

## ผลกระทบของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อการประสิทธิภาพในการล้างตะกอน ที่เกิดจากการพาสเจอร์ไร้น้ำกะทิแบบกะ

ภณิดา ชัยขวัญ<sup>\* 1)</sup> ณัฐพร จำวรรณ<sup>2)</sup> พิสิรค์ ถึงเสียบญวน<sup>3)</sup> วรณี แผงจันทิก<sup>4)</sup> หาญพล พึ่งศรี<sup>5)</sup> และ ไพรัช อุศุภรัตน์<sup>6)</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่อประสิทธิภาพในการล้างตะกอนที่เกิดจากการพาสเจอร์ไร้น้ำกะทิแบบกะ ตะกอนจำลองถูกนำมาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ค่า pH 7-12 พบว่าอัตราเร็วของการพองตัว และอัตราการพองตัวสูงสุดของตะกอนกะทิเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นในช่วง pH < 10 และที่ค่า pH > 10 พบว่าทั้งอัตราเร็วของการพองตัว และอัตราการพองตัวสูงสุดของตะกอนกะทิเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ ซึ่งลักษณะเช่นนี้มีรายงานพบในการศึกษาตะกอนที่เกิดจากการพาสเจอร์ไร้นม การศึกษาหาแรงที่ใช้ในการชะล้างตะกอนกะทินั้นใช้ตะกอนกะทิภายใต้เงื่อนไข 3 กรณี คือ (1) ไม่มีการแช่ตะกอน (2) แช่ตะกอนในน้ำกลั่น (pH 7) และ (3) แช่ตะกอนในสารละลาย NaOH (pH 12) ซึ่งเป็นค่า pH ที่พบว่าตะกอนกะทิมีการพองตัวมากที่สุด จากการทดลองพบว่าการแช่ตะกอนส่งผลให้แรงที่ใช้ในการชะล้างตะกอนลดลง แต่แรงที่ใช้ไม่แตกต่างกันมาก และแรงที่ใช้ในการชะล้างตะกอนภายใต้ 3 เงื่อนไขนั้นอยู่ในช่วง 345-472 Pa

**คำสำคัญ:** ตะกอน การล้าง น้ำกะทิ ฟลูอิดไดนามิกเกจ (Fluid dynamic gauging: FDG)

---

<sup>\* 1)</sup> อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12120

อีเมล: psai khwan@engr.tu.ac.th

<sup>2)</sup> นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12120

อีเมล: pangmkv\_m@hotmail.com

<sup>3)</sup> นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12120

อีเมล: pisanot13@hotmail.com

<sup>4)</sup> อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12120

อีเมล: pworanee@engr.tu.ac.th

<sup>5)</sup> อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12120

อีเมล: pharnpon@engr.tu.ac.th

<sup>6)</sup> อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12120

อีเมล: uphairat@engr.tu.ac.th

<sup>\*</sup> Corresponding Author

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

Phanida Saikhwan<sup>\*1)</sup> Nattaporn Jumwan<sup>2)</sup> Pisan Thungsiabyuan<sup>3)</sup> woranee paengjuntuek<sup>4)</sup> Harnpon  
Phungrassami<sup>5)</sup> and Phairat Usubharatana<sup>6)</sup>

### 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)

---

<sup>\*1)</sup> Lecturer, Department of Chemical Engineering, Thammasat University, Pathumthani 12120,

E-mail: psai khwan@engr.tu.ac.th

<sup>2)</sup> Undergraduate student, Department of Chemical Engineering, Thammasat University, Pathumthani 12120,

E-mail: pangmkv\_m@hotmail.com

<sup>3)</sup> Undergraduate student, Department of Chemical Engineering, Thammasat University, Pathumthani 12120,

E-mail: pisanot13@hotmail.com

<sup>4)</sup> Lecturer, Department of Chemical Engineering, Thammasat University, Pathumthani 12120,

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

<sup>5)</sup> Lecturer, Department of Chemical Engineering, Thammasat University, Pathumthani 12120,

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

<sup>6)</sup> Lecturer, Department of Chemical Engineering, Thammasat University, Pathumthani 12120,

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

<sup>\*</sup> Corresponding Author

## 1. บทนำ

### 1.1 ตะกอน: ปัญหาที่เกิดในการพาสเจอร์ไรส์น้ำกะทิ

ในปัจจุบันความนิยมในการบริโภคกะทิในต่างประเทศมีมากขึ้น และวิถีชีวิตคนไทยมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้กะทิกระป๋องเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความนิยมสูงขึ้น ดังนั้นอุตสาหกรรมผลิตกะทิกระป๋องจึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับขยายกำลังการผลิตให้มากขึ้นเพื่อรองรับความต้องการที่เพิ่มขึ้น

กระบวนการผลิตกะทิกระป๋องเริ่มจากการคั้นน้ำกะทิจากเนื้อมะพร้าว การนำน้ำกะทิไปพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ 92-95 °C เป็นเวลา 5-20 นาที จากนั้นน้ำกะทิที่ถูกพาสเจอร์ไรส์แล้วจะถูกผ่านกระบวนการโฮโมจีไนส์เซอร์ (homogenizer) ซึ่งมักมีการใส่อิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) ลงไป และขั้นตอนสุดท้ายคือการบรรจุน้ำกะทิลงในกระป๋อง

ในขั้นตอนการพาสเจอร์ไรส์น้ำกะทินั้น มักพบปัญหาการก่อตัวของตะกอนตรงบริเวณพื้นผิวถึงที่ร้อน ตะกอนที่เกิดขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการนำความร้อนจากแหล่งความร้อนสู่น้ำกะทิลดลง นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งสะสมของแบคทีเรีย และจุลินทรีย์อื่นๆ ที่ก่อให้เกิดปัญหาตามมา

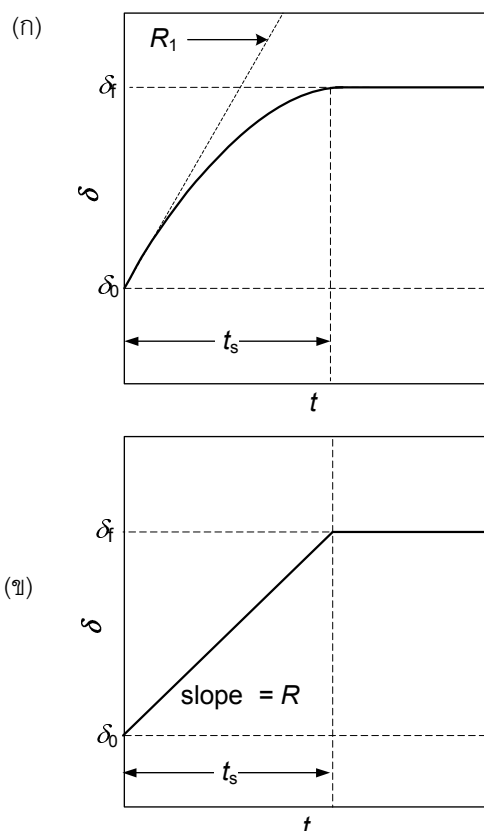
ตะกอนจากการพาสเจอร์ไรส์น้ำกะทิเป็นปัญหาที่ค่อนข้างใหม่ และมีงานวิจัยที่ศึกษาปัญหานี้ไม่มากนัก โดยส่วนใหญ่มักเป็นการศึกษาปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ และอัตราการไหล ที่ส่งผลต่ออัตราการก่อตัวของตะกอน และมีรายงานว่าตะกอนจากการพาสเจอร์ไรส์น้ำกะทิอาจเกิดจากการเปลี่ยนโครงสร้างของโปรตีนในน้ำกะทิ (Seow และ Gwee, 1997) เช่นเดียวกับการเกิดตะกอนจากการพาสเจอร์ไรส์นม (Burton, 1968)

### 1.2 การศึกษาการล้างตะกอนโดยใช้สารเคมี

การศึกษาล้างตะกอนด้วยสารเคมี นิยมทำโดยการศึกษาก่อนล้างด้วยของตะกอน เพราะการพองตัวในช่วงแรกที่เกิดขึ้นเมื่อตะกอนถูกแช่ในสารเคมี และมีความสำคัญ เพราะตะกอนที่พองตัวแล้วจะอ่อนตัวลง และอาจจะละลายในสารเคมี หรือถูกล้างออกด้วยวิธีเชิงกล เช่น การฉีดน้ำ

การศึกษาก่อนล้างด้วยของตะกอนทำได้โดยวัดความหนาของตะกอนที่ถูกแช่ในสารเคมี ที่เวลาต่างๆ เทคนิคที่ใช้ในการวัดความหนาของตะกอน เช่น วิธีชั่งน้ำหนัก (Mercade-Prieto และคณะ, 2007) การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลเลเซอร์สแกนนิ่ง (confocal laser scanning microscope) (Möhle และคณะ, 2007) และฟลูอิดไดนามิกเกจิง (fluid dynamic gauging: FDG) (Saikhwan และคณะ, 2007)

1.2.1 วิธีชั่งน้ำหนัก ทำได้โดยการชั่งน้ำหนักของมวลของตะกอนที่ถูกแช่ในสารละลายที่เวลาต่างๆ มวลที่เพิ่มขึ้นหมายถึงการพองตัว ข้อดีของวิธีนี้คือทำได้ง่าย และใช้เพียงเครื่องชั่งน้ำหนัก ข้อเสียคือไม่ได้เป็นการวัดความหนาของตะกอนโดยตรง แต่เป็นการเทียบมวลที่เปลี่ยนไปเทียบกับความหนาที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของตะกอน ( $\delta$ ) กับเวลาที่แช่ในสารเคมี ( $t$ ) ที่พบบ่อยจากการทดลอง ศึกษาตะกอนนม: (ก) diffusional model และ (ข) linear model (ปรับจาก Alfrey และคณะ, 1996)

รูปที่ 1 เป็นกราฟแสดงความหนาของตะกอนนมที่ถูกแขวนในสารเคมีวัดที่เวลาต่างๆ ซึ่งค่าที่ได้จากกราฟ ได้แก่ อัตราเร็วของการพองตัวเริ่มต้น ( $R_1$ ) และความหนาเมื่อตะกอนพองตัวมากที่สุด ( $\delta$ )

1.2.1 ฟลูอิดไดนามิกส์ (Fluid dynamic gauging: FDG) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาตะกอนชนิดต่างๆ เช่น นม โพลีเมอร์ และอาหาร (Chew และคณะ, 2005; Saikhwon และคณะ, 2006) รูปที่ 2 แสดงเทคนิค FDG ซึ่งประกอบด้วยท่อพลาสติกใสปลายแคบ (เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ  $D$  และปลายท่อ  $d$ ) จุ่มในถังกับบรรจุของเหลว โดยมีสายยางต่อจากท่อ ซึ่งเมื่อกำหนดให้ปลายสายยางอยู่ต่ำกว่าระดับของเหลวในถัง (ค่า  $H$  ในรูป 2(ก)) จะสามารถทำการกลัมน้ำที่ปลายสายยางทำให้ของเหลวไหลออกมาทางปลายสายยาง อัตราการไหลเชิงมวลของของเหลวนี้แปรผันตรงกับค่า  $H$  และระยะห่างระหว่างปลายท่อพลาสติกกับพื้นผิวตะกอน หรือค่า  $h$  (รูป 2(ข)) ดังนั้นเมื่อกำหนดให้ค่า  $H$  คงที่จะสามารถหาค่า  $h$  จากอัตราการไหลเชิงมวลของของเหลว และเมื่อทราบตำแหน่งของปลายท่อพลาสติก หรือค่า  $h_0$  (ตำแหน่งของปลายท่อพลาสติกกำหนดได้โดยการหมุนไมโครมิเตอร์, M) ก็จะสามารถคำนวณหาความหนาของตะกอน หรือ  $\delta$  ได้:

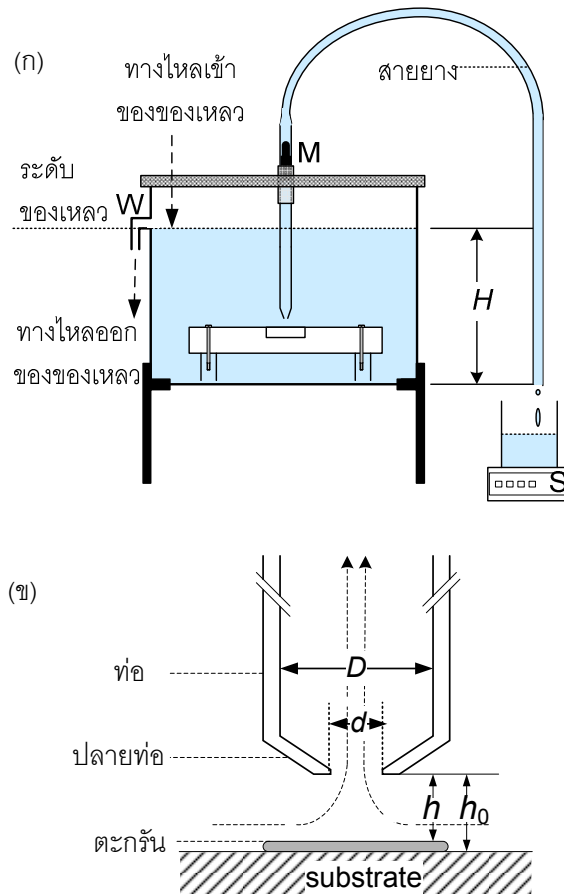
$$\delta = h - h_0 \quad (1)$$

ข้อดีของเทคนิค FDG คือ มีราคาถูก ทำได้ง่าย และวัดความหนาของตะกอนได้โดยไม่ต้องนำตัวอย่างออกจากสารเคมีที่แช่ ข้อเสีย คือ ตะกอนอาจถูกชะล้างโดยแรงเฉือน ( $\tau$ ) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากของไหลเหนือผิวตะกอน ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดความหนาของตะกอน

อย่างไรก็ตามสามารถปรับเปลี่ยนค่าของแรงเฉือนดังกล่าวได้โดยการปรับค่า  $H$  และค่า  $h$  จึงสามารถใช้เทคนิค FDG ในการวัดปริมาณแรงเฉือนที่ใช้ในการชะล้างตะกอนออกจากพื้นผิวได้อีกด้วย โดยหากเป็นการชะล้างตะกอนภายในท่อ สามารถคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำในการชะล้างตะกอนจากค่าแรงเฉือนที่วัดได้ด้วย FDG โดยใช้สมการที่ 2 (Chew และคณะ, 2005):

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

โดยที่  $\mu$  และ  $\rho$  คือ ค่าความหนืด และความหนาแน่นของของเหลวที่ใช้ในการทดสอบ,  $r$  คือ รัศมีของปลายท่อ FDG (หรือเท่ากับ  $d/2$ ),  $h$  คือ ระยะทางระหว่างผิวของตะกอน และปลายท่อ FDG,  $\dot{m}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของเหลววัดในขณะทดสอบ



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงหลักการของ FDG: (ก) โครงร่างภายนอก:  $D$ —เส้นผ่านศูนย์กลางในของท่อพลาสติก,  $d$ —เส้นผ่านศูนย์กลางในของปลายท่อพลาสติก;  $H$ —แรงดันน้ำที่ทำให้ น้ำถูกดูดผ่านบริเวณปลายท่อ;  $M$ —ไมโครมิเตอร์;  $S$ —เครื่องชั่งน้ำหนัก และ  $W$  — ที่กั้นระบายน้ำเพื่อควบคุมระดับน้ำ (ข) รายละเอียดของส่วนปลายท่อของ FDG:  $h$ —ช่องว่างระหว่างส่วนหัวของ FDG กับพื้นผิวตะกอนที่ศึกษา,  $h_0$ —ช่องว่างระหว่างส่วนหัวของ FDG กับพื้นผิวที่ไม่มีตะกอน

## 2. วิธีการทดลอง

### 2.1 การเตรียมตะกอนจำลอง

เพื่อจำลองตะกอนที่เกิดจากการพาสเจอร์ไร้น้ำกะทิแบบกะ ซึ่งเป็นแบบที่ใช้ส่วนใหญ่ในโรงงานผลิตน้ำกะทิ กระป๋องขนาดกลาง และขนาดเล็ก งานวิจัยนี้ได้ใช้น้ำกะทิ (มะพร้าวชูด 1 กิโลกรัมคั้นในน้ำ 150 ซีซี ที่ 45 องศาเซลเซียส) มาต้มในภาชนะสเตนเลส ซึ่งบรรจุแผ่นสเตนเลส (4x4 ตารางเซนติเมตร) โดยใช้ hot plate ต้มน้ำกะทิให้มีอุณหภูมิในช่วง 90-95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการพาสเจอร์ไร้น้ำกะทิในอุตสาหกรรม (Tangsuphoom และ Coupland, 2005) ในระหว่างต้มมีการใช้เครื่องกวนกวนบริเวณผิวน้ำกะทิ (100 rpm) เพื่อป้องกันการเกิดเป็นแผ่นของกะทิที่ผิวบนของน้ำกะทิ นอกจากนี้ยังเป็นการจำลองการพาสเจอร์ไร้น้ำกะทิแบบกะ ที่มีการคนกะทิในระหว่างการพาสเจอร์ไร้น้ำกะทิ เมื่อครบ 30 นาที เหน้กะทิออกจะพบแผ่นตะกอนที่ผิวแผ่นสเตนเลส ซึ่งจะเรียกตะกอนนี้ว่า ตะกอนจำลอง

### 2.2 การศึกษาการล้างตะกอนจากน้ำกะทิ

สารเคมีที่ใช้ในการศึกษาการล้างตะกอนกะทิ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งเป็นสารเคมีที่นิยมใช้ในการล้างตะกอนนม โดยการศึกษาจะสังเกตอัตราการพองตัวของตะกอน และอัตราการพองตัวสูงสุดของตะกอนในสารละลาย NaOH ที่ค่า pH ต่างๆ ในช่วง pH 7-12 การศึกษาการพองตัวทำโดยวิธีชั่งน้ำหนัก เพราะตะกอนที่เกิดขึ้นอ่อนเกินกว่าจะทดสอบโดยเทคนิค FDG ได้

เนื่องจากความหนาเริ่มต้นของตะกอนจำลองที่สร้างขึ้นมา มีความแตกต่าง ความหนาของตะกอนจึงถูกทำให้ไว้หน่วย ดังนี้

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

โดยที่  $m_t$  คือ มวลของตะกอนที่เวลาใดๆ  $m_0$  คือ มวลของตะกอนเริ่มต้น  $\delta_t$  คือ ความหนาของตะกอนที่เวลาใดๆ  $\delta_0$  คือ ความหนาของตะกอนเริ่มต้น และ  $\delta$  คือ ความหนาของตะกอนที่ถูกทำให้ไว้หน่วยแล้ว

จากกราฟของ  $\delta$  ที่เวลาต่างๆ สามารถหาความชันเริ่มต้น ซึ่งแสดงถึงอัตราเร็วในการพองตัวของตะกอน ( $R_t$ )

และอัตราการพองตัวสูงสุดของตะกอน ( $\delta_t$ ) ได้ (รูปที่ 1(ก))

ในระหว่างการศึกษากการพองตัวของตะกอน ได้มีการบันทึกค่า optical density (OD) ที่ 395 nm (UV spectrophotometer, UV-1201, Shimadzu, Japan) ของสารละลาย เพื่อสังเกตว่ามีการละลายของตะกอนเกิดขึ้นในระหว่างที่พองตัวหรือไม่ โดย OD ที่ 395 nm เป็นการแสดงการเปลี่ยนสีของสารละลาย (Mebirouk และคณะ, 2007) ซึ่งสอดคล้องกับความยาวคลื่นที่สารละลายที่ใช้ในการแช่ตะกอนเกิดการดูดกลืนรังสีมากที่สุด

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการล้างตะกอนได้มีการเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการล้างตะกอนจำลองภายใต้ 3 เงื่อนไข คือ 1) ตะกอนจำลองที่ไม่ได้ถูกแช่ในสารเคมีใดๆ 2) ตะกอนจำลองที่ถูกแช่ในน้ำกลั่น (pH 7) จนถึงจุดพองตัวสูงสุด และ 3) ตะกอนจำลองที่ถูกแช่ในสารละลาย NaOH (pH 12) จนถึงจุดพองตัวสูงสุด โดยแรงที่ใช้ในการล้างตะกอนวัดด้วยเทคนิค FDG

## 3. ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

ตะกอนจำลองที่ได้มีลักษณะเป็นเจลสีขาวขุ่น คล้ายกับตะกอนที่เกิดจากการพาสเจอร์ไร้นมชนิด A ซึ่งเป็นตะกอนที่มีกลไกในการก่อตัวของตะกอนที่เชื่อมโยงกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของโปรตีน (Burton, 1968) และไม่มีพบลักษณะมันวาวที่พื้นผิวหน้าของตะกอน ซึ่งลักษณะเช่นนี้มักพบในตะกอนที่เกิดจากการพาสเจอร์ไร้นมชนิด B ซึ่งมีกลไกหลักในการก่อตัวของตะกอนจากการตกผลึกของเกล็ดแร่ที่เป็นส่วนประกอบในน้ำนม (Changani, 1997) การไม่พบตะกอนนมชนิด B สอดคล้องกับองค์ประกอบของน้ำกะทิที่ไม่มีส่วนที่เป็นเกล็ดแร่ (ตารางที่ 1)

จากการศึกษาการพองตัวของตะกอนจำลองโดยวิธีชั่งน้ำหนัก พบว่าการพองตัวของตะกอนจำลองมีลักษณะคล้ายดังรูปที่ 3 โดยพบว่าอัตราการพองตัวเริ่มต้นนั้นมีค่าสูงมาก และค่อยๆ ลดลงจนหยุดพองตัวในที่สุด ลักษณะการพองตัวเช่นนี้ คล้ายกับการพองตัวของตะกอนนมที่ถูก

**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%  |              |        |

แชในสารเคมี (Hooper, 2006) ซึ่งมีลักษณะสอดคล้องกับ diffusion model (รูปที่ 1(n)) แต่การสังเกตค่า OD ของของเหลวที่ใช้แช่ตะกอนจำลองพบว่ามีความสูงชัน (รูปที่ 3) แสดงว่าในระหว่างที่ตะกอนฟองตัว ได้เกิดการละลายของตะกอนขึ้นด้วย โดยที่อัตราการฟองตัวมีความสูงกว่าอัตราการละลาย (มิฉะนั้นความหนาของตะกอนจะมีค่าลดลง) การฟองตัวของตะกอนที่เกิดขึ้นพร้อมกันกับการละลายของตะกอนเช่นนี้ พบได้กับกรณีของเจลเวย์โปรตีน (whey protein gel) ที่ถูกแชในสารละลาย NaOH (Saikhwan, 2010) ซึ่งเจลเวย์โปรตีนมักถูกนำมาใช้ในการสร้างตะกอนจำลองสำหรับการศึกษาระดับต้น

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

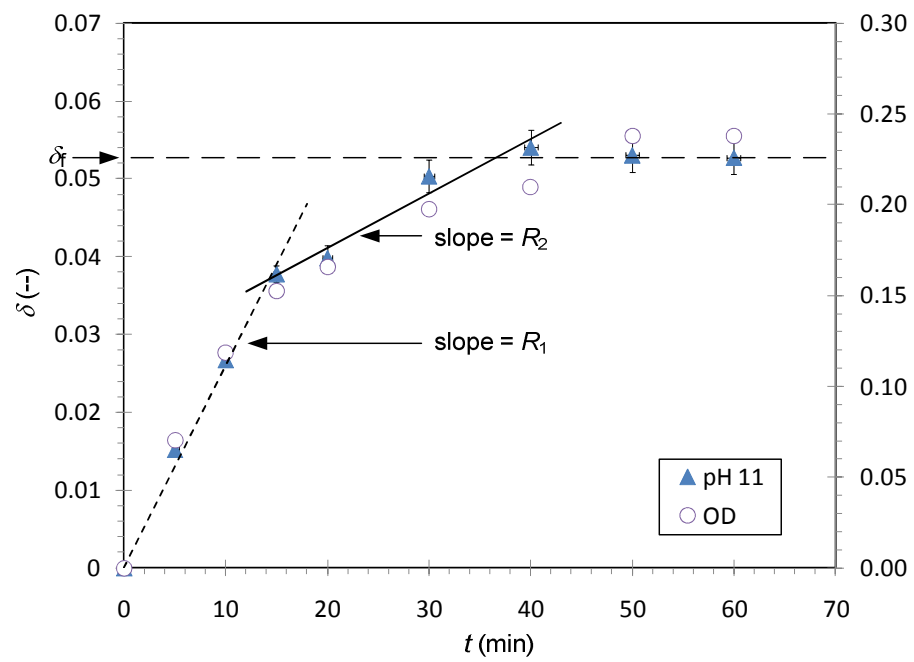
เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการฟองตัวของตะกอนกะทิที่มีลักษณะเหมือนกับตะกอนนม อาจตั้งข้อสมมติฐานเพิ่มเติมได้ว่าตะกอนกะทิเกิดจากการเปลี่ยนโครงสร้าง (denature) ของโปรตีนดังที่ Seow และ Gwee (1997) รายงานไว้ อาจมีโครงสร้างที่เอื้อให้ไขมันแทรกอยู่ในโครงสร้างโปรตีนนี้ ดังนั้นเมื่อนำตะกอนกะทิไปแชใน

สารละลาย NaOH โครงสร้างโปรตีนนี้จึงเกิดการขยายตัว เช่นเดียวกับกรณีที่โครงสร้างโปรตีนเช่นนี้ขยายตัวในกรณีของตะกอนนม และการขยายตัวของโครงสร้างโปรตีนทำให้ไขมันที่แทรกอยู่ในโครงสร้างโปรตีนแยกตัวออกมา สังเกตพบเป็นชั้นไขมันในสารละลาย NaOH ดังที่พบในงานวิจัยนี้ ทั้งนี้สมมติฐานนี้น่าจะเป็นการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

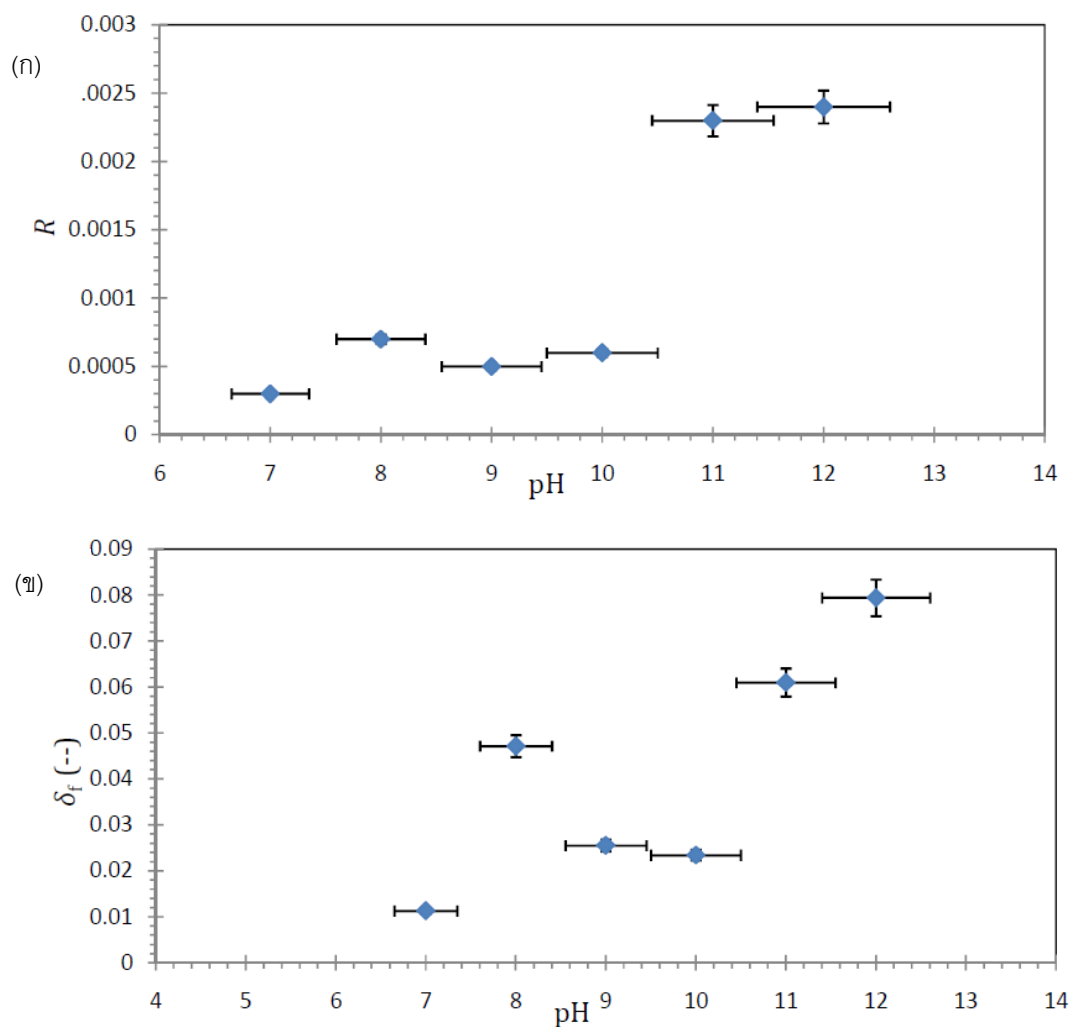
เนื่องจากการหาค่า  $\delta$  ที่เวลาก่อน 4 นาที เป็นเรื่องยาก เนื่องจากข้อจำกัดของการศึกษาการฟองตัวโดยใช้วิธีชั่งน้ำหนัก ที่ต้องมีการนำตะกอนออกจากภาชนะบรรจุสารละลาย NaOH ซึบของเหลวส่วนเกินที่ผิวตะกอน และล้างใต้แผ่นสแตนเลส ก่อนที่จะมีการชั่งน้ำหนัก นอกจากนี้ในระหว่างการชั่งน้ำหนักของตะกอน ยังได้มีการวัด OD ของสารละลาย NaOH ควบคู่กัน ซึ่งต้องใช้เวลาในการวัด ดังนั้นการรายงานอัตราการฟองตัวของตะกอนจึงรายงานค่าอัตราเร็วของการฟองตัวเริ่มต้น ( $R_1$ , ความชันของเส้นประในรูปที่ 3) และอัตราการฟองตัวที่หายากค่า  $\delta$  ที่วัดได้ในช่วงแรกของการทดลอง ( $R_2$ , ความชันของเส้นทึบในรูปที่ 3) ค่า  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $\delta_f$  ของตะกอนที่ถูกแชในสารละลาย NaOH ที่ค่า pH ต่างๆ บันทึกในตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** ค่า  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $\delta_f$  ของตะกอนจำลองแชในสารละลาย NaOH ที่ pH ต่างๆ

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



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



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

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

ตารางที่ 2 ยังแสดงให้เห็นว่าตะกอนจำลองที่แช่ในสารละลาย NaOH ที่ pH 12 มีค่า  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $\delta_f$  มากที่สุด ซึ่งแสดงว่าตะกอนที่ถูกแช่ใน pH 12 นี้พองตัวเร็วที่สุด (ไม่ต้องแช่นาน) และเมื่อพองตัวเต็มที่มีการขยายตัวมากที่สุด (มีความอ่อนตัวมากที่สุด) เนื่องจากมีรายงานถึงสาเหตุของการพองตัวของตะกอนนม (Mercade-Prieto และคณะ, 2007) และโพลีเมอร์ (Saikhwan และคณะ, 2007) เมื่อถูกแช่ในสารละลายที่เป็นแอลคาไลว่าเกิดจากการสลายด้วยน้ำของพันธะของส่วนประกอบในตะกอนที่เป็นเอสเทอร์ (ester) ดังนั้นที่ค่า pH สูง อัตราการพองตัวและปริมาณการขยายตัวของตะกอนจึงมีค่าสูงตามไปด้วย เนื่องจากตะกอนที่ถูกแช่ที่ pH 12 มีความอ่อนตัวมากที่สุด จึงมีการทดสอบหาแรงที่ใช้ในการชะล้างตะกอนที่ถูกแช่ที่ pH 12 นี้ โดยเทียบกับแรงที่ใช้ในการล้างตะกอนจำลองที่ไม่ผ่านการแช่สารเคมีใดๆ และตะกอนจำลองที่แช่ในน้ำ pH 7 (แช่เป็นเวลาให้ค่า  $\delta_f$  มากที่สุด)

แรงที่ใช้ในการชะล้างตะกอนทั้ง 3 เงื่อนไขนี้ แสดงในตารางที่ 3

**ตารางที่ 3** ค่าแรงเฉือนเฉลี่ย และอัตราการไหลที่ใช้ในการชะล้างตะกอนที่ผิวบนของตะกอน (cohesive strength) และที่พื้นผิวสเตนเลส (adhesive strength)

|                    | แรงเฉือน |            | อัตราการไหล          |            |
|--------------------|----------|------------|----------------------|------------|
|                    | (Pa)     |            | (g s <sup>-1</sup> ) |            |
|                    | ผิวตะกอน | ผิวสเตนเลส | ผิวตะกอน             | ผิวสเตนเลส |
| 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 ซึ่งแนวโน้มเดียวกันนี้สังเกตได้จากแรงเฉือนที่ใช้ในการชะล้างตะกอนบริเวณผิวสเตนเลส โดยแรงนี้แสดงถึงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสเตนเลส และโมเลกุลของตะกอน (adhesive strength)

พบว่าเมื่อเปลี่ยนค่าแรงเฉือนที่ต้องใช้ในการชะล้างตะกอนเป็นอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ต้องใช้ในการชะล้างตะกอนถ้าตะกอนดังกล่าวเกิดขึ้นในท่อน้ำ พบว่าอยู่ในช่วง 372-435 g s<sup>-1</sup> ซึ่งในเชิงปฏิบัติถือว่าเป็นอัตราการไหลที่ไม่ต่างกัน เพราะปั๊มน้ำที่ใช้ในการล้างตะกอนในโรงงานอุตสาหกรรมมักไม่มีความละเอียดในการปรับอัตราการไหล และเป็นไปได้ว่าอัตราการไหลในช่วง 372-435 g s<sup>-1</sup> อยู่ในช่วงการตั้งค่าปั๊มค่าเดียวกัน ดังนั้นแม้การแช่ตะกอนกะทิทั้งในน้ำ และในสารละลาย NaOH จะทำให้ตะกอนอ่อนนุ่ม และชะล้างออกได้ง่าย แต่ในทางปฏิบัติ นั้นน่าจะไม่มีมีความจำเป็นที่จะต้องแช่ตะกอนกะทิ เพราะ

ตะกอนกะทิน่าจะถูกล้างออกได้ด้วยแรงฉีดน้ำเพียงอย่างเดียว

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการพองตัวของตะกอนกะทิในสารละลาย NaOH พบว่าตะกอนกะทิมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงตะกอนนม 2 ประการ ประการที่หนึ่ง คือ การพองตัวของตะกอนกะทิมีลักษณะเป็นแบบ diffusional model และประการที่สอง คือ พบว่าอัตราการพองตัวมีค่าสูงขึ้นเมื่อ pH เพิ่มขึ้น และเมื่อค่า pH มากกว่าค่าๆ หนึ่ง อัตราการพองตัวจะเพิ่มขึ้นสูงอย่างเห็นได้ชัด (pH 10 ในรูปที่ 4)

อย่างไรก็ตามการพองตัวของตะกอนกะทิ และตะกอนนมในสารละลาย NaOH มีความแตกต่างที่สำคัญคือ ในช่วงแรกของการแช่ตะกอนนมในสารละลาย NaOH จะไม่พบการละลายของตะกอน (สังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่า OD) ในขณะที่ในกรณีของตะกอนกะทิพบการละลายของตะกอนตั้งแต่ในช่วงแรกของการแช่ นอกจากนี้ยังพบชั้นไขมันในของเหลวที่ใช้แช่ตะกอนกะทิซึ่งไม่พบในกรณีของตะกอนนม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่ากะทิมีสัดส่วนของไขมันมากกว่านม และควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องนี้

จากลักษณะการพองตัวของตะกอนกะทิ ทั้งที่คล้ายคลึงกับตะกอนนม และที่แตกต่าง ทำให้ทราบว่าส่วนประกอบของตะกอนมีผลต่อการพองตัว และการล้างตะกอน แม้ว่าส่วนประกอบนั้นอาจไม่มีผลต่อการก่อตัวของตะกอนก็ตาม ดังนั้นเมื่อพิจารณาการดำเนินงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตะกอนนมมาประยุกต์ใช้กับกรณีของตะกอนกะทิ ควรเน้นงานวิจัยที่เป็นการศึกษาโดยใช้ตะกอนที่เกิดจากนม หรือเวย์โปรตีน (whey protein) ซึ่งมีค่าไขมันสูงกว่าตะกอนนมจำลองที่สร้างจากโปรตีน (เช่น  $\beta$ -Lg) เพียงอย่างเดียว

สำหรับแนวทางในการล้างตะกอนกะทินั้น พบว่าการแช่ตะกอนในน้ำ และในสารละลาย NaOH ช่วยให้ตะกอนอ่อนนุ่ม และชะล้างออกจากพื้นผิวสเตนเลสได้ง่ายขึ้น แต่แรงดันน้ำที่ใช้ในการชะล้างตะกอนเปรียบเทียบระหว่างตะกอนที่ไม่ได้ถูกแช่ ตะกอนที่ถูกแช่ในน้ำ และตะกอนที่ถูก

แช่ในสารละลาย NaOH มีค่าไม่แตกต่างกันมาก ดังนั้นการล้างตะกอนกะทิที่ในโรงงานนิยมทำโดยแช่ตะกอนในสารเคมีก่อนล้างด้วยการฉีดน้ำนั้น สามารถลดขั้นตอนให้เหลือเพียงการฉีดน้ำเพียงขั้นตอนเดียว 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., Sbail, 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  $\beta$ -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.