

ผลกระทบของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อการประสิทธิภาพในการล้างตะกรัน ที่เกิดจากการพาสเจอร์ไร้น้ำกะทิแบบกะ

ภณิดา ช้ายขวัญ^{*1)} ณัฐพร จำวรรณ²⁾ พิสรุค ถึงเสียบญวน³⁾ วรณี แผงจันทิก⁴⁾ หาญพล พึ่งรัศมี⁵⁾ และ ไพรัช อุดุภรัตน์⁶⁾

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่อประสิทธิภาพในการล้างตะกรันที่เกิดจากการพาสเจอร์ไร้น้ำกะทิแบบกะ ตะกรันจำลองถูกนำมาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ค่า pH 7-12 พบว่าอัตราเร็วของการพองตัว และอัตราการพองตัวสูงสุดของตะกรันกะทิเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นในช่วง pH < 10 และที่ค่า pH > 10 พบว่าทั้งอัตราเร็วของการพองตัว และอัตราการพองตัวสูงสุดของตะกรันกะทิเพิ่มสูงขึ้นอย่าง มีนัยยะสำคัญ ซึ่งลักษณะเช่นนี้มีรายงานพบในการศึกษาตะกรันที่เกิดจากการพาสเจอร์ไร้นม การศึกษาหาแรงที่ใช้ในการชะล้างตะกรันกะทินั้นใช้ตะกรันกะทิภายใต้เงื่อนไข 3 กรณี คือ (1) ไม่มีการแช่ตะกรัน (2) แช่ตะกรันในน้ำกลั่น (pH 7) และ (3) แช่ตะกรันในสารละลาย NaOH (pH 12) ซึ่งเป็นค่า pH ที่พบว่าตะกรันกะทิมีการพองตัวมากที่สุด จากการทดลองพบว่าการแช่ตะกรันส่งผลให้แรงที่ใช้ในการชะล้างตะกรันลดลง แต่แรงที่ใช้ไม่แตกต่างกันมาก และแรงที่ใช้ในการชะล้างตะกรันภายใต้ 3 เงื่อนไขนั้นอยู่ในช่วง 345-472 Pa

คำสำคัญ: ตะกรัน การล้าง น้ำกะทิ ฟลูอิดไดนามิกเกจ (Fluid dynamic gauging: FDG)

^{*1)} อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12120

อีเมลล์: psai khwan@engr.tu.ac.th

²⁾ นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12120

อีเมลล์: pangmkv_m@hotmail.com

³⁾ นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12120

อีเมลล์: pisanot13@hotmail.com

⁴⁾ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12120

อีเมลล์: pworanee@engr.tu.ac.th

⁵⁾ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12120

อีเมลล์: pharnpon@engr.tu.ac.th

⁶⁾ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12120

อีเมลล์: uphairat@engr.tu.ac.th

* Corresponding Author

The pH effects on cleaning of coconut milk deposits from batch pasteurizing process

Phanida Saikhwan^{*1)} Nattaporn Jumwan²⁾ Pisan Thungsiabyuan³⁾ woranee paengjuntuek⁴⁾ Harnpon Phungrassami⁵⁾ and Phairat Usubharatana⁶⁾

Abstract

In this paper, the effects of pH on the cleaning of a model coconut milk foulant found in batch pasteurization process were studied. The model coconut milk foulants were soaked in NaOH solution at pH range of 7-12. Swelling rate and swelling ratio increase slightly with pH at pH < 10 and increasing pH beyond pH 10 resulted in a significant rise of both swelling rate and swelling ratio. The pH effects observed here have been reported by literature in the case of milk foulants. Strength studies were performed on coconut milk foulants under 3 conditions: (i) no soaking, (ii) soaking in distilled water (pH 7) and soaking in NaOH solution (pH 12) where maximum swelling ratio was observed. It was found that soaking had weakened the strength of foulants but the effect was not significant. The shear stress observed to remove the foulants under the 3 conditions were in the range of 345-472 Pa.

Keywords: Fouling Cleaning Coconut milk Fluid dynamic gauging (FDG)

^{*1)} Lecturer, Department of Chemical Engineering, Thammasat University, Pathumthani 12120,

E-mail: psaihwan@engr.tu.ac.th

²⁾ Undergraduate student, Department of Chemical Engineering, Thammasat University, Pathumthani 12120,

E-mail: pangmkv_m@hotmail.com

³⁾ Undergraduate student, Department of Chemical Engineering, Thammasat University, Pathumthani 12120,

E-mail: pisanot13@hotmail.com

⁴⁾ Lecturer, Department of Chemical Engineering, Thammasat University, Pathumthani 12120,

E-mail: pworanee@engr.tu.ac.th

⁵⁾ Lecturer, Department of Chemical Engineering, Thammasat University, Pathumthani 12120,

E-mail: pharnpon@engr.tu.ac.th

⁶⁾ Lecturer, Department of Chemical Engineering, Thammasat University, Pathumthani 12120,

E-mail: uphairat@engr.tu.ac.th

^{*} Corresponding Author

1. บทนำ

1.1 ตะกรัน: ปัญหาที่เกิดในการพาสเจอร์ไร้น้ำกะทิ

ในปัจจุบันความนิยมในการบริโภคกะทิในต่างประเทศมีมากขึ้น และวิถีชีวิตคนไทยมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้กะทิกระป๋องเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมสูงขึ้น ดังนั้นอุตสาหกรรมผลิตกะทิกระป๋องจึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับขยายกำลังการผลิตให้มากขึ้นเพื่อรองรับความต้องการที่เพิ่มขึ้น

กระบวนการผลิตกะทิกระป๋องเริ่มจากการคั้นน้ำกะทิจากเนื้อมะพร้าว การนำน้ำกะทิไปพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ 92-95 °C เป็นเวลา 5-20 นาที จากนั้นน้ำกะทิที่ถูกพาสเจอร์ไรส์แล้วจะถูกผ่านกระบวนการโฮโมจีไนส์เซอร์ (homogenizer) ซึ่งมักมีการใส่ อิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) ลงไป และขั้นตอนสุดท้าย คือการบรรจุน้ำกะทิลงกระป๋อง

ในขั้นตอนการพาสเจอร์ไรส์น้ำกะทินั้น มักพบปัญหาการก่อตัวของตะกรันตรงบริเวณพื้นผิวถึงที่ร้อน ตะกรันที่เกิดขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการนำความร้อนจากแหล่งความร้อนสู่น้ำกะทิลดลง นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งสะสมของแบคทีเรีย และจุลินทรีย์อื่นๆ ที่ก่อให้เกิดปัญหาตามมา

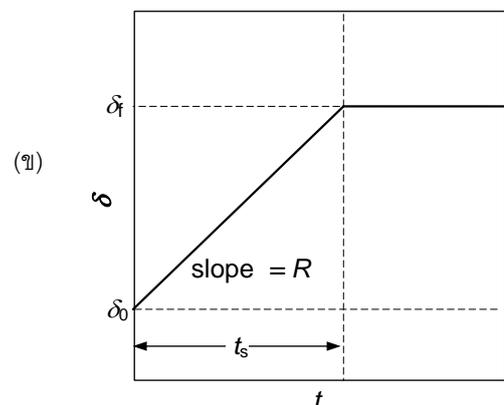
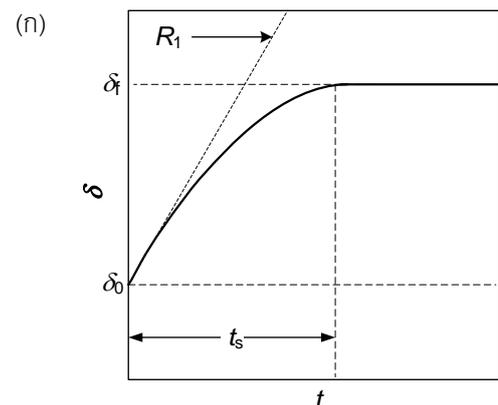
ตะกรันจากการพาสเจอร์ไรส์น้ำกะทิเป็นปัญหาที่ค่อนข้างใหม่ และมีงานวิจัยที่ศึกษาปัญหานี้ไม่มากนัก โดยส่วนใหญ่มักเป็นการศึกษาปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ และอัตราการไหล ที่ส่งผลต่ออัตราการก่อตัวของตะกรัน และมีรายงานว่า ตะกรันจากการพาสเจอร์ไรส์น้ำกะทิอาจเกิดจากการเปลี่ยนโครงสร้างของโปรตีนในน้ำกะทิ (Seow และ Gwee, 1997) เช่นเดียวกับการเกิดตะกรันจากการพาสเจอร์ไรส์นม (Burton, 1968)

1.2 การศึกษาการล้างตะกรันโดยใช้สารเคมี

การศึกษาการล้างตะกรันด้วยสารเคมี นิยมทำโดยการศึกษากองตัวของตะกรัน เพราะการพองตัวขึ้นตอนแรกที่เกิดขึ้นเมื่อตะกรันถูกแช่ในสารเคมี และมีความสำคัญ เพราะตะกรันที่พองตัวแล้วจะอ่อนตัวลง และอาจละลายในสารเคมี หรือถูกล้างออกด้วยวิธีเชิงกล เช่น การฉีดน้ำ

การศึกษากองตัวของตะกรันทำ โดยวัดความหนาของตะกรันที่ถูกแช่ในสารเคมี ที่ เวลาต่างๆ เทคนิคที่ใช้ในการวัดความหนาของตะกรัน เช่น วิธีชั่งน้ำหนัก (Mercade-Prieto และคณะ, 2007) การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลเลเซอร์สแกนนิ่ง (confocal laser scanning microscope) (Möhle และคณะ, 2007) และฟลูอิดไดนามิคเกจจิง (fluid dynamic gauging: FDG) (Saikhwon และคณะ, 2007)

1.2.1 วิธีชั่งน้ำหนัก ทำได้โดยการชั่งน้ำหนักของมวลของตะกรันที่ถูกแช่ในสารละลายที่เวลาต่างๆ มวลที่เพิ่มขึ้นหมายถึงการพองตัว ข้อดีของวิธีนี้คือทำได้ง่าย และใช้เพียงเครื่องชั่งน้ำหนัก ข้อเสียคือ ไม่ได้เป็นการวัดความหนาของตะกรันโดยตรง แต่เป็นการเทียบมวลที่เปลี่ยนไปเท่ากับความหนาที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของตะกรัน (δ) กับเวลาที่แช่ในสารเคมี (t) ที่พบบ่อยจากการทดลองศึกษาตะกรันนม: (ก) diffusional model และ (ข) linear model (ปรับจาก Alfrey และคณะ, 1996)

รูปที่ 1 เป็นกราฟแสดงความหนาของตะกักรันนมที่ถูกแขวนในสารเคมีวัดที่เวลาต่างๆ ซึ่งค่าที่ได้ จากกราฟ ได้แก่ อัตราเร็วของการพองตัวเริ่มต้น (R_1) และความหนาเมื่อตะกักรันพองตัวมากที่สุด (δ)

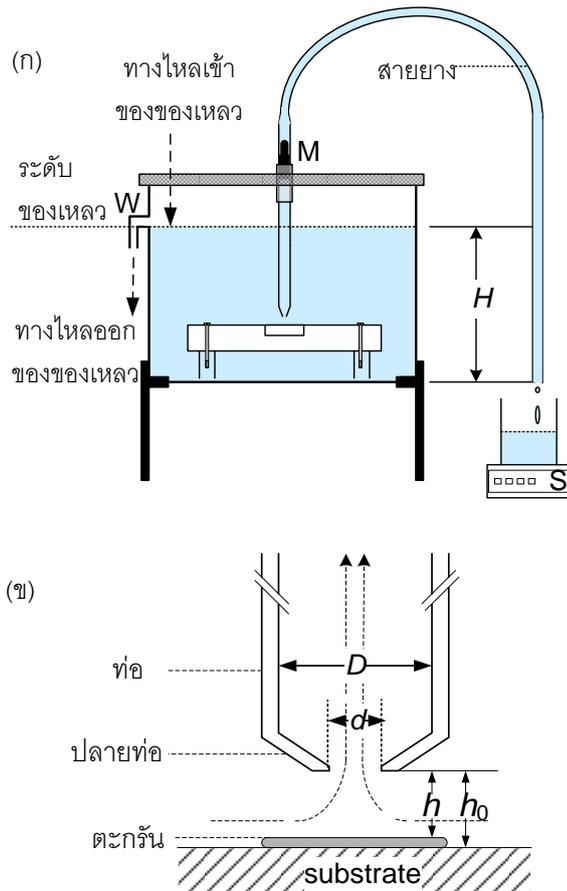
1.2.1 ฟลูอิดไดนามิกเกจิง (Fluid dynamic gauging: FDG) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาตะกักรันชนิดต่างๆ เช่น นม โพลีเมอร์ และอาหาร (Chew และคณะ, 2005; Saikhwon และคณะ, 2006) รูปที่ 2 แสดงเทคนิค FDG ซึ่งประกอบด้วยท่อพลาสติกใสปลายแคบ (เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ D และปลายท่อ d) จุ่มในแท่งกับริวจของเหลว โดยมีสายยางต่อจากท่อ ซึ่งเมื่อกำหนดให้ปลายสายยางอยู่ต่ำกว่าระดับของเหลวในแท่ง (ค่า H ในรูป 2(ก)) จะสามารถทำการลึกลงน้ำที่ปลายสายยางทำให้ของเหลวไหลออกมาทางปลายสายยาง อัตราการไหลเชิงมวลของของเหลวนี้แปรผันตรงกับค่า H และระยะห่างระหว่างปลายท่อพลาสติกกับพื้นผิวตะกักรัน หรือค่า h (รูป 2(ข)) ดังนั้นเมื่อกำหนดให้ค่า H คงที่จะสามารถหาค่า h จากอัตราการไหลเชิงมวลของของเหลว และเมื่อทราบตำแหน่งของปลายท่อพลาสติก หรือค่า h_0 (ตำแหน่งของปลายท่อพลาสติกกำหนดได้โดยการหมุนไมโครมิเตอร์, M) ก็จะสามารถคำนวณหาความหนาของตะกักรัน หรือ δ ได้:

$$\delta = h - h_0 \tag{1}$$

ข้อดีของเทคนิค FDG คือ มีราคาถูก ทำได้ง่าย และวัดความหนาของตะกักรันได้โดยไม่ต้องนำตัวอย่างออกจากสารเคมีที่แช่ ข้อเสีย คือ ตะกักรันอาจถูกชะล้างโดยแรงเฉือน (τ) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากของไหลเหนือผิวตะกักรัน ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดความหนาของตะกักรัน อย่างไรก็ตามสามารถปรับเปลี่ยนค่าของแรงเฉือนดังกล่าวได้โดยการ ปรับค่า H และค่า h จึงสามารถใช้เทคนิค FDG ในการวัดปริมาณแรงเฉือนที่ใช้ในการชะล้างตะกักรันออกจากพื้นผิวได้อีกด้วย โดยหากเป็นการชะล้างตะกักรันภายในท่อ สามารถคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำในการชะล้างตะกักรันจากค่าแรงเฉือนที่วัดได้ด้วย FDG โดยใช้สมการ ที่ 2 (Chew และคณะ, 2005):

$$\tau = \frac{3\mu\dot{m}}{\pi\rho h^2 r} \tag{2}$$

โดยที่ μ และ ρ คือ ค่าความหนืด และความหนาแน่นของของเหลวที่ใช้ในการทดสอบ, r คือ รัศมีของปลายท่อ FDG (หรือเท่ากับ $d/2$), h คือ ระยะทางระหว่างผิวของตะกักรัน และปลายท่อ FDG, \dot{m} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของเหลววัดในขณะที่ทดสอบ



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงหลักการของ FDG: (ก) โครงร่างภายนอก: D –เส้นผ่านศูนย์กลางในของท่อพลาสติก, d –เส้นผ่านศูนย์กลางในของปลายท่อพลาสติก; H –แรงดันน้ำที่ทำให้ น้ำถูกดูดผ่านบริเวณ ปลายท่อ; M –ไมโครมิเตอร์; S –เครื่องซึ่งนำน้ำหนัก และ W – ที่กั้นระบายน้ำเพื่อควบคุมระดับน้ำ (ข) รายละเอียดของส่วน ปลายท่อ ของ FDG: h –ช่องว่างระหว่างส่วนหัวของ FDG กับพื้นผิวตะกักรันที่ศึกษา, h_0 –ช่องว่างระหว่างส่วนหัวของ FDG กับพื้นผิวที่ไม่มีตะกักรัน

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมตะกรันจำลอง

เพื่อจำลองตะกรันที่เกิดจากการพาสเจอร์ไร้น้ำกะทิแบบกะ ซึ่งเป็นแบบที่ใช้ส่วนใหญ่ในโรงงานผลิตน้ำกะทิ กระป๋องขนาดกลาง และขนาดเล็ก งานวิจัยนี้ได้นำน้ำกะทิ (มะพร้าวชุด 1 กิโลกรัมคั้นในน้ำ 150 ซีซี ที่ 45 องศาเซลเซียส) มาต้มในภาชนะสแตนเลส ซึ่งบรรจุแผ่นสแตนเลส (4x4 ตารางเซนติเมตร) โดยใช้ hot plate ต้มน้ำกะทิให้มีอุณหภูมิในช่วง 90-95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการพาสเจอร์ไร้น้ำกะทิในอุตสาหกรรม (Tangsuphoom และ Coupland, 2005) ในระหว่างต้มนี้มีการใช้เครื่องกวนกวนบริเวณผิวน้ำกะทิ (100 rpm) เพื่อป้องกันการเกิดเป็นแผ่น ของกะทิที่ผิวบนของน้ำกะทิ นอกจากนี้ยังเป็นการจำลองการพาสเจอร์ไร้น้ำกะทิแบบกะ ที่มีการคั่นกะทิในระหว่างการพาสเจอร์ไร้น้ำกะทิเมื่อครบ 30 นาที เทน้ำกะทิออกจะพบแผ่นตะกรันที่ผิวแผ่นสแตนเลส ซึ่งจะเรียกตะกรันนี้ว่า ตะกรันจำลอง

2.2 การศึกษาการล้างตะกรันจากน้ำกะทิ

สารเคมีที่ใช้ในการศึกษาการล้างตะกรันกะทิ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งเป็นสารเคมีที่นิยมใช้ในการล้างตะกรันนม โดยการศึกษาจะสังเกตอัตราการพองตัวของตะกรัน และอัตราการพองตัวสูงสุดของตะกรันในสารละลาย NaOH ที่ค่า pH ต่างๆ ในช่วง pH 7-12 การศึกษาการพองตัวทำโดยวิธีซึ่งน้ำหนัก เพราะตะกรันที่เกิดขึ้นอ่อนเกินกว่าจะทดสอบโดยเทคนิค FDG ได้

เนื่องจากความหนาเริ่มต้นของตะกรันจำลองที่สร้างขึ้นมา มีความแตกต่าง ความหนาของตะกรัน จึงถูกทำให้ไว้หน่วย ดังนี้

$$\frac{m_t - m_0}{m_0} = \frac{\delta_t - \delta_0}{\delta_0} = \delta \quad (2)$$

โดยที่ m_t คือ มวลของตะกรันที่เวลาใดๆ m_0 คือ มวลของตะกรันเริ่มต้น δ_t คือ ความหนาของตะกรันที่เวลาใดๆ δ_0 คือ ความหนาของตะกรันเริ่มต้น และ δ คือ ความหนาของตะกรันที่ถูกทำให้ไว้หน่วยแล้ว

จากกราฟของ δ ที่เวลาต่างๆ สามารถหาความชันเริ่มต้น ซึ่งแสดงถึงอัตราเร็วในการพองตัวของตะกรัน (R_t) และอัตราการพองตัวสูงสุดของตะกรัน (δ_t) ได้ (รูปที่ 1(n))

ในระหว่างการศึกษารองตัวของตะกรัน ได้มีการบันทึกค่า optical density (OD) ที่ 395 nm (UV spectrophotometer, UV-1201, Shimadzu, Japan) ของสารละลาย เพื่อสังเกตว่ามีการละลายของตะกรันเกิดขึ้นในระหว่างที่พองตัวหรือไม่ โดย OD ที่ 395 nm เป็นการ แสดงการเปลี่ยนสีของสารละลาย (Mebirouk และคณะ, 2007) ซึ่งสอดคล้องกับความยาวคลื่นที่สารละลายที่ใช้ในการแช่ตะกรันเกิดการดูดกลืนรังสีมากที่สุด

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการล้างตะกรันได้มีการเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการล้างตะกรันจำลองภายใต้ 3 เงื่อนไข คือ 1) ตะกรันจำลองที่ไม่ได้ถูกแช่ในสารเคมีใดๆ 2) ตะกรันจำลองที่ถูกแช่ในน้ำกลั่น (pH 7) จนถึงจุดพองตัวสูงสุด และ 3) ตะกรันจำลองที่ถูกแช่ในสารละลาย NaOH (pH 12) จนถึงจุดพองตัวสูงสุด โดยแรงที่ใช้ในการล้างตะกรันวัดด้วยเทคนิค FDG

3. ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

ตะกรันจำลองที่ได้มีลักษณะเป็นเจลสีขาวขุ่น คล้ายกับตะกรันที่เกิดจากการพาสเจอร์ไร้นมชนิด A ซึ่งเป็นตะกรันที่มีกลไกในการก่อตัวของตะกรันที่เชื่อมโยงกับการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของโปรตีน (Burton, 1968) และ ไม่พบลักษณะมันวาวที่พื้นผิวน้ำของตะกรัน ซึ่งลักษณะเช่นนี้มักพบในตะกรันที่เกิดจากการพาสเจอร์ไร้นมชนิด B ซึ่งมีกลไกหลักในการก่อตัวของตะกรันจากการตกผลึกของเกลือแร่ที่เป็นส่วนประกอบในน้ำนม (Changani, 1997) การไม่พบตะกรันนมชนิด B สอดคล้องกับองค์ประกอบของน้ำกะทิที่ไม่มีส่วนที่เป็นเกลือแร่ (ตารางที่ 1)

จากการศึกษาการพองตัวของตะกรันจำลองโดยวิธีซึ่งน้ำหนัก พบว่าการพองตัวของตะกรันจำลอง มีลักษณะคล้ายดังรูปที่ 3 โดยพบว่าอัตราการพองตัวเริ่มต้นนั้นมีความสูงมาก และค่อยๆ ลดลงจนหยุดพองตัวในที่สุด ลักษณะการพองตัวเช่นนี้ คล้ายกับการพองตัวของตะกรันนมที่ถูก

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของนม (Walstra และ Janness, 1984) และกะทิ (Tansakul และ Chaisawang, 2006)

นม		กะทิ	
น้ำ	87%	น้ำ	78%
แลคโตส	5.0%	คาร์โบไฮเดรต	1%
โปรตีน	3.06%	โปรตีน	1.8-2%
ไขมัน	4.0%	ไขมัน	17-18%
เกลือแร่	0.64%	Ash	1%
อื่นๆ	0.3%		

แซในสารเคมี (Hooper, 2006) ซึ่งมีลักษณะสอดคล้องกับ diffusion model (รูปที่ 1(ก)) แต่การสังเกตค่า OD ของของเหลวที่ใช้แช่ตะกอนจำลองพบว่ามีความสูงขึ้น (รูปที่ 3) แสดงว่าในระหว่างที่ตะกอนฟองตัว ได้เกิดการละลายของตะกอนขึ้นด้วย โดยที่อัตราการฟองตัวมีค่าสูง กว่าอัตราการละลาย (มิฉะนั้นความหนาของตะกอนจะมีค่าลดลง) การฟองตัวของตะกอนที่เกิดขึ้นพร้อมกันกับการละลายของตะกอนเช่นนี้ พบได้กับกรณีของ เจลเวย์โปรตีน (whey protein gel) ที่ถูกแช่ในสารละลาย NaOH (Saikhwan, 2010) ซึ่งเจลเวย์โปรตีนมักถูกนำมาใช้ในการสร้างตะกอนจำลองสำหรับการศึกษาระดับนม

แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะพบว่าของเหลวที่ใช้แช่ตะกอนมีการแยกชั้น คือ ชั้นไขมัน และชั้นที่เป็นสารละลาย ซึ่งลักษณะเช่นนี้ไม่เกิดขึ้นกับกรณีของเจลเวย์โปรตีน แสดงว่าตะกอนกะทิจำลองในงานวิจัยนี้มีไขมันเป็นส่วนประกอบด้วย ซึ่งอาจสันนิษฐานได้ว่าเป็นเพราะน้ำกะทิมีส่วนของไขมันมากกว่านมมาก (ตารางที่ 1) ข้อสันนิษฐานนี้สอดคล้องกับงานของ Law และคณะ (2009) ที่พบว่าตะกอนที่เกิดจากน้ำกะทิมีไขมันเป็นส่วนประกอบในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกับน้ำกะทิ

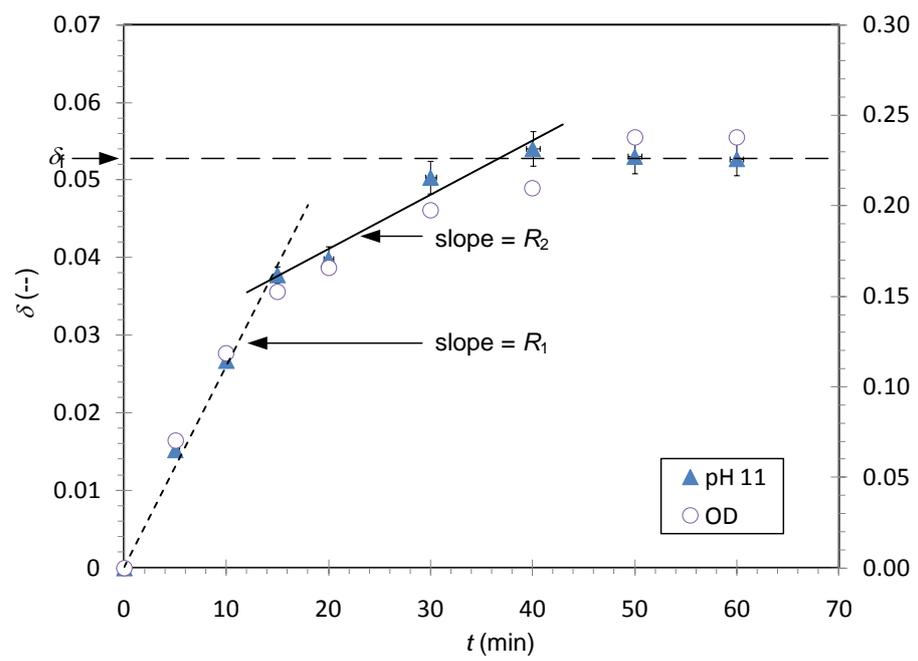
เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการฟองตัวของตะกอนกะทิที่มีลักษณะเหมือนกับตะกอนนม อาจตั้งข้อสมมติฐานเพิ่มเติมได้ว่าตะกอนกะทิเกิดจากการ เปลี่ยนโครงสร้าง (denature) ของโปรตีนดังที่ Seow และ Gwee (1997) รายงานไว้ อาจ มีโครงสร้างที่เอื้อให้ไขมันแทรกอยู่ในโครงสร้างโปรตีนนี้ ดังนั้น เมื่อนำตะกอนกะทิไปแช่ใน

สารละลาย NaOH โครงสร้างโปรตีนนี้จึงเกิดการขยายตัว เช่นเดียวกับกรณีที่โครงสร้างโปรตีนเช่นนี้ขยายตัวในกรณีของตะกอนนม และการขยายตัวของโครงสร้างโปรตีน ทำให้ไขมันที่แทรกอยู่ในโครงสร้างโปรตีนแยกตัวออกมา สังเกตพบเป็นชั้นไขมันในสารละลาย NaOH ดังที่พบในงานวิจัยนี้ ทั้งนี้สมมติฐานนี้ น่าจะเป็นการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

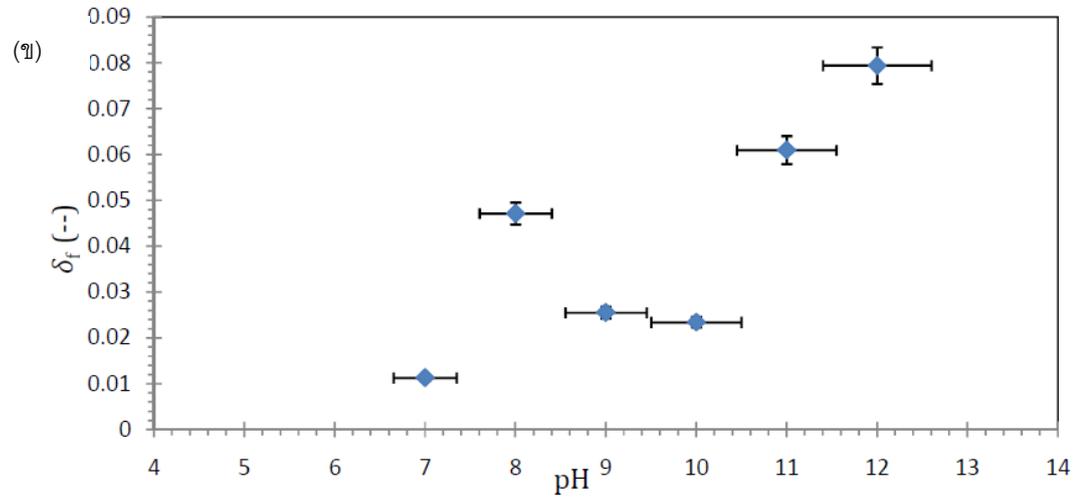
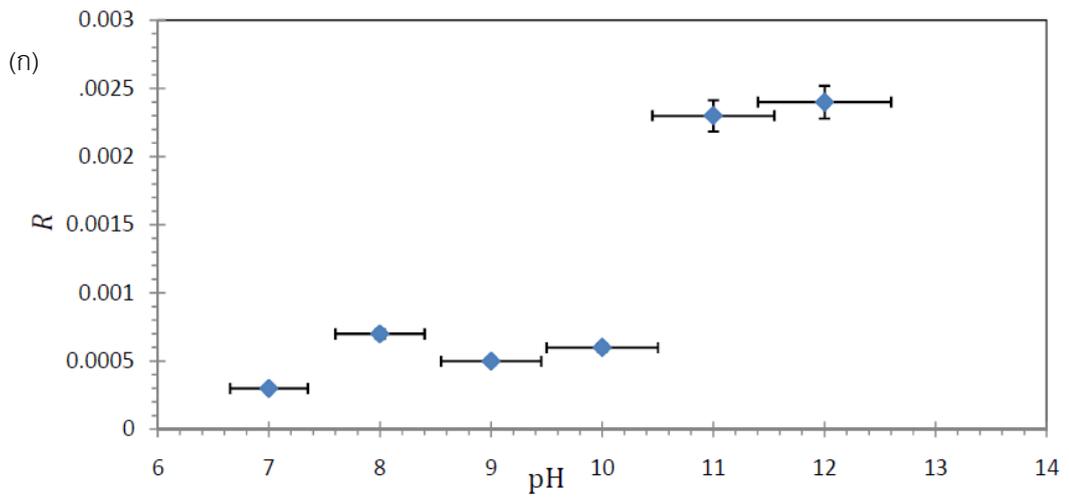
เนื่องจากการหาค่า δ ที่เวลา ก่อน 4 นาที เป็นเรื่องยาก เนื่องจากข้อจำกัดของการศึกษาการฟองตัวโดยใช้วิธีชั่งน้ำหนัก ที่ต้องมีกรนำตะกอนออกจากภาชนะบรรจุสารละลาย NaOH ซึบของเหลวส่วนเกินที่ผิวตะกอน และล้างใต้แผ่นสแตนเลส ก่อนที่จะมีการชั่งน้ำหนัก นอกจากนี้ ในระหว่างการชั่งน้ำหนักของตะกอน ยังได้มีการวัด OD ของสารละลาย NaOH ควบคู่กัน ซึ่งต้องใช้เวลาในการวัด ดังนั้นการรายงานอัตราการฟองตัวของตะกอนจึงรายงานค่าอัตราเร็วของการฟองตัวเริ่มต้น (R_1 , ความชันของเส้นประในรูปที่ 3) และอัตราการฟองตัวที่หายจากค่า δ ที่วัดได้ในช่วงแรกของการทดลอง (R_2 , ความชันของเส้นทึบในรูปที่ 3) ค่า R_1 , R_2 และ δ_f ของตะกอนที่ถูกแช่ในสารละลาย NaOH ที่ค่า pH ต่างๆ บันทึกในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่า R_1 , R_2 และ δ_f ของตะกอนจำลองแช่ในสารละลาย NaOH ที่ pH ต่างๆ

pH	R_1	R_2	δ_f
7	1.1×10^{-3}	3.0×10^{-4}	1.1×10^{-2}
8	1.6×10^{-2}	7.0×10^{-4}	4.7×10^{-2}
9	2.0×10^{-3}	7.0×10^{-4}	2.6×10^{-2}
10	3.2×10^{-3}	6.4×10^{-4}	2.3×10^{-2}
11	2.3×10^{-3}	2.0×10^{-3}	5.8×10^{-2}
12	5.4×10^{-4}	2.6×10^{-3}	8.0×10^{-2}



รูปที่ 3 การพองตัวของตะกอนจำลองแช่ในสารละลาย NaOH (pH 10) ที่เวลา (t) ต่างๆ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ค่า R_1 (R ในภาพ) และ (ข) δ_f ของตะกอนจำลองแช่ในสารละลาย NaOH ที่ pH ต่างๆ

จากตารางที่ 2 พบว่าค่า R_2 ที่ pH ต่างๆ มีแนวโน้มที่ชัดเจนมากกว่าค่า R_1 และมีแนวโน้มเดียวกับค่า δ_f ซึ่งแนวโน้มนี้แสดงให้เห็นชัดเจนมากขึ้นในรูปที่ 4 คือ ทั้งค่า R_1 และ δ_f มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อค่า pH เพิ่มมากขึ้น โดยที่ค่า pH 7-10 ค่า R_1 และ δ_f มีค่าใกล้เคียงกัน และเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อ pH เพิ่มขึ้นจาก pH 10 (จากนี้จะเรียกจุดนี้ว่า จุดเปลี่ยนอัตราการพองตัว) ซึ่งการศึกษาการพองตัวของ β -Lg เจล ซึ่งเป็นตะกอนนมจำลอง ได้พบแนวโน้มเช่นเดียวกันนี้ เพียงแต่จุดเปลี่ยนอัตราการพองตัวเกิดที่ pH 11 (Saikwan และคณะ, 2010) ซึ่งค่า pH ที่ต่างกันนี้อาจเป็นจากส่วนประกอบต่างๆ ของตะกอนที่ไม่เหมือนกัน และมีสัดส่วนไม่เท่ากัน โดยในงานวิจัยของ Saikwan และคณะ (2010) ได้แสดงด้วยว่าเมื่อปริมาณไขมันในนมเพิ่มสูงขึ้น จุดที่อัตราการพองตัวเปลี่ยนจะเกิดขึ้นที่ค่า pH ต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากงานวิจัยนี้เพราะตะกอนกะทิมีปริมาณไขมันมากกว่าตะกอนนม

ตารางที่ 2 ยังแสดงให้เห็นว่า ตะกอนจำลองที่แช่ในสารละลาย NaOH ที่ pH 12 มีค่า R_1 , R_2 และ δ_f มากที่สุด ซึ่งแสดงว่าตะกอน ที่ถูกแช่ใน pH 12 นี้พองตัวเร็วที่สุด (ไม่ต้องแช่นาน) และเมื่อพองตัวเต็มที่มีการขยายตัวมากที่สุด (มีความอ่อนตัวมากที่สุด) เนื่องจากมีรายงานถึงสาเหตุของการพองตัวของตะกอนนม (Mercade-Prieto และคณะ, 2007) และโพลีเมอร์ (Saikwan และคณะ, 2007) เมื่อถูกแช่ในสารละลายที่เป็นแอลคาลไท์ที่เกิดจากการสลายด้วยน้ำของพันธะของส่วนประกอบในตะกอนที่เป็นเอสเทอร์ (ester) ดังนั้นที่ค่า pH สูง อัตราการพองตัวและปริมาณการขยายตัวของตะกอนจึงมีค่าสูงตามไปด้วย เนื่องจากตะกอนที่ถูกแช่ที่ pH 12 มีความอ่อนตัวมากที่สุด จึงมีการทดสอบหาแรงที่ใช้ในการชะล้างตะกอนที่ถูกแช่ที่ pH 12 นี้ โดยเทียบกับแรงที่ใช้ในการล้างตะกอนจำลองที่ไม่ผ่านการแช่ สารเคมีใดๆ และตะกอนจำลองที่แช่ในน้ำ pH 7 (แช่เป็นเวลาให้ค่า δ_f มากที่สุด)

แรงที่ใช้ในการชะล้างตะกอนทั้ง 3 เงื่อนไขนี้ แสดง ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าแรงเฉือนเฉลี่ย และอัตราการไหลที่ใช้ในการชะล้างตะกอนที่ผิวบนของตะกอน (cohesive strength) และที่พื้นผิวสเดนเลส (adhesive strength)

	แรงเฉือน		อัตราการไหล	
	(Pa)		(g s ⁻¹)	
	ผิวตะกอน	ผิวสเดนเลส	ผิวตะกอน	ผิวสเดนเลส
ไม่แช่	360	472	380	435
แช่น้ำกลั่น (pH 7)	291	416	341	408
แช่ NaOH (pH 12)	228	345	302	372

ค่าแรงเฉือนที่ใช้ในการชะล้างตะกอนที่บริเวณผิวตะกอน แสดงถึงแรงที่ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลตะกอนด้วยกัน (cohesive strength) ดังนั้นผลการทดลองจึงแสดงให้เห็นว่าตะกอนที่ถูกแช่ในน้ำกลั่น และใน NaOH (pH 12) นั้นอ่อนนุ่มกว่าตะกอนที่ไม่ผ่านการแช่ ซึ่งแนวโน้มเดียวกันนี้สังเกตได้จากแรงเฉือนที่ใช้ในการชะล้างตะกอนบริเวณผิวสเดนเลส โดยแรงนี้แสดงถึงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสเดนเลส และโมเลกุลของตะกอน (adhesive strength)

ทว่าเมื่อเปลี่ยนค่าแรงเฉือนที่ต้องใช้ในการชะล้างตะกอนเป็นอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ต้องใช้ในการชะล้างตะกอนถ้าตะกอนดังกล่าวเกิดขึ้นในท่อน้ำ พบว่าอยู่ในช่วง 372-435 g s⁻¹ ซึ่งในเชิงปฏิบัติถือว่าเป็นอัตราการไหลที่ไม่ต่างกัน เพราะปั๊มน้ำที่ใช้ในการล้างตะกอนในโรงงานอุตสาหกรรมมักไม่มีความละเอียดในการปรับอัตราการไหล และเป็นไปได้ว่าอัตราการไหลในช่วง 372-435 g s⁻¹ อยู่ในช่วงการตั้งค่าปั๊มค่าเดียวกัน ดังนั้นแม้การแช่ตะกอนกะทิทั้งในน้ำ และในสารละลาย NaOH จะทำให้ตะกอนอ่อนนุ่ม และชะล้างออกได้ง่าย แต่ในทางปฏิบัติ นั้นน่าจะไม่มีมีความจำเป็นที่จะต้องแช่ตะกอนกะทิ เพราะ

ตะกรันกะทิน่าจะถูกล้างออกได้ด้วยแรงฉีดน้ำเพียงอย่างเดียว

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการพองตัวของตะกรันกะทิในสารละลาย NaOH พบว่าตะกรันกะทิมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงตะกรันนม 2 ประการ ประการที่หนึ่ง คือ การพองตัวของตะกรันกะทิมีลักษณะเป็นแบบ diffusional model และประการที่สอง คือ พบว่าอัตราการพองตัวมีค่าสูงขึ้นเมื่อ pH เพิ่มขึ้น และเมื่อค่า pH มากกว่าค่าๆ หนึ่ง อัตราการพองตัวจะเพิ่มขึ้นสูงอย่างเห็นได้ชัด (pH 10 ในรูปที่ 4)

อย่างไรก็ตามการพองตัวของตะกรันกะทิ และตะกรันนมในสารละลาย NaOH มีความแตกต่างที่สำคัญคือ ในช่วงแรกของการแช่ตะกรันนมในสารละลาย NaOH จะไม่พบการละลายของตะกรัน (สังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่า OD) ในขณะที่ในกรณีของตะกรันกะทิพบการละลายของตะกรันตั้งแต่ในช่วงแรกของการแช่ นอกจากนี้ยังพบชั้นไขมันในของเหลวที่ใช้แช่ตะกรันกะทิ ซึ่งไม่พบในกรณีของตะกรันนม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่ากะทิมีส่วนของไขมันมากกว่านม และควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องนี้

จากลักษณะการพองตัวของตะกรันกะทิ ทั้งที่คล้ายคลึงกับตะกรันนม และที่แตกต่าง ทำให้ทราบว่า ส่วนประกอบของตะกรันมีผลต่อการพองตัว และการล้างตะกรัน แม้ว่าส่วนประกอบนั้นอาจไม่มีผลต่อการก่อตัวของตะกรันก็ตาม ดังนั้นเมื่อพิจารณาการนำงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตะกรันนมมาประยุกต์ใช้กับกรณีของตะกรันกะทิ ควรเน้นงานวิจัยที่เป็นการศึกษาโดยใช้ตะกรันที่เกิดจากนม หรือเวย์โปรตีน (whey protein) ซึ่งมีค่าไขมันสูงกว่าตะกรันนมจำลองที่สร้างจากโปรตีน (เช่น β -Lg) เพียงอย่างเดียว

สำหรับแนวทางในการล้างตะกรันกะทินั้น พบว่าการแช่ตะกรันในน้ำ และในสารละลาย NaOH ช่วยให้ตะกรันอ่อนนุ่ม และชะล้างออกจากพื้นผิวสเตนเลสได้ง่ายขึ้น แต่แรงดันน้ำที่ใช้ในการชะล้างตะกรันเปรียบเทียบระหว่างตะกรันที่ไม่ได้ถูกแช่ ตะกรันที่ถูกแช่ในน้ำ และตะกรันที่ถูก

แช่ในสารละลาย NaOH มีค่าไม่แตกต่างกันมาก ดังนั้นการล้างตะกรันกะทิที่ในโรงงานนิยมทำโดยแช่ตะกรันในสารเคมีก่อนล้างด้วยการฉีดน้ำนั้น สามารถลดขั้นตอนให้เหลือเพียงการฉีดน้ำเพียง ขั้นตอน เดียว ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดเวลา และลดการใช้สารเคมี ซึ่งเป็นการลดต้นทุน และลดการปลดปล่อยสารเคมีสู่สิ่งแวดล้อมอีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

กลุ่มผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย จากเงินกองทุนวิจัย ประจำปี 2552 สำหรับในการทำงานวิจัยชิ้นนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- Alfrey, T., Gurmee, E.F., Lloyd, W.G. (1966) Diffusion in glassy polymers. *Journal of Polymer Science*. Vol. C12, 249–261.
- Burton, H. (1968) Deposition from whole milk in heat treatment plant: A review and discussion. *Journal of Dairy Research*. Vol. 35, 317–330.
- Changani, S.D., Belmar-Beiny, M.T., Fryer, P.J. (1997) Engineering and chemical factors associated with fouling and cleaning in milk processing. *Experimental Thermal and Fluid Science*. Vol. 14, 392–406.
- Chew, J.Y.M., Tonneijk, S.J., Paterson, W.R., Wilson, D.I. (2005) Mechanisms in the solvent cleaning of emulsion polymerization reactor surfaces. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 44, 4605–4616.
- Hooper, R.J. (2006) *Development of Techniques for The Study of Protein Systems*. PhD thesis, University of Cambridge, UK.
- Law, H.Y., Ong, C.I., Ab. Aziz, N., Taip, F.S., Muda, N. (2009) Preliminary work on coconut milk fouling deposits study. *International Journal of Engineering and Technology IJET*. Vol. 9, No. 10, 18–23.

- Mebirouk, M., Sbai, L., Lopez, M., Gonzalez, J. (2007) The absorption of polyphenols from olive oil mill wastewaters by sawdust and biodegradation by the fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Grasas Y Aceites*. Vol. 58, No. 4, 366–371.
- Mercade-Prieto, R., Falconer, R.J., Paterson, W.R., Wilson, D.I. (2007) Swelling and dissolution of β -lactoglobulin gels in alkali. *Biomacromolecules*. Vol. 8, 469–476.
- Möhle, R.B., Langemann, T., Haesner, M., Augustin, W., Scholl, S., Neu, T.R., Hempel, D.C., Horn, H. (2007) Structure and shear strength of microbial biofilms as determined with Confocal Laser Scanning Microscopy and Fluid Dynamic Gauging using a novel Rotating Disc Biofilm Reactor. *Biotechnology and Bioengineering*. Vol. 98, 747–755.
- Saikhwan, P., Geddert, T., Augustin, W., Scholl, S., Paterson, W.R., Wilson, D.I. (2006) Effect of surface treatment on cleaning of a model food soil. *Surface & Coatings Technology*. Vol. 201, 943–951.
- Saikhwan, P., Chew, Y.M.J., Paterson, W.R., Wilson, D.I. (2007) Swelling and its suppression in the cleaning of polymer fouling layers. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. Vol. 46, 4846–4855.
- Saikhwan, P., Mercadé-Prieto, R., Chew, Y.M.J., Gunasekaran, S., Paterson, W.R., Wilson, D.I. (2010) *Swelling and dissolution in cleaning of whey protein gels*, Proceedings of the Fouling and Cleaning in Food Processing 2010, Department of Chemical Engineering, Cambridge, UK, March 22-24.
- Seow C.C., Gwee, C.N. (1997) Coconut milk: chemistry and technology. *International Journal of Food Science and Technology*. Vol. 32, 189–201.
- Tangsuphoom, N., Coupland, J.N. (2005) Effect of Heating and Homogenization on the Stability of Coconut Milk Emulsions. *Journal of Food Science*. Vol. 70, No. 8, E466–E470.
- Tansakul, A., Chaisawang, P. (2006) Thermophysical properties of coconut milk. *Journal of food Engineering*. Vol. 73, 276–280.
- Walstra, P., Jenness, R. (1984) *Dairy Chemistry and Physics*. Wiley, New York.