

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ชาวบ้านในชุมชนที่อาศัยอยู่ใกล้เคียงกับมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ได้มีการรวมกลุ่มกันเพื่อผลิตสินค้าพื้นบ้านประจำท้องถิ่นในระดับอุตสาหกรรมครัวเรือน ตัวอย่างเช่น การทอผ้าไหม ผ้าฝ้าย และผ้ากาบบัว เป็นต้น หรือที่รู้จักกันดีในอีกชื่อหนึ่งนั่นคือ สินค้าโอท็อป (OTOP) ซึ่งได้รับการส่งเสริมจากหน่วยงานต่าง ๆ ของทางภาครัฐ เพื่อสร้างรายได้เสริมให้แก่ชาวบ้านนอกเหนือจากกิจกรรมทางด้านการเกษตร การผลิตผ้าดังกล่าวมีอยู่หลายขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมเส้นใย การปั่นเส้นใย การย้อมสีเส้นใย การทอผ้า และการตัดเย็บผ้า เป็นต้น แต่ในขั้นตอนการย้อมสีผ้าจำเป็นต้องใช้น้ำปริมาณมาก ประกอบกับชาวบ้านนิยมใช้สีย้อมผ้าเคมีสังเคราะห์ที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาด ตัวอย่างเช่น สีย้อมผ้าตราสิงโตตึกทอง สีย้อมผ้าตราใบหม่อน และสีย้อมผ้าตราเครื่องบิน เป็นต้น สีย้อมผ้าเหล่านี้นิยมใช้มากเนื่องจากมีราคาถูก หาซื้อได้ง่ายในท้องถิ่น และเมื่อนำมาย้อมสีผ้าแล้วจะได้ผ้าที่มีสีสดและติดทนนานเมื่อเปรียบเทียบกับสีย้อมผ้าธรรมชาติ จึงก่อให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมาก ชาวบ้านจะทิ้งน้ำเสียเหล่านี้สู่แหล่งรองรับทางธรรมชาติ เช่น ทิ้งลงสู่พื้นดิน ใต้ถุนบ้านและลำธารบริเวณใกล้เคียง โดยไม่ได้ทำการบำบัดก่อนทิ้งแต่อย่างใด น้ำเสียที่เกิดขึ้นสามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้น้อยซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดปัญหามลพิษทางดินและแหล่งน้ำเน่าเสียได้

เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปนเปื้อนของสีย้อมผ้าเคมีสังเคราะห์ในดินและแหล่งน้ำ การบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นเหล่านี้ก่อนปล่อยทิ้งสู่แหล่งรองรับทางธรรมชาติจึงเป็นสิ่งจำเป็น แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ เป็นแร่ดินที่มีปริมาณมากในประเทศ มีราคาถูกและมีการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมเนื่องจากการผลิตแร่ดินมีการทำปฏิกิริยแร่ดินหลายขั้นตอน จึงทำให้ผลิตภัณฑ์แร่ดินมีความบริสุทธิ์สูง นอกจากนี้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์สามารถนำมาปรับปรุงสภาพพื้นผิวให้เหมาะสมกับการยึดจับโมเลกุลชนิดต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยึดจับได้ เช่น การนำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มาปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวประเภทควอเตอร์เอมีน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับสีย้อมผ้าเคมีสังเคราะห์ได้เนื่องจากพื้นที่ผิวของแร่ดินมีคุณสมบัติเปลี่ยนไปจากที่ชอบน้ำ (hydrophilic) กลายเป็นชอบสารอินทรีย์ (organophilic) โดยพิจารณาจากปริมาณคาร์บอนบนแร่ดินที่เพิ่มขึ้น และองค์ประกอบของสีย้อมผ้าส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์จึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับดีขึ้น (จักรกฤษณ์ อัมพสุข และ รัตนวรรณ เกียรติโกมล, 2549) สารไคโตซานเป็นสารที่สามารถสกัดมาจากเปลือกนอกของสัตว์จำพวกกุ้ง แมลง และปู ซึ่งมีการบริโภคสัตว์เหล่านี้เป็นจำนวนมากในประเทศไทย สารไคโตซานสามารถนำมาปรับปรุงคุณสมบัติทางพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

ให้สามารถยึดจับกับโมเลกุลที่มีประจุบวกและโมเลกุลที่มีประจุลบได้ (Wan Ngah and Kamari, 2009)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

ศึกษาการกำจัดสีย้อมผ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซาน ศึกษาความเป็นไปได้ในการดูดซับและศึกษาสภาวะที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับในการทดลองแบบกะในห้องปฏิบัติการ และศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในหน่วยปฏิบัติการหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ศึกษาการดูดซับสีย้อมเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ (เตรียมจากสีย้อมเคมีที่ชาวบ้านนิยมใช้ ข้อมูลในส่วนนี้ได้จากการเก็บข้อมูลภาคสนาม) โดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซานเป็นตัวดูดซับ การทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การศึกษาการดูดซับแบบกะในระดับห้องปฏิบัติการ และการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในหน่วยปฏิบัติการหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

1.4 สมมติฐานการวิจัย

เนื่องจากสารไคโตซานเป็นสารที่มีประจุทั้งบวกและลบภายในโมเลกุล จึงทำให้สามารถยึดจับกับพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีสภาพพื้นผิวมีประจุเป็นลบได้ แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซานแล้ว สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเคมีสังเคราะห์ได้ เนื่องจากสีย้อมเคมีสังเคราะห์ส่วนใหญ่เป็นสารที่มีประจุลบ โมเลกุล จึงสามารถยึดจับกับสารไคโตซานที่ถูกตรึงไว้บนพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ได้ด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้า

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. สามารถพัฒนาวิธีการปรับสภาพน้ำเสียที่เกิดจากการย้อมสีผ้าก่อนปล่อยทิ้งสู่แหล่งรองรับทางธรรมชาติ เพื่อลดปัญหาการปนเปื้อนของสีย้อมผ้าในดินและแหล่งน้ำภายในชุมชนที่มีการย้อมสีผ้าด้วยสีย้อมเคมีสังเคราะห์

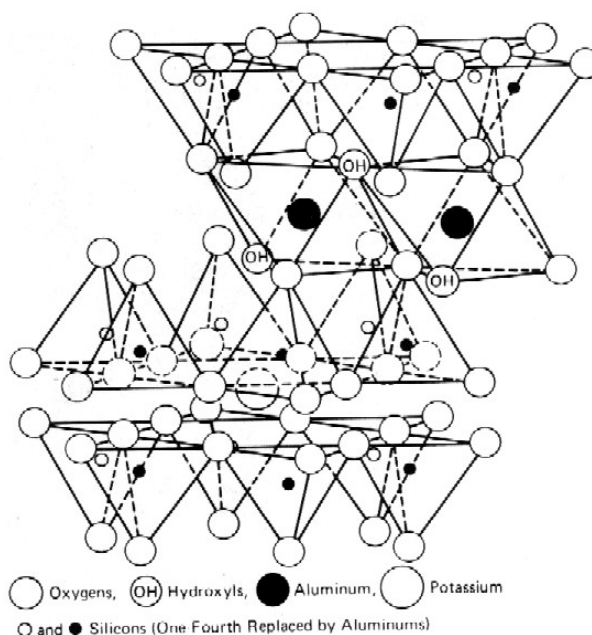
2. สามารถพัฒนาหน่วยปฏิบัติการในการกำจัดสีย้อมผ้าจากน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการย้อมสีผ้าในอุตสาหกรรมระดับครัวเรือนของกลุ่มชาวบ้านในพื้นที่บริเวณใกล้เคียงกับมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่มีต้นทุนต่ำ และไม่ซับซ้อนในการดำเนินงาน

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรม

2.1 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite clay)

แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite clay: MMT) เป็นแร่ดินในกลุ่มสเมคไทต์ (Smectite) มีสูตรทางเคมีทั่วไปคือ $M_{y+}(Al_{2-y},Mg_y)Si_4O_{10}(OH)_2.n(H_2O)$ สำหรับสูตรอย่างง่าย (Empirical formula) ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ได้แก่ $(Na,Ca)_{0.3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2.n(H_2O)$ โครงสร้างของแร่ดินแสดงไว้ในรูปที่ 2-1 (Ohtsuka, 1997)



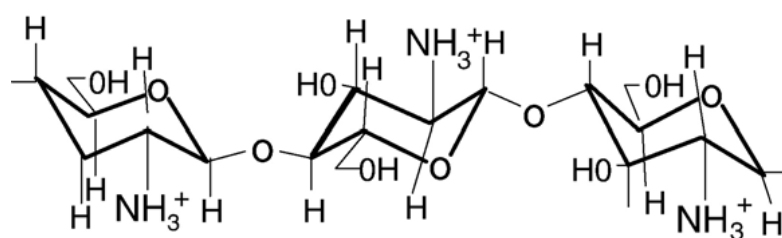
รูปที่ 2-1 โครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ วงกลมสีขาวใหญ่คือ ออกซิเจน วงกลมสีขาวเล็กคือ ไฮโดรเจน วงกลมสีดำใหญ่คือ อลูมิเนียม, เหล็ก, แมกนีเซียม วงกลมสีดำเล็กคือ ซิลิกา, บางส่วนเป็นอลูมินา วงกลมเล็กที่มี OH อยู่ตรงกลางคือ ไฮดรอกซิล

ในแต่ละชั้นดินจะประกอบไปด้วยแผ่น 3 แผ่นซ้อนกัน ได้แก่ แผ่นซิลิกาที่มีรูปร่างของเซลล์หน่วยเป็นแบบทรงสี่หน้า 2 แผ่นประกบกับแผ่นของอลูมินาที่มีรูปร่างของเซลล์หน่วยเป็นแบบทรงแปดหน้าแทรกอยู่ตรงกลาง เนื่องมาจากประจุสุทธิของชั้นดินเป็นประจุลบจึงเกิดการผลักกันระหว่างชั้นดินแต่ละชั้น จึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างชั้นกันอยู่ระหว่างแต่ละชั้นดิน การเกิดประจุลบบนชั้นดินเกิดมาจากอลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) สามารถเข้าไปแทนที่ซิลิกอนไอออน (Si^{4+}) ในแผ่นซิลิกา และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) หรือสังกะสีไอออน (Zn^{2+}) สามารถเข้าไปแทนที่อลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) ใน

แผ่นอลูมินาได้ แต่ออกซิเจนที่อยู่ล้อมรอบไอออนบวกเหล่านี้จัดเรียงตัวกันอย่างแน่นหนาจึงไม่สามารถขยับและไม่สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างไอออนได้ เมื่อเกิดการแทนที่ขึ้นมาก ๆ จะมีประจุลบเหลือมากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ประจุสุทธิของชั้นดินเป็นประจุลบ ส่งผลให้มีแรงผลักเกิดขึ้นระหว่างชั้นดินเกิดเป็นช่องว่างระหว่างชั้นดินขึ้น ในธรรมชาติเพื่อให้ประจุของแร่ดินมีความสมดุลจึงมีประจุบวก เช่น Na^+ Ca^{2+} และน้ำ เป็นต้น มาแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นดินเพื่อคู่กับประจุลบในชั้นดิน นี่เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แร่ดินพองตัวเมื่อละลายอยู่ในน้ำ เพราะน้ำจะเข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นดินทำให้ช่องว่างระหว่างชั้นดินขยายกว้างขึ้น (จักรกฤษณ์ อัมพขและรัตนวรรณ เกียรติโกมล, 2549)

2.2 ไคโตซาน (Chitosan)

ไคโตซาน (Chitosan) เป็นไบโอโพลิเมอร์ธรรมชาติอย่างหนึ่ง เป็นสารอนุพันธ์ของไคตินที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญในรูปของ D-glucosamine พบได้ในธรรมชาติ โดยเป็นองค์ประกอบอยู่ในเปลือกนอกของสัตว์พวกกุ้ง ปู แมลง และเชื้อรา เป็นสารธรรมชาติที่มีลักษณะโดดเด่นเฉพาะตัว คือ เป็นวัสดุชีวภาพ (Biomaterials) ย่อยสลายตามธรรมชาติ มีความปลอดภัยในการนำมาใช้กับมนุษย์ ไม่เกิดผลเสียและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม ไม่เกิดการแพ้ ไม่ไวไฟและไม่เป็นพิษ (non-phytoxic) ต่อพืช ไคโตซานเป็นตัวดูดซับที่นำมาใช้ในการดูดซับของแข็งแขวนลอยซึ่งไม่มีประจุ ไคโตซานสามารถนำไปใช้ดูดซับโลหะที่มีประจุบวกได้ดี เพราะว่ามีหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) อยู่ในโมเลกุล และสามารถดูดซับสีย้อมผ้าที่มีประจุลบได้ดี เนื่องจากมีหมู่อะมิโน ($-\text{NH}_2$) อยู่บนโซ่โพลิเมอร์ทำหน้าที่เป็นตัวยึดเกาะและเกิดปฏิกิริยา ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-2 ในแง่ทางเศรษฐกิจ ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ชนิดหนึ่งของไคตินซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาถูกเนื่องจากไคตินเป็นโพลิเมอร์ที่มีมากที่สุดเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส (Chang and Juang, 2004)

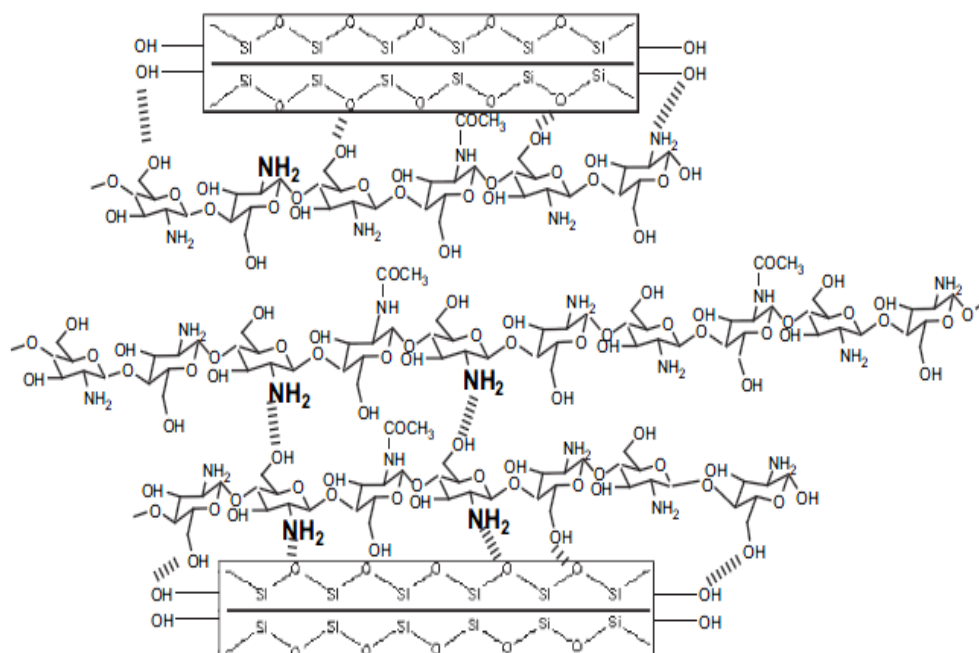


รูปที่ 2-2 โครงสร้างของโมเลกุลไคโตซาน (An and Dultz, 2007)

2.3 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซาน (Chitosan-coated-montmorillonite clay)

แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติมีพื้นที่ผิวสูงและมีประจุที่พื้นผิวเป็นประจุลบ และช่องว่างระหว่างชั้นดินสามารถขยายตัวได้เมื่อละลายอยู่ในน้ำ ไคโตซานเป็นโพลิเมอร์ธรรมชาติที่มี

ประจุบวกอยู่บนโมเลกุลจึงสามารถยึดจับกับพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลไนต์ได้ดี นอกจากนี้ไคโตซานยังสามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนบวกที่อยู่ภายในช่องว่างระหว่างชั้นของแร่ดินมอนต์มอริลไนต์ธรรมชาติได้ด้วย (Wang *et al.*, 2005) โครงสร้างของโมเลกุลไคโตซานยึดจับกับแร่ดินมอนต์มอริลไนต์ แสดงไว้ดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 โครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลไนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซาน

ไคโตซานมีความสามารถในการยึดจับพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลไนต์ได้สูงถึง 180% CEC (Cation Exchange Capacity) (Darder *et al.*, 2003) การยึดจับกันของไคโตซานกับพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลไนต์จะเกิดขึ้นเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างหมู่ hydroxylated ของสายโซ่โพลิเมอร์กับหมู่ hydroxylated ของชั้นซิลิเกต เนื่องจากไคโตซานหนึ่งโมเลกุลประกอบไปด้วยหมู่อะมิโน ($-NH_2$) หนึ่งหมู่และหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) สองหมู่ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ hydroxylated ของชั้นซิลิเกต ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์กับชั้นซิลิเกต (Wang and Wang, 2007) ลักษณะเช่นนี้ทำให้ช่องว่างระหว่างชั้นดิน (Basal spacing) ขยายใหญ่ขึ้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค X-ray diffraction

ไคโตซาน (poly N-acetyl-D-glucosamine) นิยมนำมาใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนัก เช่น ทองแดง (Wu *et al.*, 1999) โครเมียม (Fan *et al.*, 2006) และสารอินทรีย์ที่มีประจุเป็นกลางหรือสารอินทรีย์ที่มีประจุบวกอยู่ในโมเลกุล เช่น สีย้อมฟิฟ (reactive dye) หรือสีย้อมโลหะ (Wu *et al.*, 2001) เพราะว่าหมู่ไฮดรอกซิลบนโซ่โพลิเมอร์ของไคโตซานจะทำหน้าที่เป็นตัวยึดเกาะและการ

เกิดปฏิกิริยา ความสามารถในการดูดซับสารที่มีประจุตามธรรมชาติและโลหะของไบโอโพลิเมอร์ชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช เนื่องจากหมู่อะมิโนจะมีระดับการสูญเสียอิเล็กตรอนหรือโปรตอนเนต (Protonation) ไปเป็น -NH_3^+ เมื่อค่า $\text{pKa} = 6.3$ (Dambies *et al.*, 2001) นอกจากนี้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มอนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซานยังสามารถดูดซับสีย้อมผ้าที่มีประจุลบได้ด้วย เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างประจุ การดูดซับในช่วง pH ต่ำ ๆ หมู่อะมิโน (-NH_2) ของไคโตซานจะถูกโปรตอนเนต (ความแรงของประจุบวกของโมเลกุลเพิ่มขึ้น) ทำให้สามารถดึงดูดกับประจุลบของสีย้อมผ้าได้ดี แต่ในช่วง pH มากกว่า 7 หมู่อะมิโนจะถูกดีโปรตอนเนต (ความแรงของประจุลบของโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น) ไฮดรอกซิลไอออนที่เพิ่มขึ้นจำนวนมากจะเข้าไปแย่งจับกับพื้นผิวของตัวดูดซับกับประจุลบของสีย้อมผ้า ทำให้การดูดซับสีย้อมผ้าที่มีประจุลบเกิดขึ้นได้น้อยลง การดูดซับที่ค่า pH สูง ๆ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเป็นแบบ Chemisorption การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับตัวอย่างเช่น การดูดซับสีคองโกเรด (Congo Red) ด้วยแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซานจะเป็นไปตามแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม ซึ่งให้เห็นว่าขั้นตอนการดูดซับที่ช้าที่สุดเกิดขึ้นที่ขั้นตอน Chemisorption (Wan Ngah and Kamari, 2009) แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซานถูกนำมาใช้ในการดูดซับโลหะหนัก (Heavy metal) การดูดซับที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบ Chemosorption เนื่องจากมีการสร้างพันธะขึ้นระหว่างไอออนบวกของโลหะหนักกับหมู่ไฮดรอกซิลของไคโตซาน และการดูดซับสีย้อมผ้าที่มีประจุลบในโมเลกุล (anionic dye) บนไคโตซานบนพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซานจะเกิดขึ้นเนื่องจากการสร้างพันธะระหว่างไอออนบวกของหมู่อะมิโนกับไอออนลบของสีย้อมผ้า (Wan Ngah *et al.*, 2011) ดังนั้น แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซานจึงเป็นตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับดูดซับตัวถูกดูดซับที่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งอาจจะมีประจุบวกหรือลบบ่อยในโมเลกุลก็ได้

ถึงแม้ว่าไคโตซานจะแสดงความสามารถในการดูดซับโมเลกุลชนิดต่าง ๆ ได้ดีแล้ว แต่ยังมีข้อจำกัดเชิงกลบางประการ เช่น เกิดการบวม พองตัวเมื่อละลายอยู่ในน้ำ มีความถ่วงจำเพาะต่ำ จึงอาจจะนำมาซึ่งความไม่สะดวกในการใช้งาน เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานในการทดลองแบบกะในห้องปฏิบัติการและในหน่วยปฏิบัติการหอดูดซับ คุณสมบัติทางกายภาพเหล่านี้สามารถถูกปรับปรุงได้โดยการนำไคโตซานไปตรึงหรือเคลือบไว้บนพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ

2.4 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับคือการยึดเหนี่ยวตัวถูกละลายหรือตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) เช่น อะตอม ไอออน หรือโมเลกุลของก๊าซหรือของเหลวกับพื้นผิวของของแข็งหรือของเหลว (Adsorbent) กระบวนการ

นี้จะสร้างชั้นฟิล์มของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นเนื่องจากการยึดเกาะกันระหว่างตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับจะทำให้เกิดการลดลงของแรงดึงดูดหรือพลังงานที่พื้นผิวทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น การดูดซับแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพ หรือ Physisorption เป็นการดูดซับที่ตัวถูกดูดซับยึดเหนี่ยวกับพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยแรง van der Waals ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวอ่อน ๆ ขณะที่การดูดซับทางเคมีหรือ Chemisorption เป็นการดูดซับที่ตัวถูกดูดซับยึดเหนี่ยวกับพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยพันธะเคมี การดูดซับจะนิยามอธิบายในรูปของไอโซเทอมการดูดซับ นั่นคือ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล ซึ่งจะอยู่ในรูปของความดันในกรณีของก๊าซ และอยู่ในรูปของความเข้มข้นในกรณีของของเหลว ไอโซเทอมมีอยู่หลายชนิด ได้แก่ ไอโซเทอมแบบ Langmuir ไอโซเทอมแบบ Freundlich และไอโซเทอมแบบ BET เป็นต้น

เมื่อนำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มาผสมกับน้ำเสีย อนุภาคของแร่ดินจะกระจายตัวไปทั่วภาชนะบรรจุ เมื่อการดูดซับสิ้นสุดแล้วหรือระบบอยู่ในสมดุลแล้ว จะต้องทำการแยกตัวดูดซับออกจากน้ำเสียหลังการดูดซับ ซึ่งอาจจะใช้เทคนิคการตกตะกอน การกรอง การปั่นเหวี่ยง เป็นต้น จึงอาจจะไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริง เพื่อลดปัญหานี้การออกแบบให้เกิดการดูดซับในหน่วยปฏิบัติการหอดูดซับแบบเบดนิ่งจึงถูกนำมาใช้ในการดูดซับ โดยบรรจุแร่ดินไว้ในคอลัมน์แล้วปัมน้ำเสียจากสี่เหลี่ยมผ่านคอลัมน์ เมื่อสิ้นสุดการดูดซับแล้วจึงไม่จำเป็นต้องแยกแร่ดินออกจากน้ำเสีย เพราะแร่ดินได้ถูกกักเก็บไว้ในคอลัมน์แล้ว ประสิทธิภาพการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งจะนิยมแสดงโดยการสร้างความสัมพันธ์ที่เรียกว่ากราฟเบรคทูร (Breakthrough curve) ซึ่งเป็นการพล็อตระหว่างอัตราส่วนของความเข้มข้นหลังผ่านคอลัมน์ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) กับเวลาหรือปริมาตรเบด (Bed volume) ตัวอย่างเช่น การดูดซับสีเอโซ 3 ชนิดได้แก่ สีรีเอคทีฟแบล็ค 5 สีรีเอคทีฟเรด 5 และสีเหลือง 176 โดยใช้ซีโอไลต์เคลือบผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวประเภท Quaternary amine, hexadecyl trimethyl ammonium bromide ในหน่วยปฏิบัติการหอดูดซับแบบเบดนิ่ง พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีรีเอคทีฟแบล็ค 5 มีค่าสูงสุด เนื่องจากมีจุดเบรคทูรสูงที่สุด เป็นต้น (Benkli *et al.*, 2005)

2.5 กระบวนการผลิตผ้าในอุตสาหกรรมแบบครัวเรือน (Process)

จากการศึกษากระบวนการทอผ้าฝ้ายในพื้นที่จริงจากกลุ่มสตรีทอผ้าบ้านคำขวาง 138 หมู่ 5 บ้านคำขวาง ต.คำขวาง อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี มีขั้นตอนในการย้อมสีผ้าต่อไปนี้

ก. การปั่นเส้นใย ชาวบ้านจะเรียกขั้นตอนนี้ว่า “การขึ้นหูก” การขึ้นหูกจะมีอยู่ 2 ลักษณะ ได้แก่ การขึ้นหูกเส้นยืนและการขึ้นหูกเส้นพุ่ง ทำให้เส้นใยนั่นจับตัวกันเป็นระเบียบคล้ายกับการม้วนเก็บเชือก เพื่อให้สะดวกในการนำไปข้อมในขั้นตอนต่อไป

ข. การข้อมสีผ้า ชาวบ้านจะทำการข้อมสีผ้าเดือนละประมาณ 2 ครั้ง โดยใช้สีข้อมผ้าที่เป็นสีเคมีสังเคราะห์ สีข้อมที่ชาวบ้านนิยมใช้ ได้แก่ สีข้อมผ้าตราสิงโตดึกทองและสีข้อมผ้าตราแมววิ่งรอบโลก โดยเริ่มจากการต้มน้ำในกะละมังโดยใช้น้ำประมาณ 5 ลิตร รอจนกระทั่งน้ำเดือดแล้วเติมผงสีข้อมเคมีลงไป 1 ชอง (15 กรัม) เมื่อสีข้อมละลายในน้ำดีแล้ว จะนำเส้นใยฝ้ายหนัก 1 กิโลกรัมใส่ลงไป โดยจะทำการพลิกเส้นใยไปมาเพื่อให้สามารถข้อมสีเส้นใยได้สม่ำเสมอและป้องกันไม่ให้มีรอยด่างบนเส้นใย ในระหว่างที่ข้อมสีผ้าในกะละมังจะทำการเติมเกลือแกงลงไปประมาณ 1 ช้อนโต๊ะ เพื่อให้สีติดเนื้อผ้าได้ดีขึ้นและผ้ามีสีสดขึ้น ปลอຍเส้นใยต้มอยู่ในกะละมังนานประมาณ 20 นาที หลังจากนั้นนำเส้นใยไปล้างกับน้ำสะอาด ล้างจนกระทั่งไม่มีสีข้อมเคมีละลายออกมาจากเส้นใยที่ทำการข้อม

ค. การต่อเส้น ขั้นตอนนี้ชาวบ้านจะนำเส้นใยฝ้ายที่ข้อมสีเสร็จแล้วมาทำการต่อเส้นใยเพื่อเพิ่มความยาว เพื่อให้ได้ความยาวของเส้นฝ้ายตามที่ต้องการ ต่อจากนั้นจะทำการปั่นเก็บเส้นใยที่ต่อเสร็จแล้ว

ง. การทอผ้าและการตัดเย็บ ในขั้นตอนนี้ชาวบ้านจะนำเส้นใยฝ้ายมาทอเป็นผืนผ้า โดยใช้เครื่องทอผ้าซึ่งชาวบ้านจะเรียกว่า “หูก” โดยจะตอเส้นใยด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า “ฟืม” และเรียกเส้นที่ถูกตอว่า “เส้นยืน” นอกจากนี้ชาวบ้านจะนำเส้นใยอีกส่วนหนึ่งไปร้อยไว้กับกระสวยทอผ้าและทำการสานกับเส้นยืนกลายเป็นผืนผ้าออกมา โดยจะเรียกเส้นใยที่ร้อยไว้กับกระสวยทอผ้านี้ว่า “เส้นพุ่ง” หลังจากนั้นทำการตัดเย็บ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ ได้แก่ เสื้อกาบบัว กางเกง ผ้าพันคอ ผ้าขาวม้า เป็นต้น

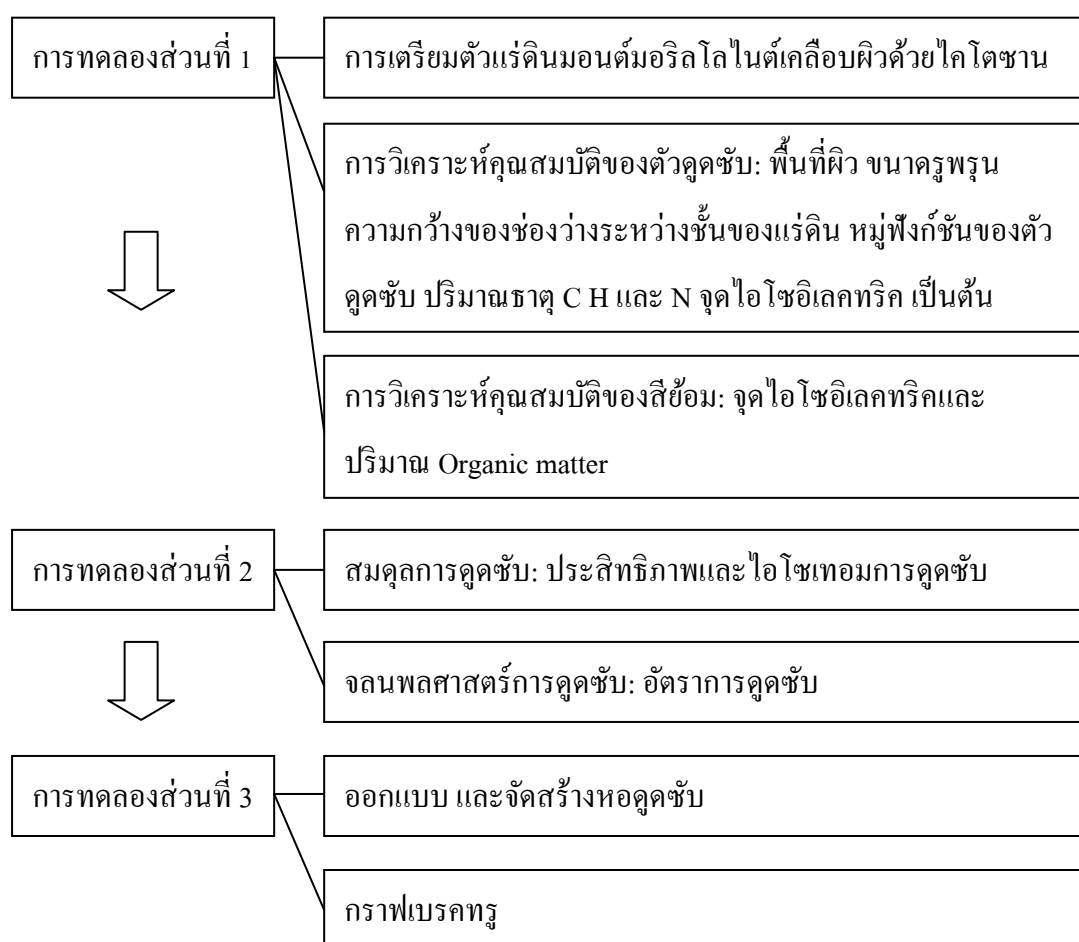
น้ำเสียที่เกิดจากการข้อมผ้าด้วยสีข้อมเคมีสังเคราะห์ในอุตสาหกรรมระดับครัวเรือน จะมีค่า BOD อยู่ในช่วง 17 – 462 mg/L และค่า COD อยู่ในช่วง 170 – 2,360 mg/L ขึ้นอยู่กับชนิดของสีเคมีที่ใช้ข้อม ค่ามาตรฐานที่รัฐบาลกำหนด BOD $\leq$ 20 mg/L และค่า COD $\leq$ 120 mg/L (จักรกฤษณ์ อัมพุก และรัตนวรรณ เกียรติโกมล, 2549)

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 กรอบการวิจัย

กรอบแนวคิดของงานวิจัยนี้สามารถแสดงไว้ในแผนภาพที่แสดงไว้ในรูปที่ 3-1 งานวิจัยนี้สามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การเตรียมและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับและสีย้อม เป็นการศึกษาการเคลือบผิวแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารไคโตซาน และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับที่เตรียมขึ้น เช่น ความกว้างของช่องว่างระหว่างชั้นของแร่ดิน หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ พื้นที่ผิวสัมผัส ขนาดรูพรุน และปริมาณธาตุ C และ N ที่เปลี่ยนแปลงไป เป็นต้น ส่วนที่ 2 การทดลองแบบกะในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะศึกษาสมมูลการดูดซับและจลนพลศาสตร์การดูดซับ ส่วนที่ 3 การทดลองในหน่วยปฏิบัติการหอดูดซับ ส่วนนี้จะศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของสีย้อมผ้าผ่านคอลัมน์ที่บรรจุตัวดูดซับแบบเบดนิ่ง



รูปที่ 3-1 แผนภาพกรอบแนวคิดงานวิจัย

3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ใช้ในการทดลอง (ได้รับการสนับสนุนมาจากบริษัทไทยนิปอนด์ เคมีภัณฑ์อุตสาหกรรม จำกัด ประเทศไทย) มีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-1 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติมีค่า CEC (Cation Exchange Capacity) เท่ากับ 0.8 meq./g ซึ่งเป็นข้อมูลที่บริษัทระบุไว้ ชนิดสีส้มเคมีสังเคราะห์ที่ใช้ได้แก่สีย้อมผ้าตราสิงโตติดลอง ของบริษัท พวเทียมสีน จำกัด ซึ่งเป็นสีย้อมที่ชาวบ้านนิยมใช้ (ข้อมูลได้จากการสำรวจข้อมูลภาคสนามในชุมชนท้องถิ่นใกล้ ๆ กับมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี) สารเคมีที่ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวของแร่ดินตัวดูดซับ ได้แก่ สารไคโตซาน จากบริษัท Aldrich Chemistry

ตารางที่ 3-1 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีโดยน้ำหนัก (%wt) ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

องค์ประกอบทางเคมี	%wt	องค์ประกอบทางเคมี	%wt
SiO ₂	56-60	MgO	1.5-2.0
Al ₂ O ₃	16-18	CaO	1.9-2.1
Fe ₂ O ₃	5-7	K ₂ O ₃	0.3-0.5
Na ₂ O	2.4-3	TiO ₂	1.2-1.5

3.3 การเตรียมและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ

3.3.1 การเตรียมแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซาน

นำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) 1 g ละลายในน้ำดีไอ 100 mL และเติมสารละลายไคโตซานเข้มข้น 2 g.L⁻¹ ปริมาตร 100 mL และทำการกวนด้วยอัตราการกวนคงที่เป็นเวลา 1 hr ที่ 25°C ค่า pH จะถูกปรับด้วยสารละลาย HCl ให้อยู่ในช่วง 7.0 - 7.5 ทั้งสารละลายให้อยู่ในรูปของเจลเป็นเวลา 30 นาที ที่ 25°C หลังจากนั้นนำมากรองและล้างด้วยน้ำดีไอและทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 24 hr นำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่เคลือบผิวด้วยไคโตซาน (CTS-MMT) มาบดด้วยครกวิทยาศาสตร์ให้ละเอียด แล้วไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 mesh ก็จะได้ขนาดอนุภาคของแร่ดินน้อยกว่า 75 μ m (Futalan *et al.*, 2010)

3.3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ

ก. การวิเคราะห์หาความกว้างของช่องว่างระหว่างชั้นดิน (ค่า d_{001}) ของแร่ดิน MMT และแร่ดิน CTS-MMT โดยใช้กฎของแบรกก์ (Bragg's law) เพื่อเปลี่ยนค่า 2θ ไปเป็นค่า d_{001} ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction

ข. การวิเคราะห์หาการแทนที่ของหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่ $(-\text{NH}_2)$ และหมู่ไฮดรอกซิล $(-\text{OH})$ ของสารไคโตซาน กับหมู่ของน้ำในแร่ดิน MMT เมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวของแร่ดิน MMT ด้วยสารไคโตซาน วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR (Fourier transform infrared spectrophotometer)

ค. การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของแร่ดิน MMT และแร่ดิน CTS-MMT โดยใช้วิธี BET วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Automatic Surface Analyzer

ง. วิเคราะห์หาปริมาณธาตุคาร์บอน ธาตุไฮโดรเจน และธาตุไนโตรเจน ด้วยเครื่อง CHNS analyzer

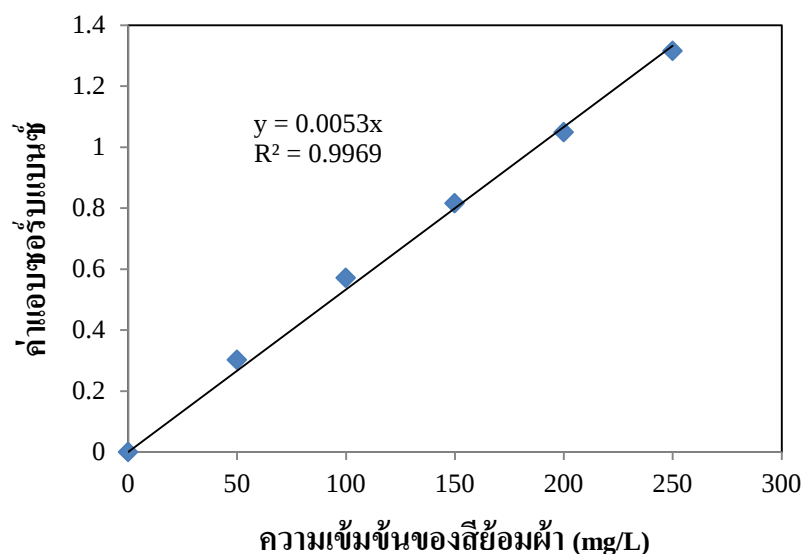
จ. วิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ในตัวดูดซับทั้งสองชนิด เพื่อใช้ยืนยันว่าสีย้อมถูกตรึงไว้ที่ผิวของตัวดูดซับ โดยใช้วิธี Organic matter determination อ้างอิงจาก ASTM D 2974 – Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Organic Soils เนื่องจากสีย้อมผ้าเคมีสังเคราะห์ส่วนใหญ่มีองค์ประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์ เพราะมีธาตุคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลัก ดังนั้น จึงได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ในสีย้อมผ้า โดยใช้วิธี Organic matter determination เช่นเดียวกับการวิธีที่ใช้วิเคราะห์ตัวดูดซับ

ฉ. วิเคราะห์หา Point of zero charge ของตัวดูดซับและสีย้อม

การทำ Point of zero charge (จุดที่มีประจุสุทธิเป็นศูนย์) จะใช้วิธี Solid addition method (Li Wang *et al.*, 2008) นำตัวดูดซับหรือผงสีย้อมผ้าจำนวน 0.1 g ละลายในสารละลาย KNO_3 ที่ความเข้มข้น 0.1 M จำนวน 45 มิลลิลิตร ทำการปรับค่า pH_0 (พีเอชเริ่มต้น) ต่าง ๆ กัน ได้แก่ 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 โดยการปรับค่า pH ด้วยสารละลาย 0.1 M NaOH หรือ 0.1 M HNO_3 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปวัดค่า pH_f (พีเอชสุดท้าย) เพื่อนำไปวิเคราะห์หาจุดที่มีประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pH_{PZC}) โดยการนำค่า pH_0 กับ $\text{pH}_0 - \text{pH}_f$ (ของแต่ละ pH ต่าง ๆ) ไปพล็อตกราฟ ทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย KNO_3 ไปเป็น 0.01 M

3.3.3 วิธีการวัดปริมาณสีของผ้าในของเหลว

การวัดความเข้มข้นของสีของผ้าในสารละลายทำได้โดยการวัดความเข้มของแสงส่องผ่านในรูปแบบของค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Absorbance, Abs) โดยใช้เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer โดยอาศัยกฎของเบียร์ (Beer's Law) ที่กล่าวว่า “เมื่อแสงส่องผ่านสารละลายตัวกลาง ค่าความเข้มแสงจะลดลงเป็นปฏิกิริยาแบบชี้กำลัง (Exponential) กับการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารละลาย” ค่าแอมซอร์บแนนซ์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นความเข้มข้นโดยใช้กราฟมาตรฐาน (Standard curve) โดยมีวิธีการทำดังนี้ เตรียมสารละลายสีของผ้าที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน (50, 100, 150, 200 และ 250 mg/L) ต่อมาทำการสแกนหาค่าความยาวคลื่นสูงสุด ($\lambda_{\max}$) ของสีของผ้าแต่ละสี จากนั้นสร้างกราฟมาตรฐาน ของสีของผ้า โดยการนำสารละลายสีของผ้าที่ทราบความเข้มข้นแล้ว มาวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่สามารถดูดกลืนแสงได้มากที่สุด ($\lambda_{\max}$) แล้วสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมซอร์บแนนซ์กับความเข้มข้นของสีของผ้าในช่วงความเข้มข้น 0 – 250 mg/L ตัวอย่างกราฟมาตรฐานของสีของผ้า (สีคราม) จะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3-2 และสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมซอร์บแนนซ์กับความเข้มข้นของสีของผ้าในกราฟมาตรฐานของสีของผ้าแต่ละสีจะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3-2



รูปที่ 3-2 กราฟมาตรฐานของสีคราม ด้วยความยาวคลื่นสูงสุด เท่ากับ 567 nm

ตารางที่ 3-2 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมซอร์บแนนซ์กับความเข้มข้นของสีย้อมในกราฟมาตรฐาน

ลำดับ	ชนิดสีย้อม	ความยาวคลื่น ที่ค่าแอม ซอร์บแนนซ์ สูงสุด (nm)	สมการความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแอมซอร์บแนนซ์กับความ เข้มข้น	R ²
1	สีน้ำเงิน	536	$y = 0.0023x$	0.9991
2	สีเหลืองแก่	429	$y = 0.0065x$	0.9908
3	สีเขียวหัวเป็ด	596	$y = 0.0024x$	0.9961
4	สีแดงครึ่ง	525	$y = 0.0082x$	0.9913
5	สีเขียวกลาง	634	$y = 0.0055x$	0.9916
6	สีชมพู	536	$y = 0.0064x$	0.9927
7	สีระกำทอง	476	$y = 0.0035x$	0.9977
8	สีคราม	567	$y = 0.0053x$	0.9942
9	สีเลือดหมู	520	$y = 0.0095x$	0.9943
10	สีฟ้า	585	$y = 0.0049x$	0.9925
11	สีเขียวขี้ม้าสด	520	$y = 0.0014x$	0.9974
12	สีน้ำตาลทอง	520	$y = 0.0013x$	0.9995
13	สีน้ำตาลแก่	525	$y = 0.0035x$	0.9988
14	สีแก่นขนุน	618	$y = 0.0022x$	0.9923

หมายเหตุ y คือ ค่าแอมซอร์บแนนซ์ และ x คือ ความเข้มข้นของสีย้อม(mg/L)

3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การทดลองแบบกะชนิดขั้นตอนเดียว

ก.การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมผ้า

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมผ้า มีวิธีการดังนี้ เตรียมสารละลายสีย้อมผ้าที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 mg/L ปริมาตร 200 mL เพื่อใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ จากนั้นนำไปวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer เพื่อให้ทราบค่าแอมซอร์บแนนซ์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น เสร็จแล้วเทใส่ในขวดรูปชมพู่แล้วเติมตัวดูดซับ (แรดนิมอนด์มอร์ริโด

ไนโตรธรรมชาติ หรือแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซาน) ลงไป 0.5 g ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยกระดาษฟอยล์ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เพียงพอที่จะก่อให้เกิดสมมูลการดูดซับสีของเหล่านี (จักรกฤษณ์ อัมพุข และรัตนวรรณ เกียรติโกมล, 2549) จากนั้นนำสารละลายที่ได้ปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็วรอบ 6,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที เพื่อแยกเอาตัวดูดซับออก นำสารละลายส่วนที่ใสไปวัดค่าแอมบอร์บแบนซ์ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับสีของผ้า

ข. การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

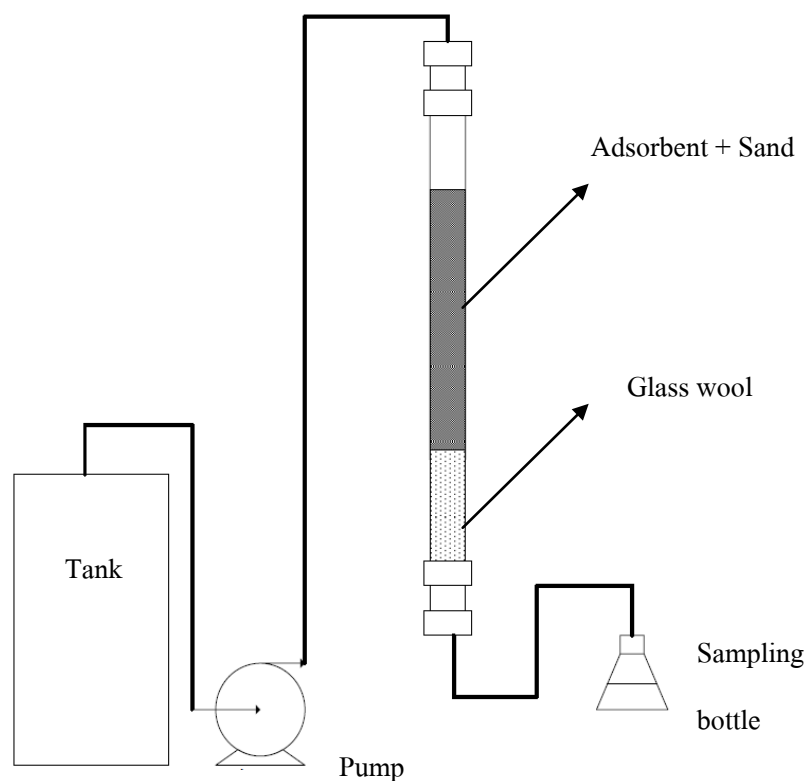
การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีของผ้า มีวิธีการเช่นเดียวกันกับการหาประสิทธิภาพการดูดซับสีของผ้า โดยเตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน นั่นคือ ในช่วง 0 - 250 mg/L (50, 100, 150, 200 และ 250 mg/L) ปริมาตร 200 mL และผสมกับตัวดูดซับ (แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซาน) จำนวน 0.1 g แล้วทำการทดลองเช่นเดียวกับการหาประสิทธิภาพการดูดซับสีของผ้า

ค. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีของผ้า มีวิธีการทดลองดังนี้ เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากสีของผ้าที่มีความเข้มข้น 200 mg/L จำนวน 800 mL ในบีกเกอร์ขนาด 1,000 mL ทำการเก็บตัวอย่างเพื่อหาความเข้มข้นเริ่มต้นที่แท้จริง โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer นำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซาน 0.4 g ผสมกับสารละลายสีของผ้าในบีกเกอร์แล้วกวนสารแขวนลอยด้วยเครื่อง Jar-test ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ทำการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 5 นาทีในครึ่งชั่วโมงแรก ต่อมาทำการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 30 นาที จนถึงชั่วโมงที่ 3 หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 60 นาที นำตัวอย่างที่เก็บได้ไปทำการแยกตัวดูดซับออกโดยใช้เครื่อง Centrifuge ด้วยความเร็วรอบ 6,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาทีทันที เสร็จแล้วนำสารละลายส่วนที่ใสไปวัดค่าแอมบอร์บแบนซ์และเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นโดยใช้กราฟมาตรฐาน

3.4.2 การทดลองในหน่วยปฏิบัติการหอดูดซับ

ก. ออกแบบและจัดสร้างหน่วยปฏิบัติการหอดูดซับแบบเบดนิ่ง



รูปที่ 3-3 แผนภาพของหน่วยปฏิบัติการหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

หน่วยปฏิบัติการหอดูดซับแบบเบดนิ่ง ประกอบด้วย คอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm สูง 40 cm ปัมป์ชนิดโซลินอยด์ ปลายด้านหนึ่งของคอลัมน์จะบรรจุใยแก้ว (Glass wool) สูง 10 cm และปลายอีกหนึ่งจะเททรายละเอียดผสมตัวดูดซับลงไป หลังจากนั้นปลายทั้งสองข้างจะถูกเชื่อมต่อกับท่อสายยางพลาสติก เพื่อป้องกันน้ำเสียสังเคราะห์ที่บริเวณปลายด้านบน และเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์จากท่อที่ปลายด้านล่าง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3-3

ข. การดูดซับสีย้อมผ้าในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

นำแร่ดินที่ใช้เป็นตัวดูดซับผสมทรายควอซเซ่าให้เข้ากันในอัตราส่วน ตัวดูดซับ 2 % โดยใช้ใยแก้วรองรับตัวดูดซับผสมทรายเพื่อป้องกันการอุดตัน จากนั้นปล่อยสารละลายสีย้อมเคมีที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน 3 ค่า ไหลผ่านคอลัมน์ที่ความเร็วเริ่มต้นแตกต่างกัน 3 ค่า และความสูงของ

เบดในคอลัมน์แตกต่างกัน 3 ค่า ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-3 เก็บตัวอย่างสารละลายที่ออกจากคอลัมน์ที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสีข้อมเคมีที่เหลือในสารละลาย

ตารางที่ 3-3 ชุดการทดลองการดูดซับในหน่วยปฏิบัติการหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

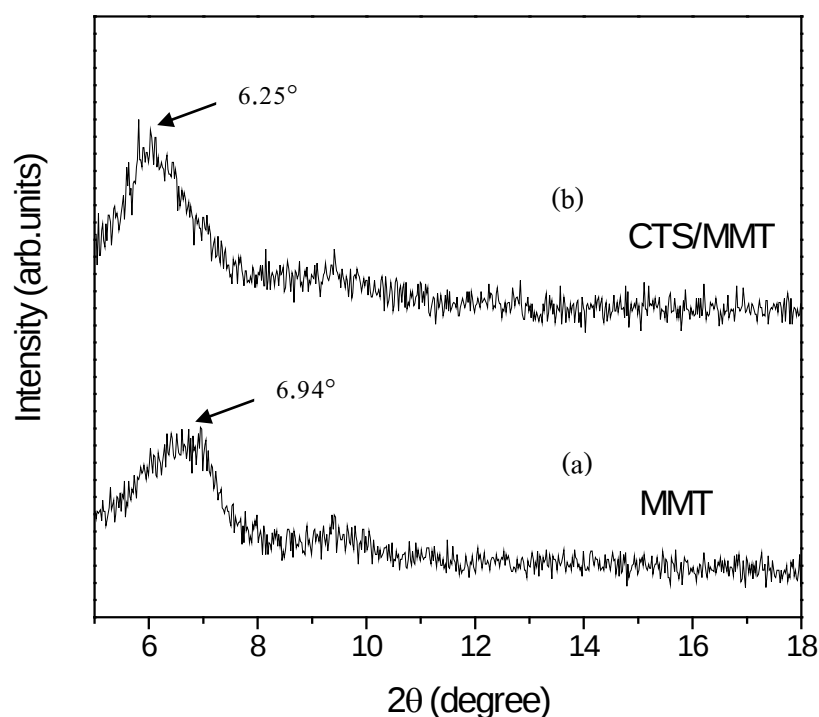
Inlet concentration (mg/L)	Mixed sand-clay bed height (cm)	Initial flow rate (mL/min)
50	10	5
100	10	5
200	10	5
100	15	5
100	20	5
100	10	10
100	10	15

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับและสีย้อมผ้า

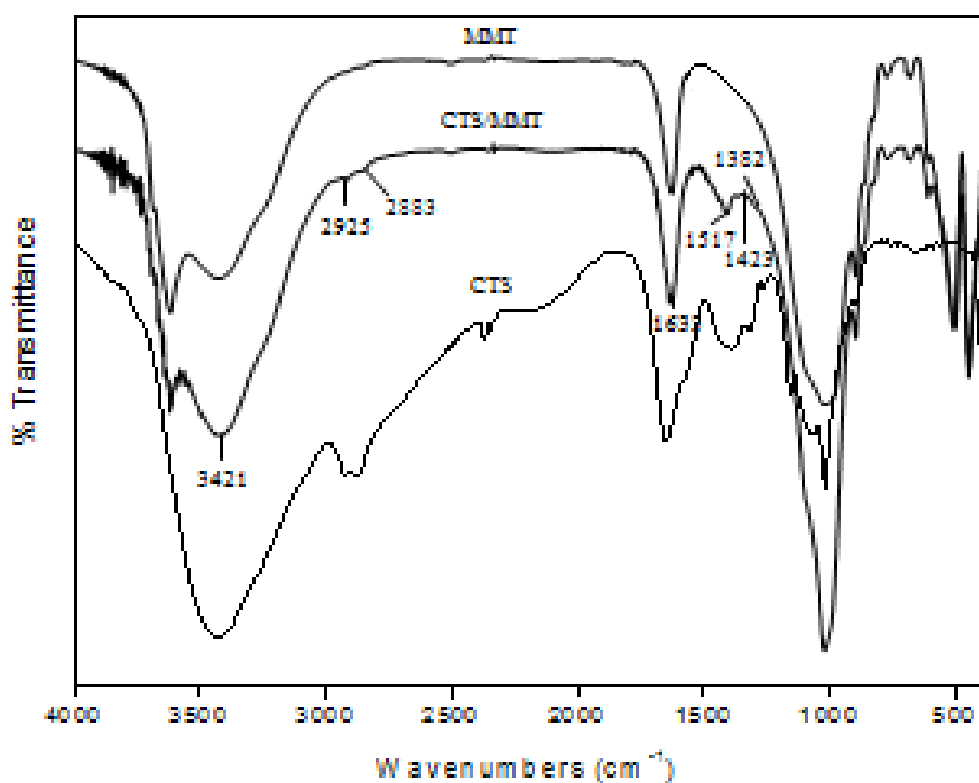
เมื่อนำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ (MMT) และแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซาน (CTS-MMT) ไปวิเคราะห์หาความกว้างของช่องว่างภายในชั้นดิน (Basal Spacing, d_{001}) พบว่า แร่ดิน MMT มีพีคของการเลี้ยวเบน (Peak of diffraction: 2θ) เท่ากับ 6.94° หรือมีค่าความกว้างของช่องว่าง d_{001} เท่ากับ 1.27 nm และแร่ดิน CTS-MMT มีพีคของการเลี้ยวเบนเท่ากับ 6.25° หรือมีค่าความกว้างของช่องว่าง d_{001} เท่ากับ 1.40 nm ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4-1 ลักษณะเช่นนี้แสดงให้เห็นว่า แร่ดิน CTS-MMT มีความกว้างของช่องว่างระหว่างชั้นดิน d_{001} มากกว่าแร่ดิน MMT ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสารไคโตซานเข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นดินส่งผลให้ช่องว่าง d_{001} กว้างขึ้น



รูปที่ 4-1 แผนภาพ XRD ของผงแร่ดิน MMT (a) และแร่ดิน CTS-MMT (b)

FTIR-spectrum ของแร่ดิน MMT แสดงไว้ในรูปที่ 4-2 พบว่า การปรากฏของ vibration bands ที่ 3421 cm^{-1} เนื่องมาจากพันธะ H ของ O-H stretching ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวภายนอกของอนุภาคแร่ดิน (Interlayer) และเกิดขึ้นภายในอนุภาคของแร่ดิน (intalayer) ขณะที่ FTIR-spectrum ของสารไคโตซานแสดงให้เห็นพีคที่ 3421 cm^{-1} แทนการ overlapping ของหมู่ O-H กับ N-H stretching bands ที่ 2925 แทน aliphatic C-H stretching, ที่ 1632 และ 1517 cm^{-1} แทน N-H bending, ที่ 1423 และ 1382

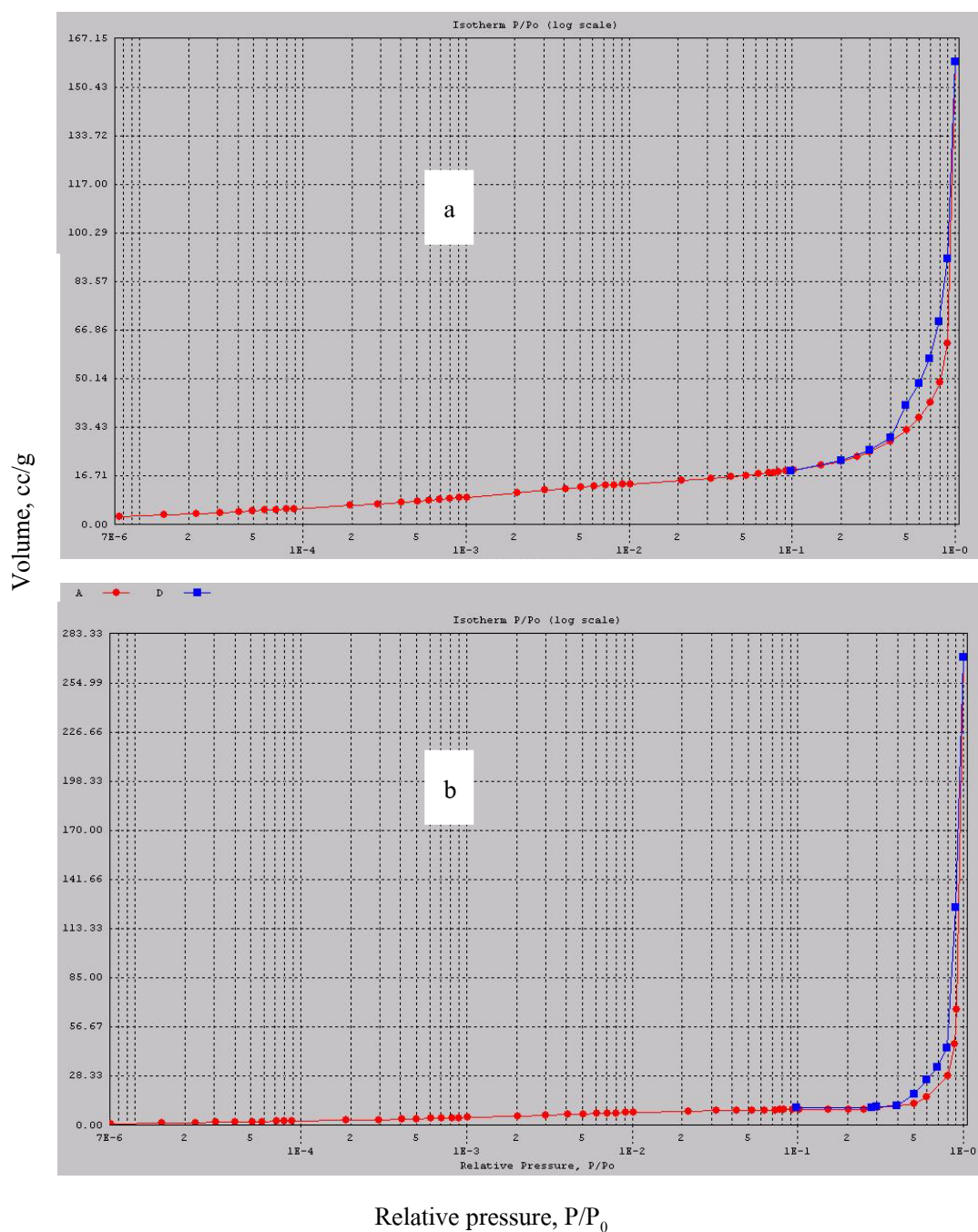
cm^{-1} แทน C-H bending และ FTIR-spectrum ของแร่ดิน CTS-MMT แสดงให้เห็นว่า ที่ความถี่ 3421 cm^{-1} ของแร่ดิน CTS/MMT จะพบหมู่ฟังก์ชัน O-H และ ที่ความถี่ 2925 cm^{-1} N-H (ส่วน MMT จะพบหมู่ฟังก์ชัน -OH และ น้ำ) ที่ 1423 cm^{-1} พบหมู่ฟังก์ชัน C-H (Methyl) ส่วนที่ความถี่ 2883 cm^{-1} และ 1382 cm^{-1} พบหมู่ฟังก์ชัน C-H (Methylene) และที่ความถี่ 1517 cm^{-1} พบหมู่ฟังก์ชัน N-H (Amine) แต่สำหรับในแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติจะไม่พบเลย และที่ความถี่ 1633 cm^{-1} ของ CTS/MMT พบหมู่ฟังก์ชัน NH – CO (ส่วน MMT จะพบหมู่ฟังก์ชัน -OH และ น้ำ) การปรากฏหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของสารไคโตซานบนแร่ดิน CTS-MMT แต่ไม่พบในแร่ดิน MMT จะแสดงให้เห็นถึงการยึดจับกันของไคโตซานกับแร่ดิน MMT



รูปที่ 4-2 FT-IR spectra ใน Transmission mode ของสารไคโตซาน (CTS), แร่ดิน CTS-MMT, และแร่ดิน MMT

รูปที่ 4-3 แสดงไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับของก๊าซไนโตรเจนบนตัวดูดซับแร่ดิน MMT และ CTS-MMT เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี BET พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะของ MMT และ CTS-MMT มีค่าเท่ากับ $78.23 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $35.47 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ พื้นที่ผิวที่ลดลงของ CTS-MMT อาจเนื่องมาจากการยึดจับตัวกันอย่างหนาแน่นของโมเลกุลไคโตซานบนพื้นผิวภายนอกและช่องว่างระหว่างชั้นของแร่ดิน MMT ทำให้อนุภาคของแร่ดินมีขนาดใหญ่ขึ้น เป็นผลให้เกิดการปิดหรือบดบัง

รูพรุนขนาดเล็กของแร่ดิน MMT ทำให้โมเลกุลของไนโตรเจนไม่สามารถผ่านเข้าไปในรูพรุนได้ ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของ CTS-MMT มีค่าเท่ากับ $19.32 \text{ \AA}$ เมื่อเปรียบเทียบกับแร่ดิน MMT ที่มีค่าเท่ากับ $36.27 \text{ \AA}$



รูปที่ 4-3 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับของก๊าซไนโตรเจนบนแร่ดิน MMT (a) และ แร่ดิน CTS-MMT (b)

ตารางที่ 4-1 แสดงผลการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ กำมะถัน ของแร่ดิน MMT และแร่ดิน CTS-MMT ด้วยเครื่อง CHNS-analyzer พบว่า แร่ดิน CTS-MMT มีปริมาณของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและกำมะถันมากกว่าแร่ดิน MMT ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสารไคโตซานมีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน เป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในโมเลกุล ขณะที่แร่ดิน MMT มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นซิลิกาและอลูมินาและมีปริมาณของธาตุคาร์บอนน้อยมาก เมื่อนำสารไคโตซานมาตรึงไว้บนผิวของแร่ดิน MMT จึงทำให้ปริมาณของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน เพิ่มสูงขึ้นในแร่ดิน CTS-MMT

ตารางที่ 4-1 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน และ กำมะถัน ของแร่ดิน MMT และ CTS-MMT โดยใช้เครื่อง CHNS-analyzer 932

ชนิดของตัวดูดซับ	ปริมาณของธาตุองค์ประกอบ (%)			
	C	H	N	S
MMT	2.929	1.825	0.462	0.3436
CTS-MMT	14.10	3.622	2.627	1.640

ตารางที่ 4-2 แสดงเปอร์เซ็นต์ Organic matter ของสีย้อมผ้าและตัวดูดซับ ได้แก่ แร่ดิน MMT และแร่ดิน CTS-MMT พบว่า สีย้อมผ้าที่ศึกษาทุกชนิดมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ ขณะที่แร่ดิน MMT มีเปอร์เซ็นต์ Organic matter น้อยมากหรือเท่ากับ 0 และแร่ดิน CTS-MMT มีปริมาณสารอินทรีย์อยู่ในโมเลกุลเท่ากับ 26.28% การที่แร่ดิน CTS-MMT มีปริมาณสารอินทรีย์ปรากฏอยู่ในโมเลกุลมากกว่าแร่ดิน MMT เป็นการยืนยันว่าไคโตซานเข้าไปยึดเกาะกับพื้นผิวของแร่ดิน MMT จริง จากตารางที่ 4-3 แสดงผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ Organic matter บนแร่ดิน CTS-MMT หลังการดูดซับสีย้อมผ้า 5 ชนิด พบว่า แร่ดิน CTS-MMT ก่อนการดูดซับจะมีสารอินทรีย์อยู่ประมาณ 26.28 % แต่เมื่อนำมาดูดซับกับสีย้อมแล้ว แร่ดิน CTS-MMT จะมีปริมาณของสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าแร่ดิน CTS-MMT สามารถยึดจับกับโมเลกุลของสีย้อมผ้าได้ โดยพิจารณาจากปริมาณสารอินทรีย์ของสีย้อมผ้าที่อยู่ในตัวดูดซับหลังการดูดซับ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมมูลมวลสารแสดงได้ดังสมการ (4-1)

$$OM_{\text{Dyes, eq}} = OM_{\text{CTS/MMT, eq}} - OM_{\text{CTS/MMT, in}} \quad (4-1)$$

โดย $OM_{Dyes, eq}$ คือ ปริมาณสารอินทรีย์ของสีย้อมผ้าที่อยู่ในตัวดูดซับหลังการดูดซับที่สภาวะสมดุล (%) $OM_{CTS/MMT, eq}$ คือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในตัวดูดซับหลังการดูดซับที่สภาวะสมดุล (%) และ $OM_{CTS/MMT, in}$ คือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในตัวดูดซับก่อนการดูดซับ (%)

ตารางที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ และ Point of zero charge ของแร่ดิน MMT และแร่ดิน CTS-MMT และสีย้อมผ้า

ลำดับ	ชนิดสีย้อม	% Organic matter	Point of zero charge
1	สีน้ำเงิน	6.68	7.2
2	สีเหลืองแก่	14.68	6.8
3	สีเขียวหัวเป็ด	17.79	6.8
4	สีแดงครึ่ง	21.35	7.5
5	สีเขียวกลาง	2.49	7
6	สีชมพู	23.24	6.7
7	สีระกำทอง	10.53	7.5
8	สีคราม	21.74	8.4
9	สีเลือดหมู	8.43	6.8
10	สีฟ้า	21.78	6.3
11	สีเขียวขี้ม้าสด	7.77	7
12	สีน้ำตาลทอง	12.52	7.5
13	สีน้ำตาลแก่	19.74	7.5
14	สีแก่นขนุน	99.73	7
15	แร่ดิน MMT	0	8.2
16	แร่ดิน CTS-MMT	26.28	8.5

ตารางที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ในแร่ดิน CTS-MMT หลังการดูดซับสีย้อมผ้า

ลำดับ	ชนิดสีย้อม	% Organic matterของแร่ดิน CTS-MMT	
		ก่อนการดูดซับ	หลังการดูดซับ
1	สีเขียวหัวเป็ด	26.28	33.33
2	สีคราม	26.28	40.50
3	สีเลือดหมู	26.28	35.17

ตารางที่ 4-2 แสดงผลการวิเคราะห์หา Point of zero charge (pH_{PZC}) หรือระดับค่า pH ที่ทำให้พื้นผิวของอนุภาคมีประจุเป็นศูนย์หรือเป็นกลางทางไฟฟ้า การหาค่า pH_{PZC} ของตัวดูดซับกระทำเพื่อให้รู้ถึงกลไกของการดูดซับของตัวดูดซับ การดูดซับโมเลกุลที่มีประจุบวกจะเกิดขึ้นได้ดีที่ $pH < pH_{PZC}$ ขณะที่การดูดซับของตัวดูดซับที่มีประจุลบจะเกิดได้ดีที่ $pH > pH_{PZC}$ โดยทั่วไปการดูดซับของตัวดูดซับที่มีประจุลบจะทำให้ค่า pH_{PZC} เพิ่มสูงขึ้น ขณะที่การดูดซับประจุบวกจะทำให้ pH_{PZC} มีค่าลดลง (Wang *et al.*, 2008) จากผลการทดลอง พบว่า แร่ดิน MMT และแร่ดิน CTS-MMT สามารถดูดซับโมเลกุลที่มีประจุบวกได้ดีที่ pH น้อยกว่า 8.2 และจะสามารถดูดซับโมเลกุลที่มีประจุลบได้ดีที่ pH มากกว่า 8.2

4.2 การดูดซับแบบกะชนิดขั้นตอนเดียว

4.2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าเคมี

ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมผ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแร่ดิน MMT และแร่ดิน CTS-MMT เปรียบเทียบการกำจัดสีย้อมผ้าสามารถคำนวณได้จากสมการ (4-2)

$$\% \text{ Removal} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (4-2)$$

โดย C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมผ้าในน้ำ (mg/L) และ C_e คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของสีย้อมผ้าในน้ำ (mg/L)

ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมด้วยแร่ดิน MMT และแร่ดิน CTS-MMT นั้นแสดงไว้ในตารางที่ 4-4 พบว่า แร่ดิน MMT และแร่ดิน CTS-MMT สามารถดูดซับสีย้อมได้สูงที่สุด โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดเท่ากัน นั่นคือ 99.97 % แร่ดิน CTS-MMT สามารถดูดซับสีย้อมที่ศึกษาทุกชนิดได้ดีกว่าแร่ดิน MMT แร่ดิน CTS-MMT สามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีน้ำเงินได้สูงที่สุดนั่นคือ 71.11 % เมื่อเทียบกับเปอร์เซ็นต์การกำจัดของแร่ดิน MMT ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกศึกษาการดูดซับสีย้อมด้วยแร่ดิน CTS-MMT เท่านั้น เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูงกว่าแร่ดิน MMT

ตารางที่ 4-4 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้า ที่ $C_0 = 200 \text{ mg/l}$ ใช้ปริมาณแร่ดินเท่ากับ 0.5 กรัม

ลำดับ	ชนิดสีย้อม	% Dye removal		
		ดูดซับด้วยแร่ดิน MMT	ดูดซับด้วยแร่ดิน CTS-MMT	ผลต่าง
1	สีน้ำเงิน	14.93	86.04	71.11
2	สีเหลืองแก่	6.86	64.01	57.15
3	สีเขียวหัวเป็ด	4.73	18.29	13.56
4	สีแดงครั้ง	37.59	95.56	57.97
5	สีเขียวกลาง	92.85	98.92	6.07
6	สีชมพู	99.97	99.97	0
7	สีระกำทอง	2.62	42.25	39.63
8	สีคราม	40.29	97.71	57.42
9	สีเลือดหมู	33.88	96.44	62.56
10	สีฟ้า	85.02	92.24	7.22
11	สีเขียวขี้ม้าสด	4.98	56.27	51.29
12	สีน้ำตาลทอง	10.58	71.80	61.22
13	สีน้ำตาลแก่	4.74	23.33	18.59
14	สีแก่นขนุน	0.69	27.85	27.16

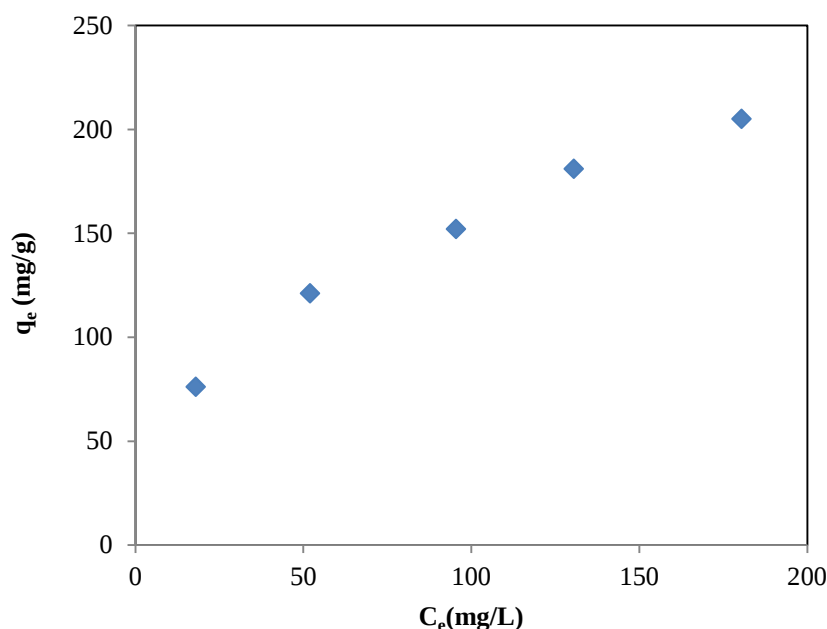
4.2.2 ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมผ้าเคมี

ไอโซเทอมของการดูดซับ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในของเหลวที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบจำลองที่อธิบายได้โดยสมการซึ่งมีประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์กลไกการดูดซับ ส่วนใหญ่พฤติกรรมของการดูดซับในของเหลวจะมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir) และแบบฟรุนดลิช (Freundlich) ปริมาณของสีย้อมผ้าบนตัวดูดซับสามารถคำนวณได้จากสมการมวลสาร

โดยจะถือว่าความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่หายไปจากสารละลาย จะมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่อยู่บนตัวดูดซับเท่านั้นและปริมาณการดูดซับเป็นไปตามสมการ (4-3)

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{m} \quad (4-3)$$

โดย q_e คือ ปริมาณสีย้อมที่ตรึงไว้ในตัวแร่ดินต่อปริมาณของแร่ดินที่สภาวะสมดุล (mg/g) m คือน้ำหนักของแร่ดิน (g) V คือ ปริมาตรของน้ำ (L) C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (mg/L) และ C_e คือความเข้มข้นของสีย้อมผ้าที่สมดุล (mg/L)



รูปที่ 4-4 ไอโซเทอมการดูดซับสีน้ำเงินด้วยแร่ดิน CTS-MMT

รูปที่ 4-4 แสดงตัวอย่างไอโซเทอมการดูดซับของสีน้ำเงินเมื่อนำมาดูดซับบนแร่ดิน CTS-MMT พบว่า ปริมาณการดูดซับของสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นที่สมดุลของสีน้ำเงิน เพื่อทำการตรวจสอบว่าไอโซเทอมที่ได้มีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนดิชหรือไม่ ผลการทดลองที่สมดุลจะถูกนำไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์โดยใช้สมการที่ (4-5) สำหรับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และสมการที่ (4-7) สำหรับไอโซเทอมแบบฟรอนดิช

ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) มีสมมติฐานว่าตัวถูกดูดซับจะปกคลุมผิวของตัวดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer) แสดงได้ดังสมการ (4-4)

$$q_e = \frac{K_L C_e}{(1 + a_L C_e)} \quad (4-4)$$

โดย a_L และ K_L คือ ค่าคงที่

สำหรับการหาค่าคงที่ในสมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ สามารถหาได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_e}{q_e}$ กับ C_e โดยใช้สมการที่ (4-4) ซึ่งเป็นการจัดรูปสมการใหม่ของสมการ (4-5)

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L} + \frac{a_L}{K_L} C_e \quad (4-5)$$

เมื่อหาค่าเศษหนึ่งส่วนความชัน ($\frac{1}{\text{slope}}$) หรือหาค่า $\frac{K_L}{a_L}$ ในสมการ (4-5) จะได้ปริมาณการดูดซับแบบชั้นเดียวของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับสูงสุด (Maximum adsorption capacity of adsorbent) และแทนด้วยสัญลักษณ์ q_m

ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช จะอธิบายถึงการจับตัวกันเป็นชั้น ๆ ของตัวถูกดูดซับ (Multilayer) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ เนื่องจากโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันสูง แสดงได้ดังสมการ (4-6)

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (4-6)$$

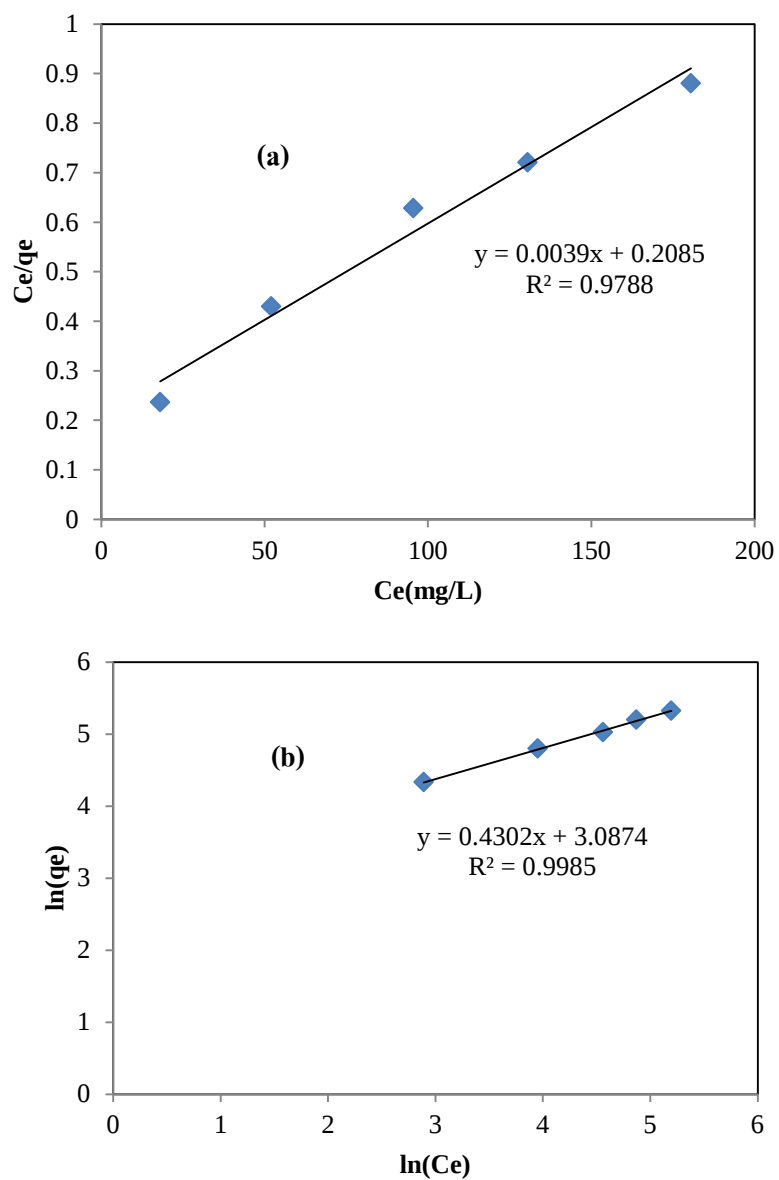
โดย K_f, n คือ ค่าคงที่

ค่าคงที่ในสมการไอโซเทอมของฟรุนดลิช สามารถหาได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(q_e)$ กับ $\ln(C_e)$ โดยใช้สมการ (4-7) ซึ่งเป็นการจัดรูปสมการใหม่ของสมการ (4-6)

$$\ln(q_e) = \ln(K_f) + \frac{1}{n} \ln(C_e) \quad (4-7)$$

โดยค่าคงที่ n หาได้จากค่าเศษหนึ่งส่วนความชัน ($\frac{1}{\text{slope}}$) และค่าคงที่ K_f หาได้จากค่าเอกซ์โพเนนเชียลของจุดตัดแกน y ในสมการ (4-7)

รูปที่ 4-5 แสดงตัวอย่างการพล็อตกราฟไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิชของสีน้ำเงิน โดยพิจารณาค่า R^2 (linear regression) ถ้าค่า R^2 เข้าใกล้ 1 แสดงว่าผลการทดลองและสมการไอโซเทอมนั้น ๆ มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี แต่ถ้าค่า R^2 ไม่เข้าใกล้ 1 แสดงว่าผลการทดลองและไอโซเทอมชนิดนั้น ๆ ไม่สอดคล้องกัน พบว่า ค่า R^2 ที่ได้จากการนำข้อมูลไปพล็อตกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์มีค่ามากกว่าค่า R^2 ที่ได้จากการพล็อตข้อมูลกับไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช แสดงว่าไอโซเทอมการดูดซับของสีน้ำเงินสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่า ส่วนสีย้อมชนิดอื่น ๆ จะแสดงค่าพารามิเตอร์ของไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ไว้ในตารางที่ 4-5 และไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชในตารางที่ 4-6 พบว่า ไอโซเทอมการดูดซับของสีย้อมแต่ละชนิดจะสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์หรือแบบฟรุนดลิชขึ้นอยู่กับชนิดของสีย้อมแต่ละสี



รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ของการพล็อตข้อมูลการดูดซับของสีน้ำเงินกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (a) และแบบฟรุนดลิช (b) ด้วยแร่ดิน CTS-MMT

ตารางที่ 4-5 ค่าคงที่ของไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir ของสีย้อมผ้าด้วยแร่ดิน CTS-MMT

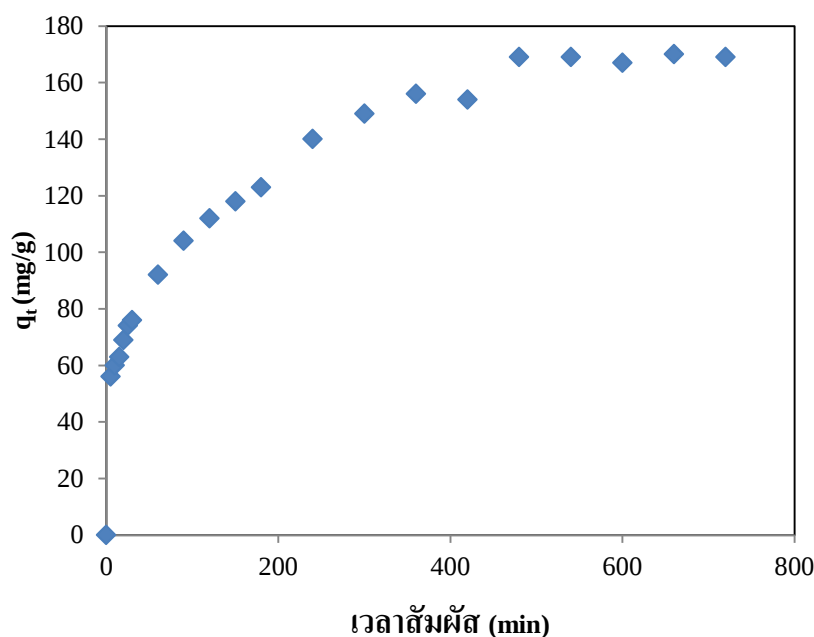
ลำดับ	ชนิดสีย้อม	Langmuir's parameter			
		a_L (L/mg)	k_L (L/g)	q_m (mg/g)	R^2
1	สีน้ำเงิน	0.019	4.80	257.07	0.9787
2	สีเหลือง	0.55	96.15	174.82	0.9927
3	สีเขียวหัวเป็ด	0.006	1.02	163.93	0.9540
4	สีแดงครั้ง	0.039	11.81	303.95	0.9582
5	สีเขียวกลาง	-	-	-	0.8794
6	สีชมพู	-	-	-	0.0012
7	สีระกำทอง	0.062	0.062	350.88	0.9866
8	สีคราม	0.147	18.90	128.57	0.9780
9	สีเลือดหมู	0.472	0.76	416.67	0.9985
10	สีฟ้า	0.05	19.92	398.41	0.9574
11	สีเขียวขี้ม้าสด	-	-	-	0.7747
12	สีน้ำตาลทอง	-	-	-	0.7234
13	สีน้ำตาลแก่	0.025	0.025	156.25	0.9738
14	สีแก่นขนุน	0.043	0.043	225.73	0.9740

ตารางที่ 4-6 ค่าคงที่ของไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich ของสีย้อมผ้าด้วยแร่ดิน CTS-MMT

ลำดับ	ชนิดสีย้อม	Freundlich's parameter		
		k_f (L/g)	n	R^2
1	สีน้ำเงิน	21.92	2.32	0.9984
2	สีเหลืองแก่	-	-	0.2306
3	สีเขียวหัวเปิด	3.27	1.58	0.9727
4	สีแดงครั้ง	41.39	2.66	0.9830
5	สีเขียวกลาง	24.92	2.04	0.9596
6	สีชมพู	24.78	0.964	0.9373
7	สีระกำทอง	60.02	2.79	0.9749
8	สีคราม	-	-	0.2570
9	สีเลือดหมู	187.79	4.36	0.9272
10	สีฟ้า	1.80	0.892	0.9504
11	สีเขียวขี้ม้าสด	5.94	1.32	0.9281
12	สีน้ำตาลทอง	9.71	1.43	0.9588
13	สีน้ำตาลแก่	25.46	3.22	0.9289
14	สีแก่นขนุน	32.43	2.67	0.9281

4.2.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

จลนพลศาสตร์การดูดซับ คือ การศึกษาอัตราการดูดซับสีย้อมผ้าบนแร่ดินตัวดูดซับในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ๆ จนกระทั่งการดูดซับเข้าใกล้จุดสมดุล ตัวอย่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับระยะเวลาสัมผัสของสีน้ำเงินโดยใช้แร่ดิน CTS-MMT เป็นตัวดูดซับ แสดงในรูปที่ 4-6 พบว่า ปริมาณการดูดซับของสีย้อมน้ำเงินเข้าสู่สมดุลภายใน 480 นาที ส่วนเวลาในการเข้าสู่สมดุลของสีย้อมชนิดอื่นจะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4-7 ซึ่งสีครามจะใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับนานที่สุดนั่นคือ 900 นาที แสดงว่า การดูดซับสีย้อมทั้ง 14 ชนิด จะสามารถเข้าสู่สมดุลก่อนเร็ว 24 ชั่วโมง ซึ่งเป็นระยะเวลาในการศึกษาไอโซเทอมดูดซับที่สภาวะสมดุลในงานวิจัยนี้ (ดูหัวข้อที่ 3.4.1)



รูปที่ 4-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับของสีน้ำเงิน (mg/g) เทียบกับเวลาสัมผัส (min)

เพื่อทำการทำนายกลไกอัตราการดูดซับ ผลการทดลองจะถูกนำมาพล็อตกับสมการกลไกการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) และสมการการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) อัตราการดูดซับขึ้นอยู่กับขั้นตอนในการแพร่ของตัวถูกดูดซับ ว่าขั้นตอนใดเกิดขึ้นช้าที่สุด ขั้นตอนนั้นจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ (Rate of limiting step)

สมการอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) มีสมมติฐานว่าขั้นตอนการถ่ายโอนมวลของตัวถูกดูดซับผ่านชั้นของไฮดรอลิกตัวดูดซับ เกิดขึ้นช้าที่สุด แสดงได้ดังสมการ (4-8)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (4-8)$$

โดย q_t คือ ปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับที่เวลา t (mg/g) และ k_1 คือ ค่าคงที่สมดุล (min^{-1}) เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 8 โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ที่ $t = 0$; $q_t = 0$ และ $t = t$; $q_t = q_t$ จะได้

$$\ln\left[\frac{q_e}{(q_e - q_t)}\right] = k_1 t \quad (4-9)$$

สามารถจัดรูปใหม่ของสมการ (4-9) ในรูปของสมการเส้นตรงดังนี้

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \quad (4-10)$$

ค่าคงที่ k_1 และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ R^2 สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(q_e - q_t)$ กับ t

สมการอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ดังแสดงไว้ในสมการ (4-11) ซึ่งอธิบายถึงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นได้ช้าที่สุด

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (4-11)$$

โดย k_2 คือ ค่าคงที่สมดุล (g/mg*min)

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการ (4-11) โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ที่ $t = 0; q_t = 0$ และ $t = t; q_t = q_t$ จะได้

$$\frac{t}{(q_e - q_t)} = \frac{1}{q_e} + k_2 t \quad (4-12)$$

สมการ (4-12) สามารถจัดรูปใหม่ในรูปของสมการเส้นตรง ได้ดังนี้

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4-13)$$

ค่าคงที่ k_2 , q_e และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ R^2 สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{t}{q_t}$ กับ t

ตารางที่ 4-8 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการดูดซับแบบ Pseudo-first Order ได้แก่ k_1 อยู่ในช่วง 3.55×10^{-3} - $9.25 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ และ Pseudo-second order ได้แก่ k_2 อยู่ในช่วง 1.11×10^{-4} - $8.70 \times 10^{-5} \text{ g/mg*min}$ นอกจากนี้ ผลการทดลองของการดูดซับสีย้อมผ้าส่วนใหญ่จะสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับแบบ Pseudo-second order มากกว่าแบบจำลองการดูดซับแบบ Pseudo-first order โดยพิจารณาจากค่า R^2

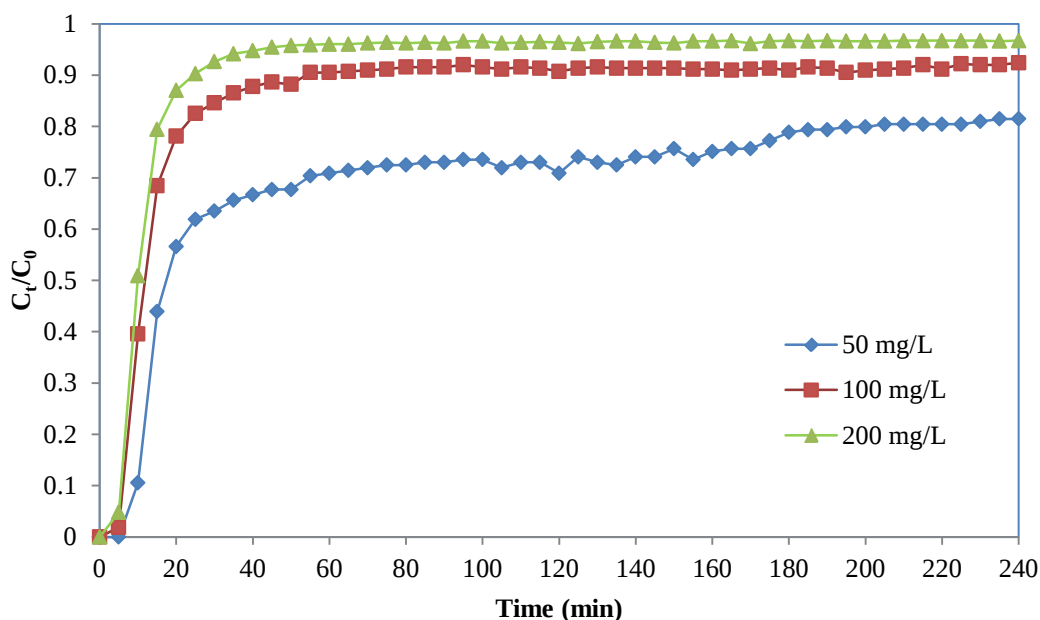
ตารางที่ 4-7 ค่าคงที่ของสมการอันดับหนึ่งเทียมและสองเทียมของการดูดซับสีย้อมผ้า

ลำดับ	ชนิดสีย้อม	Equilibrium time (min)	Pseudo-first order's parameter		Pseudo-second order's parameter	
			k_1 (min^{-1})	R^2	k_2 ($\text{g/mg} \cdot \text{min}$)	R^2
1	สีน้ำเงิน	480	5.55×10^{-3}	0.9666	1.34×10^{-4}	0.9918
2	สีเหลืองแก่	480	7.87×10^{-3}	0.8874	7.82×10^{-5}	0.9902
3	สีเขียวหัวเปิด	360	9.25×10^{-3}	0.9471	3.10×10^{-4}	0.9968
4	สีแดงครั้ง	660	5.11×10^{-3}	0.9256	4.54×10^{-5}	0.9520
5	สีเขียวกลาง	660	5.63×10^{-3}	0.9589	5.05×10^{-5}	0.9869
6	สีชมพู	5	6.67×10^{-3}	0.2724	-	1.0000
7	สีระกำทอง	660	5.31×10^{-3}	0.9761	3.39×10^{-5}	0.9812
8	สีคราม	900	3.30×10^{-3}	0.8704	7.01×10^{-5}	0.9724
9	สีเลือดหมู	660	5.50×10^{-3}	0.9825	8.70×10^{-5}	0.9954
10	สีฟ้า	600	5.23×10^{-3}	0.9824	6.16×10^{-5}	0.9912
11	สีเขียวขี้ม้าสด	660	5.02×10^{-3}	0.9675	3.71×10^{-5}	0.9780
12	สีน้ำตาลทอง	480	6.15×10^{-3}	0.9922	5.53×10^{-5}	0.9908
13	สีน้ำตาลแก่	600	5.71×10^{-3}	0.9627	3.77×10^{-5}	0.9764
14	สีแก่นขนุน	420	7.86×10^{-3}	0.9831	5.81×10^{-5}	0.9909

4.3 การดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

4.3.1 อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อการดูดซับ

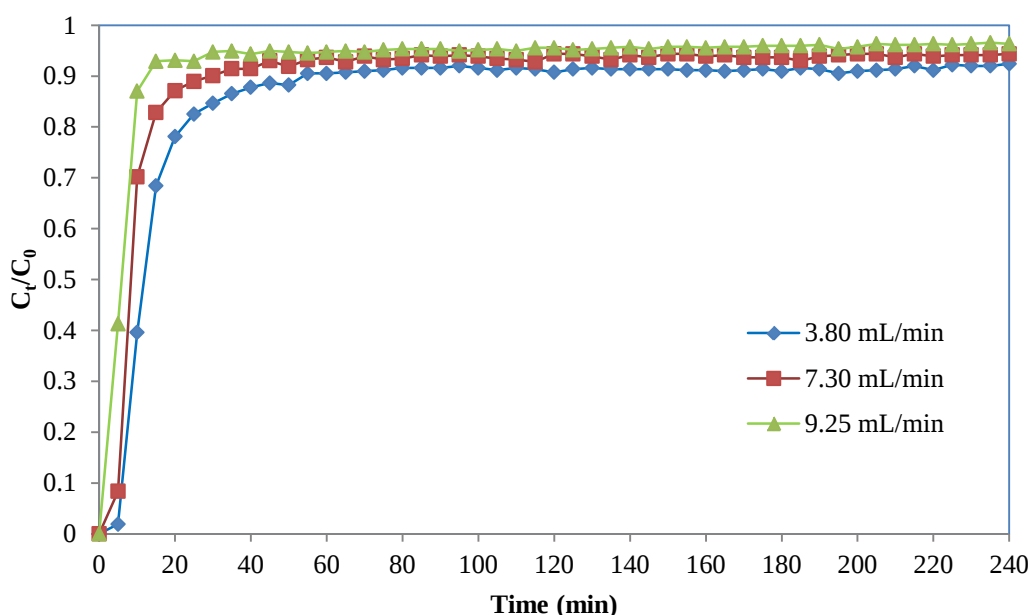
อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นขาเข้าของสีย้อมจาก 50 ไปเป็น 200 mg/L โดยใช้ความสูงของเบด (ทรายผสมกับแร่ดิน CTS-MMT) เท่ากันคือ 10 cm และสารละลายมีอัตราการไหลขาออกเท่ากับ 3.81 mL/min แสดงไว้ในกราฟเบรคทรูในรูปที่ 4-7 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมงค่าของ C_t/C_0 จะมีค่าเป็น 0.82, 0.92 และ 0.97 เมื่อความเข้มข้นขาเข้า เท่ากับ 50, 100 และ 200 mg/L ตามลำดับ นั่นคือ เวลาที่จุดเบรคทรู (เวลาที่ $C_t/C_0 = 0.05$) จะลดลงเมื่อความเข้มข้นขาเข้าเพิ่มขึ้น รูปร่างของกราฟเบรคทรูจะมีความชันของเส้นกราฟน้อยเมื่อความเข้มข้นขาเข้าของสีย้อมน้อย อย่างไรก็ตาม ความชันของเส้นกราฟจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นขาเข้าของสีย้อมมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่ความเข้มข้นขาเข้ามีค่าน้อย ทำให้มีความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมและแร่ดิน CTS-MMT มีค่าน้อย หรือมีค่า Concentration gradient น้อยนั่นเอง ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารน้อย เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมจะส่งผลให้ Concentration gradient มีค่าสูงขึ้น ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลง Concentration gradient จะส่งผลกระทบต่ออัตราการอิมตัวของสีย้อมบนแร่ดิน CTS-MMT และเวลาที่จุดเบรคทรู



รูปที่ 4-7 กราฟเบรคทรูสำหรับการดูดซับสีย้อมด้วยแร่ดิน CTS-MMT ในเบดนิ่ง ที่ความเข้มข้นขาเข้าแตกต่างกัน (bed height = 10 cm, flow rate = 3.80 mL/min และ $25 \pm 2^\circ\text{C}$)

4.3.2 อิทธิพลของอัตราการไหลของสารละลายต่อการดูดซับ

อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของการดูดซับสีครามโดยใช้หน่วยปฏิบัติการหอดูดซับแบบเบดนิ่งจะถูกทำการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลขาออก (3.80, 7.30 และ 9.25 mL/min) โดยกำหนดให้ความสูงของเบดเท่ากับ 10 cm และความเข้มข้นของสีครามขาเข้าเท่ากับ 100 mg/L ดังแสดงไว้ในกราฟเบรคทรูในรูปที่ 3-3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เวลาที่จุดเบรคทรูจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลลดลง ที่อัตราการไหลต่ำ ๆ โมเลกุลของสีครามจะมีเวลาสัมผัสกับแร่ดิน CTS-MMT นานกว่าที่อัตราการไหลสูง ๆ เป็นผลให้การกำจัดสีครามเกิดขึ้นสูงกว่า ส่วนที่อัตราการไหลสูง ๆ ความสามารถในการดูดซับจะน้อยลงเนื่องจากเวลาการสัมผัสระหว่างแร่ดิน CTS-MMT กับสีครามไม่นานพอที่จะเข้าสู่ภาวะสมดุล

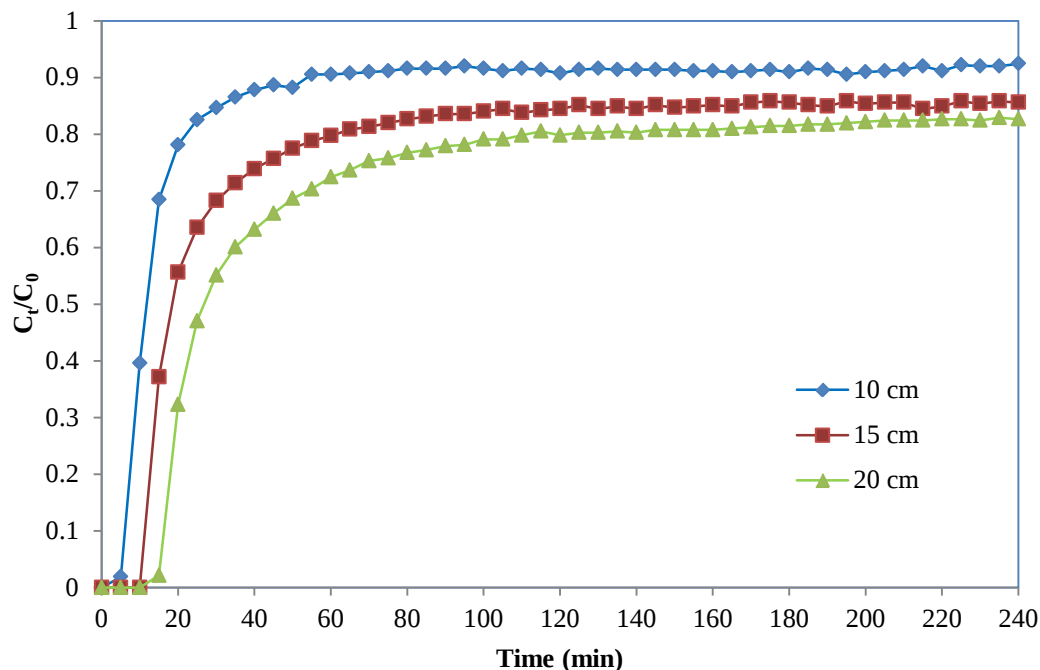


รูปที่ 4-8 กราฟเบรคทรูสำหรับการดูดซับสีครามด้วยแร่ดิน CTS-MMT ในเบดนิ่ง ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน (initial dye concentration = 100 mg/L, bed height = 10cm, temperature 25±2°C)

4.3.3 อิทธิพลของความสูงของเบดในหน่วยปฏิบัติการหอดูดซับ

รูปที่ 4-9 แสดงกราฟเบรคทรูของการดูดซับสีครามในหน่วยปฏิบัติการหอดูดซับแบบเบดนิ่ง ที่ความสูงของเบดแตกต่างกัน ได้แก่ 10 15 และ 20 cm ที่อัตราการไหลขาออกคงที่เท่ากับ 3.80 mL/min โดยกำหนดให้อัตราการไหลเท่ากับ 10 cm และความเข้มข้นของสีครามขาเข้าเท่ากับ 100 mg/L จากรูปที่ 4-9 เวลาที่จุดเบรคทรูจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของเบดเพิ่มขึ้น ความสูงของเบดจะเพิ่มขึ้นจะทำให้โมเลกุลของสีครามสัมผัสกับแร่ดิน CTS-MMT นานขึ้น เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีคราม

เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นความสูงของเบคสูงขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นขาออกของสีครามลดลงที่เวลาในการดูดซับเท่ากัน ความชันของกราฟเบคทรูจะลดลงเมื่อทำการเพิ่มความสูงของเบคซึ่งเป็นผลของพื้นที่ในการเกิดการถ่ายเทมวลสารที่กว้างขึ้น ปริมาณการดูดซับสูงสุดและปริมาณการดูดซับที่สมดุลจะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4-9



รูปที่ 4-9 กราฟเบคทรูสำหรับการดูดซับสีครามด้วยแร่ดิน CTS-MMT ในเบคหนึ่ง ที่ความสูงของเบคหนึ่งแตกต่างกัน (initial dye concentration = 100 mg/L, flow rate = 3.80 mL/min, temperature $25 \pm 2^\circ\text{C}$)

4.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองในหน่วยปฏิบัติการหอดูดซับ

เวลาที่จุดเบคทรูและรูปร่างของเส้นกราฟเบคทรูเป็นคุณลักษณะที่สำคัญในการวิเคราะห์การทำงานและผลการตอบสนองเชิงพลวัตของการดูดซับในหอดูดซับแบบเบคหนึ่ง เส้นกราฟเบคทรูจะแสดงพฤติกรรมการจัดสีย้อมออกจากสารละลาย ซึ่งโดยทั่วไปจะแสดงอยู่ในรูปของความเข้มข้นของสีที่ถูกดูดซับ (C_{ad}) ความเข้มข้นเริ่มต้นขาเข้าของสีคราม (C_0) ความเข้มข้นขาออกของสีคราม (C_t) หรือ อัตราส่วนความเข้มข้นของสีครามขาออกต่อความเข้มข้นสีครามขาเข้าเป็นฟังก์ชันกับเวลา (t) ปริมาตรขาออกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-14

$$V_{eff} = Qt_{total} \quad (4-14)$$

ที่ซึ่ง t_{total} และ Q คือเวลาของการไหลทั้งหมด (min) และ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (mL/min) ค่า Q ที่คำนวณได้จากแต่ละการทดลองจะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4-9 ซึ่งมีค่า $R^2 \geq 0.9999$ พื้นที่ใต้กราฟของการเบรคทู (A) จะหาได้โดยการอินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ถูกดูดซับ C_{ad} กับ เวลา t ปริมาณการดูดซับสีครามทั้งหมด (q_{total}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-15

$$q_{total} = \frac{Q}{1000} \int_{t=0}^{t=t_{total}} C_{ad} dt \quad (4-15)$$

ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (q_e) หรือปริมาณการดูดซับสูงสุด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-16 ซึ่งเป็นปริมาณการดูดซับทั้งหมด (q_{total})หารด้วยปริมาณตัวดูดซับ (w) ที่เวลาสุดท้ายของการไหลทั้งหมด

$$q_e = \frac{q_{total}}{w} \quad (4-16)$$

ตารางที่ 4-8 ข้อมูลการทดลองและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการดูดซับสีครามด้วยแร่ดิน CTS-MMT ในหน่วยปฏิบัติการหอดูดซับแบบเบคนิง

ลำดับ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ความสูงของเบค (cm)	ค่าอัตราการไหลเฉลี่ย Q (mL/min)	เวลาที่จุดเบรคทู (min)	ปริมาตรที่จุดเบรคทู (mL)	q_{total} (mg)	q_e (mg/g)
1	50	10	3.80	7.36	8.98	14.29	35.73
2	100	10	3.84	5.41	21.65	13.68	34.20
3	200	10	3.80	5.02	19.09	13.98	34.95
4	100	15	3.64	10.67	40.06	20.60	34.33
5	100	20	3.60	15.47	55.71	28.65	35.81
6	100	10	7.26	3.00	21.62	14.02	35.03
7	100	10	9.25	0.61	2.30	13.69	34.23

จากตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า q_e สูงที่สุดได้แก่ 35.81 mg/g ซึ่งคำนวณได้จากการทดลองที่สภาวะความเข้มข้นขาเข้าเริ่มต้นของสีคราม เท่ากับ 100 mg/L ความสูงของเบคเท่ากับ 20 cm และอัตราการไหลของของไหลผ่านคอลัมน์เท่ากับ 3.60 mL/min

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. การนำแร่ดิน MMT มาปรับปรุงด้วยสารไคโตซานกลายเป็นแร่ดิน CTS-MMT ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมผ้าสูงขึ้น

2. การนำสารไคโตซานมาเคลือบผิวแร่ดิน MMT จะส่งผลให้ความกว้างของช่องว่างระหว่างชั้นดินกว้างขึ้น (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD) การยึดจับของสารไคโตซานจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนยึดเหนี่ยวระหว่างหมู่ $-OH$ กับหมู่ $-NH_2$ กับอะตอมของออกซิเจนในแผ่นซิลิกาของแร่ดิน MMT (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR) แร่ดิน CTS-MMT จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าแร่ดิน MMT เนื่องจากสารไคโตซานจะเข้ามาเกาะและบดบังรูพรุนขนาดเล็กของแร่ดิน MMT จึงทำให้ค่าขนาดรูพรุนเฉลี่ยของแร่ดิน CTS-MMT ใหญ่ขึ้น แร่ดิน CTS-MMT จะมีปริมาณของธาตุ ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน สูงกว่าแร่ดิน MMT (วิเคราะห์โดย CHNS-analyzer) ยืนยันการปรากฏของสารไคโตซานอยู่ในแร่ดิน CTS-MMT หลังจากทำการดูดซับสีย้อมเคมีแล้วจะมีปริมาณสารอินทรีย์ของ CTS-MMT หลังการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากสีย้อมเคมีมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบอยู่โมเลกุล เมื่อนำมาดูดซับกับแร่ดิน CTS-MMT จะทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ในแร่ดิน CTS-MMT หลังการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น แร่ดิน MMT และแร่ดิน CTS-MMT มีจุด Point of zero charge อยู่ที่ pH เท่ากับ 8.2

3. การดูดซับสีย้อมผ้าเคมีด้วยแร่ดิน CTS-MMT จะสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และไอโซเทอมฟรุนดลิช ขึ้นอยู่กับชนิดของสีย้อมเคมีแต่ละสี

4. อัตราการดูดซับสีย้อมผ้าเคมีด้วยแร่ดิน CTS-MMT ส่วนใหญ่จะสอดคล้องกับแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second order) แสดงว่าขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นขั้นกำหนดอัตรา (rate limiting step) หรือเป็นขั้นตอนที่มีอัตราการดูดซับช้าที่สุด

5. การดูดซับสีย้อมเคมีด้วยแร่ดิน CTS-MMT ในหน่วยปฏิบัติการหอดูดซับแบบเบดนิ่ง จะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นขาเข้าต่ำ อัตราการไหลช้า และความสูงของเบดสูง สภาวะที่ทำให้เกิดการดูดซับสูงสุด ได้แก่ ความเข้มข้นของสีครามเท่ากับ 100 mg/L อัตราการไหลเท่ากับ 3.60 mL/min ความสูงของเบดเท่ากับ 20 cm โดยค่าปริมาณการดูดซับสูงสุด ได้แก่ 35.81 mg/g

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเพิ่มปริมาณของเปอร์เซ็นต์ของสารโคโคซานในแร่ดิน MMT อาจจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมผ้าเพิ่มสูงขึ้น
2. การศึกษาการดูดซับสีย้อมด้วยหน่วยปฏิบัติการชนิดอื่น ๆ เช่น ระบบถังกวนอย่างง่าย เป็นต้น อาจจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- จักรกฤษณ์ อัมพูช และ รัตนวรรณ (วิบูลย์สวัสดิ์) เกียรติโกมล. “จลนพลศาสตร์ของการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมผ้าในระดับอุตสาหกรรมครัวเรือนโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบถังกวน”, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา. 17(3): 40-47, 2549.
- Ahmad, A.A. and Hameed, B.H. “Fixed-bed adsorption of reactive azo dye onto granular activated carbon prepared from waste”, Journal of Hazardous Materials. 175: 298-303, 2010.
- An, J.-H. and Dultz, S. “Adsorption of tannic acid on chitosan-montmorillonite as a function of pH and surface charge properties”, Applied Clay Science. 36: 256-264, 2007.
- ASTM D 2974 – Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Organic Soils.
- Benkli, Y.E., Can, M.F., Turan, M. and Celik, M.S. “Modification of organo zeolite surface for the removal of reactive azo dyes in fixed-bed reactors”, Water Research. 39(2-3): 487-493, 2005.
- Chang, M.-Y. and Juag, R.-S. “Adsorption of tannic acid, humic acid and dyes from water using the composite of chitosan and activated clay”, Journal of Colloid and Interface Science. 278:18-25, 2004.
- Darder, M., Colilla, M., Ruiz-Hitzky, E. “Biopolymer-clay nanocomposites based on chitosan intercalated in montmorillonite”, Chemistry Materials. 15: 3774-3780, 2003.
- Dambies, L., Guimon, C., Yiacoumi, S., Guibal, E. “Characterization of metal ion interactions with chitosan by X-ray photoelectron spectroscopy”, Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects. 177: 203-214, 2001.
- Fan, D., Zhu, X., Xu, M., and Yan, J. “Adsorption properties of Chromium (VI) by Chitosan Coated Montmorillonite”, Journal of Biological Science. 6(5): 941-945, 2006.

- Futalan, C. M., Kan, C.-C., Palida, M.L., Hsien, K.-J., Pascua, C. and Wan, M.-W. "Comperative and competitive adsorption of copper, lead, and nickel using chitosan immobilized on bentonite", Carbohydrate Polymers. 83: 528-536, 2011.
- Ohtsuka, K. "Preparation and properties of two-dimensional microporous pillared interlayer solids", Chemistry of Materials. 9: 2039-2050, 1997.
- Wan Ngah, A. and Kamari, W.S. "Adsorption of dyes and heavy metal ions by chitosan composite: A review", Charbohydrate Polymers. 83(4): 1446-1456, 2007.
- Wan Ngah, A. and Kamari, W.S. "Isotherm, kinetic and thermodynamic studies of lead and copper uptake by H₂SO₄ modified chitosan", Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 73 (2): 257-256, 2009.
- Wang, L. and Wang, A. "Adsorption characteristics of congo red onto the chitosan montmorillonite nanocomposite", Journal of Hardous Materials. 147: 979 – 985, 2007.
- Wang, L., Zhang, J. and Wang, A. "Removal of methylene blue from aqueous solution using chitosan-g-poly (acrylic acid)/ montmorillonite superadsorbent nanocomposite", Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects. 322: 47-53, 2008.
- Wang, S., Zhua, Z., Coomes, A. "The physical and surface chemical characteristics of activated carbons and the adsorption of methylene blue from wastewater", Journal of Colloid and Interface Science. 284: 440-446, 2005.
- Wu, F.C., Tseng, R.L., Juang, R.S. "Role of pH in metal adsorption from aqueous solutions containing chelating agents onto chitosan", Industrial & Engineering Chemistry Research. 38: 270-275, 1999.
- Wu, F.C., Tseng, R.L., Juang, R.S. "Enhanced abilities of highly swollen chitosan beads for color removal and tyrosinase immobilization", Journal of Harzrd Materials. B 81: 167-177, 2001.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดลอง

1. ข้อมูลกราฟมาตรฐานของสีย้อมผ้า

ตารางที่ 1ก ค่าแอมซอร์บแนนซ์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสีย้อมผ้า ในการสร้างกราฟมาตรฐาน

ลำดับ	ชนิดสี	ค่าแอมซอร์บแนนซ์ (Absorbance) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ				
		$C_0=50$ mg/L	$C_0=100$ mg/L	$C_0=150$ mg/L	$C_0=200$ mg/L	$C_0=250$ mg/L
1	สีน้ำเงิน	0.114	0.227	0.345	0.444	0.568
2	เหลืองแก่	0.374	0.713	0.993	1.272	1.596
3	สีเขียวหัวเป็ด	0.126	0.248	0.369	0.485	0.582
4	สีแดงจิ้ง	0.434	0.907	1.268	1.635	1.993
5	สีเขียวกลาง	0.312	0.603	0.833	1.129	1.345
6	สีชมพู	0.369	0.677	0.954	1.32	1.562
7	สีระกำทอง	0.185	0.349	0.534	0.696	0.849
8	สีคราม	0.302	0.571	0.816	1.048	1.315
9	สีเลือดหมู	0.525	0.945	1.501	1.848	2.345
10	สีฟ้า	0.298	0.516	0.74	0.958	1.226
11	สีเขียวขี้ม้าสด	0.082	0.141	0.215	0.283	0.355
12	สีน้ำตาลทอง	0.067	0.135	0.195	0.262	0.329
13	สีน้ำตาลแก่	0.184	0.351	0.532	0.692	0.859
14	สีแก่นขนุน	0.118	0.235	0.334	0.427	0.526

2. ข้อมูลสมมูลการดูดซับ

ตารางที่ 2ก ค่าแอมซอร์เบแนนซ์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสีย้อม ก่อนการดูดซับ

ลำดับ	ชนิดสี	ค่าแอมซอร์เบแนนซ์ (Absorbance) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ				
		$C_0=50 \text{ mg/L}$	$C_0=100 \text{ mg/L}$	$C_0=150 \text{ mg/L}$	$C_0=200 \text{ mg/L}$	$C_0=250 \text{ mg/L}$
1	สีน้ำเงิน	0.114	0.227	0.345	0.444	0.568
2	เหลืองแก่	0.411	0.773	1.002	1.217	1.495
3	สีเขียวหัวเป็ด	0.126	0.248	0.369	0.485	0.582
4	สีแดงครั้ง	0.541	0.964	1.428	1.688	1.849
5	สีเขียวกลาง	0.312	0.603	0.833	1.129	1.345
6	สีชมพู	0.345	0.697	0.919	1.163	1.317
7	สีระกำทอง	0.185	0.349	0.534	0.696	0.849
8	สีคราม	0.322	0.603	0.85	1.04	1.181
9	สีเลือดหมู	0.585	1.109	1.583	1.82	1.945
10	สีฟ้า	0.348	0.553	0.751	0.951	1.144
11	สีเขียวขี้ม้าสด	0.082	0.141	0.215	0.283	0.355
12	สีน้ำตาลทอง	0.067	0.135	0.195	0.262	0.329
13	สีน้ำตาลแก่	0.184	0.351	0.532	0.692	0.859
14	สีแก่นขนุน	0.118	0.235	0.334	0.427	0.526

หมายเหตุ ตัวดูดซับที่ใช้ได้แก่ แร่ดิน CTS-MMT

ตารางที่ 3ก ค่าแอบซอร์เบแนนซ์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสีย้อม หลังการดูดซับ

ลำดับ	ชนิดสี	ค่าแอบซอร์เบแนนซ์ (Absorbance) ที่ความเข้มข้นที่สมดุล				
		$C_e=50$ mg/L	$C_e=100$ mg/L	$C_e=150$ mg/L	$C_e=200$ mg/L	$C_e=250$ mg/L
1	สีน้ำเงิน	0.038	0.106	0.193	0.263	0.363
2	เหลืองแก่	0.143	0.197	0.406	0.684	0.917
3	สีเขียวหัวเป็ด	0.094	0.194	0.287	0.395	0.487
4	สีแดงจิ้ง	0.318	0.526	0.76	0.935	1.072
5	สีเขียวกลาง	0.394	0.772	0.975	1.158	1.296
6	สีชมพู	0.028	0.041	0.063	0.075	0.099
7	สีระกำทอง	0.033	0.088	0.159	0.237	0.387
8	สีคราม	0.029	0.195	0.390	0.658	0.847
9	สีเลือดหมู	0.162	0.514	1.012	1.257	1.571
10	สีฟ้า	0.157	0.218	0.277	0.386	0.465
11	สีเขียวขี้ม้าสด	0.037	0.066	0.091	0.148	0.196
12	สีน้ำตาลทอง	0.021	0.058	0.083	0.105	0.157
13	สีน้ำตาลแก่	0.081	0.225	0.356	0.497	0.662
14	สีแก่นขนุน	0.044	0.113	0.153	0.232	0.334

หมายเหตุ ตัวดูดซับที่ใช้ได้แก่ แร่ดิน CTS-MMT

3. ข้อมูลจนผลศาสตร์การดูดซับ

ตารางที่ 4ก ค่าแอมซอร์บแนนซ์ที่เวลาสัมผัสต่าง ๆ ของสีย้อม หลังการดูดซับ

ลำดับ	ชนิดสี	ค่าแอมซอร์บแนนซ์ (Absorbance) ที่เวลาต่าง ๆ							
		t = 0	t = 5	t = 10	t = 15	t = 20	t = 25	t = 30	t = 60
		นาที	นาที	นาที	นาที	นาที	นาที	นาที	นาที
1	สีน้ำเงิน	0.529	0.473	0.469	0.466	0.460	0.455	0.453	0.437
2	สีเหลืองแก่	1.137	1.111	1.098	1.089	1.081	1.074	1.071	1.057
3	สีเขียวหัวเป็ด	0.512	0.479	0.469	0.462	0.458	0.452	0.445	0.439
4	สีแดงครั้ง	1.751	1.623	0.1599	1.593	1.589	1.585	1.575	1.539
5	สีเขียวกลาง	1.133	1.076	1.052	1.030	1.017	1.005	0.993	0.919
6	สีชมพู	1.425	0.068	0.065	0.056	0.062	0.064	0.063	0.051
7	สีระกำทอง	0.677	0.632	0.615	0.592	0.577	0.565	0.550	0.499
8	สีคราม	1.098	0.985	0.98	0.974	0.968	0.965	0.959	1.098
9	สีเลือดหมู	1.925	1.806	1.796	1.783	1.777	1.771	1.761	1.720
10	สีฟ้า	0.978	0.776	0.758	0.734	0.725	0.711	0.697	0.649
11	สีเขียวขี้ม้าสด	0.295	0.281	0.273	0.268	0.264	0.26	0.258	0.239
12	สีน้ำตาลทอง	0.266	0.230	0.222	0.214	0.205	0.202	0.200	0.178
13	สีน้ำตาลแก่	0.700	0.651	0.633	0.613	0.602	0.589	0.581	0.532
14	สีแก่นขนุน	0.453	0.418	0.398	0.388	0.376	0.362	0.357	0.327

หมายเหตุ ตัวดูดซับที่ใช้ได้แก่ แร่ดิน CTS-MMT

ตารางที่ 4ก (ต่อ) ค่าแอมซอร์บแนนซ์ที่เวลาสัมผัสต่าง ๆ ของสีย้อม หลังการดูดซับ

ลำดับ	ชนิดสี	ค่าแอมซอร์บแนนซ์ (Absorbance) ที่เวลาต่าง ๆ							
		t = 90 นาที	t = 120 นาที	t = 150 นาที	t = 180 นาที	t = 240 นาที	t = 300 นาที	t = 360 นาที	t = 420 นาที
1	สีน้ำเงิน	0.425	0.417	0.411	0.406	0.389	0.38	0.373	0.375
2	สีเหลืองแก่	1.048	1.042	1.034	1.020	1.004	0.992	0.997	0.973
3	สีเขียวหัวเปิด	0.434	0.43	0.424	0.418	0.404	0.403	0.398	0.398
4	สีแดงครั้ง	1.503	1.463	1.428	1.395	1.349	1.306	1.268	1.231
5	สีเขียวกลาง	0.860	0.856	0.830	0.819	0.779	0.743	0.716	0.697
6	สีชมพู	0.046	0.05	0.046	0.041	0.039	0.041	0.043	0.038
7	สีระกำทอง	0.464	0.439	0.424	0.398	0.358	0.326	0.302	0.280
8	สีคราม	0.927	0.913	0.894	0.879	0.859	0.845	0.837	0.824
9	สีเลือดหมู	1.691	1.671	1.651	1.621	1.567	1.533	1.500	1.471
10	สีฟ้า	0.597	0.538	0.501	0.483	0.422	0.415	0.389	0.357
11	สีเขียวขี้ม้าสด	0.218	0.209	0.2	0.195	0.182	0.172	0.162	0.155
12	สีน้ำตาลทอง	0.158	0.144	0.136	0.129	0.113	0.102	0.092	0.086
13	สีน้ำตาลแก่	0.506	0.486	0.467	0.453	0.409	0.383	0.355	0.335
14	สีแก่นขนุน	0.305	0.295	0.278	0.266	0.243	0.225	0.209	0.198

หมายเหตุ ตัวดูดซับที่ใช้ได้แก่ แร่ดิน CTS-MMT

ตารางที่ 4ก (ต่อ) ค่าแอมซอร์เบแนนซ์ที่เวลาสัมผัสต่าง ๆ ของสีย้อม หลังการดูดซับ

ลำดับ	ชนิดสี	ค่าแอมซอร์เบแนนซ์ (Absorbance) ที่เวลาต่าง ๆ								
		t = 480 นาที่	t = 540 นาที่	t = 600 นาที่	t = 660 นาที่	t = 720 นาที่	t = 780 นาที่	t = 840 นาที่	t = 900 นาที่	t = 960 นาที่
1	สีน้ำเงิน	0.375	0.36	0.36	0.362	0.359	-	-		
2	สีเหลืองแก่	0.949	0.949	0.947	0.947	0.947	-	-		
3	สีเขียวหัวเป็ด	0.398	0.398	0.399	0.397	0.399	-	-		
4	สีแดงครั้ง	1.187	1.156	1.137	1.121	1.113	-	-		
5	สีเขียวกลาง	0.683	0.67	0.662	0.65	0.645	-	-		
6	สีชมพู	0.039	0.041	0.04	0.041	0.041	-	-		
7	สีระกำทอง	0.269	0.252	0.238	0.228	0.229	-	-		
8	สีคราม*	0.812	0.796	0.775	0.768	0.752	0.734	0.721	0.717	0.716
9	สีเลือดหมู	1.439	1.41	1.404	1.375	1.350	-	-		
10	สีฟ้า	0.349	0.334	0.313	0.310	0.297	-	-		
11	สีเขียวขี้ม้าสด	0.147	0.142	0.136	0.132	0.129	-	-		
12	สีน้ำตาลทอง	0.075	0.075	0.074	0.075	0.076	-	-		
13	สีน้ำตาลแก่	0.316	0.297	0.293	0.285	0.287	-	-		
14	สีแก่นขนุน	0.195	0.190	0.188	0.191	0.190	-	-		

หมายเหตุ *ค่าแอมซอร์เบแนนซ์ของสีครามที่เวลาในการสัมผัส 1020 นาที่ และ 1080 นาที่ เท่ากับ 0.717 และ 0.718 ตามลำดับ และตัวดูดซับที่ใช้คือ CTS/MMT

4. ข้อมูลการดูดซับในหน่วยปฏิบัติการดูดซับแบบเบดนิ่ง

ตารางที่ 5ก ค่าแอมซอร์บแนนซ์ที่เวลาต่าง ๆ ของสีย้อม หลังการดูดซับ

เวลา (min)	ค่าแอมซอร์บแนนซ์ (Absorbance) ที่เวลาต่าง ๆ						
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4	ชุดที่ 5	ชุดที่ 6	ชุดที่ 7
0	0.341	0.327	1.008	0.596	0.573	0.595	0.646
5	0.152	0.161	0.193	0.152	0.152	0.189	0.356
10	0.172	0.34	0.588	0.152	0.152	0.463	0.582
15	0.235	0.477	0.832	0.317	0.161	0.519	0.611
20	0.259	0.523	0.897	0.399	0.288	0.538	0.612
25	0.269	0.544	0.925	0.434	0.350	0.546	0.611
30	0.272	0.554	0.945	0.455	0.384	0.551	0.62
35	0.276	0.563	0.958	0.469	0.405	0.557	0.621
40	0.278	0.569	0.963	0.48	0.418	0.557	0.618
45	0.28	0.573	0.969	0.488	0.43	0.564	0.621
50	0.28	0.571	0.972	0.496	0.441	0.559	0.62
55	0.285	0.582	0.973	0.502	0.448	0.565	0.619
60	0.286	0.582	0.974	0.506	0.457	0.567	0.62
65	0.287	0.583	0.974	0.511	0.462	0.563	0.621
70	0.288	0.584	0.976	0.513	0.469	0.568	0.62
75	0.289	0.585	0.977	0.516	0.471	0.565	0.622
80	0.289	0.587	0.976	0.519	0.475	0.566	0.623
85	0.29	0.587	0.977	0.521	0.477	0.569	0.623
90	0.29	0.587	0.976	0.523	0.48	0.568	0.623
95	0.291	0.589	0.979	0.523	0.481	0.569	0.621
100	0.291	0.587	0.979	0.525	0.485	0.568	0.622
105	0.288	0.585	0.976	0.527	0.485	0.566	0.623
110	0.29	0.587	0.977	0.524	0.488	0.565	0.621
115	0.29	0.586	0.978	0.526	0.491	0.563	0.624
120	0.286	0.583	0.977	0.527	0.488	0.57	0.624

หมายเหตุ ตัวดูดซับที่ใช้ได้แก่ แร่ดิน CTS-MMT สภาวะการทดลองของข้อมูลในชุดที่ 1 -7 อยู่ในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 5ก (ต่อ) ค่าแอมซอร์บแนนซ์ที่เวลาต่าง ๆ ของสีย้อม หลังการดูดซับ

เวลา (min)	ค่าแอมซอร์บแนนซ์ (Absorbance) ที่เวลาต่าง ๆ						
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4	ชุดที่ 5	ชุดที่ 6	ชุดที่ 7
125	0.292	0.586	0.975	0.53	0.49	0.57	0.622
130	0.29	0.587	0.978	0.527	0.49	0.568	0.623
135	0.289	0.586	0.979	0.529	0.491	0.565	0.624
140	0.292	0.586	0.979	0.527	0.49	0.569	0.625
145	0.292	0.586	0.977	0.53	0.492	0.567	0.623
150	0.295	0.585	0.976	0.528	0.492	0.57	0.624
155	0.291	0.585	0.979	0.529	0.492	0.57	0.625
160	0.294	0.585	0.979	0.53	0.492	0.568	0.624
165	0.295	0.584	0.98	0.529	0.493	0.569	0.625
170	0.295	0.585	0.975	0.532	0.494	0.567	0.625
175	0.298	0.586	0.979	0.533	0.495	0.567	0.626
180	0.301	0.584	0.98	0.532	0.495	0.567	0.626
185	0.302	0.587	0.979	0.53	0.496	0.564	0.626
190	0.302	0.586	0.98	0.529	0.496	0.568	0.627
195	0.303	0.582	0.979	0.533	0.497	0.569	0.623
200	0.303	0.584	0.979	0.531	0.498	0.57	0.625
205	0.304	0.585	0.979	0.532	0.499	0.57	0.628
210	0.304	0.586	0.98	0.532	0.499	0.567	0.627
215	0.304	0.589	0.98	0.527	0.499	0.57	0.627
220	0.304	0.585	0.98	0.529	0.5	0.568	0.628
225	0.304	0.59	0.98	0.533	0.5	0.569	0.627
230	0.305	0.589	0.98	0.531	0.499	0.569	0.628
235	0.306	0.589	0.979	0.533	0.501	0.569	0.629
240	0.306	0.591	0.98	0.532	0.5	0.57	0.628

หมายเหตุ ตัวดูดซับที่ใช้ได้แก่ แร่ดิน CTS-MMT ศึกษาการทดลองของข้อมูลในชุดที่ 1 -7 อยู่ใน
ตารางที่ 3-3

ภาคผนวก ข

การนำเสนอบทความภายใต้ทุนวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ถูกนำไปเสนอในการประชุมวิชาการระดับคณะจำนวน 1 ครั้ง ระดับชาติจำนวน 1 ครั้ง และระดับนานาชาติจำนวน 1 ครั้ง ได้แก่

ทรงศักดิ์ สระแก้ว และจักรกฤษณ์ อัมพูช “การหาพารามิเตอร์เชิงจลนพลศาสตร์และเชิงสมดุลของการดูดซับสีย้อมผ้าเคมีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซาน”, การประชุมวิชาการนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2554 น.14-22. อุบลราชธานี: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2554.

ทรงศักดิ์ สระแก้ว และจักรกฤษณ์ อัมพูช “การกำจัดสีย้อมผ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซาน”, การประชุมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 10 น. 31. สงขลา: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2554.

Umpuch, C. and Sakaew, S. “Removal of commercial blue dye from water onto Chitosan-coated-Montmorillonite in fixed bed”, International Thailand Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference 2011, p. T-31. Songkhla: The Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry, 2011.

ภาคผนวก ค

สรุปผลการดำเนินการวิจัย

ผลสรุปแผนการดำเนินงานและผลการปฏิบัติงานจริง

กิจกรรม	ช่วงเวลา (เดือน)							
	2	4	6	8	10	12	15	16
1. ศึกษารวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง								
2. ศึกษาทดลอง								
3. วิเคราะห์และอภิปรายผล								
4. สรุปผลการศึกษา								
5. เผยแพร่งานวิจัยในรูปแบบต่าง ๆ								

หมายเหตุ



แผนการดำเนินงาน



ปฏิบัติงานจริง



หัวหน้าโครงการวิจัยดาราศาสตร์ (อุปสมบทระยะเวลา 3 เดือน)

รายงานสรุปการใช้งบประมาณ

ลำดับ	รายการ	งบประมาณตาม แผน (บาท)	งบประมาณที่ใช้ จริง (บาท)
1	หมวดค่าตอบแทน	9,000	9,000
2	หมวดค่าใช้สอย		
2.1	ค่าเดินทางเพื่อเก็บตัวอย่าง	1,000	0
2.2	ค่าจ้าง	2,000	1,875
3	หมวดวัสดุ		
3.1	ค่าวัสดุสำนักงาน	1,000	1,000
3.2	ค่าวัสดุวิทยาศาสตร์	20,000	21,048.5
4	หมวดครุภัณฑ์	12,000	9,630
รวมงบประมาณที่ใช้จริง		41,923.50	
งบประมาณที่ได้รับการสนับสนุน		45,000	
รวมงบประมาณที่ขออนุมัติเบิกจ่าย		41,923.50	

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์และผลที่ได้รับจากการดำเนินโครงการ

วัตถุประสงค์	ผลที่ได้รับ
ศึกษาการปรับปรุงแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารไคโตซาน	ได้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยสารไคโตซาน
ศึกษาสมมูลการดูดซับ	- ประสิทธิภาพในการดูดซับสีของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในการกำจัดสีของผ้า - ไอโซเทอมการดูดซับ
ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ	อัตราการดูดซับและกลไกการดูดซับ
ศึกษาการดูดซับในหน่วยปฏิบัติการดูดซับแบบเบดนิ่ง	- ประสิทธิภาพในการดูดซับสีของหน่วยปฏิบัติการดูดซับแบบเบดนิ่ง - สภาพที่เหมาะสมในการดูดซับของหน่วยปฏิบัติการนี้