

การดูดซับน้ำมันหล่อเย็นแบบต่อเนื่องโดยเกลบดัดแปร

Continuous Adsorption of Cutting Fluid by Modified Rice Husk

ปนพร เล็กประเสริฐ รุ่งสินี ชื่นเจริญ และ โกวิท ปิยะมังกลา*

Pranaporn Lekprasert, Rungsinee Chunjaroen and Kowit Piyamongkala*

ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชาราษฎร์ แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science,

King Mongkut's University of Technology North Bangkok,

1518 Pracharat 1 road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok, 10800

E-mail: kowit.p@sci.kmutnb.ac.th, Tel 02-5552000, Fax 02-5878251

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นในลักษณะอิมัลชัน โดยใช้เกลบดัดแปรเป็นตัวดูดซับ การทดลองทำแบบต่อเนื่องในลักษณะไหลขึ้น ศึกษาผลอัตราการไหลในช่วง 1.0 – 4.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 5,816.7 – 15,000.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงของเกลบดัดแปรที่ 4.5 – 18.0 เซนติเมตร ที่อัตราการไหล 1.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ความเข้มข้นเริ่มต้น 5,816.7 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูง 18.0 เซนติเมตร พบว่าเวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ ความสามารถในการดูดซับ และร้อยละการดูดซับมีค่าที่ดีที่สุดเท่ากับ 150 นาที 71.0 มิลลิกรัมต่อกรัม และร้อยละ 88.8 ตามลำดับ สภาวะการทดลองที่ดีที่สุดนำมาใช้น้ำเสียจริง ผลการทดลองยืนยันได้ว่าเกลบดัดแปรสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับน้ำมันหล่อเย็นจากกระบวนการตัดกลึงโลหะในลักษณะขึ้นตรงแบบต่อเนื่องได้ดี เส้นโค้งการดูดซับทำนายจากสมการอดัม-โบฮาร์ท และสมการยูน-เนลสัน พบว่าสมการยูน-เนลสัน สามารถใช้ทำนายเส้นโค้งการดูดซับได้เป็นอย่างดีตลอดการทดลอง

คำสำคัญ: การดูดซับแบบต่อเนื่อง น้ำมันหล่อเย็น เกลบดัดแปร

ABSTRACT

The modified rice husk was used as an adsorbent for removal cutting fluid emulsion. The effects of the flow rate in range 1.0 – 4.0 cm³/min, initial cutting fluid concentration at 5,816.7 – 15,000.0 mg/L and height of adsorbent at 4.5 – 18.0 cm were thoroughly investigated in continuous up-flow adsorption process. At the flow rate 1.0 cm³/min, initial cutting fluid concentration 5,876.1 mg/L and height 18.0 cm, the highest of breakthrough point, adsorption capacity and percent adsorption to adsorb cutting fluid was 150 minutes, 71.0 mg/g and 88.8%, respectively. The best of flow rate and height of adsorbent was conducted to use for removal cutting fluid wastewater. The results confirmed that modified rice husk can be used as an adsorbent for fixed-bed continuous adsorption of cutting fluid in the waste water from turning operation. The breakthrough curves were predicted by Adams-Bohart and Yoon-Nelson models. The Yoon-Nelson model was fitted well to predict the over all of breakthrough curve with the experimental data.

Key words: Continuous adsorption, Cutting fluid, Modified rice husk

1. บทนำ

น้ำมันหล่อเย็นในกระบวนการตัดกลึงโลหะแบ่งออกเป็น 4 ประเภท [1] ได้แก่หนึ่งน้ำมันอย่างเดี่ยวประกอบด้วยน้ำมันแร่และสารเพิ่มคุณภาพ เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการหล่อลื่นสูง เช่นงานกัดเฟืองเกียร์ งานเจาะร่อง สองน้ำมันหล่อเย็นธรรมดา ประกอบด้วยน้ำมันแร่ร้อยละ 60 – 90 การใช้งานต้องผสมน้ำในอัตราส่วน 1:20 ซึ่งจะได้ของเหลวคล้ายน้ำมัน โดยมากใช้กับงานเจียระไน งานตัดกลึงและขึ้นรูปโลหะ สามน้ำมันหล่อเย็นสังเคราะห์ ไม่มีส่วนประกอบของน้ำมันแร่ การใช้งานต้องผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1:20 จะได้ของเหลวใส มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดี เหมาะกับงานเจียระไนที่ต้องการความละเอียดสูง มีความสามารถต้านทานต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ดี และสี่น้ำมันหล่อเย็นกึ่งสังเคราะห์ ประกอบด้วยน้ำมันแร่ร้อยละ 5 – 40 การใช้งานต้องผสมน้ำในอัตราส่วน 1:20 ได้ของเหลวขุ่น ทึบแสง เหมาะกับการใช้งานตัดกลึงโลหะ

ภายหลังจากการใช้งานไปช่วงระยะเวลาหนึ่ง น้ำมันหล่อเย็นจะมีการเสื่อมสภาพ เนื่องจากการเสียดสีระหว่างชิ้นงานกับใบมีด ก่อให้เกิดความร้อน เป็นผลให้แบคทีเรียเจริญเติบโตได้ดี ทำลายสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันหล่อเย็น โดยทั่วไปการกำจัดน้ำมันหล่อเย็นมีการใช้ถังดักไขมันซึ่งเป็นวิธีทางกายภาพ (Physical process) โดยปล่อยน้ำเสียพักไว้ในถังระยะหนึ่ง เพื่อให้ไขมันลอยตัวแยกออกจากน้ำ แล้วจึงตักน้ำมันไปทิ้ง แต่ถ้าเป็นน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำที่ใช้กันในอุตสาหกรรม วิธีการดังกล่าว นำมาใช้ไม่ได้ผล เนื่องจากน้ำมันหล่อเย็นมีการผลิตขึ้นมาเป็นพิเศษ โดยใช้สารตัวกลางที่เรียกว่า อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) เติมผสมในขั้นตอนการผลิต เพื่อให้หยดน้ำมันแขวนลอยเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ ดังนั้นการแยกน้ำมันออกจากน้ำโดยวิธีทางกายภาพจึงใช้ไม่ได้ผล ต้องเลือกวิธีทางเคมี (Chemical process) เข้ามาช่วย โดยใช้ $FeCl_3$ หรือ $Al_2(SO_4)_3$ เป็น Coagulating agent นอกจากนั้น น้ำมันหล่อเย็นยังสามารถกำจัดได้ด้วยการแยกโดยใช้กระบวนการไมโครฟิวเตรชันและ

อัลตราฟิวเตรชัน การเผาโดยใช้ความร้อน โดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [2]

การดูดซับเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถกำจัดน้ำมันหล่อเย็นได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีการทำงานที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ไม่มีปัญหาเรื่องการลอยตัวของน้ำมันหล่อเย็น ไม่ต้องใช้สารเคมีล้างทำความสะอาดน้ำมันหล่อเย็นที่อยู่บนตัวดูดซับ [3] ตัวดูดซับดัดแปรที่มีการนำมาใช้ดูดซับน้ำมันหล่อเย็น ได้แก่ โคลโลไมท์ [4] ขี้เถ้า [5] โคลโคซาน [6] ดินเปรี้ยวสังเคราะห์ [7]

แกลบเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เกิดขึ้นจากการสีข้าวสาร ในปี พ.ศ. 2557 ประเทศไทยมีการผลิตข้าวเปลือกประมาณ 34 ล้านตัน มีแกลบเกิดขึ้นประมาณ 14 ล้านตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 44.2 ของปริมาณข้าวเปลือก [8] แกลบมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ร้อยละ 20 – 25 เซลลูโลสร้อยละ 30 – 40 และลิกนินร้อยละร้อยละ 19 – 47 เมื่อพิจารณาเฉพาะในส่วน of สารอินทรีย์ พบว่ามีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) สูงมาก อยู่ในช่วงร้อยละ 85 – 99 นอกนั้นก็ถือว่าเป็นสารปนเปื้อนในแกลบ ซึ่งมีปริมาณน้อยมาก ได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นต้น แกลบเป็นวัสดุที่ไม่ละลายน้ำ มีความต้านทานต่อสารเคมีและมีขนาดเล็ก การนำแกลบมาใช้เป็นวัสดุดูดซับมีประโยชน์ในด้าน การลดปัญหาสารมลพิษในน้ำเสีย และเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร จึงมีการนำแกลบมาใช้เป็นตัวดูดซับสารมลพิษในน้ำ ได้แก่โลหะหนัก สีย้อม สารพิษ [9]

การดูดซับน้ำมันหล่อเย็น โดยส่วนใหญ่ใช้กระบวนการแยกแบบแบดจ์ ในขณะที่การดูดซับแบบต่อเนื่องมีผู้ทำวิจัยน้อยมาก โดย Viraraghavan และ Mathavan ได้ใช้ถ่านหิน Peat ดูดซับน้ำมันหล่อเย็น [10] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นแบบต่อเนื่องโดยใช้แกลบดัดแปรเป็นตัวดูดซับ เพื่อลดปัญหาการปนเปื้อนของน้ำมันหล่อเย็นที่มีการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ โดยศึกษาผลอัตราการไหลและความ

เข้มข้นของน้ำมันหล่อเย็น ผลความสูงของแถบตัดแปร นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับ และทำนายเส้นโค้งการดูดซับ (Breakthrough curve)

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมตัวดูดซับ

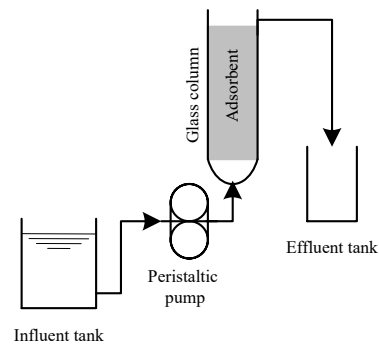
นำแถบปริมาณ 50 กรัม มาล้างด้วยน้ำสะอาด ประมาณ 3 – 4 ครั้ง เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดมาให้หลุดออกไป จากนั้นกรองโดยใช้ตะแกรงกรองขนาดช่องว่าง 1.6 มิลลิเมตร เพื่อแยกแถบออกมา จากนั้นนำไปอบในตู้อบ (Binder รุ่น FD 53) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำที่เกาะติดผิวแถบ ได้แถบแห้ง จากนั้นนำแถบแห้งมาบดให้มีขนาดเล็กกลง โดยใช้เครื่องบดน้ำผลไม้ (Phillips รุ่น HR 2068) ใช้เวลา 2 นาที ได้ผงแถบ จากนั้นนำผงแถบไปร่อนด้วยตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตร โดยผงแถบที่ผ่านตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตรลงมาจะนำไปกวนกับสารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ด้วยเครื่องกวน (Janke&Kunkel รุ่น RW 20) ที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 1 เพื่อแยกผงแถบออกมา จากนั้นนำผงแถบไปตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 3 วัน ได้แถบตัดแปร ใช้เป็นตัวดูดซับ น้ำมันหล่อเย็น มีขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิว เท่ากับ 9.9 นาโนเมตร 7.5×10^{-3} ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 3.0×10^{-2} ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยแถบตัดแปรจัดอยู่ในรูพรุนขนาดกลาง มีค่าอยู่ในช่วง 2 – 50 นาโนเมตร [11]

2.2 การเตรียมน้ำมันหล่อเย็น

เตรียมโดยชั่งน้ำมันหล่อเย็นปริมาณ 15.0 กรัม ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมน้ำกลั่นให้ถึงขีดบอกปริมาตร จากนั้นนำไปปั่นด้วยเครื่องกวน ที่ความเร็ว 1,200 รอบต่อนาที ใช้เวลา 10 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ 15 นาที เพื่อให้ฟองหายไป

2.3 การดูดซับน้ำมันหล่อเย็นแบบต่อเนื่อง

อุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย ถังจ่ายน้ำมันหล่อเย็น เครื่องสูบจ่ายสารเคมี (Peristaltic pump, Master Flex รุ่น L/S 10-600) คอลัมน์แก้ว มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 3.0 เซนติเมตร โดยน้ำมันหล่อเย็นจะถูกสูบเข้าสู่คอลัมน์แก้วในลักษณะไหลขึ้น (Up flow) และไหลออกทางด้านบน โดยเครื่องสูบจ่ายสารเคมี เก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อเย็นที่ไหลผ่านคอลัมน์แก้วทุก ๆ 15 นาที จากนั้นนำมาวัดความเข้มข้นของน้ำมันหล่อเย็น ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (UV-VIS Spectrophotometer, Thermo electron รุ่น Spectronic Genesys 20) ที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร นำผลจากการดูดกลืนแสงมาเทียบกับกราฟมาตรฐาน อ่านเป็นความเข้มข้นของน้ำมันหล่อเย็นที่เหลือภายหลังการดูดซับ



รูปที่ 1 การดูดซับน้ำมันหล่อเย็นแบบต่อเนื่อง

ศึกษาผลอัตราการไหลน้ำมันหล่อเย็น 1.0 – 4.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที (ใช้แถบตัดแปรปริมาณ 20 กรัม) ความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำมันหล่อเย็น 5,816.7 – 15,000.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (ใช้แถบตัดแปรปริมาณ 20 กรัม) และความสูงแถบตัดแปร 4.5 – 18.0 เซนติเมตร (ใช้แถบตัดแปรปริมาณ 6 – 20 กรัม)

สำหรับการดูดซับแบบต่อเนื่อง เส้นโค้งการดูดซับ เป็นการเขียนกราฟจากผลการทดลอง โดยให้แกน x เป็นเวลาที่ใช้ในการดูดซับหรือปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัด และแกน y เป็นค่าความเข้มข้นตัวดูดซับที่เวลาใด ๆ ต่อความเข้มข้นตัวดูดซับที่เวลาเริ่มต้น (C/C_0) โดยเส้น

โค้งการดูดซับควรมีลักษณะคล้ายรูปตัวเอส (S-curve) เมื่อความเข้มข้นตัวถูกดูดซับที่เวลาใด ๆ ต่อความเข้มข้นตัวถูกดูดซับที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.05 เรียกว่าเวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ (Breakthrough time, $C_t/C_0 = 0.05$) ในขณะที่ความเข้มข้นตัวถูกดูดซับที่เวลาใด ๆ ต่อความเข้มข้นตัวถูกดูดซับที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.95 เรียกว่าเวลาสมมูลการดูดซับ (Exhaustion time, $C_t/C_0 = 0.95$) [12] ดังนั้นปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัด เขียนได้ดังสมการที่ 1

$$V_{\text{eff}} = Q \times t_{\text{total}} \quad (1)$$

เมื่อ V_{eff} หมายถึงปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัด (ลูกบาศก์เซนติเมตร) Q หมายถึงอัตราการไหลของน้ำเสีย (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที) และ t_{total} หมายถึงเวลาที่ใช้ในการดูดซับแบบต่อเนื่องทั้งหมด (นาที)

สำหรับการดูดซับแบบต่อเนื่อง เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นถูกป้อนเข้าสู่คอลัมน์ด้วยอัตราการไหลคงที่ ปริมาณตัวถูกดูดซับทั้งหมดภายในคอลัมน์ เขียนได้ดังสมการที่ 2

$$q_{\text{total}} = \frac{Q}{1000} \int_0^t C_{\text{ad}} dt \quad (2)$$

เมื่อ q_{total} หมายถึงมวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่เกิดการดูดซับภายในคอลัมน์ (มิลลิกรัม) C_{ad} หมายถึงความเข้มข้นตัวถูกดูดซับภายในคอลัมน์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ ความเข้มข้นตัวถูกดูดซับที่เวลาเริ่มต้น ลบด้วย ความเข้มข้นตัวถูกดูดซับที่เวลาใด ๆ ($C_0 - C_t$, มิลลิกรัมต่อลิตร) และ t หมายถึงเวลาที่ใช้ในการดูดซับแบบต่อเนื่อง (นาที)

มวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ เขียนได้ดังสมการที่ 3

$$m_{\text{total}} = \frac{C_0 Q t_{\text{total}}}{1000} \quad (3)$$

เมื่อ m_{total} หมายถึงมวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ (มิลลิกรัม)

ดังนั้นความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง เขียนได้ดังสมการที่ 4

$$q_e = \frac{q_{\text{total}}}{m} \quad (4)$$

เมื่อ q_e หมายถึงความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ m หมายถึงมวลตัวถูกดูดซับ (กรัม)

ในขณะที่ร้อยละการดูดซับ เขียนได้ดังสมการที่ 5

$$\% \text{ Total adsorption} = \frac{q_{\text{total}}}{m_{\text{total}}} \times 100 \quad (5)$$

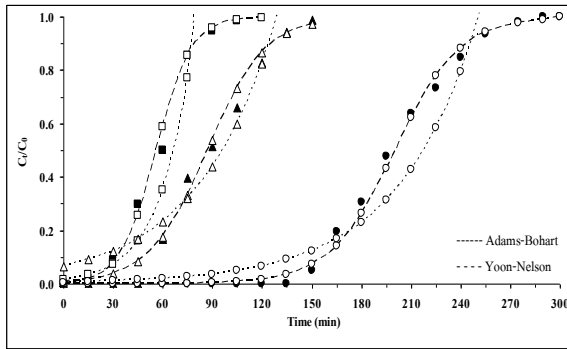
3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 ผลอัตราการไหลน้ำมันหล่อเย็น

ผลการดูดซับน้ำมันหล่อเย็น โดยใช้แกลบคัดแปร ความสูง 18.0 เซนติเมตร ความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำมันหล่อเย็นเท่ากับ 5,816.7 มิลลิกรัมต่อลิตร เปลี่ยนแปลงอัตราการไหลน้ำมันหล่อเย็น ในช่วง 1.0, 2.0 และ 4.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที แสดงในรูปที่ 2 พบว่าที่อัตราการไหล 1.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพมีค่าเท่ากับ 150 นาที โดยแกลบคัดแปรสามารถดูดซับน้ำมันหล่อเย็นได้ดี หลังจากนั้นการดูดซับเริ่มลดลง จนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยมีเวลาสมมูลการดูดซับเกิดขึ้นที่ 275 นาที พิจารณาที่อัตราการไหล 2.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที พบว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีปานกลาง มีเวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพเกิดขึ้นที่ 65 นาที จากนั้นการดูดซับเริ่มลดลงและหมดประสิทธิภาพการดูดซับที่เวลา 135 นาที ในขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 4.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที พบว่าเวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพเกิดขึ้นที่ 35 นาที และเวลาหมดประสิทธิภาพการดูดซับเกิดขึ้นที่ 105 นาที แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลของน้ำมันหล่อเย็นมีผลต่อการดูดซับ โดยอัตราการไหลที่เพิ่มสูงขึ้น น้ำมันหล่อเย็นมีระยะเวลาสั้นในการสัมผัสกับแกลบคัดแปร น้ำมันหล่อเย็นเกาะที่ผิวภายนอกของแกลบคัดแปรได้ปริมาณน้อย เป็นผลทำให้เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ และเวลาสมมูลการดูดซับเกิดในช่วงเวลาที่สั้นลง โดยผลการทดลองที่ได้

เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการใช้ Carbon aerogel ดูดซับสีข้อมไคเร็กซ์เรด 2 [13]

การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลน้ำมันหล่อเย็นจาก 1.0 – 4.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที มีผลทำให้มวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่เกิดการดูดซับภายในคอลัมน์ ความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง และร้อยละการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นของแกลบคัดแปร มีแนวโน้มลดต่ำลงจาก 1,420.8 – 1,060.0 มิลลิกรัม 71.0 – 53.0 มิลลิกรัมต่อกรัม และร้อยละ 88.8 – 45.6 ตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามมวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจาก 1,599.6 – 2,326.7 มิลลิกรัม ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 2 เส้นโค้งการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นของแกลบคัดแปร ที่อัตราการไหล: ● 1.0, ▲ 2.0 และ ■ 4.0 cm³/min

ตารางที่ 1 ความสามารถในการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นแบบต่อเนื่องเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล

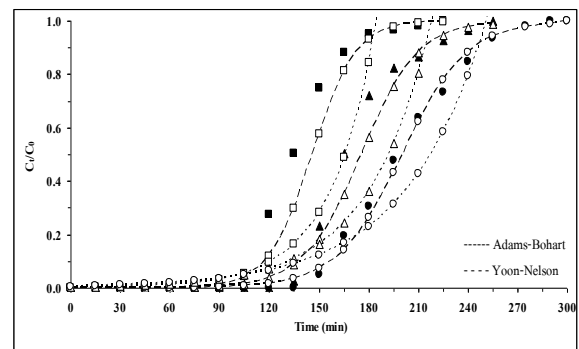
Q (cm ³ /min)	q _{total} (mg)	m _{total} (mg)	q _c (mg/g)	%Adsorption
1.0	1,420.8	1,599.6	71.0	88.8
2.0	1,193.0	1,628.7	59.6	73.2
4.0	1,060.0	2,326.7	53.0	45.6

3.2 ผลความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำมันหล่อเย็น

เส้นโค้งการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นที่อัตราการไหล 1.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และความสูงแกลบคัดแปร 18.0 เซนติเมตร เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันหล่อเย็นที่ 5,816.7, 11,383.3 และ 15,000.0 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงในรูปที่ 3 ผลการทดลองพบว่า เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพมีค่าเท่ากับ 150, 45

และ 15 นาที ตามลำดับ เวลาสมมูลการดูดซับเกิดขึ้นที่ 275, 135 และ 90 นาที ตามลำดับ

พิจารณาประสิทธิภาพการดูดซับแบบต่อเนื่อง เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำมันหล่อเย็นจาก 5,816.7 – 15,000.0 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่เกิดการดูดซับภายในคอลัมน์ มวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ ความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง และร้อยละการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นของแกลบคัดแปร มีแนวโน้มลดต่ำลงจาก 1,420.8 – 1,122.0 มิลลิกรัม 1,599.6 – 1,350.0 มิลลิกรัม 71.0 – 56.1 มิลลิกรัมต่อกรัม และร้อยละ 88.8 – 83.1 ตามลำดับ ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2 การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันหล่อเย็นมีผลทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพลดต่ำลง เนื่องจากการถ่ายโอนมวลน้ำมันหล่อเย็นเกิดขึ้นได้ช้า เป็นผลทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่หรือสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของน้ำมันหล่อเย็นจากน้ำไปยังผิวแกลบคัดแปรมีค่าลดต่ำลง [14]



รูปที่ 3 เส้นโค้งการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นของแกลบคัดแปร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น: ● 5,816.7, ▲ 11,383.3 และ ■ 15,000.0 mg/L

ตารางที่ 2 ความสามารถในการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นแบบต่อเนื่องเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้น

C ₀ (mg/L)	q _{total} (mg)	m _{total} (mg)	q _c (mg/g)	% Adsorption
5,816.7	1,420.8	1,599.6	71.0	88.8
11,383.3	1,302.8	1,536.7	65.1	84.8
15,000.0	1,122.0	1,350.0	56.1	83.1

3.3 ผลความสูงแถบตัดแปร

ผลการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นความเข้มข้นเริ่มต้น 5,816.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราการไหล 1.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เปลี่ยนแปลงความสูงของแถบตัดแปร 4.5, 9.0 และ 18.0 เซนติเมตร ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าเวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพเกิดขึ้นที่ 5, 40 และ 150 นาที ตามลำดับ ในขณะที่เวลาสมมูลการดูดซับเกิดขึ้นที่ 50, 100 และ 275 นาที ตามลำดับ การลดความสูงแถบตัดแปรมีผลทำให้เส้นโค้งการดูดซับเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้ายมือ และมีความชันเพิ่มสูงขึ้น

การเปลี่ยนแปลงความสูงของแถบตัดแปรจาก 4.5 – 18.0 เซนติเมตร มีผลทำให้มวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่เกิดการดูดซับภายในคอลัมน์ มวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ ความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง และร้อยละการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นของแถบตัดแปร มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจาก 255.6 – 1,420.9 มิลลิกรัมต่อกรัม และร้อยละ 87.9 – 88.8 ตามลำดับ ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3 การเพิ่มความสูงแถบตัดแปรมีผลทำให้ระยะเวลาในการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นยาวนานขึ้น และประสิทธิภาพการดูดซับทำได้ดีขึ้น เนื่องจากมีปริมาณ พื้นที่ผิวและตำแหน่งที่ว่างของแถบตัดแปรที่ใช้ในการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นเพิ่มมากขึ้น [15] นอกจากนั้นการถ่ายโอนมวลไปตามแกนมีการกระจายตัวลดต่ำลง เป็นผลทำให้การแพร่ของน้ำมันหล่อเย็นไปยังแถบตัดแปรเกิดได้ดีขึ้น ดังนั้นน้ำมันหล่อเย็นจึงมีเวลายาวนานมากพอที่จะแพร่ไปตามความยาวของคอลัมน์และเกิดการเกาะติดผิวแถบตัดแปร [14]

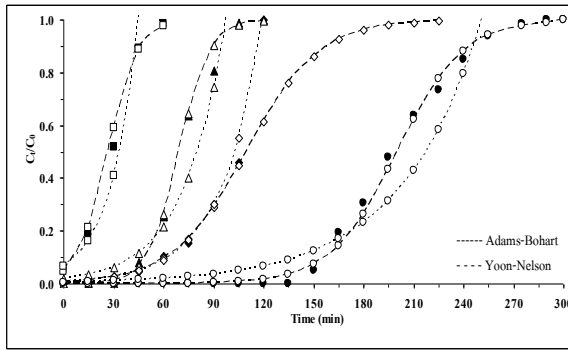
การใช้น้ำเสียจริง (Wastewater) จากกระบวนการตัดกลึงโลหะ ป้อนเข้าสู่กระบวนการดูดซับแบบต่อเนื่อง ที่อัตราการไหล 1.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ใช้แถบตัดแปรความสูง 18.0 เซนติเมตร ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าเวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ และเวลาสมมูลการดูดซับเกิดขึ้นเกิดขึ้นที่ 45 และ 110 นาที ตามลำดับ คำนวณมวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่เกิดการ

ดูดซับภายในคอลัมน์ มวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ ความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง และร้อยละการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นของแถบตัดแปร มีค่าเท่ากับ 561.0 มิลลิกรัม 599.5 มิลลิกรัม 28.1 มิลลิกรัมต่อกรัม และร้อยละ 93.6 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 3

เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นและน้ำเสียจริงที่อัตราการไหล 1.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และใช้แถบตัดแปรที่ความสูง 18.0 เซนติเมตร พบว่าน้ำเสียจริงมีเวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ และเวลาสมมูลการดูดซับ มวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่เกิดการดูดซับภายในคอลัมน์ มวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ และความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง น้อยกว่าน้ำมันหล่อเย็น เนื่องจากน้ำเสียจริงมีการใช้งานซ้ำกันหลายรอบ และผ่านการใช้งานมาเป็นเวลานาน เป็นผลทำให้มีสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสีย ได้แก่ สนิม เศษโลหะ ตลอดจนคราบน้ำมันหล่อลื่นปนอยู่ในน้ำเสียจริงในปริมาณมาก โดยสารปนเปื้อนเหล่านี้จะไปเกาะติดผิวแถบตัดแปร เป็นผลทำให้การดูดซับน้ำเสียจริงของแถบตัดแปรมีปริมาณน้อยกว่าน้ำมันหล่อเย็น

แถบตัดแปรดูดซับน้ำมันหล่อเย็นได้ เนื่องจากมีเซลลูโลส (RH-OH) อยู่ในโครงสร้างของโมเลกุล [16] หลังจากทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริก ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแถบตัดแปร (RH- OH₃²⁺) เป็นผลทำให้แถบตัดแปรมีประจุที่ผิวเป็นบวก เขียนได้ดังสมการที่ 6 แถบตัดแปรดูดซับน้ำมันหล่อเย็น (CF⁻) ซึ่งมีประจุเป็นลบ [6] โดยการทำลายเสถียรภาพของน้ำมันหล่อเย็น เป็นผลทำให้น้ำมันหล่อเย็นเกาะติดผิวแถบตัดแปร เขียนได้ดังสมการที่ 7





รูปที่ 4 เส้นโค้งการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นของแกลบคัดแปร ที่ความสูง: ■ 4.5, ▲ 9.0, ● 18.0 cm และ ◆ การดูดซับน้ำเสียจริง

ตารางที่ 3 ความสามารถในการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นแบบต่อเนื่องเมื่อเปลี่ยนแปลงความสูง

Z (cm)	q _{total} (mg)	m _{total} (mg)	q _e (mg/g)	% Adsorption
4.5	255.6	290.8	42.6	87.9
9.0	512.3	581.7	51.2	88.1
18.0	1,420.9	1,599.6	71.0	88.8
Waste	561.0	599.5	28.1	93.6

3.4 การทำนายเส้นโค้งการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นแบบต่อเนื่องโดยแกลบคัดแปร

สมการอดัม-โบฮาร์ท (Adams-Bohart) ใช้พื้นฐานการดูดซับเกิดขึ้นที่บริเวณผิว มีสมมติฐานที่ว่าอัตราเร็วของการดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงของทั้งความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับที่เหลืออยู่และความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ [17] สมการอดัม-โบฮาร์ท เขียนได้ดังสมการที่ 8

$$\frac{C_t}{C_0} = e^{(k_{AB}C_0t - k_{AB}N_0\frac{Z}{v})} \quad (8)$$

เมื่อ k_{AB} หมายถึงค่าคงที่อดัม-โบฮาร์ท (ลิตรต่อมิลลิกรัม-ชั่วโมง) N_0 หมายถึงความเข้มข้นอิ่มตัว (มิลลิกรัมต่อลิตร) v หมายถึงความเร็วของน้ำมันหล่อเย็นในคอลัมน์ (เซนติเมตรต่อวินาที) และ Z หมายถึงความสูงของแกลบคัดแปรในคอลัมน์ (เซนติเมตร)

สมการที่ 8 สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงสำหรับการหาค่าคงที่อดัม-โบฮาร์ท และความเข้มข้นอิ่มตัว เขียนได้ดังสมการที่ 9

$$\ln \frac{C_t}{C_0} = k_{AB}C_0t - k_{AB}N_0\frac{Z}{v} \quad (9)$$

สมการยูน-เนลสัน (Yoon-Nelson) มีสมมติฐานที่ว่าอัตราเร็วการลดต่ำลงในโอกาสของการดูดซับสำหรับโมเลกุลตัวถูกดูดซับ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับโอกาสการดูดซับของตัวถูกดูดซับ และโอกาสของตัวถูกดูดซับทั้งหมด ประสิทธิภาพการดูดซับบนตัวดูดซับ [18] สมการยูน-เนลสัน เขียนได้ดังสมการที่ 10

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + e^{(k_{YN}(\tau - t))}} \quad (10)$$

k_{YN} หมายถึงค่าคงที่อัตราเร็วยูน-เนลสัน (ต่อชั่วโมง) τ หมายถึงเวลาร้อยละ 50 สำหรับการดูดซับของน้ำมันหล่อเย็นบนเส้นโค้งการดูดซับ (ชั่วโมง)

สมการที่ 10 สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง เขียนได้ดังสมการที่ 11

$$\ln \frac{C_t}{(C_0 - C_t)} = k_{YN}\tau - \tau k_{YN} \quad (11)$$

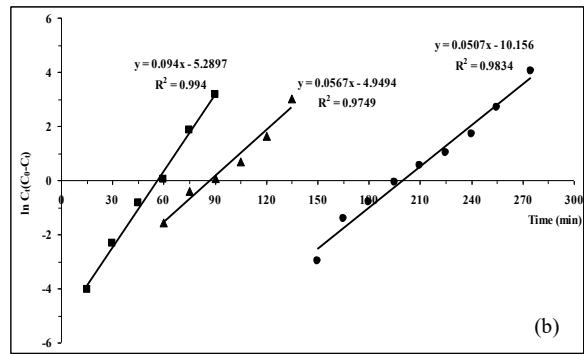
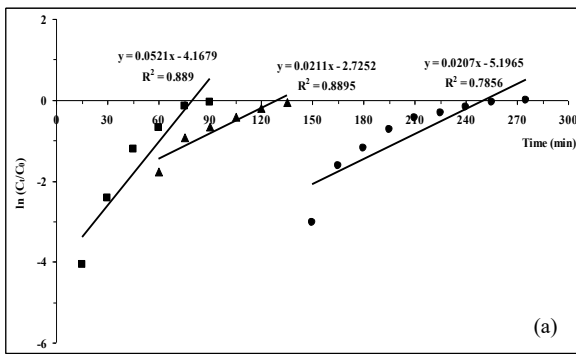
นำผลการใช้แกลบคัดแปรดูดซับน้ำมันหล่อเย็นแบบต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลน้ำมันหล่อเย็น ความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำมันหล่อเย็น ความสูงแกลบคัดแปร และการดูดซับน้ำเสียจริง มาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_t/C_0)$ กับเวลา ตามสมการเส้นตรงอดัม-โบฮาร์ท ดังแสดงในรูปที่ 5 (a), 6 (a) และ 7 (a) ตามลำดับ ค่าคงที่อดัม-โบฮาร์ท และความเข้มข้นอิ่มตัว สามารถหาได้จากความชันและจุดตัดของสมการที่ 9 ตามลำดับ ผลการคำนวณ ดังแสดงใน ตารางที่ 4 ในขณะที่นำผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลน้ำมันหล่อเย็น ความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำมันหล่อเย็น ความสูงแกลบคัดแปร และการดูดซับน้ำเสียจริง มาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_t/(C_0 - C_t))$ กับเวลา ตามสมการเส้นตรงยูน-เนลสัน ดังแสดงในรูปที่ 5 (b), 6 (b) และ 7 (b) ตามลำดับ โดยค่าคงที่

อัตราเร็วยูน-เนลสัน และเวลาร้อยละ 50 สำหรับการดูดซับของน้ำมันหล่อเย็นบนเส้นโค้งการดูดซับ สามารถหาได้จากความชันและจุดตัดของสมการที่ 11 ตามลำดับ ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4 ความถูกต้องของการทำนายเส้นโค้งการดูดซับจากสมการอดัม-โบฮาร์ และสมการยูน-เนลสัน พิจารณาจากค่า Mean Square Error (MSE) ที่เข้าใกล้ศูนย์ [19] เขียนได้ดังสมการที่ 12

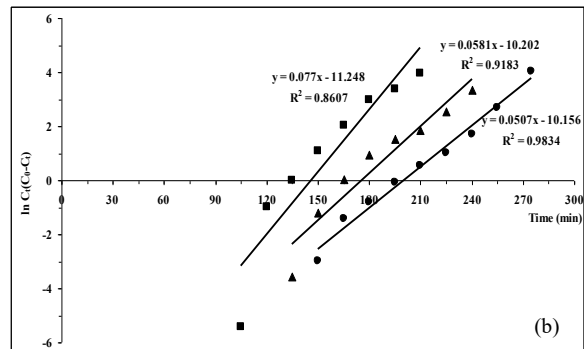
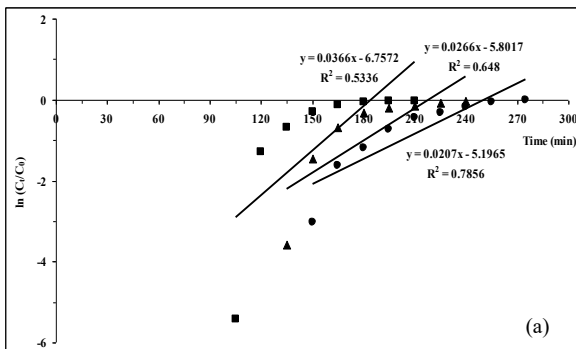
$$MES = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\left(\frac{C_t}{C_0} \right)_{\text{exp}} - \left(\frac{C_t}{C_0} \right)_{\text{cal}} \right)^2 \quad (12)$$

เมื่อ n หมายถึงจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง ผลการทำนายเส้นโค้งการดูดซับน้ำมันหล่อเย็น โดยใช้เกลบคัตแปร เมื่อใช้สมการอดัม-โบฮาร์และสมการยูน-เนลสัน สำหรับการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลน้ำมันหล่อ

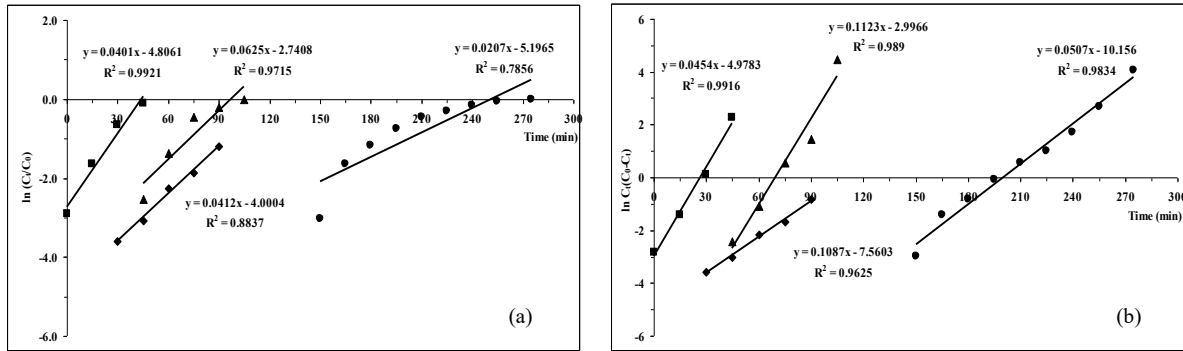
เย็น และความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำมันหล่อเย็น ดังแสดงในรูปที่ 2 – 3 ตามลำดับ ผลการเปลี่ยนแปลงความสูงเกลบคัตแปรและการดูดซับน้ำเสียจริง ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าเส้นโค้งการดูดซับที่ทำนายได้จากสมการยูน-เนลสัน มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าทำนายจากสมการอดัม-โบฮาร์ นอกจากนี้ผลการคำนวณค่า Mean Square Error ที่ได้จากสมการยูน-เนลสัน มีค่าน้อยกว่าสมการอดัม-โบฮาร์ ยกเว้นผลการดูดซับน้ำเสียจริง ที่ค่า Mean Square Error ที่ได้จากสมการอดัม-โบฮาร์ มีค่าน้อยกว่าสมการยูน-เนลสัน แต่อย่างไรก็ตาม สามารถลงความเห็นได้ว่าสมการยูน-เนลสัน เหมาะสมและมีความถูกต้องสำหรับการนำมาทำนายเส้นโค้งการดูดซับแบบต่อเนื่อง ของดูดซับน้ำมันหล่อเย็นและน้ำเสียจริงโดยใช้เกลบคัตแปร



รูปที่ 5 กราฟเส้นตรงตามสมการ: (a) อดัม-โบฮาร์ และ (b) ยูน-เนลสัน ที่อัตราการไหลน้ำมันหล่อเย็น ● 1.0, ▲ 2.0 และ ■ 4.0 cm³/min



รูปที่ 6 กราฟเส้นตรงตามสมการ: (a) อดัม-โบฮาร์ และ (b) ยูน-เนลสัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำมันหล่อเย็น ● 5,816.7, ▲ 11,383.3 และ ■ 15,000.0 mg/L



รูปที่ 7 กราฟเส้นตรงตามสมการ: (a) อัดม-โบฮซาร์ และ (b) ยูน-เนลสัน ที่ความสูงแถบตัดแปร ■ 4.5, ▲ 9.0, ● 18.0 cm และ ◆ น้ำเสียจริง

ตารางที่ 4 ค่าคงที่อัดม-โบฮซาร์ ความเข้มข้นอิมตัว ค่าคงที่อัตราเร็วยูน-เนลสัน เวลาร้อยละ 50 สำหรับการดูดซับ และ Mean Square Error สำหรับการดูดซับน้ำมันหล่อเย็น โดยแถบตัดแปร

พารามิเตอร์		อัดม-โบฮซาร์			ยูน-เนลสัน		
		k_{AB} (L/mg-hr)	N_0 (mg/L)	MSE	k_{YN} (hr ⁻¹)	τ (hr)	MSE
Q (cm ³ /min)	1	3.5×10^{-7}	165,488.40	0.106	0.051	200.3	0.0006
	2	3.6×10^{-7}	75,138.70	0.0084	0.057	87.3	0.0022
	4	8.9×10^{-7}	52,735.90	0.9808	0.094	56.3	0.0012
C_0 (mg/L)	5,816.70	3.5×10^{-7}	165,488.40	0.106	0.051	200.3	0.0006
	11,383.30	2.3×10^{-7}	281,384.80	0.2131	0.058	175.6	0.0034
	15,000.00	2.4×10^{-7}	313,859.00	0.9147	0.077	146.1	0.0065
Z (cm)	4.5	1.1×10^{-7}	115,633.60	0.5113	0.112	26.7	0.0013
	9	7.1×10^{-7}	128,015.70	0.2987	0.019	69.6	0.0011
	18	3.5×10^{-7}	165,488.40	0.106	0.051	200.3	0.0006
Wastewater		7.4×10^{-7}	14,029.10	14,029.10	0.045	109.7	0.0146

4. สรุป

การเพิ่มอัตราการไหลจาก 1.0 – 4.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำมันหล่อเย็นจาก 5,816.7 – 15,000.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลทำให้เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพเกิดขึ้นเร็วขึ้นเนื่องจากน้ำมันหล่อเย็นมีระยะเวลาสั้นในการสัมผัสกับแถบตัดแปร การเกาะที่ผิวภายนอกของแถบตัดแปรมีปริมาณน้อย และการถ่ายโอนมวลน้ำมันหล่อเย็นเกิดขึ้นได้ช้า ที่อัตราการไหล 1.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ความเข้มข้นเริ่มต้น 5,816.7 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูง 18.0 เซนติเมตร พบว่าเวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ ความสามารถในการดูดซับ และร้อยละการดูดซับมีค่าเท่ากับ 150 นาที 71.0 มิลลิกรัมต่อกรัม และ

ร้อยละ 88.8 ตามลำดับ เมื่อนำสภาวะการทดลองที่ดีที่สุดมาใช้ดูดซับน้ำเสียจริง พบว่าแถบตัดแปรสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับแบบต่อเนื่อง สำหรับการกำจัดน้ำมันหล่อเย็นจากกระบวนการตัดกลึงโลหะได้ดี และสมการยูน-เนลสันสามารถนำมาใช้ทำนายเส้นโค้งการดูดซับได้เป็นอย่างดี

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มจพ. ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือสำหรับทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Irani, R.A., Bauer, R.J. and Warkentin, A. A review of cutting fluid application in the grinding process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005; 45: 1696–1705.
- [2] Tembhurkar, A.R. and Deshpande, R. Powdered activated lemon peels as adsorbent for removal of cutting oil from wastewater. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 2012; 16: 311–315.
- [3] Toyai, S., Vilipornjaroen, K., Pornputtkul, Y. and Piyamongkala, K. Kinetics mechanism and thermodynamic adsorption chromium (VI) from electroplating wastewater by Chitosan. *Engineering Journal Chiang Mai University*, 2012; 19 (1): 28–39.
- [4] Solisio, C., Lodi, A., Converti, A. and Borghe, M.D. Removal of exhausted oils by adsorption on mixed Ca and Mg Oxides. *Water Research*, 2002; 36: 899–904.
- [5] Cambiella, Á., Ortea, E., Rios, G., Benito, J.M., Pazos, C. and Coca, J. Treatment of oil-in-water emulsion: performance of a sawdust bed filter. *Journal of Hazardous Materials*, 2006; 131: 195–199.
- [6] Piyamongkala, K., Mekasut, L. and Pongstabodee, S. Cutting fluid effluent removal by adsorption on chitosan and SDS-modified chitosan. *Macromolecular Research*, 2008; 16(6): 492–502.
- [7] Kittithawornkul, V., Aoonpootarik, S. and Piyamongkala, K. Adsorption of cutting oil by synthetic acid soil. *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 2010; 20 (2): 266–277.
- [8] ณัฐพันธุ์ ศุภกา. ข้าวไทย ก้าวไกลด้วยนาโนเทคโนโลยี. *Technology Promotion and Innomag Magazine*, 2553-2554; 37(214): 35–39.
- [9] Lakshmi, U.R., Srivastava, V.C., Mall, I.D. and Lataye, D.H. Rice husk ash as an effective adsorbent: evaluation of adsorptive characteristics for indigo carmine dye. *Journal of Environmental Management*, 2009; 90: 710–720.
- [10] Viraraghavan, T. and Mathavan, G.N. Treatment of oil-in-water emulsions using peat. *Oil and Chemical Pollution*, 1998; 4: 261–280.
- [11] เดชา นัตรีวิเศษ. กระบวนการดูดซับ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [12] Daengbutdee, P., Kaew-in, K. and Piyamongkala, K. Adsorption of methylene blue dye by rice-husk in fixed-bed column. *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 2014; 24 (2): 398–408.
- [13] Wu, X., Wu, D., Fu, R. and Zeng, W. Preparation of carbon aerogels with different pore structures and their fixed bed adsorption properties for dye removal. *Dyes and Pigments*, 2012; 95, 689–694.
- [14] Sadaf, S. and Bhatti, H.N. Batch and fixed bed column studies for the removal of indosol yellow Bg dye by peanut husk. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2014; 45: 541–553.
- [15] Vieira, M.L.G., Esquerdo, V.M., Nobre, L.R., Dotto, G.L. and Pinto, L.A.A. Glass beads coated with chitosan for the food azo dyes adsorption in a fixed bed column. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2014; 20: 3387–3393.
- [16] Nakbanpote, W., Goodman, B.A. and Thiravetyan, P. Copper adsorption on rice husk derived materials studied by EPR and FTIR. *Colloids and Surfaces A*, 2007; 304: 7–13.
- [17] Bohart, G.S. and Adams, E.Q. Some Aspects of the Behavior of Charcoal with Respect of Chlorine. *Journal of the American Chemical Society*, 1920; 42 (3): 523–544.
- [18] Yoon, Y.H. and Nelson, J. H. Application of Gas Adsorption Kinetics. Part I. A Theoretical Model for Respirator Cartridge Service Life. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1984; 45 (8): 509–516.
- [19] Cavas, L., Karabay, Z., Alyuruk, H., Doğan, H. and Demir, G.K. Thomas and Artificial Neural Network Models for the Fixed-Bed Adsorption of Methylene Blue by a Beach Waste *Posidonia Oceanica (L.)* Deal Leaves. *Chemical Engineering Journal*, 2011; 171: 557–562.