



การสกัดแอนโธไซยานินจากลูกหว้า (*Syzygium cumini* Skeels)

โดยใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์

Extraction of anthocyanin from Black plum (*Syzygium cumini* Skeels)

using pulsed-electric field assisted

รวินิภา ศรีมูณ^{1*} และ สมยศ สันติมาลัย²

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี 22210

² สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี 22210

*Corresponding Author, E-mail: rawinipa.srimoon@gmail.com

Received: 29 June 2017 | Revised: 26 January 2018 | Accepted: 24 August 2018

บทคัดย่อ

การสกัดแอนโธไซยานินจากลูกหว้า หรือ Black plum (*Syzygium cumini* Skeels) ด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ใช้ขั้วเล็กโทรดแบบเบอร์แบบกลุ่มวางขนานกันยึดติดกับฉนวนที่ทำจากโพลีเอไมด์ ประกอบด้วยวงจรถ่ายกำเนิดพัลส์แรงดันไฟฟ้าแรงสูง แปรค่าแรงดันไฟฟ้า 5, 10, 20 และ 30 กิโลโวลต์ (คิดเป็นความเข้มสนามไฟฟ้า 0.7, 1.3, 2.7 และ 4.0 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ) และความถี่ 10, 20 และ 30 กิโลเฮิรตซ์ ควบคุมอุณหภูมิ ระยะห่างระหว่างขั้วเล็กโทรดทั้งสองและกำลังไฟฟ้าให้คงที่ การสกัดใช้น้ำเป็นตัวทำละลายเนื่องจากเป็นตัวทำละลายในการผลิตน้ำลูกหว้า ผลการศึกษา พบว่า เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าและความถี่ ปริมาณแอนโธไซยานินในรูป cyanidin-3-glucoside ที่สกัดได้เพิ่มขึ้นและลดเวลาในการสกัดลงได้ 2 เท่า เมื่อเทียบกับการสกัดแบบดั้งเดิม ($p < 0.05$) สภาวะที่ให้ปริมาณแอนโธไซยานินมากที่สุด คือ แรงดันไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ ความเข้มสนามไฟฟ้า 4.0 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ความถี่ 30 กิโลเฮิรตซ์ ใช้เวลาสกัด 60 นาที ที่สภาวะนี้ให้ปริมาณแอนโธไซยานิน 1.14 ± 0.020 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักสด สูงกว่าการสกัดแบบดั้งเดิมร้อยละ 32.56 และมีค่า electrical conductivity disintegration index (Z) สูงสุด เท่ากับ 0.84 ± 0.021 เมื่อนำสภาวะที่ได้ไปทำการสกัดตัวอย่างลูกหว้าทั้งผลและตัวอย่างเปลือกลูกหว้า พบว่า ลูกหว้าทั้งผลมีปริมาณแอนโธไซยานินในรูปของ cyanidin-3-glucoside, malvidin-3-glucoside และ pelargonidin-3-glucoside ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม และฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระดีที่พืชสูงกว่าในเปลือกอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดแอนโธไซยานินในลูกหว้าได้ ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปพัฒนาวิธีการผลิตน้ำลูกหว้าได้ในอนาคต

ABSTRACT

The objective of this research was to investigate the extraction of anthocyanin from black plum (*Syzygium cumini* Skeels) using pulsed electric field which was supplied from parallel batch electrode chamber made from polyamide. Black plum samples were treated with 5, 10, 20 and 30 kV of pulsed electric field (0.7, 1.3, 2.7 and 4.0 kV/cm of electrical strength, respectively) with different frequencies 10, 20 and 30 kHz. Temperature, electrodes

distance and power supply were controlled. Water was used as a solvent in the experiments because it was the solvent used in black plum juice production. The results showed that increasing in the electric field strength and frequencies increased the extraction yield of anthocyanin (cyanidin-3-glucoside) and two-folds decreased time to attained the equilibrium significantly ($p < 0.05$) compared with the traditional maceration method. The optimum conditions that yielded the highest anthocyanin concentration were 30 kV voltage, 4.0 kV/cm electric field strength, 30 kHz frequency and 60 minutes extraction time. In these conditions, anthocyanin concentration was 1.14 ± 0.020 mg/g fresh weight and 32.56% higher than that of traditional maceration. It also gave the maximum electrical conductivity disintegration index (Z) value (0.84 ± 0.021). In addition, the concentration of cyanidin-3-glucoside, malvidin-3-glucoside and pelargonidin-3-glucoside, total phenolic contents and DPPH radical scavenging activities in whole fruits were significantly higher than peels ($p < 0.05$). In conclusion, pulsed electric field-assisted extraction of anthocyanin was possible suggested method for black plum juice processing in the future.

คำสำคัญ: แอนโธไซยานิน ลูกหว่า สนามไฟฟ้าแบบพัลส์

Keywords: Anthocyanin, Black plum (*Syzygium cumini* Skeels), Pulsed-Electric Field

บทนำ

แอนโธไซยานิน (anthocyanin) เป็นสาร ประกอบ ฟีนอลิกในกลุ่มฟลาโวนอยด์ พบมากในผักและผลไม้ที่มีสีม่วงหรือ ม่วงแดง เช่น ผลไม้ตระกูลเบอร์รี่ องุ่น และกะหล่ำม่วง แอนโธไซยานินส่วนใหญ่อยู่ในรูปไกลโคไซด์ (glycoside) ของโพลี-ไฮดรอกซี (polyhydroxy) และ โพลีเมทอกซี (polymethoxy) (Chia et al., 2008) แอนโธไซยานินแต่ละชนิดแตกต่างกันที่หมู่แทนที่ โดยทั่วไปพบ 6 ชนิด ได้แก่ cyanidin, malvidin, pelargonidin, peonidin, petunidin และ delphinidin รูปแบบที่พบมากที่สุดคือ cyanidin-3-glucoside ซึ่งเป็นชนิด monomeric anthocyanin (Golmohamadi et al., 2013) แอนโธไซยานินมีคุณสมบัติเป็น สารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidants) ที่สำคัญ มีผลการศึกษาพบว่า แอนโธไซยานินช่วยป้องกันการเกิดโรคมะเร็ง โรคหลอดเลือดหัวใจ และการติดเชื้อบางชนิดได้ (Hou, 2003; Bagchi et al., 2004) อย่างไรก็ตาม แอนโธไซยานินสลายตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน แสงสว่าง ความเป็นกรดต่าง เอนไซม์ ออกซิเจน หรือสารอื่นที่พบร่วมกับแอนโธไซยานิน เช่น โพรตีน แร่ธาตุบางชนิด ฟลาโวนอยด์ รวมทั้งสภาวะในการเก็บรักษาและกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ ทำให้แอนโธไซยานินสลายตัวได้เช่นกัน (Sun et al., 2011; Vallverdú-Queralt et al., 2012) การสกัดแอนโธไซยานินในตัวอย่างจึงมีแนวโน้มใช้วิธีการที่ไม่ใช้ความร้อนเนื่องจากอาจทำให้แอนโธไซยานินเกิดการสลายตัวได้

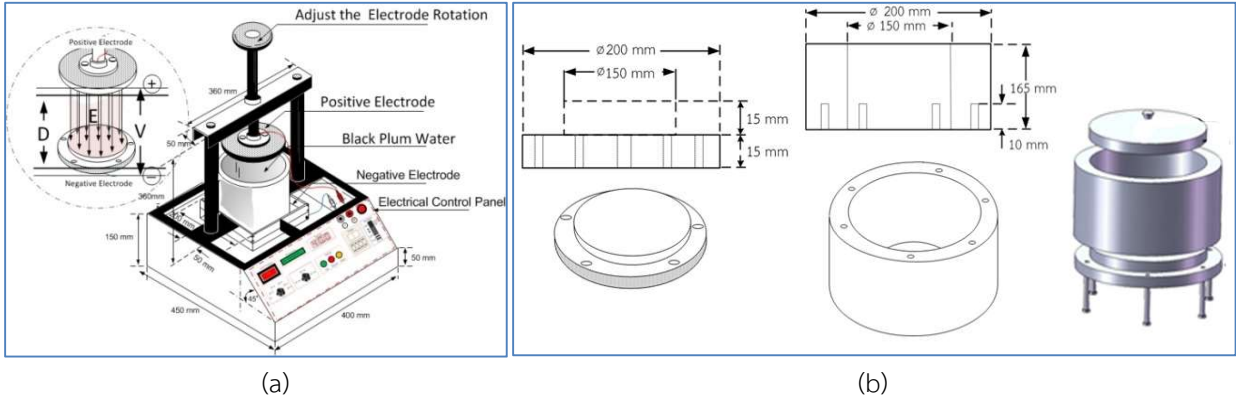
การใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ (Pulsed-electric field, PEF) เป็นวิธีการหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการสกัดตัวอย่างธรรมชาติ เนื่องจากสามารถสกัดสารต้านอนุมูลอิสระออกมาจากตัวอย่างได้มาก ใช้เวลาในการสกัดน้อย รวมทั้งใช้ตัวทำละลายน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการสกัดแบบดั้งเดิม (maceration) โดยไม่จำเป็นต้องใช้ความร้อนในการสกัด จึงทำให้สารต้านอนุมูลอิสระสลายตัวน้อยกว่า สนามไฟฟ้าแบบพัลส์เป็นการใช้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูง แรงดันไฟฟ้าปานกลาง หรือน้อยกว่า 0.1-10 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร และมีพลังงานจำเพาะต่ำกว่า 1-50 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ใช้เวลาในการสัมผัสกับตัวอย่าง ประมาณ 1 ไมโครวินาที – 1 มิลลิวินาที (Donsi, 2011) การสกัดทำโดยวางตัวอย่างไว้ระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้วที่เป็นแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างเยื่อหุ้มเซลล์จนเกิดเบรกดาวน์ เยื่อหุ้มเซลล์จะมีความพรุนและอ่อนนุ่มมากขึ้น เพิ่มอัตราการถ่ายเทมวล (mass transfer) ของตัวทำละลายระหว่างสารละลายภายนอกกับภายในเซลล์ ทำให้สามารถสกัดสารต่างๆ ที่ยึดติดกับโครงสร้างของเซลล์ได้ดี (Clarke, 2006; López et al., 2008) จากการศึกษาพบว่า การใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ แรงดันไฟฟ้า 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ช่วยเพิ่มการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากองุ่นได้มากกว่าการสกัดแบบดั้งเดิมถึงร้อยละ 50 สูงกว่าการใช้แรงดันน้ำสตีตย์ และการใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Corrales et al., 2008)

สำหรับในการศึกษาคั้งนี้ จะประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ในการสกัดแอนโธไซยานินจากลูกหว้า หรือ Black plum (*Syzygium cumini* Skeels) ซึ่งเป็นผลไม้ที่ปลูกมากในจังหวัดจันทบุรี มีการนำลูกหว้ามาแปรรูปเป็นน้ำผลไม้จำหน่ายเป็นเครื่องดื่มที่ได้รับความนิยมมากในจังหวัดจันทบุรี ลูกหว้าเป็นผลไม้ที่อยู่ในวงศ์เดียวกับชมพู เป็นไม้ยืนต้นไม่ผลัดใบ สูงประมาณ 10–35 เมตร ผลอ่อนของลูกหว้ามีสีเขียว แต่เมื่อแก่จัดจะมีสีม่วงเข้ม ขนาดผลประมาณ 0.8–2.0 เซนติเมตร ผลฉ่ำผิวเปลือกมัน รสชาติหวานอมเปรี้ยวปนฝาดเล็กน้อย ประโยชน์ของลูกหว้ามีหลายประการ เช่น เปลือกใช้ต้มรับประทานแก้โรคบิด ปากเปื่อย อาหารไม่ย่อย ท้องร่วง ใบบำรุงไตลดน้ำตาลในเลือด ผลและเมล็ดมีประโยชน์ในการรักษาเบาหวาน หลอดลมอักเสบ และโรคที่เกี่ยวข้องกับทางเดินปัสสาวะ นอกจากนี้ ลูกหว้ายังมีเพคติน กรดแกลลิก แทนนิน กรดออกซาลิก และแอนโธไซยานินในปริมาณสูงโดยเฉพาะในระยะผลสุก การศึกษาพบว่าปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมดที่วัดด้วยวิธี pH difference มีค่าอยู่ในช่วง 0.34–35.41 มิลลิกรัมต่อกรัม และพบปริมาณสูงในระยะผลสุกมากกว่าระยะผลแก่และผลอ่อน ตามลำดับ (นิตยา, 2550) ส่วนสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ที่ใช้สร้างจากอิเล็กโทรดแคโทดแบบกลุ่ม (Batch Chamber) อิเล็กโทรดสองขั้วแบบระนาบวางขนานกันให้สนามไฟฟ้าที่มีความสม่ำเสมอสูง อิเล็กโทรดถูกยึดติดอยู่บนฉนวน มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองค่าหนึ่งตัวอย่างลูกหว้าจะถูกนำมาใส่ในห้องสกัดซึ่งอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดแอนโธไซยานินจากลูกหว้าด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์กับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม รวมทั้งศึกษาปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมดในลูกหว้าทั้งผลและเปลือกลูกหว้า ซึ่งผลการวิจัยนี้มีประโยชน์ในด้านการศึกษาวิธีสกัดที่เหมาะสมเพื่อให้แอนโธไซยานินสลายตัวน้อยที่สุด เพื่อนำไปใช้ในการผลิตน้ำลูกหว้าในอนาคต

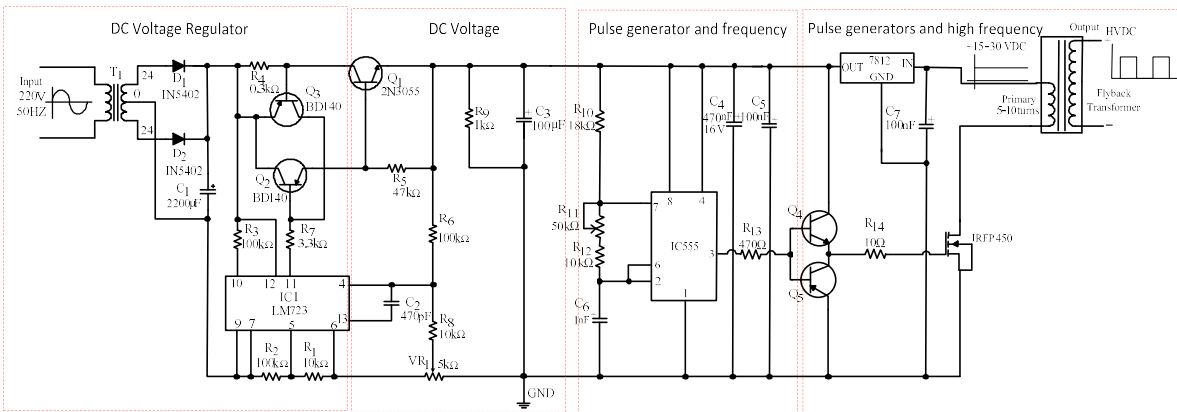
วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การออกแบบโครงสร้างเครื่องสกัดแอนโธไซยานินจากลูกหว้าด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์

โครงสร้างเครื่องสกัดเป็นดังรูปที่ 1(a) ห้องสกัดสารประกอบด้วยอิเล็กโทรดขั้วบวก (anode) ด้านบน สามารถปรับมุมระยะระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง และอิเล็กโทรดขั้วลบด้านล่าง (cathode) โดยขั้วอิเล็กโทรดทำจากสแตนเลส มีเส้นผ่าศูนย์กลางใน 150 มิลลิเมตร สูง 15 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางนอก 200 มิลลิเมตร สูง 15 มิลลิเมตร เชื่อมต่อกับระบบควบคุมการป้อนแรงดันไฟฟ้าแบบพัลส์สูงสุด 30 กิโลโวลต์ ความถี่สูงสุด 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ฉนวนแกนกลางห้องสกัดสารเป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางใน 150 มิลลิเมตร สูง 165 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางนอก 200 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1(b) แผนผังวงจรเครื่องสกัดแอนโธไซยานินจากลูกหว้าด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์แสดงดัง รูปที่ 2 การสร้างสัญญาณพัลส์และความถี่ใช้การสวิตชิงของไอซีเบอร์ 555 ขยายแรงดันไฟฟ้าและความถี่ให้สูงขึ้นเพื่อป้อนให้กับห้องสกัดสาร ป้อนแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ ให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อลดแรงดันไฟฟ้าลงที่ 15 โวลต์เอซี โดยแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงผ่านไดโอดเรียงกระแส และมีไอซี เร็กกูเลเตอร์ (IC-regulator) ควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าให้คงที่ 12 โวลต์ ดีซี ให้กับไอซีเบอร์ 555 ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างสัญญาณพัลส์และความถี่ ซึ่งความถี่จะผันแปรตามค่าความต้านทาน (resistance) และค่าความจุไฟฟ้า (capacitor) โดยสัญญาณความถี่ที่สร้างจะถูกกระตุ้นผ่านทรานซิสเตอร์ 2 ตัว เพื่อขยายสัญญาณความถี่ด้วยมอสเฟต (MOSFET) และส่งผ่านไปยังส่วนสร้างแรงดันไฟฟ้าและความถี่สูงช่วงสั้นๆ ด้วยฟลายแบคไดร์เวอร์ (flyback driver) ป้อนให้กับอิเล็กโทรดขั้วบวกและลบ เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ภายในห้องสกัดสาร



รูปที่ 1 Structure of pulsed-electric field extractor (a) external structure and (b) electrode chamber



รูปที่ 2 Wiring diagram of pulsed electric field generator (Bourneow and Santimalai, 2015)

2. การทดสอบขีดจำกัดความสามารถของเครื่องสกัดแอนโธไซยานินจากลูกหว้าด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์

ทำการทดสอบขีดจำกัดความสามารถของเครื่องสกัดแอนโธไซยานินจากลูกหว้า โดยหาช่วงแรงดันไฟฟ้าและความถี่ต่ำสุด-สูงสุดที่เครื่องสามารถทำได้ ความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ที่ระยะห่างของอิเล็กโทรดที่กำหนด คำนวณได้จากสมการ

$$E = \frac{V}{D}$$

โดยที่ E คือ ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร), V คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า (กิโลโวลต์) และ D คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (เซนติเมตร)

3. สารเคมีและอุปกรณ์

สารเคมีใช้เกรดวิเคราะห์ (AR grade): โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) กรดอะซิติก (CH₃COOH) โซเดียมอะซิเตต (CH₃COONa) จาก Univar Ajax Finechem Australia โซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) จาก Univar Ajax Finechem New Zealand กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เอทานอล (Ethanol)

เมทานอล (Methanol) จาก Merck Germany กรดแกลลิก (Gallic acid) ดีพีพีเอช (DPPH หรือ 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) โทรล๊อกซ์ (Trolox) จาก Sigma-Aldrich USA สารละลาย Folin-Ciocalteu phenol reagent จาก Loba Chemie India เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ Libra S22 ของ Biochrom เครื่องระเหยสารแบบลดความดัน Labora 4003 ของ Heidolph และ เครื่องมัลติมิเตอร์ FLUKE 115 True RMS

4. การเตรียมตัวอย่างลูกหว้า

เก็บตัวอย่างลูกหว้าสดในระยะผลสุกสีม่วงเข้ม แบ่งตัวอย่างลูกหว้าเป็น 2 ส่วน คือ ลูกหว้าทั้งผล (เนื้อและเปลือก) และเปลือกลูกหว้า (คว้านเนื้อทิ้งไป) ล้างให้สะอาด ผ่าเอาเมล็ดออก นำตัวอย่างแต่ละส่วนมาบดให้ละเอียด เก็บใส่ถุงพลาสติก แช่เย็นไว้ก่อนนำไปวิเคราะห์

5. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแอนโธไซยานินจากลูกหว้าโดยใช้เครื่องสกัดด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์

หาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแอนโธไซยานินจากลูกหว้าด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ ใช้แผนการทดลองแบบ 4x3 แฟคทอเรียลใน RCBD โดยมีปัจจัยที่ศึกษา 2 ปัจจัย คือ แรงดันไฟฟ้า 4 ระดับ คือ 5, 10, 20 และ 30 กิโลโวลต์ และความถี่ 3 ระดับ คือ 10, 20 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ปัจจัยควบคุมคือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด เท่ากับ 7.5 เซนติเมตร และอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 20–40 องศาเซลเซียส

ชั่งตัวอย่างลูกหว้าทั้งผล 50 กรัม ใส่ลงในอิเล็กโทรดแคมเบอร์ เติมน้ำกลั่น 1 ลิตร ให้แรงดันไฟฟ้าและความถี่ค่าต่างๆ รวม 12 ชุดการทดลอง ทำการสกัดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 30, 60, 90, 120 และ 180 นาที พร้อมบันทึกอุณหภูมิ นำตัวอย่างน้ำลูกหว้าที่สกัดได้ทีละเวลาต่างๆ ไปวิเคราะห์ปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมดในรูปของ cyanidin-3-glucoside (Cyd-3-glu) ด้วยวิธี pH difference เทียบกับการสกัดแบบดั้งเดิม หาเวลาเข้าสู่สมดุลของการสกัด (equilibrium time, T_{eq}) และคำนวณค่า Electrical conductivity disintegration index (Z) จากการวัดค่าการนำไฟฟ้า (conductivity) ของตัวอย่างด้วยเครื่องมือวัดทั้งก่อนและหลังการให้สนามไฟฟ้า

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแอนโธไซยานินจากลูกหว้าด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์แล้ว นำสภาวะนี้ไปสกัดลูกหว้าทั้งหมดเปรียบเทียบกับเปลือกลูกหว้า จากนั้นนำน้ำลูกหว้าที่สกัดได้ไปวิเคราะห์ปริมาณแอนโธไซยานินในรูปของ cyanidin-3-glucoside (Cyd-3-glu), malvidin-3-glucoside (Mvd-3-glu) และ pelargonidin-3-glucoside (Pgd-3-glu) พร้อมทั้งปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระดีพีพีเอช

6. การวิเคราะห์ปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมด

ปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมด ใช้วิธี pH difference (Golmohamadi et al, 2013): เตรียมหลอดทดลอง 2 หลอด แต่ละหลอดเติมน้ำลูกหว้าที่สกัดได้ลงไป 1 มิลลิลิตร หลอดที่ 1 เติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร หลอดที่ 2 เติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร ปริมาตร 4 มิลลิลิตร หลอดที่ 2 เติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร ปริมาตร 4 มิลลิลิตร หลอดที่ 2 เติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร ปริมาตร 4 มิลลิลิตร เขย่าเบาๆ ปิดปากหลอดแล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่

ความยาวคลื่น 520 และ 700 นาโนเมตร คำนวณปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมดในรูปของ Cyd-3-glu, Mvd-3-glu และ Pgd-3-glu ซึ่งมีมวลโมเลกุล 449.2, 463.3 และ 433.2 กรัมต่อโมล สภาพการดูดกลืนโมลาร์ เท่ากับ 26,900, 28,000 และ 22,400 ลิตรต่อเซนติเมตรต่อโมล ตามลำดับ

7. การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระดีพีพีเอช

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิครวมใช้วิธี Folin-Ciocalteu phenol reagent (Wong et al., 2006): นำสารละลายกรดแกลลิกหรือตัวอย่างน้ำลูกหว้าที่สกัดได้ 2 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น Folin-Ciocalteu phenol reagent เข้มข้นร้อยละ 10 ลงไป 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 3 นาที จากนั้นเติมน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร เข้มข้นร้อยละ 7.5 ลงไป 2 มิลลิลิตร ปิดปากหลอดแล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร คำนวณปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเทียบกับกรดแกลลิก ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระใช้วิธี DPPH assay (Shimada et al., 1992): ผสมสารละลาย Trolox เข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร หรือตัวอย่างน้ำลูกหว้าที่สกัดได้ ปริมาตรต่างๆ กับสารละลาย DPPH เข้มข้น 0.04 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 4.5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 5.0 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ในที่มืดนาน 10 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร คำนวณค่า EC_{50} (effective concentration) หรือความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระที่ทำให้อนุมูล DPPH ลดลงร้อยละ 50 และค่า TEAC (Trolox equivalent antioxidant capacity)

8. การคำนวณค่า Electrical conductivity disintegration index (Z)

ค่า Electrical conductivity disintegration index (Z) ใช้แสดงความเสียหายของเยื่อหุ้มเซลล์จากการให้สนามไฟฟ้า ถ้าค่า $Z = 0$ แสดงว่า เยื่อหุ้มเซลล์ไม่มีความเสียหายเลย แต่ถ้าค่า Z ใกล้เคียง 1 แสดงว่า เยื่อหุ้มเซลล์มีความเสียหายมาก และถ้าค่า $Z = 1$ แสดงว่า เยื่อหุ้มเซลล์มีความเสียหายอย่างสิ้นเชิง (Siemer et al, 2012) คำนวณได้จากการวัดค่าการนำไฟฟ้า (conductivity) ของตัวอย่างก่อนและหลังการให้สนามไฟฟ้า ดังสมการ (Loginova et al., 2011)

$$Z = \frac{(\sigma - \sigma_i)}{(\sigma_d - \sigma_i)} \quad 0 \leq Z \leq 1$$

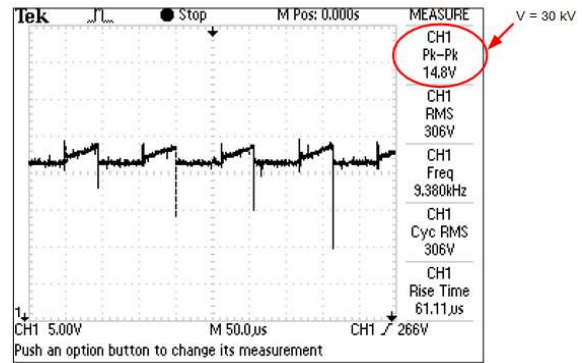
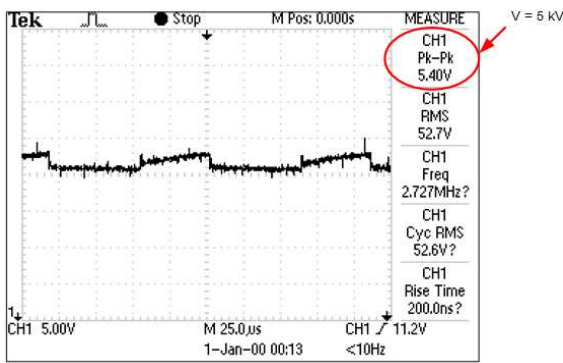
เมื่อ σ คือ ค่าการนำไฟฟ้า (ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร) ของตัวอย่างวัดที่มีความถี่ต่ำ 1-5 กิโลเฮิร์ตซ์ ตัวอักษร i และ d แสดงค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่ไม่ผ่านและผ่านสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ ตามลำดับ

9. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

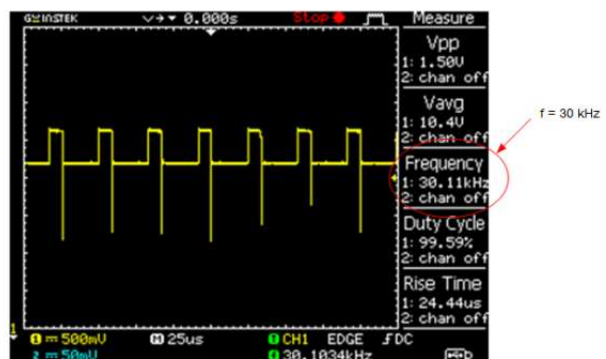
ทำการทดลอง 3 ซ้ำ รายงานผลในรูปค่าเฉลี่ย (mean±SD) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan multiple range test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ 1 Performance limits of pulsed-electric field extractor

Range	Performance limits			
	Voltage (kV)	Frequency (kHz)	Power (W)	Temperature (°C)
Minimum - Maximum	5 - 30	10 - 30	3 - 60	0 - 100



รูปที่ 3 Square wave form of PEF (5-30 kV of input voltage)



รูปที่ 4 Square wave form of PEF (10-30 kHz of input frequency)

ผลการวิจัยและวิจารณ์

1. ขีดจำกัดความสามารถของเครื่องสกัดแอนโธไซยานินด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์

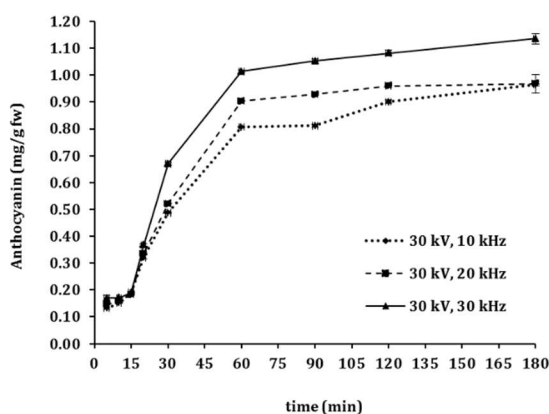
เครื่องสกัดแอนโธไซยานินจากลูกหว้าด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ เลือกใช้อิเล็กโทรดแชมเบอร์แบบกลุ่มเนื่องจากอิเล็กโทรดเป็นแบบระนาบ สนามไฟฟ้าจะมีความสม่ำเสมอสูง ปริมาตรห้องสกัดสาร เท่ากับ 2.91 ลิตร ผลการทดสอบเป็นดังตารางที่ 1 แรงดันไฟฟ้าในระดับความถี่ที่เท่ากันเป็นดังรูปที่ 3 และความถี่ในระดับแรงดันไฟฟ้าที่เท่ากันเป็นดังรูปที่ 4

2. สภาพที่เหมาะสมในการสกัดแอนโธไซยานินจากลูกหว่าด้วยเครื่องสกัดด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์

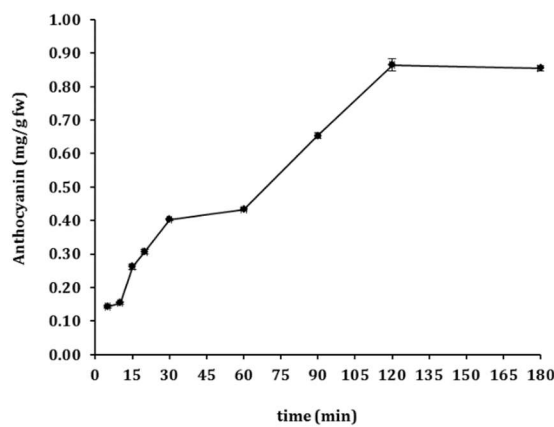
ทำการทดลองเพื่อหาสภาพที่เหมาะสมในการสกัดแอนโธไซยานินจากลูกหว่าด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายเทียบกับการสกัดด้วยวิธีดั้งเดิม เมื่อให้แรงดันไฟฟ้า เท่ากับ 5, 10, 20 และ 30 กิโลโวลต์ ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด เท่ากับ 7.5 เซนติเมตร คำนวณความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าได้เท่ากับ 0.7, 1.3, 2.7 และ 4.0 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการสกัดพบว่า ที่แรงดันไฟฟ้า 5 กิโลโวลต์ จะใช้เวลาเข้าสู่สมดุลของการสกัด (T_{eq}) นานที่สุดใกล้เคียงกับการสกัดแบบดั้งเดิม คือ 120 นาที และเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็น 10 และ 20 กิโลโวลต์ เวลาเข้าสู่สมดุลลดลงเหลือ 90 นาที และที่แรงดันไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ ให้เวลาเข้าสู่สมดุลของการสกัดเร็วที่สุด คือ 60 นาที ดังรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่า การใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์สามารถลดระยะเวลาสกัดแอนโธไซยานินจากลูกหว่าได้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ (López et al, 2009) ซึ่งใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ที่มีความเข้ม 7 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ความถี่พัลส์ 20 ลูก สามารถลดเวลาการ

สกัดซูโครสจากหัวบีท (sugar beet) ลงเหลือเพียง 1 ชั่วโมง โดยที่ยังสามารถได้น้ำตาลซูโครสสูงถึงร้อยละ 80 และใช้อุณหภูมิในการสกัดเพียง 40 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ในการสกัดซูโครสแบบดั้งเดิมต้องใช้ความร้อนในการสกัดสูงถึง 70–75 องศาเซลเซียส และใช้เวลาสกัดทั้งหมดอย่างน้อย 1.30 ชั่วโมง

ปริมาณแอนโธไซยานินที่สกัดได้เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าและความถี่ต่างๆ และค่า Electrical conductivity disintegration index (Z) เป็นดังตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการสกัดแอนโธไซยานินเมื่อเวลาสิ้นสุดการสกัด (180 นาที) ที่แรงดันไฟฟ้าและความถี่ต่างๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กล่าวคือ เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ปริมาณแอนโธไซยานินเพิ่มขึ้น โดยในช่วงแรงดันไฟฟ้าสูง 20–30 กิโลโวลต์ ปริมาณแอนโธไซยานินที่สกัดได้สูงกว่าการสกัดแบบดั้งเดิมทุกสถานะ แต่เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ ปริมาณแอนโธไซยานินที่ได้น้อยกว่าการสกัดแบบดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ยกเว้นเมื่อใช้ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ปริมาณแอนโธไซยานินที่ได้สูงกว่าการสกัดแบบดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังรูปที่ 6(a)



(a)



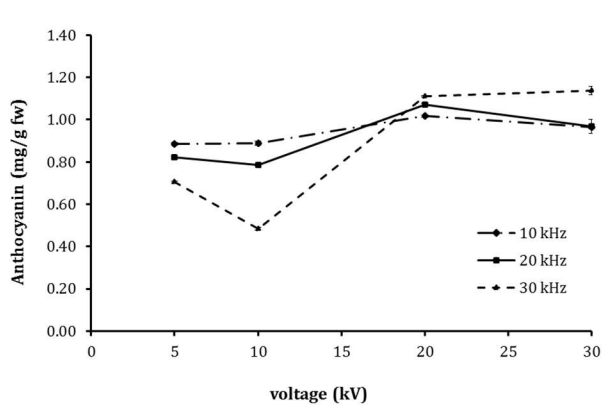
(b)

รูปที่ 5 Anthocyanin concentration at (a) 30 kV of voltage and (b) maceration extraction

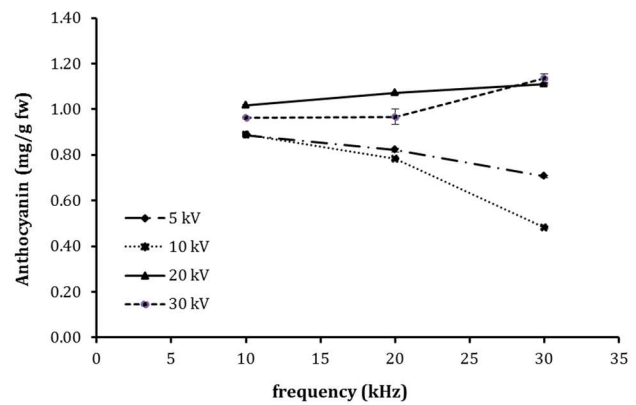
ตารางที่ 2 Anthocyanin concentration and electrical conductivity disintegration index (Z) of various extraction conditions (Ranging from the highest to the lowest value, n = 3)

Voltage (kV)	Frequency (kHz)	Anthocyanin concentration (mg Cyd-3-glu/g fw)	Z
	Maceration	0.86 ± 0.007 ^a	-
30	30	1.14 ± 0.020 ^b	0.84 ± 0.021 ^a
20	30	1.11 ± 0.003 ^c	0.76 ± 0.021 ^b
20	20	1.07 ± 0.005 ^d	0.67 ± 0.015 ^c
20	10	1.02 ± 0.004 ^e	0.63 ± 0.012 ^d
30	20	0.97 ± 0.034 ^f	0.75 ± 0.032 ^b
30	10	0.96 ± 0.003 ^f	0.68 ± 0.010 ^c
10	10	0.89 ± 0.008 ^g	0.26 ± 0.012 ^e
5	10	0.89 ± 0.006 ^g	0.36 ± 0.021 ^f
5	20	0.82 ± 0.007 ^h	0.21 ± 0.015 ^g
10	20	0.78 ± 0.003 ⁱ	0.18 ± 0.012 ^h
5	30	0.71 ± 0.005 ^j	0.11 ± 0.006 ⁱ
10	30	0.48 ± 0.006 ^k	0.14 ± 0.010 ^j

Different superscript letters (^a, ^b, ^c, ...) in each column represent significant differences ($p < 0.05$)



(a)



(b)

รูปที่ 6 Anthocyanin concentration at (a) various voltages and (b) various frequencies

การใช้ความเข้มของสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ในช่วง 0.7–4.0 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุในสนามไฟฟ้า เป็นผลให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างเยื่อหุ้มเซลล์หรือแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม (trans-membrane potential) เมื่อความต่างศักย์นี้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าเบรกดาวน (breakdown potential) เยื่อหุ้มเซลล์จะไม่สามารถทนสนามไฟฟ้านั้นได้ จึงเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเยื่อหุ้มเซลล์อย่างรุนแรงจนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน เป็นผลให้เยื่อหุ้มเซลล์มี

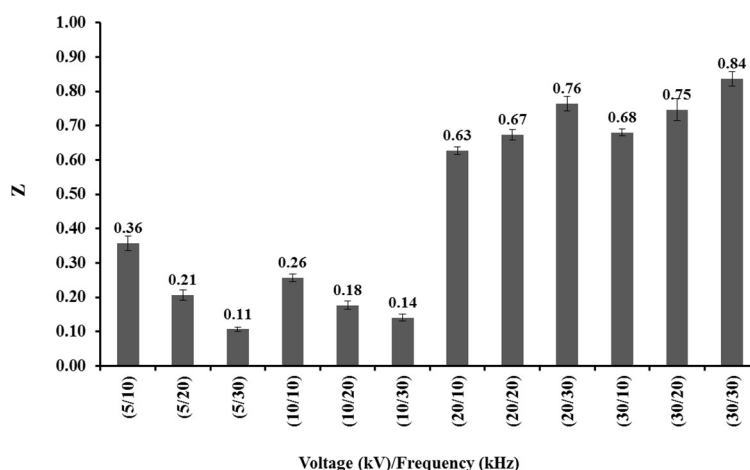
ความพรุนและอ่อนนุ่มมากขึ้น เพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลของตัวทำละลายระหว่างภายในและภายนอกเซลล์ ตัวทำละลายเข้าไปในเซลล์ได้มากขึ้น เป็นการเพิ่มการสกัดสารต่างๆ ที่ยึดติดกับโครงสร้างของเซลล์ออกมาได้มากขึ้น นอกจากนี้ สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ ยังไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เปลี่ยนสภาพสารต้านอนุมูลอิสระอื่นๆ ในเซลล์ จึงเป็นการเพิ่มปริมาณสารสำคัญที่สกัดได้ทางอ้อม (Corrales et al., 2008; López, et al., 2008) อย่างไรก็ตามจาก รูปที่ 6(b) พบว่า ในช่วงแรงดันไฟฟ้าสูง (20–

30 กิโลโวลต์) การเพิ่มความถี่ทำให้ปริมาณแอนโธไซยานินที่สกัดได้เพิ่มขึ้น แต่ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ (5–10 กิโลโวลต์) การเพิ่มความถี่ทำให้ปริมาณแอนโธไซยานินที่สกัดได้ลดลง อธิบายได้ว่า ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำเมื่อใช้ความถี่เกิน 20 กิโลเฮิร์ตซ์ จะเกิดฟองอากาศขึ้นที่เวลาประมาณ 60-70 นาที ก่อนถึงสมดุลของการสกัด (สมดุลของการสกัดที่แรงดันไฟฟ้าต่ำอยู่ที่ 90–120 นาที) ฟองอากาศที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดทำให้เกิดการสปาร์ค และขัดขวางกระบวนการสกัดแอนโธไซยานินภายในอิเล็กโทรดแชมเบอร์ ปริมาณแอนโธไซยานินที่สกัดได้จึงลดลง ในทางตรงกันข้าม ที่แรงดันไฟฟ้าสูง 20–30 กิโลโวลต์ สมดุลของการสกัดเกิดขึ้นเร็วที่เวลา 60 นาที ทำให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นหลัง 60 นาที ไม่มีผลรบกวนกระบวนการสกัดแต่อย่างใด

จากรูปที่ 7 แสดงค่า Electrical conductivity disintegration index (Z) ของการสกัดที่สภาวะต่างๆ พบว่า ที่แรงดันไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ (30/30) มีค่า

Z สูงสุดเท่ากับ 0.84 ± 0.021 ซึ่งใกล้เคียง 1 แสดงว่า เยื่อหุ้มเซลล์ของลูกหว้ามีความเสียหายมาก (Siemer et al., 2012) ที่สภาวะนี้ได้ปริมาณแอนโธไซยานินที่สกัดได้สูงสุดด้วยเช่นกัน การใช้แรงดันไฟฟ้าสูงๆ ค่า Z จะสูงตามไปด้วย โดยปกติ ค่า Z ที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปใช้เป็นตัวกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดได้ เนื่องจากบ่งชี้ความเสียหายของเยื่อหุ้มเซลล์ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าแบบพัลส์

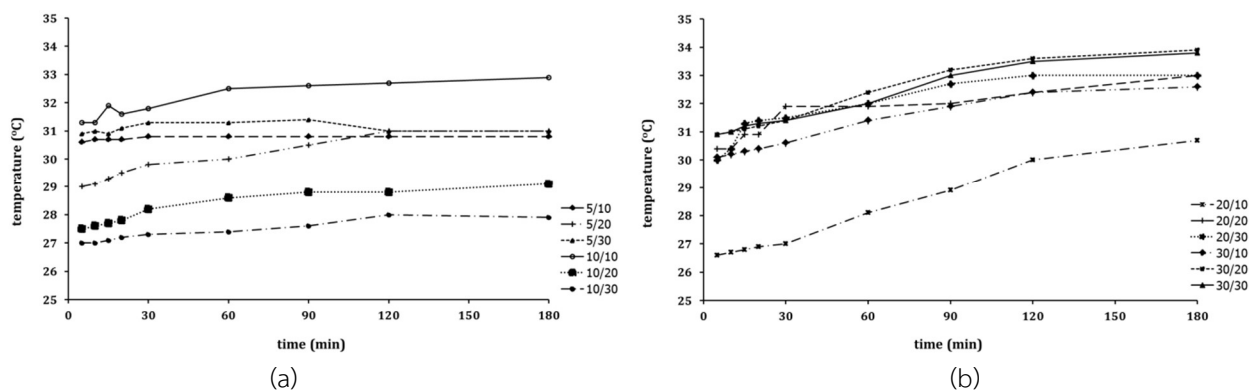
จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ให้ปริมาณแอนโธไซยานินที่สกัดได้มากที่สุดที่แรงดัน 30 กิโลโวลต์ ความเข้มสนามไฟฟ้า 4.0 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ปริมาณแอนโธไซยานินในรูป cyanidin-3-glucoside สูงสุดเท่ากับ 1.14 ± 0.020 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักสด ที่สภาวะนี้ให้ปริมาณแอนโธไซยานินสูงกว่าการสกัดแบบดั้งเดิมร้อยละ 32.56 และใช้เวลาสกัดเพียง 60 นาที ซึ่งเร็วกว่าการสกัดแบบดั้งเดิมถึง 2 เท่า



รูปที่ 7 Electrical conductivity disintegration index (Z) of extraction at various conditions

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้วิธีการสกัดโดยใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์จะเป็นวิธีการที่ไม่ใช้ความร้อน แต่การใช้สนามไฟฟ้าที่มีแรงดันสูงๆ อาจทำให้อุณหภูมิภายในอิเล็กโทรดแชมเบอร์เพิ่มขึ้นได้จากกระบวนการให้ความร้อนที่เกิดจากความต้านทานไฟฟ้าหรือแบบโอห์มมิก (Ohmic หรือ Joule heating effect) ในการทดลองจึงทำการวัดอุณหภูมิภายในอิเล็กโทรดแชมเบอร์ตลอดการสกัดจนครบ 180 นาที พบว่า อุณหภูมิภายในอิเล็กโทรดแชม

เบอร์มีค่าอยู่ในช่วง 26.6–33.8 องศาเซลเซียส ที่แรงดันไฟฟ้าสูงๆ (20–30 กิโลโวลต์) อุณหภูมิภายในอิเล็กโทรดแชมเบอร์เพิ่มขึ้นมากกว่าที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ (5–10 กิโลเฮิร์ตซ์) ดังรูปที่ 8 การหลีกเลี่ยงมิให้อุณหภูมิภายในอิเล็กโทรดแชมเบอร์เพิ่มขึ้นมากทำได้โดยการให้สนามไฟฟ้าในเวลาสั้นลง แต่ข้อเสียก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดต่ำลงด้วยเช่นกัน (Salengke et al., 2012)



รูปที่ 8 Temperature changes during PEF extraction at (a) 5-10 kV and (b) 20-30 kV

3. ปริมาณแอนโธไซยานิน สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระตีพีพีเอชในลูกหว่าทั้งผลและเปลือกลูกหว่า

นำสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแอนโธไซยานินจากลูกหว่าด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ (แรงดันไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ ความเข้มสนามไฟฟ้า 4.0 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ความถี่ 30 กิโล-

เฮิรตซ์ เวลาเข้าสู่สมดุลของการสกัด 60 นาที) ไปทำการสกัดตัวอย่างลูกหว่าทั้งผลและตัวอย่างเปลือกลูกหว่า แล้ววิเคราะห์ปริมาณแอนโธไซยานินในรูปของ cyanidin-3-glucoside, malvidin-3-glucoside และ pelargonidin-3-glucoside ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระตีพีพีเอช ผลเป็นดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 Anthocyanins, total phenolic contents and DPPH radical scavenging capacity in whole fruits and peels of black plum using PEF extraction (n = 3)

Type	Anthocyanin (mg/g fw)			Total phenolics (mg GAE/g fw)	EC ₅₀ (mg/mL)	TEAC (mg/g fw)
	Cyd-3-glu	Mvd-3-glu	Pgd-3-glu			
Whole fruit	1.01 ± 0.006 ^a	1.01 ± 0.006 ^a	1.23 ± 0.010 ^a	0.98 ± 0.076 ^a	5.27 ± 1.044 ^a	0.68 ± 0.121 ^a
peel	0.78 ± 0.055 ^b	0.78 ± 0.055 ^b	0.91 ± 0.064 ^b	0.41 ± 0.053 ^b	6.78 ± 0.102 ^b	0.52 ± 0.008 ^b

Voltage = 30 kV, Frequency = 30 kHz, Extraction time = 60 minutes

EC₅₀ of Trolox = 0.0035 ± 0.00013 mg/mL

Different superscript letters (^a, ^b, ^c, ...) in each column represent significant differences ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 3 จะเห็นว่า ในลูกหว่าทั้งผลมีปริมาณแอนโธไซยานินทั้ง 3 รูปแบบ สูงกว่าในเปลือกประมาณร้อยละ 30 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมสูงกว่าถึงร้อยละ 140 และมีฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระตีพีพีเอชสูงกว่าในเปลือกด้วยเช่นกัน โดยมีค่า EC₅₀ ต่ำกว่าประมาณร้อยละ 22 และค่า TEAC สูงกว่าประมาณร้อยละ 30 สอดคล้องกับการศึกษาของ Peuphae et al. (2011) ซึ่งศึกษาการหมักไวน์ลูกหว่าโดยเปรียบเทียบระหว่างการหมักทั้งผล (เนื้อและเปลือก) กับหมักแบบแยกเปลือก พบว่าไวน์ที่หมักลูกหว่าทั้งผล มีปริมาณแอนโธไซยานินและสารประกอบฟีนอลิกสูงกว่าไวน์ที่หมักแยกเปลือกประมาณสองเท่า เนื่องจากในเปลือกจะมีสารกลุ่มแอนโธไซยานินเป็นหลัก แต่เมื่อรวมทั้งผลจะมีสารประกอบฟีนอลิกกลุ่มอื่นนอกจากแอนโธ-

ไซยานินด้วย เช่น วิตามินซี กรดแกลลิก แทนนิน กรดโอเลอิก ไตรเทอร์ปีนอยด์ และ เคอร์ซีทิน เป็นต้น

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการสกัดแอนโธไซยานินจากลูกหว่า หรือ Black plum (*Syzygium cumini* Skeels) ด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย พบว่า เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าและความถี่ เวลาที่ใช้ในการสกัดลดลง และปริมาณแอนโธไซยานินในรูป cyanidin-3-glucoside ที่สกัดได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการสกัดแบบดั้งเดิม ($p < 0.05$) การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าทำให้ปริมาณแอนโธไซยานินเพิ่มขึ้นทุกการทดลอง แต่การเพิ่มความถี่ทำให้ปริมาณแอนโธไซยานินที่สกัดได้เพิ่มขึ้นเฉพาะที่แรงดันไฟฟ้าสูงเท่านั้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าต่ำการเพิ่มความถี่

ทำให้ปริมาณแอนโธไซยานินที่สกัดได้ลดลง สำหรับสภาวะ แรงดันไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ ความเข้มสนามไฟฟ้า 4.0 กิโลโวลต์ ต่อเซนติเมตร ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ให้ปริมาณแอนโธไซยานินที่ สกัดได้สูงกว่าการสกัดแบบดั้งเดิมร้อยละ 32.56 และการสกัดเข้าสู่ภาวะสมดุลที่เวลา 60 นาที ซึ่งเร็วกว่าการสกัดแบบดั้งเดิมถึง 2 เท่า และมีค่า Z สูงสุด แสดงให้เห็นว่าที่สภาวะนี้มีประสิทธิภาพ ในการสกัดแอนโธไซยานินจากลูกหว้าได้ดีที่สุด จากการศึกษา สรุปได้ว่า การใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์เพิ่มประสิทธิภาพการสกัด แอนโธไซยานินในลูกหว้าเมื่อเทียบกับการสกัดแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบลูกหว้าทั้งผลและเปลือกลูกหว้าพบว่า ลูกหว้าทั้งผลมีปริมาณแอนโธไซยานินทั้ง 3 รูปแบบ สูงกว่าใน เปลือกประมาณร้อยละ 30 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิครวมสูง กว่าถึงร้อยละ 140 และมีฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระดีทีพีพีเอชสูงกว่า ในเปลือกด้วยเช่นกันโดยค่า EC_{50} ต่ำกว่าประมาณ ร้อยละ 22 และค่า TEAC สูงกว่าประมาณร้อยละ 30 (ค่า EC_{50} ต่ำกว่า หมายถึงมีฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระดีทีพีพีเอชดีกว่า) ค่าที่ได้ทั้งหมดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก และผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และเทคโนโลยีชีวภาพและ สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าในการเอื้อเฟื้อสถานที่ทำการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

นิตยา เขียวอ่อน. (2550). การศึกษาสารต้านอนุมูลอิสระในลูกหว้า. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศิลปากร. นครปฐม: 116 หน้า.

Bagchi, D., Sen, C.K., Bagchi, M. and Atalay, M. (2004). Anti-angiogenic, antioxidant and anti- carcinogenic properties of a novel anthocyanin-rich berry extract formula. *Biochemistry* 69:75–80.

Bourneow, C. and Santimalai, S. (2015). Setup of a continuous pulsed electric field system for microbial reduction in some liquid foods. *Asian Journal of Applied Sciences* 3(1): 103-109.

Chia, L.S., Kong, J.M., Goh, N.K Chia, T.F. and Brouillard, R. (2008). Analysis and biological activities of antho- cyanins. *Phytochemistry* 64: 923–933.

Clarke, J. P. (2006). Pulsed electric field processing. *Food Technology* 60(1): 66-67.

Corrales, M., Toepfl, S., Butz, P., Knorr, P. and Tauscher, B. (2008). Extraction of anthocyanins from grape by- products assisted by ultrasonics, high hydrostatic pressure or pulsed electric fields: a comparison. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 9:85–91.

Donsi, F., Ferrari, G., Fruilo, M. and Pataro, G. (2011). Pulsed electric fields- assisted vinification. *Procedia- Food Science* 1: 780–785.

Golmohamadi, A., Möller, G., Powers, J. and Nindo, C. (2013). Effect of ultrasound frequency on antioxidant activity, total phenolic and anthocyanin content of red raspberry puree. *Ultrasonic Sonochemistry* 20:1316–1323.

Hou, D. X. (2003). Potential mechanisms of cancer chemo- prevention by antho cyanins. *Current Molecular Medicine* 3:149–159.

Loginova, K.V., Lebovka, N.I. and Vorobiev, E. (2011). Pulsed electric field assisted aqueous extraction of colorants from red beet. *Journal of Food Engineering* 106:127–133.

López, M., Puértolas, E., Condón, S., Álvarez, I. and Raso, J. (2008). Effects of pulsed electric fields on the extraction of phenolic compounds during the fermentation of must of tempranillo grapes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 9:477–482.

López, N., Puértolas, E., Condón, S., Raso, J. and Alvarez, I. (2009). Enhancement of the extraction of betanine from red beetroot by pulsed electric fields. *Journal of Food Engineering* 90(1):60-66.

Peuphae, R., Thongdee, A., Samappito, S. and Butkhup, L. (2011). Comparative study of skin contact on antho- cyanins composition during Java plum (*Syzygium cumini* L.) wine fermentation. In: The 3rd international symposium on tropical wine 12- 18 November 2011, Chiang Mai, Thailand.

Salengke, S., Sastry, S.K. and Zhang, H.Q. (2012). Pulsed electric field technology: modeling of electric field and temperature distributions within continuous flow PEF treatment chamber. *International Food Research Journal* 19(3):1137–1144.

- Shimada, K., Fujikawa, K., Yahara, K. and Nakamura, T. (1992). Antioxidative properties of xanthans on the autoxidation of soybean oil in cyclodextrin emulsion. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 40(6):945-948.
- Siemer, C., Toepfl, S. and Heinz, V. (2012). Mass transport improvement by PEF- applications in the area of extraction and distillation, distillation- advances from modeling to applications, Available on: <http://www.intechopen.com/books/distillationadvances-from-modeling-to-applications/mass-transport-improvement-by-pef-applications-in-the-area-of-extraction-and-distillation>. Accessed: 10 November 2015.
- Sun, J.X., Bai, W.B., Zhang, Y., Liao, X.J. and Hu, X.S. (2011). Identification of degradation pathways and products of cyanidin- 3- sophoroside exposed to pulsed electric field. *Food Chemistry* 126:1203-1210.
- Vallverdú-Queralt, A., Medina-Remón, A., Casals-Ribes, I., Andres-Lacueva, C., Water house, A.L. and Lamuela-Raventos, R.M. (2012). Effect of tomato industrial processing on phenolic profile and hydrophilic antioxidant capacity. *LWT-Food Science and Technology* 47:154-160.
- Wong, S.P., Leong, L.P. and Koh, J.H.W. (2006). Antioxidant activities of aqueous extracts of selected plants. *Food Chemistry* 99:775-783.

