



การใช้เม็ดโคโตซานดัดแปรเป็นตัวดูดซับน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ

พรพิมล จารุพนาเวช และ โกวิท ปิยะมั่งคลา*

ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 9007 8906 อีเมล: kowit.p@sci.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.01.004

รับเมื่อ 17 พฤศจิกายน 2564 แก้ไขเมื่อ 9 กุมภาพันธ์ 2565 ตอรับเมื่อ 17 กุมภาพันธ์ 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 18 มกราคม 2567

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำด้วยกระบวนการดูดซับแบบแบดซีในระดับห้องปฏิบัติการ โดยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก ศึกษาความสามารถและร้อยละการดูดซับของตัวดูดซับที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ ผงโคโตซาน เม็ดโคโตซาน และเม็ดโคโตซานดัดแปร ส่วนที่สอง ศึกษาปริมาณเม็ดโคโตซานดัดแปรที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ จากการศึกษาสมบัติทางเคมีด้วยการวิเคราะห์ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับ เพื่อตรวจสอบค่าความเป็นกรด-เบสที่ทำให้ผลรวมของประจุบนพื้นผิวตัวดูดซับเท่ากับศูนย์ สำหรับการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำที่มีค่าความเป็น-เบสเท่ากับ pH 8.90 พบว่า ผงโคโตซาน เม็ดโคโตซาน และเม็ดโคโตซานดัดแปรมีค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์เท่ากับ pH 8.90, 4.10 และ 1.98 ตามลำดับ การใช้ตัวดูดซับปริมาณเท่ากันที่ 2.0 กรัม และความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำมันหล่อเย็นเท่ากับ 11,540 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า เม็ดโคโตซานดัดแปรมีร้อยละการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 100 ขณะที่ผงโคโตซาน และเม็ดโคโตซานมีร้อยละการดูดซับเท่ากับ 0 และ 19 ตามลำดับ เนื่องจาก ประจุที่ผิวของเม็ดโคโตซานดัดแปรมีโปรตอนของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการดัดแปรมาเกาะที่ผิวของเม็ดโคโตซานดัดแปร ไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับสมการฟรุนดลิช

คำสำคัญ: การดูดซับ น้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ โคโตซานดัดแปร ไอโซเทอม



Modified Chitosan Beads Used as an Adsorbent of Soluble Metal Working Fluid

Pornpimon Jarupanavet and Kowit Piyamongkala*

Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 9007 8906, E-mail: kowit.p@sci.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.01.004

Received 17 November 2021; Revised 9 February 2022; Accepted 17 February 2022; Published online: 18 January 2024

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The adsorption soluble metal working fluid was studied in the batch adsorption at laboratory scale. The experiment was divided into 2 parts. The first part involves investigation of the adsorption capacity and adsorption percentages of chitosan powder, chitosan beads and modified chitosan beads. The second part encompasses effects of the amount of adsorbents on the adsorption process of the soluble metal working fluid. The point of zero charge was used to describe the pH where the net charge of total particle surface of adsorbents is equal to zero. The pH of soluble metal working fluid was 8.90. It was found that the point of zero charge of chitosan powder, chitosan beads and modified chitosan beads were 8.90, 4.10 and 1.98, respectively. When adsorbent doses of each category were all set at 2.0 g with initial soluble metal working fluid of 11,540 mg/L, the adsorption percentage of modified chitosan beads reached 100% while that of chitosan powder and chitosan beads were 0 and 19 %, respectively. Modified chitosan beads show greater adsorption capacity because their surface charge contains protons from hydrochloric acid. The adsorption isotherm was found to correspond to the Frundish equation.

Keywords: Adsorption, Soluble Metal Working Fluid, Modified Chitosan, Isotherm

1. บทนำ

น้ำมันหล่อเย็น (Metal Working Fluid) จัดเป็นกลุ่มของน้ำมันหล่อลื่นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นงานโลหะ เนื่องจากขณะทำการขึ้นรูปชิ้นงานโลหะ จากการเจียระ การกลึง การไส การเจาะ หรือการกัดโลหะ ล้วนก่อให้เกิดความร้อนจากการเสียดสีระหว่างตัวชิ้นงานกับใบมีดตัด ทำให้ใบมีดตัดเกิดการสึกหรอ เป็นผลให้ตัวชิ้นงานเกิดผิวหน้าที่ไม่สม่ำเสมอ น้ำมันหล่อเย็นจึงมีบทบาทสำคัญในการช่วยระบายความร้อน หล่อลื่น และป้องกันการกัดกร่อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณ ในการผลิตชิ้นงานโลหะ โดยในระหว่างกระบวนการผลิต ตัวใบมีดตัด เศษโลหะ (Chip) และชิ้นงานโลหะ มีอุณหภูมิสูงถึง 900, 500 และ 200 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยความร้อนที่เกิดขึ้นประมาณร้อยละ 75 มาจากการเสียดสีของโลหะ และร้อยละ 25 เกิดจากการเสียดสีระหว่างเศษโลหะและตัวใบมีดตัด [1]

น้ำมันหล่อเย็นสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ น้ำมันล้วน (Straight Oil) น้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ (Soluble Metal Working Fluid) น้ำมันหล่อเย็นกึ่งสังเคราะห์ ชนิดผสมน้ำ (Semisynthetic Oil) และน้ำมันหล่อเย็นสังเคราะห์ชนิดผสมน้ำ (Synthetic Oil) โดยน้ำมันหล่อเย็นชนิดน้ำมันล้วน เป็นของเหลวที่มีส่วนประกอบของน้ำมันเพียงอย่างเดียว มีสมบัติในการหล่อลื่นได้ดี แต่มีความสามารถในการระบายความร้อนต่ำ จึงเหมาะแก่การขึ้นรูปชิ้นงานโลหะในงานที่ใช้ความเร็วรอบต่ำ [2] ขณะที่ น้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ มีส่วนประกอบของสารไฮโดรคาร์บอน จำพวกพาราฟินิก แนพทาณิก อะโรมาติก ไฮโคลแอลเคน และแอลเคน [3] โดยน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นงานโลหะ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในด้านการหล่อลื่นและการระบายความร้อนที่ดี มีการเติมสารเติมแต่งเพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายต่อชิ้นงาน เมื่อผสมน้ำอยู่ในรูปของเหลวอิมัลชันที่มีความเสถียร จึงเหมาะแก่การตัดเฉือนสำหรับงานหนักที่ความเร็วรอบสูง ทำให้ได้ผลผลิตในปริมาณมากขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ [4], [5]

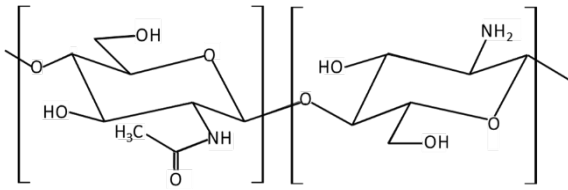
ภายหลังการใช้งานน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ พบว่าน้ำมันเกิดการสูญเสียสมบัติในการหล่อลื่น และเกิดการ

ก่อตัวเป็นของเสียอันตรายจากการปนเปื้อนของโลหะหนัก แบคทีเรีย เชื้อรา รวมทั้งจากการสลายตัวของสารเคมีที่เป็นอันตราย เช่น สารไนโตรซามีน (Nitrosamine) หากน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ จะทำให้เกิดการรบกวนระบบนิเวศ เนื่องจากน้ำมันก่อตัวเป็นฟิล์มบางบนผิวน้ำ เข้าขัดขวางการแลกเปลี่ยนก๊าซระหว่างบรรยากาศกับน้ำ [6], [7]

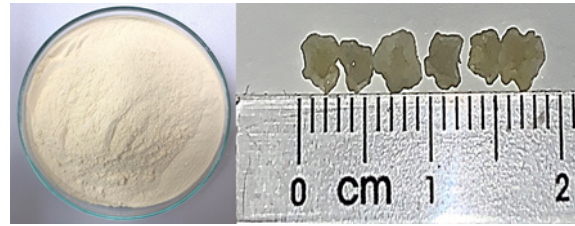
การดูดซับเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ โดยมีข้อดี ได้แก่ สามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ทำให้ไม่เกิดการสิ้นเปลืองพลังงาน ใช้ระยะเวลาในการบำบัดสั้น ไม่ต้องเติมสารเคมีลงไป ในน้ำเสีย ตัวดูดซับสามารถใช้วัสดุจากธรรมชาติหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ทำให้ต้นทุนของกระบวนการดูดซับไม่สูงมากนัก เช่น ชานอ้อย [8] แกลบ [9] เปลือกเมล็ดฟักทอง [10] และเปลือกทับทิม [11]

โคโคซาน เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ที่มีสมบัติเด่น ได้แก่ สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เป็นสารช่วยตกตะกอน เป็นสารไมโฟไฟลและไม่มีพิษ จึงไม่ก่อให้เกิดความเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม โคโคซานเกิดจากการนำโคโคตินมาทำปฏิกิริยากำจัดหมู่อะซิทธิลด้วยต่างเข้มข้น ทำให้โคโคซานมีโครงสร้างเป็น 2-amino-2-deoxy-D-glucose ที่สามารถละลายได้ในสารละลายกรดเจือจาง และสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบสต่ำกว่า pH 6 โดยเมื่อโคโคซานถูกละลายด้วยสารละลายกรด หมู่อะมิโนที่โครงสร้างของโคโคซานจะเข้ารับโปรตอนจากสารละลายกรดและอยู่ในรูปของ $-NH_3^+$ โคโคซานจึงถูกพิจารณาว่าเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ประเภทบวก (Cationic Polyelectrolyte) [12], [13]

ซึ่งปัจจุบันโคโคซานถูกนำมาเป็นตัวดูดซับ ได้แก่ โลหะหนัก [14] สีอ้อม [15] และน้ำมัน [16] รวมถึงการใช้เส้นใยโคโคซานดัดแปรด้วยไฮเดียมลอร์ริลซัลเฟต [17] และเกลือโคโคซานดัดแปรด้วยไฮเดียมลอร์ริลเทอร์ซัลเฟตสำหรับ ดูดซับน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ [18] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการนำ โคโคซาน ใน 3 รูปแบบ ได้แก่ ผงโคโคซาน เม็ดโคโคซาน และเม็ดโคโคซานดัดแปร มาเปรียบเทียบความสามารถ และศึกษาปริมาณที่เหมาะสมในการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ



รูปที่ 1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน [19]



(ก)

(ข)

รูปที่ 2 ตัวดูดซับน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ (ก) ผงไคโตซาน และ (ข) ขนาดเม็ดไคโตซาน

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1. การเตรียมตัวดูดซับ

2.1.1 ผงไคโตซาน (Chitosan Powder; CP)

ผงไคโตซานที่ใช้ในงานวิจัยซื้อมาจาก ห้างหุ้นส่วนจำกัด สีนอุดมเกษตรภัณฑ์ มีร้อยละการกำจัดหมู่อะซิทิลเท่ากับ ร้อยละ 93 (Degree of Deacetylation) สูตรโครงสร้างทางเคมีของไคโตซานดังแสดงในรูปที่ 1

2.1.2 เม็ดไคโตซาน (Chitosan Beads; CB)

เตรียมสารละลายไคโตซานความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทำโดยการนำผงไคโตซานมาละลายในกรดอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยปริมาตร จากนั้นกวนผสมด้วยเครื่องกวนสาร ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นทำการขึ้นรูปเม็ดไคโตซาน โดยการนำสารละลายไคโตซานที่เตรียมได้ มาหยดผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร ที่อัตราการไหล 2.9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ด้วยปั๊มรีดท่อลงสู่สารละลายโซเดียมลอร์ริเอเทอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในอัตราส่วน 1:1 และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นกรองด้วยตะแกรงกรอง และล้างด้วยน้ำสะอาดแบบไหลผ่าน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสารละลายโซเดียม ลอร์ริเอเทอร์ซัลเฟตให้หมด จากนั้นตากไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ได้เป็นเม็ดไคโตซานที่ขึ้นรูปด้วยโซเดียมลอร์ริเอเทอร์ซัลเฟต มีลักษณะเป็นเม็ดกลมแข็ง สีเหลืองมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 3 มิลลิเมตร สำหรับใช้เป็น ตัวดูดซับน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ โดยตัวดูดซับชนิดผงไคโตซาน และขนาดเม็ดไคโตซาน ดังแสดงในรูปที่ 2

2.1.3 เม็ดไคโตซานดัดแปร (Chitosan Modified with Hydrochloric acid Bead; CMHB)

นำเม็ดไคโตซานที่เตรียมได้จากข้อ 2.1.2 ปริมาณ 4 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ปริมาณ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในขวดรูปชมพู่ ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยแผ่นอะลูมิเนียม และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสาร ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองด้วยตะแกรงร่อน และนำเม็ดไคโตซานไปตากที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ได้เป็นเม็ดไคโตซานดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริก ที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมแข็งสีเหลือง มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยขนาด 3 มิลลิเมตร สำหรับใช้เป็นตัวดูดซับน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ การเตรียมตัวดูดซับทั้งหมดอ้างอิงจากเลขที่คำขออนุสิทธิบัตร เลขที่ 2103001727

2.2. การเตรียมน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ

น้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำซื้อจาก บริษัท Rifle Brand ประเทศไทย ความเข้มข้นน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ 11,540 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำโดยนำน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ ปริมาณ 10 กรัม ผสมเข้ากับน้ำกลั่น ปริมาณ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร กวนผสมด้วยเครื่องกวนสารที่ความเร็ว 1,200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ได้น้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำสำหรับการทดลอง ที่มีสีขาวคล้ายน้ำมันอยู่ในรูปของอิมัลชัน และมีค่าความเป็นกรด-เบสอยู่ที่ pH 8.90 เมื่อวัดด้วยเครื่องวัดความเป็นกรด-เบส (Eutech; Model pH 510)

2.3. การวิเคราะห์ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับ

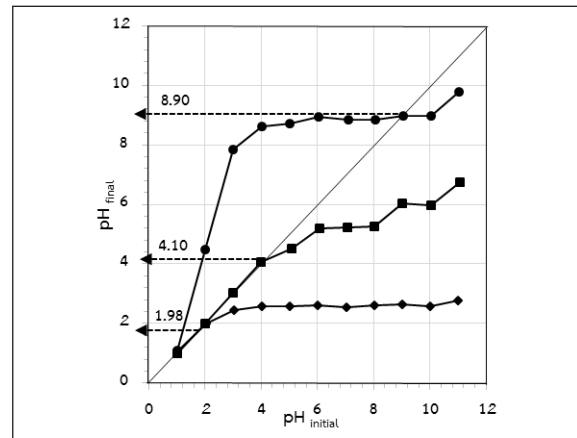
การวิเคราะห์ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับ (Point of Zero Charge; pH_{pzc}) เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาณ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปรับค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (pH_0) ให้อยู่ในช่วง pH 3.0–12.0 ด้วยสารละลายกรดไนตริก ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ หรือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จากนั้นเติมตัวดูดซับปริมาณ 0.2 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ พร้อมทั้งปิดปากขวดรูปชมพู่ให้สนิทด้วยแผ่นอะลูมิเนียม เขย่าด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นกรองด้วยตะแกรงร่อน ขนาดช่องว่างกว้าง 1 มิลลิเมตร นำสารผสมมาวัดค่าความเป็นกรด-เบสสุดท้าย (pH_f) ด้วยเครื่องวัดความเป็นกรด-เบส โดยประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับ หาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น และค่าความเป็นกรด-เบสสุดท้าย ตัดกับเส้นทแยงมุมที่มุม 45 องศา ตำแหน่ง (0,0) [18]

2.4. การศึกษาการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ

นำเม็ดโคโคซานดัดแปร ปริมาณ 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร และเติมน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำที่ความเข้มข้น 11,540 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร แต่ละใบเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำโดยเครื่อง Spectronic 21 ที่ความยาวคลื่น 395 นาโนเมตร [17] พร้อมทั้งคำนวณหาความสามารถในการดูดซับและร้อยละการดูดซับได้จากสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$q_{e,exp} = \left(\frac{(C_0 - C_e) \times V}{W} \right) \quad (1)$$

$$\% Adsorption = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \times 100 \quad (2)$$



รูปที่ 3 ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) ของ ● CP, ■ CB และ ◆ CMHB

เมื่อ C_0 และ C_e คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ และความเข้มข้นน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำที่สถานะสมดุล ตามลำดับ (มิลลิกรัมต่อลิตร) $q_{e,exp}$ คือความสามารถในการดูดซับที่สถานะสมดุล ได้จากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อกรัม) V คือ ปริมาตรน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ (ลิตร) และ W คือ น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)

3. ผลการทดลอง

3.1. ผลการวิเคราะห์ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับ

ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับ (Point of Zero Charge; pH_{pzc}) คือ ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ที่ทำให้ประจุที่ผิวของตัวดูดซับมีประจรมีค่าเป็นศูนย์หรือเป็นกลางทางไฟฟ้า เนื่องจากมีประจุบวกและประจุลบในจำนวนที่เท่ากัน โดยการหาค่า pH_{pzc} ทำให้สามารถอธิบายเหตุผลในการดูดซับได้เป็นอย่างดี เมื่อ $pH < pH_{pzc}$ ที่พื้นผิวตัวดูดซับจะแสดงประจุเป็นบวก ทำให้สามารถดูดซับโมเลกุลประจุลบได้ดี และในทางตรงกันข้าม เมื่อ $pH > pH_{pzc}$ ที่พื้นผิวตัวดูดซับจะแสดงประจุเป็นลบ ทำให้สามารถดูดซับโมเลกุลประจุบวกได้ดี

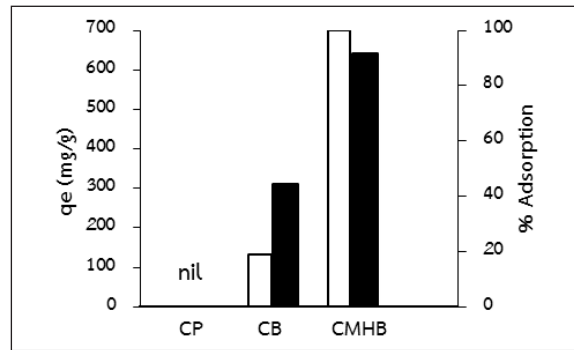
จากผลการทดลองประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับ แสดงดังรูปที่ 3 พบว่า ผงโคโคซาน เม็ดโคโคซาน และ เม็ดโคโคซานดัดแปร มีประจุที่ผิวเป็นศูนย์เท่ากับ 8.90, 4.10

และ 1.98 ตามลำดับ โดยผงโคโตซานที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้มีร้อยละการกำจัดหมู่อะซิทิลเท่ากับร้อยละ 93 ขณะที่งานวิจัยของ Kluczka และคณะ [20] มีร้อยละการกำจัดหมู่อะซิทิลเท่ากับร้อยละ 97 จึงมีค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์เท่ากับ 7.4 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการมีปริมาณหมู่ อะซิทิลหลงเหลืออยู่ในปริมาณมาก ทำให้ประจุที่ผิวเป็นศูนย์มีค่าสูงขึ้น ขณะที่การดัดแปรเม็ดโคโตซานด้วยกรดไฮโดรคลอริก ทำให้ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ลดต่ำลง เนื่องจากโปรตอนของกรดไฮโดรคลอริกมาเกาะที่พื้นผิวของเม็ดโคโตซาน ซึ่งการเพิ่มขึ้นของโปรตอน ส่งผลให้โครงสร้างของเม็ดโคโตซานอยู่ในรูปของ $-NH_4^+$ สภาวะความเป็นกรดของเม็ดโคโตซานจึงเพิ่มสูงขึ้น [21], [22]

3.2. ผลการศึกษาการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำโดยใช้ตัวดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับและร้อยละการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ ที่ความเข้มข้น 11,540 มิลลิกรัมต่อลิตรของผงโคโตซาน เม็ดโคโตซาน และเม็ดโคโตซานดัดแปรแสดงดังรูปที่ 4 ความสามารถในการดูดซับมีค่าเท่ากับ 0, 310 และ 642 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ในขณะที่ร้อยละการดูดซับมีค่าเท่ากับร้อยละ 0, 19 และ 100 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า เม็ดโคโตซานดัดแปรมีความสามารถในการดูดซับ และร้อยละการดูดซับสูงกว่า เม็ดโคโตซานและผงโคโตซาน เนื่องจากการดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริก โปรตอนจากกรดเข้าเกาะที่พื้นผิวตัวดูดซับซึ่งปริมาณโปรตอนที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความเป็นกรดเพิ่มสูงขึ้น ค่าความเป็นกรด-เบสมีค่าต่ำกว่า pH 3 จะสามารถทำลายเสถียรภาพของน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำได้ [23]

โดยน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำมีสีขาวคล้ายน้ำมันเนื่องจากการกระจายตัวของอิมัลชัน โดยมีขนาดหยดน้ำมันขนาดเล็กขนาดเฉลี่ยประมาณ 216.7 นาโนเมตร กระจายตัวอยู่ในน้ำ ที่มีศักย์ซีตาเท่ากับ -53.3 มิลลิโวลต์ ซึ่งบ่งชี้ว่าพื้นผิวของหยดน้ำมันเป็นประจุลบ [24] จึงสามารถเหนี่ยวนำน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำที่มีประจุเป็นลบนี้ให้เข้ามาเกาะที่พื้นผิวเม็ดโคโตซานดัดแปรที่มีประจุเป็นบวก โดยภายหลัง

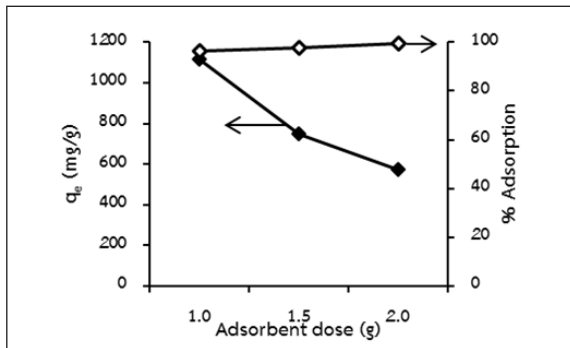


รูปที่ 4 การดูดซับน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำของ ตัวดูดซับ □ ร้อยละการดูดซับ และ ■ ความสามารถในการดูดซับ

สิ้นสุดกระบวนการดูดซับ ผลการทดลองพบว่า การดูดซับน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำด้วยผงโคโตซานและเม็ดโคโตซาน แสดงลักษณะเป็นอิมัลชันสีขาวคล้ายน้ำมันของน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ ขณะที่เม็ดโคโตซานดัดแปรแสดงน้ำสะอาดที่ไม่หลงเหลืออิมัลชัน

3.3. ผลการศึกษาปริมาณเม็ดโคโตซานดัดแปร

จากการนำเม็ดโคโตซานดัดแปรที่ปริมาณ 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม ดูดซับน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำที่ความเข้มข้น 11,540 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 5 พบว่า ร้อยละการดูดซับน้ำมันหล่อเย็น ชนิดผสมน้ำเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณเม็ดโคโตซานดัดแปร โดยมีค่าเท่ากับ 96, 97 และ 99 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเม็ด โคโตซานดัดแปร โดยมีค่าเท่ากับ 1112, 749 และ 573 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อใช้เม็ดโคโตซานดัดแปรปริมาณ 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม ตามลำดับ โดยการเพิ่มปริมาณเม็ดโคโตซานดัดแปรเป็นผลให้ร้อยละการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำสูงขึ้น เนื่องจากการดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกทำให้เม็ดโคโตซานมีพื้นที่ผิว รูพรุนและความเป็นประจุบวกที่เพิ่มขึ้นสำหรับดึงดูดประจุลบของน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Tan



รูปที่ 5 สมดุลการดูดซับของเม็ดโคโคซานดัดแปร \blacklozenge ความสามารถในการดูดซับ และ \diamond ร้อยละการดูดซับ

และคณะ [25] ทำการดัดแปรถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ขณะที่ค่าความสามารถในการดูดซับเป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับ โดยการมีตัวดูดซับในปริมาณมาก ขณะที่ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับคงที่ จะทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เกิดการดูดซับอย่างรวดเร็วในปริมาณมากจากการสัมผัสกันของเม็ดโคโคซานดัดแปรและน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ หลังจากนั้นความเข้มข้นของน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว น้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำแพร่ได้ช้าลง เพิ่มระยะในการแพร่ที่มากขึ้น ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจึงมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณเม็ดโคโคซานดัดแปร (Adsorption Sites) [26]

3.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) คือการนำสมการทางคณิตศาสตร์มาใช้จำลองการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q_e) ในแกนแนวตั้ง กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สถานะสมดุล (C_e) อุณหภูมิคงที่ในแกนแนวนอน [27]

3.4.1 แลงเมียร์ไอโซเทอม (Langmuir Isotherm)

การทำนายความสามารถในการดูดซับด้วยแลงเมียร์ไอโซเทอม สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงและคำนวณค่า

ความสามารถในการดูดซับตามแลงเมียร์ไอโซเทอมได้จากสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ [28]

$$\frac{1}{q_{e,exp}} = \left(\frac{1}{K_L q_m} \right) \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m} \quad (3)$$

$$q_{e,cal} = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (4)$$

เมื่อ K_L คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม) q_m คือ ความสามารถในการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ $q_{e,cal}$ คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลที่ได้จากการคำนวณ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

3.4.2 ฟรุนดิชไอโซเทอม (Freundlich Isotherm)

การทำนายความสามารถในการดูดซับด้วยฟรุนดิชไอโซเทอม สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงและคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับตามฟรุนดิชไอโซเทอมได้จากสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ [28]

$$\log q_{e,exp} = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad (5)$$

$$q_{e,cal} = K_F C_e^{1/n} \quad (6)$$

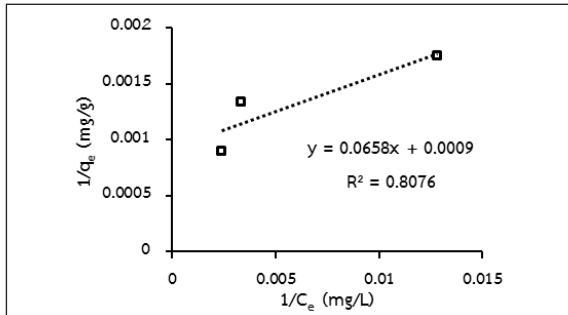
เมื่อ K_F คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบฟรุนดิช (มิลลิกรัมต่อกรัม)(ลิตรต่อมิลลิกรัม) $^{1/n}$ และ $1/n$ คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบฟรุนดิช ที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับและความแตกต่างของพื้นที่ผิวตัวดูดซับ (ไม่มีหน่วย)

3.4.3 บีอีทีไอโซเทอม (Brunauer, Emmett, and Teller Isotherm)

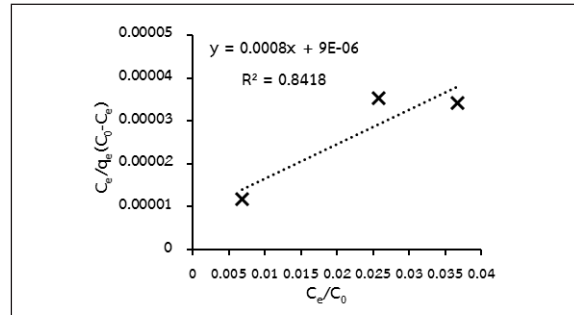
การทำนายความสามารถในการดูดซับด้วยบีอีทีไอโซเทอม สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงและคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับตามบีอีทีไอโซเทอมได้จากสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ [28]

$$\frac{C_e}{q_{e,exp}(C_0 - C_e)} = \frac{1}{q_m K_B} + \frac{(K_B - 1)}{q_m K_B} \left(\frac{C_e}{C_0} \right) \quad (7)$$

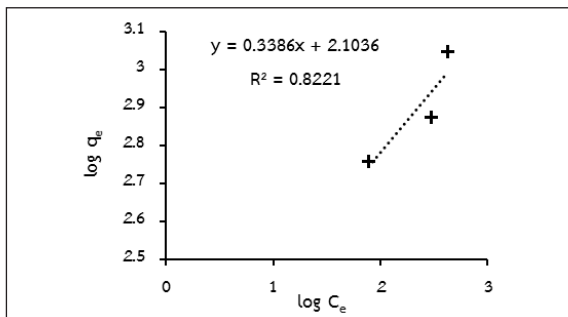
$$q_{e,cal} = \frac{q_m K_B C_e}{(C_0 - C_e) \left[1 + (K_B - 1) \left(\frac{C_e}{C_0} \right) \right]} \quad (8)$$



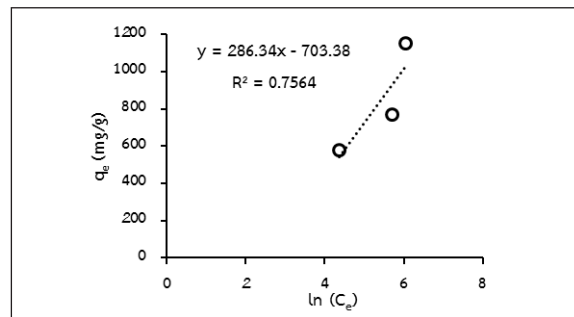
รูปที่ 6 สมการเส้นตรงแลงเมียร์ไอโซเทอม



รูปที่ 8 สมการเส้นตรงบีอีไอโซเทอม



รูปที่ 7 สมการเส้นตรงฟรูดิชไอโซเทอม



รูปที่ 9 สมการเส้นตรงเทมเคินไอโซเทอม

เมื่อ K_B คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบบีอีที (ลิตรต่อ มิลลิกรัม)

3.4.4 เทมเคินไอโซเทอม (Temkin Isotherm)

การทำนายความสามารถในการดูดซับด้วยเทมเคิน ไอโซเทอม สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงและคำนวณค่า ความสามารถในการดูดซับตามเทมเคินไอโซเทอมได้จาก สมการที่ (9) และ (10) ตามลำดับ [28]

$$q_{e,exp} = B \ln K_T + B \ln C_e \quad (9)$$

$$q_{e,cal} = B \ln(K_T C_e) \quad (10)$$

เมื่อ B คือ ค่าคงที่เทมเคินซึ่งสัมพันธ์กับความร้อน ของการดูดซับ (จูลต่อโมล) และ K_T คือ ค่าคงที่การ ดูดซับ แบบเทมเคิน (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

ความถูกต้องของไอโซเทอมสามารถพิจารณาได้จาก ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากสมการเส้นตรง (R^2) ที่มีค่า เข้าใกล้หนึ่ง แต่ในกรณีที่แต่ละไอโซเทอมมีค่า R^2 ใกล้เคียงกัน

การพิจารณาคัดเลือกอาจเกิดความผิดพลาดได้ ดังนั้นการ พิจารณาความถูกต้องไอโซเทอมจึงนิยมพิจารณาจากการ คำนวณทางสถิติ เช่น ค่า Chi-square (χ^2) และค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D) ที่มีค่าน้อยที่สุด [29] คำนวณได้จาก สมการที่ (11) และ (12) ตามลำดับ [30]

$$\chi^2 = \sum \left(\frac{(q_{e,exp} - q_{e,cal})^2}{q_{e,exp}} \right) \quad (11)$$

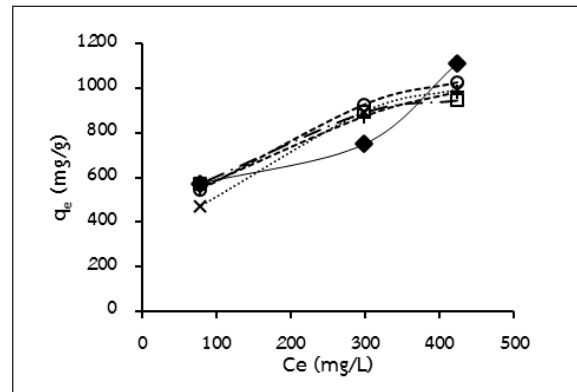
$$S.D = \left(\sqrt{\frac{\sum ((q_{e,exp} - q_{e,cal}) / q_{e,exp})^2}{n-1}} \right) \times 100 \quad (12)$$

เมื่อนำผลการศึกษาปริมาณเมื่อดโคโตซานดัดแปรมา เขียนกราฟเส้นตรง แลงเมียร์ ฟรูดิช บีอีที และเทมเคิน ไอโซเทอม แสดงดังรูปที่ 6-9 ตามลำดับ พบว่า มีค่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.8076, 0.8221, 0.8418 และ 0.7564 ตามลำดับ ค่าคงที่ q_m , K_L , K_F , n , K_B , K_T และ B แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าคงที่และค่าความสามารถในการดูดซับของ
 แลงเมียร์ ฟรุנדลิช ปีอิตี และเทมเคินไอโซเทอมที่
 ได้จากการทดลองและจากการคำนวณ

Adsorbent	(g)		1.0	1.5	2.0
$q_{e,exp}$	(mg/g)		1112	749	573
Langmuir Isotherm					
$q_{e,cal}$	(mg/g)		947	892	574
q_m	(mg/g)	1111			
K_L	(L/mg)	0.014			
R^2		0.8076			
χ^2		51.48			
S.D		17.05			
Freundlich Isotherm					
$q_{e,cal}$	(mg/g)		984	874	555
K_F	(mg/g) (L/mg) ^{1/n}	127			
n		2.953			
R^2		0.8221			
χ^2		35.90			
S.D		14.45			
BET Isotherm					
$q_{e,cal}$	(mg/g)		993	894	472
q_m	(mg/g)	1236			
K_B	(L/mg)	89.89			
R^2		0.8418			
χ^2		58.21			
S.D		19.93			
Temkin Isotherm					
$q_{e,cal}$	(mg/g)		1028	927	544
K_T	(L/mg)	0.09			
B	(J/mol)	286.34			
R^2		0.7564			
χ^2		50.23			
S.D		18.01			

คำนวณค่าความถูกต้องของสมการแลงเมียร์ ฟรุנדลิช ปีอิตี และเทมเคินไอโซเทอม มีค่า Chi-square เท่ากับ 51.48,



รูปที่ 10 ไอโซเทอมการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำของ
 เม็ดไคโตซานดัดแปร ◆ ผลการทดลอง □ สมการ
 แลงเมียร์ + สมการฟรุנדลิช × สมการปีอิตี และ
 ○ สมการเทมเคิน

35.90, 58.21 และ 50.23 ตามลำดับ และค่า S.D มีค่าเท่ากับ 17.05, 14.45, 19.93 และ 18.01 ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องทั้ง 4 ไอโซเทอม แสดงดังรูปที่ 10 พบว่า ฟรุנדลิชไอโซเทอมมีค่า Chi-square และ S.D ต่ำที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าค่าความสามารถในการดูดซับจากการคำนวณตามสมการของฟรุנדลิชไอโซเทอมและจากผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน [31] โดยนิพนธ์และคณะได้อธิบายว่า ค่า $1/n$ เท่ากับ 1 หมายถึงไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง ค่า $1/n$ น้อยกว่า 1 หมายถึงพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดในการดูดซับ และค่า $1/n$ มากกว่า 1 หมายถึงพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ [27] ดังนั้นการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำบนเม็ดไคโตซานดัดแปรจึงสามารถอธิบายได้ว่า ที่พื้นที่ผิวของเม็ดไคโตซานดัดแปรเป็นการดูดซับบนพื้นผิวแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Adsorption Surface) และเกิดลักษณะการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) ที่มีปริมาณจำกัดในการดูดซับ

4. สรุป

จากผลการทดลองพบว่า ผงไคโตซาน เม็ดไคโตซาน และเม็ดไคโตซานดัดแปร มีประจุที่ผิวเป็นศูนย์เท่ากับ pH 8.90, 4.10 และ 1.98 ตามลำดับ โดยเม็ดไคโตซานดัดแปรปริมาณ



2.0 กรัม สามารถดูดซับน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำที่ความเข้มข้น 11,540 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรได้ดี ร้อยละการดูดซับเท่ากับ ร้อยละ 100 ไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับฟรุคิช ไอโซเทอม ดังนั้นการศึกษานี้จึงแสดงให้เห็นถึงทางเลือก ในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ เพื่อลดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ด้วยการใช้วัสดุดูดซับทางธรรมชาติที่เตรียมขึ้นได้ง่าย ใช้สารเคมีในกระบวนการที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติการและสิ่งแวดล้อมสามารถพบได้ทั่วไปในห้องปฏิบัติการ เพื่อลดต้นทุนการผลิต ลดการใช้พลังงาน และลดระยะเวลาในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เลขที่สัญญา KMUTNB-KNOW-61-041

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Q. A. Rizvi, *A comprehensive review of lubricant chemistry, technology, selection, and design*. Baltimore: ASTM International, 2009.
- [2] R. Katna, M. Suhaib, and N. Agrawal, "Nonedible vegetable oil-based cutting fluids for machining processes – a review," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 35, no. 1, pp. 1–32, 2019.
- [3] E. Brinksmeier, D. Meyer, A. G. Huesmann-Cordes, and C. Herrmann, "Metalworking fluids—Mechanisms and performance," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 64, no. 2, pp. 605–628, 2015.
- [4] J. E. Anderson, B. R. Kim, S. A. Mueller, and T. V. Lofton, "Composition and analysis of mineral oils and other organic compounds in metalworking and hydraulic fluids," *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 33, no. 1, pp. 73–109, 2003.
- [5] L. Mathurasa, "Metalworking fluid: Environmental effects and treatment methods," *Burapha Science Journal*, vol. 23, no. 1, pp. 221–236, 2018 (in Thai).
- [6] E. Kuram, B. Ozcelik, and E. Demirbas, *Environmentally friendly machining: vegetable based cutting fluids*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- [7] M. Schwarz, M. Dado, R. Hnilica, and D. Veverkava, "Environmental and health aspects of metalworking fluid use," *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 24, no. 1, pp. 37–45, 2014.
- [8] W. Champreecha, A. Pranudta, and K. Piyamongkala, "Equilibrium and batch design studied for cutting fluid adsorption onto sugarcane bagasse and modified sugarcane bagasse," *The Journal of KMUTNB*, vol. 27, no. 1, pp. 1–13, 2016 (in Thai).
- [9] P. Lekprasert, R. Chunjaroen and K. Piyamongkala, "Continuous adsorption of cutting fluid by modified rice husk," *Engineering Journal Chiang Mai University*, vol. 25, no. 1, pp. 1–10, 2016 (in Thai).
- [10] A. Katiyar, A. K. Singh, and U. K. Sharma, "Utilization of waste material: pumpkin seed waste, as an efficient adsorbent for the removal of metal cutting fluids from aqueous medium/ industrial waste water," *International Journal of Engineering and Technical Research*, vol. 2, no. 5, pp. 352–358, 2014.
- [11] A. Katiyar, A. K. Singh, and L. K. Singh, "A new efficient method for removal of metal cutting



- fluids from machining waste water,” *International Journal of Engineering and Technical Research*, Special Issue, pp. 313–318, 2014.
- [12] R. Ramya, J. Venkatesan, S. K. Kim, and P. N. Sudha, “Biomedical application of chitosan: An overview,” *Journal of Biomaterials and Tissue Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 100–111, 2012.
- [13] M. Kostag, and O. A. El Seoud, “Sustainable biomaterials based on cellulose, chitin and chitosan composites - A review,” *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, vol. 2, pp. 100079, 2021.
- [14] L. Pietrelli, I. Francolini, A. Piozzi, M. Sighicelli, I. Silvestro, and M. Vocciante, “Chromium (III) removal from wastewater by chitosan flakes,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 6, pp. 1925, 2020.
- [15] V. L. Wong, S. Y. Tay, and S. S. Lim, “Enhanced removal of methyl orange from aqueous solution by chitosan-CaCl₂ beads,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 736, pp. 022049.
- [16] A. L. Ahmad, S. Sumathi, and B. H. Hameed, “Chitosan: A natural biopolymer for the adsorption of residue oil from Oily Wastewater,” *Adsorption Science and Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 75–88, 2003.
- [17] K. Piyamongkala, L. Mekasut, and S. Pongstabodee, “Cutting fluid effluent removal by adsorption on chitosan and SDS- modified chitosan,” *Macromolecular Research*, vol. 16, no. 6, pp. 492–502, 2008.
- [18] N. Puangpun, I. Suwimon, and K. Piyamongkala, “Adsorption soluble cutting fluid emulsion by modified chitosan with SLES,” *Applied Science and Engineering Progress*, vol. 12, no. 4, pp. 243–252, 2019.
- [19] N. T. T. Hai, L. H. Thu, N. T. T. Nga, T. T. Hoa, L. N. A Tuan, D. V. Phu, and N. Q. Hien, “Preparation of chitooligosaccharide by hydrogen peroxide degradation of chitosan and Its effect on soybean seed germination,” *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 27, pp. 2098–2104, 2019.
- [20] J. Kluczka, G. Dudek, A. Kazek-Kesik, M. Gnus, M. Krzywiecki, K. Mitko, and K. Krukiewicz, “The use of lanthanum ions and chitosan for boron elimination from aqueous solutions,” *Polymers*, vol. 11, no. 4, pp. 718, 2019.
- [21] M. V. Lopez-Ramon, F. Stoeckli, C. Moreno-Castilla, and F. Carrasco-Marin, “On the characterization of acidic and basic surface sites on carbons by various techniques,” *Carbon*, vol. 37, no. 8, pp. 1215–1221, 1999.
- [22] T. Kim and B. An, “Effect of hydrogen ion presence in adsorbent and solution to enhance phosphate adsorption,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 6, pp. 2777, 2021.
- [23] A. Sawain, W. Taweepreda, U. Puetpaiboon, and C. Suksaroj, “The effect of pH on the stability of grease and oil in wastewater from biodiesel production process,” presented at the 10th Annual Conference of Thai Society of Agricultural Engineering, Nakhon Ratchasima, Thailand, Apr. 1–3, 2009 (in Thai).
- [24] C. T. H. Nam, N. T. T. Hien, N. T. T. Huyen, H. H. Hiep, and N. T. Thuong, “Treatment of cutting oil-in-water emulsion by combining flocculation and fenton oxidation,” *Journal of Chemistry*, vol. 2021, pp. 1–9, 2021.



- [25] I. A. W. Tan, M. O. Abdullah, L. L. P. Lim, and T. H. C. Yeo, "Surface modification and characterization of coconut shell-based activated carbon subjected to acidic and alkaline treatments," *Journal of Applied Science and Process Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 186–194, 2017.
- [26] V. Patrulea, A. Negrulescu, M. M. Mincea, L. D. Pitulice, O. B. Spiridon, and V. Ostafea, "Optimization of the removal of copper (II) ions from aqueous solution on chitosan and cross-linked chitosan beads," *BioResources*, vol. 8, no. 1, pp. 1147–1165, 2013.
- [27] N. Tungkananuruk, and K. Tungkananuruk, *Principle of chemical water quality analysis*. Bangkok: Kasetsart University Press, 2007 (in Thai).
- [28] K. Y. Foo and B. H. Hameed, "Insights into the modeling of adsorption isotherm systems," *Chemical Engineering Journal*, vol. 156, no. 1, pp. 2–10, 2010.
- [29] H. K. Hami, R. F. Abbas, A. S. Mahdi, and A. A. Maryoosh, "An overview of using error function in adsorption isotherm modeling," *Muthanna Journal of Pure Science*, vol. 8, no. 1, pp. 22–30, 2021.
- [30] B. Boulinguez, P. Le Cloirec, and D. Wolbert, "Revisiting the determination of langmuir parameters—application to tetrahydrothiophene adsorption onto activated carbon," *Langmuir*, vol. 24, no. 13, pp. 6420–6424, 2008.
- [31] C. P. Bergmann and F. M. Machado, *Carbon Nanomaterials as adsorbents for environmental and biological applications*. Switzerland: Springer, 2015.