บทความวิจัย

# ผลของการใช้คลื่นความถี่สูงโดยหลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกต่อการกำจัดเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟีคัลโคลิฟอร์มในน้ำอ้อยคั้นสด

อดิศักดิ์ รัตนน้ำล้อม* ชาญชัย ทองโสภา ธนเสฏฐ์ ทศดีกรพัฒน์ และ สำราญ สันทาลุนัย
สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 9225 2702 7 อีเมล: m5940622@g.sut.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.06.002
รับเมื่อ 14 ตุลาคม 2564 แก้ไขเมื่อ 5 มกราคม 2565 ตอบรับเมื่อ 17 กุมภาพันธ์ 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 10 มิถุนายน 2567
© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

**บทคัดย่อ**

อ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจนอกจากจะแปรรูปเป็นน้ำตาลแล้ว ยังสามารถแปรรูปเป็นเครื่องดื่มน้ำอ้อยคั้นสด สามารถทำได้ง่าย มีขายทั่วไปตามตลาดท้องถิ่น ความปลอดภัยจากเชื้อแบคทีเรียที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคเป็นสิ่งสำคัญ หากปะปนมากับเครื่องดื่มสามารถก่อให้เกิดโรคต่างๆ ได้ ในงานวิจัยนี้นำเสนอผลของการศึกษาการกำจัดเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟีคัลโคลิฟอร์มด้วยคลื่นความถี่สูงโดยหลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกในน้ำอ้อยคั้นสด ซึ่งตัวอย่างที่ถูกนำมาศึกษาจะถูกผสมเชื้อแบคทีเรียลงไป ก่อนนำไปผ่านคลื่นความถี่สูง 800 วัตต์ เป็นเวลา 1 นาที และ 1 นาที 30 วินาที ที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส 1 คืน ก่อนนำไปตรวจสอบปริมาณเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟีคัลโคลิฟอร์มที่มีอยู่ในตัวอย่างด้วยวิธีมาตรฐานสำหรับการตรวจสอบน้ำและน้ำเสีย นอกจากนี้คุณสมบัติไดอิเล็กตริก ความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณน้ำตาลในของเหลวจะถูกตรวจสอบด้วย เชื้อแบคทีเรียสามารถถูกกำจัดได้ด้วยการให้ความร้อนโดยคลื่นความถี่สูง แต่คุณสมบัติไดอิเล็กตริก ความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณน้ำตาลของน้ำอ้อยไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

**คำสำคัญ**: น้ำอ้อยคั้นสด เชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม เชื้อแบคทีเรียกลุ่มฟีคัลโคลิฟอร์ม การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

การอ้างอิงบทความ: อดิศักดิ์ รัตนน้ำล้อม, ชาญชัย ทองโสภา, ธนเสฏฐ์ ทศดีกรพัฒน์ และ สำราญ สันทาลุนัย, "ผลของการใช้คลื่นความถี่สูงโดยหลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกต่อการกำจัดเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟีคัลโคลิฟอร์มในน้ำอ้อยคั้นสด," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 34, ฉบับที่ 3, หน้า 1–10, เลขที่บทความ 243–055550, ก.ค.–ก.ย. 2567.

วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 34 ฉบับที่ 3 ก.ค.–ก.ย. 2567
*The Journal of KMUTNB., Vol. 34, No. 3, Jul.–Sep. 2024*

Research Article

# Effect of Dielectric Heating on the Elimination of Coliform and Fecal Coliform in Sugarcane Juice

Adisak Rattananamlom*, Chanchai Thongsopa, Thanaset Thosdeekoraphat and Samran Santalunai
School of Electronic Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 9225 2702 7, E–mail: m5940622@g.sut.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.06.002
Received 14 October 2021; Revised 5 January 2022; Accepted 17 February 2022; Published online: 10 June 2024
© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

**Abstract**

Sugarcane is economic crops that can not only be processed into sugar but can also be processed into fresh sugarcane juice. Fresh sugarcane juice is easily available at local markets. Safety from bacteria that are harmful to consumers is important. If bacteria are mixed with beverages, it can cause various diseases. This research studies the results of the bacteria elimination which are coliform and fecal coliform bacteria by using high frequency based on dielectric heating principle in freshly sugarcane juice. Fresh sugarcane juice samples were inoculated with bacteria before being subjected to 800 watts of high frequency for 1 min and 1 min and 30 s at a volume of 100 ml. Afterwards, it was stored at 4 °C for 24 hours before being examined for the bacteria of coliforms and fecal coliforms in juices using standard methods for water and wastewater monitoring. In addition, the dielectric properties, pH values and sugar content in the liquid (°Brix) were also examined. Bacteria can be eliminated by high-frequency heating. In addition, the dielectric properties, pH and sugar content in the liquid (°Brix) were also examined. Bacteria can be eliminated by high-frequency heating. However, the dielectric properties, pH values and sugar content in the liquid of sugarcane juice did not change significantly.

**Keywords**: Sugarcane Juice, Total Coliform Bacteria, Fecal Coliform Bacteria, Dielectric Heating

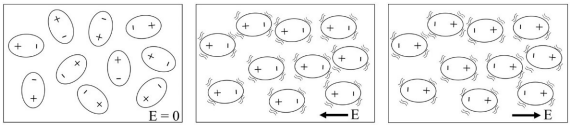
Please cite this article as: A. Rattananamlom, C. Thongsopa, T. Thosdeekoraphat, and S. Santalunai, "Effect of dielectric heating on the elimination of coliform and fecal coliform in sugarcane juice," *The Journal of KMUTNB*, vol. 34, no. 3, pp. 1–10, ID. 243–055550, Jul.–Sep. 2024 (in Thai).

**1. บทนำ**

อ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญในประเทศไทยทั้งภายในและต่างประเทศตามรายงานการส่งออกน้ำตาลทรายไปจำหน่ายต่างประเทศ ประจำปี 2564 โดยทำมูลค่าจากการแปรรูปเป็นน้ำตาลทราย อีกทั้งยังสามารถแปรรูปเป็นน้ำอ้อยคั้นสด ซึ่งให้คุณค่าทางโภชนาการ คือ น้ำตาลซูโครสสูงมาก ให้ความรู้สึกสดชื่นต่อผู้บริโภค [1] สามารถผลิตและจำหน่ายได้ตามท้องถิ่นทั่วไป เนื่องจากทำได้ง่าย แต่เครื่องดื่มน้ำอ้อยคั้นสดมักพบเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม (Total coliform bacteria) และอีโคไล (Escherichia coli, E.coli) [2] ซึ่งเป็นแบคทีเรียในกลุ่มฟีคัลโคลิฟอร์ม (Fecal coliform) ที่ก่อให้เกิดโรค หากกระบวนการผลิตและบรรจุภัณฑ์ไม่สะอาด ในธรรมชาติเชื้อแบคทีเรียชนิดนี้จะอยู่ในลำไส้ของคนและสัตว์เลือดอุ่นในการช่วยย่อยอาหาร [3] และจะถูกขับออกมากับอุจจาระหรือมูลสัตว์ [4] หากเชื้อแบคทีเรียนี้เข้าสู่ระบบการทำงานอื่น ๆ ของร่างกายจะก่อให้เกิดโรคได้ เช่น เกิดโรคในระบบทางเดินอาหารของผู้บริโภคบางรายเกิดอาการรุนแรง ไตทำงานผิดปกติอาจถึงแก่ชีวิต โดยเฉพาะคนชราและเด็ก เนื่องจากเชื้อแบคทีเรียชนิดนี้จะไปยับยั้งการสร้างโปรตีนและทำลายเซลล์เยื่อบุลำไส้ โรคติดเชื้อทางเดินปัสสาวะ [5] โรคเยื่อหุ้มสมองอักเสบและติดเชื้อในกระแสเลือด [6], [7] เป็นต้น การตรวจพบเชื้อแบคทีเรียนี้ในอาหารหรือเครื่องดื่ม เป็นการบ่งชี้คุณลักษณะความสะอาดที่ต่ำและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ มีข้อกำหนดตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 356) พ.ศ. 2556 เรื่อง เครื่องดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท กำหนดตรวจพบแบคทีเรียโคลิฟอร์มได้น้อยกว่า 2.2/100 มิลลิลิตร ด้วยวิธีเอ็มพีเอ็น (MPN) กำหนดให้ตรวจไม่พบแบคทีเรียชนิดอีโคไล

การเตรียมเครื่องมือในการคั้นน้ำอ้อยสดและเตรียมลำอ้อยที่จะนำมาคั้นน้ำให้สะอาดจึงเป็นสิ่งสำคัญ แต่เชื้อแบคทีเรียเหล่านี้เป็นสิ่งที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งสามารถปะปนกับอาหารและเครื่องดื่มได้จากปัจจัยอื่น ๆ เช่น ตามเครื่องแต่งกาย หรือมือของผู้ผลิตที่สัมผัสเชื้อแบคทีเรียนี้มาทั้งโดยตรงและทางอ้อมโดยที่ผู้ผลิตไม่รู้ตัว ซึ่งเชื้อแบคทีเรียชนิดนี้จะออกมาตามมูลสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม และหากเป็นช่วงหน้าฝน หรือร้านของผู้ผลิตอยู่ใกล้บริเวณแหล่งน้ำของเกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์ เชื้อแบคทีเรียเหล่านี้อาจปะปนมากับแหล่งน้ำ หากผู้ผลิตสัมผัสและนำเข้าสู่กระบวนการผลิต จะส่งผลให้ผู้บริโภคมีความเสี่ยงและเป็นอันตรายต่อโรคที่จะเกิดขึ้นจากเชื้อแบคทีเรียเหล่านี้ได้ เพื่อให้มั่นใจต่อผู้บริโภค การยับยั้งหรือการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเหล่านี้จึงมีความจำเป็นเป็นอย่างมาก แต่วิธีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียนั้นจะต้องไม่ส่งผลต่อคุณค่าทางโภชนาการของอาหารและเครื่องดื่ม มีผลการศึกษาและวิจัยวิธีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในอาหารและเครื่องดื่มด้วยการใช้ความร้อนจากภายนอกเข้าสู่อาหารหรือทำให้เกิดความร้อนขึ้นจากภายในอาหาร รังสีอินฟราเรด (Infrared, IR) [8] และรังสีอัลตราไวโอเลต [9] จะเป็นวิธีสำหรับเครื่องดื่มที่มีความโปร่งแสง เช่น น้ำดื่ม สนามไฟฟ้ามักใช้กับเครื่องดื่ม [10] และสารสกัดจากธรรมชาติเป็นส่วนผสม ซึ่งจะได้มาจากพืชและผลไม้ [11] วิธีการดังกล่าวไม่ส่งผลเสียต่อคุณค่าทางโภชนาการอาหารและเครื่องดื่ม

ในการศึกษานี้สนใจการศึกษาการกำจัดเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟีคัลโคลิฟอร์มในน้ำอ้อยคั้นสด ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเปรียบเทียบการใช้คลื่นความถี่สูงความร้อนจากการต้ม และคลื่นความถี่เหนือเสียง (Ultrasonics) ในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้น้ำอ้อยเน่าเสียเพื่อการเก็บรักษาน้ำอ้อยได้นานขึ้น และไม่ส่งผลต่อคุณค่าทางโภชนาการรวมทั้งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ซึ่งคลื่นความถี่สูงสามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ได้ดีที่สุด [12] มีการศึกษาการใช้คลื่นความถี่สูงร่วมกับคลื่นความถี่เหนือเสียงในการกำจัดจุลินทรีย์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาน้ำอ้อยสดที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสและไม่ส่งผลต่อคุณค่าทางโภชนาการ [13] มีการศึกษาการใช้ความดันสูงและการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก (Ohmic Heating) ส่งผลต่อการเกิดสีน้ำตาล และเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้น้ำอ้อยเน่าเสีย [14], [15] นอกจากนี้คุณสมบัติไดอิเล็กตริกจะเป็นตัวชี้วัดสถานะของแข็ง ของเหลวในอาหารจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอาหาร และค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกบ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อนด้วยหลักการการ




**รูปที่ 1** การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้า (E) และมีสนามไฟฟ้าตามทิศทาง

ให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก [16]

มีการศึกษาวิธีการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำอ้อยและไม่ส่งผลต่อคุณค่าทางโภชนาการ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มอายุการเก็บรักษาไว้ได้นานขึ้นได้หลากหลายวิธี สำหรับในระดับครัวเรือนแล้วการใช้คลื่นความถี่สูงสามารถทำได้ง่ายและเป็นขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน ผลการศึกษาการใช้คลื่นความถี่สูงในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟีคัลโคลิฟอร์มในน้ำอ้อยคั้นสดมีอยู่อย่างจำกัด ในงานวิจัยนี้เสนอผลการกำจัดเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟีคัลโคลิฟอร์มในน้ำอ้อยคั้นสดด้วยคลื่นความถี่สูงโดยหลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก และตรวจสอบคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ปริมาณน้ำตาลในของเหลว ความเป็นกรด-ด่าง โดยการเปรียบเทียบน้ำอ้อยคั้นสดที่ไม่ผ่านคลื่น ผ่านคลื่น 1 นาที และ 1 นาที 30 วินาที ที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

## 2 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1 หลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

วัสดุไดอิเล็กตริกเป็นฉนวนทางไฟฟ้าและจะเกิดการเรียงตัวใหม่ของโปรตอนและอิเล็กตรอนตามขั้วสนามไฟฟ้าที่ได้รับ ตามรูปที่ 1 เมื่อวัสดุเกิดการจัดเรียงตัวใหม่นั้นแสดงว่าได้รับพลังงานไฟฟ้าและจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนตามสมการที่ (1)

$$P = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' |\bar{E}|^2 \quad (1)$$

เมื่อ $P$ คือ ความหนาแน่นของการสูญเสียพลังงาน
$f$ คือ ความถี่สนามไฟฟ้า
$\varepsilon_0$ คือ ค่าสภาพยอมได้ของสนามไฟฟ้าในสุญญากาศ
$\varepsilon''$ คือ ค่าความสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน
$E$ คือ สนามไฟฟ้า

การถ่ายเทพลังงานความร้อนภายในวัสดุเกิดได้จากอุณหภูมิรอบวัสดุและค่าความสามารถการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนจากความเข้มสนามไฟฟ้าที่ได้รับตามสมการที่ (2)

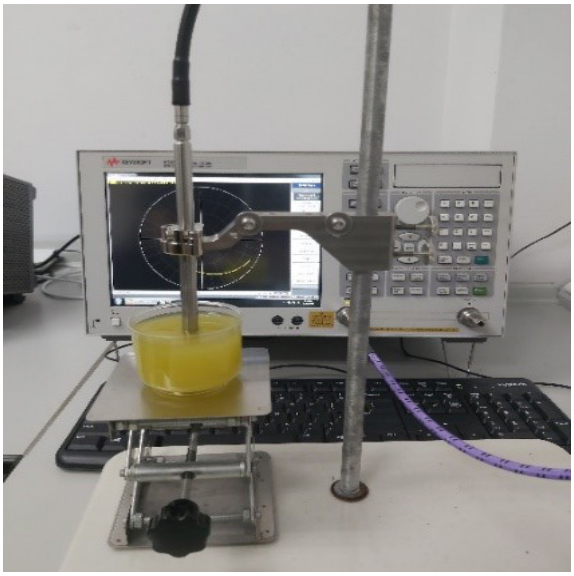
$$\rho C p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T \quad (2)$$

เมื่อ $\rho$ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ
$C_p$ คือ ความร้อนจำเพาะ
$T$ คือ อุณหภูมิ
$t$ คือ เวลา
$k$ คือ ค่าการแพร่ความร้อนของวัสดุ

ภายในเครื่องให้กำเนิดพลังงานความถี่สูงจะใช้หลอดแม็คนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 2.45 จิกกะเฮิร์ต แผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่เดียวกันออกมา มีใบกวนในการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้ทั่วเตาด้วยหลักการการสะท้อนคลื่น เพื่อให้สนามแม่เหล็กกระจายสู่โหลดภายในเตาได้ทั่วถึง เนื่องจากคลื่นความถี่นี้อยู่ในย่านเดียวกับระบบสื่อสาร เช่น สัญญาณอินเตอร์เน็ต สัญญาณมือถือ เป็นต้น เพื่อป้องกันพลังงานหรือคลื่นออกมารบกวนจึงมีโลหะล้อมรอบเครื่อง เรียกว่ากรงฟาราเดย์ ทำให้เกิดมีพลังงานความถี่สูงอยู่ภายในเตาเท่านั้นเมื่อใช้งาน

### 2.2 การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมตัวอย่างน้ำอ้อยคั้นสดจากตลาดท้องถิ่น อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 900 มิลลิลิตร เพื่อให้มั่นใจได้ว่า ในน้ำอ้อยคั้นสดมีเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟีคัลโคลิฟอร์มปะปนอยู่ น้ำในโถสุขภัณฑ์จากห้องน้ำสาธารณะถูกเติมลงไป 45 มิลลิลิตร ตัวอย่างจะถูกบรรจุในภาชนะถ้วยพลาสติกปิดสนิทปริมาตร 100 มิลลิลิตร แบ่งเป็น 9 ตัวอย่าง สำหรับการทดสอบที่ไม่ผ่านคลื่นความถี่สูง 3 ถ้วย ผ่านคลื่น 1 นาที 3 ถ้วย และผ่านคลื่น 1 นาที 30 วินาที 3 ถ้วย ด้วยเครื่องให้กำเนิดความถี่สูง 800 วัตต์ และวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์ (0–200 องศาเซลเซียส)

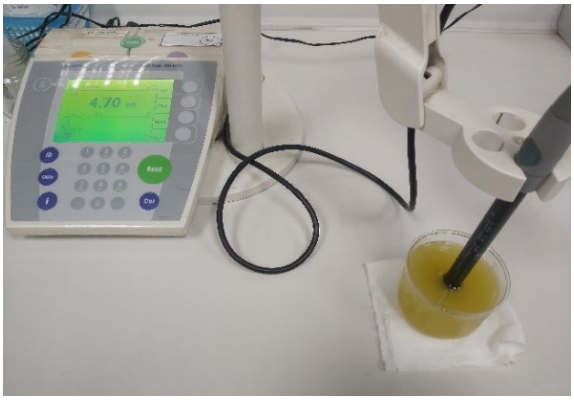


**รูปที่ 2** อุปกรณ์เครื่องมือการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

สารเหลวชนิดแอลกอฮอล์สีแดง จากนั้นเก็บรักษาตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียล 1 คืน

**2.3 การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก**

การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำอ้อย ใช้หัววัดแบบประสิทธิภาพ (Performance Probe Kit) ด้วย Open-ended Coaxial Dielectric Probe Kit (N1501A, Keysight Technology) เชื่อมต่อกับตัววิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ (E5071C, Keysight Technology) ตามรูปที่ 2 ผ่านการวิเคราะห์บนซอฟแวร์ Keysight Materials Measurement Suite 2016 ก่อนการวัดทำการสอบเทียบแบบเปิดกับอากาศ แบบปิดด้วย Performance Probe Short และน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนต่าง ๆ ออกไปที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (Deionized Water; DI Water) ในช่วงย่านความถี่ 1–10 จิกกะเฮิร์ต น้ำอ้อยตัวอย่างถูกบรรจุในภาชนะพลาสติกปริมาตร 100 มิลลิลิตร ก่อนนำไปวัดถูกพักอุณหภูมิไว้ที่อุณหภูมิห้อง ตัวอย่างน้ำอ้อยถูกแบ่งเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 3 ตัวอย่าง คือ กลุ่มที่ไม่ผ่านคลื่นความถี่สูง กลุ่มที่ผ่านคลื่น 1 นาที และกลุ่มที่ผ่านคลื่น 1 นาที 30 วินาที เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดเชื้อแบคทีเรียเกิดขึ้นข้ามตัวอย่างหรือ



**รูปที่ 3** อุปกรณ์เครื่องมือการวัดความเป็นกรด-ด่าง

มาจากปัจจัยภายนอกการวัดจะถูกวัดในห้องปิด และทุกครั้งหลังการวัด หัววัดจะถูกทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ ซึ่งหัววัดไม่ถูกถอดออกมาจากการติดตั้งที่ถูกสอบเทียบไว้แล้ว เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาด คลาดเคลื่อนจากปัจจัยที่เปลี่ยนไป

**2.4 การวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง**

ความเป็นกรด-ด่างของตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่ม ถูกวัดด้วยเครื่องมือวัด pH Conductivity Meter: Mettler Toledo S47-K SevenMulti ตามรูปที่ 3 ความสามารถในการวัดของเครื่องมืออยู่ในช่วง –2.00 ถึง 20.00 pH ก่อนตัวอย่างถูกนำไปวัด เครื่องมือวัดทำการสอบเทียบด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer Solution) pH 4.00 ± 0.02 (20 °C) และ pH 7.00 ± 0.02 (20 °C) ตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่ม กลุ่มละ 3 ตัวอย่างถูกนำไปวัดที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) ทุกครั้งก่อนและหลังทำการวัด หัววัดความเข้มข้นความเป็นกรด-ด่างจะถูกเช็ดทำความสะอาดด้วยผ้าแอลกอฮอล์และล้างด้วยน้ำกลั่น

**2.5 การวัดความหวานหรือปริมาณน้ำตาลในของเหลว**

เป็นการวัดปริมาณซูโครสในสารละลาย หรือวัดเปอร์เซ็นต์ของแข็งที่ละลายในน้ำ (Total Soluble Solid; TSS) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของของเหลว โดยการหักเหของแสงในหน่วยบริกซ์ (Brix) โดยให้

ความหมายว่ามีซูโครสกี่กรัมในสารละลาย 100 กรัม ในการศึกษานี้ใช้ Hand Held Brix Refractometer (Atago MASTER-53M) สามารถวัดได้ในช่วง 0.0–33.0% Brix ก่อนการวัดเครื่องมือทำการสอบเทียบด้วยน้ำกลั่นเพื่อปรับค่าให้ได้ 0.0% Brix ก่อนนำไปวัด ตัวอย่างจะถูกใช้เพียง 1 หยดต่อการวัด 1 ครั้ง ทั้ง 3 กลุ่ม กลุ่มละ 3 ตัวอย่าง ทุกครั้งก่อนและหลังวัดผล เครื่องมือวัดจะถูกเช็ดด้วยผ้าแอลกอฮอล์และล้างด้วยน้ำกลั่น หลังจากนั้นซับให้แห้งด้วยผ้าแห้งสะอาด

**2.6 การตรวจเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม**

การตรวจหาปริมาณเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มใช้วิธีมาตรฐานสำหรับการตรวจสอบน้ำและน้ำเสีย (Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 23rd ed., 2017, part 9221 B.) มีขั้นตอนการตรวจอยู่ 3 ระยะ คือ การตรวจเบื้องต้น (Presumptive Phase) การตรวจยืนยัน (Confirmed Phase) และการตรวจขั้นสมบูรณ์ (Completed Phase) แต่จะใช้เพียง 2 ระยะแรกในการตรวจและนำไปวิเคราะห์เชื้อแบคทีเรียด้วยวิธีเอ็มพีเอ็น (Most Probable Number; MPN)

การตรวจเบื้องต้น เป็นการแยกแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มออกจากแบคทีเรียกลุ่มอื่น โดยการเตรียมอาหารเพาะเลี้ยงเชื้อ Lauryl Tryptose Broth ความเข้มข้น 2 เท่า ปริมาตร 10 มิลลิลิตร จำนวน 5 หลอด และความเข้มข้น 1 เท่า ปริมาตร 10 มิลลิลิตร จำนวน 10 หลอด จากนั้นนำตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องเติมลงในหลอดอาหาร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร สำหรับหลอดอาหารความเข้มข้น 2 เท่า จำนวน 5 หลอด เติมตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตรสำหรับหลอดอาหารความเข้มข้น 1 เท่า จำนวน 5 หลอด และตัวอย่างปริมาตร 0.1 มิลลิลิตรสำหรับหลอดอาหารความเข้มข้น 1 เท่า จำนวน 5 หลอด โดยทุกหลอดจะมีที่ดักก๊าซ (Durham Tube) คว่ำอยู่ภายใน นำไปบ่มเพาะเชื้อที่ตู้บ่มเชื้ออุณหภูมิ 35 ± 0.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ± 2 ชั่วโมง หากมีเชื้อแบคทีเรียจะปรากฏแก๊สหรือสีเปลี่ยนเป็นสีเหลือง นั้นคือให้ผลเป็นบวก ถ้าผลปรากฏไม่แน่ชัดให้ทำการบ่มเพาะอีก 24 ชั่วโมง

การตรวจยืนยัน เตรียมอาหาร Brilliant Green Lactose Bile Broth (BGLB) ปริมาตร 10 มิลลิลิตรต่อ 1 หลอด โดยจะใช้จำนวนเท่ากับจำนวนที่ให้ผลเป็นบวกจากการตรวจเบื้องต้น นำหลอดที่ให้ผลบวกเขย่าหลอดเบา ๆ หรือหมุนหลอดเพื่อให้เชื้อกระจายทั่วหลอดของการตรวจเบื้องต้น ใช้ลูปเขี่ยเชื้อ (Sterile Loop) เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ถ่ายลงในอาหารการตรวจยืนยันและมีหลอดดักก๊าซคว่ำอยู่ภายใน นำไปบ่มเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 35 ± 0.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ± 3 ชั่วโมง หากปรากฏก๊าซในหลอดดักก๊าซจะเป็นผลยืนยันว่ามีเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มหรือให้ผลเป็นบวก ทำการบันทึกจำนวนหลอดที่ให้ผลเป็นบวก จากหลอดการทดสอบ 3 ชุด ชุดละ 5 หลอด (10, 1 และ 0.1 มิลลิลิตร) นำไปเปรียบเทียบกับตาราง MPN

**2.7 การตรวจเชื้อแบคทีเรียฟีคัลโคลิฟอร์ม**

การตรวจเชื้อแบคทีเรียกลุ่มฟีคัลโคลิฟอร์ม จะใช้วิธีการตรวจเบื้องต้นแบบเดียวกับการตรวจเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม ในขั้นตอนการตรวจยืนยัน จะใช้ตัวอย่างจากหลอดเฉพาะที่ให้เป็นผลบวกในการตรวจเบื้องต้น ใช้ลูปเขี่ยเชื้อถ่ายไปยังอาหาร Escherihia coli (EC broth) ปริมาตร 10 มิลลิลิตรต่อหลอด โดยมีหลอดดักก๊าซคว่ำอยู่ภายในนำไปบ่มเพาะเชื้อ ที่อุณหภูมิ 44.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ± 2 ชั่วโมง หากมีก๊าซเกิดขึ้นในหลอดดักก๊าซนั้นแสดงว่ามีเชื้อแบคทีเรียกลุ่มฟีคัลโคลิฟอร์มหรือให้ผลเป็นบวก ถ้าผลที่เกิดขึ้นไม่แน่ชัด จะใช้เวลาบ่มเพาะเชื้อเพิ่มอีก 24 ชั่วโมง บันทึกผลจำนวนหลอดทดลองที่ให้ผลเป็นบวกของแต่ละชุด ทั้งหมด 3 ชุด ชุดละ 5 หลอดการทดลอง ตามลำดับที่ได้เตรียมไว้ตั้งแต่การตรวจเบื้องต้น นำไปเปรียบเทียบตาราง MPN (10, 1 และ 0.1 มิลลิลิตร)

**2.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ**

การทดลองทั้งหมดตรวจสอบซ้ำ 3 ครั้ง แสดงเป็นค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตามกำหนดขั้นตอนแบบเชิงเส้นทั่วไป การเปรียบเทียบที่มีนัยสำคัญทางสถิติถูกกำหนดเมื่อ P = 0.05 โดย Microsoft Excel

**3. ผลการทดลอง**

**3.1 ความเป็นกรด-ด่างของน้ำอ้อย**

ผลการตรวจสอบคุณสมบัติความเป็นกรด-ด่างของตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 1 ตัวอย่างน้ำอ้อยคั้นสดทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านคลื่นความถี่สูงถูกเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาตรวจสอบถูกนำมาพักไว้ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) ตัวอย่างน้ำอ้อยไม่ผ่านคลื่นให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.68 ± 0.02 ตัวอย่างน้ำอ้อยที่ผ่านคลื่น 1 นาที ให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง 5.13 ± 0.01 และน้ำอ้อยที่ผ่านคลื่นความถี่สูง 1 นาที 30 วินาที ให้ค่าความเป็นกรดด่าง 5.13 ± 0.01 ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำอ้อยคั้นสดเมื่อผ่านคลื่นความถี่สูงไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$)

**3.2 ปริมาณน้ำตาลในของเหลว**

ผลการตรวจสอบปริมาณน้ำตาลหรือซูโครสในตัวอย่างเพื่อตรวจสอบผลกระทบที่เกิดขึ้นจากคลื่นความถี่สูง โดยเปรียบเทียบผลปริมาณน้ำตาลในตัวอย่างที่ผ่านคลื่นและไม่ผ่านคลื่น ก่อนนำไปตรวจสอบวัดผล ตัวอย่างจะถูกพักอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส ในตัวอย่างน้ำอ้อยคั้นสดไม่ผ่านคลื่นความถี่สูง ปริมาตร 100 กรัม พบปริมาณน้ำตาล 17.9 ± 0.3 องศาบริกซ์ หรือมีซูโครส 17.9 ± 0.3 กรัม ตัวอย่างน้ำอ้อยคั้นสดผ่านคลื่นความถี่สูง 1 นาที ปริมาตร 100 กรัม พบปริมาณน้ำตาล 18.7 ± 0.1 องศาบริกซ์ หรือมีซูโครส 18.7 ± 0.1 กรัม และน้ำอ้อยคั้นสดผ่านคลื่นความถี่สูง 1 นาที 30 วินาที ปริมาตร 100 กรัม พบปริมาณน้ำตาล 19.8 ± 0.1 องศาบริกซ์ หรือซูโครส 19.8 ± 0.1 กรัม ดังแสดงตามตารางที่ 1 และไม่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตาลในน้ำอ้อยคั้นสดเมื่อผ่านคลื่นความถี่สูง ($P < 0.05$)

**3.3 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำอ้อย**

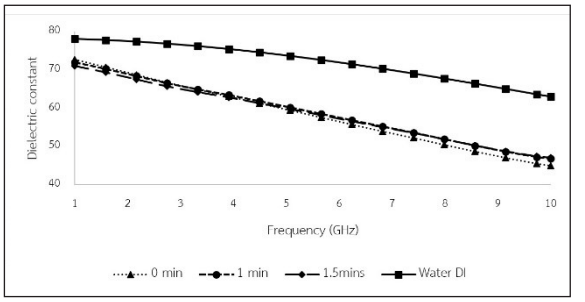
การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกถูกวัดทั้งค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss Factor) ตัวอย่างน้ำอ้อยคั้นสดที่ไม่ผ่านและผ่านคลื่นความถี่สูงเป็นเวลา 1 นาที และ 1 นาที 30 วินาที และน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนถูกตรวจสอบคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำอ้อยคั้นสดก่อนและหลังผ่านคลื่นความถี่สูง ผลแสดงตามรูปที่ 4 เป็นผลของค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ของตัวอย่างน้ำอ้อยคั้นสดไม่ผ่านคลื่นความถี่สูง ผ่านคลื่น 1 นาที ผ่านคลื่น 1 นาที 30 วินาที และน้ำผ่านการกำจัดไอออนต่างๆ ที่ความถี่ 2.45 จิกกะเฮิร์ต ให้ค่า 67.75 67.6 66.8 และ 77.1 ตามลำดับ ในรูปที่ 5 แสดงผลของค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของตัวอย่าง ให้ค่า 17.9 17.2 16.9 และ 9.9 ตามลำดับ

**3.4 เชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม**

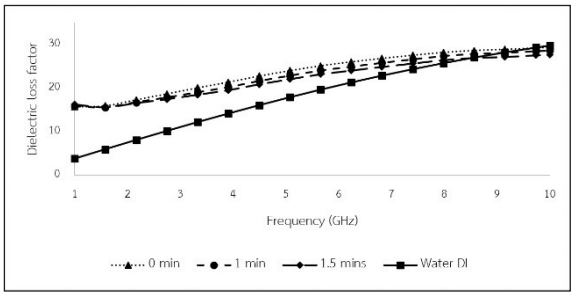
ผลการทดสอบหาปริมาณเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มด้วยวิธีมาตรฐานสำหรับการตรวจสอบน้ำและน้ำเสียของตัวอย่างแสดงในตารางที่ 1 ในตัวอย่างน้ำอ้อยคั้นสดถูกเติมน้ำในโถสุขภัณฑ์จากห้องน้ำสาธารณะ ในตัวอย่างน้ำอ้อยคั้นสดที่ไม่ผ่านคลื่นความถี่สูงตรวจพบการเกิดปฏิกิริยาเป็นฟองก๊าซหรือให้ผลยืนยันได้ว่ามีเชื้อแบคทีเรีย

**ตารางที่ 1** คุณค่าทางโภชนาการ อุณหภูมิและปริมาณเชื้อแบคทีเรียในตัวอย่าง

| ระยะเวลาตัวอย่างผ่านคลื่นความถี่สูง | ความเป็นกรด-ด่าง | อุณหภูมิ (°C) | ปริมาณน้ำตาลในของเหลว (°Brix) | ปริมาณเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม (MPN/100 ml) | ปริมาณเชื้อแบคทีเรียอีโคไล (MPN/100 ml) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 นาที | 4.68 ± 0.02 | 25 ± 1 | 17.9 ± 0.3 | ≥ $1.6 \times 10^3$ | ≥ $1.6 \times 10^3$ |
| 1 นาที | 5.13 ± 0.01 | 91 ± 2 | 18.7 ± 0.1 | < 2 | ไม่พบ |
| 1 นาที 30 วินาที | 5.13 ± 0.01 | 107 ± 2 | 19.8 ± 0.1 | < 2 | ไม่พบ |




**รูปที่ 4** ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของน้ำอ้อยคั้นสดที่ผ่านและไม่ผ่านคลื่นความถี่สูง และน้ำผ่านการกำจัดไอออน




**รูปที่ 5** ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำอ้อยคั้นสดที่ผ่านและไม่ผ่านคลื่นความถี่สูง และน้ำผ่านการกำจัดไอออน

กลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมด 15 หลอดการทดลอง ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบตารางเอ็มพีเอ็น (10, 1 และ 0.1 มิลลิลิตร) ให้ผลมีปริมาณเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มมากกว่าหรือเท่ากับ 1600 MPN/100 ml ส่วนตัวอย่างน้ำอ้อยที่ผ่านคลื่นความถี่สูงที่เวลา 1 นาที และ 1 นาที 30 วินาที ไม่เกิดปฏิกริยาตั้งแต่ระยะการตรวจเบื้องต้นทั้งหมด 15 หลอดการทดลอง จึงไม่มีความจำเป็นในการตรวจระยะยืนยันผล เมื่อนำไปเปรียบเทียบตารางเอ็มพีเอ็น พบว่ามีปริมาณเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มน้อยกว่า 2 MPN/100 ml

### 3.5 เชื้อแบคทีเรียกลุ่มฟีคัลโคลิฟอร์ม

ผลการทดสอบหาปริมาณเชื้อแบคทีเรียกลุ่มฟีคัลโคลิฟอร์มด้วยวิธีมาตรฐานสำหรับการตรวจสอบน้ำและน้ำเสียของตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า ตัวอย่างน้ำอ้อยคั้นสดที่ไม่ผ่านคลื่นความถี่สูง ทำการทดสอบถึงระยะการตรวจยืนยันและปรากฏปฏิกริยาก๊าซเกิดขึ้นทั้ง 15 หลอดการทดลอง เมื่อนำมาเทียบกับตารางเอ็มพีเอ็น พบว่ามีปริมาณเชื้อแบคทีเรียกลุ่มฟีคัลโคลิฟอร์มมากกว่าหรือเท่ากับ 1600 MPN/100 ml ในส่วนของตัวอย่างน้ำอ้อยคั้นสดผ่านคลื่นความถี่สูงด้วยเวลา 1 นาที และ 1 นาที 30 วินาที ไม่ปรากฏปฏิกริยาเกิดเป็นฟองก๊าซหรือเปลี่ยนเป็นสีเหลืองตั้งแต่ระยะการตรวจเบื้องต้น จึงสามารถกล่าวได้ว่าไม่พบเชื้อแบคทีเรียกลุ่มฟีคัลโคลิฟอร์ม

### 4. อภิปรายและสรุปผล

สำหรับงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาผลของการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟีคัลโคลิฟอร์มในน้ำอ้อยคั้นสดด้วยคลื่นความถี่สูงโดยหลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

ผลการทดสอบคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวอย่างน้ำอ้อยคั้นสดเมื่อผ่านคลื่นความถี่สูงด้วยเวลามากขึ้น ค่าคงตัวและค่าการสูญเสียที่ความถี่ 2.45 จิกกะเฮิร์ตไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ คุณสมบัติความเป็นกรด-ด่าง เมื่อผ่านคลื่นความถี่สูงแม้ใช้เวลา 1 นาทีหรือ 1 นาที 30 วินาที ไม่พบความแตกต่างและไม่เปลี่ยนแปลงไปจากตัวอย่างที่ไม่ผ่านคลื่นความถี่สูงอย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนของปริมาณน้ำตาลในตัวอย่างเมื่อผ่านคลื่นความถี่สูงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

ในการตรวจสอบเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟีคัลโคลิฟอร์มในตัวอย่าง หลังจากผสมน้ำในโถสุขภัณฑ์จากห้องน้ำสาธารณะและผ่านคลื่นความถี่สูงที่เวลาต่าง ๆ ให้ผลว่าตัวอย่างไม่พบเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟีคัลโคลิฟอร์มเมื่อตัวอย่างผ่านคลื่นเป็นเวลา 1 นาที และ 1 นาที 30 วินาที ให้อุณหภูมิ 91 และ 107 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แต่จะตรวจพบเชื้อแบคทีเรียปริมาณมากเมื่อตัวอย่างไม่ผ่านคลื่น มีงานวิจัยในลักษณะคล้ายกัน เมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นสามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้ [17]

น้ำอ้อยคั้นสดสามารถถูกกำจัดเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟีคัลโคลิฟอร์มที่ปะปนอยู่ด้วยคลื่นความถี่สูง 800 วัตต์ต่อ 100 มิลลิลิตร ซึ่งไม่ส่งผลให้คุณสมบัติไดอิเล็กตริก คุณสมบัติความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณ

น้ำตาลในตัวอย่างเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ จากการสังเกตพบว่า การใช้เวลาที่ 1 นาที 30 วินาที น้ำอ้อยคั้นสดเริ่มเดือดและกระเด็นออกจากภาชนะทดลอง การใช้เวลา 1 นาที จึงเป็นเวลาที่พอเหมาะ

**5. กิตติกรรมประกาศ**

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

**เอกสารอ้างอิง**

[1] S. Arif, A. Batool, W. Nazir, R. S. Khan, and N. Khalid, "Physiochemical characteristics nutritional properties and health benefits of sugarcane juice," in *Non-alcoholic Beverages: Volume 6. The Science of Beverages*, 2019, pp. 227–257.

[2] P. M. S. Homthong, "Detection of coliform bacteria and Escherichia coli in sugar cane juice at Amphur Muang Chonburi, Chonburi province," *The Golden Teak : Science and Technology Journal*, vol. 2, pp. 8, 2019 (in Thai).

[3] C. Ambrosi, M. Sarshar, M. R. Aprea, A. Pompilio, G. D. Bonaventura, F. Strati, A. Pronio, M. Nicoletti, C. Zagaglia, A. T. Palamara. and D. Scribano, "Colonic adenoma-associated Escherichia coli express specific phenotypes," *Microbes and Infection*, vol. 21, no. 7, pp. 305–312, 2019.

[4] R. Nag, S. Nolan, V. O'Flaherty, O. Fenton, K. G. Richards, B. K. Markey, P. Whyte, D. Bolton, and E. Cummins, "Quantitative microbial human exposure model for faecal indicator bacteria and risk assessment of pathogenic Escherichia coli in surface runoff following application of dairy cattle slurry and co-digestate to grassland," *Journal of Environmental Management*, vol. 299, 2021.

[5] J. Vila, E. Sáez-López, J. R. Johnson, U. Römling, U. Dobrindt, R. Cantón, C. G. Giske, T. Naas, A. Carattoli, M. Martínez-Medina, J. Bosch, P. Retamar, J. Rodríguez-Baño, F. Baquero, and S. M. Soto, "Escherichia coli: An old friend with new tidings," *FEMS Microbiology Reviews*, vol. 40, no. 4, pp. 437–463.

[6] P. R. Meena, P. Yadav, H. Hemlata, K. K. Tejavath, and A. P. Singh, "Poultry-origin extraintestinal Escherichia coli strains carrying the traits associated with urinary tract infection, sepsis, meningitis and avian colibacillosis in India," *Journal of Applied Microbiology*, vol. 130, no. 6, pp. 2087–2101, 2021.

[7] N. Zlatkov and B. E. Uhlin, "Absence of global stress regulation in *Escherichia coli* promotes pathoadaptation and novel c-di-GMP-dependent metabolic capability," *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, 2019.

[8] R. Zhang, C. Song, M. Kou, P. Yin, X. Jin, L. Wang, Y. Deng, B. Wang, D. Xia, P. K. Wong, and L. Ye, "Sterilization of *Escherichia coli* by photothermal synergy of WO3–x/C nanosheet under infrared light irradiation," *Environmental Science & Technology*, vol. 54, no. 6, pp. 3691–3701, 2020.

[9] Z. O. Nazar and N. O. A. Al-Musawi, "Performance application of ultraviolet disinfection technique for raw water," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1895, no. 1, pp. 1–12, 2021.

[10] P. Intra, A. Yawootti, V. Asanavijit, P. Manopian, C. Pengmanee, and N. Somsri, "Inactivation of E. coli in milk tea undergoing pulsed electric field pasteurization," *The Journal of KMUTNB*, vol. 25, no. 3, pp. 425–437, 2015 (in Thai).

[11] J. D. Dubreuil, "Fruit extracts to control pathogenic *Escherichia coli*: A sweet solution," *Heliyon*, vol. 6, no. 2, 2020.

[12] S. Adulvitayakorn, S. H. Azhari, and H. Hasan, "The effects of conventional thermal, microwave heating, and thermosonication treatments on the quality of sugarcane juice," *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 44, no. 2, 2020.

[13] S. Zia, M. R. Khan, X. A. Zeng, Sehrish, M. A. Shabbir, and R. M. Aadil, "Combined effect of microwave and ultrasonication treatments on the quality and stability of sugarcane juice during cold storage," *International Journal of Food Science and Technology*, vol. 54, no. 8, pp. 2563–2569, 2019.

[14] O. P. Chauhan, N. Ravi, N. Roopa, S. Kumar, and P. S. Raju, "High pressure, temperature and time-dependent effects on enzymatic and microbial properties of fresh sugarcane juice," *Journal of Food Science and Technology*, vol. 54, no. 12, pp. 4135–4138, 2017.

[15] B. Brochier, G. D. Mercali, and L. D. F. Marczak, "Effect of moderate electric field on peroxidase activity, phenolic compounds and color during ohmic heating of sugarcane juice," *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 43, no. 12, 2019.

[16] Y. A. Gezahegn, J. Tang, S. S. Sablani, P. D. Pedrow, Y.-Ki Hong, H. Lin, and Z. Tang, "Dielectric properties of water relevant to microwave assisted thermal pasteurization and sterilization of packaged foods," *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 74, 2021.

[17] S. Peng, J. Hummerjohann, R. Stephan, and P. Hammer, "Short communication: Heat resistance of Escherichia coli strains in raw milk at different subpasteurization conditions," *Journal of Dairy Science*, vol. 96, no. 6, pp. 3543–3546, 2013.