

ความเป็นไปได้ในการศึกษาประสิทธิภาพการล้างตะกรันด้วยการวิเคราะห์จากภาพ

POSSIBILITY OF USING IMAGE ANALYSIS TO QUANTIFY CLEANING OF DEPOSITS

ตติพร ชูตระกูล¹ ศุภากร เลิศรวมพร¹ มณีนัฐกาญจน์ ทองเปี่ยม¹ Y.M. John Chew² และ ภณิดา ซ้ายขวัญ^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120

²ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยแห่งบาธ BA2 7AY สหราชอาณาจักร

Tatiphon Chutrakul¹, Supakorn Lertruamporn¹, Mnisanutkan Thongpiam¹, Y.M. John Chew²,
and Phanida Saikhwan^{1*}

¹Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Pathumthani, 12120

²Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Bath, Bath, BA2 7AY, UK

*E-mail: psaikhwan@engr.tu.ac.th

Received: 2019-07-23

Revised: 2020-11-14

Accepted: 2021-05-31

บทคัดย่อ

การล้างตะกรันที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมมีค่าใช้จ่ายสูง การหาเงื่อนไขการล้างที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดจึงมีความสำคัญ อย่างไรก็ตามเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาการล้างตะกรันในปัจจุบันยังมีข้อจำกัด เช่น ใช้ระยะเวลานาน เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้การวิเคราะห์รูปภาพด้วยโปรแกรม Image J มาประเมินประสิทธิภาพการล้าง โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์รูปภาพกับผลที่ได้จากการใช้เทคนิค FDG หรือการชั่งน้ำหนัก จากการศึกษาการล้างตะกรัน 3 ระบบ คือ 1) ตะกรันกะทิจากกระบวนการพาสเจอร์ไร้น้ำกะทิ 2) คราบกะทิบนผ้า และ 3) ตะกรันโปรตีนนมบนนมเมมเบรน พบว่าประสิทธิภาพการล้างที่ได้จากการวิเคราะห์รูปภาพนั้นใกล้เคียงกับผลที่ได้จากเทคนิคที่ใช้ในปัจจุบัน และได้ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขต่าง ๆ ต่อประสิทธิภาพการล้างในทิศทางเดียวกัน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้การวิเคราะห์รูปภาพแทนเทคนิคที่ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาและค่าใช้จ่าย เป็นประโยชน์อย่างมากโดยเฉพาะในกรณีที่ต้องศึกษาเงื่อนไขการล้างหลายเงื่อนไข อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ภาพมีข้อจำกัด เช่น หากตะกรันฝังตัวในรูพรุนทำให้มองไม่เห็นจากภาพถ่าย ในกรณีนี้อาจใช้การวิเคราะห์ภาพเพื่อหาเงื่อนไขที่ให้ประสิทธิภาพการล้างค่อนข้างสูง แล้วนำเงื่อนไขเหล่านี้ไปศึกษาเพิ่มเติมด้วยเทคนิคอื่น

คำสำคัญ: การล้าง การวิเคราะห์จากภาพ การชั่งน้ำหนัก ตะกรัน ฟลูอิดไดนามิกเกจจิ้ง

ABSTRACT

Cost of cleaning of fouling layers from equipment surfaces is large. Hence, an optimisation of cleaning process is vital. Nevertheless, the techniques commonly used to study cleaning have

limitations such as time-consuming, etc. Hence, this work aimed to investigate the possibility of using image analysis (Image J) to quantify cleaning efficiencies of 3 systems: (i) coconut milk foulants found in a pasteurization process (ii) coconut milk foulants on fabric and (iii) milk foulants found on membrane. It was found that cleaning efficiencies from the image analysis was similar to that obtained from the traditional methods. Moreover, similar relationship between cleaning conditions and cleaning efficiencies were obtained. Therefore, image analysis could replace the traditional evaluation method. Time and cost used in the cleaning study can be reduced and this is beneficial when several cleaning conditions must be investigated. Nevertheless, there was limitation of using the image analysis when fouling particles could penetrate inside the pores; they could not be seen from the image. In this case, image analysis can still be used to narrow down conditions that give high cleaning efficiencies. These conditions then are studied further using the traditional methods.

Keywords: cleaning, image analysis, gravimetric method, fouling, fluid dynamic gauging (FDG)

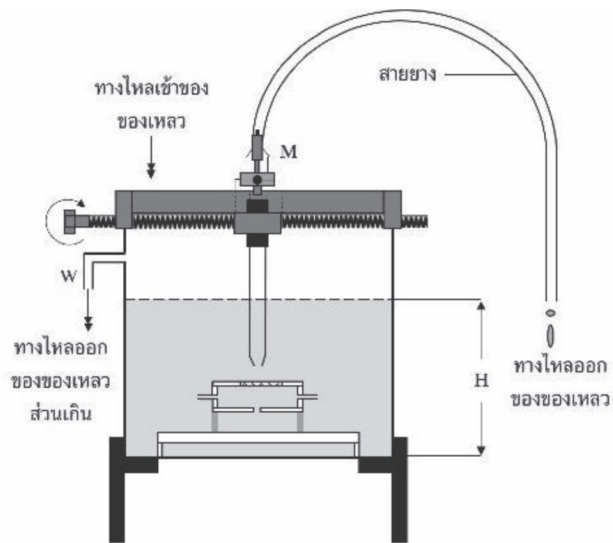
บทนำ

การล้างตะกอนที่เกิดในกระบวนการทางอุตสาหกรรมเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากตะกอนที่เกิดขึ้นอาจเป็นแหล่งสะสมของเชื้อจุลินทรีย์ และลดประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือในอุตสาหกรรม การล้างตะกอนมักจะทำโดย 2 วิธี คือ วิธีทางเคมี และวิธีเชิงกล โดยในกระบวนการล้างอาจใช้วิธีทางเคมีทำให้ตะกอนอ่อนตัวก่อนจากนั้นจะล้างตะกอนด้วยวิธีเชิงกล อย่างไรก็ตามวิธีเชิงกลอาจทำลายพื้นผิวของอุปกรณ์ได้ ส่วนการใช้สารเคมีนั้นจำเป็นต้องหาเงื่อนไขในการล้างที่เหมาะสม ซึ่งเงื่อนไขนี้มีความเฉพาะเจาะจงต่อชนิด ลักษณะตะกอน และสารที่ใช้ในการล้าง การล้างด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสมจะช่วยลดปริมาณสารเคมี และระยะเวลาที่ใช้ในการล้าง รวมถึงช่วยลดปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการล้างสารเคมีออกจากระบบ ลดปริมาณน้ำเสีย และของเสียที่เป็นสารเคมีอีกด้วย นอกจากนี้การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมยังเป็นสิ่งที่จำเป็นในการพัฒนากระบวนการล้างแบบใหม่ ๆ โดยเฉพาะการล้างที่ใช้สารที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ หรือการไม่ใช้สารเคมีเลย

ในการพัฒนาวิธีการล้างแบบใหม่ วิธีการที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพการล้างนั้นมีความสำคัญอย่างมาก เทคนิคบางอย่างที่ใช้ในการตรวจสอบกระบวนการการล้างนั้นซับซ้อนและใช้เวลามาก ตัวอย่างเช่น การล้างในกระบวนการถ่ายเทความร้อนอาจถูกตรวจสอบโดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวม (Wilson, 2005) และการวัดความต้านทานไฟฟ้าต่อพื้นผิว (Chen et al., 2002) การล้างพื้นผิวที่มีรูพรุนจะถูกวัดโดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน (Porcelli & Judd, 2010; Wang et al., 2017) ไม่นานมานี้เทคนิคฟลูอิดไดนามิกเกจจิง (Fluid Dynamic Gauging: FDG) ถูกนำมาใช้ศึกษาการล้าง โดยเทคนิคนี้สามารถวัดความหนาของตะกอน และแรงที่ต้องใช้ในการชะล้างตะกอน (Chew et al., 2007; Peck et al., 2013) นอกจากนี้เทคนิค FDG ยังสามารถใช้ได้กับตะกอนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวทึบ และพื้นผิวที่มีรูพรุน (Chew, 2004; Chew et al., 2004) อีกวิธีหนึ่งที่ยืมใช้ในการศึกษาการล้างตะกอน คือ การชั่งน้ำหนัก (Gravimetric) โดยใช้สมมติฐานว่าความหนาแน่นของตะกอนมีค่าคงที่ ดังนั้นมวลที่เปลี่ยนแปลงไปจึงแปรผันตรงกับความหนาของตะกอน เทคนิค FDG และการชั่งน้ำหนักเป็นเทคนิคที่มีความซับซ้อนน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ ที่กล่าวมาในข้างต้น และมีค่าใช้จ่ายไม่สูงเพราะอาศัยแค่เครื่องชั่ง สำหรับเทคนิค FDG เป็นเทคนิคแบบไม่สัมผัสในการวัดความหนา และแรงที่ใช้ในการชะล้างตะกอน สามารถวัดได้โดยไม่ต้องนำตะกอนออกจากระบบการ

ทดลองการล้าง และวัดตามเวลาจริง (Tuladhar et al., 2000) ภาพที่ 1 แสดงเทคนิค FDG ประกอบด้วยท่อพลาสติกใสตรงที่ต่อกับปลายที่มีขนาดเล็กกว่า จุ่มในถังบรรจุของเหลว มีสายยางต่อจากท่อออกมาจนถึงของเหลว เทคนิคนี้อาศัยการทำให้เกิดกาลักน้ำ ทำให้ของเหลวในถังไหลผ่านเหนือตะกอนออกมาทางปลายสายยาง ซึ่งอัตราการไหลของของเหลวแปรผันตรงกับระยะห่างจากปลายท่อ FDG ถึงผิวตะกอน (h) จึงคำนวณหาความหนาของตะกอน (δ) จากผลต่างระหว่างระยะที่วัดจากปลายท่อถึงพื้นผิวที่ไม่มีตะกอน (h_0) กับ h หากต้องการศึกษาแรงที่ใช้ในการชะล้างตะกอน ก็จะต้องปรับให้แรงที่ของเหลวกระทำขณะที่ไหลผ่านตะกอนก่อนไหลออกจากท่อเพิ่มมากขึ้น แล้วศึกษาแรงซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลของของเหลว และความหนาของตะกอน ดังนั้นการใช้เทคนิค FDG จึงต้องอาศัยความชำนาญ เพราะต้องเลือกใช้ขนาดของอุปกรณ์ และพารามิเตอร์อื่น ๆ (เช่น อัตราการไหล) ให้เหมาะสมกับชนิดและลักษณะของตะกอน นอกจากนี้อุปกรณ์บางชนิดต้องใช้สารเคมีในการศึกษาปริมาณมาก ในขณะที่การชั่งน้ำหนักอาจให้ผลที่ไม่แม่นยำ ถ้าไม่มีวิธีการควบคุมปริมาณความเข้มข้นบนตะกอนระหว่างการล้างให้คงที่ และ/หรือในกรณีที่ความหนาแน่นของตะกอนเปลี่ยนแปลงมากในระหว่างการล้าง นอกจากนี้เทคนิคการชั่งน้ำหนักยังต้องนำตะกอนเข้า-ออกจากชุดการทดลอง ดังนั้นการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการล้าง โดยเฉพาะในกรณีที่ตะกอนต้องศึกษาหลาย ๆ เงื่อนไข การใช้ FDG หรือ การชั่งน้ำหนัก อาจทำให้ต้องใช้การศึกษาคือเป็นระยะเวลานาน และใช้สารในปริมาณมาก

พบงานวิจัยที่ศึกษาการล้างตะกอนที่ระยะเวลาต่าง ๆ โดยการถ่ายภาพวิดีโอของตะกอนนิ่ง และเก็บภาพที่เวลาต่าง ๆ (Paul et al., 2014) แต่เป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพมากกว่า ในสาขาอื่น ๆ พบมีการนำการวิเคราะห์ภาพแสดงให้เห็นผลของการปรับเปลี่ยนพื้นผิว เช่น การฉายแสงรังสีพลาสมา การทำความสะอาดพื้นผิววัสดุโบราณ (Moropoulou et al., 2007; Laonid et al., 2013) งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้การวิเคราะห์รูปภาพตะกอนก่อน ระหว่าง และหลังการล้างมาหาประสิทธิภาพการล้าง โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการล้างที่วัดด้วยเทคนิค FDG หรือการชั่งน้ำหนักกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์รูปภาพ ตะกอนที่นำมาใช้ศึกษามีตะกอนที่เกิดบนพื้นผิวทึบ (ตะกอนที่เกิดจากการพาสเจอร์ไรส์น้ำกะทิ) และตะกอนที่เกิดบนพื้นผิวที่มีรูพรุน (คราบตะกอนกะทิบนผ้าและตะกอนโปรตีนนมบนเมมเบรน) หากสามารถใช้การวิเคราะห์รูปภาพแทนการใช้เทคนิค FDG หรือการชั่งน้ำหนักได้จะช่วยลดระยะเวลา และสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการล้าง ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างยิ่งในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบเงื่อนไขการทำความสะอาดหลาย ๆ เงื่อนไข

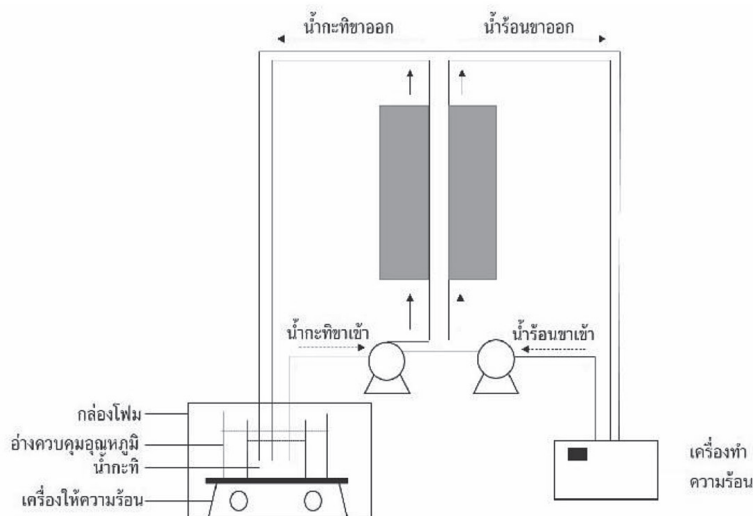


ภาพที่ 1 เทคนิค FDG: H คือ ระดับของของเหลวในแทงก์, M คือ ไมโครมิเตอร์,
W คือ ที่กั้นระบายน้ำเพื่อควบคุมระดับน้ำ

วิธีการ

การศึกษาการล้างตะกอนที่เกิดจากการพาสเจอร์ไร้น้ำกะทิ

ผลการศึกษาการล้างตะกอนกะทิด้วย FDG นำมาจากการงานของ Chutrakul et al. (2019) โดยมีขั้นตอนการเตรียมตะกอนและการล้างพอสังเขป ดังนี้ ตะกอนจำลองเตรียมโดยการใช้ชุดจำลองการพาสเจอร์ไร้น้ำกะทิแบบต่อเนื่อง (ภาพที่ 2) โดยป้อนน้ำกะทิและน้ำร้อน (162.6 มล/นาติ) เข้าสู่ระบบ หลังจากพาสเจอร์ไร้น้ำกะทิเป็นเวลา 20 นาติ ก็จะได้ตะกอนกะทิจากตะกอนที่เกิดขึ้นบนแผ่นสแตนเลสภายในชุดจำลองการพาสเจอร์ไร้น้ำกะทิ



ภาพที่ 2 ชุดจำลองกระบวนการพาสเจอร์ไร้น้ำกะทิแบบต่อเนื่อง

ตารางที่ 1 สภาวะและสารที่ใช้ในการศึกษาการล้างตะกอนที่เกิดจากการพาสเจอร์ไร้น้ำกะทิ

สารที่ใช้ในการล้างในแต่ละขั้นตอน	ความเข้มข้นที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน	ระยะเวลาที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สัญลักษณ์
สารลดแรงตึงผิว : เอนไซม์	1 : 0.06 (กรัม/ลิตร)	60 : 60	55	S : C
สารลดแรงตึงผิว : เอนไซม์	1 : 0.06 (กรัม/ลิตร)	90 : 30	55	S : C
สารลดแรงตึงผิว : เอนไซม์	1 : 0.12 (กรัม/ลิตร)	60 : 60	55	S : C
สารลดแรงตึงผิว : เอนไซม์	1 : 0.12 (กรัม/ลิตร)	90 : 30	55	S : C
โซเดียมไฮดรอกไซด์	1 (%โดยน้ำหนัก)	120	70	NaOH

หมายเหตุ : การล้างโดยสารลดแรงตึงผิว และเอนไซม์ เป็นการล้าง 2 ขั้นตอน แต่การล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นการล้างในขั้นตอนเดียว

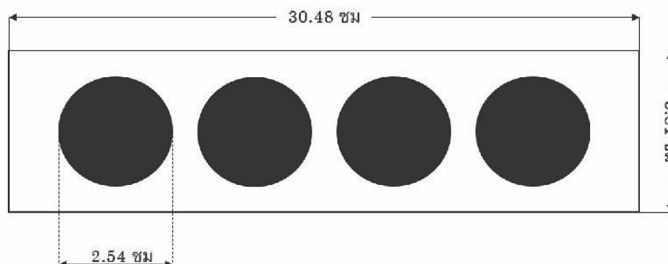
การศึกษาการล้างของ ของ Chutrakul et al. (2019) ได้จำลองการล้างแบบ Cleaning in place (CIP) ตามวิธีของ Paul et al. (2014) โดยนำแผ่นตะกอนตัวอย่างใส่ลงไปในขวดแก้วที่บรรจุด้วยสารทำความสะอาด (500 มิลลิลิตร) แล้วนำขวดไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (Shaking water bath) (55 รอบต่อนาที) กระบวนการล้างที่ศึกษาเป็นการล้างแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้สารลดแรงตึงผิว (LAS24) ในขั้นตอนที่ 1 และเอนไซม์ (Cellucast) ในขั้นตอนที่ 2 เงื่อนไขในการล้างได้จากการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารทั้ง 2 ชนิด และระยะเวลาที่ใช้ในการล้างในแต่ละขั้นตอน เงื่อนไขเหล่านี้ระบุในตารางที่ 1 นอกเหนือจากการล้างด้วยสารลดแรงตึงผิว ตามด้วยการล้างด้วยเอนไซม์ ยังได้ศึกษาการล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในขั้นตอนเดียว ตามเงื่อนไขที่ใช้จริงในกระบวนการล้างในอุตสาหกรรม (ตารางที่ 1)

ประสิทธิภาพการล้างตะกอนกะทิของ Chutrakul et al. (2019) ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีชั่งน้ำหนัก เพราะหากใช้เทคนิค FDG ต้องใช้สารในปริมาณมาก และการล้างด้วยสารที่ศึกษา เมื่อสิ้นสุดกระบวนการล้างตะกอนอ่อนนุ่มมากจนไม่สามารถวัดความหนาของตะกอนด้วยเทคนิค FDG ได้ และแรงที่ใช้ในการล้างตะกอนอาจน้อยกว่าแรงที่ใช้ในการชะล้างในช่วงที่วัดได้ด้วยเทคนิค FDG ทำให้ไม่เห็นความแตกต่างของเงื่อนไขต่าง ๆ ต่อประสิทธิภาพการล้างตะกอน ประสิทธิภาพการล้างด้วยวิธีชั่งน้ำหนักคิดตามสมการที่ 1

$$\text{ประสิทธิภาพการล้าง (\%)} = \frac{m_o - m_f}{m_o} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ m_o และ m_f คือ มวลตะกอนก่อนและหลังล้างตามลำดับ

การศึกษาการล้างตะกรันกะทิบนผ้าใยฝ้าย



ภาพที่ 3 ขนาดวงคราบตะกรันกะทิบนผ้า

ความสนใจในเรื่องของการล้างตะกรันในอีกรูปแบบหนึ่ง คือ การล้างคราบตะกรันบนผ้าเพราะเกี่ยวข้องกับกระบวนการการซักล้างในอุตสาหกรรม และยังสามารถนำมาใช้ศึกษาเป็นตัวอย่างของตะกรันที่เกิดบนพื้นผิวที่มีรูพรุนได้อีกด้วย ตัวอย่างตะกรันเตรียมโดยนำผ้าใยฝ้าย (cotton) ขนาด 12 x 3 นิ้ว ไปวางบนเครื่องให้ความร้อน (50 องศาเซลเซียส, 5 นาที) เพื่อระเหยความชื้นออกจากผ้า จากนั้นนำน้ำกะทิสำเร็จรูปที่ซื้อจากซูเปอร์มาร์เก็ต (Sainsburys, สหราชอาณาจักร) มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสและกวนให้เป็นเนื้อเดียวกัน เติมน้ำมันพืช (ความเข้มข้น 0.05 มล/ลิตร) เพื่อช่วยให้สามารถมองเห็นคราบตะกรันได้ง่ายขึ้น จากนั้นนำวงแหวนทองแดง 4 วง (เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร) วางตามแนวยาวของผ้า (ภาพที่ 3) โดยที่ฝ้ายยังวางอยู่บนเครื่องให้ความร้อน (50 องศาเซลเซียส) แล้วใช้เข็มฉีดยาฉีดตัวอย่างน้ำกะทิตกลงในแต่ละวงจำนวน 1 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 20 นาที

เนื่องจากมวลตะกรันบนผ้าชิ้นค่อนข้างน้อย และระหว่างการล้างผ้าจะดูดซับน้ำไว้ การศึกษาประสิทธิภาพการล้างตะกรันบนผ้าด้วยการชั่งน้ำหนักจึงไม่เหมาะสม การศึกษาการล้างตะกรันกะทิบนผ้าจึงใช้เทคนิค FDG โดยตัวอย่างจะถูกลงไว้ใต้ท่อ FDG (ใช้ปั๊มดูดของเหลวผ่านปลายท่อ 60 มล/นาที) โดยให้ระยะห่างระหว่างปลายท่อ FDG กับผ้าที่มีคราบตะกรันมีหลายค่า ซึ่งทำให้แรงเฉือนที่ของเหลวที่ไหลผ่านปลายท่อ FDG กระทำต่อตะกรันบนผ้ามีหลายค่าไปด้วย (แรงเฉือนแปรผันตรงกับระยะห่างระหว่างคราบตะกรัน และปลายท่อ FDG) จากนั้นวัดความหนาของตะกรันที่เหลืออยู่หลังจากถูกกระทำด้วยแรงเฉือนดังกล่าว เงื่อนไขการล้างที่ศึกษามี 4 เงื่อนไข คือ (1) การล้างด้วยน้ำ (RO: Reverse Osmosis) (2) การล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (0.05 %โดยน้ำหนัก) (3) การล้างโดยใช้ผงซักฟอกชนิด A (มีเฉพาะสารลดแรงตึงผิว) และ (4) ผงซักฟอกชนิด B (มีสารลดแรงตึงผิวและเอนไซม์) (ความเข้มข้น 0.375 %โดยน้ำหนักทั้งชนิด A และ B) เนื่องจากปัจจุบันความสนใจในการลดอุณหภูมิที่ใช้ในการล้างมีมาก จึงศึกษาการล้างคราบจากผ้าที่ 30 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพการล้างภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ คำนวณจากความหนาของตะกรันที่วัดได้ก่อน และหลังการล้างดังสมการที่ 2

$$\text{ประสิทธิภาพการล้าง (\%)} = \frac{\delta_o - \delta_f}{\delta_o} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ δ_o และ δ_f คือ ความหนาของตะกรันก่อนและหลังล้างตามลำดับ

การศึกษาการล้างตะกอนโปรตีนนมบนเมมเบรน

ปัจจุบันมีงานวิจัยหลายงานวิจัยที่ศึกษาการล้างตะกอนบนเมมเบรนโดยไม่ใช้สารเคมี ทั้งนี้เพราะการล้างด้วยสารเคมีส่งผลต่ออายุการใช้งานของเมมเบรน ด้วยเหตุนี้เทคนิคการล้างด้วยไมโครบับเบิล (Microbubble: MB) จึงได้รับความสนใจในปัจจุบัน MB คือ ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กกว่า 100 ไมโครเมตร เมื่อฟองอากาศมีขนาดเล็กลงแรงดันภายในฟองอากาศเพิ่มขึ้นฟองอากาศจึงแตกตัว ทำให้เกิดแรงดันกระทำต่อตะกอน ตะกอนจึงอ่อนนุ่ม หรือถูกชะล้างออกไป Agarwal et al. (2012) ได้ศึกษาการล้างไบโอฟิล์มบนเมมเบรนพบว่าการล้างด้วย MB นั้นให้ประสิทธิภาพการล้างที่ดีกว่าการล้างด้วยการใช้สารเคมี การศึกษาการล้างตะกอนโปรตีนนมบนเมมเบรนในงานวิจัยนี้จึงใช้เทคนิค MB ตะกอนโปรตีนนมบนเมมเบรนเตรียมโดยนํานมพร่องมันเนยที่ซื้อจากซูเปอร์มาร์เก็ต (Fresh, สหราชอาณาจักร) ปริมาณ 300 มิลลิลิตร ไปผสมกับสัฟโฟลว์ 5 หยด แล้วป้อนเข้าสู่ชุดอุปกรณ์การกรองไมโครฟิวเตรชันแบบปิดตาย (Dead-end microfiltration) ที่มีเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลไอดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene-fluoride: PVDF) (ขนาดรูพรุน: 0.1 μm , เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร) ให้ความดัน 1 บาร์ตลอดการกรองเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ส่วนของการศึกษาการล้างนั้นใช้เทคนิค FDG เช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 2. แต่ใช้เงื่อนไขการล้างแตกต่างออกไป โดยมีเงื่อนไขการล้างที่ศึกษา 3 เงื่อนไขดังนี้ (1) การล้างด้วยน้ำ (RO: Reverse Osmosis) (2) การล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (0.5 %โดยน้ำหนัก) (3) การล้างด้วย MB การล้างทุกเงื่อนไขศึกษาที่ 20 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของของเหลวผ่านท่อ FDG อยู่ที่ 500 มล/นาที่ หลังจากกระบวนการล้างเสร็จสิ้นการศึกษาศักยภาพการล้างตะกอนโปรตีนนมบนเมมเบรนจะถูกวิเคราะห์จากความหนาของตะกอนก่อนและหลังล้างตามสมการที่ 2

การศึกษาประสิทธิภาพการล้างตะกอนจากภาพ

ถ่ายภาพพื้นผิวสะอาด พื้นผิวที่มีตะกอนก่อนและหลังการล้าง โดยมีการควบคุมแสงให้เท่ากัน การศึกษาประสิทธิภาพการล้างด้วยการวิเคราะห์ภาพ ทำโดยการใช้โปรแกรม Image J (โดย Wayne Rasband, เวอร์ชัน: ImageJ 1.52a สามารถใช้ได้ฟรี) ในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการล้าง ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ปริมาณตะกอนบนพื้นผิวทั้งก่อนและหลังการล้าง ภาพพื้นผิวที่มีตะกอนและภาพพื้นผิวที่สะอาดจะถูกวิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชันวิเคราะห์อนุภาค (Analyze Particle) ในตรวจสอบอนุภาคบนพื้นผิว ภาพพื้นผิวที่สะอาดจะแสดงเป็นภาพสีขาว (ภาพที่ 4 ก) และโปรแกรมระบุประสิทธิภาพการล้างเท่ากับ 100 ในขณะที่ภาพตะกอนก่อนการล้างจะแสดงเป็นภาพสีดำ (ภาพที่ 4 ข) และโปรแกรมระบุประสิทธิภาพการล้างเท่ากับ 0 ภาพตะกอนที่ถูกล้างด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ เมื่อนำมาวิเคราะห์บนโปรแกรมจะเป็นภาพที่มีจุดดำบนพื้นขาว โปรแกรมจะวิเคราะห์ปริมาณจุดดำเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ถูกล้างเลย และกรณีที่มีตะกอนถูกล้างออกหมด แล้วแสดงค่าออกมาเป็นตัวเลข ซึ่งจะอยู่ระหว่าง 0-100 ซึ่งนำมาใช้คิดเป็นประสิทธิภาพการล้างเป็นเปอร์เซ็นต์

ในกรณีตะกอนนมบนเมมเบรนได้มีการถ่ายภาพ SEM (Scanning electron microscope) ที่บริเวณตำแหน่งที่ถูกชะล้าง เนื่องจากการศึกษาการล้างตะกอนนมบนเมมเบรนนิยมใช้ภาพ SEM ในการตรวจสอบความสะอาดของเมมเบรน และลักษณะของเมมเบรนหลังการล้าง



ภาพที่ 4 (ก) ภาพพื้นผิวที่สะอาด (ข) ภาพพื้นผิวตะกรันก่อนการล้าง

ผลการทดลองและวิจารณ์

ประสิทธิภาพการล้างที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพ

ตารางที่ 2 ตัวอย่างภาพตะกรันก่อน และหลังการล้าง และประสิทธิภาพการล้างที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพ

กรณี	ภาพ		ประสิทธิภาพการล้าง	
	ก่อนล้าง	หลังล้าง	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ตะกรันกะทิบนสแตนเลส			93.12	0.29
ตะกรันกะทิบนผ้า			76.00	0.18
ตะกรันนมบนเมมเบรน			99.07	0.37

ตัวอย่างผลที่ได้จากการศึกษาประสิทธิภาพการล้างด้วยการวิเคราะห์ภาพแสดงในตารางที่ 2 โดยประสิทธิภาพการล้างได้จากการที่โปรแกรม Image J วิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของจำนวนจุดดำบนภาพ ตะกรันก่อน และหลังการล้าง ทำให้เห็นว่าการวิเคราะห์จากภาพนอกจากจะแสดงประสิทธิภาพการล้างทั้งในเชิงตัวเลข (จากประสิทธิภาพการล้างที่โปรแกรม Image J คำนวณให้) แล้วยังให้ข้อมูลเกี่ยวกับการล้างในเชิงคุณภาพ เพราะเมื่อเปรียบเทียบภาพของตะกรันก่อน และหลังการล้าง สามารถมองเห็นได้ว่าการชะล้างตะกรันจะมีการชะล้างได้ไม่เท่ากันในแต่ละบริเวณ เช่น ตะกรันกะทิบนผ้าส่วนใหญ่ที่ถูกชะล้าง คือ บริเวณตรงกลางของตะกรัน ซึ่งอธิบายได้ว่าเป็นเพราะแรงเฉือนของน้ำที่ไหลผ่านตะกรันเข้าสู่ท่อ FDG จะมีแรงกระทำสูงสุดตรงบริเวณตรงกลางของท่อ FDG (Chew et al., 2004) เป็นต้น

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพเทียบกับข้อสรุปที่ได้จากเทคนิคอื่นที่นิยมใช้

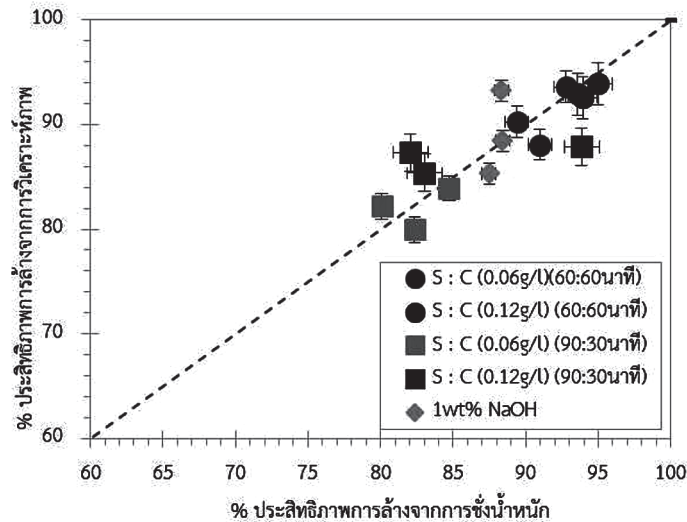
จากการศึกษาการตะกรัน 2 ชนิด คือ ตะกรันกะทิ และตะกรันโปรตีนนม ทั้งบนพื้นผิวที่มีรูพรุน (ผ้าใยฝ้าย และเมมเบรน) และไม่มีรูพรุน (แผ่นสแตนเลส) ได้นำประสิทธิภาพการล้างตะกรัน ที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพ (ภาพถ่ายปกติ (ตะกรันกะทิ ตะกรันนมบนผ้า และเมมเบรน) และภาพจาก SEM (ตะกรันบนเมมเบรน)) เปรียบเทียบกับผลที่ได้

จากการวัดโดย FDG กับการชั่งน้ำหนัก โดยการเปรียบเทียบนี้แสดงให้เห็นในภาพที่ 5-8 โดยมีเส้นประแสดงเส้นตรง $y = x$ (ประสิทธิภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพเท่ากับประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิคอื่น ๆ) พบว่าจุดต่าง ๆ ในภาพที่ 5 และภาพที่ 7-8 อยู่ใกล้เคียงกับเส้นประ แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้การวิเคราะห์ภาพแทนเทคนิคการชั่งน้ำหนัก และ FDG ได้ ในภาพที่ 8 แม้ว่าจุดต่าง ๆ จะอยู่ห่างจากเส้นประมากกว่ารูปอื่น ๆ แต่ก็พบว่าเส้นแนวโน้มที่ได้เป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพ และการใช้เทคนิค FDG โดยพบว่าประสิทธิภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพต่ำกว่าที่วัดด้วยเทคนิค FDG ดังแสดงในภาพที่ 9 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าการวิเคราะห์ภาพในภาพที่ 8 นั้นมาจากภาพถ่าย SEM ซึ่งแต่ละภาพเป็นพื้นที่ขนาดเล็กมาก หากเทียบกับพื้นที่ทั้งหมดของเมมเบรนที่เกิดขึ้น ในขณะที่ผลที่ได้จาก FDG เป็นค่าเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งบนเมมเบรน และไม่สามารถกำหนดจุดที่ถ่ายภาพ SEM ของเมมเบรนก่อนเกิดตะกรัน และหลังการล้างให้เป็นจุดเดียวกันได้ การวิเคราะห์ภาพ SEM ด้วย Image J ซึ่งอาศัยความแตกต่างระหว่างภาพเมมเบรนก่อนเกิดตะกรัน เมื่อเกิดตะกรัน และหลังการล้างจึงเกิดความคลาดเคลื่อน ภาพที่ 10 แสดงให้เห็นว่าภาพเมมเบรนหลังการล้างตะกรันออก (ภาพที่ 10 (ค)) ซึ่งมีรูพรุนที่ค่อนข้างดำเท่ากับที่พบในภาพเมมเบรนก่อนเกิดตะกรัน (ภาพที่ 10 (ก)) อย่างไรก็ตามภาพที่ 5 และภาพที่ 7-8 แสดงให้เห็นว่าไม่ว่าจะใช้ประสิทธิภาพจากการวิเคราะห์ภาพ หรือจากเทคนิคอื่น ๆ ก็จะมีผลของเงื่อนไขการล้างต่อประสิทธิภาพการล้างมีแนวโน้มเดียวกัน จึงสรุปได้ว่าการวิเคราะห์ภาพในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการล้างได้ ซึ่งช่วยลดระยะเวลา และค่าใช้จ่ายในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการล้าง

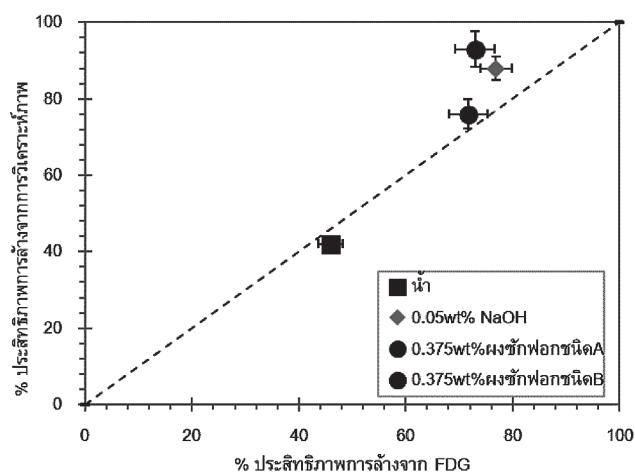
หากพิจารณากรณีการศึกษาการล้างตะกรันที่ใช้วิธีการชั่งน้ำหนักนั้น (ภาพที่ 5) หากต้องการศึกษาผลของระยะเวลาต่อประสิทธิภาพการล้างก็อาจใช้การวิเคราะห์ภาพแทนการชั่งน้ำหนัก ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาในการทดลอง และได้ผลที่ละเอียดมากขึ้นได้ เพราะการชั่งน้ำหนักนั้นจะต้องนำตัวอย่างตะกรันออกจากชุดทดลอง การล้าง ซับสารละลายส่วนเกิน ก่อนไปชั่งน้ำหนัก ทำให้อาจวัดประสิทธิภาพการล้างได้ดีที่สุดประมาณทุก 5 นาทีเท่านั้น แต่หากใช้การวิเคราะห์ภาพแทน จะสามารถถ่ายภาพตัวอย่างตะกรันโดยไม่ต้องนำตัวอย่างตะกรันออกจากชุดทดลอง และอาจถ่ายภาพซ้ำได้ถี่มากกว่าการชั่งน้ำหนัก ช่วยให้ได้อินโฟร์เมชันที่ละเอียดมากกว่า และด้วยขั้นตอนที่ไม่มีความซับซ้อนเหมือนการชั่งน้ำหนัก การใช้การวิเคราะห์ภาพน่าจะช่วยลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการทดลองได้มากกว่า ความได้เปรียบอีกประการของการใช้การวิเคราะห์ภาพ คือ ในกรณีที่ตะกรันแต่ละตำแหน่งถูกชะล้างไม่เท่ากัน การวิเคราะห์รูปภาพสามารถเลือกเปรียบเทียบประสิทธิภาพการล้างของแต่ละตำแหน่งที่สนใจได้ ในขณะที่การชั่งน้ำหนักเป็นการวัดประสิทธิภาพโดยรวมของทุกตำแหน่งของตัวอย่าง

ภาพที่ 6 แสดงให้เห็นข้อจำกัดของการหาประสิทธิภาพการล้างด้วยการวิเคราะห์ภาพ จากรูปจะเห็นว่าเงื่อนไขที่ให้ประสิทธิภาพการล้างสูง (ล้างด้วยด่าง และผงซักฟอกชนิด B) ประสิทธิภาพการล้างจากการวิเคราะห์ภาพจะสูงกว่าประสิทธิภาพที่ได้จากการใช้เทคนิค FDG และทำให้ข้อสรุปของเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการล้างที่ได้จากการพิจารณาประสิทธิภาพจากการวิเคราะห์ภาพกับ FDG แตกต่างกัน ผลที่แตกต่างกันซึ่งสังเกตพบเมื่อประสิทธิภาพการล้างค่อนข้างสูง เป็นเพราะผลการทดลองในภาพที่ 6 เป็นการพิจารณาการล้างตะกรันบนพื้นผิวที่มีรูพรุน (ตะกรันกะทิบนผ้า) ดังนั้นเมื่อประสิทธิภาพการล้างสูงมากพอจนสามารถชะล้างตะกรันที่ผิวหน้าของผ้าไปจนหมด การวิเคราะห์ภาพอาจไม่ทำให้เห็นตะกรันที่ฝังตัวอยู่ในรูพรุน การใช้ภาพที่กำลังขยายมากขึ้น เช่น SEM อาจไม่ใช่วิธีการแก้ปัญหา เพราะการถ่ายภาพ SEM ต้องใช้เวลา และค่าใช้จ่ายสูง และดังที่อภิปรายก่อนหน้านี้แล้วผลว่าการใช้ภาพ SEM ก็มีข้อจำกัดของพื้นที่ที่ถ่ายภาพได้เมื่อเทียบกับพื้นผิวทั้งหมด อย่างไรก็ตามในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในกรณีของตะกรันบนพื้นผิวที่มีรูพรุน อาจยังใช้การวิเคราะห์ภาพเพื่อหาเงื่อนไขให้ประสิทธิภาพการล้างสูงจำนวนหนึ่ง แล้วนำเงื่อนไขนี้

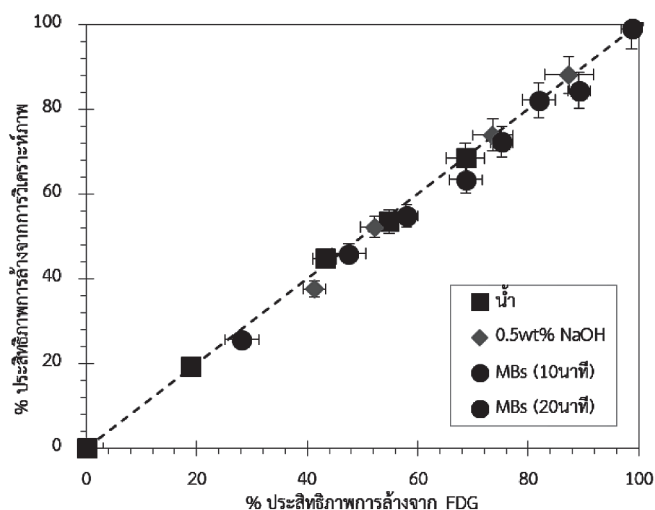
ไปศึกษาต่อด้วยเทคนิคอื่นที่แม่นยำกว่า เช่น FDG ก็จะช่วยลดระยะเวลา ค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในการหาประสิทธิภาพการล้างลงได้



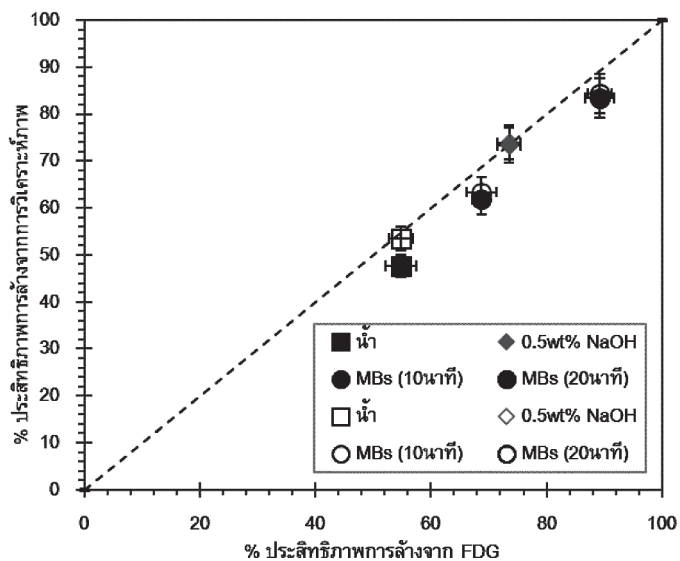
ภาพที่ 5 ประสิทธิภาพการล้างตะกอนกษะทึบบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารลดแรงตึงผิวตามด้วยเอนไซม์เซลลูเลส (S:C) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่วัดโดยการวิเคราะห์ภาพเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพที่ได้จากวิธีชั่งน้ำหนัก (เส้นประแสดงเส้นตรง $y = x$, สัญลักษณ์ต่าง ๆ แสดงเงื่อนไขการล้างดังระบุในตารางที่ 1 แต่ละเงื่อนไขมีจุด 3 จุดเป็นผลจากตะกอนที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทางข้าง ตรงกลาง และทางออก ซึ่งจะมีความเข้มข้นไม่เท่ากัน)



ภาพที่ 6 ประสิทธิภาพการล้างล้างตะกอนกษะทึบนผ้าใยฝ้ายที่วัดโดยการวิเคราะห์ภาพเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพจากเทคนิค FDG (เส้นประแสดงเส้นตรง $y = x$)

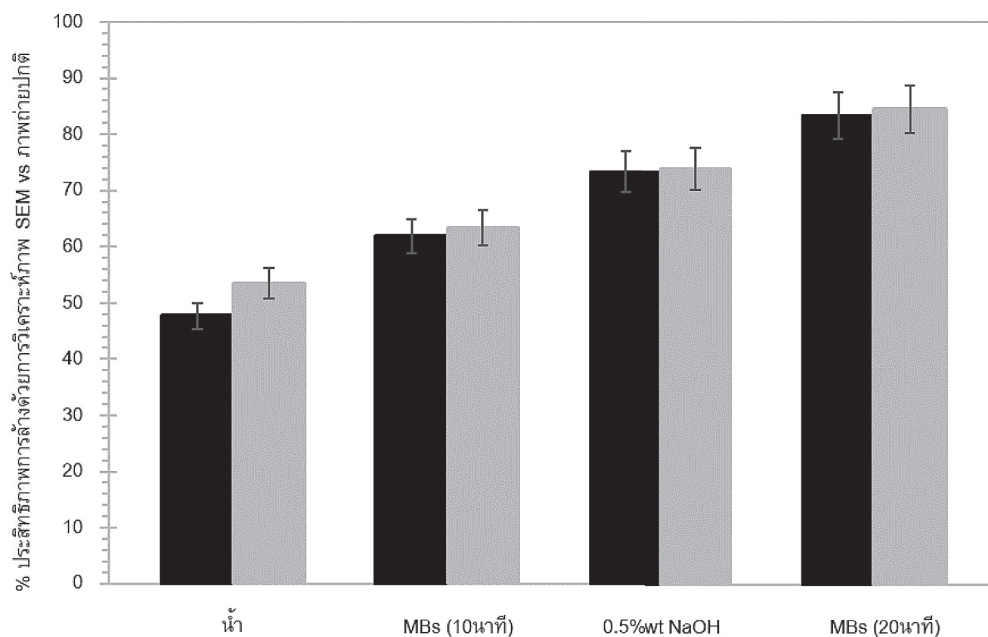


ภาพที่ 7 ประสิทธิภาพการล้างล้างตะกรันนมบนเมมเบรนที่วัดโดยการวิเคราะห์ภาพ
เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพจากเทคนิค FDG (เส้นประแสดงเส้นตรง $y = x$)

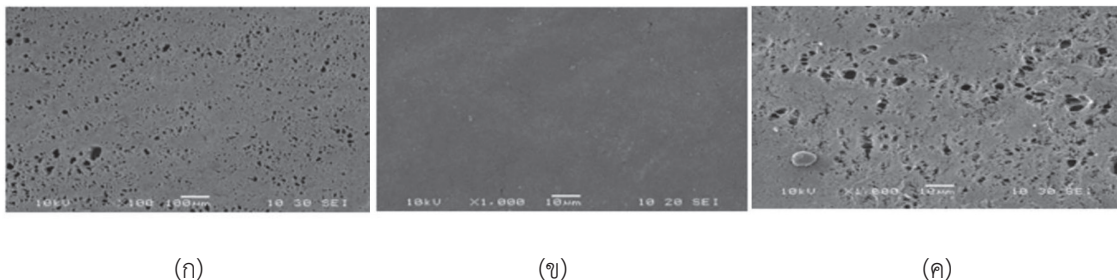


ภาพที่ 8 ประสิทธิภาพการล้างที่วิเคราะห์จากภาพของการล้างตะกรันนมบนเมมเบรน โดยสัญลักษณ์แบบทึบ
มาจากภาพ SEM และสัญลักษณ์แบบโปร่งมาจากภาพถ่ายปกติ

สิ่งที่น่าสนใจ คือ ภาพที่ 7 และ 8 ซึ่งมาจากการศึกษาการล้างตะกัณนมบนเมมเบรน อันเป็นพื้นผิวที่มีรูพรุน แต่ไม่ได้มีข้อจำกัดในการใช้การวิเคราะห์ภาพแทนการใช้ FDG เหมือนกับกรณีตะกัณกะทิบนผ้า ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าขนาดของรูพรุนของเมมเบรนนั้นมีขนาดเล็กกว่าโปรตีนนมอันเป็นองค์ประกอบของตะกัณนมมาก โอกาสที่ตะกัณจะอยู่ในรูพรุนและภาพไม่สามารถถ่ายได้จึงน้อยกว่า นอกจากนี้ความหนาของแผ่นเมมเบรนที่น้อยมาก และสีเมมเบรนมีลักษณะใส ตะกัณที่อยู่ในรูพรุน (ซึ่งมีการย้อมสีตะกัณ) อาจแสดงให้เห็นเป็นสีจาง ๆ บนภาพได้ อย่างไรก็ตามในกรณีนี้อาจได้ภาพที่มีความเข้มของสีไม่เท่ากัน อาจใช้ฟังก์ชันฮิสโตแกรม (Histogram) ของโปรแกรม Image J นำค่าความคมชัด (Contrast) ของความเข้มที่แตกต่างกันบนภาพมาวิเคราะห์ผลได้ ซึ่งจะเหมาะกับกรณีที่ความหนาตะกัณแต่ละตำแหน่งแตกต่างกันมาก หรือเทคนิคการล้างที่ใช้ทำให้ตะกัณแต่ละตำแหน่งถูกชะล้างไม่เท่ากันอีกด้วย



ภาพที่ 9 ประสิทธิภาพการล้างที่วิเคราะห์จากภาพถ่าย(เทา) และภาพ SEM(ดำ)ของตะกัณนมบนเมมเบรน



ภาพที่ 10 ภาพ SEM ของ (ก) เมมเบรนก่อนเกิดตะกัณ (ข) เมมเบรนเมื่อเกิดตะกัณ และ (ค) เมมเบรนที่มีตะกัณหลังการล้าง

สรุป

จากศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้การวิเคราะห์ภาพเพื่อหาประสิทธิภาพการล้างตะกอน พบว่าการใช้เทคนิคการวิเคราะห์จากภาพให้ผล และ/หรือแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับการประสิทธิภาพการล้างที่วัดโดยเทคนิค FDG และการชั่งน้ำหนัก ซึ่งสามารถใช้ได้กับตะกอนที่เกิดบนพื้นผิวที่ไม่มีรูพรุน และมีรูพรุนขนาดเล็ก เช่น เมมเบรน ได้ โดยไม่มีความจำเป็นต้องใช้ภาพจาก SEM ในการวิเคราะห์ในกรณีที่พื้นผิวที่มีตะกอนเป็นพื้นผิวที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ในกรณีตะกอนบนพื้นผิวที่มีรูพรุนขนาดไม่เล็กมาก เช่น ผ้าฝ้าย การวิเคราะห์ภาพจะไม่เหมาะสมเมื่อเงื่อนไขการล้างนั้นให้ประสิทธิภาพการล้างสูง อย่างไรก็ตามสามารถใช้การวิเคราะห์ภาพหาประสิทธิภาพการล้างภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ แทนการใช้เทคนิคอื่น ๆ ได้ โดยอาจนำเงื่อนไขที่ให้ประสิทธิภาพการล้างสูงไปศึกษาต่อยอดด้วยเทคนิคอื่น ๆ การใช้การวิเคราะห์ภาพแทนเทคนิคอื่นที่มีความซับซ้อนมากกว่า มีขั้นตอนมากกว่า หรืออาจต้องใช้สารมากกว่า จะช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสม และอาจช่วยลดปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ การใช้การวิเคราะห์รูปภาพมาหาประสิทธิภาพการล้างจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งเมื่อต้องการเปรียบเทียบเงื่อนไขการทำความสะอาดหลาย ๆ เงื่อนไข หรือต้องการทราบประสิทธิภาพการล้างที่เวลาต่าง ๆ อย่างไรก็ตามหากการล้างเกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่ง แตกต่างกัน อาจต้องพิจารณาการวิเคราะห์รูปภาพแต่ละตำแหน่งประกอบการตัดสินใจหาเงื่อนไขที่เหมาะสมด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้ทุนการศึกษากับนางสาวตติพร ชูตระกูล และภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยแห่งบาร ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- Agarwal, A., Xu, H., Ng, W.J., & Liu, Y. (2012). Biofilm detachment by self-collapsing air microbubbles: a potential chemical-free cleaning technology for membrane biofouling. **Journal of Materials Chemistry**, 22(5), 2203-2207.
- Chew, J.Y.M. (2004). **Development of fluid dynamic gauging for cleaning studies**. Ph.D.Thesis, University of Cambridge, UK.
- Chew, J.Y.M., Paterson, W.R., & Wilson, D.I. (2004). Fluid dynamic gauging for measuring the strength of soft deposits. **Journal of Food Engineering**, 65(2), 175-187.
- Chew, Y.M.J., Paterson, W.R., & Wilson, D.I. (2007). Fluid dynamic gauging: A new tool to study deposition on porous surfaces. **Journal of Membrane Science**, 296(1-2), 29-41.
- Chen, X.D., Li, D.X.Y., Lin, S.X.Q., & Özkan, N. (2002). On-line fouling/cleaning detection by measuring electric resistance-equipment development and application to milk fouling detection and chemical cleaning monitoring. **Journal of Food Engineering**, 61(2), 181-189.
- Chutrakul, T., Rangton, N., Daochot,R., Sattayathitikul, N., & Saikhwon.P. (2019) Enzyme-based integrated solution to cleaning of coconut milk foulants. **Food and Bioproducts Processing**, 113, 93–100.

- Ioanid, E.G., Ioanid, A., Goras, B.T., & Goras, L. (2013) Assessment of the cleaning effect of HF cold plasma by statistical processing of photographic image. **Measurement**, **46**, 2569-2576.
- Moropoulou, A., Delegou, E.T., Vlahakis, V., & Karaviti, E. (2007). Digital processing of SEM images for the assessment of evaluation indexes of cleaning interventions on Pentelic marble surfaces. **Materials Characterization**, **58**(11-12), 1063-1069.
- Paul, T., Jana, A., Das, A., Mandal, A., Halder, S.K., Das Mohapatra, P.K., & Mondal, K.C. (2014). Smart cleaning-in-place process through crude keratinase: an eco-friendly cleaning techniques towards dairy industries. **Journal of Cleaner Production**, **76**, 140-153.
- Peck, O.P.W., Bird, M.R., Bolhuis, A., & Chew, Y.M.J. (2013). **Application of fluid dynamic gauging in the characterisation and removal of biofouling deposits**, pp.(685-694). In Malayeri, Müller-Steinhagen & Watkinson (Ed.), International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning, 9-14 June 2013, Budapest, Hungary: Publico.
- Porcelli, N., & Judd, S. (2010). Effect of cleaning protocol on membrane permeability recovery: A sensitivity analysis. **Journal American Water Works Association**, **102**(12), 78-86.
- Tuladhar, T.R., Paterson, W.R., Macleod, N., & Wilson, D.I. (2000). Development of a novel non-contact proximity gauge for thickness measurement of soft deposits and its application in fouling studies. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, **78**(5), 935-947.
- Wang, X.H., Wang, C., Tang, C.Y.Y., Hu, T.Z., Li, X.F., & Ren, Y.P. (2017). Permeability recovery of fouled forward osmosis membranes by chemical cleaning during a long-term operation of anaerobic osmotic membrane bioreactors treating low-strength wastewater. **Water Research**, **123**, 505-512.
- Wilson D.I. (2005). Challenges in cleaning: recent developments and future prospects. **Heat Transfer Engineering**, **26**(1), 51-59.
-