การดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยเทคโนโลยีพลาสมา

FORMALDEHYDE ADSORPTION IN AQUEOUS SOLUTION USING EGGSHELL TREATED WITH PLASMA TECHNOLOGY

***ศิรประภา ชัยเนตร*[1]*, *รุ่งนภา เขียววิจิตร*[1], *ชาญชัย เดชธรรมรงค์*[2], *ครรชิต เงินคำคง*[1]**

***Siraprapa Chainetr*[1]*, *Rungnapha Khiewwijit*[1], *Chanchai Dechthummarong*[2], *Khanchit Ngoenkhumkhong*[1]**

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

[1]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna.

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

[2]Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna.

**Corresponding author, e-mail: siraprapa@rmutl.ac.th*

***Received:** 25 November 2021; **Revised:** 20 April 2022; **Accepted:** 31 May 2022*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมาเปรียบเทียบกับการใช้เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพตามปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้น (10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระยะเวลาสัมผัส (5-360 นาที) และขนาดของเปลือกไข่ที่ใช้ Sieve no.12, 16 และ 20 ซึ่งได้อนุภาคเปลือกไข่ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ≤1.70 มิลลิเมตร, ≤1.18 มิลลิเมตร และ ≤0.85 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยเป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ และเพื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของฟอร์มัลดีไฮด์ จากผลการศึกษาพบว่า การปรับสภาพเปลือกไข่ด้วยพลาสมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์โดยใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา คือใช้ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้นเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที และใช้เปลือกไข่ขนาด Sieve no.16 ซึ่งส่งผลให้มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์เท่ากับร้อยละ 90.53±0.00 ในขณะที่การใช้เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์เท่ากับร้อยละ 56.17±2.34 รวมถึงยังพบว่า ไอโซเทอมการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์มีความสอดคล้องกับแลงเมียร์ได้ดีกว่าฟรุนดลิช โดยการใช้เปลือกไข่แบบที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา ส่งผลให้มีความสามารถสูงสุดในการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์เท่ากับ 18.203 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าการใช้เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพถึง 3.8 เท่า งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาวิธีการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์โดยใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในการปรับสภาพวัสดุดูดซับที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งอย่างเปลือกไข่ได้อย่าง

มีประสิทธิภาพ และสามารถใช้พัฒนาต่อยอดเพื่อการประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียฟอร์มัลดีไฮด์ในภาคอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: การดูดซับ ฟอร์มัลดีไฮด์ เปลือกไข่ เทคโนโลยีพลาสมา

Abstract

The aim of this study was to compare the adsorption potential of formaldehyde in aqueous solution using treated eggshell with plasma technology to untreated eggshell, based on factors affecting adsorption such as initial concentration of aqueous formaldehyde (10-50 mg/L), contact time (5-360 minutes), and Sieve no.12, 16 and 20 eggshell sizes in which referred to the particle size diameter of eggshell of ≤1.70 mm, ≤1.18 mm and ≤0.85 mm, respectively. All tests were performed in a laboratory scale. Moreover, the isotherm of formaldehyde adsorption was also examined. The results showed that plasma treatment of eggshell could efficiently increase the adsorption potential of formaldehyde. The optimal conditions for formaldehyde adsorption using eggshell treated with plasma technology were a 30 mg/L initial concentration of aqueous formaldehyde, a contact time of 120 minutes, and Sieve no.16 eggshell size. The average formaldehyde adsorption efficiency was 90.53±0.00% under this optimal condition, compared to 56.17±2.34% when using untreated eggshell. Additionally, the results showed that adsorption isotherm was more fitted by Langmuir than Freundlich. The maximum adsorption capacity of eggshell treated with plasma was 18.203 mg/g, which was 3.8 times higher than the capacity of untreated eggshell. This study provided a development of efficient adsorption of formaldehyde by using advanced technology for modifying absorbent in which focused on the use of wastes, such as eggshell. Furthermore, results obtained in this study can be used to further develop the treatment of formaldehyde industrial wastewater in the future.

Keywords: Adsorption, Formaldehyde, Eggshell, Plasma Technology

บทนำ

ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) เป็นสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดหนึ่งและใช้สูตรทางเคมีว่า CH_2O ซึ่งมีกลิ่นฉุน มีฤทธิ์กัดกร่อนและสามารถละลายในน้ำได้ดี โดยสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์หรือฟอร์มาลีนจะเป็นของเหลวไม่มีสีและมีกลิ่นฉุน สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งจากกระบวนการตามธรรมชาติและผลิตได้ทางอุตสาหกรรม ในปัจจุบันมีการนำฟอร์มัลดีไฮด์ไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เช่น ในด้านอุตสาหกรรมเพื่อนำไปผลิตยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสินค้าต่าง ๆ ด้านการเกษตรเพื่อป้องกันจุลินทรีย์ เชื้อราและช่วยเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตร รวมถึงด้านการแพทย์เพื่อใช้ในการฆ่าเชื้อโรค ดับกลิ่น ป้องกันและชะลอการเสื่อมสภาพของเซลล์เนื้อเยื่อ [1-2] อย่างไรก็ตาม ฟอร์มัลดีไฮด์จัดเป็นสารก่อมะเร็ง โดยจัดอยู่ในกลุ่มที่ 1 ที่ทำให้เกิดมะเร็งโพรงจมูกตามองค์การนานาชาติเพื่อการวิจัยมะเร็ง (International Agency for Research on Cancer; IARC) และสำหรับประเทศไทย ฟอร์มัลดีไฮด์จัดเป็นวัตถุอันตรายชนิดที่ 2 ตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 และยังเป็นสารที่ห้ามใช้กับอาหารตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 151 (พ.ศ. 2536) [1] เนื่องจากฟอร์มัลดีไฮด์มีผลทำให้เกิดการระคายเคืองดวงตาและเนื้อเยื่อบุทางเดินหายใจ แสบจมูก เจ็บคอ ปอดอักเสบ และอาจเกิดอันตรายเฉียบพลันเมื่อได้รับฟอร์มัลดีไฮด์ที่ความเข้มข้น 20 พีพีเอ็ม (มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยหากรับประทานเข้าไปจะทำให้

มีอาการปวดท้องรุนแรง คลื่นไส้อาเจียน ปัสสาวะเป็นเลือดและเลือดเป็นกรด นอกจากนั้น ฟอร์มัลดีไฮด์ยังมีผลต่อผิวหนัง เมื่อสัมผัสจะทำให้เกิดการระคายเคืองผิวหนังเป็นผื่นแดง จนถึงผิวหนังไหม้หากสัมผัสโดยตรง [2-3] ด้วยเหตุนี้องค์การอนามัยโลก (World Health Organization; WHO) จึงได้กำหนดค่าปริมาณที่ได้รับประจำวันที่ทนได้ไว้ไม่เกิน 0.15 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัมต่อวัน และยังประมาณการบริโภคสารฟอร์มัลดีไฮด์สำหรับผู้ใหญ่โดยเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 14.0 มิลลิกรัมต่อวัน และสำหรับประเทศไทย ตามประกาศของกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่องขีดจำกัดความเข้มของสารเคมีอันตราย พ.ศ. 2560 กำหนดความเข้มข้นเฉลี่ยตลอดระยะเวลาทำงานปกติของฟอร์มัลดีไฮด์ไว้ไม่เกิน 0.75 พีพีเอ็ม [4]

จากการทบทวนและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าฟอร์มัลดีไฮด์สามารถกำจัดได้โดยใช้เทคนิค เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชั่น การแลกเปลี่ยนไอออน กระบวนการแยกด้วยเมมเบรนและการดูดซับ ซึ่งในปัจจุบันการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยวิธีการดูดซับ จัดเป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก โดยการดูดซับ คือ กระบวนการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารเคลื่อนที่ไปสัมผัสและเกาะติดแน่นอยู่บนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ เนื่องจากเป็นวิธีที่ดำเนินการง่าย ไม่ซับซ้อน ใช้เงินต้นทุนต่ำ ไม่ต้องใช้สารเคมีสังเคราะห์ที่เป็นอันตรายและสามารถกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3] ดังนั้น การดูดซับจึงเป็นวิธีที่น่าสนใจและควรได้รับการพัฒนาประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับต่อไป เพื่อช่วยลดต้นทุนจากการใช้วัสดุดูดซับสังเคราะห์ที่มีราคาแพงและยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าเปลือกไข่ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับต้นทุนต่ำเพื่อกำจัดโลหะหนักและสารเคมี เช่น โครเมียม ทองแดงและอะลูมิเนียม เพราะเปลือกไข่มีรูพรุนที่ผิวจำนวนมาก จึงมีความสามารถในการดูดซับได้สูง [5] อีกทั้งยังเป็นการนำเปลือกไข่ซึ่งจัดเป็นของเหลือทิ้งในแต่ละปีเป็นจำนวนมากกลับมาใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะไข่ไก่ที่จัดเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตอาหารทั้งในระดับอุตสาหกรรมและครัวเรือน ซึ่งหากไม่มีการกำจัดอย่างถูกวิธี จะมีผลทำให้เกิดการเน่าเสียจนกระทบต่อระบบนิเวศ มีผลกระทบสุขภาพของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ และยังมีผลต่อการเพาะปลูกซึ่งเกิดจากการที่เปลือกไข่ทำให้ดินเกิดสภาวะเป็นด่าง [5-6] นอกจากนั้นยังพบว่า มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาวิธีการปรับสภาพวัสดุดูดซับ เช่น การใช้เทคโนโลยีพลาสมาเพื่อปรับสภาพเปลือกไข่ ซึ่งสามารถปรับสภาพเปลือกไข่ได้อย่างมีประสิทธิภาพและส่งผลให้มีประสิทธิภาพการดูดซับสารเคมี เช่น ฟลูออไรด์ ได้สูงกว่าการใช้เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ [7] โดยการใช้เทคโนโลยีพลาสมาจัดเป็นวิธีที่ปลอดภัย ดำเนินการง่าย รวดเร็วและไม่ต้องใช้สารเคมีที่เป็นอันตราย ทั้งนี้เนื่องจากเป็นวิธีที่อาศัยหลักการฉายพลาสมาซึ่งประกอบไปด้วยไอออนบวก ไอออนลบและอนุมูลอิสะต่าง ๆ ที่อยู่ในสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้า จนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วกับโครงสร้างทางเคมีของผิววัสดุ แต่ไม่ทำให้คุณลักษณะดั้งเดิมของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป [8-9] ซึ่งจากการศึกษาของ Lee et al. [10] พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับของเหล็กไอออน (Fe^{2+}) ในสารละลายโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเทคโนโลยีพลาสมามีค่าสูงมากกว่าการใช้ถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพถึง 3.8 เท่า ด้วยเหตุนี้ คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดและสนใจในการพัฒนาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์โดยใช้เทคโนโลยีพลาสมาในการปรับสภาพเปลือกไข่เพื่อนำผลการวิจัยไปใช้พัฒนาต่อยอดอย่างยั่นยืนและแนะนำให้แก่โรงงานอุตสาหกรรมและผู้ที่สนใจต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมาเปรียบเทียบกับการใช้เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ตามปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้น ระยะเวลาสัมผัสและขนาดของเปลือกไข่ที่ใช้

2. เพื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของฟอร์มัลดีไฮด์โดยใช้เปลือกไข่ทั้งที่ปรับสภาพด้วยพลาสมาและที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์

สารเคมีที่ใช้คือ สารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก (BioGnost, Croatia) โดยเตรียมสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ที่มีความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์เท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงกับตัวอย่างน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีฟอร์มัลดีไฮด์ปนเปื้อนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตเส้นใยสังเคราะห์โพลีเอสเตอร์และพลาสติก ได้แก่ เอทิลีนออกไซด์และเอทิลีนไกลคอล [11] จากนั้นนำสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ที่เตรียมไว้ไปปรับค่าความเป็นกรด-ด่างหรือพีเอช (pH) ให้เท่ากับ 7.0 ซึ่งเป็นค่าพีเอชเฉลี่ยที่พบได้ตามแหล่งน้ำธรรมชาติส่วนใหญ่ และเป็นระดับค่าพีเอชที่สามารถพบได้เมื่อมีน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ นอกจากนั้น การกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายด้วยวิธีการดูดซับที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7.0 ส่งผลทำให้สามารถกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [11-12]

2. เปลือกไข่ที่ใช้ในการศึกษา

เปลือกไข่ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นเปลือกไข่ที่ได้จากไข่ไก่ ซึ่งวางจำหน่ายในตลาดสดเขตเทศบาลตำบลช้างเผือก จังหวัดเชียงใหม่ โดยนำเปลือกไข่ที่ได้ไปล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออก แล้วจึงนำเปลือกไข่ไปผึ่งให้แห้งและนำไปบดให้เป็นผงละเอียด จากนั้นนำผงเปลือกไข่ไปร่อนด้วยตะแกรงสแตนเลสแยกขนาด (Endecotts Ltd., England) ที่มีขนาดต่างกัน ได้แก่ เบอร์ 12 (Sieve no.12), 16 (Sieve no.16) และ 20 (Sieve no.20) โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องตะแกรงเท่ากับ 1.70 มิลลิเมตร, 1.18 มิลลิเมตร และ 0.85 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งอนุภาคของเปลือกไข่ส่วนที่ร่อนผ่านช่องตะแกรงสแตนเลสจะมีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องตะแกรงตามแต่ละขนาดที่ใช้ ดังนั้น อนุภาคของเปลือกไข่ส่วนที่ผ่านช่องตะแกรงที่ใช้ในการศึกษาจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ≤1.70 มิลลิเมตร, ≤1.18 มิลลิเมตร และ ≤0.85 มิลลิเมตร ที่ขนาดของตะแกรงสแตนเลสที่ใช้เท่ากับ Sieve no.12, 16 และ 20 ตามลำดับ หลังจากนั้นนำเปลือกไข่ส่วนที่ผ่านช่องตะแกรงสแตนเลสแต่ละขนาดไปอบแห้งและเก็บรักษาตามวิธีที่ได้จากการศึกษาที่ผ่านมาของ Chainetr et al. [7] โดยอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำเปลือกไข่ไปทำให้เย็นลงจนมีอุณหภูมิที่ระดับอุณหภูมิห้องด้วยโถดูดความชื้น และเก็บไว้ในโถดูดความชื้นต่อไปเพื่อเตรียมไว้ทำการทดลอง

3. การฉายพลาสมา

ใช้เครื่องผลิตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric Pressure Plasma; APP) แบบไดอิเล็กทริคแบริเออร์ดิสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge; DBD) ซึ่งได้รับการออกแบบและพัฒนามาจากสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดเชียงใหม่ โดยอาศัยหลักการสะสมและคายประจุไอออนบนวัสดุไดอิเล็กทริคด้วยไฟฟ้ากระแสสลับที่ความดันบรรยากาศและความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง โดย การนำเปลือกไข่ขนาด Sieve no.12, 16 และ 20 ที่เตรียมไว้ วางบนขั้วกราวด์เพื่อให้ได้รับพลาสมาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 13 กิโลโวลต์ เป็นระยะเวลา 4 นาที ตามวิธีที่ได้จากการศึกษาที่ผ่านมาของ Chainetr et al. [7] ซึ่งพบว่าเป็นวิธีการปรับสภาพเปลือกไข่ด้วยเทคโนโลยีพลาสมาที่มีประสิทธิภาพและสามารถดูดซับสารเคมี เช่น ฟลูออไรด์ได้ประสิทธิภาพสูงสุด หลังจากนั้นนำเปลือกไข่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยพลาสมาไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อเตรียมไว้ทำการทดลองต่อไป

4. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยใช้เปลือกไข่ตามปัจจัยที่แตกต่างกัน

นำเปลือกไข่ทั้งที่ผ่านการปรับสภาพด้วยพลาสมาและไม่ผ่านการปรับสภาพมาทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลาย โดยดำเนินการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ณ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดเชียงใหม่ และได้ออกแบบการทดลองเป็น 2 ชุดหลัก ได้แก่ ชุดการทดลองที่ใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมาและชุดการทดลองที่ใช้เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยในแต่ละชุดการทดลองหลักได้ดำเนินการเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้น (10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระยะเวลาสัมผัส (5-360 นาที) และขนาดของเปลือกไข่ที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับ (Sieve no.12-20) สำหรับในชุดการทดลองหลักที่ 1 ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์โดยใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมาที่มีขนาดของเปลือกไข่เท่ากับ Sieve no.12, 16 และ 20 โดยในแต่ละขนาดของเปลือกไข่ที่ใช้ ได้ทำการออกแบบการทดลองออกเป็นชุดการทดลองย่อยตามปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทั้งความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้นและระยะเวลาสัมผัส ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยในแต่ละการทดลองทำการทดลองละ 3 ซ้ำ นอกจากนั้น เพื่อเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมากับการใช้เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ จึงได้ทำการทดลองชุดการทดลองหลักที่ 2 เป็นชุดควบคุม เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์โดยใช้เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยได้ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับในชุดการทดลองหลักที่ 1 แต่ใช้เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพแทนเปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา

ภาพที่ 1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายตามปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ในชุดการทดลองที่ใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา

อีกทั้งทางคณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเปลือกไข่ทั้งที่ผ่านการปรับสภาพด้วยพลาสมาและที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) (JSM-6480LV, JEOL, Japan) ที่ระดับสุญญากาศสูง (High vacuum) และความต่างศักย์ (Accelerating voltage) เท่ากับ 10 ถึง 15 กิโลโวลต์ โดยเลือกใช้ขนาดของเปลือกไข่ที่มีผลต่อการเกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์โดยใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา และทำการเปรียบเทียบผลการศึกษาที่ได้กับเปลือกไข่ที่ผ่านไม่การปรับสภาพ

5. วิธีการวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์

การหาปริมาณความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลาย ใช้วิธีการวิเคราะห์ที่อ้างอิงตามการศึกษาของ Fountouli et al. [13] ซึ่งใช้เทคนิค Nash method โดยเป็นปฏิกิริยาระหว่างอะเซตติลอะซิโตน (Acetyl acetone) แอมโมเนีย (Ammonia) และฟอร์มัลดีไฮด์ แล้วจึงทำการวัดปริมาณของ 3,5-ไดอะซิติล-1,4-ไดไฮโดรลูทิดีน (3,5-Diacetyl-1,4-dihydrolutidine) ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 412 นาโนเมตร โดยมีระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ ที่ระดับความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์น้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร [14] จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์โดยใช้สมการที่ (1) [15]

$$\eta = \frac{(C_0 - C_f)\text{x}\,100}{C_0} \qquad (1)$$

โดยที่ η คือ ประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ (ร้อยละ) C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ C_f คือ ความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายที่เหลือหลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

6. วิธีการวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์

การวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของเปลือกไข่กับความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์ที่เหลืออยู่ในสภาวะสมดุล ทั้งนี้เพื่อหาไอโซเทอมที่เหมาะสมและสามารถใช้อธิบายลักษณะการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์โดยใช้เปลือกไข่ที่เกิดขึ้นได้ ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำข้อมูลผลการทดลองที่ได้จากปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา ได้แก่ ปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้นและระยะเวลาสัมผัส โดยทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้นที่ใช้จนถึงระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม ทั้งนี้เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมที่ได้กับชุดการทดลองที่ใช้เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพในเปลือกไข่ทั้งสามขนาด สำหรับการวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ใช้ทั้งแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir) ดังแสดงในสมการที่ (2) และแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich) ดังแสดงในสมการที่ (3) [16]

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{K_L q_m} \qquad (2)$$

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{\text{n}} \log C_e \qquad (3)$$

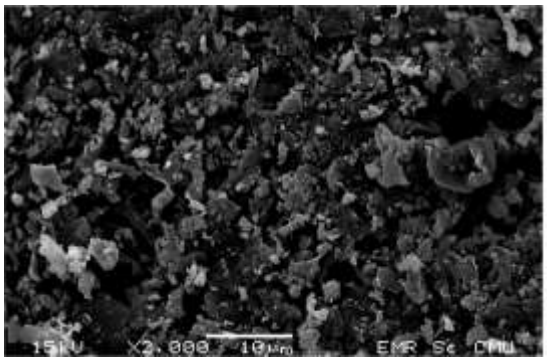
โดยที่ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของวัสดุดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) C_e คือ ความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายที่สภาวะสุมดล (มิลลิกรัมต่อลิตร) q_m คือ ปริมาณสูงสุดของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของวัสดุดูดซับแบบชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม) K_L คือ ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม) K_F คือ ค่าคงที่ของสมการฟรุนดลิช และ $1/\text{n}$ คือความเข้มของการดูดซับ

ผลการวิจัย

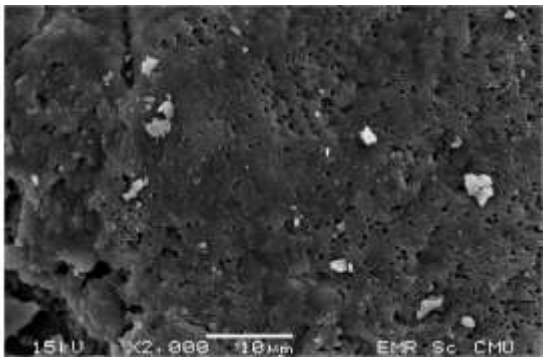
1. ผลการปรับสภาพเปลือกไข่ด้วยเทคโนโลยีพลาสมา

ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของบริเวณพื้นผิวเปลือกไข่ที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับฟอร์มาดีไฮด์ในสารละลายด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) รวมทั้งตัวอย่างของเปลือกไข่ที่บดเป็นผงและนำไปร่อนผ่านช่องตะแกรงสแตนเลสแยกขนาดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ แสดงดังในภาพที่ 2

(ก) ตัวอย่างเปลือกไข่ส่วนที่ร่อนผ่านช่องตะแกรงสแตนเลสแยกขนาด



(ข) เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา



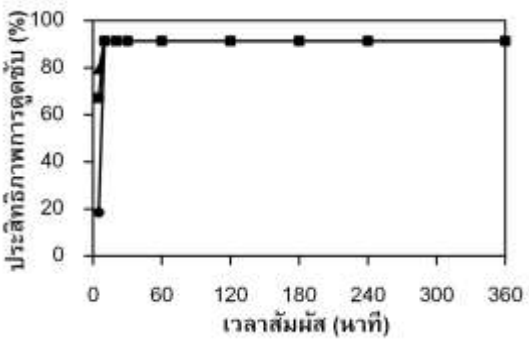
(ค) เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

ภาพที่ 2 ตัวอย่างเปลือกไข่ส่วนที่ร่อนผ่านช่องตะแกรงสแตนเลสแยกขนาดและภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด บริเวณพื้นผิวเปลือกไข่ขนาด Sieve no.16

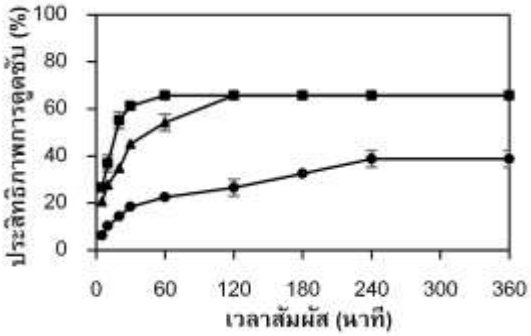
จากภาพที่ 2 แสดงลักษณะสัณฐานของพื้นผิวเปลือกไข่ขนาด Sieve no.16 ทั้งที่ปรับสภาพด้วยพลาสมาและไม่ผ่านการปรับสภาพ ซึ่งเป็นขนาดของเปลือกไข่ที่ให้ผลประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา พบว่าเปลือกไข่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยพลาสมา (ภาพที่ 2ข) มีปริมาณรูพรุนบนพื้นผิวเปลือกไข่มากกว่าเปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ภาพที่ 2ค) โดยปริมาณรูพรุนบนพื้นผิวเปลือกไข่ที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ที่สูงขึ้น ซึ่งจะทำการอภิปรายผลต่อไป โดยสอดคล้องกับการศึกษาของ Arunlertaree et al. [17] ที่พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วด้วยการใช้เปลือกไข่เป็นวัสดุดูดซับสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณรูพรุนต่อหน่วยพื้นที่ผิวเปลือกไข่ที่ใช้

2. ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์

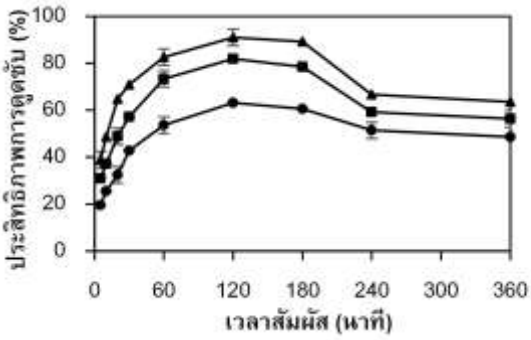
ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยใช้เปลือกไข่ทั้งที่ปรับสภาพด้วยพลาสมาและไม่ผ่านการปรับสภาพตามปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้น ระยะเวลาสัมผัสและขนาดของเปลือกไข่ มีรายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 3 จากผลการศึกษา พบว่าการใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมาเป็นวัสดุดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลาย ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ได้สูงกว่าการใช้เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ แต่อย่างไรก็ตาม ปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ โดยจะทำการอภิปรายผลการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป



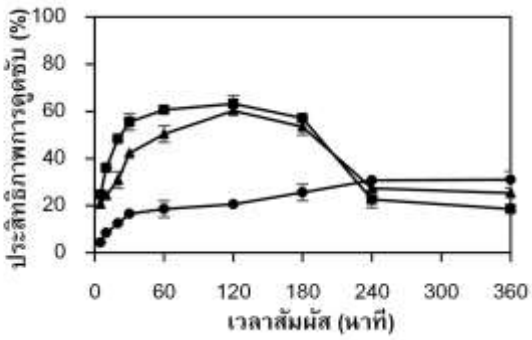
(ก) 10 mg/L, เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา



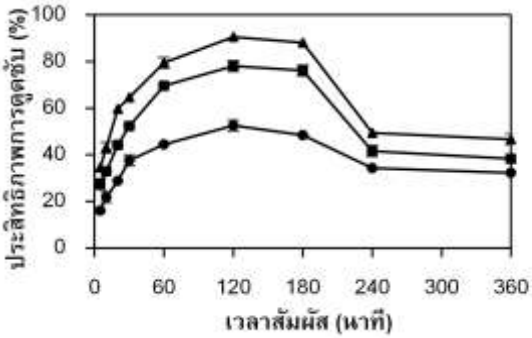
(ข) 10 mg/L, เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ



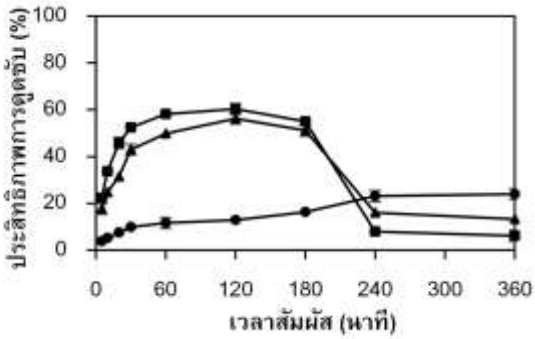
(ค) 20 mg/L, เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา



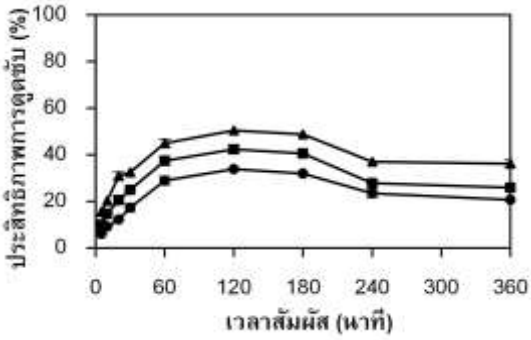
(ง) 20 mg/L, เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ



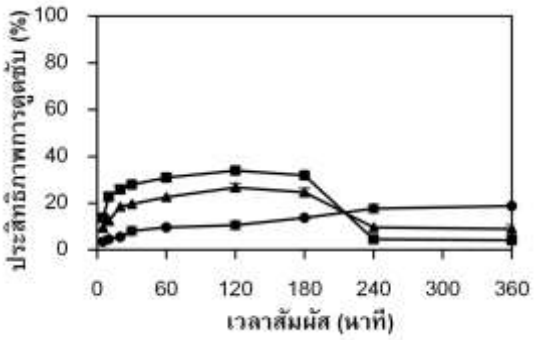
(จ) 30 mg/L, เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา



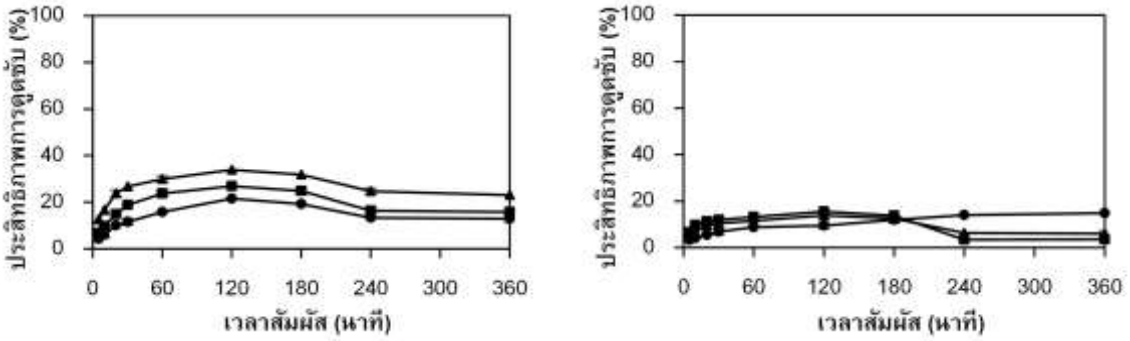
(ฉ) 30 mg/L, เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ



(ช) 40 mg/L, เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา



(ซ) 40 mg/L, เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ



(ฌ) 50 mg/L, เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา (ญ) 50 mg/L, เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

ภาพที่ 3 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ตามความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้นและขนาดของเปลือกไข่: (●) Sieve no.12 (▲) Sieve no.16 และ (■) Sieve no.20 ตามระยะเวลาสัมผัสที่ใช้

2.1 ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้น

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้นที่ใช้ต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์โดยใช้เปลือกไข่ ดังแสดงในภาพที่ 3 พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้น 10 ถึง 30 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์สูงใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะเมื่อใช้เปลือกไข่ขนาด Sieve no.16 ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยพลาสมา พบว่าให้ผลค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์สูงสุด เท่ากับร้อยละ 91.43±0.00, 91.02±3.51 และ 90.53±0.00 ที่ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้นเท่ากับ 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อใช้เปลือกที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ พบว่าเปลือกไข่ขนาด Sieve no.20 ให้ผลค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์สูงสุด เท่ากับร้อยละ 65.72±0.00, 63.22±3.51 และ 60.32±2.34 ที่ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้นเท่ากับ 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์สูงสุดโดยใช้เปลือกไข่ทั้งที่ผ่านการปรับสภาพด้วยพลาสมาและไม่ผ่านการปรับสภาพที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้เป็นค่าประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายที่สูงกว่าการศึกษาของ Wararam et al. [11] ซึ่งรายงานว่าประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว มีค่าเท่ากับร้อยละ 34.30, 25.19 และ 16.13 ที่ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้นเท่ากับ 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม จากผลที่แสดงในภาพที่ 3 พบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ลดลงอย่างมาก เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้นสูงขึ้นที่เท่ากับ 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้น จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้นที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา คือที่ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2 ระยะเวลาสัมผัส

จากภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาสัมผัสที่ใช้มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยใช้เปลือกไข่และเมื่อใช้ระยะเวลาสัมผัสระหว่าง 5 ถึง 120 นาที ส่งผลทำให้ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์สูงขึ้นตามระยะเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้น โดยพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์สูงสุดที่ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที เท่ากับร้อยละ 90.53±0.00 และ 60.32±2.34 เมื่อใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมาขนาด Sieve no.16 และเปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพขนาด Sieve no.20 ตามลำดับ หลังจากนั้น เมื่อใช้ระยะเวลาสัมผัสมากกว่า

120 นาที ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับคงที่หรือลดลงในทุกชุดการทดลอง ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากกระบวนการละลายกลับ (Desorption) ของฟอร์มัลดีไฮด์ออกมาในสารละลาย ยกเว้นในชุดการทดลองที่ใช้เปลือกที่ไม่ผ่านการปรับสภาพขนาด Sieve no.12 ที่พบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึงระยะเวลาสัมผัส 240 นาที และคงที่เมื่อระยะเวลาสัมผัสมากกว่า 240 นาที ดังนั้น จากผลการศึกษาพบว่าการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมาจะเข้าสู่สภาวะสมดุล ที่ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที

2.3 ขนาดของเปลือกไข่

จากการศึกษาผลของขนาดเปลือกไข่ซึ่งใช้เป็นวัสดุดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลาย ดังแสดงในภาพที่ 3 พบว่าขนาดของเปลือกไข่มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ โดยพบว่าเมื่อใช้เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ผลค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์สูงขึ้นตามขนาดของเปลือกไข่ที่ลดลง ตัวอย่างเช่น เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และระยะเวลาสัมผัส 120 นาที ส่งผลให้มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์สูงสุด เท่ากับร้อยละ 12.93±0.00, 56.17±2.34 และ 60.32±2.34 เมื่อใช้เปลือกไข่ขนาด Sieve no.12, 16 และ 20 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และระยะเวลาสัมผัส 120 นาที ส่งผลให้มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์สูงสุด เท่ากับร้อยละ 52.51±2.34, 90.53±0.00 และ 78.09±2.34 เมื่อใช้เปลือกไข่ขนาด Sieve no.12, 16 และ 20 ตามลำดับ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าขนาดของเปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมาที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลาย คือที่ขนาด Sieve no.16

3. ไอโซเทอมการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์

ผลการวิเคราะห์ค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายด้วยการใช้เปลือกไข่ทั้งสามขนาดที่ปรับสภาพด้วยพลาสมาและที่ไม่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้สมการทั้งแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช แสดงดังในตารางที่ 1 โดยได้ทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้นที่ใช้จนถึงระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม ได้แก่ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที จากผลที่แสดงในตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r^2) ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด พบว่ามีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ได้ดีกว่าฟรุนดลิชในทุกขนาดของเปลือกไข่ทั้งที่ปรับสภาพด้วยพลาสมาและที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ตัวอย่างเช่น เมื่อใช้เปลือกไข่ขนาด Sieve no.16 ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา มีค่า r^2 เท่ากับ 0.9998 และ 0.9996 ในสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิช ตามลำดับ และเมื่อใช้เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ มีค่า r^2 เท่ากับ 0.9954 และ 0.9946 ตามลำดับ นอกจากนั้นยังพบว่า การใช้เปลือกไข่ขนาด Sieve no.16 ซึ่งเป็นขนาดของเปลือกไข่ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยการใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา ส่งผลให้มีความสามารถสูงสุดในการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์เท่ากับ 18.203 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยมีค่าสูงกว่าการใช้เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพถึง 3.8 เท่า ซึ่งมีความสามารถสูงสุดในการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์เท่ากับ 3.761 มิลลิกรัมต่อกรัม

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์โดยใช้เปลือกไข่ที่ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้น 5-30 มิลลิกรัมต่อลิตร และระยะเวลาสัมผัส 120 นาที

ขนาดของเปลือกไข่ที่ใช้	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์			ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช		
	q_m	K_L	r^2	n	K_F	r^2
เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา						
Sieve no.12	1.646	0.801	0.9886	3.375	0.740	0.8774
Sieve no.16	18.203	0.062	0.9998	1.075	1.045	0.9996
Sieve no.20	3.002	0.427	0.9705	1.831	0.854	0.9666
เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ						
Sieve no.12	0.526	0.152	0.9491	2.055	0.096	0.8931
Sieve no.16	3.761	0.060	0.9954	1.306	0.243	0.9946
Sieve no.20	6.052	0.036	0.9987	1.174	0.227	0.9982

สรุปและอภิปรายผล

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมาเปรียบเทียบกับการใช้เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพตามปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์โดยใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา คือที่ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากเมื่อใช้ความเข้มข้นต่ำของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้นระหว่าง 10 ถึง 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้อัตราส่วนของจำนวนโมเลกุลฟอร์มัลดีไฮด์ต่อพื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับมีค่าน้อย ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้น แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้นที่สูงมากขึ้น คือที่มากกว่า 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้พื้นที่ผิวซึ่งใช้ในการดูดซับเกิดการอุดตัน ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเปลี่ยนแปลงตามปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้นที่ใช้ โดยประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลงตามความเข้มข้นเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้น [15] สำหรับปัจจัยระยะเวลาสัมผัสที่ใช้พบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาสัมผัสระหว่าง 5 ถึง 120 นาที ทำให้ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์สูงขึ้นตามระยะเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเลือกใช้ระยะเวลาสัมผัสที่ไม่นานเกินไป ทำให้พื้นที่ผิวของเปลือกไข่มีปริมาณตำแหน่งที่สามารถเกิดการดูดซับได้ที่มากพอและความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายมีปริมาณมาก ส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นตามระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จนเข้าสู่สภาวะสมดุลในการดูดซับ โดยพบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาสัมผัสมากกว่า 120 นาที ทำให้มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการดูดซับคงที่หรือลดลง ซึ่งเป็นเพราะตำแหน่งที่สามารถเกิดการดูดซับได้มีปริมาณลดลงและมีความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายลดลง หรืออาจเกิดจากการที่แรงดึงดูดในการยึดเหนี่ยวบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับและสารที่ถูกดูดซับมีค่าอ่อนลง ส่งผลให้สารที่ถูกดูดซับถูกปล่อยกลับออกมาในสารละลาย กระบวนการนี้เรียกว่า การละลายกลับ จึงทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงตามระยะเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้น [18-19] ดังนั้น ที่ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ซึ่งส่งผลให้การดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยใช้เปลือกไข่มีประสิทธิภาพสูงสุดและคุ้มค่าในการจัดการระบบบำบัดน้ำเสีย อีกทั้งจากผลการทดลองยังพบว่า ขนาดของเปลือกไข่ที่ใช้เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญที่มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลาย โดยเมื่อใช้เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ พบว่ามีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์สูงขึ้นตามขนาดของเปลือกไข่ที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการใช้วัสดุดูดซับที่มีอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้น ส่งผลให้มีประสิทธิภาพ

การดูดซับสูงขึ้น [15] อย่างไรก็ตาม การใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา พบว่ามีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์สูงสุดเมื่อใช้เปลือกไข่ขนาด Sieve no.16 โดยอาจเป็นเพราะเปลือกไข่ขนาด Sieve no.20 ซึ่งอนุภาคของเปลือกไข่มีขนาดเล็กที่สุด จะเป็นข้อจำกัดของการปรับสภาพวัสดุที่มีขนาดเล็กมากหรือแบบผงด้วยการใช้เทคโนโลยีพลาสมาในระบบความดันบรรยากาศ ซึ่งยากต่อการควบคุมให้วัสดุไหลเข้าสู่บริเวณที่ผลิตพลาสมาและทำให้ไม่สามารถปรับสภาพวัสดุได้อย่างทั่วถึงทั้งหมด จึงส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง [9] ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอแนะให้ใช้เปลือกไข่ขนาด Sieve no.16 เพื่อใช้ในการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา

นอกจากนั้น ผลจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายด้วยการใช้เปลือกไข่ พบว่าไอโซเทอมการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์มีความสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ได้ดีกว่าฟรุนดลิชทั้งที่ใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมาและที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าลักษณะการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยใช้เปลือกไข่เป็นแบบชั้นเดียวบนพื้นผิววัสดุดูดซับ โดยสอดคล้องกับตัวอย่างการศึกษาของ Wararam et al. [11] ที่รายงานว่ากระบวนการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นไปตามสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ โดยกระบวนการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายด้วยการใช้วัสดุดูดซับ เช่น เปลือกไข่ อาจสามารถอธิบายขั้นตอนการดูดซับที่เกิดขึ้นได้ด้วย 3 ขั้นตอนต่อเนื่องกัน ได้แก่ (1) การเคลื่อนที่ของฟอร์มัลดีไฮด์จากสารละลายผ่านชั้นของเหลวไปสู่ผิวรูพรุนภายนอกของเปลือกไข่ (2) ฟอร์มัลดีไฮด์แพร่เข้าไปภายในรูพรุนของเปลือกไข่ และ (3) เกิดการดูดซับของฟอร์มัลดีไฮด์ภายในรูพรุนของเปลือกไข่ [20] อย่างไรก็ตาม ในการต่อยอดงานวิจัยเพื่อประยุกต์ใช้กระบวนการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมานี้ในระดับอุตสาหกรรมและเพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป คณะผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอแนะให้นำผลการวิจัยที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ไปต่อยอดในการศึกษาการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยการใช้เปลือกไข่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยพลาสมาแบบต่อเนื่องในคอลัมน์บรรจุ (Packed column) ทั้งนี้เพื่อทำให้เข้าใจถึงกระบวนการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริง อีกทั้งยังทำให้ทราบถึงความเสถียรของระบบการบำบัดน้ำเสีย โอกาสในการใช้ซ้ำของเปลือกไข่ และเพื่อหาแนวทางในการกำจัดเปลือกไข่ที่ใช้ดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์แล้วต่อไป เช่น การเผาที่อุณหภูมิสูง (Incineration) หรือการใช้กระบวนการออกซิเดชั่นขั้นสูง (Advanced Oxidation Process; AOP) เป็นต้น [13, 21-22]

ผลจากการวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยเทคโนโลยีพลาสมาสามารถดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์โดยใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา คือที่ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที และใช้เปลือกไข่ขนาด Sieve no.16 ซึ่งส่งผลให้มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์เท่ากับร้อยละ 90.53±0.00 ในขณะที่เมื่อใช้เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์เท่ากับร้อยละ 56.17±2.34 ทั้งนี้เนื่องจากการปรับสภาพเปลือกไข่ด้วยเทคโนโลยีพลาสมาช่วยเพิ่มปริมาณรูพรุนบนพื้นผิวเปลือกไข่ ทำให้มีความสามารถในการดูดซับได้สูงขึ้น อีกทั้งยังพบว่า ไอโซเทอมการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์มีความสอดคล้องกับแลงเมียร์ได้ดีกว่าฟรุนดลิช แสดงให้เห็นว่าลักษณะการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยใช้เปลือกไข่เป็นแบบชั้นเดียวบนพื้นผิววัสดุดูดซับ โดยเมื่อใช้ปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมา ส่งผลให้มีความสามารถสูงสุดในการดูดซับเท่ากับ 18.203 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าการใช้เปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพถึง 3.8 เท่า ดังนั้น เพื่อให้เกิดการพัฒนาวิธีการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายให้มีประสิทธิภาพและยั่งยืนในอนาคต สามารถใช้วัสดุเหลือทิ้งอย่างเปลือกไข่เป็นวัสดุดูดซับ โดยใช้การปรับสภาพเปลือกไข่ด้วยเทคโนโลยีพลาสมาและใช้ปัจจัยที่เหมาะสม

ในการดูดซับ เพื่อมุ่งเน้นให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์และสามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อการประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียฟอร์มัลดีไฮด์ในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณงบประมาณสนับสนุนการวิจัยส่วนหนึ่งจากงบประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ประจำปีงบประมาณ 2563

เอกสารอ้างอิง

[1] Bureau of Quality and Safety of Food. (2018). *Formaldehyde in Foods*. Nonthaburi: Department of Medical Sciences, Ministry of Public Health.

[2] Suradmanee, T. (2018). Hazard of Formaldehyde in Office and Residential Buildings. *EAU Heritage Journal Science and Technology, 12*(2), 130-136.

[3] Suresh, S., and Bandosz, T. J. (2018). Removal of Formaldehyde on Carbon-Based Materials: A Review of the Recent Approaches and Findings. *Carbon, 137*, 207-221.

[4] Department of Labour Protection and Welfare. (2017). *Notification of the Department of Labor Protection and Welfare: Concentration Limits of Hazardous Chemicals*. Volume 134, Special Part 198 Ngor on August 3, B.E. 2560 (2017). Bangkok: Cabinet and Royal Thai Gazette Publishing Office.

[5] Mittal, A., Teotia, M., Soni, R. K., and Mittal, J. (2016). Applications of Egg Shell and Egg Shell Membrane as Adsorbents: A Review. *Journal of Molecular Liquids, 223*, 376-387.

[6] Rattananavinkul, K. (2020). *Egg Price Stabilization in Thailand*. Bangkok: Division of Livestock Extension and Development, Department of Livestock Development.

[7] Chainetr, S., Wongpankamol, P., and Dechthummarong, C. (2019). *Effect of Atmospheric Pressure Plasma Treatment of Eggshell on Fluoride Removal from Water*. In 4th International Symposium on Application of High-Voltage, Plasmas & Micro/Nano Bubbles to Agriculture and Aquaculture. Phra Nakhon Si Ayutthaya: Thailand.

[8] Chu, P. K., Chen, J. Y., Wang, L. P., and Huang, N. (2002). Plasma-Surface Modification of Biomaterials. *Materials Science and Engineering R, 36*, 143-206.

[9] Rosell, N. T. (2007). *Plasma Modification on Carbon Black Surface: From Reactor Design to Final Applications* [Unpublished doctoral dissertation]. Ramon Llull University.

[10] Lee, D., Hong, S. H., Paek, K. H., and Ju, W. T. (2005). Adsorbability Enhancement of Activated Carbon by Dielectric Barrier Discharge Plasma Treatment. *Surface and Coatings Technology, 200*(7), 2277-2282.

[11] Wararam, W., Tangkananuruk, N., and Punsuvon, V. (2009). *Adsorption Formaldehyde in Wastewater from Ethylene Oxide and Ethylene Glycol Production by Activated Carbon*. In 47th Kasetsart University Annual Conference: Natural Resources and Environment. Bangkok: Thailand.

[12] Maimunsomsuk, P. (2010). *Preliminary Analysis of Water and Wastewater*. Bangkok: Department of Industrial Works, Ministry of Industry.

[13] Fountouli, T. V., Chrysikopoulos, C. V., and Tsanis, I. K. (2019). Effect of Salinity on Formaldehyde Interaction with Quartz Sand and Kaolinite Colloid Particles: Batch and Column Experiments. *Environmental Earth Sciences, 78*(5), 1-12.

[14] Helrich, K. (1990). *964.1 Formaldehyde in Maple Sirup: Spectrophotometric Method*. In K. Helrich (Ed.) Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists (pp. 1037-1038). Arlington, Virginia: Association of Official Analytical Chemists, Inc.

[15] Belay, K., and Hayelom, A. (2014). Removal of Methyl Orange from Aqueous Solutions Using Thermally Treated Egg Shell (Locally Available and Low Cost Biosorbent). *Chemistry and Materials Research, 6*(7), 31-39.

[16] Rattanapan, S., and Kongsune, P. (2018). Methylene Blue Adsorption onto Activated Charcoal Prepared from Mangosteen Peel. *Thaksin University Journal, 21*(2), 51-59.

[17] Arunlertaree, C., Kaewsomboon, W., Kumsopa, A., Pokethitiyook, P., and Panyawathanakit, P. (2007). Removal of Lead from Battery Manufacturing Wastewater by Egg Shell. *Songklanakarin Journal of Science and Technology, 29*(3), 857-868.

[18] Darama, S. E., and Çoruh, S. (2020). Investigation of the Removal of Malachite Green and Copper Ions by Dual System Using Natural and Biochar Pea Shells. *Bulletin of Biotechnology, 1*(2), 46-51.

[19] Said, A., Hakim, M. S., and Rohyami, Y. (2014). *The Effect of Contact Time and pH on Methylene Blue Removal by Volcanic Ash*. In 2014 International Conference on Chemical, Biological, and Environmental Sciences. Kuala Lumpur: Malaysia.

[20] Pei, J., and Zhang, J. S. (2011). On the Performance and Mechanisms of Formaldehyde Removal by Chemi-Sorbents. *Chemical Engineering Journal, 167*(1), 59-66.

[21] Mitra, T., Bar, N., and Das, S. K. (2019). Rice Husk: Green Adsorbent for Pb (II) and Cr (VI) Removal from Aqueous Solution-Column Study and GA-NN Modeling. *SN Applied Sciences, 1*(5), 1-15.

[22] Guimaraes, J. R., Farah, C. R. T., Maniero, M. G., and Fadini, P. S. (2012). Degradation of Formaldehyde by Advanced Oxidation Processes. *Journal of Environmental Management, 107,* 96-101.