

บทสรุปผู้บริหาร

- ชื่อเรื่อง** การกำจัดสีย้อมจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซาน
Dye removal from synthetic wastewater by natural and Chitosan-coated-Montmorillonite clay
- ผู้วิจัย** นายจักรกฤษณ์ อัมพูช
- หน่วยงาน** คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ชาวบ้านในชุมชนที่อาศัยอยู่ใกล้เคียงกับมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ได้มีการรวมกลุ่มเพื่อผลิตสินค้าพื้นบ้านประจำท้องถิ่นในระดับอุตสาหกรรมครัวเรือน ตัวอย่างเช่น การทอผ้าไหม ผ้าฝ้าย และผ้ากบฏ เป็นต้น หรือที่รู้จักกันดีในอีกชื่อหนึ่งนั่นคือ สินค้าโอท็อป (OTOP) ซึ่งได้รับการส่งเสริมจากหน่วยงานต่างๆ ของทางภาครัฐ เพื่อสร้างรายได้เสริมให้แก่ชาวบ้านนอกเหนือจากกิจกรรมทางด้านเกษตรกรรม การผลิตผ้าดังกล่าวมีอยู่หลายขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมเส้นใย การปั่นเส้นใย การย้อมสีเส้นใย การทอผ้า และการตัดเย็บผ้า เป็นต้น แต่ในขั้นตอนการย้อมสีผ้าจำเป็นต้องใช้น้ำในปริมาณมาก ประกอบกับชาวบ้านนิยมใช้สีย้อมผ้าเคมีสังเคราะห์ที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาด ตัวอย่างเช่น สีย้อมผ้าตราสิงโตติดทอง สีย้อมผ้าตราใบหม่อน และสีย้อมผ้าตราเครื่องบิน เป็นต้น สีย้อมผ้าเหล่านี้ได้รับความนิยมมากเนื่องจาก มีราคาถูก หาซื้อได้ง่ายในท้องถิ่น และเมื่อนำมาย้อมสีผ้าแล้วจะได้ผ้าที่มีสีสดและติดทนนานเมื่อเปรียบเทียบกับสีย้อมผ้าธรรมชาติ จึงทำให้มีน้ำเสียปริมาณมากเกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ น้ำเสียที่เกิดขึ้นย่อยสลายตามธรรมชาติได้น้อย และจะถูกปล่อยทิ้งสู่แหล่งรองรับทางธรรมชาติโดยไม่ได้รับการบำบัดก่อน ตัวอย่างเช่น ทิ้งลงสู่พื้นดินได้ ฤนบ้านและลำธารบริเวณใกล้เคียง เป็นต้น เป็นสาเหตุให้เกิดปัญหามลพิษทางดินและแหล่งน้ำเน่าเสียได้

เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปนเปื้อนของสีย้อมผ้าเคมีสังเคราะห์ในดินและแหล่งน้ำ การบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นเหล่านี้ก่อนปล่อยทิ้งสู่แหล่งรองรับทางธรรมชาติจึงเป็นสิ่งจำเป็น แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ เป็นแร่ดินที่มีปริมาณมากในประเทศ มีราคาถูกและมีการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม เนื่องจากการผลิตแร่ดินมีการทำบริสุทธิ์แร่ดินหลายขั้นตอน จึงทำให้ผลิตภัณฑ์แร่ดินมีความบริสุทธิ์สูง นอกจากนี้แร่ดิน

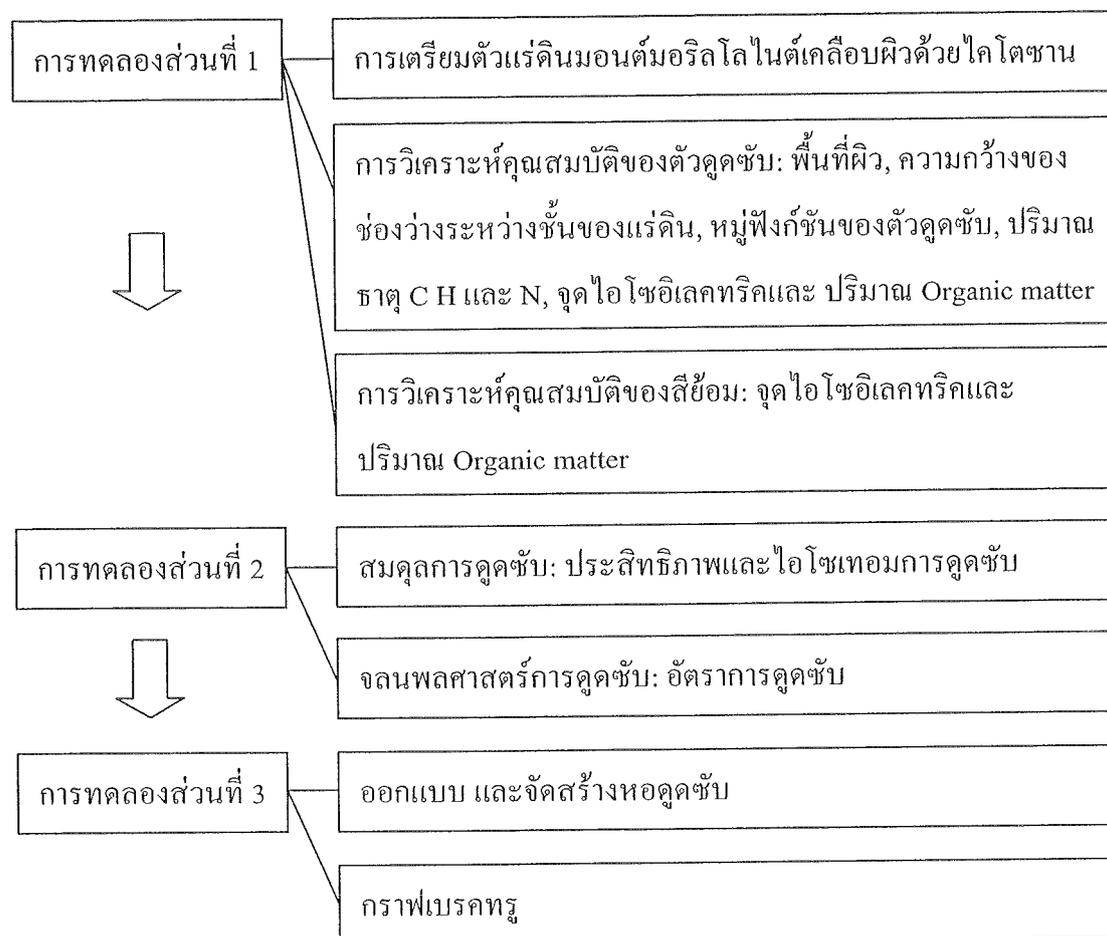
มอนต์มอริลโลไนต์สามารถนำมาปรับปรุงสภาพพื้นผิวให้เหมาะสมกับการยึดจับโมเลกุลชนิดต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยึดจับได้ เช่น การนำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มาปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวประเภทควอเตอร์นารีเอมีน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับสีย้อมผ้าเคมีสังเคราะห์ได้ เนื่องจากพื้นที่ผิวของแร่ดินมีคุณสมบัติเปลี่ยนไปจากที่ชอบน้ำ (hydrophilic) กลายเป็นชอบสารอินทรีย์ (organophilic) โดยพิจารณาจากปริมาณคาร์บอนบนแร่ดินที่เพิ่มขึ้น และองค์ประกอบของสีย้อมผ้าส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์จึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับดีขึ้น (จักรกฤษณ์ อัมพข และ รัตนวรรณ เกียรติโกมล, 2549) สารไลโตซานเป็นสารที่สามารถสกัดมาจากเปลือกนอกของสัตว์จำพวกกุ้ง แมลง และปู ซึ่งมีการบริโภคสัตว์เหล่านี้เป็นจำนวนมากในประเทศไทย สารไลโตซานสามารถนำมาปรับปรุงคุณสมบัติทางพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ให้สามารถยึดจับกับโมเลกุลที่มีประจุบวกและโมเลกุลที่มีประจุลบได้ (Wan Ngah and Kamari, 2009)

วัตถุประสงค์

ศึกษาการกำจัดสีย้อมผ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไลโตซาน ศึกษาความเป็นไปได้ในการดูดซับและศึกษาสถานะที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับในการทดลองแบบกะในห้องปฏิบัติการ และศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในหน่วยปฏิบัติการหอดูดซับแบบเบคคิง

วิธีดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยนี้แสดงไว้ในรูปที่ 1 หลังจากทำการทบทวนวรรณกรรมและเอกสารที่เกี่ยวข้อง การทดลองจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การทดลองส่วนที่ 1 การเตรียมแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไลโตซานและการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการยึดเกาะของสารไลโตซานบนพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์และลักษณะที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน การทดลองส่วนที่ 2 การดูดซับแบบกะ แบ่งการทดลองได้เป็น 2 ชุด ได้แก่ การศึกษาสมดุลการดูดซับและการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ เพื่อศึกษาความสามารถและพฤติกรรมการดูดซับของสีย้อมบนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยสารไลโตซาน การทดลองส่วนที่ 3 การศึกษาการดูดซับของสีย้อมด้วยแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไลโตซานในหน่วยปฏิบัติการการดูดซับแบบเบคคิง เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการนำสีย้อมไปดูดซับในหน่วยปฏิบัติการดูดซับแบบเบคคิง



รูปที่ 1 แผนภาพกรอบแนวคิดงานวิจัย

ผลการวิจัย

การเตรียมและการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ

การนำสารไคโตซานมาเคลือบผิวแร่ดิน MMT จะส่งผลให้ความกว้างของช่องว่างระหว่างชั้นดิน (d_{001}) กว้างขึ้นจาก 1.27 nm ไปเป็น 1.40 nm (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD) การยึดจับของสารไคโตซานจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนยึดเหนี่ยวระหว่างหมู่ $-OH$ กับหมู่ $-NH_2$ ของสารไคโตซานกับอะตอมของออกซิเจนในแผ่นซิลิกาของแร่ดิน MMT (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FITR) แร่ดิน CTS-MMT จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าแร่ดิน MMT เนื่องจากสารไคโตซานจะเข้าไปปกคลุมรูพรุนขนาดเล็กของแร่ดิน MMT ทำให้พื้นผิวภายในรูพรุนขนาดเล็กหายไป จึงส่งผลให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของแร่ดิน CTS-MMT มีค่าสูงขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHNS-analyzer พบว่า แร่ดิน CTS-MMT จะมีปริมาณของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน สูงกว่าแร่ดิน MMT (วิเคราะห์โดย CHNS-analyzer) เนื่องจากสารไค

โตะซานมีปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก การเพิ่มขึ้นของปริมาณธาตุดังกล่าวในแร่ดิน CTS-MMT ยืนยันการยึดเกาะของสาร โตะซานในแร่ดิน CTS-MMT เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ของแร่ดิน CTS-MMT ก่อนและหลังการดูดซับสีข้อม พบว่า แร่ดิน CTS-MMT หลังการดูดซับสีข้อมมีปริมาณสารอินทรีย์สูงกว่าแร่ดิน MMT ซึ่งยืนยันว่าเกิดการยึดจับของสีข้อมกับแร่ดิน CTS-MMT ขึ้น เนื่องจากสีข้อมมีองค์ประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์ นอกจากนี้ แร่ดิน CTS-MMT มีจุด Point of zero charge อยู่ที่ pH เท่ากับ 8.2

การดูดซับแบบกะชนิดขั้นตอนเดียว

การปรับปรุงแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสาร โตะซานจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมของแร่ดินเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมด้วยแร่ดิน MMT และแร่ดิน CTS-MMT นั้นแสดงไว้ในตารางที่ 1 พบว่า แร่ดิน MMT และแร่ดิน CTS-MMT สามารถดูดซับสีข้อมได้สูงที่สุด โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดเท่ากัน นั่นคือ 99.97 % แร่ดิน CTS-MMT สามารถดูดซับสีข้อมผ้าที่นำมาศึกษาทุกชนิดได้ดีกว่าแร่ดิน MMT เช่น เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นเมื่อดูดซับด้วยแร่ดิน CTS-MMT ถึง 71.11 % เมื่อเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์การกำจัดของแร่ดิน MMT ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกศึกษาการดูดซับสีข้อมในขั้นตอนต่อไปด้วยแร่ดิน CTS-MMT เท่านั้น เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมสูงกว่าแร่ดิน MMT

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมผ้า ที่ $C_0 = 200 \text{ mg/l}$ ใช้ปริมาณแร่ดินเท่ากับ 0.5 กรัม

ลำดับ	ชนิดสีข้อม	% 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	สีเขียวหัวเปิด	4.73	18.29	13.56
4	สีแดงครั่ง	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

ข้อมูลการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยแร่ดิน CTS-MMT ที่สภาวะสมดุลจะสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และ/หรือไอโซเทอมแบบฟรุนลิช ขึ้นอยู่กับชนิดของสีย้อมผ้า นั้น ๆ ข้อมูลที่พล็อตกับไอโซเทอมใดมีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 มากกว่า แสดงว่าไอโซเทอมนั้นสอดคล้องมากกว่า

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนลิชของสีย้อมผ้าที่ถูกดูดซับด้วยแร่ดิน CTS-MMT

ลำดับ	ชนิดสีย้อม	Langmuir's parameter			Freundlich's parameter		
		k_L (L/g)	q_m (mg/g)	R^2	k_f (L/g)	N	R^2
1	สีน้ำเงิน	4.80	257.07	0.9787	21.92	2.32	0.9984
2	สีเหลืองแก่	96.15	174.82	0.9927	-	-	0.2306
3	สีเขียวหัวเบ็ด	1.02	163.93	0.9540	3.27	1.58	0.9727
4	สีแดงครึ่ง	11.81	303.95	0.9582	41.39	2.66	0.9830
5	สีเขียวกลาง	-	-	0.8794	24.92	2.04	0.9596
6	สีชมพู	-	-	0.0012	24.78	0.964	0.9373
7	สีระกำทอง	0.062	350.88	0.9866	60.02	2.79	0.9749
8	สีคราม	18.90	128.57	0.9780	-	-	0.2570
9	สีเลือดหมู	0.76	416.67	0.9985	187.79	4.36	0.9272
10	สีฟ้า	19.92	398.41	0.9574	1.80	0.892	0.9504
11	สีเขียวขี้ม้าสด	-	-	0.7747	5.94	1.32	0.9281
12	สีน้ำตาลทอง	-	-	0.7234	9.71	1.43	0.9588
19	สีน้ำตาลแก่	0.025	156.25	0.9738	25.46	3.22	0.9289
20	สีแก่นขนุน	0.043	225.73	0.9740	32.43	2.67	0.9281

การดูดซับสีย้อมผ้าจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลาสัมผัสแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของสีย้อมผ้า นั้น ๆ พบว่า การดูดซับสีครามจะเข้าสู่สภาวะสมดุลช้าที่สุดนั้นคือ 900 นาที อัตราการดูดซับสีย้อมด้วยแร่ดิน CTS-MMT ส่วนใหญ่จะสอดคล้องกับแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second order) แสดงว่า ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นขั้นกำหนดอัตรา (rate limiting step) หรือเป็นขั้นตอนที่อัตราการดูดซับช้าที่สุด

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ของสมการอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียมของการดูดซับสีเขียว

ลำดับ	ชนิดสีเขียว	Equilibrium time (min)	Pseudo-first order's parameter		Pseudo-second order's parameter	
			k_1 (min^{-1})	R^2	k_2 ($\text{g/mg}^*\text{min}$)	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	สีเขียวหัวเป็ด	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

การดูดซับในหน่วยปฏิบัติการหอดูดซับ

การดูดซับสีเขียวเคมีด้วยแร่ดิน CTS-MMT ในหน่วยปฏิบัติการหอดูดซับแบบเบดนิ่ง จะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นขาเข้าต่ำ อัตราการไหลช้า และความสูงของเบดนิ่งสูง ๆ สภาวะที่เกิดการดูดซับได้สูงที่สุด จะมีค่า q_e เท่ากับ 35.81 mg/g ได้แก่ ความเข้มข้นขาเข้าเริ่มต้นของสีคราม เท่ากับ 100 mg/L ความสูงของเบดเท่ากับ 20 cm และอัตราการไหลผ่านคอลัมน์เท่ากับ 3.60 mL/min

ตารางที่ 4 ข้อมูลการทดลองและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการดูดซับสีกครามด้วยแร่ดิน CTS-MMT ในหน่วยปฏิบัติการหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

ลำดับ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ความสูงของเบด (cm)	ค่าอัตราการไหลเฉลี่ย Q (mL/min)	เวลาที่จุดเบรคทฤษฎี (min)	ปริมาตรที่จุดเบรคทฤษฎี (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

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1. การนำแร่ดิน MMT มาปรับปรุงด้วยสารไคโตซานกลายเป็นแร่ดิน CTS-MMT ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเคมีสูงขึ้น โดยสีน้ำเงินจะมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดเพิ่มขึ้นสูงที่สุดได้แก่ 71.11%

2. การนำสารไคโตซานมาเคลือบผิวแร่ดิน MMT จะส่งผลให้ความกว้างของช่องว่างระหว่างชั้นดินกว้างขึ้น (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD) การยึดจับของสารไคโตซานจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนยึดเหนี่ยวระหว่างหมู่ $-OH$ กับหมู่ $-NH_2$ กับอะตอมของออกซิเจนในแผ่นซิลิกาในของแร่ดิน MMT (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR) แร่ดิน CTS-MMT จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าแร่ดิน MMT เนื่องจากสารไคโตซานจะเข้าบดบังรูพรุนขนาดเล็กของแร่ดิน MMT จึงทำให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของแร่ดิน CTS-MMT ใหญ่ขึ้น แร่ดิน CTS-MMT จะมีปริมาณของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน สูงกว่าแร่ดิน MMT (วิเคราะห์โดย CHNS-analyzer) เนื่องจากแร่ดิน CTS-MMT มีสารไคโตซานยึดเกาะอยู่ในโมเลกุล แร่ดิน CTS-MMT หลังจากทำการดูดซับสีย้อมเคมีแล้วจะมีปริมาณสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น เนื่องจากสีย้อมเคมีมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุล 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. อัตราการดูดซับสี่ข้อมผ้าเคมีด้วยแร่ดิน CTS-MMT ส่วนใหญ่จะสอดคล้องกับแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second order) แสดงว่าขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นขั้นตอนการกำหนดอัตรา (rate limiting step) หรือเป็นขั้นตอนที่มีอัตราการดูดซับช้าที่สุด

5. การดูดซับสี่ข้อมเคมีด้วยแร่ดิน CTS-MMT ในหน่วยปฏิบัติการหอดูดซับแบบเบดนิ่ง จะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นขาเข้าต่ำ อัตราการไหลช้า และความสูงของเบดสูง สภาวะที่เกิดการดูดซับได้สูงที่สุดโดยมีค่า q_c เท่ากับ 35.81 mg/g ได้แก่ ความเข้มข้นขาเข้าเริ่มต้น เท่ากับ 100 mg/L ความสูงของเบดเท่ากับ 20 cm และอัตราการไหลผ่านคอลัมน์ของของไหลเท่ากับ 3.60 mL/min

ข้อเสนอแนะ

1. การเพิ่มปริมาณของเปอร์เซ็นต์ของสารโคโคซานในแร่ดิน MMT อาจจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสี่ข้อมผ้าเพิ่มสูงขึ้น
2. การศึกษาการดูดซับสี่ข้อมผ้าในหน่วยปฏิบัติการชนิดอื่น ๆ เช่น ระบบถังกวนอย่างง่าย อาจจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น