

การสังเคราะห์เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดไอออนบวกจากผักตบชวา
ที่ปรับสภาพด้วยกรดซิตริก

Synthesis of Cation Exchange Resin from Water Hyacinth
Chemically Modified with Citric Acid

พรรนิพา พวันนา* วัชรีย์ บางแบ่ง และพิพัฒน์ แหลมเจียบ
สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์
*Email: apannipa.p@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดไอออนบวกจากผักตบชวาโดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างเซลลูโลสในผักตบชวากับกรดซิตริก เพื่อใช้เป็นสารแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายน้ำ ในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เรซินมีค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนสูงสุดในเทอมของปริมาณหมู่คาร์บอกซิลิกอิสระ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ถึง 140 องศาเซลเซียส และเวลา 60 นาที ถึง 600 นาที ผลปรากฏว่า ค่าความจุเฉลี่ยสูงสุดของเรซินในที่สุดการทดลอง เท่ากับ 5.1044, 4.7377, 4.6285 และ 4.4229 มิลลิมูลย์ต่อกรัมเรซิน ตามลำดับ อย่างไรก็ตามค่าความจุไอออนของเรซินไม่ได้เพิ่มขึ้นตามการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเกิดการเชื่อมขวางขึ้นในโครงสร้างของเรซินหากใช้ความร้อนสูงหรือใช้เวลานาน เมื่อนำเรซินดังกล่าวไปหาค่าการบวมตัวและความชื้นพบว่ามีการบวมตัวระหว่าง 1.13 ถึง 1.33 เท่า และค่าความชื้นระหว่าง 3.16 ถึง 5.18 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำเรซินทั้งสี่ชนิดมาทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงในสารละลายน้ำ (พีเอช 5, 24 ชั่วโมง) พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับอยู่ในช่วงร้อยละ 55 ถึง 82 โดยเรซินที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 240 นาที และ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 180 นาที ให้ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนทองแดงสูง จากผลการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่า อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันนอกจากจะมีผลต่อค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแล้วยังมีผลต่อการบวมตัวและความชื้นของเรซิน ซึ่งทั้งสามปัจจัยล้วนมีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนทองแดงในสารละลายน้ำทั้งสิ้น

คำสำคัญ: เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดไอออนบวก ผักตบชวา กรดซิตริก

Abstract

In this research, cation exchange resin was synthesized by esterification reaction between cellulose in water hyacinth and citric acid, for used to ion exchanger in aqueous solution. The temperature and reaction time were investigated to obtain the maximum total ion exchange capacity, in term free carboxylic content. The experiments were performed at 110 to

140 °C and reaction time at 60 to 600 min. The results shown that the average total ion exchange capacities of four experiments were 5.1044, 4.7377, 4.6285 and 4.4229 meq/g, respectively. However, ion exchange capacity does not increased progressively with increasing of reaction efficiency because of the present of crossing structure in resin when using high temperature and reaction time. Determination of swelling value and moisture content have found that the swellings were between 1.13 to 1.33 and the moisture contents were between 3.16 to 5.18 percent. The adsorption of copper ion in aqueous solution (pH 5, 24 h.) by four synthetic resins was investigated. The adsorption efficiencies were in the range of 55-82%. The resin which synthesis at 130 °C, 240 min and 140 °C, 180 min offered high adsorption efficiencies of copper ion. From all of the result concluded that the temperature and reaction time were influence on total ion exchange capacity, swelling and moisture content of resin. Three factors are all effect on the exchange of copper ion in aqueous solution.

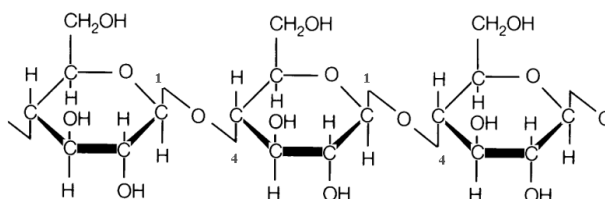
Keywords: Cation exchange resin, Water hyacinth, Citric acid

บทนำ

เรซิน (resin) เป็นสารพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบร่างแห หรือแบบเชื่อมขวาง ทำให้ไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไป และมีคุณสมบัติในการเป็นสารแลกเปลี่ยนไอออนได้ ไอออนบวกและไอออนลบขึ้นอยู่กับชนิดของเรซิน ดังนั้นจึงมีการนำเรซินไปใช้งานอย่างกว้างขวางในหลายๆ ด้าน แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องค่าใช้จ่ายและปัญหาด้านการจัดการหลังการใช้งาน โดยเฉพาะเรซินจากสารสังเคราะห์ เช่น สไตรีนและไดไวโนลเบนซีน ฟีนอลและฟอร์มัลดีไฮด์ เพราะมีราคาแพงและสลายตัวได้ยาก ดังนั้นเรซินที่มีองค์ประกอบพื้นฐานจากวัสดุธรรมชาติ เช่น เซลลูโลส จึงได้รับสนใจในการนำมาพัฒนาเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งนับว่าเป็นอีกแนวทางในการลดหรือทดแทนการใช้สารเคมีที่อันตราย และเป็น การนำเอาทรัพยากรที่มีอยู่ตามธรรมชาติมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

เส้นใยพืชประกอบไปด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารอินทรีย์อื่นๆ ซึ่งโดยโครงสร้างที่เป็นร่างแหและมีหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) เป็นองค์ประกอบ (ภาพที่ 1) จึงทำให้เส้นใยพืชมีคุณสมบัติในการเป็นตัวดูดซับหรือสารแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายได้ ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่ทำหน้าที่จับหรือแลกเปลี่ยนไอออนเหล่านี้ ดังนั้นการปรับปรุงลักษณะโครงสร้างทั้งทางกายภาพและทางเคมีจะทำให้เส้นใยพืชมีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนเพิ่มมากขึ้น โดยการปรับปรุงโครงสร้างของเส้นใยพืชเพื่อให้มีหมู่ฟังก์ชันในการแลกเปลี่ยนไอออนมากขึ้นทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การปรับสภาพด้วยวิธีการทางเคมี (chemical modification) การปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพ (physical modification) และการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ (biological modification) เป็นต้น การปรับสภาพด้วยวิธีการทางเคมีเป็นวิธีหนึ่งที่มีความนิยม เนื่องจากขั้นตอนไม่ซับซ้อน ทำได้ง่าย และยังสามารถเลือกใช้สารเคมีที่ราคาถูกและมีความเป็นพิษน้อย โดยวิธีนี้ส่วนใหญ่เป็นการนำสารที่มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้เข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซี (-OH) ที่มีอยู่มากมายใน

โครงสร้างของเซลลูโลส สารปรับสภาพที่นิยมใช้ เช่น กรดอินทรีย์ที่มีหมู่คาร์บอกซิลมากกว่า 1 หมู่ (เช่น กรดซิตริก กรดซิตริก) กรดอะมิโน และอีดีทีเอ (EDTA) เป็นต้น ซึ่งการเลือกใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของเรซินที่ต้องการสังเคราะห์ (Altundoğan et al., 2007; Zhu et al., 2008; Wan Ngah & Hanafiah, 2008; O'Connell et al., 2008; Júnior et al., 2009; Li et al., 2010; Soliman et al., 2011; Kalia et al., 2011; Yu et al., 2013; Ibrahim et al., 2015; Altundoğan et al., 2016; อรสา, 2553)



ภาพที่ 1 ลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลส

ที่มา: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0612/cellulose>

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยมีแนวความคิดในการนำผักตบชวาเป็นวัสดุพื้นฐานในการสังเคราะห์เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดไอออนบวกโดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับกรดซิตริก เนื่องจากผักตบชวาเป็นพืชที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนที่ค่อนข้างสูง นอกจากนี้ยังเป็นพืชที่หาได้ง่ายและพบได้ทั่วไปในทุกภูมิภาคของประเทศไทย ส่วนกรดซิตริกนั้นเป็นสารที่ราคาย่อมเยาและมีความเป็นพิษน้อยมาก (ขวัญเนตร, 2542; รัชพล, 2554; Ibrahim et al., 2012; Sindhu et al., 2017) ดังนั้นเรซินที่สังเคราะห์ได้จึงมีต้นทุนต่ำและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมผักตบชวา

ผักตบชวาที่ผ่านการบดและอบแห้งแล้วถูกนำมาบำบัดโดยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ในอัตราส่วนผักตบชวา 100 กรัมต่อสารละลาย 2 ลิตร (Zhu et al., 2008 & Altundoğan et al., 2016) ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการกรองสารละลายทิ้งแล้วล้างผักตบชวากับน้ำกลั่นหลาย ๆ ครั้งจนโซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกล้างออกไปจนหมด (ทดสอบโดยการวัดพีเอชของน้ำล้าง) นำผักตบชวาที่ผ่านการบำบัดแล้วมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ แล้วคัตขนาดผักตบชวาให้อยู่ในช่วง 0.250 ถึง 0.125 มิลลิเมตร (60 ถึง 120 เมช) ด้วยตะแกรงร่อน เก็บผักตบชวาที่ได้ในโถสุญญากาศ

การศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อการเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออนโดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

1. การสังเคราะห์เรซินจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซี (-OH) ของเซลลูโลสและกรดซิตริกแบ่งออกเป็น 2 ช่วงอุณหภูมิที่ต่อเนื่องกัน คือ เริ่มต้นปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจึงเพิ่ม

อุณหภูมิ เป็น 110 ถึง 140 องศาเซลเซียส การทดลองนี้ทำการศึกษาเฉพาะเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาช่วงที่สอง โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุด ตามอุณหภูมิที่ทำการศึกษา ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทดลอง

ชุดการทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	เวลาที่ใช้ (นาที)
1	110	60 - 600
2	120	60 - 600
3	130	60 - 600
4	140	60 - 600

การทดลองมีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งผักตบชวา (ผ่านการบำบัดแล้ว) 1.5 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น กรดซิตริก ความเข้มข้น 0.6 โมลต่อลิตร ปริมาตร 15 มิลลิลิตร คนด้วยแท่งแก้วให้ของผสมเข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (McSweeny et al., 2006; Zhu et al., 2008; Altundoğan et al., 2016)

2. จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิของตูบเป็น 110 องศาเซลเซียส และปล่อยให้สารทำปฏิกิริยากันเป็นเวลาที่ต่าง ๆ ตามกำหนด (ชุดการทดลองที่ 1)

3. เมื่อครบตามเวลา นำบีกเกอร์ออกจากตูบ รอให้อุณหภูมิลดลงแล้วเติมน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า นาน 2 ชั่วโมง เพื่อล้างกรดซิตริกที่เหลือจากปฏิกิริยา แยกน้ำล้างเก็บไว้

4. ล้างเรซินที่ได้ด้วยน้ำกลั่นหลาย ๆ ครั้ง จนกรดซิตริกถูกล้างออกหมด (ทดสอบด้วยกระดาษลิตมัส) นำน้ำล้างเรซินไปรวมกับน้ำล้างในข้อ (3) เพื่อนำไปหาค่า % Reaction efficiency

5. นำเรซินที่ผ่านการล้างแล้วไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เรซิน (ขั้นตอนการทดลองอธิบายในหัวข้อที่ 2)

6. ทำการทดลองเช่นเดิมในชุดการทดลอง 2 ถึง 4 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในขั้นตอนข้อที่ 2 ตามตารางที่ 1

2. การหาค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน (ion exchange capacity)

ปริมาณหมู่คาร์บอกซิลิกอิสระ (free carboxylic content) เป็นพารามิเตอร์ที่บอกขีดความสามารถสูงสุดในการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange capacity) ของเรซิน ซึ่งหาได้จากการไทเทรตแบบย้อนกลับ (back titration) (Yu et al., 2013) โดยชั่งเรซิน 0.20 กรัม ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 100.00 มิลลิลิตร ปิดฝาขวดเพื่อป้องกันก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ละลายลงไป แล้วนำสารผสมไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบเวลา เปิดส่วนสารละลายลงในขวดรูปชมพู่ ขวดละ 25.00 มิลลิลิตร จำนวน 3 ขวด แล้วเติมน้ำกลั่นกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 0.020 โมลต่อลิตร

ปริมาตร 25.00 มิลลิลิตร ลงในแต่ละขวด หยดอินดิเคเตอร์ฟีนอล์ฟทาลีน 2-3 หยด จากนั้นนำไปไทเทรตหาปริมาณกรดไฮโดรคลอริกที่เหลือนำด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.020 โมลต่อลิตร โดยที่จุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีชมพูจาง โดยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

ปริมาณหมู่คาร์บอกซิลิกอิสระ (-COOH) ในเรซิน 1 กรัม ในหน่วยมิลลิโมลสมมูลต่อกรัมเรซิน (meq/g_{resin}) คือค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน ซึ่งคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{ปริมาณหมู่คาร์บอกซิลิกอิสระ} = \frac{(C_{\text{NaOH}} V_{\text{NaOH}} - [(CHCl) V_{HCl}] - (C_{\text{titrant}} V_{\text{titrant}})) \times 100}{25 \times \text{น้ำหนักเรซินที่ใช้}}$$

3. การหาคุณสมบัติทั่วไปของเรซิน

ความชื้น (% moisture content) หาได้จากการชั่งเรซิน 1.5 กรัม (W1) ในกระดาดกรองจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เมื่อครบเวลา ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก (W2) โดยค่าความชื้นหาได้จากสมการ

$$\% \text{ Moisture content} = \frac{W1 - W2}{W2} \times 100$$

การบวมตัว (swelling) หาได้จากการนำเรซิน 0.5 กรัม บรรจุลงในกระบอกตวงขนาด 10 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นลงไป 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นวัดปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของเรซิน โดยค่าการบวมตัวหาได้จากสมการ

$$\text{Swelling} = \text{ปริมาตรสุดท้าย} / \text{ปริมาตรเริ่มต้น}$$

การดูดซับไอออนทองแดงในสารละลายน้ำของเรซินที่สังเคราะห์ได้

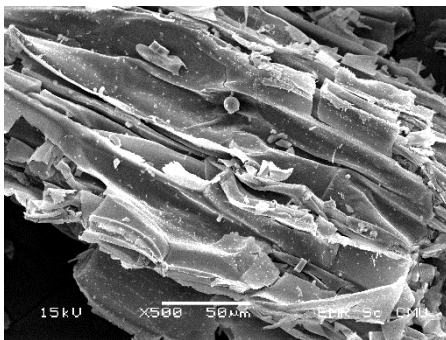
เรซินที่สังเคราะห์ได้จะถูกทำความสะอาดก่อนนำไปทำการทดลอง โดยล้างด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 0.10 โมลต่อลิตร เพื่อกำจัดไอออนโลหะที่อาจค้างอยู่ในผักตบชวาตามธรรมชาติ จากนั้นล้างเรซินด้วยน้ำปราศจากไอออนหลายๆ ครั้งจนกรดไนตริกถูกล้างออกไปหมด แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ชั่งเรซิน 0.500 กรัม ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร เติมสารละลายคอปเปอร์ (II) ไนเตรต ความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม (พีเอช 5) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 24 ชั่วโมง (McSweeney et al., 2006; Zhu et al., 2008) จากนั้นกรองแยกสารละลายออกจากเรซิน แล้วนำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณไอออนทองแดงที่เหลือนำด้วยเครื่องอะตอมมิก แอปซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer; AAS)

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

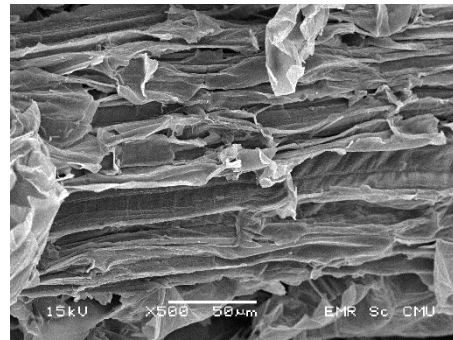
การเตรียมผักตบชวา

ผักตบชวาที่ผ่านการบดและอบแห้งแล้วถูกนำไปบำบัดโดยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อกำจัดหรือลดปริมาณสารอินทรีย์ที่ปนอยู่กับเซลล์ลูลอสออก เช่น เฮมิเซลล์ลูลอส ลิกนิน และสารอินทรีย์อื่นๆ เนื่องจากสารเหล่านี้จะไปบดบังการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซี (-OH) ของ

เซลลูโลสกับกรดซิตริก จากการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของผักตบชวาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) พบว่าผักตบชวาที่บำบัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ภาพที่ 2ข) มีพื้นผิวโปร่งกว่าผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบำบัด (ภาพที่ 2ก) เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไปละลายสารอินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกไปบางส่วน ทำให้ช่องว่างภายในเส้นใยของผักตบชวาชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้การทำปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเฉพาะในการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดได้ง่ายยิ่งขึ้น (Altundoğan et al., 2007)



(ก)

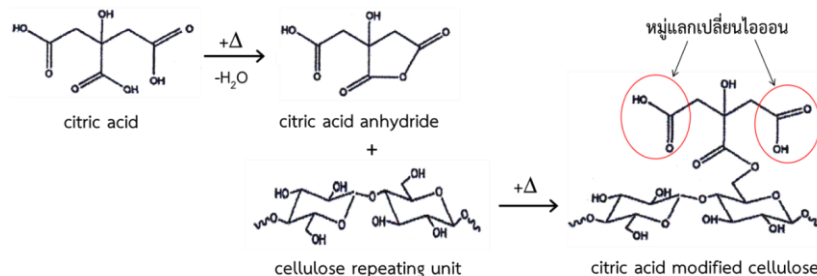


(ข)

ภาพที่ 2 ลักษณะพื้นผิวของ (ก) ผักตบชวา และ (ข) ผักตบชวาที่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อการเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออนโดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

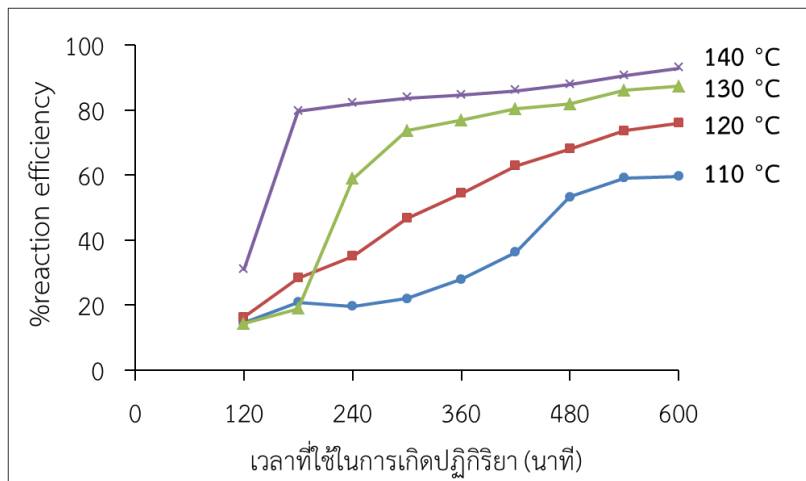
การทดลองนี้เป็นการเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดไอออนบวกจากผักตบชวา โดยอาศัยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) ของเซลลูโลสในผักตบชวาและกรดซิตริก เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของผักตบชวาให้สามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกในสารละลายน้ำได้มากขึ้น โดยสมการการเกิดปฏิกิริยาแสดงในภาพที่ 3 เรซินที่สังเคราะห์ได้มีหมู่ฟังก์ชันเป็นกรดอ่อน คือ คาร์บอกซิลิก (-COOH) และมีโปรตอน (H^+) ของหมู่ฟังก์ชันทำหน้าที่แลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนบวกอื่นๆ



ภาพที่ 3 ปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสในผักตบชวาและกรดซิตริก
ดัดแปลงจาก Wing R.E. (1996) และ Altundoğan et al. (2016)

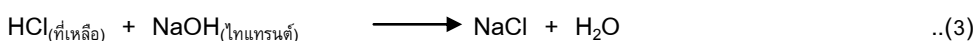
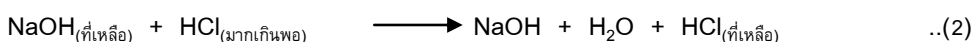
ในการทดลอง เมื่อนำผักตบชวาที่ผ่านการบำบัดไปผสมกับสารละลายกรดซิตริกแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความร้อนจะทำให้กรดซิตริกสูญเสียน้ำ (dehydrate) แล้วกลายเป็นซิตริก

แอนไฮไดร (citric acid anhydride) ซึ่งเป็นสารที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่าเมื่ออยู่ในรูปกรดคาร์บอกซิลิก และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ซิตริกแอนไฮไดรจึงเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของเซลลูโลสในผักตบชวา (Carey, 2003; Zhu et al., 2008) จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ (110-140 องศาเซลเซียส) และเวลาที่ใช้ ประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยา (reaction efficiency) มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย แสดงให้เห็นว่ามีปฏิกิริยาเกิดขึ้นจริง โดยที่อุณหภูมิเดียวกัน ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา และที่อุณหภูมิสูง ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่ามากกว่าการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำในกรณีที่ใช้เวลาเท่ากัน ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ที่ใช้ในสังเคราะห์เรซิน

เมื่อนำเรซินที่สังเคราะห์ได้ในแต่ละชุดการทดลองไปวิเคราะห์ปริมาณหมู่คาร์บอกซิลิกอิสระ (free carboxylic content) ด้วยการไทเทรตแบบย้อนกลับ (back titration) โดยนำเรซินมาเขย่ากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มากเกินไป เพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลิกในเรซิน ดังสมการที่ (1)-(3) แล้วคำนวณหาปริมาณหมู่คาร์บอกซิลิกอิสระของเรซินตามสมการในหัวข้อที่ 2

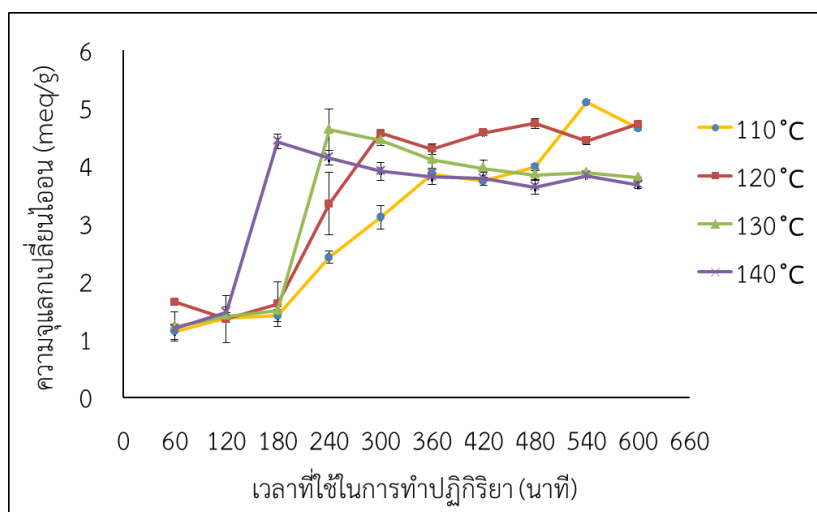


ปริมาณหมู่คาร์บอกซิลิกอิสระเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ความสามารถสูงสุดในการแลกเปลี่ยนไอออน หรือค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน (total ion exchange capacity) ดังนั้นหากมีปริมาณมากก็คาดการณ์เบื้องต้นได้ว่าเรซินนั้นสามารถแลกเปลี่ยนหรือดูดซับไอออนในสารละลายได้ในปริมาณมากเช่นกัน สำหรับการทดลองนี้ เรซินที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ มีความจุแลกเปลี่ยนไอออนในหน่วยมิลลิสมมูลย์ต่อกรัมเรซินเป็นไปตามตารางที่ 2 โดยที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เรซินมีความจุแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตามเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และมี

ปริมาณสูงสุดเมื่อใช้เวลา 540 นาที เท่ากับ 5.1044 มิลลีสมมูลย์ต่อกรัมเรซิน สำหรับที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ความจุแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินมีที่พบในช่วงเวลา 300-600 นาที มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยอยู่ระหว่าง 4.29-4.74 มิลลีสมมูลย์ต่อกรัมเรซิน ส่วนเรซินที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส และ 140 องศาเซลเซียสนั้นพบว่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีค่าสูงสุดที่เวลา 240 นาที และ 180 นาที ตามลำดับ หลังจากนั้นความจุแลกเปลี่ยนไอออนเริ่มลดลงอย่างช้าๆ จนเวลาสุดท้ายของการทดลอง

ตารางที่ 2 ความจุแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินเมื่อสังเคราะห์ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ (มิลลีสมมูลย์ต่อกรัมเรซิน)

เวลาที่ใช้ (นาที)	ความจุแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน (meq/g)			
	110 °C	120 °C	130 °C	140 °C
60	1.1361 ± 0.13	1.6522 ± 0.02	1.2240 ± 0.25	1.1867 ± 0.04
120	1.3795 ± 0.08	1.3576 ± 0.40	1.4043 ± 0.06	1.4667 ± 0.09
180	1.4082 ± 0.09	1.6152 ± 0.38	1.4947 ± 0.02	4.4229 ± 0.12
240	2.4218 ± 0.10	3.3479 ± 0.53	4.6285 ± 0.35	4.1420 ± 0.12
300	3.1156 ± 0.20	4.5714 ± 0.05	4.4467 ± 0.08	3.9097 ± 0.15
360	3.8607 ± 0.01	4.2951 ± 0.09	4.1086 ± 0.14	3.8091 ± 0.13
420	3.7448 ± 0.00	4.5756 ± 0.04	3.9622 ± 0.14	3.7848 ± 0.11
480	3.9868 ± 0.04	4.7377 ± 0.08	3.8491 ± 0.07	3.6344 ± 0.11
540	5.1044 ± 0.03	4.4356 ± 0.07	3.8811 ± 0.03	3.8364 ± 0.03
600	4.6533 ± 0.02	4.7222 ± 0.02	3.7941 ± 0.01	3.6689 ± 0.05



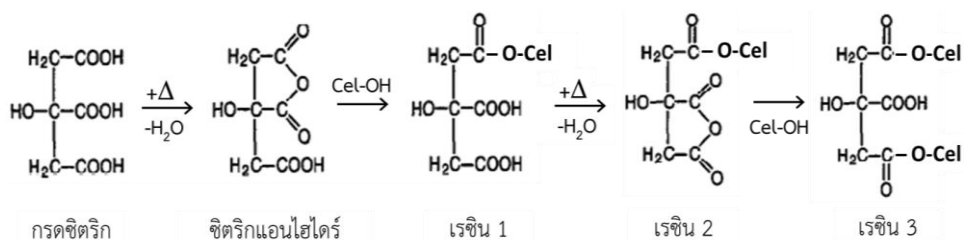
ภาพที่ 5 กราฟระหว่างค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน (meq/g) และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาของแต่ละชุดการทดลอง

จากภาพที่ 5 เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาของแต่ละชุดการทดลองพบว่า ในช่วงแรกของปฏิกิริยา ความจุแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปกลับมีแนวโน้มคงที่หรือลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยความจุแลกเปลี่ยนไอออนสูงสุดของเรซินในแต่ละชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาและค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน พบว่า ที่อุณหภูมิของการทดลอง 110 องศาเซลเซียส ค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นตามประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น จนถึงเวลา 540 นาที

แต่สำหรับที่อุณหภูมิ 120, 130 และ 140 องศาเซลเซียสนั้น ค่าทั้งสองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เฉพาะในช่วงแรกของปฏิกิริยาคือที่เวลาของปฏิกิริยา 60-300 นาที หลังจากนั้นแม้ว่าปฏิกิริยาระหว่างกรดซัลฟิวริกและหมู่ไฮดรอกซีของเซลลูโลสเกิดมากขึ้น (ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น) แต่ค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนกลับเพิ่มน้อยมากหรือลดลงอย่างช้าๆ

ทั้งนี้เนื่องมาจากความร้อนเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันและทำให้กรดซัลฟิวริกเปลี่ยนไปเป็นซัลฟิริกแอนไฮไดรด์ ดังนั้นหากให้ความร้อนในปริมาณมากเกินไป ทั้งการใช้อุณหภูมิสูงหรือทำปฏิกิริยาเป็นเวลานาน หมู่คาร์บอกซิลิกอิสระในเรซิน (เรซิน 1) จะไปทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซีที่มีอยู่มากมายในเซลลูโลส และเกิดการเชื่อมขวาง (crosslink) ขึ้นในโครงสร้าง ทำให้หมู่คาร์บอกซิลิกอิสระในเรซินลดลง (Wing, 1996; Zhu et al., 2008) ดังสมการในภาพที่ 6 (เรซิน 2 และ 3) ซึ่งหมายความว่าหมู่ที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนไอออนลดลงนั่นเอง นอกจากนี้ความร้อนที่มากเกินไปยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของเรซิน เช่น สีคล้ำ มีกลิ่นไหม้ และเหนียวติดบีกเกอร์ ทำให้ยากต่อการทำความสะอาดเรซินในขั้นตอนสุดท้ายของการสังเคราะห์

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันสำหรับการสังเคราะห์เรซินแลกเปลี่ยนไอออนในการทดลองนี้ไม่ใช่กรดแก่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังเช่นปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันทั่วไป เพราะถึงแม้ว่ากรดแก่เช่นกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา แต่ก็ทำให้เกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) ซึ่งทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสเกิดการสลายตัว



ภาพที่ 6 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกอิสระในเรซินและหมู่ไฮดรอกซีของเซลลูโลส (Cel-OH)
ดัดแปลงจาก; Robert E. Wing (1996)

เมื่อนำเรซินที่มีค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนสูงสุดของแต่ละชุดการทดลองไปวิเคราะห์หาการบวมตัวและปริมาณความชื้นพบว่าให้ผลดังแสดงในตารางที่ 3 โดยเรซินชนิดที่ 2 มีการบวมตัวและปริมาณความชื้นสูงสุด

ตารางที่ 3 การบวมตัวและความชื้นของเรซินผักตบชวาที่สังเคราะห์ได้

ชนิดเรซิน	การบวมตัว (เท่า)	ร้อยละของความชื้น
1 ^a	1.13	4.88
2 ^b	1.33	5.18
3 ^c	1.20	4.59
4 ^d	1.20	3.16

a สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 110 °C ใช้เวลา 540 นาที, b สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 120 °C ใช้เวลา 480 นาที, c สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 130 °C ใช้เวลา 240 นาที และ d สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 140 °C ใช้เวลา 180 นาที

เรซินโดยทั่วไปมีความสามารถในการดูดน้ำหรือของเหลวรอบตัวได้ ทำให้เกิดการบวมตัวของเรซิน ซึ่งการบวมตัวนี้มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออน กล่าวคือ หากเรซินบวมตัวได้น้อย การแทรกผ่านของสารละลายเข้าไปในเม็ดเรซินก็เกิดได้ยาก ทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นน้อยตามไปด้วย ในทางกลับกันหากเรซินมีการบวมตัวมากเกินไปจะทำให้สารละลายผ่านรูพรุนของเรซินได้เร็ว ส่งผลให้เวลาในการสัมผัสกันระหว่างไอออนในสารละลายกับไอออนแลกเปลี่ยนของเรซินน้อยลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลงเช่นกัน นอกจากการบวมตัวแล้ว ความชื้นเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับช่องว่างภายในเรซิน

เรซินที่หมู่ไฮโดรคาร์บอนยึดเหนี่ยวกันไม่แน่น ช่องว่างภายในจะมีมากทำให้สามารถกักเก็บน้ำได้มาก ความชื้นจึงสูง แต่ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำเนื่องจากสารละลายผ่านเรซินได้เร็วเกินไป ส่วนเรซินที่มีความชื้นต่ำแสดงว่าช่องว่างภายในน้อย ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจะสูงขึ้น แต่หากช่องว่างภายในเรซินมีน้อยเกินไป กล่าวคือความชื้นต่ำมาก การแลกเปลี่ยนไอออนก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ดี เนื่องจากสารละลายเคลื่อนที่เข้าออกได้ไม่สะดวก นอกจากนี้ยังอาจทำให้เรซินแตกได้ง่ายอีกด้วย (พอตา, 2547; อรสา, 2553; Ibrahim et al., 2015)

การดูดซับไอออนทองแดงในสารละลายน้ำของเรซินที่สังเคราะห์ได้

เมื่อนำเรซินทั้งสี่ชนิดที่มีค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนสูงสุดของแต่ละชุดการทดลอง (ตารางที่ 2) มาทำการศึกษาความสามารถในการแลกเปลี่ยนหรือดูดซับไอออนทองแดง (Cu^{2+}) ในสารละลายน้ำ โดยควบคุมสภาวะในการทดลองให้เหมือนกัน คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 1000 พีพีเอ็ม ปริมาตร 50 มิลลิลิตร (คิดเป็นไอออนทองแดง 0.79 มิลลิโมล) จากผลการทดลองในตารางที่ 4 พบว่า

เรซินทั้งสี่ชนิดสามารถดูดซับไอออนทองแดงในสารละลายน้ำในสภาวะที่ควบคุมได้ดี คือเรซิน 1 กรัม สามารถดูดซับไอออนทองแดงได้ถึง 0.43 - 0.65 มิลลิโมล โดยเรซินชนิดที่ 3 และ 4 มีความสามารถในการดูดซับที่สูงใกล้เคียงกัน รองลงมาคือเรซินชนิดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 การดูดซับไอออนทองแดง (Cu^{2+}) ในสารละลายน้ำของเรซินที่สังเคราะห์ได้

ชนิดเรซิน	ปริมาณ Cu^{2+} เริ่มต้น (mmol)	ปริมาณ Cu^{2+} ที่ ดูดซับ (mmol/g)	ร้อยละการดูดซับ Cu^{2+}
1 ^a	0.79	0.56 ±0.04	70.6
2 ^b	0.79	0.43 ±0.02	55.1
3 ^c	0.79	0.65 ±0.03	82.3
4 ^d	0.79	0.65 ±0.01	82.1

a สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 110 °C ใช้เวลา 540 นาที, b สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 120 °C ใช้เวลา 480 นาที, c สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 130 °C ใช้เวลา 240 นาที และ d สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 140 °C ใช้เวลา 180 นาที

เมื่อพิจารณาในหน่วยร้อยละการดูดซับพบว่าเรซินทั้งสี่ชนิดสามารถแลกเปลี่ยนไอออนทองแดงได้มากกว่าร้อยละ 50 โดยเฉพาะอย่างยิ่งเรซินชนิดที่ 3 และ 4 นั้นสูงถึงร้อยละ 80 แสดงให้เห็นว่าเรซินที่สังเคราะห์ได้นี้สามารถใช้งานได้จริง แต่ประสิทธิภาพในการดูดซับหรือแลกเปลี่ยนไอออนอาจมีค่าไม่เป็นที่ไปตามการทดลองนี้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของไอออนในสารละลายและสภาวะที่ใช้ในการดูดซับ และเมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับหรือการแลกเปลี่ยนไอออนทองแดงเทียบกับค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินพบว่าผลที่ได้ไม่เป็นที่ไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เรซินที่มีค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนสูงที่สุดไม่ได้มีร้อยละการดูดซับสูงสุดตามไปด้วย ดังแสดงการเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 5 โดยเรซินชนิดที่ 1 ที่มีค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนสูงสุดกลับมีร้อยละการแลกเปลี่ยนน้อยกว่าเรซินชนิดที่ 3 และ 4 สำหรับเรซินที่ 2 นั้นมีความจุแลกเปลี่ยนไอออนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับเรซินชนิดที่ 3 และ 4 แต่ดูดซับไอออนทองแดงได้เพียงร้อยละ 55.1 เท่านั้น ซึ่งน้อยกว่าถึงเกือบร้อยละ 30 เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะนอกจากค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนแล้ว สมบัติทางกายภาพอื่นๆ เช่น การบวมตัวและปริมาณความชื้นของเรซิน ก็มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนเช่นกัน เนื่องจากทั้งสองพารามิเตอร์บ่งชี้ถึงการขยายตัวและปริมาณช่องว่างในโครงสร้างของเรซิน ซึ่งเกี่ยวข้องกับการไหลเข้าออกของสารละลายผ่านเรซินเหล่านี้ดังที่อธิบายไว้ในข้อที่ 3 (ตารางที่ 3) ดังนั้นอัตราการบวมตัวและปริมาณช่องว่างที่ไม่เหมาะสมย่อมส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายน้ำ

ตารางที่ 5 การแลกเปลี่ยน/ดูดซับไอออนทองแดง (Cu^{2+}) ในสารละลายน้ำของเรซินทั้งสี่ชนิด

ชนิดเรซิน	ความจุแลกเปลี่ยน ไอออนของเรซิน (meq/g)	การบวมตัว (เท่า)	ร้อยละ ความชื้น	ร้อยละการดูดซับ Cu^{2+}
1 ^a	5.1044	1.13	4.88	70.6
2 ^b	4.7377	1.33	5.18	55.1
3 ^c	4.6285	1.20	4.59	82.3
4 ^d	4.4229	1.20	3.16	82.1

a สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 110 °C ใช้เวลา 540 นาที, b สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 120 °C ใช้เวลา 480 นาที, c สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 130 °C ใช้เวลา 240 นาที และ d สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 140 °C ใช้เวลา 180 นาที

นอกจากไอออนทองแดงแล้ว โดยทั่วไปเรซินที่มีหมู่คาร์บอกซิลิกอิสระสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนโลหะที่มีประจุบวกอื่นๆ ได้ เช่น โครเมียม (Cr^{3+}) ตะกั่ว (Pb^{2+}) และแคดเมียม (Cd^{2+}) เป็นต้น และยังสามารถดูดซับสารที่มีประจุบวก เช่น แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และกรดอะมิโนได้อีกด้วย ดังตีพิมพ์ในวารสารงานวิจัยหลายฉบับ ซึ่งจากคุณสมบัติดังกล่าวจึงสามารถนำเรซินผกตบขาวจากงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้งานในหลายด้าน เช่น เป็นสารดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย เป็นเรซินตัวกลางในการเพิ่มความเข้มข้นของไอออนโลหะ (pre-concentration) หรือในการแยกสารผสมที่มีประจุบวกออกจากสารละลาย เป็นต้น โดยประสิทธิภาพในการใช้งานอาจแตกต่างกันไปตามชนิดของไอออนตัวอย่าง ปริมาณไอออนในสารละลาย และสภาวะในการดูดซับ (Gurgel et al., 2008, Sharma & Pant, 2009; Li et al., 2010; Yu et al., 2013 Altundoğan et al., 2016)

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์เรซินแลกเปลี่ยนไอออนจากผกตบขาวโดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสในผกตบขาวกับกรดซิติริก เรซินที่สังเคราะห์ได้เป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดกรดอ่อน มีโปรตอนของหมู่คาร์บอกซิลิกทำหน้าที่เป็นหมู่แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกอื่นๆ ในสารละลาย โดยในการทดลองนี้ทำการศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เรซินมีค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนสูงสุดในเทอมของปริมาณหมู่คาร์บอกซิลิกอิสระ และวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานอื่นๆ ของเรซิน ซึ่งสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. สภาวะที่ทำให้เรซินมีค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนสูงสุดในสี่ชุดการทดลอง คือ ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 540 นาที, สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 480 นาที, สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 240 นาที และสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 180 นาที โดยให้ค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินเท่ากับ 5.1044, 4.7377, 4.6285 และ 4.4229 มิลลิสมมูลย์ต่อกรัมเรซิน ตามลำดับ ซึ่งในสามชุดการทดลองหลังนั้นค่าที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95)

2. ค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินไม่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงหรือเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มากเกินไปทำให้เกิดการเชื่อมขวางขึ้นในโครงสร้างเรซิน ส่งผลให้เรซินมีหมู่แลกเปลี่ยนไอออน (หมู่คาร์บอกซิลิกอิสระ) ลดลง

3. เมื่อนำเรซินที่มีค่าดังกล่าวไปหาค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนสูงสุดในแต่ละชุดการทดลองไปหาค่าการบวมตัวและความชื้นพบว่ามีการบวมตัวระหว่าง 1.13 ถึง 1.33 เท่า และค่าความชื้นระหว่าง 3.16 ถึง 5.18 เปอร์เซ็นต์ โดยเรซินที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 480 นาที มีการบวมตัวและมีปริมาณความชื้นสูงสุด ส่วนการบวมตัวและปริมาณความชื้นต่ำสุดเป็นของเรซินที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 540 นาที และ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 180 นาที ตามลำดับ

4. การศึกษาความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงในสารละลายน้ำของเรซินทั้งสี่ชนิดในสภาวะควบคุม พบว่ามีประสิทธิภาพการดูดซับอยู่ในช่วง 55 ถึง 82 เปอร์เซ็นต์ โดยเรซินที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 240 นาที และสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 180 นาที ให้ค่าการดูดซับสูงสุดใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 82.3 และ 82.1 ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองค่าไม่มีความ

แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) นอกจากนี้ยังพบว่าเรซินที่มีค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนสูงสุดไม่ได้มีการดูดซับสูงสุดตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ยกตัวอย่างเช่น การบวมตัว และความชื้นของเรซิน ปริมาณไอออนในสารละลาย และสภาวะในการดูดซับ เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ ที่สนับสนุนทุนในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณ สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ ที่อนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- ขวัญเนตร สบายใจ. (2542). การกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พอลา ประสานนาม. (2547). การกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนที่ผลิตจาก Hydroxyethyl Cellulose. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- รัชพล พะวงศ์รัตน์. (2554). การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมไฮโดรไลสผักตบชวาโดยหมักหนึ่งไอ้ น้ำแรงดันสูงเพื่อผลิตเอทานอล. Veridian E-Journal SU. 4(1): 891-901.
- อรสา โนนทอง. (2553). การศึกษาประสิทธิภาพเรซินธรรมชาติจากก้านกล้วยน้ำว่าในการลดปริมาณโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานชุบโครเมียม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, นครราชสีมา: มหาวิทยาลัย ราชภัฏนครราชสีมา.
- Altundoğan, H.S., Arslan, N.E. and Tümen, F. (2007). Copper removal from aqueous solutions by sugar beet pulp treated by NaOH and citric acid. Journal of Hazardous Materials. 149: 432–439.
- Altundoğan, H.S., Topdemir, A., Çakmak, M. and Bahar, N. (2016). Hardness removal from waters by using citric acid modified pine cone. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 58: 219–225.
- Carey, F.A. (2003). Organic Chemistry, 5th edition, New York: McGraw-Hill Companies. Ibrahim, H.S., Ammar, N.S., Soylak, M. and Ibrahim, M. (2012). Removal of Cd(II) and Pb(II) from aqueous solution using dried water hyacinth as a biosorbent. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 96: 413-420.
- Ibrahim, M.D. and Mondal, H. (2015). Cellulose and cellulose derivatives: synthesis, modification and applications, New York: Nova Science Publishers.

- Júnior, O.K., Gurgel, L.V.A., de Freitas, R.P. and Gil, L.F. (2010). Removal of Cu(II) and Cd(II) from aqueous single metal solutions by mercerized cellulose and mercerized sugarcane bagasse chemically modified with EDTA dianhydride (EDTAD). *Carbohydrate Polymers*. 79: 184–191.
- Kalia, S., Kaith, B. S. and Kaur, I. (2011). *Cellulose Fibers: bio- and nano-polymer composites green chemistry and technology*, Springer.
- Li, Q., Chai, L., Wang, Q., Yang, Z., Yan, H. and Wang, Y. (2010). Fast esterification of spent grain for enhanced heavy metal ions adsorption. *Bioresource Technology*. 101: 3796-3799.
- McSweeney, J.D., Rowell, R.M. and Min, S. (2006). Effect of citric acid modification of aspen wood on sorption of copper ion. *Journal of Natural Fibers*. 3(1): 43-58.
- O'Connell, D.W., Birkinshaw, C. and O'Dwyerac, T.F. (2008). Heavy metal adsorbents prepared from the modification of cellulose: A review. *Bioresource Technology*. 99: 6709-6724.
- Sharma, R.K. and Pant, P. (2009). Preconcentration and determination of trace metal ions from aqueous samples by newly developed gallic acid modified Amberlite XAD-16 chelating resin. *Journal of Hazardous Materials*. 163: 295-301.
- Sindhu, R., Binod, P., Pandey, A., Madhavan, A. Alphonsa, J.A., Vivek, N., Gnansounou, E., Castro, E. and Vincenza. (2017). Water hyacinth a potential source for value addition: An overview. *Bioresource Technology*. 230: 152-162.
- Soliman, E.M., Ahmed, S.A. and Fadl, A.A. (2011). Removal of calcium ions from aqueous solutions by sugar cane bagasse modified with carboxylic acids using microwave-assisted solvent-free synthesis. *Desalination*. 278: 18-25.
- Gurgel, L.V.A., Júnior, O.K., Gil, R.P.F. and Gil, L.F. (2008). Adsorption of Cu(II), Cd(II), and Pb(II) from aqueous single metal solutions by cellulose and mercerized cellulose chemically modified with succinic anhydride, *Bioresource Technology*. 99: 3077–3083.
- Wan Ngah, W.S. and Hanafiah, M.A.K.M. (2008). Removal of heavy metal ions from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents: A review. *Bioresource Technology*. 99: 3935–3948.
- Wing, R.E. (1996). Corn fiber citrate: preparation and ion-exchange properties. *Industrial Crops and Products*. 5: 301-305.
- Yu, X., Tong, S., Ge, M., Wu, L., Zuo, J., Cao, C. and Song, W. (2013). Adsorption of heavy metal ions from aqueous solution by carboxylated cellulose nanocrystals. *Journal of Environmental Sciences*. 25(5): 933–943.
- Zhu, B., Fan, T. and Zhang, D. Adsorption of copper ions from aqueous solution by citric acid modified soybean straw. *Journal of Hazardous Materials*. 153: 300-308.