



## เครื่องควบคุมความเข้มข้นคลอรีนสำหรับกระบวนการล้างผักที่อาศัยหลักการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

### Chlorine Concentration Control Machine for Vegetable Washing Process Based on Ohmic Heating Principle

เสาวลักษณ์ โพธิ์ทอง<sup>1</sup> ธฤต ตันฑ์ไพบูลย์<sup>1</sup> พิชชาภา โกศัยเนตร<sup>1</sup> กฤษณันท์ มะลิทอง<sup>1</sup> และ กอบศักดิ์ กาญจนพงศ์กุล<sup>1\*</sup>

Saowalak Phothong<sup>1</sup>, Tarit Tanpaiboon<sup>1</sup>, Pitchapa Kosainetr<sup>1</sup>, Kritsanant Malithong<sup>1</sup> and Kobsak Kanjanpongkul<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

<sup>1</sup>Department of Food Engineering, Faculty of Engineering at Kanphangsean, Kasetsart University

\*Corresponding Author E-mail: ksk\_gb@yahoo.com

| ARTICLE INFO                                                                                                                                                                                                                                                                                      | ABSTRACT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Article history:</p> <p>Received 15 August 2018</p> <p>Accept 25 October 2018</p> <p>Online 3 December 2018</p> <p><a href="https://doi.org/10.14456/rj-rmutt.2018.1">doi.org/10.14456/rj-rmutt.2018.1</a></p> <p><b>Keywords:</b></p> <p>ohmic heating, chlorine, electrical conductivity</p> | <p>Due to the fact that the analysis and control of the chlorine concentration in the vegetable wash-water used in the vegetable washing process in the food industry still require manpower and chemicals, the objectives of this research are therefore to design and develop an automatic chlorine concentration control machine to reduce the uses of such man-power and chemicals. The ohmic heating technique was applied to analyze the relationship between the electrical conductivity and the chlorine concentration of the vegetable wash-water. From the result, the increasing rate of the electrical conductivity was positively proportional to the concentration of chlorine. This relationship was used to develop a mathematical model for the prediction of the chlorine concentration which was programmed into the processing unit of</p> |

the machine based on an Arduino platform equipped with the temperature, voltage and electric current sensors. The test results showed that the developed mathematical model correctly predicted and the machine precisely controlled the chlorine concentration (accuracy of about 90%). The results revealed that the uses of ohmic heating in the analysis and the automatic control of the chlorine concentration in the vegetable wash-water was possible.

### บทคัดย่อ

เนื่องจากการวิเคราะห์และควบคุมความเข้มข้นของสารละลายคลอรีนในน้ำล้างผักที่ใช้ในกระบวนการล้างผักในอุตสาหกรรมอาหารยังใช้แรงงานคนและสารเคมี งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมความเข้มข้นคลอรีนอัตโนมัติเพื่อลดการใช้แรงงานและสารเคมีในขั้นตอนดังกล่าว โดยประยุกต์เทคนิคการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าการนำไฟฟ้าของคลอรีน จากผลการทดสอบพบว่าอัตราการเพิ่มของค่าการนำไฟฟ้าแปรผันตรงกับความเข้มข้นคลอรีน ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าการนำไฟฟ้านี้ถูกนำไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณความเข้มข้นของสารละลายคลอรีน ซึ่งถูกนำไปใช้ในส่วนประมวลผลของเครื่องควบคุมความเข้มข้นคลอรีนที่สร้างขึ้นโดยใช้บอร์ดอาร์ดูโน (Arduino) ร่วมกับตัวตรวจจับอุณหภูมิ แรงดันและกระแสไฟฟ้า ผลการทดสอบเครื่องแบบจำลองว่าสามารถทำการวิเคราะห์และควบคุมความเข้มข้นคลอรีนได้อย่างถูกต้อง (ความแม่นยำประมาณ 90%) ผลการวิจัยทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์เทคนิคการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกในการวิเคราะห์และควบคุมความเข้มข้นคลอรีนของน้ำล้างผักแบบอัตโนมัติมีความเป็นไปได้

**คำสำคัญ:** การให้ความร้อนแบบโอห์มมิก คลอรีน ค่าการนำไฟฟ้า

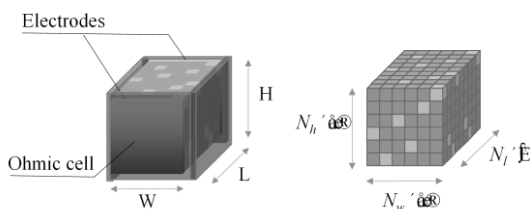
### บทนำ

การล้างผักเป็นกระบวนการที่สำคัญเนื่องจากผักสดที่นำมาบริโภคอาจมีการปนเปื้อนเชื้อโรค พยาธิ และสารพิษหรือสารเคมีอันตราย [1] การล้างผักสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การล้างผักด้วยเบกกิ้งโซดาหรือน้ำส้มสายชู [2] แต่วิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารคือการล้างผักด้วยคลอรีนซึ่งสามารถฆ่าเชื้อต่างๆได้ และพบว่ามีประสิทธิภาพในการลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ได้สูงถึง 99.80% จากปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น [3] ความเข้มข้นของสารละลายคลอรีนที่ใช้การล้างผักในอุตสาหกรรมอาหารอยู่ในช่วง 50-200 ppm โดยนิยมใช้ในคลอรีนในรูปแบบเหลวหรือสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์เนื่องจากมีความสะดวกในการใช้งาน [4] ในระหว่างการล้างผัก ความเข้มข้นของสารละลายคลอรีนที่ใช้จะค่อย ๆ ลดลง ผู้ผลิตจึงต้องใช้แรงงานคนในการสุ่มตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายคลอรีน หากพบว่าคลอรีนมีความเข้มข้นลดลงจะต้องทำการเติมคลอรีนลงไปเพื่อปรับให้ความเข้มข้นของสารละลายคลอรีนในน้ำล้างผักอยู่ในระดับที่ต้องการ กระบวนการดังกล่าวส่งผลให้เกิดการสิ้นเปลืองแรงงานทั้งในการตรวจสอบและการเติมคลอรีน นอกจากนี้วิธีการที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณคลอรีนในปัจจุบันคือการใช้วิธีการทางเคมีในการ

วิเคราะห์ ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเกิดค่าใช้จ่ายในการบำบัดสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการวิเคราะห์อีกด้วย การพัฒนาวิธีใหม่ในการควบคุมความเข้มข้นคลอรีนแบบอัตโนมัติที่สามารถลดแรงงานและการใช้สารเคมีได้จึงน่าจะส่งผลดีต่อผู้ประกอบการโดยรวม

เป็นที่ทราบกันดีว่าค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมีค่าสูงขึ้น [5] จากการทดลองเบื้องต้นพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำล้างผักที่เตรียมจากสารละลายคลอรีนแปรผันตรงกับความเข้มข้นของคลอรีน ในงานวิจัยนี้จึงได้นำหลักการความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายคลอรีนมาใช้ในการพัฒนาเครื่องควบคุมความเข้มข้นคลอรีน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและความเข้มข้นของคลอรีน สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของคลอรีน และใช้แบบจำลองในการสร้างเครื่องควบคุมความเข้มข้นคลอรีนอัตโนมัติขนาดเล็ก โดยคาดหวังว่าจะสามารถใช้นวัตกรรมต้นแบบที่ได้จากการวิจัยนี้ในการพัฒนาต่อยอดไปสู่การสร้างเครื่องตรวจวัดและควบคุมความเข้มข้นคลอรีนแบบอัตโนมัติที่สามารถใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรมต่อไป

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นคลอรีนด้วยค่าการนำไฟฟ้า



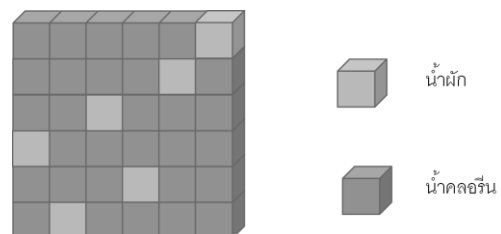
**รูปที่ 1** ลักษณะทางกายภาพของน้ำล้างผักที่มีน้ำผักผสมอยู่ โดย ภาพทางซ้ายแสดงขนาดโดยรวมและภาพทางขวาแสดงการแบ่งเป็นส่วนย่อยเพื่อการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์

รูปที่ 1 แสดงลักษณะทางกายภาพของสารละลายคลอรีนที่มีน้ำผักผสมอยู่ในโอห์มมิเซลล์ซึ่งมีอิเล็กโทรดติดตั้งอยู่ทั้งสองข้าง โดย  $L$ ,  $W$  และ  $H$  คือความยาว ความกว้างและความสูงของโอห์มมิเซลล์  $N_l$ ,  $N_w$  และ  $N_h$  คือจำนวนชั้นตามความยาว ความกว้างและความสูงของโอห์มมิเซลล์ตามลำดับ

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต้องทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าของส่วนประกอบต่าง ๆ แล้วจึงทำการคำนวณความเข้มข้นของคลอรีนจากความสัมพันธ์ดังกล่าว โดยเริ่มจากการพิจารณาว่าในขณะที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าไปยังสารละลายคลอรีนที่มีน้ำผักผสมอยู่ผ่านคู่อิเล็กโทรด กระแสไฟฟ้าจะไหลจากอิเล็กโทรดแผ่นหนึ่งไปยังอีกแผ่นหนึ่ง โดยปริมาณกระแสไฟฟ้าจะแปรผกผันกับความต้านทาน โดยรวมของของเหลว ถ้า  $\sigma_{mix}$ ,  $\sigma_{cl}$  และ  $\sigma_v$  คือค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายคลอรีนที่มีน้ำผักจำลองผสมอยู่ สารละลายคลอรีนและน้ำผัก (S/m) ตามลำดับ จะสามารถคำนวณความต้านทานต่อหน่วยของสารละลายคลอรีนและน้ำผักได้ดังนี้

$$r_{cl} = \left( \frac{L}{N_l} \right) / \left( \frac{\sigma_{cl} HW}{N_h N_w} \right) \quad (1)$$

$$r_v = \left( \frac{L}{N_l} \right) / \left( \frac{\sigma_v HW}{N_h N_w} \right) \quad (2)$$



**รูปที่ 2** แผนภาพเพื่อการคำนวณความต้านทานรวมในชั้นที่ 1

รูปที่ 2 แสดงของเหลวผสมระหว่างน้ำผักกับสารละลายคลอรีนในแต่ละชั้น หากกำหนดให้  $x$  คือสัดส่วนโดยปริมาตรของน้ำผักต่อสารละลายคลอรีน ความต้านทานรวมในแต่ละชั้น ( $r_1$ ) จะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{1}{r_1} = \frac{(1-x)N_w N_h}{r_{cl}} + \frac{xN_w N_h}{r_v} \quad (3)$$

เนื่องจากของเหลวมีการผสมกันอย่างสม่ำเสมอ  
จะได้

$$r_1 = r_2 = \dots = r_{N_i} \quad (4)$$

เนื่องจากการเรียงตัวของตัวต้านทาน  
 $r_1, r_2, \dots, r_{N_i}$  เป็นแบบอนุกรม ความต้านทานรวม  
ทั้งหมด  $R$  จึงสามารถหาได้จากสมการที่ 5 ดังนี้

$$R = \sum_{i=1}^{N_i} r_i = N_i r_1 \quad (5)$$

และด้วยเหตุที่ความต้านทานรวมของของผสม  
สามารถคำนวณได้โดยตรงจากความสัมพันธ์

$$R = \frac{L}{\sigma_{mix} HW} \quad (6)$$

เมื่อรวมสมการที่ 3 ถึง 6 จะสามารถเขียน  
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าขององค์ประกอบ  
ต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\sigma_{mix} = x\sigma_v + (1-x)\sigma_{cl} \quad (7)$$

หลังจากทราบสัดส่วนโดยปริมาตรของน้ำผักต่อ  
สารละลายคลอรีน สามารถคำนวณความเข้มข้นของ  
สารละลายคลอรีนได้จากสมการที่ 8 ดังนี้

$$C = C_0(1-x) \quad (8)$$

เมื่อ  $C$  และ  $C_0$  คือ ความเข้มข้นคงเหลือและ  
ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายคลอรีน (ppm)  
สมการที่ 7 และ 8 เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์  
ระหว่างความเข้มข้นของคลอรีน ค่าการนำไฟฟ้าของ  
ของเหลว และสัดส่วนโดยปริมาตรของน้ำผักต่อ  
สารละลายคลอรีน จากผลการทดสอบเบื้องต้นพบว่า  
แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้งานได้จริง (มีความ  
แม่นยำในการทำนายปริมาณคลอรีนมากกว่า 85 %)

## วิธีดำเนินการวิจัย

### วัตถุดิบ

สารละลายคลอรีนที่ใช้เป็นคลอรีนน้ำความ  
เข้มข้น 10%w/v ชนิดโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (บริษัทคอน  
แฟร์เอ็กซ์เพิร์ท, ประเทศไทย)

### การวัดค่าการนำไฟฟ้า

เดิมตัวอย่างสารละลายคลอรีน (ความเข้มข้น 50,  
100, 150 และ 200 ppm) 200 mL ลงในโอทมิกเซลล์  
ชนิดสถิติรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด กว้าง 15 cm ยาว  
10.5 cm และสูง 1.2 cm โดยมีฝาปิดด้านบนเพื่อป้องกันการ  
สูญเสียความร้อน ติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิชนิด  
RTD แบบสามสายที่ตำแหน่งกึ่งกลาง ให้ความร้อนแก่  
ตัวอย่างโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้า บันทึกค่ากระแสไฟฟ้า เพื่อ  
ใช้ในการคำนวณหาการนำไฟฟ้าโดยใช้สมการที่ (9)

$$\sigma = \frac{IL}{VA} \quad (9)$$

เมื่อ  $I$  และ  $V$  คือกระแส (A) และแรงดันไฟฟ้า (V)  
 $L$  และ  $A$  คือระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (cm) และ  
พื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดส่วนที่สัมผัสกับอาหาร (cm<sup>2</sup>)  
นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับ  
อุณหภูมิเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการ  
นำไฟฟ้าตามสมการที่ 10

$$\sigma = aT + b \quad (10)$$

โดย  $a$  และ  $b$  คืออัตราการเพิ่มของค่าการนำ  
ไฟฟ้า (S/m°C) และจุดตัดแกนของกราฟ (S/m)  
ตามลำดับ ความสัมพันธ์นี้ถือเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญ  
และถูกใช้เป็นข้อมูลในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนาย  
ความเข้มข้นของคลอรีนและการออกแบบโอทมิกเซลล์  
ในเครื่องวิเคราะห์ต่อไป

การเตรียมน้ำผักและน้ำผักจำลอง

น้ำผัก หมายถึง น้ำที่ซึมออกมาจากตัวผักขณะ การล้าง น้ำผักจะผสมกับสารละลายคลอรีนและมีผลทำให้ความเข้มข้นคลอรีนลดลงและส่งผลกระทบต่อค่าการนำไฟฟ้าของน้ำล้างผักโดยรวมด้วย การทดลองในส่วนนี้ จึงเป็นการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำผัก เพื่อใช้ในการเตรียมน้ำผักจำลองจากน้ำเกลือที่มีค่าการนำไฟฟ้าใกล้เคียงกับน้ำผักจริง

ขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมน้ำผักจริงและการหาค่าการนำไฟฟ้า ตัวอย่างผักที่ใช้ในการวิจัยคือเห็ดเข็มทอง วิธีการเตรียมน้ำผักทำโดยนำเห็ดเข็มทอง 200 g ไปล้างในน้ำ 1000 mL เป็นเวลา 3 นาที แยกส่วนน้ำล้างเห็ดเข็มทองเพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าตามวิธีที่ระบุข้างต้น

ตามที่อธิบายข้างต้นว่างานวิจัยนี้ใช้น้ำเกลือเป็นน้ำผักจำลองเพื่อลดผลจากความแปรปรวนจากตัวอย่างผัก โดยน้ำเกลือที่จะใช้เป็นน้ำผักจำลองนี้จะต้องมีความเข้มข้นที่เหมาะสมที่จะทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าใกล้เคียงกับน้ำผัก น้ำเกลือที่ถูกทดสอบจะมีช่วงความเข้มข้น 3 ระดับ คือ 0.1, 0.15 และ 0.2 g/L ตัวอย่างน้ำเกลือจะถูกนำไปวัดค่าการนำไฟฟ้าเพื่อเทียบกับค่าการนำไฟฟ้าของน้ำผักจริง

#### การออกแบบเครื่องควบคุมความเข้มข้นคลอรีนอัตโนมัติ

เครื่องถูกออกแบบตามข้อกำหนดดังนี้ 1) ถังล้างจำลองมีขนาดย่อส่วนจากถังล้างผักในอุตสาหกรรมในอัตราส่วน 1:100 เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบและการขยายขนาดในอนาคต และ 2) ส่วนเติมคลอรีนจะต้องทำงานเมื่อสารละลายคลอรีนในถังล้างจำลองมีความเข้มข้นต่ำกว่า 120 ppm และเติมคลอรีนจนกระทั่งความเข้มข้นไม่ต่ำกว่า 150 ppm โดยผลการออกแบบเครื่องได้แสดงไว้ในหัวข้อผลการทดลองต่อไป

การทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองและการทำงานของเครื่อง

ความแม่นยำและความเที่ยงตรงของแบบจำลอง ถูกทดสอบโดยใช้น้ำที่มีอุณหภูมิประมาณ 25 °C เพราะใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ใช้ในการล้างผักทั่วไปในอุตสาหกรรม วิธีการทดสอบว่าแบบจำลองมีความถูกต้องหรือไม่คือการทดสอบความแม่นยำและความเที่ยงตรงของค่าความเข้มข้นคลอรีนที่ทำนายได้เทียบกับค่าความเข้มข้นจริง การทดสอบเริ่มจากการเติมน้ำตัวอย่างลงในถังล้างจำลอง หลังจากนั้นโปรแกรมจะสั่งให้เครื่องทำงานโดยอัตโนมัติโดยเริ่มจากการดึงน้ำตัวอย่างจากถังล้างจำลองลงในโอห์มมิคเซลล์ หลังจากนั้นเครื่องจะทำการวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่างและคำนวณความเข้มข้นของคลอรีนเพื่อใช้ในการตัดสินใจว่าควรเติมคลอรีนหรือไม่ ทำการทดสอบซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง นำข้อมูลที่ได้นำมาคำนวณหาความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision) โดยใช้สมการที่ (11) และ (12)

$$\%Accuracy = (1 - \left| \frac{X_i - X_{act}}{X_{act}} \right|_{\max}) \times 100\% \quad (11)$$

$$\%Precision = (1 - \left| \frac{X_i - X_{av}}{X_{av}} \right|_{\max}) \times 100\% \quad (12)$$

เมื่อ  $X_i$ ,  $X_{act}$  และ  $X_{av}$  คือ ค่าความเข้มข้นของคลอรีนที่ได้จากการวัดครั้งที่  $i$  ค่าความเข้มข้นของคลอรีนจริง และค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของคลอรีนที่ได้จากการวัดทั้ง 5 ครั้ง

ในการทดสอบการทำงานของเครื่องควบคุมความเข้มข้นคลอรีนอัตโนมัติจะทำการทดสอบความถูกต้องในการตัดสินใจที่จะเติมหรือไม่เติมคลอรีนโดยเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจคือความเข้มข้นต่ำกว่า 120 ppm และตรวจสอบความเร็วในการทำงานโดยรวม

#### ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายคลอรีน

การวิจัยในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและความเข้มข้นของสารละลายคลอรีนโดยพิจารณาจากอัตราการเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าเมื่อความเข้มข้นของคลอรีนเปลี่ยนไป จากผลการทดลองพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายคลอรีนที่ความเข้มข้น 50 ppm เพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิอย่างเป็นเชิงเส้น ดังรูปที่ 2 สาเหตุที่ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายคลอรีนขึ้นกับอุณหภูมินั้นเป็นเพราะว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สารละลายจะมีความหนืดน้อยลงและไอออนในสารละลายก็มีพลังงานจลน์สูงขึ้น จึงทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นด้วย โดยผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของโพสุรีย์ [6] ซึ่งได้ทดลองวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.01 M ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และรายงานค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายจะมีค่าเพิ่มตามอุณหภูมิแบบเชิงเส้นโดยมีอัตราการเพิ่มเท่ากับ 0.0027 S/m เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายคลอรีนเป็น 100, 150 และ 200 ppm ค่าการนำไฟฟ้าก็ยังคงเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิอย่างเป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกัน แต่ความชันจะเพิ่มจาก 0.00133 เป็น 0.00187, 0.00262 และ 0.00340 S/m°C การเพิ่มความเข้มข้นเป็นการเพิ่มปริมาณไอออนอิสระในระบบส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น

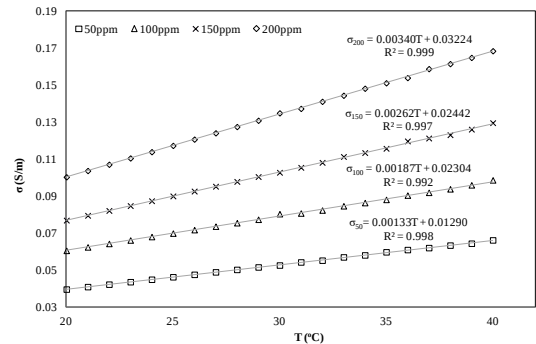
จากการพิจารณาพบว่าความชันหรืออัตราการเพิ่มของค่าการนำไฟฟ้า (แทนด้วยตัวแปร a มีหน่วยเป็น S/m°C) และจุดตัดแกนของกราฟ (แทนด้วยตัวแปร b มีหน่วยเป็น S/m) มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายคลอรีน ตามสมการที่ (13) และ (14) ตามลำดับ

$$a = 0.000014 C + 0.000565 \quad (R^2=0.993) \quad (13)$$

$$b = 0.000119 C + 0.008300 \quad (R^2=0.932) \quad (14)$$

โดย C คือความเข้มข้นของสารละลายคลอรีน (ppm) สมการที่ 13 และ 14 เป็นข้อมูลที่มีความสำคัญ

และถูกนำไปใช้ในการพัฒนาโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายคลอรีนร่วมกับสมการที่ 7 และ 8 ต่อไป

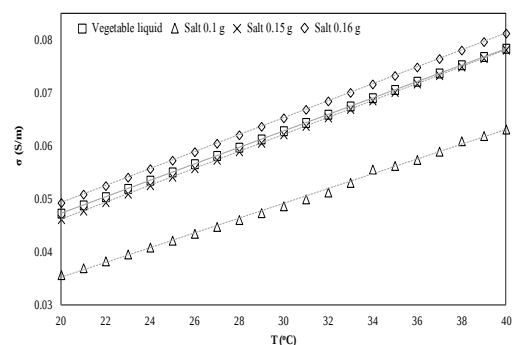


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการนำไฟฟ้า

ของสารละลายคลอรีนที่ความเข้มข้น 50-200 ppm

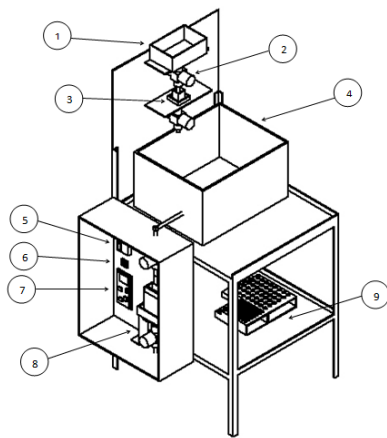
ความเข้มข้นที่เหมาะสมของน้ำเกลือที่ใช้เป็นน้ำผักจำลอง

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการนำไฟฟ้าของน้ำผักและน้ำเกลือที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำผักและน้ำเกลือทุกตัวอย่างเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิอย่างเป็นเชิงเส้น จากรูปจะเห็นได้ชัดเจนว่าน้ำเกลือที่ความเข้มข้น 0.15 g มีค่าการนำไฟฟ้าใกล้เคียงกับน้ำผักตลอดทั้งช่วงอุณหภูมิทดสอบ โดยมีความแตกต่างไม่เกิน 2.34 % และที่อุณหภูมิใช้งานจริง (24-25 °C) มีความแตกต่างเพียง 1.75 % เท่านั้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้น้ำเกลือที่ความเข้มข้น 0.15 g เป็นน้ำผักจำลองในการทดสอบแบบจำลองและการทำงานของเครื่อง



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเกลือที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และน้ำผัก

### แบบเครื่องควบคุมความเข้มข้นคลอรีนอัตโนมัติ



**รูปที่ 5** เครื่องควบคุมความเข้มข้นคลอรีนอัตโนมัติ ประกอบด้วย 1 ถังบรรจุน้ำคลอรีนเข้มข้น; 2 โซลีนอยด์วาล์ว; 3 ห้องควบคุมปริมาตรน้ำคลอรีนเข้มข้นขนาด 10 mL; 4 ถังล้างจำลอง; 5 รีเลย์; 6 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ แรงดัน และกระแสไฟฟ้า; 7 Arduino Mega; 8 ชุดการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก; 9 แหล่งจ่ายไฟ

รูปที่ 5 เป็นแบบของเครื่องควบคุมความเข้มข้นคลอรีนอัตโนมัติซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 3

ส่วนได้แก่ 1) ชุดจ่ายคลอรีนเข้มข้น (หมายเลข 1-3) 2) ถังล้างจำลองขนาด 5 L โดยคำนวณจากขนาดย่อยส่วนจากถังล้างฝักในอุตสาหกรรมในอัตราส่วน 1:100 (หมายเลข 4) และ 3) ชุดการตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้า (หมายเลข 5-9)

สำหรับชุดจ่ายคลอรีนเข้มข้นนั้นประกอบด้วยถังบรรจุน้ำคลอรีนเข้มข้นซึ่งมีความเข้มข้น 20,000 ppm เพื่อใช้ในการปรับความเข้มข้นของน้ำคลอรีนในถังล้างฝักที่น้ำในถังล้างมีความเข้มข้นต่ำกว่า 120 ppm ส่วนชุดการตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าใช้บอร์ด Arduino รุ่น Mega ร่วมกับเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ แรงดัน และกระแสไฟฟ้า เป็นตัวประมวลผล โดยจะมีโอห์มมิกเซลล์ซึ่งมีขนาดกว้าง 8 cm ยาว 2.5 cm และสูง 8 cm ทำหน้าที่เป็นห้องวัดค่าการนำไฟฟ้า วัสดุที่ใช้ทำโอห์มมิกเซลล์คืออะคริลิกเนื่องจากการประกอบขึ้นรูปสามารถทำได้ง่ายและสามารถทนอุณหภูมิใช้งานได้ดี แผ่นอิเล็กทรอนิกส์ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม 304 โดยจากการทดสอบพบว่ากระแสไฟฟ้าต้องมีปริมาณไม่เกิน 0.24 A เพื่อป้องกันการไหม้ของอิเล็กทรอนิกส์ ระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์คือ 2.5 cm เพื่อให้สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ใช้งาน

**ตารางที่ 1** ตัวอย่างผลการทำนายความเข้มข้นคลอรีนของเครื่อง

| $T$<br>(°C) | $\sigma_d$<br>(S/m) | $\sigma_{mix}$<br>(S/m) | $a_v$<br>(S/m °C) | $b_v$<br>(S/m) | $\sigma_v$<br>(S/m) | $x$  | $C$<br>(ppm) | %error |
|-------------|---------------------|-------------------------|-------------------|----------------|---------------------|------|--------------|--------|
| 25.02       | 0.0900              | 0.0758                  | 0.0013            | 0.0115         | 0.0440              | 0.24 | 114.73       | -4.39% |
| 25.08       | 0.0901              | 0.0763                  |                   |                | 0.0441              |      |              |        |
| 25.13       | 0.0903              | 0.0765                  |                   |                | 0.0442              |      |              |        |
| 25.16       | 0.0903              | 0.0810                  |                   |                | 0.0442              |      |              |        |
| 25.18       | 0.0904              | 0.0816                  |                   |                | 0.0442              |      |              |        |
| 25.22       | 0.0905              | 0.0775                  |                   |                | 0.0443              |      |              |        |
| 25.25       | 0.0906              | 0.0821                  |                   |                | 0.0443              |      |              |        |
| 25.29       | 0.0907              | 0.0824                  |                   |                | 0.0444              |      |              |        |
| 25.31       | 0.0907              | 0.0828                  |                   |                | 0.0444              |      |              |        |

### ผลการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองและการทำงานของเครื่อง

การทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองทำโดยการวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่างและคำนวณความเข้มข้นของคลอรีนในน้ำที่ดึงมาจากถังล้างจำลองเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นจริง ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างการประมาณค่า  $\sigma_a$ ,  $a_v$ ,  $b_v$ ,  $\sigma_v$  และ  $x$  จากค่า  $T$  และ  $\sigma_{mix}$  ทำให้สามารถประมาณความเข้มข้นคลอรีน ( $C$ ) โดยตัวอย่างน้ำคลอรีนที่ใช้มีความเข้มข้นที่ทราบค่าคือ 120 ppm จะเห็นได้ว่าเครื่องสามารถทำนายความเข้มข้นของสารละลายคลอรีนในถังล้างจำลองได้ใกล้เคียงกับค่าจริง (120 ppm) โดยมีความผิดพลาดประมาณ 4 %

เมื่อทำการทดสอบซ้ำอีก 4 ครั้งเพื่อตรวจสอบความแม่นยำและความเที่ยงตรงของความเข้มข้น

ตารางที่ 2 ความแม่นยำและความเที่ยงตรงของความเข้มข้นสารละลายคลอรีน

| ครั้งที่ทดสอบ | $x_{actual}$ | $x_{model}$ | $C_{actual}$ (ppm) | $C_{mode}$ (ppm) | %Accuracy | %precision |
|---------------|--------------|-------------|--------------------|------------------|-----------|------------|
| 1             | 0.20         | 0.24        | 120.00             | 114.73           | 95.61     | 95.48      |
| 2             | 0.20         | 0.25        | 120.00             | 112.62           | 93.85     | 97.41      |
| 3             | 0.20         | 0.24        | 120.00             | 114.62           | 95.51     | 95.59      |
| 4             | 0.20         | 0.31        | 120.00             | 103.99           | 86.66     | 94.73      |
| 5             | 0.20         | 0.31        | 120.00             | 102.91           | 85.76     | 93.73      |
| เฉลี่ย        | 0.20         | 0.27        | 120.00             | 109.77           | 85.76     | 93.75      |

การทดสอบการทำงานของเครื่องทำโดยการจำลองสถานการณ์การล้างผักจริงเริ่มจากการเติมน้ำคลอรีนความเข้มข้นเริ่มต้น 150 ppm ลงในถังล้างจำลองซึ่งเป็นการจำลองขั้นตอนก่อนการล้าง (Initial) เปิดโปรแกรม ในแง่การตัดสินใจในการเติมคลอรีนโปรแกรมสามารถตัดสินใจได้อย่างถูกต้องคือไม่เติมคลอรีนเนื่องจากความเข้มข้นคลอรีนในถังล้างมีค่าสูงกว่า 120 ppm (ตารางที่ 3) เมื่อความเข้มข้นของคลอรีนลดเหลือ

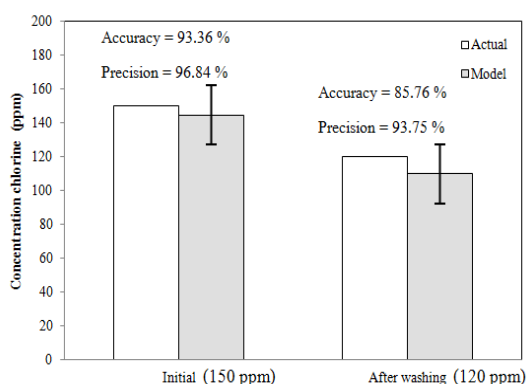
สารละลายคลอรีน จะได้ผลการทดลองซึ่งแสดงดังตารางที่ 2 โดย  $x_{actual}$  และ  $x_{model}$  คือสัดส่วนของน้ำผักจำลองจริงและค่าที่ได้จากแบบจำลอง  $C_{actual}$  และ  $C_{mode}$  คือความเข้มข้นของสารละลายคลอรีนคงเหลือจริงและค่าที่ได้จากแบบจำลองตามลำดับ สิ่งที่สังเกตพบคือ ค่าความแม่นยำจะลดลงเล็กน้อยในการวัดครั้งที่ 4 และ 5 ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการระเหยของคลอรีนที่บริเวณถังล้างจำลองซึ่งไม่มีฝาปิดระหว่างการวัด นอกจากนี้ยังอาจมีผลมาจากสิ่งแวดล้อมภายนอกอีกเล็กน้อยที่รบกวนการทำงานของระบบทำให้อุณหภูมิการทดสอบในแต่ละครั้งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย ดังนั้นในการนำเครื่องไปใช้งานอาจต้องออกแบบส่วนฝาปิดเพิ่มเติมเพื่อลดผลกระทบดังกล่าว อย่างไรก็ตามพบว่าความแม่นยำต่ำที่สุดยังคงมีค่าสูงพอสมควร (ประมาณ 86%)

120 ppm ซึ่งเป็นการจำลองขั้นตอนหลังการล้าง (After washing) พบว่าโปรแกรมสามารถตัดสินใจสั่งให้ชุดเติมคลอรีนทำงานได้ภายในเวลาที่กำหนด (2.2 s)

จากการตรวจสอบเวลาในการทำงานพบว่าเครื่องสามารถจ่ายน้ำตัวอย่างเข้าสู่ชุดตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าได้ตามปริมาณและเวลาที่กำหนด (160 mL ภายในเวลา 42 s) และเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งสิ้นโดยรวมประมาณ 3 นาทีซึ่งถือว่าเป็นเวลาที่รวดเร็วเทียบกับ

เครื่องวัดคลอรีนที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ส่วนสุดท้าย เป็นการทดสอบการปรับปริมาตรน้ำในถังล้าง ซึ่งเป็นฟังก์ชันเสริมที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการล้างโดยเครื่องจะทำการปรับน้ำในถังล้างให้คงที่ทุกครั้งหลังการวัด ซึ่งผลการทดสอบพบว่าเครื่องสามารถทำงานได้ตามลำดับอย่างถูกต้อง

จากการจำลองสถานการณ์การล้างผักจริงพบว่าเครื่องสามารถทำนายความเข้มข้นของสารละลายคลอรีนในถังล้างจำลองก่อนการล้างได้โดยมีความแม่นยำ 93.36 % และความเที่ยงตรง 96.84 % (รูปที่ 6) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายคลอรีนลดลงเหลือ 120 ppm เครื่องยังสามารถทำนายความเข้มข้นของสารละลายคลอรีนได้ใกล้เคียงกับค่าจริงโดยมีความแม่นยำ 85.76 % และความเที่ยงตรง 93.75 % ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เครื่องควบคุมคลอรีนอัตโนมัติที่สร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการการวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้ามีความแม่นยำและความเที่ยงตรงสูงในระดับที่ยอมรับได้



รูปที่ 6 ความแม่นยำ ความเที่ยงตรง และความเข้มข้นของคลอรีนก่อนการล้างและหลังการล้าง

อย่างไรก็ดีเนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้น้ำเกลือแทนน้ำผักในการทดสอบเครื่อง จึงควรมีการทดสอบเครื่องโดยการใช้น้ำที่ได้จากการล้างผักจริงเพื่อเป็นการยืนยันประสิทธิภาพของเครื่องอีกครั้งหนึ่ง

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการทำงานของเครื่อง

| ครั้งที่ทดสอบ | การทำงานของเครื่อง                 |                       |                          |                          |                               |
|---------------|------------------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|
|               | ความถูกต้องในการตัดสินใจเติมคลอรีน |                       | จ่ายน้ำเข้าโอห์มมิคเซลล์ | จ่ายน้ำเข้าโอห์มมิคเซลล์ | ปรับปริมาตรน้ำได้ถูกต้อง (4L) |
|               |                                    |                       | ได้ตามปริมาตร(160 ml)    | ได้ตามปริมาตร (10 ml)    |                               |
|               | ก่อนการล้าง (150 ppm)              | ก่อนการล้าง (120 ppm) | ภายในเวลา 60 s           | ภายในเวลา 5 s            |                               |
| 1             | ไม่เต็ม                            | เต็ม                  | ✓ (42s)                  | ✓ (22s)                  | ✓ (4L)                        |
| 2             | ไม่เต็ม                            | เต็ม                  | ✓ (42s)                  | ✓ (22s)                  | ✓ (4L)                        |
| 3             | ไม่เต็ม                            | เต็ม                  | ✓ (42s)                  | ✓ (22s)                  | ✓ (4L)                        |
| 4             | ไม่เต็ม                            | เต็ม                  | ✓ (42s)                  | ✓ (22s)                  | ✓ (4L)                        |
| 5             | ไม่เต็ม                            | เต็ม                  | ✓ (42s)                  | ✓ (22s)                  | ✓ (4L)                        |

### สรุปผล

จากการวิจัยพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำคลอรีนเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิอย่างเป็นเชิงเส้นและแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารละลายคลอรีน หลักการดังกล่าว

ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบเครื่องควบคุมความเข้มข้นคลอรีนอัตโนมัติ ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำคลอรีนถูกใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณความเข้มข้นของสารละลายคลอรีน

โดยใช้หลักการวงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบผสม จากการวิเคราะห์ความวงจรสมมูลพบว่าความเข้มข้นมีความสัมพันธ์กับการนำไฟฟ้าของคลอรีนในน้ำล้างผักตามสมการ  $C = C_0(1 - \frac{\sigma_{mix} - \sigma_{cl}}{\sigma_v - \sigma_{cl}})$  ผลการทดสอบ

แบบจำลองพบว่ามีความแม่นยำในการทำนายปริมาณคลอรีน 85-93 % ในส่วนของตัวเครื่องที่สร้างขึ้น ออกแบบให้ส่วนถังล้างผักที่สร้างขึ้นมีขนาดย่อส่วนจากถังล้างผักในอุตสาหกรรมจริงในอัตราส่วน 1:100 เพื่อความสะดวกในการขยายขนาด เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณคลอรีนในงานวิจัยนี้เป็นเทคนิคที่คิดค้นขึ้นมาใหม่และมีความแตกต่างจากเครื่องวัดคลอรีนที่มีจำหน่ายในท้องตลาด โดยได้เลือกใช้วิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิคมาทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าและพัฒนาโปรแกรมเพื่อทำนายและควบคุมความเข้มข้นของคลอรีนเครื่องที่สร้างขึ้นสามารถลดการใช้แรงงานในการตรวจวัดและควบคุมความเข้มข้นของสารละลายคลอรีนในน้ำล้างผักโดยไม่ต้องใช้สารเคมีในกระบวนการตรวจวัด

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

### เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักสุขาภิบาลอาหารและน้ำ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. 2557. คู่มือหลักสูตรการสุขาภิบาลอาหาร สำหรับผู้สัมผัสอาหารและผู้ประกอบการกิจการด้านอาหาร.
- [2] สุวรรณ กาญจนภู, 2537. ถังล้างผักเพื่อลดพิษภัย. หมอชาวบ้าน 16 (181) (พิเศษ) :22.

[3] จอมขวัญ สุวรรณรักษ์ พุดกรอง พันธุ์โหมงค์ และนิธิยา รัตนานนท์, 2557. ประสิทธิภาพของสารฆ่าเชื้อกรดเพอร์ออกไซด์แอซิดิกและสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ในการลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ผิวของผักและผลไม้สดแกะสลัก. วารสารวิชาการและวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 8(2), 92-106.

[4] Beuchat, L.R. 2000. Surface decontamination of fruits and vegetables eaten raw: a review. Center for Food Safety and Quality Enhancement, University of Georgia, Griffin, Georgia, USA.

[5] ไพฑูรย์ หมายมั่นสมสุข. 2553. การวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียเบื้องต้น. สำนักวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมโรงงาน.

[6] ไพฑูรย์ หมายมั่นสมสุข. 2556. การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. กรมโรงงานอุตสาหกรรม.