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา แบคทีเรียโคลิฟอร์ม *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus* และ *Clostridium perfringens* อีกด้วย

**ผลการวิจัย** : จากผลการทดลอง พบว่า ค่าความสว่าง (*L*) ของน้ำมะเกี๋ยงมีค่าลดลงหลังจากผ่านการแปรรูปด้วยความร้อนและคลื่นเสียงความถี่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมะเกี๋ยงสด (ชุดควบคุม) และจะเห็นได้ชัดว่าเมื่อระดับความเข้มของคลื่นความถี่เสียงเพิ่มขึ้นค่าสี *L* จะมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ น้ำมะเกี๋ยงที่แปรรูปด้วยความร้อนมีค่าความเป็นสีแดง (*a**) ต่ำที่สุด และมีค่าความเป็นสีเหลือง (*b**) สูงที่สุด สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงพบว่า ค่าสี *a** และค่าสี *b** ของตัวอย่างมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มของคลื่นความถี่เสียงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์สอดคลองกับค่าความเข้มของสี (*C**) และค่าความแตกต่างของค่าสีทั้งหมด ($\Delta E$) ในตัวอย่าง ค่าความหนืด ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ค่า pH และปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ทั้งหมดของน้ำมะเกี๋ยงที่ผ่านการแปรรูปด้วยความร้อนและคลื่นเสียงความถี่สูงที่ระดับต่าง ๆ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแปรรูป การแปรรูปด้วยวิธีการนี้มีผลต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแปรรูปด้วยความร้อน และตัวอย่างที่ผ่านการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงยังคงมีปริมาณสารสำคัญต่าง ๆ (แอนโธไซยานิน และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด) และประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ (วิธี DPPH, FRAP และ $ABTS^{\bullet+}$) ในระดับที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างสด และมีปริมาณมากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการแปรรูปด้วยความร้อน กิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสและเปอร์ออกซิเดสในตัวอย่างมีค่าลดลงหลังจากผ่านการแปรรูป นอกจากนั้นยัง

พบว่าการแปรรูปด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที และการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงที่ระดับความเข้มของคลื่นความถี่เสียง 80 เปอร์เซ็นต์ สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ชี้วัดในด้านสุขาภิบาลและความปลอดภัยของน้ำมะเกี๋ยงให้มีจำนวนน้อยกว่าที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกำหนด (มผช. 484/2557)

**สรุปผลการวิจัย** : จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า การแปรรูปน้ำมะเกี๋ยงด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงที่ 20 กิโลเฮิร์ต ระดับความเข้มของคลื่นความถี่เสียง 80 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 20 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถคงรักษาคุณภาพด้านต่าง ๆ และสารสำคัญ รวมทั้งประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระของผลิตภัณฑ์เอาไว้ได้ดีกว่าการแปรรูปภายใต้สภาวะอื่น ๆ นอกจากนั้นในภาพรวมสามารถกล่าวได้ว่าการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการแปรรูปน้ำผลไม้ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ได้ สำหรับการวิจัยในอนาคตอาจจะต้องมีการประเมินทางประสาทสัมผัสก่อนนำเทคโนโลยีไปต่อยอดในเชิงอุตสาหกรรม รวมทั้งต้องศึกษาผลของการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงต่ออายุการเก็บรักษา และสารสำคัญอื่น ๆ ในมะเกี๋ยงอีกด้วย

**คำสำคัญ** : น้ำมะเกี๋ยง ; การแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง ; สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ; ความปลอดภัยทางอาหาร

## Abstract

**Background and Objectives** : *Cleistocalyx nervosum* var. *paniala*, commonly known as "*Ma-Kiang*" in Thailand, belongs to the family Myrtaceae. This plant is a small to medium-sized tree found in tropical and subtropical regions, particularly in Southeast Asia. It has gained attention for its edible fruits and bioactive compounds, which are associated with various health benefits. Its fruits and extracts hold promise in health applications, particularly as natural antioxidants and anti-inflammatory agents. Ultra-sonic processing involves the use of high-frequency sound waves (20 kHz to several MHz) to generate intense pressure waves within a liquid medium. This technique has found significant applications in food processing, including fruit juice production, due to its ability to improve extraction, enhance flavor, and promote better preservation. The intense shear forces and heat generated during ultrasonication can also inactivate microorganisms (bacteria, yeasts, and molds) in fruit juices, improving the microbiological quality and extending shelf life. This, however, depends on the intensity, duration, and frequency of the ultrasound treatment. Ultra-sonic processing is considered another option for fruit juice processing, as it is a novel technology that can better preserve the bioactive compounds and antioxidant efficiency of the juice compared to heat processing. Therefore, this research aimed to investigate the effects of ultra-sonic processing on various qualities of *Ma-Kiang* juice compared to heat processing.

**Methodology** : To prepare *Ma-Kiang* juice, fresh *Ma-Kiang* fruits were harvested, washed and drained before refrigeration at 6ºC for 2 h before processing. The extraction of *Ma-Kiang* juice was done by extracting the *Ma-Kiang* fruits using a juicer extractor. Total soluble solids of the extracted juice were adjusted to 16ºBrix with fructose. *Ma-Kiang* juice was processed using a High Intensity Ultra-Sonic Processor with a frequency of 25

kHz and 20–80% amplitude for 30 min and heated at 80ºC for 2 min, then immediately cool it by immersing it in an ice-water bath for 5 min. All processed samples were stored at 4ºC prior to analyzing their qualities. Physico-chemical qualities of the treated samples including color parameter, *viz. L* (brightness), *a** (redness/greenness), *b** (yellowness/blueness), *C** (chroma) and total different colors ($\Delta E$), viscosity, total soluble solids, pH and total titratable acidity (TTA) were investigated. To study the health benefits, total anthocyanin content, total phenolic compounds, and antioxidant capacity, *viz*. 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical-scavenging activity, ferric-reducing antioxidant power (FRAP), and 2,2'-Azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ($ABTS^{\bullet+}$) radical scavenging activity were also assessed. Polyphenol oxidase (PPO) and peroxidase (POD) activities in the samples were monitored, and the residual of both enzymes were then calculated. According to the Thai Community Product Standard for *Ma-Kiang* juice (TCPS. 484/2014), some indicator microorganisms, *viz.* total plate counts, yeasts and molds, coliform bacteria, *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus* and *Clostridium perfringens*, were determined.

**Main Results** : From the experimental results, it was found that the brightness value (*L*) of the processed *Ma-Kiang* juice decreased after being treated with heat and high-frequency sound waves compared to fresh *Ma-Kiang* juice (control). It was noticed that when the intensity levels of the ultrasonic frequency increased, the *L* values of the samples significantly decreased. The heated *Ma-Kiang* juice had the lowest redness (*a**) and the highest yellowness (*b**). For ultrasonic treated samples, the *a** and *b** values tended to increase when the frequency intensity levels rose, which correlated with the values of color intensity (*C**) and total different colors ($\Delta E$) in the samples. The viscosity, total soluble solids, pH, and total titratable acidity of the processed *Ma-Kiang* juice using heat and ultra-sonic processing at different frequency intensity levels showed no statistically significant differences when compared to the unprocessed samples. Samples processed with ultrasonication still retained high levels of bioactive compounds (total anthocyanins and total phenolic compounds) and antioxidant capacity (DPPH, FRAP, and $ABTS^{\bullet+}$ assays) compared to fresh samples, and they contained more than that processed by heat. The activities of polyphenol oxidase and peroxidase in the samples decreased after processing. Additionally, it was found that heat processing at a temperature of 80ºC for 2 min and ultrasonication at an intensity level of 80% could inhibit indicator microorganisms related to the sanitation and safe consumption of *Ma-Kiang* juice, bringing their numbers below the standards set by the Thai Community Product Standard (TCPS. 484/2014).

**Conclusions** : From this experimental research, it can be summarized that processing *Ma-Kiang* juice with ultra-sonication at 20 kHz, with an intensity level of 80% for 20 minutes, was the most optimal condition. This method can better preserve various qualities and bioactive compounds, as well as the antioxidant efficiency of the product, compared to processing under other conditions. Additionally, it can be suggested that ultra-sonic

processing was another option for fruit juice processing and can be commercially utilized. For future research, sensory evaluation may be required before the technology is further developed industrially, and the effects of ultra-sonic processing on the shelf life and other bioactive compounds in *Ma-Kiang* juice should also be studied.

**Keywords** : *Ma-Kiang* juice ; ultra-sonic processing ; bioactive compounds ; food safety

***Corresponding author. E-mail** : pittaya.chaikham@gmail.com

## Introduction

มะเกี๋ยงเป็นไม้ยืนต้นที่พบในเขตจังหวัดภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย อยู่ในวงศ์ Myrtaceae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Cleistocalyx nervosum* var. *paniala* ผลสุกแก่เต็มที่มีสีน้ำตาลแดงถึงสีดำเข้ม ช่วงเวลาเก็บเกี่ยวจะอยู่ในเดือนกรกฎาคมถึงสิงหาคม ผลสุกเต็มที่มีรสหวานอมเปรี้ยวและฝาดปนกัน น้ำคั้นที่ได้จากผลสุกจะมีสีม่วงแดงเข้ม ซึ่งเป็นสีของรงควัตถุแอนโธไซยานิน และทนต่อการเปลี่ยนสีจากกระบวนการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร มะเกี๋ยงมีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีสารอาหารที่จำเป็นต่อความต้องการของร่างกายหลายชนิด เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก วิตามิน เช่น A (เบต้า-แคโรทีน), $B_1$, $B_2$ และ E) พบสารสำคัญในมะเกี๋ยงเป็นสารในกลุ่มฟลาโวนอยด์ (flavonoids) จัดเป็นสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งช่วยป้องกันโรคหลอดเลือดหัวใจอุดตัน เนื่องจากสารนี้ช่วยในการกระตุ้นการเพิ่มระดับของ HDL (High Density Lipoprotein) ในกระแสเลือด ซึ่ง HDL จะทำหน้าที่ทำลายไขมันที่เกาะตามผนังหลอดเลือด ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดโรคหลอดเลือดหัวใจอุดตัน ในส่วนเปลือกของมะเกี๋ยงพบสารในกลุ่มโพลีฟีนอล (polyphenols) และแทนนิน (tannin) ซึ่งเป็นสารกลุ่มเดียวกับที่พบในเปลือกและเมล็ดองุ่น สารกลุ่มนี้ทำหน้าที่จับกับสารกระตุ้นการเกิดมะเร็งที่เป็นอนุมูลอิสระทำให้ป้องกันการเกิดโรคมะเร็งได้ (Prasanth *et al*., 2019; Thuschana *et al*., 2020; Kerdsup *et al*., 2022) ผลมะเกี๋ยงมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดประมาณ 269 mg GAE/100 g (Patthamakanokporn *et al*., 2008) และน้ำมะเกี๋ยงที่มีสีแดงเข้มจะมีกรดซิตริกเป็นส่วนประกอบประมาณ 0.45 เปอร์เซ็นต์ของกรดทั้งหมด ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 2.93 และมีปริมาณแอนโธไซยานินประมาณ 50 mg/L ซึ่งถือว่ามีปริมาณสูงมาก (Phupinyokul, 2016) มะเกี๋ยงปกตินิยมบริโภคทั้งในรูปผลสดและผลดอง ผลมะเกี๋ยงสุกสามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารได้หลายชนิด เช่น ไวน์ น้ำผลไม้ แยม และเนคต้า เป็นต้น

การผลิตเครื่องดื่มจากมะเกี๋ยงในเชิงพาณิชย์จำเป็นต้องทำการยืดอายุการเก็บรักษาให้สามารถจำหน่ายได้ในช่วงเวลาที่ยาวนานขึ้น กระบวนการยืดอายุหรือการถนอมอาหารที่มีประสิทธิภาพต้องสามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในระดับที่มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค และสามารถถนอมสารสำคัญต่าง ๆ ไว้ได้ โดยวิธีดั้งเดิมที่นิยมใช้ในการแปรรูปน้ำผลไม้จะเป็นกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60-100 องศาเซลเซียส เพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสียและจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค ถึงแม้ว่าวิธีดังกล่าวจะช่วยลดจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายและยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ แต่มีผลทำให้คุณค่าทางโภชนาการ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไปโดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านรสชาติ เทคนิคที่มีศักยภาพสูงควรเป็นกระบวนการที่ไม่ใช้ความร้อนหรือใช้ความร้อนในระดับต่ำ เช่น การแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (ultra-sonic processing) เทคโนโลยีการแปรรูปอาหารด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงหรือคลื่นอัลตราโซนิค เป็นการใช้คลื่นเสียง

ที่มีความถี่สูงเกินกว่าระดับการได้ยินของมนุษย์หรือมากกว่า 20 กิโลเฮิร์ตซ์ขึ้นไป ซึ่งเป็นคลื่นที่มีทิศทางที่แน่นอน ทำให้สามารถกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของคลื่นไปยังเป้าหมายได้อย่างเฉพาะเจาะจง คลื่นความถี่นี้นิยมนำมาใช้กับตัวกลางที่เป็นของเหลวเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศ และการสั่นสะเทือนระดับจุลภาคในอาหาร ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวลและพลังงานขึ้น จึงเป็นประโยชน์อย่างยิ่งเมื่อนำมาใช้กับกระบวนการแปรรูปอาหารที่ต้องการให้เกิดการสูญเสียคุณภาพน้อยที่สุด (Chaikham & Prangthip, 2015; Chaikham *et al*., 2016a; Lepaus *et al*., 2023; Roobab *et al*., 2023) การแปรรูปน้ำผลไม้ด้วยวิธีนี้สามารถกำจัดจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถรักษาสี กลิ่น และรสชาติของอาหาร รวมทั้งคุณค่าทางโภชนาการ เช่น วิตามิน และสารออกฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาต่าง ๆ ได้ดี และมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค ดังนั้นเทคโนโลยีนี้จึงถือว่าเป็นทางเลือกใหม่สำหรับใช้ในกระบวนการผลิตเครื่องดื่มบำรุงสุขภาพ (Chaikham *et al*., 2016b; Bhat & Goh, 2017; Nadeem *et al*., 2022; Zhu *et al*., 2022; Hasheminya & Dehghannya, 2022; Aslam *et al*., 2023) จากข้อดีดังที่กล่าวมาข้างต้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงต่อคุณภาพด้านต่าง ๆ ของเครื่องดื่มน้ำมะเกี๋ยงเปรียบเทียบกับการแปรรูปด้วยความร้อน

## Methodology

*1. การเตรียมน้ำมะเกี๋ยง*

ในการทดลองนี้ใช้ผลมะเกี๋ยงจากสวนผลไม้ในพื้นที่ตำบลต้นธง อำเภอเมืองลำพูน จังหวัดลำพูน เก็บเกี่ยวในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2566 โดยสุ่มเก็บมะเกี๋ยงที่มีสีม่วงจนออกสีดำเข้ม (ระยะสุกเต็มที่) จากต้นมะเกี๋ยงจำนวน 5 ต้น ๆ ละ 10 กิโลกรัม ทำการสุ่มเก็บทั้งหมด 2 ครั้งต่อต้น จากนั้นนำผลมะเกี๋ยงมาล้างทำความสะอาดและสะเด็ดน้ำออก จากนั้นนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนนำไปแปรรูป การสกัดน้ำมะเกี๋ยงทำได้โดยนำผลมะเกี๋ยงทั้งหมดมาสกัดด้วยเครื่องคั้นน้ำผลไม้ ปรับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (total soluble solids, TSS) เท่ากับ 16 องศาบริกซ์ ด้วยน้ำตาลฟรุกโตส นำน้ำมะเกี๋ยงที่เตรียมได้มาปริมาตร 100 มิลลิลิตร บรรจุลงในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร ก่อนนำไปแปรรูปด้วยเครื่อง High intensity ultra-sonic processor (VCX 130 PB 130 W, Sonics & Materials Inc., Newtown, CT) โดยจุ่มหัว ultra-sonic probe ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร ลงไปครึ่งหนึ่งของความสูงของตัวอย่าง โดยใช้ความถี่คลื่นเสียงที่ 20 กิโลเฮิร์ต ซึ่งเป็นค่าความถี่สูงสุดของเครื่อง ผันแปรระดับความเข้มของคลื่นความถี่เสียงตั้งแต่ 20 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 30 นาที โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิขณะแปรรูป เมื่อสิ้นสุดการแปรรูป พบว่า อุณหภูมิของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 11.74±0.38 องศาเซลเซียส เป็น 42.97±1.97, 54.06±1.06, 59.34±0.94 และ 75.36±1.03 องศาเซลเซียส ที่ระดับความเข้มของคลื่นความถี่เสียง 20, 40, 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ สำหรับการแปรรูปด้วยความร้อน นำน้ำมะเกี๋ยงที่เตรียมได้มา 250 มิลลิลิตร บรรจุในถุงทนความร้อนชนิดอ่อนตัว (retort pouch) ให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำร้อน จนอุณหภูมิตรงกลางภายในถุงเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส และให้ความร้อน ณ อุณหภูมินี้ไปเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นทำให้เย็นทันทีโดยการแช่ในอ่างน้ำผสมน้ำแข็ง เป็นเวลา 5 นาที นำตัวอย่างที่ผ่านการแปรรูปทั้งหมดไปเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปวิเคราะห์คุณภาพ

*2. การวัดค่าสี และการวิเคราะห์หาค่าความหนืด*

วัดค่าสี *L*, *a** และ *b** ของน้ำมะเกี๋ยงสดและที่ผ่านการแปรรูปด้วยเครื่อง Colorimeter (Minolta Chroma Meter CR-300, Kyoto, Japan) โดยค่าสี *L* เป็นค่าความสว่าง (lightness) ค่าสี *a** เป็นค่าสีแดงและสีเขียว (redness/greenness) และค่าสี *b** เป็นค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน (yellowness/blueness) จากนั้นคำนวณหาค่าความเข้มของสี (chroma, *C**) และค่าความแตกต่างของสีทั้งหมด (total different colors, $\Delta E$) ตามสมการ (Chroma value ($C^*$) = $[(a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2}$ และ Total different colors ($\Delta E$) = $[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$ ตามลำดับ และวิเคราะห์หาค่าความหนืดของตัวอย่างด้วยเครื่อง AR 2000 Rheometer (TA Instruments, Inc., New Castle, DE) ตามวิธีของ Chaikham *et al.* (2016b)

*3. การวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ค่า pH และปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ทั้งหมด*

วิเคราะห์หาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดของตัวอย่างด้วยเครื่อง N-10E Digital Refractometer (Atago, Japan) วิเคราะห์หาค่า pH ด้วยเครื่อง Sartorius PB-20 pH meter (Sartorius, Gottingen, Germany) และวิเคราะห์หาปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ทั้งหมดในรูปกรดซิตริก (total titratable acidity; TTA) ตามวิธี AOAC (2005)

*4. การวิเคราะห์หาค่ากิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสและเปอร์ออกซิเดส*

*4.1 การสกัดตัวอย่าง*

นำตัวอย่างมา 20 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายผสมระหว่างสารละลาย sodium hydrogen phosphate buffer (pH 6.2) ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ และสารละลาย sodium chloride ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำส่วนผสมที่ได้มาทำการสกัดด้วยเครื่องผสมที่ความเร็วรอบ 100×*g* เป็นเวลา 20 นาที นำตัวอย่างที่ผ่านการสกัดไปเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4,000×*g* เป็นเวลา 10 นาที (Apichartsrangkoon *et al*., 2013; Chaikham *et al*., 2016b)

*4.2 การวิเคราะห์หาค่ากิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส*

นำสารละลายส่วนใสด้านบนที่สกัดได้จากข้อ 4.1 มา 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายผสมระหว่างสารละลาย potassium phosphate (pH 7) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และสารละลาย pyrocatechol ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 0.4 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำไปวัดหาค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร เป็นเวลา 5 นาที ด้วยเครื่อง Perkin Elmer UV WINLAB spectrophotometer (Perkin Elmer, USA) จากนั้นคำนวณหาค่ากิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (Apichartsrangkoon *et al*., 2013; Chaikham *et al*., 2016b)

*4.3 การวิเคราะห์หาค่ากิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส*

นำสารละลายส่วนใสด้านบนที่สกัดได้จากข้อ 4.1 มา 0.1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันกับสารละลายผสมของสารละลาย sodium acetate buffer (pH 6) ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ สารละลาย hydrogen peroxide ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ปริมาตร 0.25 มิลลิลิตร และสารละลาย guaiacolpotassium phosphate (pH 7) ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาตร 2.15 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวัดหาค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 470 นาโนเมตร เป็นเวลา 5 นาที ด้วยเครื่อง Perkin Elmer UV WINLAB spectrophotometer จากนั้นคำนวณหาค่ากิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส (Apichartsrangkoon *et al*., 2013; Chaikham *et al*., 2016b)

*5. การวิเคราะห์หาปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมด*

การวิเคราะห์หาปริมาณสารแอนโธไซยานินทั้งหมด (Total anthocyanins) ในตัวอย่าง ทำตามวิธีของ Chaikham (2015) และ Chaikham *et al.* (2016b) โดยปิเปตตัวอย่างมา 10 มิลลิลิตรผสมกับสารละลาย potassium chloride buffer (pH 1) ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร และผสมกับสารละลาย sodium acetate buffer (pH 4.5) ความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่องผสมเป็นเวลา 20 นาที นำตัวอย่างที่ผ่านการสกัดในสารละลายทั้ง 2 ชนิดมาผ่านการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman® เบอร์ 4 จากนั้นนำไปวัดหาค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร เป็นเวลา 5 นาที ด้วยเครื่อง Perkin Elmer UV WINLAB spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร และความยาวคลื่นสูงที่สุด ปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมดคำนวณจากสมการ Total anthocyanins (mg/L) = A(MW)(DF) × 1,000/$\boldsymbol{\varepsilon}$L โดย MW คือ มวลโมเลกุลของแอนโธไซยานิน (cyanidin-3-glucoside = 449.2 MW), DF คือ ค่า dilution factor, L คือ ระยะที่แสงส่องผ่าน (path length), $\boldsymbol{\varepsilon}$ คือ ค่าmolar absorptivity (26,900) และ A คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง ซึ่งคำนวณได้จากสมการ $A = (A\lambda_{max} - A_{700})_{pH\ 1} - (A\lambda_{max} - A_{700})_{pH\ 4.5}$

*6. การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด*

การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (total phenolic compounds) ในตัวอย่างทำตามวิธีของ Zainol *et al*. (2003) โดยการปิเปตตัวอย่างมา 2 มิลลิลิตร สกัดในเอทานอลความเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 8 มิลลิลิตร เป็นเวลา 15 นาที นำตัวอย่างที่ผ่านการสกัดไปเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4,000×*g* เป็นเวลา 10 นาที นำสารละลายใสด้านบนมา 0.5 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลาย Folin-Ciocalteu reagent ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ให้ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 5 นาที และจากนั้นเติมสารละลายอิ่มตัวของ sodium carbonate ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำไปวัดหาค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Perkin Elmer UV WINLAB spectrophotometer ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดคำนวณออกมาในรูปของสาร gallic acid (mg GAE/100 ml)

*7. การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ*

*7.1 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl radical scavenging activity (DPPH assay)*

การวิเคราะห์หาค่า DPPH radical scavenging activity หรือ DPPH inhibition ทำตามวิธีของ Chaikham & Apichartsrangkoon (2012) โดยนำตัวอย่างมา 2 มิลลิลิตร สกัดในเมทานอล ปริมาตร 8 มิลลิลิตร เป็นเวลา 15 นาที นำตัวอย่างที่ผ่านการสกัดไปเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4,000×*g* เป็นเวลา 15 นาที นำสารละลายใสด้านบนมา 1.6 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลาย DPPH radical ความเข้มข้น 1.5 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 0.4 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ให้ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 30 นาทีที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปวัดหาค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Perkin Elmer UV WINLAB spectrophotometer ค่า DPPH radical scavenging activity คำนวณได้ตามสมการ DPPH radical scavenging activity (%) = $[1 - (Abs_{sample}/Abs_{control})] \times 100$

*7.2 Ferric-reducing antioxidant power assay (FRAP assay)*

ปิเปตตัวอย่างมา 400 ไมโครลิตร ผสมกับสารละลาย FRAP reagent ปริมาตร 3,000 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน บ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Perkin Elmer UV WINLAB spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร สำหรับชุดควบคุมใช้สารละลายเอทานอล ความ

เข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ แทนตัวอย่าง คำนวณค่า FRAP value ในหน่วย mg Trolox (TE)/ml ของตัวอย่าง (Benzie & Stain, 1996)

*7.3 2,2'-Azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) radical scavenging activity ($ABTS^{\bullet+}$ assay)*

นำสารละลาย $ABTS^{\bullet+}$ ความเข้มข้น 7 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลาย dipotassium peroxodisulphate ความเข้มข้น 2.45 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 88 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นนำมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้น เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ในตัวทำละลาย dimethyl sulfoxide ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ผสมสารละลาย $ABTS^{\bullet+}$ ที่เจือจางแล้วกับน้ำมะเกี๋ยง โดยให้ปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 2,120 ไมโครลิตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 734 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Perkin Elmer UV WINLAB spectrophotometer คำนวณค่าการยับยั้งอนุมูลอิสระ $ABTS^{\bullet+}$ ในหน่วย mg Trolox (TE)/ml ของตัวอย่าง (Dajanta *et al*., 2019; Sudsanor *et al*., 2023)

*8. การวิเคราะห์หาจำนวนจุลินทรีย์ชี้วัด*

การวิเคราะห์หาจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา และโคลิฟอร์ม รวมทั้งจำนวนจุลินทรีย์ก่อโรคชนิดต่าง ๆ ได้แก่ *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus* และ *Clostridium perfringens* ในตัวอย่างตามวิธีมาตรฐานของ US Food and Drug Administration (2001) ซึ่งระบุไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (Thai Community Product Standard) "น้ำมะเกี๋ยง" (มผช. 484/2557; Thai Industrial Standards Institute, 2014)

*9. การวางแผนการทดลอง*

งานวิจัยนี้วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ทำการทดลองทั้งหมด 6 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 95 เปอร์เซ็นต์

## Results

Table 1 แสดงผลของการแปรรูปด้วยความร้อนและคลื่นเสียงความถี่สูงต่อค่าสีของน้ำมะเกี๋ยง โดยพบว่า ค่าความสว่าง ($L$) ของน้ำมะเกี๋ยงมีค่าลดลงหลังจากผ่านการแปรรูปด้วยความร้อนและคลื่นเสียงความถี่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมะเกี๋ยงสด (ชุดควบคุม) และจะเห็นได้ชัดว่าเมื่อระดับความเข้มของคลื่นความถี่เสียงเพิ่มขึ้นค่าสี $L$ จะมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) น้ำมะเกี๋ยงที่แปรรูปด้วยความร้อนมีค่าความเป็นสีแดง ($a^*$) ต่ำที่สุด และมีค่าความเป็นสีเหลือง ($b^*$) สูงที่สุด โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับตัวอย่างอื่น ๆ ($P < 0.05$) สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงพบว่า ค่าสี $a^*$ และค่าสี $b^*$ ของตัวอย่างมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มของคลื่นความถี่เสียงที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อคำนวณหาค่าความเข้มของสี ($C^*$) พบว่า น้ำมะเกี๋ยงที่แปรรูปที่ระดับความเข้มของคลื่นความถี่เสียง 80 เปอร์เซ็นต์ มีค่า $C^*$ สูงที่สุด และมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่น ($P < 0.05$) โดยที่ตัวอย่างที่ผ่านการแปรรูปด้วยความร้อนมีค่า $C^*$ ไม่แตกต่างกับตัวอย่างที่แปรรูปที่ระดับความเข้มของคลื่นความถี่เสียง 40 เปอร์เซ็นต์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) และพบว่า น้ำมะเกี๋ยงที่ผ่านการแปรรูปด้วยความร้อนมีค่าความแตกต่างของค่าสีทั้งหมด ($\Delta E$) มากที่สุด และมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทาง

สถิติเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่น ($P < 0.05$) รองลงมา คือ น้ำมะเกี๋ยงที่ผ่านการแปรรูปที่ระดับความเข้มของคลื่นความถี่เสียง 80, 60, 40 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนั้นจากการศึกษาผลของการแปรรูปด้วยความร้อนและคลื่นเสียงความถี่สูงต่อค่าความหนืดของน้ำมะเกี๋ยง (Table 1) พบว่า การแปรรูปทั้ง 2 วิธี ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของตัวอย่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

***Table 1*** Color parameters and viscosity of fresh, heat and ultra-sonic treated *Ma-Kiang* juices

| Samples | Color parameters | | | | | Viscosity |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *L* | *a** | *b** | *C** | $\Delta E$ | (mPa.s)$^{ns}$ |
| Fresh juice | 18.94±0.22$^{a}$ | 3.27±0.16$^{e}$ | 2.28±0.08$^{e}$ | 3.99±0.16$^{d}$ | - | 6.60±0.35 |
| HT | 15.55±0.12$^{e}$ | 3.14±0.04$^{f}$ | 2.95±0.05$^{a}$ | 4.31±0.06$^{c}$ | 3.46±0.13$^{a}$ | 6.43±0.27 |
| US 20% | 18.10±0.16$^{a}$ | 3.34±0.11$^{d}$ | 2.27±0.08$^{e}$ | 4.04±0.12$^{d}$ | 0.88±0.17$^{e}$ | 6.51±0.42 |
| US 40% | 17.71±0.12$^{b}$ | 3.54±0.08$^{c}$ | 2.40±0.04$^{d}$ | 4.28±0.05$^{c}$ | 1.27±0.08$^{d}$ | 6.44±0.38 |
| US 60% | 17.16±0.29$^{c}$ | 3.68±0.04$^{b}$ | 2.54±0.03$^{c}$ | 4.47±0.03$^{b}$ | 1.85±0.16$^{c}$ | 6.48±0.14 |
| US 80% | 16.24±0.24$^{d}$ | 3.86±0.06$^{a}$ | 2.77±0.03$^{b}$ | 4.75±0.07$^{a}$ | 2.81±0.29$^{b}$ | 6.50±0.24 |

Means in the same column followed by the same letters are not significantly different ($P > 0.05$). ns is not significant. Means were calculated from triplicate determinations with individual duplication. HT is heat treatment and US is ultrasonication.

***Table 2*** Chemical qualities of fresh, heat and ultra-sonic treated *Ma-Kiang* juices

| Samples | TSS (°Brix)$^{ns}$ | pH$^{ns}$ | TTA (%)$^{ns}$ |
|---|---|---|---|
| Fresh juice | 16.45±0.07 | 3.86±0.02 | 0.65±0.13 |
| HT | 16.47±0.04 | 3.88±0.05 | 0.67±0.08 |
| US 20% | 16.42±0.05 | 3.87±0.04 | 0.65±0.05 |
| US 40% | 16.46±0.11 | 3.85±0.01 | 0.64±0.02 |
| US 60% | 16.45±0.09 | 3.86±0.02 | 0.68±0.04 |
| US 80% | 16.44±0.06 | 3.86±0.04 | 0.67±0.05 |

ns is not significant. Means were calculated from triplicate determinations with individual duplication. HT is heat treatment and US is ultrasonication. TSS is total soluble solids and TTA is total titratable acidity.

จากผลการทดลองที่แสดงใน Table 2 พบว่า การแปรรูปด้วยความร้อนและคลื่นเสียงความถี่สูงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ค่า pH และปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) จะเห็นได้ชัดว่าค่าเหล่านี้มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อระดับความเข้มของคลื่นความถี่เสียงมีค่าเพิ่มขึ้น

กิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (PPO) และเปอร์ออกซิเดส (POD) ในน้ำมะเกี๋ยงสด และน้ำมะเกี๋ยงที่ผ่านการแปรรูปด้วยความร้อนและคลื่นเสียงความถี่สูงแสดงใน Table 3 โดยพบว่า การแปรรูปด้วยความร้อนและความเข้มของคลื่นความถี่เสียงที่ระดับต่าง ๆ มีผลทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ทั้ง 2 ชนิดมีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส จะเห็นได้ชัดว่าการแปรรูปด้วยความร้อนจะสามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ทั้ง 2 ชนิด ได้มากที่สุดและมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำมะเกี๋ยงที่ผ่านการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง พบว่า การยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ทั้ง 2 ชนิด ที่ระดับของความเข้มของคลื่นความถี่เสียง 80 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงที่สุด และมีค่าแตกต่างกับความเข้มของคลื่นความถี่เสียงที่ระดับอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับการหลงเหลืออยู่ของเอนไซม์ทั้ง 2 ชนิด (Table 3)

***Table 3*** Polyphenol oxidase and peroxidase activities in fresh, heat and ultra-sonic treated *Ma-Kiang* juices

| Samples | PPO activity (Unit/m/ml) | Residual PPO (%) | POD activity (Unit/m/ml) | Residual POD (%) |
|---|---|---|---|---|
| Fresh juice | 95.26±4.62$^{a}$ | 100.00±0.00$^{a}$ | 136.93±5.77$^{a}$ | 100.00±0.00$^{a}$ |
| HT | 39.94±1.21$^{e}$ | 41.95±0.77$^{e}$ | 23.43±2.82$^{f}$ | 17.07±1.37$^{e}$ |
| US 20% | 92.47±1.08$^{ab}$ | 97.18±3.61$^{b}$ | 128.04±1.90$^{b}$ | 93.58±2.61$^{b}$ |
| US 40% | 90.27±0.71$^{b}$ | 94.89±3.93$^{b}$ | 125.11±1.29$^{c}$ | 91.46±3.04$^{b}$ |
| US 60% | 83.49±2.03$^{c}$ | 87.71±2.16$^{c}$ | 113.93±3.59$^{d}$ | 83.38±6.19$^{c}$ |
| US 80% | 58.68±1.40$^{d}$ | 61.67±2.64$^{d}$ | 65.47±2.84$^{e}$ | 47.82±0.76$^{d}$ |

Means in the same column followed by the same letters are not significantly different ($P > 0.05$). Means were calculated from triplicate determinations with individual duplication. HT is heat treatment and US is ultrasonication. PPO is polyphenol oxidase and POD is peroxidase.

***Table 4*** Bioactive components and antioxidant capacity of fresh, heat and ultra-sonic treated *Ma-Kiang* juices

| Samples | Total anthocyanins (mg CE/100 ml) | Total phenolics (mg GAE/100 ml) | DPPH inhibition (%) | FRAP value (mg TE/ml) | $ABTS^{\bullet+}$ inhibition (mg TE/ml) |
|---|---|---|---|---|---|
| Fresh juice | 53.49±4.21$^{a}$ | 346.18±13.07$^{c}$ | 68.14±3.68$^{a}$ | 135.07±4.09$^{a}$ | 179.62±4.65$^{a}$ |
| HT | 41.95±3.06$^{b}$ | 319.61±12.28$^{d}$ | 59.07±5.17$^{b}$ | 113.68±4.67$^{b}$ | 148.83±6.83$^{b}$ |
| US 20% | 54.35±2.74$^{a}$ | 381.46±10.26$^{b}$ | 66.75±2.95$^{a}$ | 141.33±3.80$^{a}$ | 173.90±6.01$^{a}$ |
| US 40% | 52.61±3.42$^{a}$ | 377.83±15.19$^{b}$ | 67.48±5.02$^{a}$ | 139.96±2.97$^{a}$ | 175.84±3.47$^{a}$ |
| US 60% | 55.42±4.51$^{a}$ | 385.12±11.49$^{ab}$ | 69.86±5.46$^{a}$ | 140.18±3.13$^{a}$ | 179.42±4.60$^{a}$ |
| US 80% | 54.37±4.08$^{a}$ | 394.57±10.83$^{a}$ | 68.50±4.11$^{a}$ | 139.30±5.22$^{a}$ | 174.48±5.18$^{a}$ |

Means in the same column followed by the same letters are not significantly different ($P >0.05$). Means were calculated from triplicate determinations with individual duplication. HT is heat treatment and US is ultrasonication.

ในการศึกษานี้ได้ศึกษาผลของการแปรรูปด้วยความร้อนและคลื่นเสียงความถี่สูงต่อปริมาณสารสำคัญและประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระในตัวอย่างน้ำมะเกี๋ยง ได้แก่ ปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมด ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ค่า DPPH inhibition, FRAP value และ $ABTS^{\bullet+}$ inhibition จาก Table 4 พบว่า สภาวะที่ใช้ในการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมดในตัวอย่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างสด แต่ตัวอย่างที่ผ่านการแปรรูปด้วยความร้อนมีปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมดต่ำที่สุด และมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น ($P < 0.05$) และพบว่า ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในน้ำมะเกี๋ยงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อตัวอย่างผ่านการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง ส่วนตัวอย่างที่ผ่านการแปรรูปด้วยความร้อนมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดต่ำที่สุดและมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่น ($P < 0.05$) เมื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ (วิธี DPPH, FRAP และ $ABTS^{\bullet+}$) ของตัวอย่างทั้งหมด (Table 4) พบว่า ค่า DPPH inhibition, FRAP value และ $ABTS^{\bullet+}$ inhibition ของตัวอย่างน้ำมะเกี๋ยงที่ผ่านการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงทุกระดับความเข้มมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างสด ($P > 0.05$) และมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการแปรรูปด้วยความร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

***Table 5*** Microbiological qualities of fresh, heat and ultra-sonic treated *Ma-Kiang* juices

| Samples | Total plate counts (CFU/ml) | Yeasts & Molds (CFU/ml) | Coliforms (MPN/100 ml) | *E. coli* (MPN/100 ml)$^{ns}$ | *Salmonella* (per 25 ml)$^{ns}$ | *S. aureus* (CFU/ml) | *B. cereus* (CFU/ml) | *Cl. perfringens* (CFU/ml)$^{ns}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fresh juice | $6.48\pm0.95^{a}\times10^{5}$ | $9.86\pm1.16^{a}\times10^{3}$ | $<3.0^{a}$ | nd | nd | $2.15\pm0.47^{a}\times10^{2}$ | $1.18\pm0.26^{a}\times10^{2}$ | nd |
| HT | nd$^{e}$ | nd$^{e}$ | $<1.1^{b}$ | nd | nd | nd$^{c}$ | nd$^{c}$ | nd |
| US 20% | $1.56\pm0.27^{b}\times10^{5}$ | $6.53\pm1.44^{b}\times10^{2}$ | $<1.1^{b}$ | nd | nd | $<25^{b}$ | $<25^{b}$ | nd |
| US 40% | $6.49\pm1.42^{c}\times10^{3}$ | $1.07\pm0.65^{c}\times10^{2}$ | $<1.1^{b}$ | nd | nd | $<25^{b}$ | $<25^{b}$ | nd |
| US 60% | $5.81\pm1.68^{d}\times10^{2}$ | $<25^{d}$ | $<1.1^{b}$ | nd | nd | nd$^{c}$ | nd$^{c}$ | nd |
| US 80% | nd$^{e}$ | nd$^{e}$ | $<1.1^{b}$ | nd | nd | nd$^{c}$ | nd$^{c}$ | nd |

Means in the same column followed by the same letters are not significantly different ($P > 0.05$). ns is not significant. Means were calculated from triplicate determinations with individual duplication. nd is not detected. HT is heat treatment and US is ultrasonication.

ผลการวิเคราะห์คุณภาพด้านจุลชีววิทยาในตัวอย่างทั้งหมด แสดงใน Table 5 โดยพบว่า จำนวนเริ่มต้นของจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา และโคลิฟอร์ม รวมทั้ง *S. aureus* และ *B. cereus* ในน้ำมะเกี๋ยงสดมีค่าเท่ากับ $6.48\times10^{5}$ CFU/ml, $9.86\times10^{3}$ CFU/ml, <3.0 MPN/100 ml, $2.15\times10^{2}$ CFU/ml และ $1.18\pm\times10^{2}$ CFU/ml ตามลำดับ ส่วน *E. coli*, *Salmonella* และ *Cl. perfringens* ตรวจไม่พบ หลังจากการแปรรูปด้วยความร้อนและคลื่นเสียงความถี่สูงที่ระดับต่าง ๆ พบว่า ปริมาณจุลินทรีย์ชี้วัดทั้งหมดตรวจไม่พบในน้ำมะเกี๋ยงที่ผ่านการแปรรูปด้วยความร้อนและคลื่นเสียงความถี่สูงที่ระดับ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยที่จำนวนโคลิฟอร์มมีค่าต่ำกว่า 1.1 MPN/100 ml

## Discussion

สีเป็นสมบัติทางกายภาพของอาหารด้านสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ (optical properties) ที่มีผลต่อคุณภาพและการยอมรับของผู้บริโภค จากการแปรรูปน้ำมะเกี๋ยงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที และการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่ที่ 20 กิโลเฮิร์ต และผันแปรระดับความเข้มของคลื่นความถี่เสียงตั้งแต่ 20 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 30 นาที จะเห็นได้ชัดว่าการลดลงของค่าความสว่างของตัวอย่างเกิดขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นสีเหลือง ค่าความเป็นสีแดง และค่าความเข้มของสีในตัวอย่าง ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) ระหว่างกรดอะมิโนและน้ำตาลรีดิวซ์ (Kumar & Banker, 2005) ในกรณีที่แปรรูปน้ำมะเกี๋ยงด้วยความร้อน และเกิดจากเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในกรณีที่แปรรูปน้ำมะเกี๋ยงด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าน้ำมะเกี๋ยงที่ผ่านการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงยังคงมีกิจกรรมของเอนไซม์หลงเหลือประมาณ 61.67– 97.18 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นการลดลงของความสว่างและการเพิ่มขึ้นของความเป็นสีแดงในตัวอย่างที่ผ่านการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงอาจจะเกิดจากแอนโธไซยานินถูกสกัดออกมาในขั้นตอนของการแปรรูป เนื่องจากแอนโธไซยานินเป็นรงควัตถุที่ให้สีแดงและสีน้ำเงินในมะเกี๋ยง (Kerdsup *et al.*, 2022) ซึ่งผลการทดลองนี้มีความสอดคล้องกับปริมาณแอนโธไซยานินที่พบในตัวอย่างหลังจากผ่านการแปรรูป ในกรณีของผลไม้ชนิดอื่นมีรายงานว่าการแปรรูปน้ำบูลเบอร์รี่ ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงที่ใช้ความถี่ของคลื่นที่ 20 กิโลเฮิร์ต และผันแปรระดับความเข้มของคลื่นความถี่เสียงตั้งแต่ 40 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มีผลต่อค่าสี *L* ของตัวอย่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนการแปรรูปด้วยความร้อนการเปลี่ยนแปลงค่าสี *L* เกิดจากการเกิดสารสีน้ำตาลซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด คือ สาร hydroxymethylfurfural (HMF) และพบว่าการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงที่สภาวะดังกล่าวไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี *a** ของตัวอย่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่การเปลี่ยนแปลงค่าสี *a** และ/หรือ *b** ของตัวอย่างเกิดจากการสลายตัวของแอนโธไซยานินและการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดเป็นหลัก (Mohideen *et al.*, 2015) และ Kwawa *et al.* (2018) พบว่า ระดับความเข้มของคลื่นความถี่เสียงที่ความถี่ 24 กิโลเฮิร์ต มีผลต่อค่าสี *L* และ *b** ของน้ำหม่อนหมัก แต่ไม่มีผลต่อค่าสี *a** และ *C** อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่การแปรรูปด้วยความร้อนมีผลทำให้ค่าสี *L* และ *b** เพิ่มขึ้น แต่ค่าสี *a** และ *C** ลดลง นอกจากนั้น Engmann *et al.* (2014) ยังรายงานว่า ค่าสี *C** และค่า $\Delta E$ ในน้ำหม่อนที่ผ่านการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงมีค่าสูงกว่าน้ำหม่อนสดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากที่กล่าวมาข้างต้นเมื่อเปรียบเทียบการแปรรูปน้ำมะเกี๋ยงด้วยความร้อน 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที กับการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงที่ระดับ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เวลา 30 นาที และมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 75 องศาเซลเซียส เมื่อสิ้นสุดกระบวนการแปรรูป พบว่า การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงสามารถยังคงรักษาคุณภาพด้านสีของน้ำมะเกี๋ยงเอาไว้ได้ดีกว่าการแปรรูปด้วยความร้อน อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในระหว่างการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งถึงอุณหภูมิสูงสุดเมื่อสิ้นสุดการแปรรูปด้วยคลื่นความถี่เสียงแบบเป็นจังหวะ จึงทำให้คุณภาพด้านสีของตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และยังช่วยสกัดสารสำคัญต่าง ๆ ออกจากเซลล์พืชได้ เช่น แอนโธไซยานิน และกรดฟีนอนิก รวมทั้งยังคงรักษาประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระได้ดี (Kwawa *et al.*, 2018)

ในงานวิจัยนี้พบว่าการแปรรูปน้ำมะเกี๋ยงด้วยความร้อนและการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืด ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ค่า pH และปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากรายงานของ Cruz-Cansino *et al.* (2013) พบว่า การแปรรูปน้ำกระบองเพชรสีเขียวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด และค่า pH เพียงเล็กน้อย แต่ไม่มีผลต่อค่าความหนืดของตัวอย่าง และ Chaikham *et al.* (2016b) พบว่า การแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืด ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด และค่า pH ของน้ำเม่าเบอร์รี่ นอกจากนั้น Kwawa *et al.* (2018) ยังพบว่า การแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงไม่มีผลต่อปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ค่า pH และปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ทั้งหมดของน้ำหม่อนหมัก

จากการศึกษานี้พบว่าการแปรรูปด้วยความร้อนและการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงมีผลต่อการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสและเปอร์ออกซิเดส โดยจะเห็นผลชัดเจนกับเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสมากกว่าเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส Iqbal *et al.* (2020) รายงานว่า การลดลงของกิจกรรมของเอนไซม์ทั้ง 2 ชนิด เกิดจากคลื่นเสียงความถี่สูงจะไปทำลายพันธะวานเดอร์วาว และพันธะไฮโดรเจนของเปปไทด์ ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของโปรตีน ซึ่งเป็นโครงสร้างของเอนไซม์ นอกจากนั้นการแปรรูปที่อุณหภูมิมากกว่า 60 องศาเซลเซียส ก็ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของโปรตีนด้วยเช่นกัน แต่อย่างไรการแปรรูปที่อุณหภูมิระดับสูงอาจจะทำให้คุณภาพด้านประสาทสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์สูญเสียไป สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ซึ่งพบว่า ความเข้มของคลื่นความถี่เสียงที่ระดับ 20-80 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ต มีผลทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ทั้ง 2 ชนิดมีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส โดยที่ความเข้มของคลื่นความถี่เสียงที่ระดับ 80 เปอร์เซ็นต์ สามารถยับยั้งเอนไซม์ทั้ง 2 ชนิดได้มากที่สุด ถึง 47.82 และ 73.03 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Chaikham *et al.*, 2016b) และ Cao *et al.* (2018) พบว่าการแปรรูปด้วยความร้อนและคลื่นเสียงความถี่สูงสามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส และเปอร์ออกซิเดสได้ เมื่อความเข้มของคลื่นความถี่เสียงเพิ่มขึ้นกิจกรรมของเอนไซม์ทั้ง 2 ชนิดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Dabir & Ananthanarayan (2017) และรายงานของ Liu *et al.* (2022) ในแอปเปิ้ลและเมล่อนที่ผ่านการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและความร้อน

ในมะเกี๋ยงพบสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลายชนิดที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ ได้แก่ ไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ (cyanidin-3-glucoside) เรสเวอราทรอล (resveratrol) เควอซิทิน (quercetin) กรดเฟอรูลิก (ferulic acid) และลูทีน (lutein) ซึ่งสารเหล่านี้มีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ ต้านหรือลดการอักเสบ ช่วยป้องกันการเสื่อมของเซลล์ประสาท เสริมสร้างระบบภูมิคุ้มกัน และลดความเสี่ยงของโรคเรื้อรังต่าง ๆ ได้ (Nantacharoen *et al.*, 2022) ในงานวิจัยนี้พบว่าการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงไม่มีผลกระทบต่อปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมดในน้ำมะเกี๋ยง ซึ่งอาจเกิดจากความเสถียรของแอนโธไซยานินหรือคุณสมบัติของน้ำผลไม้ที่ป้องกันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารดังกล่าว แต่พบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในน้ำมะเกี๋ยงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น มีรายงานว่าการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงสามารถเพิ่มปริมาณแอนโธไซยานินและสารประกอบฟีนอลิกในน้ำผลไม้ได้ เนื่องจากคลื่นเสียงความถี่สูงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัด โดยการสร้างความเสียหายให้กับเซลล์พืช และอาจช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายและความคงตัวของแอนโธไซยานินและสารประกอบฟีนอลิกในน้ำผลไม้ได้ (Xu *et al.*, 2022; Piecko *et al.*, 2024) สอดคล้องกับงานวิจัยของ

Chaikham *et al.* (2016b) ซึ่งพบว่า การแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงไม่มีผลต่อปริมาณแอนโธไซยานิน แต่มีผลทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตามระดับของความเข้มของคลื่นความถี่เสียงที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม Piecko *et al.* (2024) พบว่า ปริมาณของแอนโธไซยานินในน้ำสตรอเบอร์รี่ แรสเบอร์รี่ และแบล็กเคอร์แรนต์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมีค่าคงที่หลังจากผ่านการแปรรูปด้วยวิธีการเดียวกัน และจากงานวิจัยนี้ยังพบว่าน้ำมะเกี๋ยงที่ผ่านการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงยังคงมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH, FRAP และ $ABTS^{\bullet+}$ assays) ไม่แตกต่างกับน้ำมะเกี๋ยงสดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในน้ำบาร์เบอร์รีที่ผ่านการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงของ Radziejewska-Kubzdela *et al.* (2020) โดยพบว่า การแปรรูปด้วยความร้อนมีผลทำให้ปริมาณสารสำคัญ (แอนโธไซยานิน และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด) และประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ (วิธี DPPH, FRAP และ $ABTS^{\bullet+}$) ของน้ำมะเกี๋ยงมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมะเกี๋ยงสดและน้ำมะเกี๋ยงที่ผ่านการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง การลดลงของปริมาณแอนโธไซยานินและสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในน้ำผลไม้หลังจากการแปรรูปด้วยความร้อนเกิดจากการเสื่อมสภาพจากความร้อน การเกิดออกซิเดชัน (ทั้งจากเอนไซม์และไม่เกี่ยวกับเอนไซม์) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการเกิดพอลิเมอไรเซชัน และการจับตัวกับองค์ประกอบอื่น ๆ ซึ่งการลดลงของสารทั้ง 2 กลุ่ม มีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระของน้ำผลไม้ ดังนั้นการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงถือว่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยคงรักษาสารสำคัญต่าง ๆ และประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระในน้ำผลไม้เอาไว้ได้ (Lepaus *et al.*, 2023; Roobab *et al.*, 2023)

จากการตรวจวิเคราะห์หาจุลินทรีย์ชี้วัดคุณภาพของน้ำมะเกี๋ยงที่ผ่านการแปรรูปด้วยความร้อนและคลื่นเสียงความถี่สูงตามมาตรฐานผลิตชุมชนของน้ำมะเกี๋ยง (มผช. 484/2557) พบว่า การแปรรูปด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที และการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงที่ระดับความเข้มของคลื่นความถี่เสียง 80 เปอร์เซ็นต์ สามารถยับยั้งหรือทำลายกลุ่มของจุลินทรีย์ชี้วัดทั้งหมดในตัวอย่างจนกระทั่งอยู่ในระดับของมาตรฐาน ซึ่งกำหนดไว้ว่าในเครื่องดื่มน้ำมะเกี๋ยงต้องมีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ต้องไม่เกิน $1\times10^4$ โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ยีสต์และราต้องน้อยกว่า 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร โคลิฟอร์ม ต้องน้อยกว่า 2.2 เอ็มพีเอ็นต่อตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร รวมทั้งจำนวนจุลินทรีย์ก่อโรคชนิดต่าง ๆ ได้แก่ *E. coli* ต้องไม่พบในตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร, *Salmonella* ต้องไม่พบในตัวอย่าง 25 มิลลิลิตร, *S. aureus* ต้องน้อยกว่า 10 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร, *B. cereus* ต้องไม่เกิน 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร และ *Cl. perfringens* ต้องไม่เกิน 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร (Thai Industrial Standard Institute, 2014) การลดลงของจุลินทรีย์เหล่านี้เกิดจากเกิดสภาวะที่เป็นพิษในระหว่างกระบวนการแปรรูป (Ravikumar, 2017) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Shahid *et al.* (2025) ในน้ำผลไม้ตระกูลส้มพันธุ์ต่าง ๆ และรายงานของ Oladunjoye & Awani-Aguma (2023) ในน้ำมะม่วง

## Conclusions

จากผลการทดลอง พบว่า ค่าความหนืด ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ค่า pH และปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ทั้งหมดของน้ำมะเกี๋ยงที่ผ่านการแปรรูปด้วยความร้อนและคลื่นเสียงความถี่สูงที่ระดับต่าง ๆ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแปรรูป การแปรรูปด้วยวิธีการนี้มีผลต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์

โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแปรรูปด้วยความร้อน และตัวอย่างที่ผ่านการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงยังคงมีปริมาณสารสำคัญ (แอนโธไซยานิน และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด) และประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ (วิธี DPPH, FRAP และ ABTS$^{\bullet+}$) ในระดับที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างสด และมีปริมาณมากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการแปรรูปด้วยความร้อน กิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสและเปอร์ออกซิเดสในตัวอย่างมีค่าลดลงหลังจากผ่านการแปรรูป นอกจากนั้นยังพบว่าการแปรรูปด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที และการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงที่ระดับความเข้มของคลื่นความถี่เสียง 80 เปอร์เซ็นต์ สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ชี้วัดในด้านสุขาภิบาลและความปลอดภัยของน้ำมะเกี๋ยงให้มีจำนวนน้อยกว่าที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช. 484/2557) กำหนดได้ จากงานวิจัยจะเห็นได้ชัดว่าการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงอาจเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการแปรรูปน้ำผลไม้ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ สำหรับการวิจัยในอนาคตอาจจะต้องมีการประเมินทางประสาทสัมผัสก่อนนำเทคโนโลยีไปต่อยอดในเชิงอุตสาหกรรม รวมทั้งต้องศึกษาผลของการแปรรูปด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงต่ออายุการเก็บรักษา และสารสำคัญอื่น ๆ อีกด้วย

## Acknowledgments

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ สำหรับใช้ในงานวิจัยนี้

## References

AOAC. (2005). Official methods of analysis (18th ed.). Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.

Apichartsrangkoon, A., Srisajjalertwaja, S., Chaikham, P., & Hirun, S. (2013). Physical and chemical properties of *Nam Prig Nhum*, a Thai green chili paste, following ultra-high pressure and thermal processes. *High Pressure Research: An International Journal*, *31*(1), 83-95.

Aslam, R., Alam, M. S., Ali, A., Tao, Y., & Manickam, S. (2023). A chemometric approach to evaluate the effects of probe-type ultrasonication on the enzyme inactivation and quality attributes of fresh amla juice. *Ultrasonics Sonochemistry*, *92*, 106268.

Benzie, I. F. F., & Stain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of antioxidant power; the FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, *239*, 70-76.

Bhat, R., & Goh, K. M. (2017). Sonication treatment convalesces the overall quality of hand pressed strawberry juice. *Food Chemistry*, *215*, 470–476.

Cao, X., Cai, C., Wang, Y., & Zheng, X. (2018). The inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase in bayberry juice during thermal and ultrasound treatments. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *45*, 169–178.

Chaikham, P. (2015). Comparison of high hydrostatic pressure and thermal processing on physicochemical and antioxidant properties of Maoberry (*Antidesma thwaitesianum* Müell. Arg.) juice. *International Food Research Journal*, *22*(5), 1993-2001.

Chaikham, P., & Apichartsrangkoon, A. (2012). Comparison of dynamic viscoelastic and physicochemical properties of pressurised and pasteurised longan juices with xanthan addition. *Food Chemistry*, *134*, 2194-2200.

Chaikham, P., & Prangthip, P. (2015). Alteration of antioxidative properties of longan flower-honey after high pressure, ultra-sonic and thermal processing. *Food Bioscience*, *10*, 1-7.

Chaikham, P., Kemsawasd, V., & Apichartsrangkoon, A. (2016a). Effects of conventional and ultrasound treatments on physicochemical properties and antioxidant capacity of floral honeys from Northern Thailand. *Food Bioscience*, *15*, 19-26.

Chaikham, P., Prangthip, P., & Seesuriyachan, P. (2016b). Ultra-sonication effects on quality attributes of maoberry (*Antidesma bunius* L.) juice. *Food Science and Technology Research*, *22*(5), 647-654.

Cruz-Cansino, N., Pérez-Carrera, G., Zafra-Rojas, Q., Delgado-Olivares, L., Alanís-García, E., & Ramírez-Moreno, E. (2013). Ultrasound processing on green cactus pear (*Opuntia ficus* Indica) juice: Physical, microbiological and antioxidant properties. *Journal of Food Processing and Technology*, *4*, 1-6.

Dabir, M. P., & Ananthanarayan, L. (2017). Effect of heat processing and ultrasonication treatment on custard apple peroxidase activity and vitamin C. *International Journal of Food Engineering*, *13*, 99562367.

Dajanta, K., Chattong, U., & Rongkom, H. (2019). Color, pigments and antioxidant quality of red yeast rice (*Angkak*) fermented by various rice varieties. *KKU Science Journal*, *47*(3), 468-477. (in Thai)

Engmann, F. N., Ma, Y., Tchabo, W., & Ma, H. (2014). Ultrasonication treatment effect on anthocyanins, color, microorganisms and enzyme inactivation of mulberry (*Moraceae nigra*) juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, *39*, 854-862.

Hasheminya, S. M., & Dehghannya, J. (2022). Non-thermal processing of black carrot juice using ultrasound: intensification of bioactive compounds and microbiological quality. *International Journal of Food Science and Technology*, *57*, 5848–5858.

Iqbal, A., Murtaza, A., Marszalek, K., Iqbal, M. A., Chughtai, M. F., Hu, W., Barba, F. J., Bi, J., Liu, X., & Xu, X. (2020). Inactivation and structural changes of polyphenol oxidase in quince (*Cydonia oblonga* Miller) juice subjected to ultrasonic treatment. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *100*, 2065–2073.

Kerdsup, P., Hattayapichat, P., Silva, J. L., & Tantratian, S. (2022). Survival of potential probiotic isolated from fermented tea leaf and encapsulated in multilayer beads stored in makiang (*Cleistocalyx nervosum* var. paniala) juice. *Food Bioscience*, *50*, 102015.

Kumar V., & Banker G. S. (2005). Maillard reactions in chemistry, food and health (pp. 20-27). Elsevier; Amsterdam, The Netherlands.

Kwaw, E., Ma, Y., Tchaboa, W., Sackey, A. S., Apaliya, M. T., Xiao, L., Wu, M., & Sarpong, F. (2018). Ultrasonication effects on the phytochemical, volatile and sensorial characteristics of lactic acid fermented mulberry juice. *Food Bioscience*, *24*, 17–25.

Lepaus, B. M., Valiati, B. S., Machado, B. G., Domingos, M. M., Silva, M. N., Faria-Silva, L., Bernardes, P. C., da Silva Oliveira, D., & de Sao Jose, J. F. B. (2023). Impact of ultrasound processing on the nutritional components of fruit and vegetable juices. *Trends in Food Science & Technology*, *138*, 752–765.

Liu, M., Li, J., Zong, W., Sun, W., Mo, W., & Li, S. (2022). Comparison of calcium and ultrasonic treatment on fruit firmness, pectin composition and cell wall-related enzymes of postharvest apricot during storage. *Journal of Food Science and Technology*, *59*, 1588–1597.

Mohideen, F. W., Solval, K. M., Li, J., Zhang, J., Chouljenko, A., Chotiko, A., Prudente, A. D., Bankston, J. D., & Sathivel, S. (2015). Effect of continuous ultra-sonication on microbial counts and physico-chemical properties of blueberry (*Vaccinium corymbosum*) juice. *LWT - Food Science and Technology*, *60*, 563-570.

Nadeem, M., Ranjha, M. M. A. N., Ameer, K., Ainee, A., Yasmin, Z., Javaria, S., & Teferra, T. F. (2022). Effect of sonication on the functional properties of different citrus fruit juices. *International Journal of Fruit Science*, *22*, 568-580.

Nantacharoen, W., Baek, S. J., Plaingam, W., Charoenkiatkul, S., Tencomnao, T., & Sukprasansap, M. (2022). *Cleistocalyx nervosum* var. *paniala* berry promotes antioxidant response and suppresses glutamate-induced cell death via SIRT1/Nrf2 survival pathway in hippocampal HT22 neuronal cells. Molecules, *27*(18), 5813.

Oladunjoye, A. O., & Awani-Aguma, E. U. (2023). Effect of thermosonication on physicochemical, bioactive, sensory and microbiological qualities of African mango fruit (*Irvingia gabonensis*) juice. *Measurement: Food*, *11*, 100103.

Patthamakanokporn, O., Puwastien, P., Nitithamyong, A., & Sirichakwal, P. P. (2008). Changes of antioxidant activity and total phenolic compounds during storage of selected fruits. *Journal of Food Composition and Analysis*, *21*, 241–248.

Phupinyokul, M. (2016). Acceptance and nutritive values of makiang juice and the analyses of antioxidants makiang fruits (*Cleistocalyx nervosum* var paniala). *Agricultural Science Journal*, *47*(1), 103–113. (in Thai)

Piecko, J., Mieszczakowska, M., Celejewska, K., & Szwejda-Grzybowska, J. (2024). Impact of ultrasound pretreatment on juice yield and bioactive content in juice produced from selected berries fruit. *Foods*, *13*, 1231.

Prasanth, M. I., Brimson, J. M., Chuchawankul, S., Sukprasansap, M., & Tencomnao, T. (2019). Antiaging, stress resistance, and neuroprotective efficacies of *Cleistocalyx nerovosum* var paniala fruit extracts using *Caenorhabditis elegans* model. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, *2019*, 7024785.

Radziejewska-Kubzdela, E., Szwengiel, A., Ratajkiewicz, H., & Nowak, K. (2020). Effect of ultrasound, heating and enzymatic pretreatment on bioactive compounds in juice from *Berberis amurensis* Rupr. *Ultrasonics Sonochemistry*, *63*, 104971.

Ravikumar, M. (2017). Ultrasonication: An advanced technology for food preservation. *International Journal of Pure & Applied Bioscience*, *5*, 363–371.

Roobab, U., Abida, A., Madni, G. M., Ranjha, M. M. A. N., Zeng, X.-A., Khaneghah, A. M., & Aadil, R. M. (2023). An updated overview of ultrasound-based interventions on bioactive compounds and quality of fruit juices. *Journal of Agriculture and Food Research*, *14*, 100864.

Shahid, M. B., Nadeem, M., Qureshi, T. M., Shahid, M. A., Asif, A., Balal, R. M., Ahmed, S., Rukh, L., Nawaz, A., & Ahmad, N. (2025). Comparison of thermo-sonication and conventional pasteurization on the quality attributes of some selected citrus fruit juices. *Measurement: Food*, *17*, 100212.

Sudsanor, P., Chaikham, P., Thanaboonrongkom, S., & Dajanta, K. (2023). Physicochemical and antioxidative properties of *Barringtonia acutangula* leaf tea produced by hot-air drying and conventional roasting. *Burapha Science Journal*, *28*(3), 1854-1870. (in Thai)

Thai Industrial Standards Institute. (2014). Thai Community Product Standard : Makiang Drink (TCPS. 484/2014). Ministry of Industry, Thailand.

Thuschana, W., Thumvijit, T., Chansakaow, S., Ruamrungsri, S., & Wongpoomchai, R. (2020). Chemical constituents and antioxidant activities of *Cleistocalyx Nervosum* fruits in *in vitro* and *in vivo* models. *Thai Journal of Toxicology*, *27*(2), 194.

US Food and Drug Administration. (2001). Bacteriological analytical manual (BAM). Department of Health and Human Services, New Hampshire Avenue, Washington DC.

Xu, K., Fan, G., Wu, C., Suo, A., & Wu, Z. (2022). Preparation of anthocyanin-rich mulberry juice by microwave-ultrasonic combined pretreatment. *Food Science and Biotechnology*, *31*, 1571–1581.

Zainol, M. K., Adb-Hamid, A., Yusof, S., & Muse, R. (2003). Antioxidative activity and total phenolic compounds of leaf, root and petiole of four accessions of *Centella asiatica* (L.) Urban. *Food Chemistry*, *81*, 575–581.

Zhu, D., Zhang, Y., Kou, C., Xi, P., & Liu, H. (2022). Ultrasonic and other sterilization methods on nutrition and flavor of cloudy apple juice. *Ultrasonics Sonochemistry*, *84*, 105975.