

การผลิตน้ำสับประดเข้มข้นด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งแบบก้าวหน้า

Progressive Freeze - Concentration of Pineapple Juice Concentrate

ประภาศรี เทพรักษา

ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ปทุมธานี 12121

ชิตพงศ์ ประดิษฐ์สุวรรณ

ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

การทำของเหลวให้เข้มข้นด้วยการแช่เยือกแข็งแบบก้าวหน้า เป็นวิธีการใหม่ที่มีผลึกน้ำแข็งก้อนใหญ่เพียงก้อนเดียวเกิดขึ้นในระบบ จึงทำให้การแยกผลึกน้ำแข็งออกจากระบบง่ายขึ้น งานวิจัยนี้ได้นำวิธีการนี้มาประยุกต์ใช้ในการผลิตน้ำสับประดเข้มข้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตด้วยการแปรความเร็วของใบพัดกวน 3 ระดับคือ 300, 600 และ 1000 รอบต่อนาที และอัตราเร็วในการเกิดผลึกน้ำแข็ง 3 ระดับคือ 0.6, 1.4 และ 2.0 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ประเมินผลจากปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ค่าสัมประสิทธิ์การแยกเฟส (K) และอัตราการเกิดสีน้ำตาล ผลการศึกษาพบว่า ความเร็วของใบพัดกวน 600 รอบต่อนาที และอัตราเร็วในการเกิดผลึกน้ำแข็ง 1.4 เซนติเมตรต่อชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ผลิตกัณฑ์น้ำสับประดเข้มข้นมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้หลังการทำให้เข้มข้นสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแยกเฟส (K) ต่ำหรือมีการสูญเสียเนื้อสารไปกับผลึกน้ำแข็งที่แยกออกได้น้อยที่สุด และอัตราการเกิดสีน้ำตาลในน้ำสับประดเข้มข้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

คำสำคัญ: น้ำสับประดเข้มข้น การแยกเฟส การทำให้เข้มข้น การแช่เยือกแข็งแบบก้าวหน้า

Abstract

Progressive freeze-concentration is the newest method of liquid concentration, which is an only large ice crystal occurred, too easy to separate from the system. This research applied the procedure to produce the pineapple juice concentrate. The optimum condition of the process was studied. The variables consisted of the paddle rotation rate (300, 600, 1000 rpm) and the ice crystal growth rate (0.6, 1.4, 2.0 cm/hr). The final product was evaluated by total soluble solid, the effective partition constant (K), and the browning rate. The result was found that the paddle rotation rate and the ice crystal growth rate at 600 rpm and 1.4cm/hr, respectively, was the

best suitable condition for the Progressive freeze - concentration of pineapple juice concentrate. The concentrate product was high total soluble solid, low *K*-value or a little loss of solute inside the ice crystal, and slight increasing of the browning rate.

Keywords: pineapple juice-concentrate, phase separation, concentration, progressive freezing

1. บทนำ

สับปะรดเป็นพืชเศรษฐกิจของไทย ที่ปลูกกันอย่างแพร่หลายทางภาคใต้ และภาคตะวันออก โดยสามารถเพาะปลูกได้ตลอดปี ทำให้มีผลผลิตสดเข้าสู่ตลาดเป็นจำนวนมาก การแปรรูปสับปะรดเป็นวิธีที่จะช่วยขยายตลาดการบริโภค และเพิ่มมูลค่าให้กับวัตถุดิบสดได้ ในปี 2544 ประเทศไทยส่งออกน้ำสับปะรดเข้มข้น 105,311 ตัน คิดเป็นมูลค่า 2,965.69 ล้านบาท ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปี 2540 ร้อยละ 2.58 สำหรับสาเหตุที่ทำให้สับปะรดระบองและน้ำสับปะรดเข้มข้นของไทยมีชื่อเสียง และเป็นที่นิยมในต่างประเทศ เนื่องจากสับปะรดของไทยมีคุณภาพดี รสชาติอร่อย นอกจากนี้สับปะรดที่ปลูกในประเทศไทยได้รับการรับรองว่าเป็นพืชหนึ่งใน 159 ชนิด ที่ไม่ได้รับการตัดต่อสารพันธุกรรม (Non GMOs) และกรมวิชาการเกษตรสามารถออกประกาศการตรวจและออกหนังสือรับรองสินค้าที่ไปจำหน่ายในต่างประเทศได้ ดังนั้นประเทศไทยจึงมีคู่แข่งทางการขายตลาดการส่งออกสับปะรดแปรรูปได้อีกมาก [1]

การทำน้ำผลไม้เข้มข้นด้วยวิธีแช่เยือกแข็งแบบดั้งเดิม เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากน้ำผลไม้โดยอาศัยหลักการ solid-liquid phase equilibrium ซึ่งเป็นการทำให้น้ำที่เป็นตัวทำละลายขององค์ประกอบส่วนใหญ่ในน้ำผลไม้เปลี่ยนสถานะกลายเป็นผลึกน้ำแข็งเล็กๆ กระจายอยู่ในของเหลว และเมื่อแยกน้ำแข็งออกจากระบบ

ของเหลวที่เหลือจะเข้มข้นขึ้น และเนื่องจากการทำให้เข้มข้นภายใต้ภาวะอุณหภูมิค่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีคุณค่าทางโภชนาการและกลิ่นรสที่ดี[2] แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ได้รับความนิยมน้อยกว่าการทำให้เข้มข้นด้วยวิธีการต้มระเหยแบบสุญญากาศ เนื่องจากยากต่อการแยกผลึกน้ำแข็งเล็กๆ ออกจากน้ำผลไม้ที่เข้มข้น และการสูญเสียตัวอย่างไปกับผลึกน้ำแข็งที่แยกออกไป [3]

ในปี ค.ศ. 1997 ได้มีการพัฒนาระบบการทำให้เข้มข้นด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งจากแบบดั้งเดิมไปเป็นระบบใหม่คือ Progressive Freeze-Concentration ให้สามารถแยกผลึกน้ำแข็งออกจากระบบได้ง่ายขึ้น และลดการสูญเสียตัวอย่างไปกับส่วนน้ำแข็งโดยอาศัยหลักการสำคัญ 2 ประการคือ (ก) การแช่เยือกแข็งระบบอย่างช้าๆ เพียงด้านเดียว เพื่อให้เกิดการพอกขยายผลึกน้ำแข็งอย่างต่อเนื่อง ในทิศทางเดียว ทำให้ได้ผลึกน้ำแข็งก้อนใหญ่เพียงก้อนเดียว ระบบจึงแยกเป็น 2 เฟส คือ ผลึกน้ำแข็งกับของเหลวที่เข้มข้น (ข) การกำจัดโมเลกุลของตัวถูกละลาย ออกจากผิวหน้าหรือรอยต่อของน้ำแข็งกับของเหลว โดยการกวนของเหลวบริเวณผิวน้ำแข็ง [4] ต่อมาในปี ค.ศ. 1998 Miyawaki และคณะ ได้ใช้ปรากฏการณ์ Concentration polarization มาใช้ในการอธิบายประสิทธิภาพการทำให้เข้มข้นด้วยวิธี Progressive Freeze-Concentration ซึ่งขึ้นกับความสัมพัทธ์ของปัจจัยต่างๆ ของระบบกล่าวคือ การ

เพิ่มอัตราการกวนของเหลวที่ผิวหน้า น้ำแข็ง และการลดอัตราการขยายตัวของผลึกน้ำแข็ง จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น [5] ในปี ค.ศ.1999 ได้มีผู้ทดลองผลิตน้ำมะเขือเทศเข้มข้นด้วยวิธี Progressive Freeze-Concentration โดยพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณค่าทางการบริโภคทางด้านกลิ่นรส และสีที่ดี นอกจากนี้การเพิ่มอัตราการกวนของเหลวที่ผิวหน้า น้ำแข็ง และการลดอัตราการขยายตัวของผลึกน้ำแข็ง จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้นสามารถลดการสูญเสียเนื้อมะเขือเทศไปกับส่วนน้ำแข็งได้ [6]

อย่างไรก็ตามยังไม่มียางานวิจัยใดที่นำวิธีการดังกล่าวข้างต้นมาใช้ในการผลิตน้ำสับประรดเข้มข้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ริเริ่มขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการผลิตน้ำสับประรดเข้มข้นด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งแบบก้ำวหน้า เพื่อให้ได้ซึ่งข้อมูลสำหรับใช้เป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการผลิตน้ำสับประรดเข้มข้นให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วัสดุุดิบ

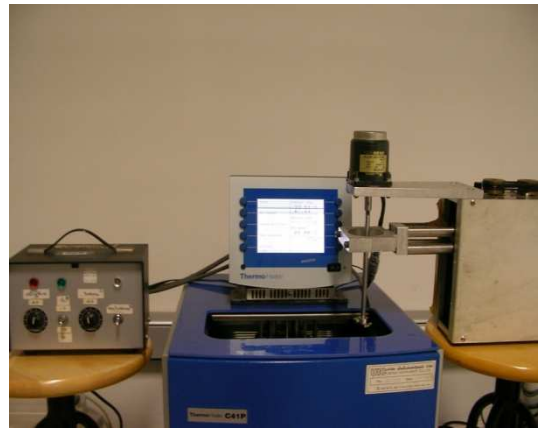
สับประรดพันธุ์ศรีราชา น้ำหนักผลประมาณ 2.5 กิโลกรัม ความสุกมากกว่าร้อยละ 50 โดยพิจารณาจากสีเปลือกมีสีเหลืองอมส้มทางด้านล่างของผลมีสัดส่วนประมาณครึ่งผล [7]

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องคั้นน้ำผลไม้แยกกาก ยี่ห้อ

Moulinex รุ่น 753

- ชุดอุปกรณ์ผลิตน้ำสับประรดเข้มข้นด้วยวิธีแช่เยือกแข็งแบบก้ำวหน้า แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์ผลิตน้ำสับประรดเข้มข้นด้วยวิธีแช่เยือกแข็งแบบก้ำวหน้า

ชุดอุปกรณ์ผลิตน้ำสับประรดเข้มข้นด้วยวิธีแช่เยือกแข็งแบบก้ำวหน้า ตามรูปที่ 1 ประกอบด้วย 3 ส่วนดังนี้

- กระจกทดลอง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร พื้นผิวตัวกระจกทำด้วยอะคริลิกใสหนา 0.2 เซนติเมตรฐานของกระจกทำด้วยสแตนเลสหนา 1.3 เซนติเมตร เพื่อให้การถ่ายโอนความร้อนของระบบเกิดขึ้นในทิศทางเดียวคือ จากทางด้านล่างของกระจก

- มอเตอร์ควบคุมการหมุนของใบพัดกวน และการขับเคลื่อนกระจกตัวอย่างขึ้นและลง โดยสามารถแยกการปรับความเร็วรอบใบพัดกวนได้ตั้งแต่ 100 -1,500 รอบต่อนาที และความเร็วในการขับเคลื่อนกระจกตัวอย่างได้ตั้งแต่ 0.5 - 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ลักษณะมอเตอร์ควบคุมและใบพัดกวน แสดงดังรูปที่ 2

- อ่างควบคุมอุณหภูมิต้วยี่ห้อ Thermo Haaker ภายในบรรจุสารทำความเย็น อุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส สารทำความเย็นประกอบด้วย

สารละลายผสมระหว่าง สารเอทิลีนไกลคอล 2 ส่วน ต่อน้ำกลั่น 1 ส่วน



รูปที่ 2 มอเตอร์ควบคุม และ ไขพัดกว

- อุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

- Hand Refractometer ยี่ห้อ Atago รุ่น N-1E
- เครื่องวิเคราะห์ค่าสี ยี่ห้อ Minolta รุ่น CR

300

- เครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Spectronic 20

2.3 วิธีการทดลอง

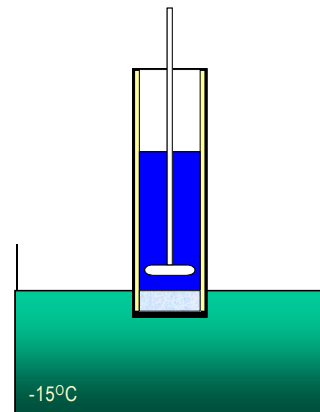
ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

1) การเตรียมน้ำสับปะรด นำสับปะรดพันธุ์ศรีราชาที่มีความสุกมากกว่าร้อยละ 50 มาปอกเปลือก คั้นน้ำด้วยเครื่องคั้นน้ำแบบแยกกาก แล้วกรองด้วยผ้าขาวบางผ่านเครื่องบีบสุญญากาศ จากนั้นนำน้ำสับปะรด แช่เย็นที่อุณหภูมิ 0-1 องศาเซลเซียส

2) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตน้ำสับปะรดเข้มข้นด้วยวิธีแช่เยือกแข็งแบบก้าวหน้าใส่น้ำกลั่น 3 มิลลิลิตรในกระบอกทดลอง เปลี่ยนให้น้ำกลั่นกระจายให้ทั่วภายในฐานกระบอกตัวอย่าง แล้วนำกระบอกแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิซึ่งบรรจุสารละลายเอทิลีนไกลคอลเป็นสารทำความเย็นที่

อุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส เพื่อให้ น้ำกลั่นในกระบอกแข็งตัวเป็นผลึกน้ำแข็ง (ice lining) แล้วจึงนำน้ำสับปะรดที่เตรียมได้ขึ้นต้น 120 มิลลิลิตร เทลงในกระบอกทดลองที่มี ice lining อยู่ทั่วภายในฐานสารทำความเย็นอยู่ที่ระนาบเดียวกับผิวหน้าของ ice lining และติดตั้งไขพัดกววน้ำสับปะรดโดยให้ระดับไขพัดอยู่ชิดผิวหน้า ice lining ดังแสดงในรูปที่ 3

จากนั้นเริ่มทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำให้เข้มข้นด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งแบบก้าวหน้า ทั้งนี้กำหนดคิให้ระยะเวลาทำให้เข้มข้นนาน 3 ชั่วโมง แปรความเร็วของไขพัดกววน 3 ระดับคือ 200, 600 และ 1000 รอบต่อนาที และแปรอัตราเร็วในการขับเคลื่อนกระบอกตัวอย่างลงในสารทำความเย็นหรืออัตราเร็วในการเกิดผลึกน้ำแข็ง 3 ระดับคือ 0.6, 1.4 และ 2.0 เซนติเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 3 การจัดวางระดับของไขพัดกววนและกระบอกทดลองในอ่างควบคุมอุณหภูมิ

3) การประเมินผลตัวอย่าง ประเมินผลคุณภาพน้ำสับปะรดก่อน และหลังการทำให้เข้มข้นทั้งในส่วนของน้ำสับปะรดเข้มข้น และส่วนของน้ำแข็งที่แยกได้จาก ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ [6] ค่าสัมประสิทธิ์การแยกเฟส (K) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำในส่วนผลึกน้ำแข็งต่อ

ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำในส่วนน้ำสับประรดเข้มข้น [5] และอัตราการเกิดสีน้ำตาล โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร [8]

4) การวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล วางแผนการทดลองแบบ Symmetric Factorial Experiment ทดลอง 2 ชั้น วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS for Window

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการแปรอัตราเร็วในการเกิดผลึกน้ำแข็งและการแปรอัตราเร็วการกวนตัวอย่าง ผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของน้ำสับประรดก่อนและหลังทำให้เข้มข้น แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของน้ำสับประรดก่อนและหลังทำให้เข้มข้นด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งแบบกัวหน้า

อัตราเร็วในการเกิดผลึก น้ำแข็ง (เซนติเมตรต่อชั่วโมง)	อัตราเร็วการกวน (รอบต่อนาที)	ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ \pm ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (องศาบริกซ์)	
		ก่อนทำให้เข้มข้น	หลังทำให้เข้มข้น
0.6	200	11.00 ^a \pm 0.00	14.00 ^a \pm 0.00
	600	13.00 ^b \pm 0.70	17.50 ^{bc} \pm 0.71
	1,000	13.00 ^b \pm 0.70	15.50 ^{ab} \pm 0.71
1.4	200	11.00 ^a \pm 0.00	15.50 ^{ab} \pm 0.00
	600	11.00 ^a \pm 0.00	20.00 ^d \pm 0.71
	1,000	13.00 ^b \pm 0.70	16.0 ^{ab} \pm 1.41
2.0	200	13.00 ^b \pm 0.70	19.00 ^{cd} \pm 0.71
	600	11.00 ^a \pm 0.00	19.00 ^d \pm 1.41
	1,000	13.00 ^b \pm 0.70	21.00 ^d \pm 1.41

a, b, c,... ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 1 พบว่า ปัจจัยร่วมของ 2 ปัจจัยที่ศึกษาในการทดลองนี้คือ อัตราเร็วในการเกิดผลึกน้ำแข็ง และอัตราเร็วในการกวน มีผลต่อปริมาณ

ของแข็งที่ละลายน้ำได้ของน้ำสับประรดก่อนและหลังทำให้เข้มข้นด้วยวิธีแช่เยือกแข็งแบบกัวหน้า อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

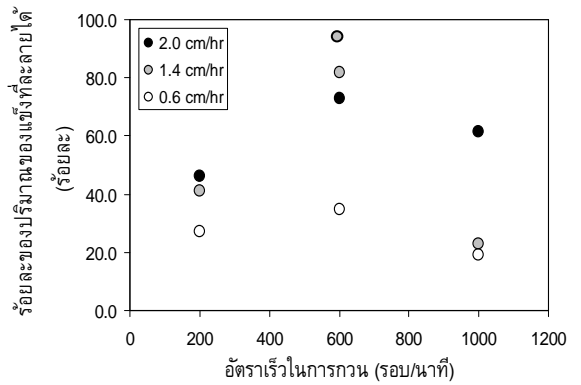
แต่เนื่องจากในการทดลองนี้ ตัวอย่างน้ำ สับปะรดเริ่มต้นมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ใน ปริมาณที่แตกต่างกัน($p \leq 0.05$) ดังจะเห็นได้จากผล การทดลองในตารางที่ 1 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ ได้ก่อนการทำให้เข้มข้น ในแต่ละสภาวะมีค่าเท่ากับ 11.00 และ 13.00 องศาบริกซ์ ดังนั้นการประเมินผล ของการทดลองในขั้นตอนนี้จึงพิจารณาจาก

- 1) การเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งที่ละลาย น้ำได้ โดยคำนวณเป็นร้อยละของปริมาณของแข็งที่ ละลายน้ำได้ที่เพิ่มขึ้นภายหลังการทำให้เข้มข้น
- 2) ความสัมพันธ์ของปริมาณของแข็งที่ ละลายน้ำได้ที่สูญเสียไปกับส่วนของผลึกน้ำแข็งที่ แยกออก เปรียบเทียบกับที่คงเหลือในส่วน น้ำ สับปะรดเข้มข้น

3) ค่าสัมประสิทธิ์การแยกเฟส(K) ของแข็ง (ผลึกน้ำแข็ง) และของเหลว(น้ำสับปะรดเข้มข้น)

ผลการคำนวณร้อยละของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ ได้ที่เพิ่มขึ้นภายหลังการทำให้เข้มข้นดังรูปที่ 1 พบว่า สภาวะการทดลองโดยการแปรอัตราเร็วในการเกิด ผลึกน้ำแข็ง และอัตราเร็วในการกวน มีผลต่อร้อยละ ของ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ที่เพิ่มขึ้นหลังทำ ให้เข้มข้น โดยการกวนตัวอย่างที่อัตราเร็ว 600 รอบ ต่อนาที ที่ทุกระดับของอัตราเร็วในการเกิดผลึก น้ำแข็ง ทำให้ร้อยละของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ ได้ที่เพิ่มขึ้นภายหลังการทำให้เข้มข้น สูงกว่า อัตราเร็วในการกวน 200 รอบต่อนาที ทั้งนี้เนื่องจาก การเพิ่มอัตราเร็วในการกวนตัวอย่างเป็นการช่วย กำจัดโมเลกุลของตัวถูกละลายออกจากผิวหน้าหรือ รอยต่อของน้ำแข็งกับของเหลว [4] ทำให้เกิดการพอก ขยายของผลึกน้ำแข็งได้ดีขึ้น น้ำสับปะรดจึงมีความ เข้มข้น หรือปริมาณของแข็งที่ละลายเพิ่มมากขึ้น จึง ทำให้โมเลกุลของน้ำในน้ำสับปะรดสามารถแพร่มา

พอกกับผิวหน้าน้ำแข็งหรือ ice lining ที่ทำหน้าที่เป็น ตัวล่อผลึก

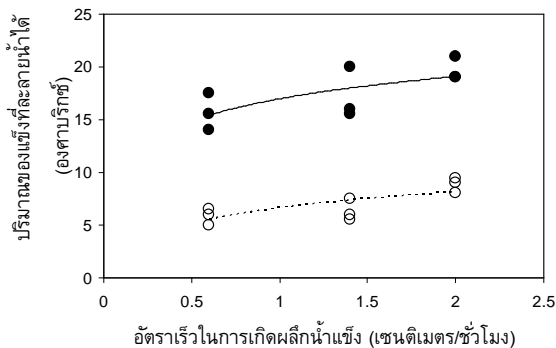


รูปที่ 4 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ที่เพิ่มขึ้นในน้ำ สับปะรด หลังการทำให้เข้มข้นเมื่อแปรอัตราเร็วใน การกวน และอัตราเร็วในการเกิดผลึกน้ำแข็งที่ 0.6 (○), 1.4 (◐) และ 2.0 (●) เซนติเมตรต่อชั่วโมง

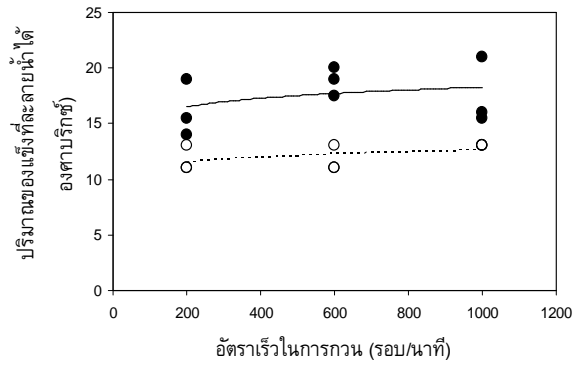
นอกจากนี้จากรูปที่ 4 ยังพบว่าการเพิ่มอัตรา การกวนจาก 600 เป็น 1,000 รอบต่อนาที ทำให้ร้อย ละของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ที่เพิ่มขึ้น ภายหลังการทำให้เข้มข้นลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการ กวนที่ความเร็วสูงมากทำให้ของเหลวเกิดฟองอากาศ จำนวนมาก ซึ่งฟองอากาศนี้ไปบดบังการแพร่ของ โมเลกุลน้ำในน้ำสับปะรด มายังบริเวณผิวหน้าน้ำแข็ง เพื่อพอกขยายผลึกของน้ำแข็ง จึงทำให้ร้อยละของ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ภายหลังการทำให้ เข้มข้นที่อัตราการกวน 1,000 รอบต่อนาที เพิ่มขึ้นใน ระดับต่ำกว่าที่ อัตราการกวน 600 รอบต่อนาที

การศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณของแข็ง ที่ละลายน้ำได้ที่สูญเสียไปกับส่วนของผลึกน้ำแข็งที่ แยกออก เปรียบเทียบกับที่คงเหลือในส่วน น้ำ สับปะรดเข้มข้น ให้ผลแสดงดังรูปที่ 5 และ 6 พบว่า อัตราการขยายตัวของผลึกน้ำแข็งของระบบเพิ่มขึ้น

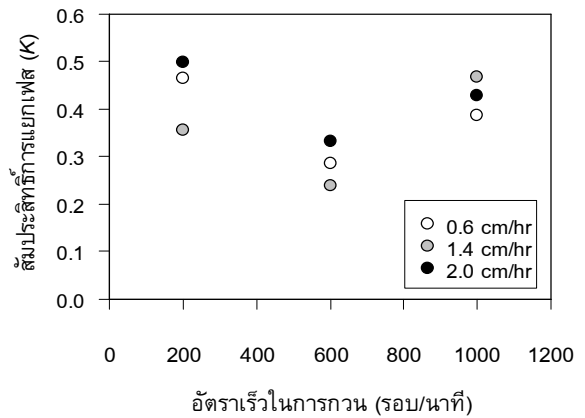
ส่งผลให้ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำจะสูญเสียไปกับ ส่วนของผลึกน้ำแข็งที่แยกออกได้มากขึ้น สอดคล้อง กับผลการศึกษาของ Theprugsa และ คณะ(2005) ซึ่ง ได้อธิบายสาเหตุไว้ว่า การขยายตัวของผลึกน้ำแข็ง อย่างรวดเร็วของกระบวนการแช่เยือกแข็งแบบ ก้าวหน้า ทำให้ตัวถูกละลายบริเวณผิวหน้าน้ำแข็งไม่ สามารถแพร่ออกจากผิวหน้าผลึกน้ำแข็งไปสู่ bulk solution ได้ทัน ตัวถูกละลายจำนวนมากจึงถูกตรึงอยู่ ในผลึกน้ำแข็งที่พอกขยายตัวอย่างรวดเร็วตลอดกระบวน การ ทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำในส่วน ผลึกน้ำแข็งที่แยกออกหลังสิ้นสุดกระบวนการทำให้ เข้มข้นมีปริมาณสูง หรือมีการสูญเสียเนื้อสารไปกับ ส่วนของผลึกน้ำแข็งมาก[9] ซึ่งการสูญเสียเนื้อสาร ไปกับส่วนน้ำแข็งที่แยกออกจากระบบ สามารถ ประเมินได้จากค่าสัมประสิทธิ์การแยกเฟส ส่วน ของแข็งหรือผลึกน้ำแข็ง และส่วนของเหลวหรือน้ำ สับปะรดเข้มข้น[10] ผลการคำนวณ แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 5 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้หลังทำให้ เข้มข้นในผลึกน้ำแข็ง (○) และน้ำสับปะรดเข้มข้น (●) เมื่อแปรอัตราการเกิดผลึกน้ำแข็ง



รูปที่ 6 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้หลังทำให้ เข้มข้นในผลึกน้ำแข็ง (○) และน้ำสับปะรดเข้มข้น (●) เมื่อแปรอัตราการในการกวน



รูปที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์การแยกเฟส (K) ของ ผลึกน้ำแข็งและน้ำสับปะรดเข้มข้น เมื่อแปร อัตราเร็วในการกวน และอัตราการในการเกิด ผลึกน้ำแข็งที่ 0.6 (○), 1.4 (◐) และ 2.0 (●) เซนติเมตรต่อชั่วโมง

ค่าสัมประสิทธิ์การแยกเฟส(K) ของแข็ง และของเหลว เป็นค่าที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพของ การทำให้เข้มข้นด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งแบบก้าวหน้า ซึ่งคำนวณได้จากสัดส่วนของปริมาณของแข็งที่ ละลายน้ำได้ในส่วนผลึกน้ำแข็ง ต่อ ปริมาณของแข็ง ที่ละลายน้ำได้ในส่วนของเหลวเข้มข้น ดังนั้น ค่า K

ที่มีค่าน้อยหมายถึง ระบบมีประสิทธิภาพในการแยกเฟสที่ดี หรือ มีการสูญเสียเนื้อสาร หรือตัวถูกละลายไปกับผลิตภัณฑ์น้ำแข็งที่แยกจากของเหลวเข้มข้นได้น้อย [5,10]

ผลการคำนวณของการทดลองนี้ตามรูปที่ 7 พบว่า สภาวะการทดลองโดยใช้อัตราเร็วในการกวน 600 รอบต่อนาที และอัตราเร็วการเกิดผลิตภัณฑ์น้ำแข็ง 1.4

เซนติเมตรต่อชั่วโมง ค่า K จะมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งหมายถึงที่สภาวะดังกล่าวนี้ มีปริมาณเนื้อสารสูญเสียไปในขั้นตอนการแยกผลิตภัณฑ์น้ำแข็งน้อยที่สุดสำหรับผลการตรวจวิเคราะห์อัตราการเกิดสื่อน้ำตาลของน้ำสับประรดก่อนและหลังทำให้เข้มข้นด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งแบบกึ่งน้ำ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราการเกิดสื่อน้ำตาลของน้ำสับประรดก่อนและหลังทำให้เข้มข้น ด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งแบบกึ่งน้ำ

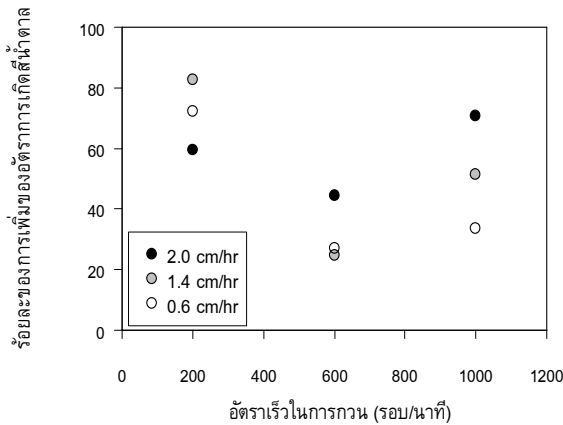
อัตราเร็วการเกิดผลิตภัณฑ์น้ำแข็ง (เซนติเมตรต่อชั่วโมง)	อัตราเร็วการกวน (รอบต่อนาที)	อัตราการเกิดสื่อน้ำตาล \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
		ก่อนทำให้เข้มข้น	หลังทำให้เข้มข้น
0.6	200	0.97 ^a \pm 0.04	1.67 ^{bc} \pm 0.01
	600	1.40 ^c \pm 0.01	1.78 ^c \pm 0.42
	1,000	1.40 ^c \pm 0.01	1.87 ^c \pm 0.01
1.4	200	0.97 ^a \pm 0.04	1.77 ^c \pm 0.01
	600	0.97 ^a \pm 0.04	1.21 ^a \pm 0.23
	1,000	1.13 ^b \pm 0.03	1.71 ^c \pm 0.03
2.0	200	1.13 ^b \pm 0.03	1.80 ^c \pm 0.03
	600	0.97 ^a \pm 0.04	1.40 ^{ab} \pm 0.28
	1,000	1.13 ^b \pm 0.03	1.93 ^c \pm 0.01

a, b, c, ... ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 2 พบว่า ปัจจัยร่วมของ 2 ปัจจัยที่ศึกษาในการทดลองนี้คือ อัตราเร็วในการเกิดผลิตภัณฑ์น้ำแข็ง ของน้ำสับประรด และอัตราเร็วในการกวน มีผลต่ออัตราการเกิดสื่อน้ำตาลของน้ำสับประรด ก่อนและหลังทำให้เข้มข้นด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งแบบกึ่งน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และเนื่องด้วย

ตัวอย่างน้ำสับประรดเริ่มต้นมีอัตราการเกิดสื่อน้ำตาลของน้ำสับประรดแตกต่างกัน ($p \leq 0.05$) ดัง จะเห็นได้จากผลการทดลองในตารางที่ 2 อัตราการเกิดสื่อน้ำตาลของน้ำสับประรดก่อนทำให้เข้มข้น มีค่าเท่ากับ 0.97, 1.13 และ 1.40

ดังนั้นการประเมินผลของการทดลองในขั้นตอนนี้จึงพิจารณาเช่นเดียวกับวิธีการประเมินผลปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ โดยประเมินจากปริมาณปริมาณร้อยละของการเพิ่มขึ้นของอัตราการเกิดสีน้ำตาล ในน้ำสับปะรดหลังการทำให้เข้มข้น ผลแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 อัตราการเกิดสีน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น ในน้ำสับปะรดหลังการทำให้เข้มข้น เมื่อแปรอัตราเร็วในการกวนและอัตราเร็วในการเกิดผลึกน้ำแข็งที่ 0.6 (○), 1.4 (○) และ 2.0 (●) เซนติเมตรต่อชั่วโมง

จากรูปที่ 8 พบว่า สภาวะการทดลองที่ใช้อัตราเร็วในการกวน 200 และ 1,000 รอบต่อนาทีทำให้น้ำสับปะรดมีอัตราการเกิดสีน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นหลังการทำให้เข้มข้น สูงกว่า การใช้อัตราเร็วในการกวน 600 รอบต่อนาที โดยที่อัตราเร็วในการกวน 600 รอบต่อนาที และอัตราการเกิดผลึกน้ำแข็ง 0.6 และ 1.4 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ทำให้ได้น้ำสับปะรดเข้มข้นที่มีร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการเกิดสีน้ำตาลต่ำที่สุด

4. สรุปผลการทดลอง

สภาวะการทดลองโดยใช้อัตราเร็วในการกวน 600 รอบต่อนาที อัตราเร็วการเกิดผลึกน้ำแข็ง 1.4 เซนติเมตรต่อชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำน้ำสับปะรดให้เข้มข้นด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งแบบก้าวหน้าโดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณร้อยละของของแข็งที่ละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นหลังการทำให้เข้มข้นสูงที่สุด และร้อยละของอัตราการเกิดสีน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นหลังการทำให้เข้มข้นต่ำสุด นอกจากนี้ที่สภาวะดังกล่าวนี้เป็นสภาวะที่ระบบมีประสิทธิภาพในการแยกเฟสที่ดีที่สุด หรือมีการสูญเสียเนื้อสาร หรือตัวถูกละลายไปกับผลึกน้ำแข็งที่แยกจากของเหลวเข้มข้นได้น้อยที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่ให้ความอนุเคราะห์งบประมาณจากกองทุนวิจัยของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปีงบประมาณ 2549 เพื่อใช้เป็นทุนในการวิจัย

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์วรภัทร ลัคนทินวงศ์ ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องวัดสี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] รัชณี ศรีวัชรวัฒน์, สถานการณ์สับปะรดและผลิตภัณฑ์สับปะรด: การปรับตัวตามการค้าเสรีโลก, ใน <http://www.baccbank.com/information/pineapple.htm>, เข้าถึงเมื่อ 15 สิงหาคม 2547.

- [2] Braddock, R.J. and Marcy, J.E., Freeze Concentration of Pineapple Juice, J. Food Sci., Vol. 50 , pp.1636-1639, 1985.
- [3] Ramteke, R.S., Singh,N.I., Rekha, M.N. and Eipeson, W.E., Methods for Concentration of Fruit Juices: A Critical Evaluation, J. Food Sci. Technol., Vol. 30 , pp. 391-402, 1993.
- [4] Liu, L., Miyawaki, O. and Nakamura, K., Progressive Freeze-Concentration of Model Liquid Food, Food Sci.Technol. Int.Tokyo., Vol. 3 , pp. 348-352, 1997.
- [5] Miyawaki, O., Liu, L. and Nakamura, K., Effective Partition Constant of Solute between Ice and Liquid Phases in Progressive Freeze-Concentration, J. Food Sci., Vol. 63 , pp.756-758, 1998.
- [6] Liu, L., Miyawaki, O. and Hayakawa, K., Progressive Freeze-Concentration of Tomato Juice, Food Sci.Technol. Res., Vol. 5 , pp. 108-112, 1999.
- [7] กรมวิชาการเกษตร, สับปะรด, ใน <http://www.doae.go.th/library/detail/Pineappl/pine03.htm>, เข้าถึงเมื่อ 18 มกราคม 2548.
- [8] Meydav, S., Sagay, I. and Kopelman, I.J., Browning Determination of Citrus Products, J. Agric. Food Chem., Vol. 25 , pp. 602-604, 1997.
- [9] Theprugsa, P., Pradistsuwanna, P. and Miyawaki O., Progressive Freeze-concentration of Salt and Sugar Solutions, In Proceedings of the 2nd International Conference on Innovations in Food Processing Technology and Engineering, AIT, Bangkok, pp. 699-705, 2005.
- [10] Pradistsuwanna, P., Theprugsa, P. and Miyawaki O., Measurement of Limiting Partition Coefficient in Progressive Freeze-Concentration, Food Sci.Technol. Res., Vol. 9, pp. 391-402, 2003.