

ผลของแคลเซียมต่อการจับตัวตกตะกอนน้ำอ้อยที่บสกัด

Effect of Calcium on Coagulation and Precipitation in Extracted Sugarcane Juice

ดวงฤดี วังภูมิใหญ่^{1,2} อนูทิน ปัทมะสุวรรณ² จักรพล สุนทรวรภาส²

ก้านรงค์ ศรีรอต² และประมุข ภาระกุลสุสถิตย์^{1*}

Duangrudee Wangpoomyai^{1,2}, Anutin Pattamasuwan², Jackapon Sunthornvarabhas²

Klanarong Sriroth² and Pramuk Parakulsuksatid^{1*}

¹ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10903

²บริษัท มิตรผลวิจัย พัฒนาอ้อยและน้ำตาล จำกัด ชัยภูมิ 36110

¹Department of Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok, Thailand 10903

²Mitr Phol Innovation & Research Center, Chaiphum, Thailand 36110

*Corresponding author: fagimp@ku.ac.th

Received: September 21, 2021

Revised: February 28, 2022

Accepted: March 29, 2022

Abstract

Sugarcane juice clarification is well known for raw sugar production. The principle based on coagulation precipitation of soluble solid and sedimentation to make a clear juice. Aim of this work to investigate the effect of calcium on pH which affected coagulation precipitation of extracted sugarcane juice. The sugarcane juice was incubated at 75°C, then lime saccharate with various calcium hydroxide content was added for adjusting the pH of the juice solution. The sample solutions in the range of pH 6.5-8.5 were boiled and kept for further analysis, comparing with the control sample. Regarding to the experiment, the sample solutions with pH 7.5 or higher was an appropriated for 321 mg/kg phosphate, phosphate removal 90.9% and turbidity 0.013 abs with less sucrose losses. Moreover, the results of the FTIR profile showed that main species of calcium phosphate compounds and calcium carbonate were accelerate in lime juice. Although the particle size of suspension in the sample and control solutions were similar, this profile was not detected in the control sample.

Keywords: sugarcane juice, coagulation, precipitation, calcium phosphate, FTIR

บทคัดย่อ

กระบวนการทำใส่น้ำอ้อยในการผลิตน้ำตาลทรายดิบเป็นที่รู้จักกันดี อาศัยหลักการจับตะกอนของแข็งที่ละลายในน้ำอ้อย แล้วทำการตกตะกอนแยกน้ำอ้อยใสออกมา ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของแคลเซียมต่อ pH ซึ่งมีผลต่อการจับตะกอนของแข็งที่แขวนลอยในน้ำอ้อย โดยได้นำน้ำอ้อยมาอุ่นที่อุณหภูมิ 75°ซ. และเติมโลม์แซคคาเรท ซึ่งมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นองค์ประกอบ เพื่อปรับ pH น้ำอ้อยให้อยู่ในช่วง pH 6.0-8.5 จากนั้นให้ความร้อนจนกระทั่งน้ำอ้อยเดือด นำแต่ละสารละลายตัวอย่างที่ได้ไปเก็บเพื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับสารละลายควบคุมจากการทดลองพบว่า ตัวอย่างน้ำอ้อยที่ pH ตั้งแต่ 7.5 เพียงพอสำหรับการจับตะกอนฟอสเฟตที่ 321 มก./กก. กำจัดฟอสเฟตได้ 90.9% มีค่าความขุ่นน้ำอ้อย 0.013 abs โดยพบการสูญเสียซูโครสในปริมาณน้อยขณะเดียวกันผลจากโปรไฟล์เอฟทีโออาร์ บ่งชี้ว่าในสารละลายมีการเกิดสปีซีหลักของแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมฟอสเฟต แต่ไม่พบในตัวอย่างน้ำอ้อยควบคุม แม้ว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของสารแขวนลอยไม่แตกต่างกัน

คำสำคัญ: น้ำอ้อย การจับตะกอน ตกตะกอน
สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต
เทคนิควัดการดูดกลืนแสงด้วยเอฟทีโออาร์

คำนำ

อ้อย (*Saccharum officinarum* L.) จัดอยู่ในวงศ์หญ้า (POACEAE หรือ GRAMINEAE) และอยู่ในวงศ์ย่อย PANICOIDEAE ในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบจากอ้อยที่ผ่านกระบวนการหีบสกัดได้เป็นน้ำอ้อยรวมมีของแข็งที่ละลายในปริมาณ 15-17%Brix โดยปกติมีส่วนประกอบของสารละลายน้ำตาลซูโครส 78-89%

และสารละลายอื่นที่ไม่ใช่น้ำตาล ทั้งที่เป็นสารละลายสารแขวนลอย และสารคอลลอยด์ โดยขั้นตอนการทำใสเป็นกระบวนการตกตะกอนสิ่งเจือปน ทำให้น้ำอ้อยใสและมีความบริสุทธิ์มากขึ้น เพื่อนำไปผลิตน้ำตาลในขั้นตอนต่อไป โดยกระบวนการทำใสน้ำอ้อยนิยมเติมปูนขาวผสมในน้ำอ้อย มีชื่อเรียกแต่ละวิธี ได้แก่ กระบวนการทำใสแบบฟอสฟาเตชัน (Phosphatation) คาร์บอนเนชัน (Carbonation) ซัลไฟเตชัน (Sulfitation) และเดเฟเคชัน (Defecation) (Istifanus, 2015) วิธีที่นิยมใช้กันเป็นส่วนใหญ่ คือ กระบวนการทำใสแบบเดเฟเคชัน ทำได้โดยผสมน้ำปูนขาวเพื่อปรับ pH น้ำอ้อย และเติมสารเร่งตกตะกอนกลุ่มโพลีอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) (Doherty and Edye, 1999; Poel *et al.*, 1998; Simpson, 1996) ปฏิกริยาเคมีสำคัญ คือ การเกิดสารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟต (Calcium phosphate) ที่มีประจุบวกยึดเกาะสารที่มีประจุลบในน้ำอ้อย ได้แก่ แบง โปรตีน สิ่งเจือปนที่แขวนลอยในน้ำอ้อย เช่น เส้นใยอ้อย ดิน ทราย เป็นต้น ขนาดอนุภาคตะกอนที่ใหญ่ขึ้นและมีน้ำหนักตะกอนสูงขึ้นจะแยกออกมาจากน้ำอ้อย โดยสารเร่งตกตะกอนช่วยลดแรงดึงดูดของสารแขวนลอยในน้ำอ้อยให้ตกตะกอนเร็วขึ้น (Thai *et al.*, 2015; Eggleston *et al.*, 2012; Doherty, 2011; Zaeib, 2004; Poel *et al.*, 1998) วิธีการอื่น ๆ ได้แก่ วิธีฟอสฟาเตชัน แต่ไม่นิยมเนื่องด้วยต้องมีการเติมกรดฟอสฟอริก วิธีคาร์บอนเนชันใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับกระบวนการลดค่าสีน้ำเชื่อม นิยมใช้สำหรับกระบวนการผลิตน้ำตาลรีไฟน์ และวิธีซัลไฟเตชันเดิมมีการเติมกำมะถัน (Sulfur) ซึ่งวิธีนี้ประเทศไทย โดยสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทรายของประเทศไทย ได้ระบุอย่างชัดเจนว่า โรงงานผลิตน้ำตาลทรายทุกโรงงานได้ยกเลิกใช้ “สารฟอกขาว” ในขั้นตอนการผลิตของประเทศไทย มาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547

กระบวนการทำใสแบบเดเฟเคชัน ทำได้โดยการเติมน้ำปูนขาว (Calcium hydroxide) ผสมกับน้ำอ้อยที่อุณหภูมิ 75°ซ. และปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 7.5-7.8

เพื่อให้เกิดตะกอนไตรแคลเซียมฟอสเฟต และแรงประจุบวกของตะกอนที่มาจากแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) จะดึงเอาสิ่งเจือปนที่เป็นประจุลบมารวมตัวกัน (Eggleston *et al.*, 2012) จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ประสิทธิภาพการทำให้ใสในน้ำอ้อยที่สูง ความขุ่นลดลง เมื่อมีปริมาณฟอสเฟตในน้ำอ้อยไม่น้อยกว่า 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Doherty and Rackemann 2008; Rein, 2007; Khotaveevattana, 2003) ทั้งนี้ การศึกษาของ Eggleston *et al.* (2012) พบว่าการอุ่นน้ำอ้อยที่ 65°C. นาน 15 นาที และเติมสารละลายน้ำปูนขาวที่เตรียมจากสารละลายไลม์แซคคาเรท (Lime saccharate) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอน เนื่องจากมีแคลเซียมไอออนอิสระมากกว่าและการผสมไลม์แซคคาเรทที่อุณหภูมิปานกลางพบการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลซูโครสไปเป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรุคโตสในปริมาณน้อย (Eggleston *et al.*, 2002; Steindl, 2001; Eggleston and Vercellotti, 2000; Honig, 1963) ทั้งนี้มีงานวิจัยพบว่าการปรับ pH แตกต่างกันทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตในสารละลายและค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวอนุภาคต่างกัน (Thai and Doherty, 2012; Chen and Chou, 1993; Crees *et al.*,

1977) ซึ่งเป็นผลมาจากสารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของแคลเซียมและฟอสเฟต (Berzina and Borodajenko, 2012; Greenwood *et al.*, 2007) และพบว่ามีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยใหญ่กว่าน้ำอ้อยวัตถุดิบ (Thai *et al.*, 2015; Thai and Doherty, 2012; Thai *et al.*, 2012; Doherty and Rackemann, 2008; Doherty *et al.*, 2002) เมื่อปรับ pH น้ำอ้อยเป็น 8.0 ยังคงพบไอออนของโลหะละลายหลงเหลือในน้ำอ้อยไม่จับตะกอนแยกออกมา (Thai *et al.*, 2015; Doherty and Rackemann 2009; Zaeib., 2004; Eggleston *et al.*, 2002) และมีการศึกษาพบว่า pH ของสารละลายระหว่าง 7.0-8.0 จะให้ประจุ HPO_4^{2-} ตามด้วย H_2PO_4^- (Doherty and Rackemann, 2008; Johnsson and Nancollas, 1992) สอดคล้องกับการศึกษาของ Seliem *et al.* (2016) (Figure 1) และในส่วนสารละลายที่ไม่ใช่น้ำตาลที่ยังคงมีในน้ำอ้อย ไอออนโลหะมักตกตะกอนสะสมเป็นตะกอน (Scale) เกาะที่ผิวอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ระหว่างกระบวนการต้มระเหยน้ำอ้อยเป็นน้ำเชื่อม การเคี้ยวตกผลึก และส่งผลต่อคุณภาพและผลผลิตน้ำตาลทรายดิบ (Phakam *et al.*, 2018)

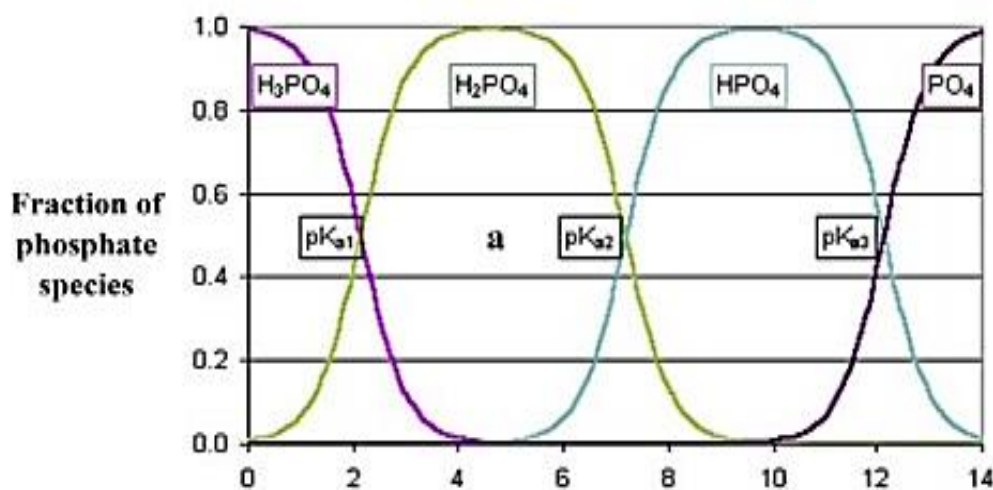


Figure 1 Fraction of phosphate species at different pH

Source: Seliem *et al.* (2016)

แคลเซียมฟอสเฟตจากปฏิกิริยาของแคลเซียมและฟอสเฟตซึ่งเป็นสารบริสุทธิ์ในระดับห้องปฏิบัติการถูกทำการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ และ pH ต่อชนิดสารที่เกิดขึ้น โดยพบว่าเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy) ในระดับดูดกลืนพลังงานแสงที่เลขคลื่นในช่วง $560\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ พบการดูดกลืนแสงของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต โดยมีการศึกษาพบพิคการดูดกลืนแสงของสารประกอบคาร์บอเนตอออนที่เลขคลื่น 850 และ 870 cm^{-1} (Berzina and Borodajenko, 2012; Paschalis *et al.*, 1996) โดย Karampas and Kontoyannis (2013) พบพิคการดูดกลืนแสงของสารประกอบไดแคลเซียมฟอสเฟต ไดไฮเดรต ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ที่ pH ตั้งแต่ 6.5 ถึง 8.5 ที่เลขคลื่น 987 cm^{-1} พบพิคการดูดกลืนแสงของสารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟต (CaHPO_4) ที่ pH 7.5 ที่เลขคลื่น 906 cm^{-1} และพบพิคการดูดกลืนแสงของสารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) ตั้งแต่ pH 7.5 ถึง 8.0 ที่เลขคลื่น 941 cm^{-1} (Meejo *et al.*, 2006) ในขณะที่ Berzina and Borodajenko (2012) พบสารประกอบไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) ที่ pH เดียวกัน พบสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตในน้ำอ้อยจำลอง (Synthetic sugarcane juice) (Doherty and Rackemann, 2008) และพบคาร์บอเนตอออนเกิดขึ้นที่ pH 7.5 และ 8.0 เกิดการเกาะกลุ่มกันของแข็งที่ละลายในน้ำอ้อยที่มีประจุลบมาเกาะกับประจุบวกของไตรแคลเซียมฟอสเฟต เกิดลักษณะปฏิกิริยาเชื่อมต่อระหว่างแคลเซียมอออนกับฟอสเฟต (Calcium phosphate bridging) (Eggleston *et al.*, 2012)

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น เห็นได้ว่าสาเหตุที่ยังคงมีสิ่งเจือปนติดไปกับน้ำอ้อยใส แม้จะมีการเติมสารเร่งตกตะกอนเพื่อช่วยให้มีการรวมตัวตะกอน คือ การปรับ pH ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้จะทำการศึกษากการเตรียมน้ำอ้อยผสมน้ำปูนขาวก่อนเติมสารเร่งตกตะกอน เพื่อศึกษาผลของแคลเซียมต่อ pH ซึ่งมีผลต่อปริมาณสารที่อยู่ในน้ำอ้อย โดยหวังว่าผลที่ได้สามารถใช้

กำหนดมาตรฐานวิธีเตรียมน้ำอ้อยผสมปูนขาวที่เหมาะสมและเพียงพอสำหรับกระบวนการทำใส่น้ำอ้อยแบบเดเฟชันของโรงงานน้ำตาลได้ และอาจสามารถใช้เป็นความรู้พื้นฐานสำหรับต่อยอดศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมน้ำตาลของประเทศไทยต่อไปในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

ตัวอย่างอ้อยสด สุกแก่ที่อายุอ้อย 10-11 เดือน เก็บเกี่ยวด้วยรถตัดในเดือนมีนาคม ฤดูกาลผลิต 2561/62 ของโรงงานน้ำตาล บริษัท รวมเกษตรกรอุตสาหกรรม จำกัด (โรงงาน บี) อำเภอกุฉิเยว จังหวัดชัยภูมิ ที่ผ่านกระบวนการหีบสกัดด้วยระบบถังแช่ (Diffuser) ได้น้ำอ้อยรวมที่อุณหภูมิ $38\text{--}40^{\circ}\text{C}$. และตัวอย่างโลม์แซคคาเรทที่ได้จากการเตรียมโดยนำปูนขาวผง (Calcium hydroxide) เตรียมเป็นน้ำเข้มข้น (Milk of lime) มาผสมกับน้ำเชื่อม (Raw syrup) นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลอง โดยคุณภาพน้ำอ้อยมีปริมาณฟอสเฟต 321 มก./กก. (ICUMSA method GS7-15, 1994) ค่า %บrix 16-18% ค่า pH 5.3 และคุณภาพโลม์แซคคาเรท มีค่า %บrix 38% ค่า pH 11.5-12.5

นำตัวอย่างน้ำอ้อยที่เก็บรักษาในตู้แช่แข็งมาละลายแล้วกรองด้วยตะแกรงสเตนเลส ขนาดรูตะแกรง 100 Mesh จากนั้นตวงตัวอย่างหลังกรองจำนวน 8 ลิตร ด้วยกระบอกตวงขนาด 1 ลิตร อุ่นในอ่างน้ำร้อนควบคุมอุณหภูมิ 65°C . นาน 15 นาที (Eggleston *et al.*, 2002) จากนั้นตวงด้วยกระบอกตวงขนาด 1 ลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร จำนวน 6 บีกเกอร์ นำบีกเกอร์ตัวอย่างไปให้ความร้อนบนเตาไฟฟ้า ควบคุมอุณหภูมิ น้ำอ้อยสำหรับผสมโลม์แซคคาเรท ที่ 75°C . (Thai *et al.*, 2012; Doherty *et al.*, 2002) ปรับ pH ด้วยการเติมโลม์แซคคาเรทในแต่ละบีกเกอร์ เป็น 6.5, 7.0, 7.5, 8.0 และ 8.5 ตามลำดับ และใช้ตัวอย่างที่ไม่เติมโลม์แซคคาเรทเป็นตัวอย่างควบคุมให้ความร้อนต่อจนกระทั่งน้ำอ้อยเดือด โดยควบคุมการให้

ความร้อนจาก 75°C. จนกระทั่งน้ำอ้อยเดือดภายในเวลา 3 นาที (Eggleston *et al.*, 2002; Steindl, 2001) รอให้ฟองยุบ ใช้แท่งแก้วกวนตัวอย่างเป็นวงกลม วนซ้าย 5 รอบ และวนขวา 5 รอบ แบ่งเก็บตัวอย่างเป็น 3 ส่วนต่อค่า pH ใส่ลงในขวดพลาสติกเก็บตัวอย่างที่ร้อนเพื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพ โดยตัวอย่างที่รอการทดสอบนำไปเก็บรักษาในตู้แช่แข็ง -20°C. โดยมีการวิเคราะห์ค่า pH และค่าคุณภาพต่าง ๆ ดังนี้

1. วิเคราะห์ pH วัดโดยเครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH/mV/Conductivity meter รุ่น EUTECH INSTRUMENTS PC700, Singapore)

2. วิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (%Brix) โดยเครื่องวัดบrix 0-95% (Auto refractometer SCHMIDT + HAENSCH)

3. วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลซูโครสด้วยวิธีการหักเหแสงโพลาไรเซชัน (%Polarization) โดยเครื่องโพลาไรมิเตอร์ 0-100°Z (Polarimeter รุ่น POLARTRONIC NIR W2-SCHMIDT + HAENSCH) อ้างอิงวิธีการมาตรฐาน ICUMSA Method GS5/7-1(1994)

4. วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลซูโครส (%Sucrose) น้ำตาลกลูโคส (%Glucose) และน้ำตาลฟรุคโตส (%Fructose) ด้วยเครื่องมือ High Performance Liquid Chromatography (HPLC) โดยใช้คอลัมน์ Sugar Pax[®] ที่อุณหภูมิ 80°C. สภาวะหล่อเย็นตัวอย่าง 4°C. Mobile phase ใช้ 0.05% Calcium disodium ethylenediamine tetra-acetic acid ที่อัตราการใช้ 0.5 มล./นาที และใช้ Refractive Index Detector อ้างอิงวิธีการมาตรฐาน ICUMSA Method GS7/8/4-24(1994)

5. วิเคราะห์ปริมาณแคลเซียม (Calcium, mg/kg) โดยเครื่องมือ Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) รุ่น FAST Sequential Atomic AA280FS, VARIAN, Agilent, USA อ้างอิงวิธีการมาตรฐาน AOAC 968.08

6. วิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟต (Available phosphate, mg/kg) โดยเทคนิค Blue Colorimetric Phosphomolybdate Method วัดการดูดกลืนแสงที่ 600 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-visible Spectrophotometer รุ่น Evaluation 100EV1-153883, Thermo Spectronic อ้างอิงวิธีการมาตรฐาน ICUMSA Method GS7-15 (1994)

7. วิเคราะห์ปริมาณแป้ง (Starch, mg/kg) นำตัวอย่างน้ำอ้อยมาตกตะกอนแป้งด้วยเอทานอล 95% กรองตะกอน นำไปต้มกับ 40% Calcium chloride กรองส่วนใสทำปฏิกิริยากับ Potassium iodide และ Potassium iodate ในสภาวะที่มีกรดอะซิติก วัดค่าดูดกลืนแสงที่ 720 นาโนเมตร อ้างอิงวิธีการมาตรฐาน ICUMSA Method GS 1-17 (2013) และ Laboratory Manual for South African Sugar Factories Including the Official Methods (1985)

8. วิเคราะห์ปริมาณเดกซ์แทรน (Dextran, mg/kg) นำตัวอย่างน้ำอ้อยมากรองแล้วเติมเอนไซม์อะไมเลส บ่มที่ 90°C. และนำสารละลายส่วนใสตกตะกอนด้วย Absolute ethanol วัดค่าดูดกลืนแสงที่ 720 นาโนเมตร อ้างอิงวิธีการมาตรฐาน ICUMSA Method GS 1/2/9-15 (2015); Clarke *et. al.*, 1987; Eggleston and Monge, 2005. Modified Alcohol Haze Method

9. วิเคราะห์ค่าสี (Color, ICUMSA unit) นำตัวอย่างน้ำอ้อยมากรอง ปรับลด %Brix โดยใช้ น้ำกลั่นเจือจาง และนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 420 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer เพื่อคำนวณค่าสี อ้างอิงวิธีการมาตรฐาน ICUMSA Method GS 1/3-7 (2011)

10. วิเคราะห์ค่าความขุ่น (Turbidity, abs) นำตัวอย่างน้ำอ้อยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 900 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer อ้างอิงวิธีการมาตรฐาน ICUMSA Method GS 7-21 (2007)

11. วิเคราะห์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Average particles size, μm) นำตัวอย่างน้ำอ้อยวัดขนาดอนุภาคในระดับไมโครเมตร (Micrometer) ด้วยเทคนิค Dynamic Light Scattering (DLS) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ Laser Diffraction Particle Size Analyzer รุ่น HORIBA-Partica LA-950V2 (Kyoto, Japan)

12. วิเคราะห์ค่าศักย์ไฟฟ้าเซต้า (Zeta potential, mV) นำตัวอย่างน้ำอ้อยแบบไม่เจือจางวัดค่าด้วยเครื่องวิเคราะห์ประจุไฟฟ้า รุ่น Malvern Model Zetasizer Nano ZS Instrument อ้างอิงวิธีการตาม Thai *et al.*(2012)

13. วิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity, mS/sec) โดยเครื่อง (pH/mV/Conductivity meter รุ่น EUTECH INSTRUMENTS PC700, Singapore) อ้างอิงวิธีการมาตรฐาน ICUMSA Method GS 1/3/4/7/8-13 (1994)

14. วิเคราะห์การดูดกลืนพลังงานของหมู่ฟังก์ชันสารประกอบฟอสเฟต โดยเทคนิค Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เตรียมตัวอย่างโดยระเหยน้ำออกเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารที่ 60°C. นาน 4 ชั่วโมง นำมาสแกนช่วงความยาวคลื่นสแกน 4000-400 cm^{-1} โดยทุก ๆ 4 cm^{-1} ทำการสแกน 64 สแกน ด้วยเครื่อง Bruker Tensor 27 FT-IR Spectrometer (Ettlingen, Germany) และใช้โปรแกรม Optical User software (OPUS) 7.5 ในการประมวลผล

จากการทดลองนี้ ข้อมูลจากผลวิเคราะห์ตัวอย่าง จำนวนตัวอย่างละ 3 ซ้ำ ในรายการวิเคราะห์ข้อ 1 ถึงข้อ 13 จะนำไปหาความสัมพันธ์กับ pH โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของตัวอย่างควบคุม และที่ปรับ pH แตกต่างกัน ด้วยโปรแกรม Statistix 8.0 คำนวณสถิติ ANOVA analysis โดยวิธีของ Tukey's mean test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

ผลการวิจัยและวิจารณ์

จากการทดลองเตรียมตัวอย่างน้ำอ้อยโดยแบ่งตัวอย่างน้ำอ้อยเริ่มต้น (ตัวอย่างควบคุม) มีค่า pH 5.3 ทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ๆ ละ 1 ลิตร นำไปอุ่นให้ความร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 65°C. นาน 15 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิน้ำอ้อยเป็น 75°C. และเติมโลม์แซคคาเรทเพื่อปรับ pH เป็น 6.5, 7.0, 7.5, 8.0 และ 8.5 ใช้ปริมาณโลม์แซคคาเรทที่ 4, 6, 8, 10 และ 12 มล. ตามลำดับให้ความร้อนต่อจนกระทั่งน้ำอ้อยเดือด นำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์ผลของ pH จากการเติมโลม์แซคคาเรทต่อปริมาณสารละลายน้ำตาลที่มีในน้ำอ้อย และผลของ pH ต่อปริมาณสารละลายน้ำตาลในน้ำอ้อย ดังแสดงใน Table 1 ผลของ pH ต่อปริมาณสารที่ไม่ใช่น้ำตาลและลักษณะของสารแขวนลอยในน้ำอ้อย ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตในน้ำอ้อยด้วยเทคนิค FTIR

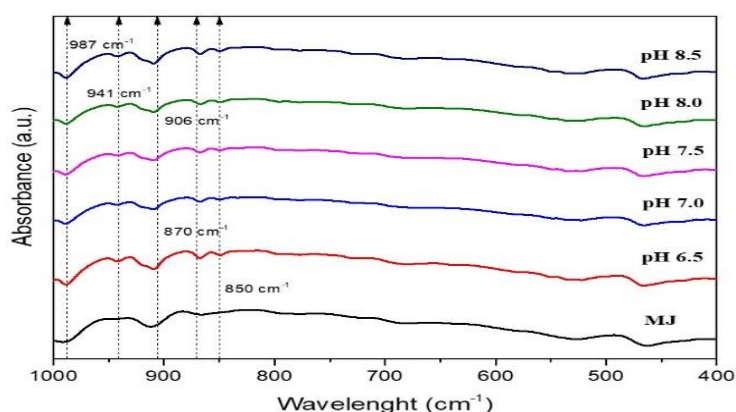


Figure 2 FTIR spectrum of calcium phosphate composite in sugar cane juice

ผลของการเติมโลม์แซคคาเรท ที่มีต่อ pH และปริมาณสารละลายน้ำตาลในน้ำอ้อย

จากการทดลองเติมโลม์แซคคาเรท pH 11.5-12.5 ความเข้มข้น 38%Brix ผสมกับน้ำอ้อยที่อุณหภูมิ 75°C. นำไปต้มให้เดือด แล้วนำไปตรวจวัดปริมาณน้ำตาลได้ผลดังแสดงใน Table 1 พบว่าเมื่อค่า pH ของน้ำอ้อยเพิ่มขึ้น ค่า pH หลังต้มจะเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องมาจากสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นส่วนประกอบของโลม์แซคคาเรทแตกตัวได้เป็นแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) ส่งผลให้ pH ในสารละลายมีความเป็นด่างมากขึ้น เมื่อพิจารณาสารละลายทั้งหมดในน้ำอ้อยพบว่าความเข้มข้น %Brix ของตัวอย่างมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยตัวอย่างน้ำอ้อยที่มีการเติมโลม์แซคคาเรทที่ pH 7.0-8.0 มีค่า %Brix ไม่แตกต่างกันเป็นผลมาจากเติมโลม์แซคคาเรทเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า pH เพิ่มขึ้น และสารละลายที่ได้หลังการเติมโลม์แซคคาเรทเกิดเป็นซูโครสในน้ำอ้อย จากการวิเคราะห์ค่า %Pol ที่ pH 7.0, 8.0 และ 8.5 พบว่ามีค่าน้อยกว่าน้ำอ้อยควบคุม และค่าไม่แตกต่างกันที่ pH 6.5 และ 7.5 นอกจากนั้น

การให้ความร้อนในการทดลองนี้ไม่เพิ่มการสูญเสียน้ำตาลซูโครสมากนัก (Eggleston *et al.*, 2012) เมื่อคำนวณความบริสุทธิ์ของน้ำอ้อยจากค่า %Pol พบว่าที่ pH 7.5 มีค่าสูงกว่าตัวอย่างควบคุม และใกล้เคียงกันกับ pH 7.0, 8.0 และ 8.5 ในขณะที่ pH 6.5 และ 7.0 ใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อ pH ตั้งแต่ 7.5 จะมีความบริสุทธิ์สูงกว่าน้ำอ้อยควบคุม เป็นผลมาจากการตกตะกอนของแคลเซียมฟอสเฟตที่เจือปนในน้ำอ้อย ทำให้ความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันผลของการวิเคราะห์คุณภาพด้วย HPLC ในสารละลาย pH 7.0, 7.5, 8.0 และ 8.5 พบว่าปริมาณน้ำตาลซูโครสไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และน้ำตาลรีดิวซ์ ซึ่งผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน และพบว่าที่ pH 8.0 มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์น้อย ผลจากการที่น้ำตาลซูโครสเสื่อมสลายน้อย ที่ pH ในระดับกลางถึงด่างอ่อน (Eggleston *et al.*, 2012) ซึ่งจากการทดลองนี้ปริมาณน้ำตาลซูโครสที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ pH 6.5 มาจากตัวอย่างเริ่มต้นอาจปนเปื้อนด้วยสิ่งเจือปน ที่มีผลทำให้ %Pol มีค่าสูงกว่าผลของการวัดปริมาณซูโครสด้วย HPLC

ผลของ pH ต่อปริมาณสารละลายที่ไม่ใช่น้ำตาลและลักษณะตะกอนที่แขวนลอยในน้ำอ้อย

จากการทดลองจะเห็นว่าปริมาณไลม์แซคคาเรทมีผลต่อ pH และปริมาณสารละลายน้ำตาลที่มีในน้ำอ้อยแล้วนั้น ในส่วนของผลต่อปริมาณสารละลายที่ไม่ใช่น้ำตาลและลักษณะตะกอนที่แขวนลอยในน้ำอ้อย ดังแสดงใน Table 1 พบว่าเมื่อเติมสารละลายไลม์แซคคาเรทเพิ่มขึ้นนอกจาก pH เพิ่มขึ้นแล้ว ปริมาณของแคลเซียม มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นจากตัวอย่างควบคุมตั้งแต่ pH 6.5 เป็นต้นไป โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยพบว่าปริมาณแคลเซียมไม่แตกต่างกันเมื่อค่า pH เป็น 7.0, 7.5 และ 8.0 มาจากการเติมสารละลายไลม์แซคคาเรทซึ่งเพิ่มแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ลงไปในน้ำอ้อยนั้น ในทางตรงกันข้ามพบว่าปริมาณฟอสเฟตในน้ำอ้อยลดลงจากตัวอย่างควบคุมตั้งแต่ pH 6.5 เป็นต้นไป โดยปริมาณฟอสเฟตที่ลดลงสอดคล้องกันกับเปอร์เซ็นต์การกำจัดปริมาณฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำอ้อยที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งพบที่ pH 7.5 เป็นต้นไปสามารถกำจัดฟอสเฟตได้มากกว่า 90% (Zaeib, 2004) สอดคล้องกับค่าความขุ่นที่มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้ในส่วนค่าความขุ่นที่ลดลงนั้นพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อค่า pH เป็น 7.0, 7.5 และ 8.0 เช่นเดียวกันกับเปอร์เซ็นต์การกำจัดความขุ่น โดยที่ pH 8.5 กำจัดความขุ่นสูงสุดที่ 59.3% ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมกับฟอสเฟตในน้ำอ้อยในสภาวะที่เป็นต่าง

เมื่อพิจารณาปริมาณสารละลายที่ไม่ใช่น้ำตาลที่มีในน้ำอ้อยได้แก่ ปริมาณแป้ง พบว่าเมื่อค่า pH สูงขึ้น ปริมาณแป้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างควบคุม โดยที่ pH 6.5 และ 7.0 มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยค่า pH ตั้งแต่ 7.5 มีความแตกต่างกันเนื่องมาจากการละลายของแป้งเพิ่มมากขึ้นเมื่อ pH สูงขึ้น ร่วมกับการให้ความร้อน (Seliem *et al.*, 2016; Doherty and Rockmann, 2008; Eggleston *et al.*, 2002) ในทางเดียวกันปริมาณเด็กซ์เตรนที่พบใกล้เคียงกันกับตัวอย่างควบคุม เนื่องการให้ความร้อน 103°C. เพื่อต้มน้ำอ้อยให้เดือดช่วยลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในกลุ่มที่สร้างเด็กซ์เตรน ทำให้ให้น้ำอ้อยไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างการเก็บรักษาในตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ -20°C. ในระหว่างรอการทดสอบ โดยปกติการให้ความร้อนกับน้ำอ้อยมักเกิดสีจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด จากน้ำตาลรีดิวซ์และกรดอะมิโน ในการทดลองนี้พบว่าสีของน้ำอ้อยมีแนวโน้มใกล้เคียงกันกับตัวอย่างควบคุม โดยเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างกันทางสถิติพบว่า ที่ pH 8.0 มีค่าสีสูงกว่า และที่ pH 7.0 มีค่าสีน้อยกว่าตัวอย่างควบคุมซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดเกิดน้อย สอดคล้องกับปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งจากผลข้างต้นที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อย เนื่องด้วยการทดลองมีการควบคุมอุณหภูมิปานกลางช่วงผสมไลม์แซคคาเรท และเวลารวมในการต้มน้ำอ้อยจนเดือดไม่เกิน 5 นาที

Table 1 Effect of pH on total soluble solid, soluble sugar, soluble non-sugar, color, particle size, electric potential of colloid in sugarcane juice

Analysis results	pH 5.3 (control)	pH 6.5	pH 7.0	pH 7.5	pH 8.0	pH 8.5
Soluble sugar						
pH	5.20±0.01 ^F	6.43±0.00 ^E	6.84±0.00 ^D	7.23±0.01 ^C	7.73±0.01 ^B	8.20±0.01 ^A
%Brix	17.36±0.07 ^A	16.86±0.37 ^B	16.63±0.02 ^{BC}	16.66±0.08 ^{BC}	16.69±0.02 ^{BC}	16.51±0.02 ^C
%Polarization	14.49±0.06 ^A	14.17±0.28 ^{AB}	14.02±0.03 ^B	14.31±0.34 ^{AB}	14.09±0.01 ^B	14.07±0.17 ^B
%Purity by polarization ¹	83.45±0.66 ^C	84.05±0.18 ^{BC}	84.32±0.11 ^{ABC}	85.85±1.62 ^A	84.42±0.04 ^{ABC}	85.22±0.92 ^{AB}
%Sucrose	14.26±0.45 ^A	11.12±2.33 ^B	14.32±0.04 ^A	14.15±0.43 ^A	13.18±0.07 ^A	14.28±0.10 ^A
%Glucose	0.81±0.02 ^A	0.59±0.10 ^C	0.79±0.03 ^A	0.78±0.02 ^{AB}	0.67±0.09 ^{BC}	0.78±0.02 ^A
%Fructose	0.76±0.01 ^A	0.49±0.15 ^C	0.75±0.02 ^{AB}	0.69±0.02 ^{AB}	0.62±0.07 ^{BC}	0.75±0.04 ^{AB}
%Purity by sucrose ²	82.13±2.15 ^{AB}	65.85±8.31 ^C	86.13±0.10 ^A	84.91±1.42 ^{AB}	78.97±0.20 ^B	86.48±0.35 ^A
%Reducing sugar ³	1.57±0.02 ^A	1.08±0.24 ^C	1.54±0.04 ^A	1.47±0.03 ^{AB}	1.29±0.15 ^{BC}	1.53±0.01 ^A
Soluble non-sugar						
Calcium (mg/kg)	333 ^D	480 ^C	540 ^B	541 ^B	565 ^B	637 ^A
Available phosphate (mg/kg)	321 ^A	168 ^B	82 ^C	29 ^D	15 ^E	8 ^F
Turbidity (absorbance)	0.027 ^A	0.017 ^B	0.014 ^C	0.013 ^C	0.014 ^C	0.011 ^D
Starch (mg/kg)	482 ^D	480 ^D	565 ^{CD}	806 ^{AB}	734 ^{BC}	975 ^A
Dextran (mg/kg)	2,596 ^A	2,661 ^A	1,478 ^C	2,461 ^{AB}	1,721 ^{BC}	2,640 ^A
Color (ICUMSA unit)	15,309 ^{BC}	15,384 ^{BC}	14,921 ^C	16,168 ^{AB}	16,825 ^A	15,339 ^{BC}
Average particle sizes (µm)	119 ^A	107 ^B	104 ^B	117 ^A	114 ^A	115 ^A
Zeta potential (mV)	-4.20 ^A	-4.86 ^A	-5.04 ^{AB}	-4.97 ^A	-4.33 ^A	-6.25 ^B
Conductivity (mS/sec)	4.17 ^C	4.57 ^{AB}	4.42 ^{BC}	4.44 ^{BC}	4.52 ^B	4.87 ^A
%Phosphateremoval ⁴	-	49.5 ^E	74.6 ^D	90.9 ^C	95.2 ^B	97.4 ^A
%Turbidity removal ⁵	-	37.0 ^C	48.2 ^B	51.9 ^B	48.2 ^B	59.3 ^A

A-F means with different superscripts of soluble sugar or soluble non-sugar are represent significant difference (p<0.05).

¹ %Purity by polarization = (%Polarization/%Brix) *100

² %Purity by sucrose = (%Sucrose/%Brix) *100

³ %Reducing sugar = %Glucose + %Fructose

⁴ % Phosphate removal = (Phosphate initial – Phosphate after)/Phosphate initial *100

⁵ % Turbidity removal = (Turbidity initial – Turbidity after)/Turbidity initial *100

นอกจากผลของ pH ต่อคุณภาพทางด้านเคมี น้ำตาลของน้ำอ้อยที่กล่าวในข้างต้นแล้ว เมื่อนำน้ำอ้อยไปทดสอบทางด้านกายภาพและทางไฟฟ้าเคมีของอนุภาค ได้แก่ ขนาดอนุภาคตะกอนที่แขวนลอยในน้ำอ้อย ค่าศักย์ไฟฟ้าเซต้าที่ผิวอนุภาค และค่าการนำไฟฟ้า (Table 1) พบว่าแนวโน้มของขนาดอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเมื่อเติมโพลิเมอร์แซคคาเรทเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบทางสถิติพบว่าที่ pH 6.5 และ 7.0 มีขนาดเล็กกว่าตัวอย่างควบคุม และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่ pH 7.5 เป็นต้นไป มีขนาดเล็กกว่าแต่ใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุมและขนาดอนุภาคไม่แตกต่างกัน ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าผลการศึกษาของ Thai and Doherty (2012) ที่ศึกษาพบว่าขนาดอนุภาคของน้ำอ้อยที่ไม่ผ่านการอุ่นร้อนหรือเติมแคลเซียม มีขนาดเฉลี่ย 40 ไมโครเมตร มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Eggleston *et al.* (2012) ที่พบว่าเมื่อให้ความร้อนน้ำอ้อยผสมปูนขาวที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการรวมกลุ่มของสารแขวนลอยในน้ำอ้อยกับในระหว่างเกิดสารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟต ทำให้ขนาดอนุภาครวมกลุ่มกันและมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยเมื่อพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าเซต้า (Zeta potential) พบที่ pH 6.5-8.0 มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับตัวอย่างควบคุม โดยที่ pH 7.0 และ 8.5 มีค่าไม่แตกต่างกัน แต่มีค่าแตกต่างกันกับตัวอย่างควบคุม โดยพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าเซต้าหลังเติมโพลิเมอร์แซคคาเรทมีค่าสูงกว่าตัวอย่างควบคุม ในขณะเดียวกัน ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ที่ pH 7.0 และ 7.5 ไม่แตกต่างกันกับตัวอย่างควบคุม ขณะที่ pH 6.5-8.0 แตกต่างกับตัวอย่างควบคุมโดยมีค่าสูงกว่า และ pH 6.5 และ 8.5 ไม่แตกต่างกัน แต่แตกต่างกับตัวอย่างควบคุม โดยพบว่าค่าการนำไฟฟ้าหลังเติมโพลิเมอร์แซคคาเรทมีค่าสูงกว่าตัวอย่างควบคุม

ผลของ pH ต่อหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตในน้ำอ้อย

จากการศึกษานี้พบว่าน้ำอ้อยที่มีปริมาณฟอสเฟตตามธรรมชาติปริมาณ 321 มก./กก. เมื่อถูกปรับ pH จากเริ่มต้นที่ pH 5.3 เป็น 6.5, 7.0, 7.5, 8.0 และ 8.5 เปรียบเทียบกับตัวอย่างน้ำอ้อยควบคุม (pH 5.3) ผลจาก FTIR profile (Figure 2) พบเกิดการดูดกลืนแสงของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต ตั้งแต่ pH 6.5 เป็นต้นไป โดยจะพบการเกิดสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตจากพิกของคาร์บอเนตไอออนที่เลขคลื่น 850 cm^{-1} และ 870 cm^{-1} นอกจากนั้นยังพบสารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่เลขคลื่น 906 cm^{-1} สารประกอบไดรแคลเซียมฟอสเฟตที่เลขคลื่น 941 cm^{-1} สารประกอบไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต และสารประกอบไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เลขคลื่น 987 cm^{-1} (Berzina and Borodajenko, 2012; Meejo *et al.*, 2006; Paschlis *et al.*, 1996) โดยค่าการดูดกลืนแสงที่พบดังกล่าวมาจากการทดลองวิจัยครั้งนี้ แต่ไม่พบการดูดกลืนแสงดังกล่าวในตัวอย่างน้ำอ้อยควบคุม ทั้งนี้ที่ pH ในน้ำอ้อยแตกต่างกัน เป็นผลให้สัดส่วนของแคลเซียมต่อฟอสเฟต (Ca/P ratio) และชนิดไอออนคาร์บอเนตและฟอสเฟตแตกต่างกัน ทำให้เกิดสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมฟอสเฟตต่างชนิดกัน (Seliem *et al.*, 2016; Doherty and Rackermann, 2008)

สรุปผลการวิจัย

การเติมโพลิเมอร์แซคคาเรทที่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลงในน้ำอ้อยนอกจากช่วยปรับค่า pH ให้สูงขึ้น ยังช่วยให้เกิดการรวมตัวของสิ่งเจือปนที่ไม่ใช่น้ำตาลที่ละลายอยู่

ในน้ำอ้อย โดยเฉพาะทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตเกิดเป็นแคลเซียมฟอสเฟตชนิดต่าง ๆ ซึ่งประจุรวมที่เป็นบวกจะช่วยดึงเอาสิ่งเจือปนที่เป็นประจุลบมารวมตัวกัน ทำให้ตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น และตะกอนน้ำอ้อยขนาดเล็กลดจำนวนลง และเมื่อ pH มากขึ้นสามารถกำจัดฟอสเฟตได้เพิ่มขึ้น โดยการทดลองนี้พบว่าตั้งแต่ pH 7.5 สามารถกำจัดได้ตามเกณฑ์ คือ 90% ส่งผลให้ความขุ่นลดลง โดยพบว่าที่ pH 7.5-8.5 ลดความขุ่นได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้น pH 7.5 เป็นค่าที่เหมาะสมในการปรับปริมาณการเติมไลม์แชคคาเรทในน้ำอ้อยที่มีปริมาณฟอสเฟต 321 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เพราะกำจัดฟอสเฟตได้สูงและน้ำอ้อยมีความขุ่นลดลง หากไม่กำจัดฟอสเฟตออกไปให้ได้มากที่สุดในช่วงขั้นตอนการผสมน้ำอ้อยกับไลม์แชคคาเรท ปริมาณที่หลงเหลือที่ติดไปกับน้ำอ้อยจะส่งผลต่อคุณภาพความบริสุทธิ์ของน้ำอ้อย และเกิดสะสมตะกอนที่พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของหม้อต้มชุดที่ 1 และ 2 ได้

ข้อเสนอแนะ

ลักษณะทางเคมีของน้ำอ้อยที่มีสิ่งเจือปนที่ไม่ใช่น้ำตาล มักจะมีความหลากหลายและพบได้ในปริมาณที่แตกต่างกัน เนื่องมาจากแหล่งที่มาของวัตถุดิบหลักอ้อย ซึ่งเป็นที่น่าสนใจศึกษาต่อไปว่า หากปริมาณฟอสเฟตที่มีอยู่ในน้ำอ้อยตามธรรมชาติ และสิ่งที่เจือปนในน้ำอ้อยแตกต่างกัน จะส่งผลต่อการรวมตัวตกตะกอนในน้ำอ้อยอย่างไรในระหว่างเกิดการเชื่อมโยงโครงข่ายแคลเซียมฟอสเฟต (Calcium phosphate bridging) และสารอื่น ๆ ในกระบวนการเตรียมน้ำอ้อยผสมปูนขาวก่อนที่จะเติมสารเร่งการตกตะกอน เพื่อให้สามารถปรับปรุงและพัฒนาการเกิดตะกอน ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพกระบวนการทำใสน้ำอ้อยได้ดียิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์นวัตกรรมและการวิจัยมิตรผล สายงานประกันคุณภาพและวิศวกรรมกลุ่มงานโรงงาน กลุ่มน้ำตาลมิตรผล และรองศาสตราจารย์ ดร. อนุรักษ์ นิตยพัทธ์ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มา ณ โอกาสนี้ และผลงานการวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา (ปริญญาโท) โดยได้รับทุนสนับสนุนการศึกษาภายใต้โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) (รหัสทุน MSD60I0060) ดูแลโดยสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

เอกสารอ้างอิง

- Berzina, C.L. and N. Borodajenko. 2012. **Infrared Spectroscopy – Materials Science, Engineering and Technology.** London: IntechOpen. 526 p.
- Chen, J.C.P. and C.C. Chou. 1993. **Cane Sugar Handbook: A Manual for Cane Sugar Manufacturers and Their Chemists.** New York: John Wiley & Sons, Inc. 834 p.
- Clarke, D.W., C. Mohtadi and P.S. Tuffs. 1987. Generalized predictive control-Part I: The basic algorithm. **Automatica** 23(2): 137-148.
- Crees, O.L., E. Whayman and A.L. Willersdorf. 1977. Further studies on flocculation. **Proc Queensland Soc Sugar Cane Tech** 44: 225-232.

- Doherty, W.O.S. and L.A. Edye. 1999. An Overview on the Chemistry of Clarification of Cane Sugar Juice. pp. 381-388. *In Proceedings -Australian Society of Sugar Cane Technologists*. Queensland: Watson Ferguson and Company.
- Doherty, W.O.S., J. Greenwood, D. Pilaski and P.G. Wright. 2002. The Effect of Liming Conditions in Juice Clarification. pp. 443-451. *In Proceedings-Australian Society of Sugar Cane Technologists*. Queensland: PK Editorial Services Pty Ltd.
- Doherty, W.O.S. and D.W. Rackemann. 2008. Stability of sugarcane juice a preliminary assessment of the colorimetric method used for phosphate analysis. *Sugar Industry* 133(1): 24-30.
- _____. 2009. Some aspects of calcium phosphate chemistry in sugarcane clarification. *International Sugar Journal* 111(1327): 448-455.
- Doherty, W.O.S. 2011. Improved sugar cane juice clarification by understanding calcium oxide-phosphate-sucrose systems. *J. Agric. Food Chem.* 59: 1829-1836.
- Eggleston, G. and J.R. Vercellotti. 2000. Degradation of sucrose, glucose and fructose in concentrated aqueous solutions under constant pH conditions at elevated temperature. *Journal of Carbohydrate Chemistry* 19(9): 1305-1318.
- Eggleston, G., A. Monge and A. Pepperman. 2002. Preheating and incubation of cane juice prior to liming: a comparison of intermediate and cold lime clarification. *J. Agric. Food Chem.* 50: 484-490.
- Eggleston, G., A. Monge. 2005. Optimization of sugarcane factory application of commercial dextranases. *Process Biochemistry* 40(5): 1881-1894.
- Eggleston, G., D. Legendre, K. Pontif and J. Goober. 2012. Improved control of sucrose losses and clarified juice turbidity with lime saccharide in hot lime clarification of sugarcane juice and other comparisons with milk of lime. *Journal of Food Processing and Preservation* 38: 311-325.
- Greenwood J., T. Rainey and W.O.S. Doherty. 2007. Light scattering study on the size and structure of calcium phosphate/hydroxyapatite flocs formed in sugar solutions. *Journal of Colloid and Interface Science* 306(1): 66-71.
- Honig, P. 1963. *Principles of Sugar Technology*. Amsterdam-London -New York: Elsevier Publishing Company. 767 p.
- Istifanus, A.B. 2015. *Prediction of Sugar Yield from Sugar Cane Using Process Modeling*. Enugu: Department of Agricultural and Bioresource engineering, Faculty of Engineering, University of Nigeria. 17 p.

- Johnsson, M.S.A and G.H. Nancollas. 1992.
The role of brushite and octacalcium phosphate in apatite formation. **Critical Reviews in Oral Biology and Medicine** 3(1/2): 61-82.
- Karampas, I.A. and C.G. Kontoyannis. 2013.
Characterization of calcium phosphates mixtures. **Vibrational Spectroscopy** 64: 126-133.
- Khotaveevattana, S. 2003. **Sugar Technology**. Bangkok: Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University. 520 p. [in Thai]
- Meejoo, S., W. Maneeprakorn and P. Winotai. 2006. Phase and thermal stability of nanocrystalline hydroxyapatite prepared via microwave heating. **Thermochimica Acta** 447: 115-120.
- Paschalis, E.P., E. DiCarlo, F. Betts, P. Sherman, R. Mendelsohn and A.L. Boskey. 1996. FTIR microspectroscopic analysis of human osteonal bone. **Calcif Tissue Int.** 59: 480-487.
- Phakam, B., L. Moghaddam, M. Wellard and W.O.S. Doherty. 2018. The effect of cleaning agents on the structural features of heat exchanger deposits from sugar factories. **Journal of Food Engineering** 226: 65-72.
- Poel, P.W.V.D., H. Schiweck. and T. Schwartz. 1998. **Sugar Technology Beet and Cane Sugar Manufacture**. Berlin: Verlag Dr Albert Bartens KG. 1118 p.
- Rein, P. 2007. **Cane Sugar Engineering**. Berlin: Bartens. 768 p.
- Seliem, M.K., K. Sridhar and K.R. Mostafa. 2016. Phosphate removal from solution by composite of MCM-41 silica with rice husk: kinetic and equilibrium studies. **Journal Microporous and Mesoporous Materials** 224: 51-57.
- Simpson, R. 1996. The chemistry of clarification. **Proc. S. Afr. Sug. Technol. Ass.** 70: 267-271.
- Steindl, R.J. 2001. Minimizing sugar losses with in-line saccharate mixing. **Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol** 24: 360-362.
- Thai, C.C.D., H. Bakir and W. Doherty. 2012. Insights to the clarification of sugar cane juice expressed from sugar cane stalk and trash. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 60(11): 2916-2923.
- Thai, C.C.D., L. Moghaddam and W. Doherty. 2012. Characterization of sugarcane juice particles that influence the clarification process. pp. 324-332. *In Proceedings of the 34th Annual Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists. Curran Associates, Inc.* Mackay: Australian Society of Sugar Cane Technologists (ASSCT).
- _____. 2015. Calcium phosphate flocs and the clarification of sugar cane juice from whole of crop harvesting. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 63(5): 1573-1581.

วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร 40(2): 103-116

Zaeib, M.G. 2004. **The Use of Locally
Produced Lime for Clarification of
Juice in the Cane Sugar Industry.**
Master Thesis. University of Al Baath.
136 p.