



## โครงการ การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

**ชื่อโครงการ** การกำจัดสีย้อมโดยใช้นาโนคอมพอสิตโคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์-ออกไซด์ของโลหะ

(Removal of dye by using metal oxide – PVA /chitosan nanocomposite)

**ชื่อนิสิต** นางสาว ณัฏฐา จันทร์เมือง เลขประจำตัว 5932919323  
นางสาว ปาณิสรา เชษฐนรกุล เลขประจำตัว 5932939923

**ภาควิชา** เคมีเทคนิค

**ปีการศึกษา** 2562

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การกำจัดสีย้อมโดยใช้นาโนคอมพอสิตโคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์-ออกไซด์ของโลหะ

(Removal of dye by using metal oxide – PVA /chitosan nanocomposite)

โดย

นางสาว ณิชฎา จันทร์เมือง  
นางสาว ปาณิศา เชษฐนรกุล

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2562

**ชื่อโครงการ** การกำจัดสีย้อมโดยใช้นาโนคอมพอสิตโคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์-ออกไซด์ของโลหะ  
(Removal of dye by using metal oxide – PVA /chitosan nanocomposite)

**โดย** นางสาว ณิชฐา จันทร์เมือง เลขประจำตัว 5932919323  
นางสาว ปาณิศา เชษฐนรกุล เลขประจำตัว 5932939923

รายงานฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษา

ชันทอง สุนทรภา อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภา)



Project Title Removal of dye by using metal oxide – PVA /chitosan nanocomposite  
Student Name Miss Natta Janmuang Student ID 5932919323  
Miss Panisa Chedthanorrakul Student ID 5932939923  
Advisor Name Assoc. Prof. Dr. Khantong Soontarapa  
Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University,  
Academic Year 2019

### Abstract

In this work, a one-pot synthesis of ZnO – PVA / Chitosan nanocomposite quantum dots was developed for dye removal in wastewater. ZnO quantum dots increased the surface area to volume ratio resulting in higher absorption. In order to stabilize the quantum dots in any combination or Ostwald ripening, the ZnO quantum dots were dispersed in chitosan and polyvinyl alcohol (PVA) matrix. On adsorption characteristics, the effects of temperature (35, 40 and 45 °C), type of dye (methylene blue, congo red and acid blue), pH (2 – 10), contact time (5 – 60 minutes) and dye concentration (60, 80 and 100 ppm) were studied. The XRD analysis revealed that the prepared materials were composed of zinc oxide as main component. It was found that the dye adsorption increased with contact time. The optimum conditions for methylene blue adsorption were at initial dye concentration of 100 mg/l, 35°C and pH 10. Those for congo red were at 100 mg/l, 45°C and pH 6. And those for acid blue were at 100 mg/l, 35°C and pH 2. The thermodynamic results indicated that methylene blue and congo red adsorption were spontaneous endothermic process. While acid blue adsorption required catalysts for adsorption and converted to be exothermic process with decreased efficiency with increased temperature.

Keywords: Dye, Adsorption process, Chitosan/PVA/ZnO nanocomposite

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากรองศาสตราจารย์ ดร.ชนทอง สุนทรภา อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาสละเวลา ให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่อย่างดีมาโดยตลอด และขอบคุณ Dr.Lakkaboyana Sivarama Krishna ที่เป็นผู้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในช่วงที่ทำวิจัยมาโดยตลอด ประสพการณ์ครั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุนบางส่วนในการทำวิจัย รวมทั้งรุ่นพี่และเจ้าหน้าที่กองปฏิบัติการทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำและให้กำลังใจตลอดในการทำงานวิจัย ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่บุคลากรทางการศึกษา และ ผู้สนใจทั่วไปไม่มากก็น้อย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูป	ฏ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 สมมติฐานของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4.1 ได้ทราบสถานะที่เหมาะสมต่อการดูดซับของแต่ละสีย้อม	2
1.4.2 ได้อนุภาคนาโนคอมพอสิตโคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ของซิงค์ออกไซด์ที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการดูดซับสีย้อม	2
1.4.3 ได้ทราบถึงประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมของอนุภาคนาโนคอมพอสิตโคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ของซิงค์ออกไซด์	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 ความหมายและประเภทของสี	3
2.2 การจำแนกและชนิดสีย้อม	3
2.2.1 สีย้อมธรรมชาติ (natural dyestuffs)	4
2.2.2 สีย้อมสังเคราะห์ (synthetic dyestuffs)	5
2.3 อันตรายของสีย้อมที่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม	7
2.4 เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำ (Color Removal Technology)	8
2.4.1 เทคโนโลยีทางกายภาพ (Physical technology)	8
2.4.2 เทคโนโลยีการกำจัดสีทางเคมี (Chemical Technology)	9
2.4.3 เทคโนโลยีทางชีวภาพ (Biological technology)	10
2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)	11

2.6 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO)	12
2.7 ไคโตซาน (Chitosan)	12
2.8 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol; PVA)	13
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
<b>บทที่ 3 ดำเนินงานวิจัย</b>	15
3.1 วัสดุ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	15
3.1.1 วัสดุ	15
3.1.2 เครื่องมือ	15
3.2.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของ PVA/Chitosan-ZnO QDs nanocomposites ที่ได้จากการเตรียม	16
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	20
3.3.1 การศึกษาผลของเวลา (Contact time)	20
3.3.2 การศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH)	21
3.3.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิ (Temperature)	21
3.4 ข้อมูลผลการทดลอง	22
3.4.1 สีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue)	22
3.4.2 สีย้อมคองโกเรด (Congo red)	23
3.4.3 สีย้อมแอซิดบลู (Acid blue)	25
3.4 การคำนวณความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุล	26
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง</b>	27
4.1 ผลการทดลองของสีย้อมเมทิลีนบลู	27
4.1.1 ผลของเวลา (Contact time) กับการดูดซับสีย้อม	27
4.1.2 ผลของอุณหภูมิ (Temperature) และความเข้มข้นสีย้อม (Concentration) กับการดูดซับสีย้อม	29
4.1.3 ผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH) กับการดูดซับสีย้อม	32
4.2 ผลการทดลองของสีย้อมคองโกเรด	34
4.2.1 ผลของเวลา (Contact time) กับการดูดซับสีย้อม	34
4.2.2 ผลของอุณหภูมิ (Temperature) และความเข้มข้นสีย้อม (Concentration) กับการดูดซับสีย้อม	36



4.2.3 ผลของความเป็นกรด-ด่าง pH กับการดูดซับสีย้อม	39
4.3 ผลการทดลองของสีย้อมแอซิดบลู (Acid blue)	40
4.3.1 ผลของเวลา (Contact time) กับการดูดซับสีย้อม	41
4.3.2 ผลของอุณหภูมิ(Temperature)และความเข้มข้นสีย้อม(Concentration)กับการดูดซับสีย้อม	42
4.3.3 ผลของ pH กับการดูดซับสีย้อม	46
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ</b>	48
5.1 ปัจจัยด้านเวลา	48
5.2 ปัจจัยด้านอุณหภูมิ	48
5.3 ปัจจัยด้านค่าความเป็นกรด-ด่าง	49
บรรณานุกรม	51

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงพืชพื้นบ้านสำหรับการย้อมสี และเฉดสีจากการมอร์แดนท์	4
ตารางที่ 3.4.1 (ก) แสดงผลของตัวแปรเวลากับค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสีย้อมเมทิลีนบลู ที่ความเข้มข้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร	22
ตารางที่ 3.4.1 (ข) แสดงผลของตัวแปรอุณหภูมิและความเข้มข้นสีย้อมกับค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสีย้อมเมทิลีนบลู	22
ตารางที่ 3.4.1 (ค) แสดงผลของตัวแปร pH กับค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	23
ตารางที่ 3.4.2 (ก) แสดงผลของตัวแปรเวลากับค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสีย้อมคองโกเรด ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะเติม/ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% w/w 0.2 มิลลิลิตร	23
ตารางที่ 3.4.2 (ข) แสดงผลของตัวแปรอุณหภูมิและความเข้มข้นสีย้อมกับค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสีย้อมคองโกเรด ที่สภาวะเติม/ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% w/w 0.2 มิลลิลิตร	24
ตารางที่ 3.4.2 (ค) แสดงผลของตัวแปร pH กับค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสีย้อมคองโกเรด ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	24
ตารางที่ 3.4.3 (ก) แสดงผลของตัวแปรเวลากับค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสีย้อมแอสิตบลู ที่ความเข้มข้น 37.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะเติม/ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% w/w 0.2 มิลลิลิตร	25
ตารางที่ 3.4.3 (ข) แสดงผลของตัวแปรอุณหภูมิและความเข้มข้นสีย้อม กับค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสีย้อมแอสิตบลู ที่สภาวะเติม/ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% w/w 0.2 มิลลิลิตร	25
ตารางที่ 3.4.3 (ค) แสดงผลของตัวแปร pH กับค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสีย้อมแอสิตบลู ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	26
ตารางที่ 4.1 แสดงผลของตัวแปรเวลากับค่าขีดความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร	27
ตารางที่ 4.2 แสดงผลของตัวแปรอุณหภูมิและความเข้มข้นสีย้อม กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู	29
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าอุณหภูมิศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู	31
ตารางที่ 4.4 แสดงผลของตัวแปร pH กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	32
ตารางที่ 4.5 แสดงผลของตัวแปรเวลากับค่าขีดความสามารถในการดูดซับสีย้อมคองโกเรดที่ ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะเติม/ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% w/w 0.2 มิลลิลิตร	34
ตารางที่ 4.6 แสดงผลของตัวแปรอุณหภูมิและความเข้มข้นสีย้อม กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับสีย้อมคองโกเรด ที่สภาวะเติม/ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% w/w 0.2 มิลลิลิตร	36

ตารางที่ 4.8 แสดงผลของตัวแปร pH กับค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสีย้อมคองโกเรด ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	39
ตารางที่ 4.9 แสดงผลของตัวแปรเวลากับค่าขีดความสามารถในการดูดซับสีย้อมแอสิดบลูที่ความเข้มข้น 37.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะเต็ม/ไม่เต็มไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% w/w 0.2 มิลลิลิตร	41
ตารางที่ 4.10 แสดงผลของตัวแปรอุณหภูมิและความเข้มข้นสีย้อม กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับสีย้อมแอสิดบลู ที่สภาวะเต็ม/ไม่เต็มไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% w/w 0.2 มิลลิลิตร	42
ตารางที่ 4.11 แสดงค่าอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมแอสิดบลู	44
ตารางที่ 4.12 แสดงผลของตัวแปร pH กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับสีย้อมคองโกเรด ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	46

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของ (ก) เมทิลีนบลูและ (ข) คองโกเรด (ค) แอซิดบลู	7
รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของโคโตซาน	13
รูปที่ 3.1 กราฟรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ zinc oxide hexagonal phase	17
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูกับค่าขีดความสามารถในการดูดซับ ที่ความเข้มข้นสีย้อม 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร	28
รูปที่ 4.2 แสดงผลการทดลองในตัวแปรเวลา (นาที่) ในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู	28
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูที่ 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสถานะเต็ม/ไม่เต็ม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส	29
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูที่ 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับ	32
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	33
รูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมเมทิลีนบลู	33
รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดลองตัวแปร pH ของสีย้อมเมทิลีนบลู	34
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมคองโกเรดกับค่าขีดความสามารถในการดูดซับ ที่ความเข้มข้นสีย้อม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสถานะเต็ม/ไม่เต็มไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	35
รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดลองในตัวแปรเวลา (นาที่) ในการดูดซับสีย้อมคองโกเรดในสถานะไม่เต็ม (ก) /เต็ม (ข) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	36
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นสีย้อมคองโกเรดที่ 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับในสถานะเต็ม (ก) /ไม่เต็ม (ข) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	37
รูปที่ 4.12 แสดงผลการทดลองตัวแปรอุณหภูมิและความเข้มข้นสีย้อมคองโกเรดที่(ก) 35, (ข) 40, (ค) 45°C ที่ความเข้มข้น 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	38
รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับสีย้อมคองโกเรด ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	39
รูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมคองโกเรด	40
รูปที่ 4.15 แสดงผลการทดลองตัวแปร pH ของสีย้อมคองโกเรด	40
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมแอซิดบลูกับค่าขีดความสามารถในการดูดซับ ที่ความเข้มข้นสีย้อม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสถานะเต็ม/ไม่เต็มไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	41

- รูปที่ 4.17 แสดงผลการทดลองในตัวแปรเวลา (นาที) ในการดูดซับสีย้อมแอซิดบลูในสภาวะ  
ไม่เต็ม (ก) /เต็ม (ข) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 42
- รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นสีย้อมแอซิดบลูที่ 60, 80 และ 100 มิลลิกรัม  
ต่อลิตร กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับ ในสภาวะเต็ม (ค) /ไม่เต็ม (ง) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 43
- รูปที่ 4.19 แสดงผลการทดลองตัวแปรอุณหภูมิและความเข้มข้นสีย้อมแอซิดบลูที่ (ก) 35, (ข) 40,  
(ค) 45°C ที่ความเข้มข้น 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 45
- รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับสีย้อมแอซิดบลู  
ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร 46
- รูปที่ 4.21 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมแอซิดบลู 47
- รูปที่ 4.22 แสดงผลการทดลองตัวแปร pH ของสีย้อมแอซิดบลู 47

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ปัญหาน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ สีย้อมผ้า คือ สีของน้ำอันเป็นผลจากกระบวนการในโรงงาน ซึ่งหากไม่บำบัดก่อนปล่อยออกสู่แหล่งธรรมชาติจะก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม [1] สีที่ปนอยู่ในน้ำสามารถกั้นขวางแสงปริมาณแสง ทำให้แสงส่องผ่านสู่แหล่งน้ำลดลง ลดการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำทำให้การผลิตออกซิเจนในน้ำลดลง [2] แหล่งน้ำมีออกซิเจนไม่เพียงพอและไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำและห่วงโซ่อาหาร นอกจากนี้สีที่เป็นสารอินทรีย์ละลายหรือคอลลอยด์ สามารถย่อยสลายได้ส่งผลให้ออกซิเจนละลายน้ำลดลง [3] ดังนั้น น้ำเสียที่ปนเปื้อนจากสีย้อมจึงควรได้รับการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมมีหลายวิธี เช่น การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) การกรอง (Filtration) การดูดซึม (Absorption) การดูดซับ (Adsorption) เป็นต้น ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีที่กล่าวมาอาจต้องมีการบำบัดขั้นต้นมาก่อนเพื่อลดภาระในการทำปฏิกิริยาของระบบ ซึ่งมีความยุ่งยากและอาจมีค่าใช้จ่ายสูงในการบำบัด ในขณะที่เทคโนโลยีในการดูดซับ (Adsorption) เป็นวิธีที่ไม่ต้องใช้ทักษะในการเดินระบบมากนักซึ่งสามารถเลือกใช้วัสดุที่ราคาไม่สูงและหาง่าย [4] ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการทำการดูดซับ (adsorption) โดยเราเลือกใช้ตัวดูดซับในลักษณะควอนตัมดอท (quantum dot) เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นผลึกนาโน (nanocrystal) มาเป็นตัวดูดซับสีย้อมในงานวิจัยในครั้งนี้ เพื่อหวังให้สามารถดูดซับสารสีให้มีประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น สำหรับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol; PVA) ที่เป็นส่วนหนึ่งสำหรับสารที่ใช้เตรียมตัวดูดซับนั้น เป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลโดยสังเคราะห์ขึ้น จากสารตั้งต้นที่ได้จากสารปิโตรเคมีและมีสมบัติเด่นคือ ไม่มีพิษ ไม่มีกลิ่น และละลายน้ำได้ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของ PVA มีความเป็นไฮโดรฟิลิกสูง จึงสามารถดูดซับของเหลวที่มีน้ำเป็นตัวกลางได้ดีมาก และจะดูดซับของเหลวได้มาก [5] นอกจากนี้การใช้ไคโตซานในกระบวนการเพื่อเกิดเป็นนาโนคอมโพสิต (nanocomposites) ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำ เนื่องจากไคโตซาน มีความชอบน้ำ (hydrophilic) และเป็นเมมเบรนที่สังเคราะห์จากวัสดุทางชีวภาพ [6] มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม รวมทั้งยังมีความสามารถในการดูดซับมลพิษเช่น โลหะหนักและสีย้อมได้ จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ประยุกต์ในกระบวนการกำจัดสีย้อมในน้ำ

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีของ PVA/chitosan-ZnO nanocomposites กับสีย้อมที่แตกต่างกันสามชนิด คือ แอซิดบลู ,คองโกเรด ,เมทิลีนบลู
- 1.2.2 ศึกษาผลของ pH, อุณหภูมิ, ปริมาณความเข้มข้นสีย้อม และ เวลา ว่ามีผลต่อการดูดซับสีย้อมอย่างไร
- 1.2.3 ศึกษาผลของตัวแปรที่จะศึกษาว่า ณ ที่สภาวะใดของตัวแปรที่ศึกษามีความเหมาะสมต่อการกระบวนการดูดซับ

### 1.3 สมมติฐานของโครงการวิจัย

อนุภาคนาโนคอมพอสิตไคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ของซิงค์ออกไซด์คาดว่าจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ทราบสถานะที่เหมาะสมต่อการดูดซับของแต่ละสีย้อม

1.4.2 ได้อนุภาคนาโนคอมพอสิตไคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ของซิงค์ออกไซด์ที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการดูดซับสีย้อม

1.4.3 ได้ทราบถึงประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมของอนุภาคนาโนคอมพอสิตไคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ของซิงค์ออกไซด์

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ความหมายและประเภทของสี [7]

สี (Color) ในพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน หมายถึง ลักษณะของแสง ที่ปรากฏแก่ สายตาเรา ให้เห็นเป็น สีขาว ดำ แดง เขียว ฯลฯ หรือการสะท้อนรังสีของแสงมาสู่ตาเรา

สีที่เราเห็นตามธรรมชาตินั้นเกิดจากการสะท้อนของแสงเมื่อมาตกกระทบกับวัตถุแล้วจะเกิดการหักเหของแสง สีจัดเป็นคลื่นแสงชนิดหนึ่ง ซึ่งเราจะเห็นได้เมื่อแสงผ่านละอองไอน้ำ ในอากาศ หรือ แท่งแก้วปริซึม และจะปรากฏเป็นสีต่างๆ รวม 7 สี ได้แก่ สีม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม และ แดง เรียกว่า สีรุ้ง ที่ปรากฏบนท้องฟ้า สีโดยทั่วไปในสิ่งแวดล้อมรอบๆตัว เราสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ สีที่เกิดในธรรมชาติ มีอยู่ 2 ชนิดคือ

ก. สีที่เป็นแสง ( Spectrum ) คือ สีที่เกิดจากการหักเหของแสง เช่น สีรุ้ง สีจากแท่งแก้วปริซึม

ข. สีที่อยู่ในวัตถุ หรือเนื้อสี ( Pigment ) คือ สีที่มีอยู่ในวัตถุธรรมชาติทั่วไป เช่น สีที่เป็นรงควัตถุสีม่วงหรือธาตุในร่างกายเรา สีที่เกิดจากวัตถุธาตุจาก พืช สัตว์ แร่ธาตุเป็นต้น ซึ่งเป็นสีที่ใช้ในงานศิลปะ ส่วนสีอีกชนิดหนึ่งคือ สีที่มนุษย์สร้างขึ้น ซึ่งเป็นสีที่ได้จากการสังเคราะห์ เพื่อใช้ประโยชน์ในงานต่างๆ เช่น งานศิลปะ อุตสาหกรรม และในชีวิตประจำวัน

### 2.2 การจำแนกและชนิดสีย้อม [8]

สำหรับในด้านสิ่งทอ สีจะหมายถึง สิ่งที่มีสีหรือ สิ่งที่ทำให้เกิดสีอาจเรียกว่า คัลเลอร์แรนท์ (colorant) ซึ่งแบ่งออกเป็น

- สีคัลเลอร์แรนท์อินทรีย์ (organic colorant) เป็นสารให้สีที่เป็นสารประกอบอินทรีย์เป็นสีย้อม (dye) ที่ใช้ย้อมวัสดุ (substrate) เช่น ผ้า กระดาษ หนังสือ ผนัง โดยการละลายสีในตัวกลางเช่น น้ำ เป็นต้น
- สีคัลเลอร์แรนท์อนินทรีย์ (inorganic colorant) เป็นสารให้สีของสารประกอบอนินทรีย์ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นพิกเมนต์ (pigment) มักทำให้เกิดสีในวัสดุโดยไม่ ต้องใช้ตัวกลาง เช่น น้ำ เพื่อทำให้เกิดสีในสีทาบ้าน หรือ สีในพลาสติก

สีย้อม (dyestuffs) คือ เป็นสีที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้า อาจจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้โดยมีลักษณะของสีอาจเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมบางชนิดละลายน้ำได้และบางชนิดไม่สามารถละลายน้ำแต่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีจะซึมผ่านเข้าไปในเส้นใยโดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อม ซึ่งสีที่เราเห็นจากสีย้อมนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมนั้นมีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน โดยแสงที่ตามองเราสามารถมองเห็นได้นั้นจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400 - 700 นาโนเมตร ซึ่งการที่สีย้อมมีโครงสร้างต่างกันก็จะทำให้ช่วงการดูดกลืนพลังงานแสงในความยาวคลื่นที่ต่างกันออกไปด้วย ซึ่งตาเราสามารถรับภาพได้ จึงทำให้เราเห็นความแตกต่างกันของในแต่ละสีย้อม โดยสีย้อมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ



## 2.2.1 สีย้อมธรรมชาติ (natural dyestuffs)

เป็นสีย้อมที่มาจากแหล่งธรรมชาติจะมาจากพืชและสัตว์ ในสีย้อมที่ได้จากพืชนั้นก็จะมีมาจากส่วนประกอบต่างๆของพืช เช่น ส่วนลำต้น ส่วนดอก ส่วนเปลือก ส่วนที่เป็นใบ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น สีดำจากลูกมะเกลือ สีน้ำเงินจากต้นคราม สีแดงจากดอกกรรณิการ์ สีแดงจากรากต้นเข็ม ส่วนสีย้อมที่มาจากสัตว์ เช่น สีม่วงแดงของครั่ง สีม่วงจากหอยสังข์หนาม เป็นต้น จำแนกสีย้อมธรรมชาติออกเป็นชนิดต่างๆ ตามแหล่งที่มาได้ดังนี้

- สีย้อมแร่ธาตุ (mineral dyes)  
สีที่ได้จากแร่ธาตุ จัดเป็น สื่อนินทรีย์ ส่วนใหญ่มักจะเป็นออกไซด์ของโลหะหรือ สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ ซึ่งสีชนิดนี้มีความคงทนสูงและมีเฉดสีต่างๆ เช่น เลดโครเมตมีสีเหลือง ออกไซด์ของเหล็กผสมกับออกไซด์ของโครเมียมให้สีเทา
- สีย้อมสัตว์ (animal dyes)  
สีที่ได้จากสัตว์ เช่น กรดแลคคาอิก (laccic acid) ซึ่งสกัดได้จากแมลงคอคคัสแลคซี (coccus laccae) ที่อาศัยอยู่ในเปลือก ต้นไม้ กิ่งต้นไม้ที่มีแมลงชนิดนี้อาศัยอยู่จะปกคลุมไปด้วยเรซินสีน้ำตาลแดง ที่เรียกว่า ครั่ง (lac) โครงสร้างทางเคมีของกรดแลคคาอิกเป็นอนุพันธ์ของแอนทราควิโนน สารละลายกรดแลคคาอิกให้หลายเฉดสี ได้แก่ สีส้ม แดง แดงอมม่วง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช
- สีย้อมพืช (vegetable dyes)  
เป็นแหล่งใหญ่ของสีย้อมธรรมชาติ ทุกส่วนของพืช เช่น ราก ลำต้น ใบ ดอก ผล ให้เฉดสีหลากหลาย อีกทั้ง การมอร์แดนต์ด้วยโลหะคนละชนิดจะทำให้เฉดสีแตกต่างกันได้

**ตารางที่ 2.1** แสดงพืชพื้นบ้านสำหรับการย้อมสี และเฉดสีจากการมอร์แดนท์

แหล่งสีย้อมธรรมชาติ	สารสำหรับการมอร์แดนท์	เฉดสีที่ได้จากการมอร์แดนท์
ใบแก้ว	คอปเปอร์ซัลเฟต	เขียว
ผลคนทา	เหล็กซัลเฟต	เทาม่วง
ใบมะกอกโอลีฟ	คอปเปอร์ซัลเฟต	น้ำตาลเหลือง
เปลือกผลเงาะ	เหล็กซัลเฟต	ดำ
ผลหม่อน	คอปเปอร์ซัลเฟต	เขียวขี้ม้า
ผลหว่า (ผลใหญ่)	คอปเปอร์ซัลเฟต	เหลืองนวล
เปลือกผลมังคุด	คอปเปอร์ซัลเฟต	น้ำตาล
กลีบดอกดาวเรือง	อาลัม	เหลือง
ใบแกช้เหล็กบ้าน	-	น้ำตาล
ผลมะเกลือ	เหล็กซัลเฟต	ดำ
สะเดา	คอปเปอร์ซัลเฟต	น้ำตาล

\*การมอร์แดนท์เป็นการเติมโลหะในสีย้อมเพื่อเพิ่มความคงทนต่อการซักและแสงแดด

## 2.2.2 สีย้อมสังเคราะห์ (synthetic dyestuffs) [9]

เป็นสีย้อมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทางเคมี การจำแนกสีย้อมที่นิยมกันมากที่สุด คือ การจำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้ เพราะจะต้องมีความคงทนการซัก มีความคงทนต่อแสงและยังต้องมีความคงทนต่อความร้อน ซึ่งในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 11 ประเภท คือ (1) สีเอซิด (2) สีไดเร็กต์ (3) สีเบสิก (4) สีดิสเพอร์ส (5) สีรีแอกทีฟ (6) สีอะโซอิก (7) สีแว็ต (8) สีมอร์แดนท์ (9) สีอินเกรน (10) สีออกซิเดชัน และ (11) สีซัลเฟอร์ โดยที่สีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อม ตลอดจนวิธีใช้ที่แตกต่างกันไป ดังนั้นการเลือกใช้สีย้อมจึงมีความสำคัญอย่างมากในการย้อมสี เพราะวัตถุประสงค์ของการย้อมอาจสามารถย้อมด้วยสีย้อมเพียงชนิดเดียวหรือย้อมด้วยสีย้อมหลายชนิดที่ต่างชนิดกันได้ เช่น เส้นใยเซลลูโลสส่วนใหญ่จะย้อมด้วยสีไดเร็กต์ เป็นต้น

1) **สีเอซิด (acid dye)** สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีเอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน ไยขนแกะ ไหม และอะคริลิกได้ดี วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีเอซิดไม่ทนต่อการซักและไม่ทนต่อเหงื่อ

2) **สีไดเร็กต์ (direct dye)** หรืออาจเรียกว่าสีย้อมฝ้าย สีชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบ อะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใยและยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำ สีดกง่าย ทนแสง

3) **สีเบสิก (basic or cationic dye)** สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (organic base) ให้ประจุลบ ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและใยอะคริลิกได้ดี ในขณะที่โมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใยเป็นสีที่ติดทนไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง

4) **สีดิสเพอร์ส (disperse dye)** เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิ และความดันสูง สีดิสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควั่นหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนโตรซอกไซด์ สีดิสเพอร์ส แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ (azo dyes) และสีย้อมแอมมิโน แอนทราควิโนน (amino anthraquinone) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่ม ประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทรานอลามีน (ethanolamine;  $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$ ) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

5) **สีรีแอกทีฟ (reactive dye)** เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^-$ ) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่างกลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอกทีฟมี 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง  $70-75^\circ\text{C}$  และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอกทีฟให้สีที่สดใสทุกสีติดทนในทุกสภาวะ

6) **สีอะโซอิก (azoic dye)** สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อนซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซักแต่ไม่ทนต่อการขัดถู

7) **สีแว้ต (vat dye)** เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแว้ตละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแว้ตจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสีแว้ตสีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโก (indigoid) และสีแอนทราควินอยด์ (antraquinoid)

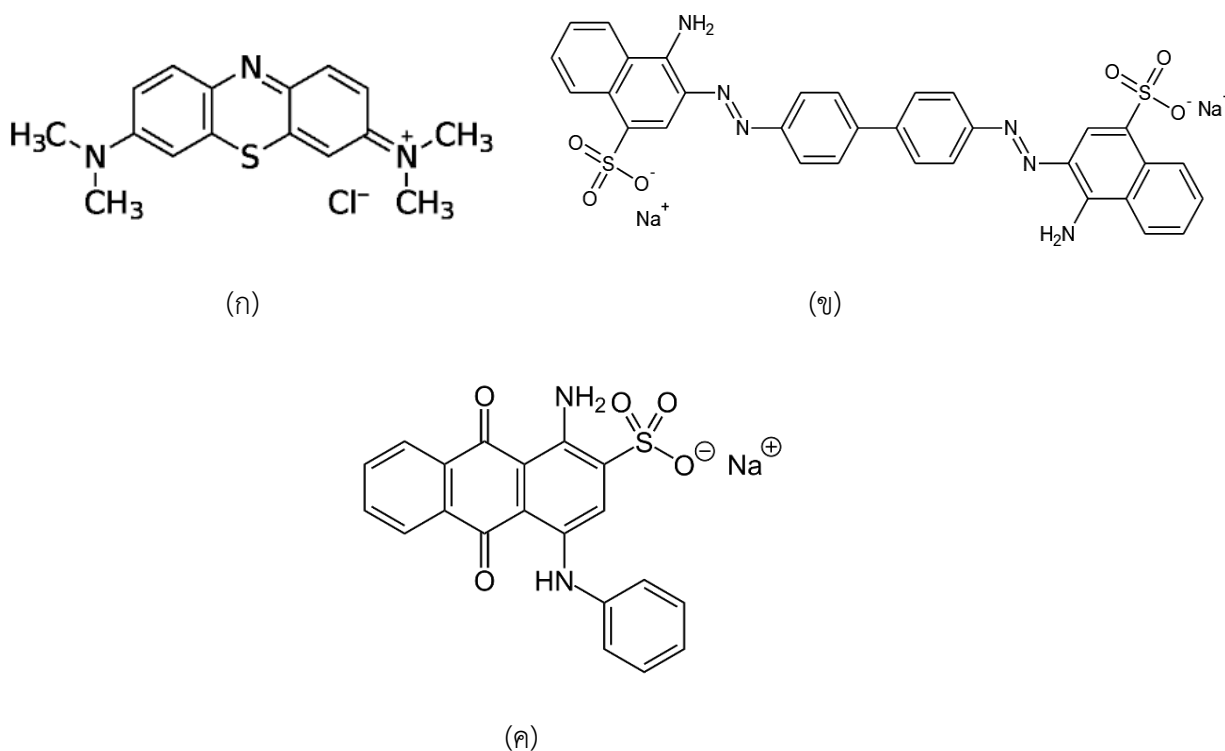
8) **สีมอร์แดนท์ หรือโครม (mordant or chrome dye)** สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนท์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจาก สีมอร์แดนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

9) **สีอินเกรน (ingrained)** เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำย้อมชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมผ้า

10) **สีออกซิเดชัน (oxidation dye)** เป็นสีที่มีละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่น อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมผ้าและขนสัตว์

11) **สีซัลเฟอร์ (sulfur dye)** เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำได้ นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมผ้า สีจะติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูก แต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ เมทิลีนบลู คองโกเรต แอซิดบลู ซึ่งเป็นสีย้อมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม โดยเมทิลีนบลูจัดเป็นสีย้อมประเภทดิสเพิร์ส (Disperse dyes) โดยสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 1(ก) เมทิลีนบลูมีลักษณะเป็นผลึกหรือผงสีเขียวเข้ม ละลายได้ดีในน้ำและละลายได้เล็กน้อยในแอลกอฮอล์เมื่อละลายน้ำจะได้สารละลายสีน้ำเงินเข้ม เมทิลีนบลูเป็นสารอินทรีย์ที่มีการนำไปใช้ประโยชน์ในหลายๆด้าน เช่น ใช้เป็นสีย้อมหรือสามารถใช้ในการแพทย์ เช่น ใช้เป็นยารักษาโรคในมนุษย์ และยารักษาโรคในปลา เป็นต้น (ชำนาญ ราษฎร์, 2544) [10] ในส่วนของสีย้อมคองโกเรต จัดเป็นสีย้อมประเภทสีไคเรก (Direct dye) หรือสีชนิดติดเส้นใย สูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 1(ข) ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซ พทาโลไควนิน หรือ ออกซาซิน มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิค ละลายน้ำให้ประจุลบ เกาะติดเส้นใยได้ดี นิยมใช้ย้อม เส้นใยเซลลูโลสและสีแอซิดบลู จัดเป็นสีย้อมประเภท สีแอซิด (Acid dye) สูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 1(ค) ในสีประเภทนี้อาจพบหมู่แอนทราควิโนน อะโซ หรือไนโตรเป็นองค์ประกอบในโมเลกุล สีย้อมพวกนี้มักนิยมนำไปใช้ในการย้อมพวกเส้นใยโปรตีน และเซลลูโลส เช่น ปอ ป่าน ไยขนแกะ และไหม สีย้อมประเภทนี้เป็นสีที่สามารถละลายน้ำได้ และมีประจุลบ



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของ (ก) เมทิลีนบลูและ (ข) คองโกเรด (ค) แอซิดบลู

### 2.3 อันตรายของสีย้อมที่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม [11]

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอที่มีการใช้สีย้อมในกระบวนการผลิต เช่น การย้อมสีซึ่งต้องใช้สารเคมีเพื่อให้กระบวนการย้อมสีมีประสิทธิภาพซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่า สารเคมีต่างๆและสีย้อมมีองค์ประกอบของสารอันตรายหลายชนิด เช่น ไอออนโลหะหนักอย่าง ทองแดง นิกเกิล โครเมียม โปรท ซึ่งพวกโลหะเหล่านี้ล้วนเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทั้งสิ้น ไอออนของโลหะหนักในสีย้อมทำให้สีย้อมมีความคงทนสูง เนื่องจากว่าไอออนของโลหะหนักนั้นจะทำให้มวลโมเลกุลของสีย้อมสูงขึ้นทำให้ความคงทนต่อการซักดีขึ้นไปด้วย และสามารถดึงดูดอิเล็กตรอนที่ถูกเร้าแสงได้ เมื่อแสงที่มากระทบทำให้มีความคงทนต่อแสงแดดสูงขึ้น นอกจากนี้สีย้อมจัดเป็นสารอินทรีย์ซึ่งสามารถก่อให้เกิดค่า Biochemical oxygen demand (BOD) ได้ซึ่งค่า BOD เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความต้องการในการใช้ออกซิเจนของพวกจุลินทรีย์ในน้ำเพื่อใช้ในการย่อยสลายสารต่างๆ หากค่า BOD สูงจะทำให้แหล่งน้ำมีปริมาณออกซิเจนที่ลดลง และนำไปสู่แหล่งน้ำเน่าเสียได้ นอกจากนี้สีย้อมสามารถดูดกลืนแสงได้ทำให้พืชที่ต้องการแสงในการสังเคราะห์แสงได้รับผลกระทบตามไปด้วย ซึ่งจะเห็นได้ว่าปัญหาสิ่งแวดล้อมทางน้ำที่เกิดขึ้นมักมาจากอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการจัดการวางแผน ในการกำจัดน้ำเสียจากโรงงานให้มีคุณภาพได้มาตรฐานตามเกณฑ์ที่กำหนดก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งปัจจุบันเราก็มีเทคโนโลยีมากมายที่จะใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานซึ่งถือว่าเป็นตัวช่วยสำคัญที่จะช่วยลดการเกิดน้ำเสียในแหล่งน้ำได้อีกทางหนึ่ง

## 2.4 เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำ (Color Removal Technology) [12]

### 2.4.1 เทคโนโลยีทางกายภาพ (Physical technology)

สำหรับในกระบวนการนี้เป็นกระบวนการทางกายภาพ (physical process) เป็นการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออก ซึ่งวิธีนี้จะแยกตะกอนและสิ่งสกปรกของพวกสารอินทรีย์ ในกระบวนการนี้มีหลายวิธี เช่น การดักจับของเสียด้วยตะแกรง (screening) จะเป็นคัดแยกเศษขยะต่างๆ ที่มากับน้ำเสีย เช่น เศษไม้ กระดาษ เป็นต้น การตัดย่อย (combination) คือ กระบวนการที่ใช้เครื่องตัดเศษขยะที่มักมีขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง การกวาด (skimming) เป็นการแยกของเสียที่เป็นน้ำมันและไขมัน การทำให้ลอย (floating) จะใช้กับพวกตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่าน้ำ และการตกตะกอน (sedimentation) จะเป็นการแยกตะกอนออก โดยอาศัยหลักการแรงโน้มถ่วง ซึ่งเหมาะกับพวกตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ ในส่วนของตัวอย่างเทคโนโลยีทางกายภาพมีดังนี้

#### การกรองด้วยเยื่อแผ่น (Membrane)

การกรองด้วยเยื่อแผ่น ประกอบด้วย 3 วิธี คือ ไมโครฟิลเตรชัน (microfiltration) จะใช้กำจัดสิ่งย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่ผ่านการย้อมและล้างมาแล้ว โดยวิธีใช้กำจัดสีประเภทดีสเพอร์สที่ใช้อยู่ส่วนใหญ่ สีย้อมประเภทนี้หากผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชันแล้วสามารถที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ส่วนวิธีออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis) เป็นวิธีที่ใช้กำจัดพวกออสโมซิสย้อม และโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ วิธีนี้แบ่งย่อยได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ เยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย (Brackish Water) เยื่อแผ่นนี้สามารถกำจัดสีย้อมได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือ จากนั้นจะถูกส่งไปยังเยื่อแผ่นที่สอง คือ เยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล (Sea Water) ซึ่งมีความสามารถในการกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 94 แต่มีข้อจำกัดตรงที่ไม่สามารถกำจัดพวกสีย้อมที่ใช้อยู่ส่วนใหญ่ประเภทฝ้ายได้ และไดนามิค เมมเบรน (Dynamic Membrane) จะใช้ในการกำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ โดยการกำจัดจะใช้ตัวรองรับที่มีลักษณะเป็นรูพรุน เช่น วัสดุคาร์บอน และได้มีการพัฒนามาใช้ Hydrous zirconium (IV) oxide และกรดพอลิอะครีลิก (Zr/PAA) เพื่อปรับปรุงขนาดของรูพรุน กระบวนการนี้กำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 95 หรือมากกว่านั้น นอกจากนี้ยังมีกระบวนการกำจัดสี โดยการแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ แผ่นกรองร่วมกับไฟฟ้ากระแสตรงแยกสารประจุบวกและประจุลบ ออกจากน้ำ โดยมีแผ่นกรองที่มีประจุบวก (Cation) และประจุลบ (Anion) ติดตั้งวางสลับกันเป็นชั้นๆ เพื่อกระแสไฟฟ้าจะถูกส่งเข้าไปในช่องระหว่างแผ่นกรอง โดยในขณะเดียวกันก็มีการปล่อย ไฟฟ้ากระแสตรงผ่านแผ่นกรอง โดยแผ่นกรองประจุบวกยอมให้ประจุบวกไหลผ่านไปกับน้ำ ส่วนแผ่นกรองประจุลบ จะยอมให้สารประจุลบไหลผ่าน โดยน้ำที่มีประจุบวกและประจุลบรวมกันแล้วไหลออกไป แต่วิธีนี้มักพบปัญหาคือ เกิดตะกอนเกาะที่แผ่นกรอง ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามากและต้องทำล้างทำความสะอาดบ่อยครั้งจึงไม่ได้รับความนิยม

### การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูงและมีคุณสมบัติในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ที่ปนเปื้อนในของเหลว การที่มีรูขนาดเล็ก (Microporosity) ทำให้สามารถกำจัดสีแท้และสีปรากฏได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยวัสดุที่นำมาใช้จะเป็นพวกสารอินทรีย์ ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ไม้ ถ่านหิน กะลามะพร้าว กากขานอ้อย เป็นต้น นำมาเผาด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงในเตาอบอากาศ ซึ่งการใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดความพรุน (Porosity) จากนั้นจะทำการอัดด้วยไอน้ำร้อน ยิ่งยวดที่อุณหภูมิประมาณ 200-1,600 องศาเซลเซียส เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับให้มากขึ้น การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของสีติดบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ แต่อย่างไรก็ตามถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวจำกัดประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลงตามอายุการใช้งาน การจะนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่ต้องใช้ต้นทุนสูง เนื่องจากโมเลกุลของสีที่เกาะบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะหลุดออกยาก จึงต้องมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากจึงทำให้เทคนิคไม่เป็นที่นิยม

#### 2.4.2 เทคโนโลยีการกำจัดสีทางเคมี (Chemical Technology)

เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกสารต่างๆ หรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่จะทำการบำบัด เช่น โลหะหนัก สารพิษ สภาพความเป็นกรด-ด่าง จะทำการเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยาซึ่งจะมีประโยชน์ในการแยกสาร แต่ข้อเสียคือ เมื่อเราเติมสารเคมีลงในน้ำเสียแล้ว จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้นอกจากนี้ยังมีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูง ดังนั้นกระบวนการทางเคมีจะเลือกใช้เมื่อน้ำเสียไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางกายภาพหรือชีวภาพซึ่งก็มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ดังนี้

#### การสร้างรวมตะกอน (Coagulation-flocculation)

การรวมตะกอนด้วยสารเคมีเป็นกระบวนการที่จะใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยสารที่นิยมใช้เป็นสารเคมีสร้างตะกอน (Coagulant) คือ สารส้ม (Aluminum Sulfate; Alum) ปูนขาว (Calcium oxide) หรือเฟอร์รัสคลอไรด์ ( $FeCl_2$ ) เป็นต้น ในการสร้างและรวมตะกอนเป็นการทำให้พวกสารแขวนลอยขนาดเล็กรวมตัวกัน จนกลายเป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่และสามารถตกตะกอนได้ โดยส่วนใหญ่แล้วพวกสารแขวนลอยจะมีประจุไฟฟ้าลบ เมื่อนุภาคเหล่านั้นมาพบกันจะเกิดการผลักรันไม่สามารถรวมตัวกันเป็นตะกอน จึงต้องมีการทำให้ประจุของอนุภาคเป็นกลางโดยการเติมสารเคมีสร้างตะกอนลงไปซึ่งเรียกว่ากระบวนการ สร้างตะกอน (Coagulation) หลังจากนั้นเกิดกระบวนการรวมกัน (Flocculation) เกิดขึ้นได้ซึ่งการเติมสารเคมีเพื่อรวมตะกอน (Flocculants) จะทำให้ไปช่วยยึดหรือจับให้เกิดรวมตัวกันของตะกอนได้เมื่อกลุ่มตะกอนมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากก็จะสามารถตกตะกอนลงมาได้

**การออกซิเดชันทางเคมี (Chemical Oxidation)** กระบวนการนี้จะใช้สารเคมีในการออกซิไดส์สารประกอบในน้ำเสีย เช่น

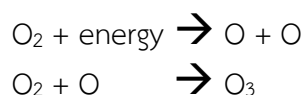
#### กระบวนการเฟนตัน (Fenton process)

เป็นกระบวนการที่ใช้สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออนจะได้ไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH) เป็นตัวออกซิไดส์สารอินทรีย์ซึ่งไอออนบวกของเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาเป็นตัวกลางสำคัญ ซึ่งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลมีค่าศักย์ไฟฟ้า

ออกซิเดชันสูงบ่งบอกถึงความสามารถในการในการรับอิเล็กตรอน ถ้าตัวออกซิไดซ์ที่แรงจะรับอิเล็กตรอนได้ง่ายมาก หากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถออกซิไดส์สารจำนวนมากอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพ และเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำจะทำให้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีย้อมได้

### กระบวนการโอโซนออกซิเดชัน (Ozone oxidation)

เป็นกระบวนการที่ใช้โอโซนเพื่อทำให้พันธะของโมเลกุลที่ทำให้เกิดสีแตกออกกลายเป็นโมเลกุลเล็กและสีจะหายไปโดยแตกสลายโมเลกุลของสีที่ยาวให้มีขนาดสั้นลง ทำให้สีในน้ำจะลดลงได้ การทำลายโครงสร้าง โมเลกุลแบบโครงสร้างแบบโซ่ของสารอินทรีย์ความสามารถในการกำจัดสีจะกำจัดได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสกับโอโซนให้นานขึ้น และสีของน้ำลดลงมาก หากก๊าซโอโซนไม่เสถียร สามารถสลายตัวเป็นออกซิเจนได้ง่าย วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตก๊าซโอโซนคืออากาศหรือออกซิเจน โดยออกซิเจน 2 โมเลกุลจะผลิตก๊าซโอโซนได้ 1 โมเลกุล ดังสมการ



โอโซนมีสถานะเป็นก๊าซที่ความดันและอุณหภูมิปกติ ความสามารถในการละลายของโอโซนในน้ำจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความดันรวมทั้งค่าความเป็นกรด-ด่าง โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรอัตราการสลายตัวจึงเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรดต่าง และอุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้โอโซนอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ เช่น ในการใช้ก๊าซโอโซน เป็นสารที่ให้ออกซิเจนอย่างแรง อาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้

### 2.4.3 เทคโนโลยีทางชีวภาพ (Biological technology)

ในเทคโนโลยีทางกายภาพ และเคมีเป็นการใช้สารเคมีในการกำจัดสี ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ทั้งยังเป็นการเพิ่มสารเคมีให้กับสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีทางชีวภาพจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการกำจัดสีย้อม เช่น

#### การย่อยสลายโดยเชื้อรา (Fungi decomposition)

เป็นกระบวนการที่ใช้เชื้อราโดยตัวอย่างเชื้อราที่ใช้กำจัดสีย้อม เช่น ในการสร้างเอนไซม์นอกเซลล์กลุ่มลิกนินโกลิติก (Ligninolytic enzyme) เพื่อย่อยสลายเนื้อไม้ โดยในเนื้อไม้มีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ ลิกโนเซลลูโลส ทำให้สามารถกำจัดสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษได้ นอกจากนี้เชื้อรา *Aspergillus fumigates* สามารถผลิตสารแลคเคส เพอร์แมงกานีส และไซลानเนสซึ่งมีประสิทธิภาพกำจัดสีย้อมโดยย่อยสลายลิกนินในช่วง ความเป็นกรดต่าง 6.0-9.0 แต่ในการใช้ราในการกำจัดสีย้อมผ้าไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากการเก็บรักษา และความสะอาดในการทำงาน

### การดูดซับด้วยสาหร่าย (Algae absorption)

สาหร่ายสามารถกำจัดสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรม ซึ่งในการดูดซับสีจะอยู่ภายใต้สภาวะที่มีแสงโดยเปลี่ยนโมเลกุล ที่มีสีเป็นโมเลกุลที่ไม่มีสี ตัวอย่างสาหร่ายที่ใช้ดูดซับ เช่น สาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) สามารถดูดซับสีเบสิคจาก อุตสาหกรรมฟอกย้อมได้ นอกจากนี้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน และ กลุ่มพวกสาหร่ายสีเขียวมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีของโรงงานผลิตสุราที่มีการใช้กากน้ำตาลเป็น วัตถุดิบ โดยมีปัจจัย ด้านปริมาณความเข้มข้นของอาหาร ปริมาณ ความเข้มแสง ปริมาณความเข้มข้นของเซลล์ตั้งต้น และความเป็นกรดต่าง หากสาหร่ายสองสายพันธุ์นำมาบำบัดในปฏิกริยาเฟนตันและโอโซนร่วมด้วย พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมดีขึ้น

### การย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย (Bacteria decomposition)

ในการย่อยสลายสีด้วยแบคทีเรีย สามารถลดสีหลายประเภท [12] เช่น ในการศึกษาการดูดซับสีกลุ่ม แอนทราควิโนนโดยเชื้อ *Bacillus gordonae*, *B. benzeovorans* และ *Ps. putida* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีเท่ากับ ร้อยละ 13, 19 และ 18 ตามลำดับ นอกจากนี้ [13] การศึกษาประสิทธิภาพของแบคทีเรียสายพันธุ์ *Burkholderia glumae* ในการย่อยสลายสีรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ในกระบวนการบำบัดแบบที่ไม่มีการเติมอากาศให้ผลเร่ง การกำจัดสีได้ดีกว่าการบำบัดแบบเติมอากาศ โดยสามารถขจัดสีในน้ำทิ้งได้ร้อยละ 76 ในเวลา 7 วัน โดย ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลาย คือ ค่าความเป็นกรดต่าง ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม สารอาหารที่จำเป็นต่อ การเจริญ รวมถึงความต้องการอากาศในการเจริญของเชื้อแบคทีเรียและการย่อยสลายสี จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการนี้จะขึ้นกับประเภทของแบคทีเรียและการสภาวะที่เหมาะสม แบคทีเรียในแต่ละชนิดในวิธีการกำจัดสีย้อมนั้นมีอยู่หลายวิธีการซึ่งหนึ่งในวิธีที่น่าสนใจคือ กระบวนการดูดซับ เป็นกระบวนการที่ใช้ต้นทุนต่ำ ควบคุมง่าย จึงนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ในการกำจัดสีย้อม

### 2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process) [15]

กระบวนการดูดซับ คือ เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของ สารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า(interface) โดยจะเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ของเหลวกับของแข็ง เป็นต้น โดยโมเลกุลที่ถูกดูดอยู่ที่พื้นผิวจะเรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ(adsorbent) ในการที่สารละลายหรือพวกสาร แขนงลอยถูกดูดติดอยู่บนผิวตัวดูดซับเพื่อกำจัดออกจากน้ำ ซึ่งโมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิว ภายในโพรงของตัวดูดซับโดยจะมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหา ตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุดโดย ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะ โมเลกุลส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับโดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และกาดูดซับทางเคมี



## การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมลและสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งถือเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารจะถูกดูดซับติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

## การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมี เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกละลายกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกละลายเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกละลายออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก เนื่องจากไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่าง

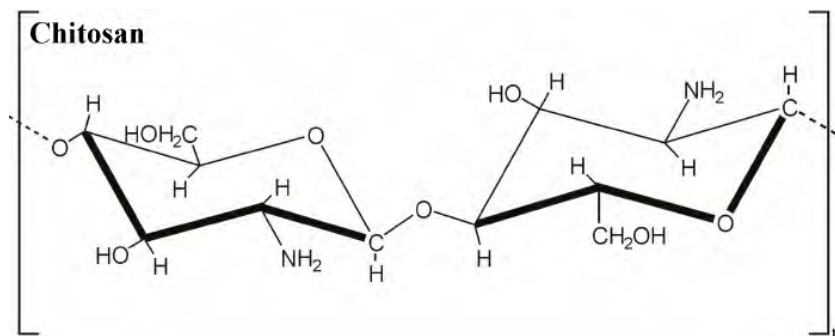
## 2.6 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) [16,17]

ซิงค์ออกไซด์จัดเป็นสารประกอบที่สามารถพบได้ในธรรมชาติ และเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานกว้าง และสามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในการนำไปประยุกต์ใช้มากมาย ซิงค์ออกไซด์มาใช้งานในรูปแบบของวัสดุนาโน ตัวอย่างการใช้นาโนซิงค์ออกไซด์ ได้แก่ การใช้งานในกลุ่มของอิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ ใช้ในการบำบัดสิ่งแวดล้อมเนื่องจากมีสมบัติในด้านการดูดซับแสง และสมบัติด้านการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง จึงทำให้ซิงค์ออกไซด์เป็นที่นิยมในภาคอุตสาหกรรม

## 2.7 ไคโตซาน (Chitosan) [18]

ไคโตซานจัดเป็นไบโอโพลิเมอร์ธรรมชาติอย่างหนึ่ง โดยมีองค์ประกอบของโตนโครงสร้างอยู่ในรูปของ D-glucosamine ซึ่งสามารถพบได้ในธรรมชาติ ไคโตซานเป็นองค์ประกอบอยู่ในเปลือกของสัตว์พวก กุ้ง ปู หรือแมลงซึ่งเป็นสารที่ได้จากธรรมชาติ ทำให้ไคโตซานเป็นวัสดุชีวภาพ (Biomaterials) ที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ จึงทำให้เป็นสารที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมนอกจากนี้ไคโตซานเป็นไบโอโพลิเมอร์ที่มีต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์อื่น ๆ จึงทำให้เป็นที่น่าสนใจเนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะ เช่น เป็นประจุบวก และมีความสามารถในการดูดซับเพื่อกำจัดมลพิษออกจากร่างน้ำเสีย เนื่องจากไคโตซานเกิดจากปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซีทิล (Deacetylation) ของไคตินด้วยด่างเข้มข้น ทำให้โครงสร้างของไคตินบางส่วนเปลี่ยนแปลงไป โดยมีการเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันที่มีหมู่อะเซตามิโด (-NHCOCH<sub>3</sub>) เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของหมู่อะมิโน (-NH<sub>2</sub>) ที่

ตำแหน่งคาร์บอนตัวที่ 2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไคโตซานเป็นโพลิเมอร์สายยาว มีประจุบวก เนื่องจากเกิดโปรตอนเนตหมู่เอมิโน (ในรูป-NH<sub>3</sub><sup>+</sup>) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน จึงสามารถทำปฏิกิริยากับ โปรตีน สีย้อมผ้า และไอออนของโลหะได้ มีการนำไคโตซานไปใช้ดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำทิ้ง และใช้ในการดูดซับ ไอออนของโลหะในการบำบัดน้ำทิ้ง ได้แก่ ตะกั่ว ทองแดง โปรท โครเมียม เป็นต้น



รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของไคโตซาน

## 2.8 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol; PVA) [19]

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่เป็นพิษและเป็นสารที่มีความชอบน้ำ (Hydrophilic polymer) จึงสามารถละลายน้ำได้และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและมีความเสถียรทางเคมี ทั้งยังมีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพทำให้ PVA ถูกนำมา ประยุกต์ใช้ในหลายๆ ด้าน อย่างในด้านอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ผลิตภัณฑ์ทางการค้า เช่น การใช้งาน PVA ในการเป็นสารลดแรงตึงผิว (Emulsifier) และสารที่ทำให้คงตัว (Stabilizer) สำหรับอนุภาคแขวนลอย เป็นต้น การนำ PVA กับ ไคโตซาน (CS) มาผสมกันเพื่อให้ได้ฟิล์มที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการเติม CS ช่วยลดความสามารถในการเปลี่ยนรูปของฟิล์มลงอย่างมีนัยสำคัญและเพิ่มความแข็งแรงของฟิล์ม นอกเหนือจากนี้ PVA ยังถูกนำมาใช้งานเกี่ยวกับทางการแพทย์และเภสัชกรรม เพราะจากความที่ไม่เป็นพิษและสมบัติทางด้านกายภาพรวมทั้งง่ายในการขึ้นรูป

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Xinghou และ คณะ [20] ได้ทำการทดลองเตรียมนาโนคอมโพสิตควอตซ์คอลลอยด์/โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ โดยใช้วิธีแบบ One-pot โดยนำ UV-vis spectrophotometry และ photoluminescence (PL) X-ray diffraction (XRD), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และ FT-IR spectrophotometry มาทำการอธิบายลักษณะทางสัณฐานวิทยาและโครงสร้างของนาโนคอมโพสิต จากภาพถ่ายกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ยืนยันว่า ควอตซ์คอลลอยด์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4 นาโนเมตรจะกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์ของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งการเปล่งแสงสีน้ำเงินของนาโนคอมโพสิตควอตซ์คอลลอยด์/โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ได้มากกว่า เมื่อเทียบกับนาโนคอมโพสิต ควอตซ์คอลลอยด์เพียงอย่างเดียว ซึ่งนาโนคอมโพสิตควอตซ์คอลลอยด์ที่มีเติม PVA ลงไปทำให้มีความเสถียรทางความร้อนของเพิ่มขึ้น และผลการวิจัยยืนยันว่าวัสดุนาโนคอมโพสิต PVA / ZnO QDs ที่มีการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ สามารถเตรียมได้ง่ายด้วยวิธีการ one-pot และมีประสิทธิภาพที่ดีสำหรับการใช้งานในด้านโฟโตอิเล็กทรอนิกส์

รวินิภา ศรีมูล [21] ได้ทำการทดลองการดูดซับสีย้อม ด้วยถ่านกัมมันต์เป็นการดูดซับสีย้อมด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรม โดยการใช้ถ่านกัมมันต์จะผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันโดยการเผาภายใต้ความดันและอุณหภูมิระหว่าง 200-1600 องศาเซลเซียส ควบคุมปริมาณแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้ได้ถ่านที่มีรูพรุนมาก เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในตัวอย่างของการนำวัสดุเหลือใช้ในการดูดซับ เช่น ถ่านลอย ใช้ดูดซับสีรีแอคทีฟและสีแอซิด โดยวิธีการเตรียมและปรับสภาพคือ ทำให้แห้งที่ 378 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 160 ไมโครเมตร แล้วเผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ผลการทดลองที่ได้คือ การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่ pH ต่ำ สีแอซิดมีค่า adsorption capacity สูงกว่าสีรีแอคทีฟ นอกจากนี้ผลที่มีต่อการดูดซับสีย้อมมีหลายปัจจัยดังนี้ สมบัติของตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับความสามารถในการดูดซับสีย้อมบนตัวดูดซับ, ความเข้มข้นของสารละลาย, ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ, ปริมาณของตัวดูดซับ, อุณหภูมิปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ล้วนมีผลต่อประสิทธิภาพและพฤติกรรมการดูดซับทั้งสิ้น การเลือกใช้วัสดุดูดซับควบคู่ไปกับการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับจะช่วยให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ดี

Sivaramakrishna และคณะ [22] ได้ทำการทดลองโดยเลือกเตรียมตัวดูดซับที่มีราคาถูกและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและหาได้ง่าย ซึ่งได้เลือกใช้เมล็ดพันธุ์ Jujuba ที่สามารถพบได้ในประเทศอินเดีย โดยตัวดูดซับที่เตรียมขึ้นได้ถูกนำไปใช้สำหรับการดูดซับสีย้อมประจุลบอย่างคองโกเรด โดยได้ศึกษาการดูดซับในกระบวนการแบบ batch เพื่อศึกษาผลกระทบของ เวลาสัมผัส, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมคองโกเรด, pH และอุณหภูมิ โดยจากผลการทดลองการกำจัดสีย้อมสูงสุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 และไอโซเทอมการดูดซับได้ศึกษา ไอโซเทอมฟรุนดริช, ไอโซเทอมทั่วไป, ไอโซเทอมแลงก์เมียร์ โดยระบบเป็นไปตามไอโซเทอมแลงก์เมียร์ และมีค่าความสามารถในการดูดซับอยู่ที่ 55.56 mg/g นอกจากนี้จลนพลศาสตร์อันดับสองถือว่ามีความเหมาะสมสำหรับการดูดซับในสีย้อมคองโกเรดมากที่สุด รวมทั้งในทางพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ระบบการดูดซับเป็นไปตามระบบดูดความร้อน และการดูดซับสีย้อมคองโกเรดสามารถเกิดขึ้นเองได้เนื่องจากผลของวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานกิบส์ ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าเมล็ดพันธุ์ Jujuba IJS (*Z. maruritian*) เป็นตัวดูดซับที่มีราคาถูกและเหมาะสำหรับการกำจัดสีย้อมคองโกเรด

### บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

##### 3.1.1 วัสดุ

- 3.1.1.1 ซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต (Zinc Nitrate Hexahydrate,  $Zn(NO_3)_2$ )
- 3.1.1.2 สีย้อมคองโกเรด (Congo red), เมทิลีนบลู (Methylene blue) และ แอซิดบลู (Acid blue)
- 3.1.1.3 ไดเอทานอลามีน (Diethanolamine,  $C_4H_{11}NO_2$ )
- 3.1.1.4 เอทานอล (Ethanol,  $C_2H_5OH$ )
- 3.1.1.5 โอเลอิก แอซิด (Oleic acid,  $C_{18}H_{34}O_2$ )
- 3.1.1.6 ไคโตซาน (chitosan,  $C_{56}H_{103}N_9O_{39}$ )
- 3.1.1.7 น้ำกลั่น (Distilled water)
- 3.1.1.8 ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ 35% w/w (Hydrogen Peroxide,  $H_2O_2$ )
- 3.1.1.9 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol,  $(C_2H_4O)_x$ )

##### 3.1.2 เครื่องมือ

- 3.1.2.1 ปีกเกอร์ (Beaker)
- 3.1.2.2 แท่งแม่เหล็กกวน (Magnetic bar)
- 3.1.2.3 เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน (Centrifuge)
- 3.1.2.4 ตู้อบ (oven)
- 3.1.2.5 เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)
- 3.1.2.6 เครื่องกวนสาร (Hotplate Stirrer)
- 3.1.2.7 ไซริงค์ฉีดยา (Syringe)
- 3.1.2.8 ขาตั้งข้อต่อ (stand and clamp)
- 3.1.2.9 แท่งแก้วคนสาร (Glass Rod)
- 3.1.2.10 กระบอกลม (cylinder)
- 3.1.2.11 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ XRD (X-ray Diffractometer )
- 3.1.2.12 ขวดรูปชมพู่ (conical flask)
- 3.1.2.13 ช้อนตักสาร (Spatula)
- 3.1.2.14 เครื่องชั่งสาร (Analytical balance)
- 3.1.2.15 อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (shaking water bath) รุ่น GFL 1083

### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

#### 3.2.1 การเตรียม PVA/Chitosan-ZnO QDs nanocomposites

3.2.1.1 เตรียม Diethanolamine (DEA) 0.33 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร

3.2.1.2 เตรียม  $Zn(NO_3)_2 \cdot H_2O$  0.774 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร

3.2.1.3 ผสมสารละลายซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต และสารละลายไดเอทานอลเอมีน (DEA) ที่เตรียมไว้ เติมกรดโอเลอิก (OA) 0.11 มิลลิลิตร ใส่ลงใน reactor และกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิให้ถึง 80 องศาเซลเซียส ด้วยอ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิ (Oil bath) ขณะที่กวนต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.2.1.4 ลดอุณหภูมิให้เหลือ 30 องศาเซลเซียส โดยตั้งทิ้งไว้

3.2.1.5 เติมน้ำละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ /โคโตซาน และกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.2.1.6 แยกน้ำออกโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็วรอบ 700rpm ระยะเวลา 5 นาที จนนาโนคอมพอสิตโคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์-ออกไซด์ของโลหะ ตกตะกอนออกมาจากสารละลาย

3.2.1.7 แขนานาโนคอมพอสิตโคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์-ออกไซด์ของโลหะ และล้างด้วยน้ำอุณหภูมิห้องเพื่อขจัดสารที่ไม่ทำปฏิกิริยาและสิ่งเจือปนอื่นๆออก จะได้เป็นนาโนคอมพอสิตโคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์-ออกไซด์ของโลหะ ที่มีสีขาวและมีน้ำเจือปนอยู่เล็กน้อย

3.2.1.8 นำ นาโนคอมพอสิตโคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์-ออกไซด์ของโลหะเข้าเตาอบ ทำให้แห้งที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

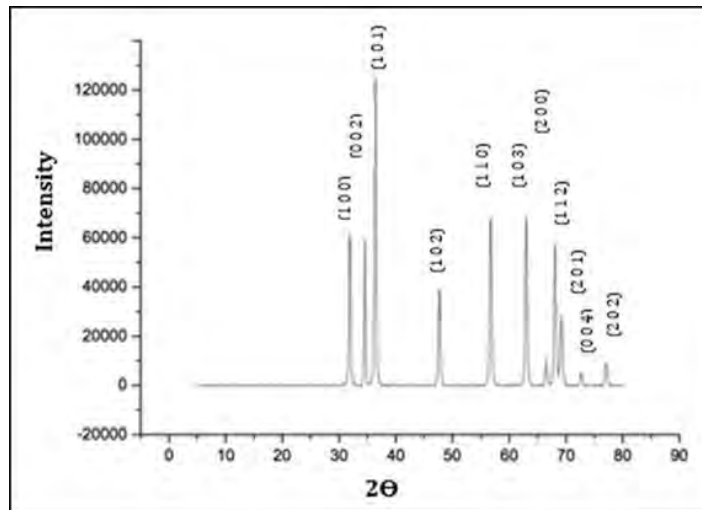
3.2.1.9 นำนาโนคอมพอสิตโคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์-ออกไซด์ของโลหะซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นออกจากเตาอบ และใช้โกร่งบดสารบดให้สารแตกละเอียดแต่ไม่เป็นผงจนเกินไป

3.2.1.10 จัดเก็บสารที่เตรียมได้ใส่ภาชนะสำหรับการทดลองต่อไป

#### 3.2.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของ PVA/Chitosan-ZnO QDs nanocomposites

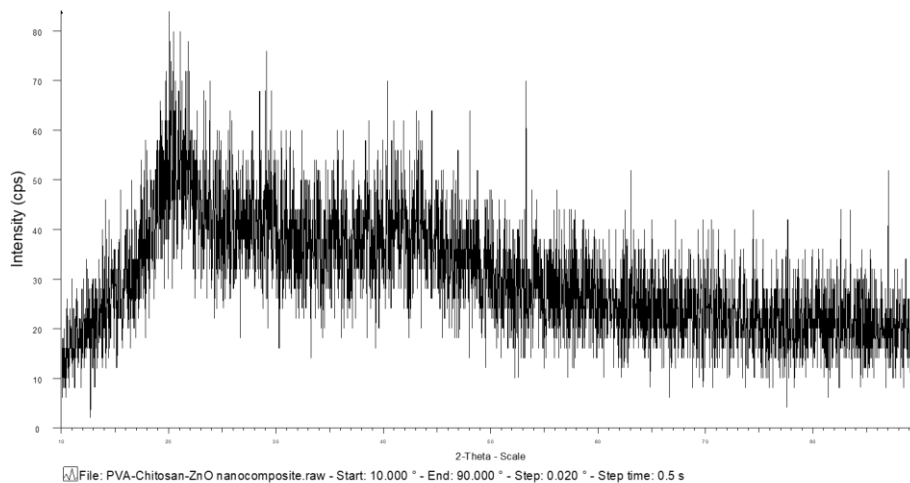
##### ที่ได้จากการเตรียม

โครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างถูกตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ X-Ray Diffractometer (XRD) โดยได้ทำการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่ คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

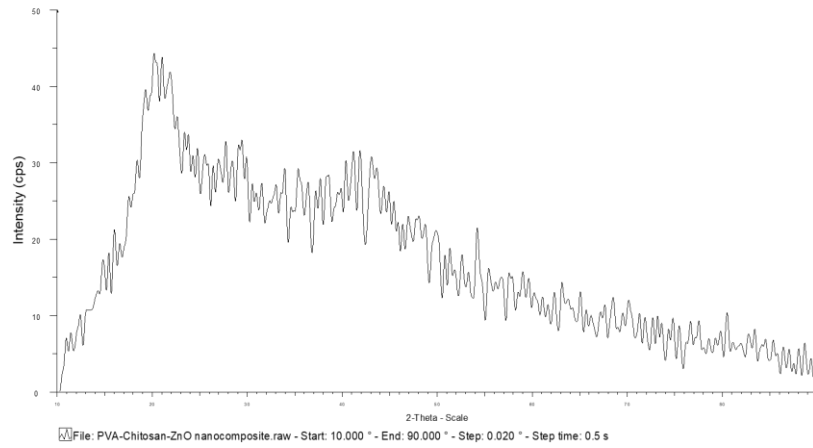


รูปที่ 3.1 กราฟรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ zinc oxide hexagonal phase  
ที่มา : [https://www.researchgate.net/figure/The-XRD-pattern-of-zinc-oxide-hexagonal-phase\\_fig1\\_326102694](https://www.researchgate.net/figure/The-XRD-pattern-of-zinc-oxide-hexagonal-phase_fig1_326102694)

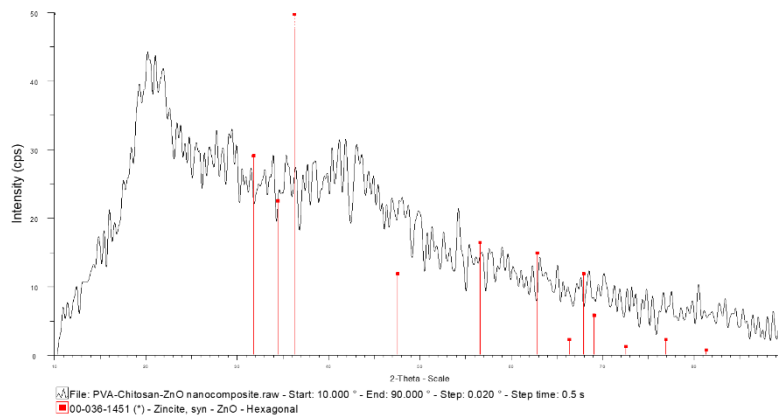
เมื่อนำมาเทียบกับสารตัวอย่างที่ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ X-Ray Diffractometer (XRD) ผลการวิเคราะห์เป็นดังนี้



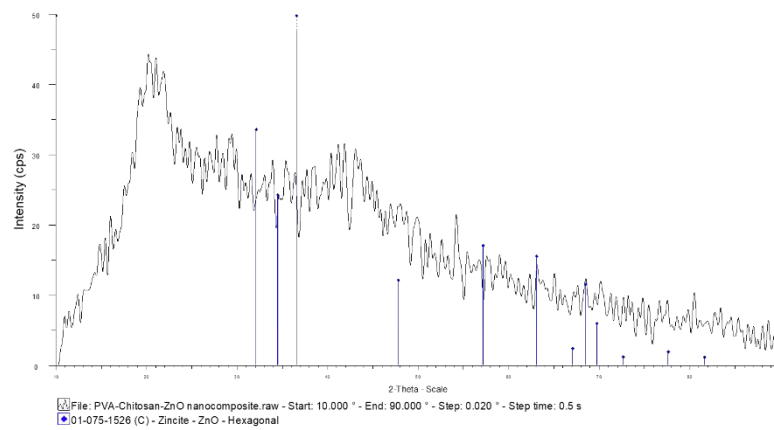
(ก)



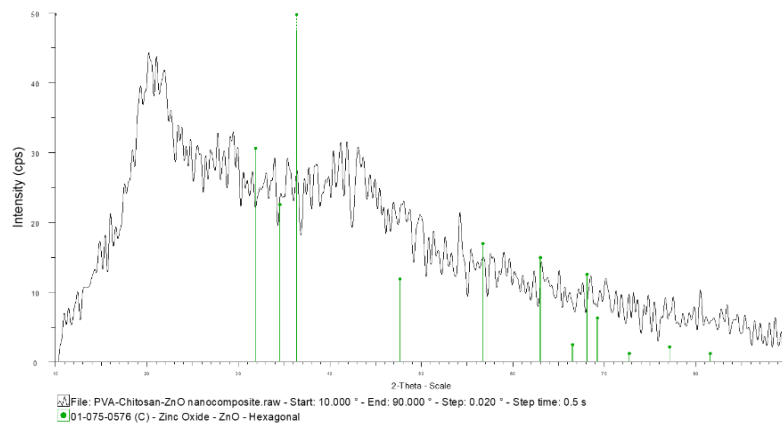
(၅)



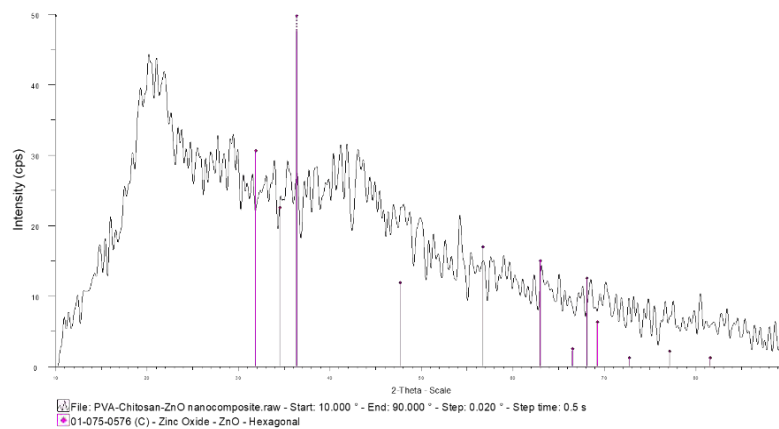
(၆)



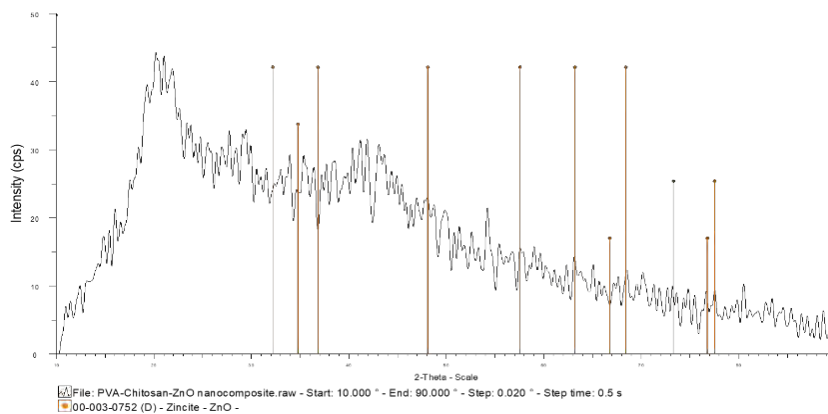
(၇)



(จ)

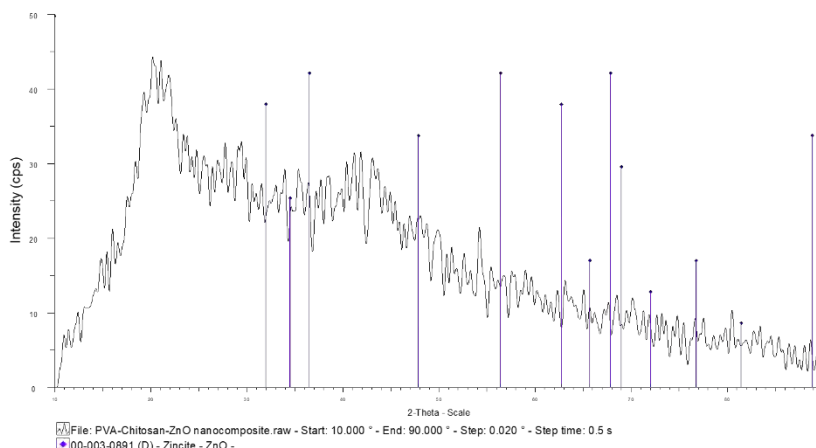


(ฉ)



(ง)





(ข)

รูปที่ 3.2 (ก), (ข), (ค), (ง), (จ), (ฉ), (ช), (ซ) แสดงลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารตัวอย่างซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมขึ้นมาสำหรับการทำวิจัย

จากผลรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการ one-pot พบว่าลักษณะของพีคการเลี้ยวเบนที่มุมเลี้ยวเบน ( $2\theta$ ) คือ 32.8 34.6 36.3 47.7 56.8 63.0 66.5 68.2 และ 69.3 ใกล้เคียงกับระนาบเลี้ยวเบน (100) (002) (101) (102) (110) (103) (200) (112) และ (201) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์มาตรฐานของซิงค์ออกไซด์ hexagonal phase แสดงว่าสารที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีการ one-pot มีซิงค์ออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักและมีโครงสร้างแบบ hexagonal crystal

### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

การกำจัดสีย้อมโดยกระบวนการดูดซับ (adsorption) โดยใช้ นาโนคอมพอสิตโคโตซาน/โพลีไวนิลแอลกอฮอล์-ออกไซด์ของโลหะ

#### 3.3.1 การศึกษาผลของเวลา (Contact time)

การทดลองการดูดซับทดลองเป็นแบบแบทช์ (batch) ในการศึกษาผลเวลา ทดลองโดยใช้สีย้อมความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ นาโนคอมพอสิตโคโตซาน/โพลีไวนิลแอลกอฮอล์-ออกไซด์ของโลหะ 0.03 กรัม ที่เตรียมไว้ลงในสารละลายและเข้าเครื่องอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (shaking water bath) อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เก็บตัวอย่าง 7-10 มิลลิลิตร โดยใช้กระดาษกรองแยกตัวดูดซับออก เก็บตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที 10 นาที 15 นาที 30 นาที และ 60 นาที นำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดซับด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (spectrophotometer)

### 3.3.2 การศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ในการศึกษาผลของ pH สีย้อม ทดลองโดยใช้สีย้อมความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า pH ของสีย้อมในการทดลองได้แก่ 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 และ 10.0 ปรับ pH โดยใช้สารละลาย HCl 0.1 โมลาร์ และ NaOH 0.1 โมลาร์ วัดค่า pH ด้วยกระดาษยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์ (Universal indicator) ใส่นาโนคอมพอสิตโคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์-ออกไซด์ของโลหะ ที่เตรียมไว้ 0.03 กรัม ลงในสารละลายและเข้าเครื่องอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เก็บตัวอย่าง 7-10 มิลลิลิตร โดยใช้กระดาษกรองแยกตัวดูดซับออก นำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดซับด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (spectrophotometer)

### 3.3.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิ (Temperature)

ในการศึกษาผลของอุณหภูมิ ทดลองโดยใช้สีย้อมความเข้มข้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร, 80 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองได้แก่ 35 องศาเซลเซียส, 40 องศาเซลเซียส และ 45 องศาเซลเซียส ใส่นาโนคอมพอสิตโคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์-ออกไซด์ของโลหะ ที่เตรียมไว้ 0.03 กรัม ลงในสารละลายและเข้าเครื่องอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เก็บตัวอย่าง 7-10 มิลลิลิตร โดยใช้กระดาษกรองแยกตัวดูดซับออก นำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดซับด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (spectrophotometer)

ทำการทดลองข้างต้นกับสีย้อม 3 ชนิด ได้แก่ แอซิดบลู (Acid blue) , เมทิลีนบลู (Methylene blue) และคองโกเรด (Congo red) และทดสอบที่สภาวะเต็ม/ไม่เต็ม ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% เพื่อเปรียบเทียบทั้ง 2 สภาวะ ซึ่งการที่เราทำการทดสอบที่สภาวะเต็มไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเพิ่มการดูดซับสีย้อมให้มากขึ้น เพราะการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical;  $\cdot\text{OH}$ ) ซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดซ์พวกสารอินทรีย์ได้ทำให้สีของสีย้อมลดลงได้ [23]

### 3.4 ข้อมูลผลการทดลอง

#### 3.4.1 สีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue)

##### 3.4.1.1 ผลของเวลา (Contact time) กับการดูดซับสีย้อม

ตารางที่ 3.4.1 (ก) แสดงผลของตัวแปรเวลากับค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance - A)		
	10 ppm	20 ppm	30 ppm
5	0.02	0.127	0.159
10	0.037	0.125	0.144
15	0.044	0.16	0.248
30	0.038	0.123	0.214
60	0.056	0.085	0.137

##### 3.4.1.2 ผลของอุณหภูมิ (Temperature) และความเข้มข้นสีย้อม (Concentration) กับการดูดซับสีย้อม

ตารางที่ 3.4.1 (ข) แสดงผลของตัวแปรอุณหภูมิและความเข้มข้นสีย้อมกับค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสีย้อมเมทิลีนบลู

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance - A)		
	60 ppm	80 ppm	100 ppm
35	0.367	0.363	0.335
40	0.201	0.33	0.442
45	0.251	0.404	0.619
45 (เติม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 0.2 มิลลิลิตร)	0.124	0.255	0.369

### 3.4.1.3 ผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH) กับการดูดซับสีย้อม

ตารางที่ 3.4.1 (ค) แสดงผลของตัวแปร pH กับการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

pH	ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance - A)
2	0.716
4	0.264
6	0.66
8	0.208
10	0.045

### 3.4.2 สีย้อมคองโกเรด (Congo red)

เนื่องจากปริมาณสารนาโนคอมพอสิตโคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์-ออกไซด์ของโลหะ มีจำกัดจึงทำการทดสอบตัวแปรเวลา ที่ความเข้มข้นสีย้อม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และเทียบระหว่าง 2 สภาวะ คือ เติม/ไม่เติม ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% w/w 0.2 มิลลิลิตร

#### 3.4.2.1 ผลของเวลา (Contact time) กับการดูดซับสีย้อม

ตารางที่ 3.4.2 (ก) แสดงผลของตัวแปรเวลากับค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสีย้อมคองโกเรดที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะเติม/ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% w/w 0.2 มิลลิลิตร

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance - A)	
	เติม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	ไม่เติม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
5	0.414	0.94
10	0.256	0.864
15	0.017	0.755
30	0.208	0.824
60	0.044	0.741

3.4.2.2 ผลของอุณหภูมิ (Temperature) และความเข้มข้นของสีย้อม (Concentration) กับการดูดซับสีย้อม

ตารางที่ 3.4.2 (ข) แสดงผลของตัวแปรอุณหภูมิและความเข้มข้นสีย้อม กับค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสีย้อมคองโกเรด ที่สภาวะเต็ม/ไม่เต็มไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% w/w 0.2 มิลลิลิตร

	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance - A)		
		60 ppm	80 ppm	100 ppm
เต็ม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	35	0.551	0.203*	0.221*
	40	0.513	0.789	0.294*
	45	0.577	0.257*	0.836
ไม่เต็ม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	35	0.302*	0.276*	0.411*
	40	0.237*	0.401*	0.392*
	45	0.257*	0.301*	0.391*

หมายเหตุ : \*Df (Dissolved fraction) = 5

3.4.2.3 ผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH) กับการดูดซับสีย้อม

ตารางที่ 3.4.2 (ค) แสดงผลของตัวแปร pH กับค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสีย้อมคองโกเรด ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

pH	ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance - A)
2	0.394*
4	0.182
6	0.014
8	0.285*
10	0.9

### 3.4.3 สีย้อมแอซิดบลู (Acid blue)

#### 3.4.3.1 ผลของเวลา (Contact time) กับการดูดซับสีย้อม

ตารางที่ 3.4.3 (ก) แสดงผลของตัวแปรเวลากับค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสีย้อมแอซิดบลูที่ความเข้มข้น 37.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะเต็ม/ไม่เต็มไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% w/w 0.2 มิลลิลิตร

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance - A)	
	เต็ม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	ไม่เต็ม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
5	0.414	0.94
10	0.256	0.864
15	0.017	0.755
30	0.208	0.824
60	0.044	0.741

#### 3.4.3.2 ผลของอุณหภูมิ (Temperature) และความเข้มข้นสีย้อม (Concentration) กับการดูดซับ สีย้อม

ตารางที่ 3.4.3 (ข) แสดงผลของตัวแปรอุณหภูมิและความเข้มข้นสีย้อม กับค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสีย้อมแอซิดบลู ที่สภาวะเต็ม/ไม่เต็มไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% w/w 0.2 มิลลิลิตร

	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance - A)		
		60 ppm	80 ppm	100 ppm
เต็ม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	35	0.551	0.203*	0.221*
	40	0.513	0.789	0.294*
	45	0.577	0.257*	0.836
ไม่เต็ม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	35	0.302*	0.276*	0.411*
	40	0.237*	0.401*	0.392*
	45	0.257*	0.301*	0.391*

หมายเหตุ : \*Df (Dissolved fraction) = 5

### 3.4.3.2 ผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH) กับการดูดซับสีย้อม

ตารางที่ 3.4.3 (ค) แสดงผลของตัวแปร pH กับการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสีย้อมแอซิดบลู ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

pH	ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance - A)
2	0.028
4	0.083
6	0.802
8	0.203*
10	0.965

### 3.4 การคำนวณความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุล

$$qe = \left( \frac{Ci - Ce}{w} \right) \times V \quad (3.1)$$

เมื่อ  $q_e$  = ความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$C_i$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_e$  = ความเข้มข้นสมดุลของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$w$  = ปริมาณของตัวดูดซับ (กรัม)

$V$  = ปริมาณของสีย้อม (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดลองของสีย้อมเมทิลีนบลู

ในการแปรผลข้อมูลการทดลองเพื่อหาค่าการดูดซับสีย้อมจากค่าการดูดกลืนแสง ทำได้โดยเทียบกับกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (Calibration curve) ของสีย้อมแต่ละชนิด ได้ดังนี้

สมการความเข้มข้นมาตรฐานของสีย้อมเมทิลีนบลู

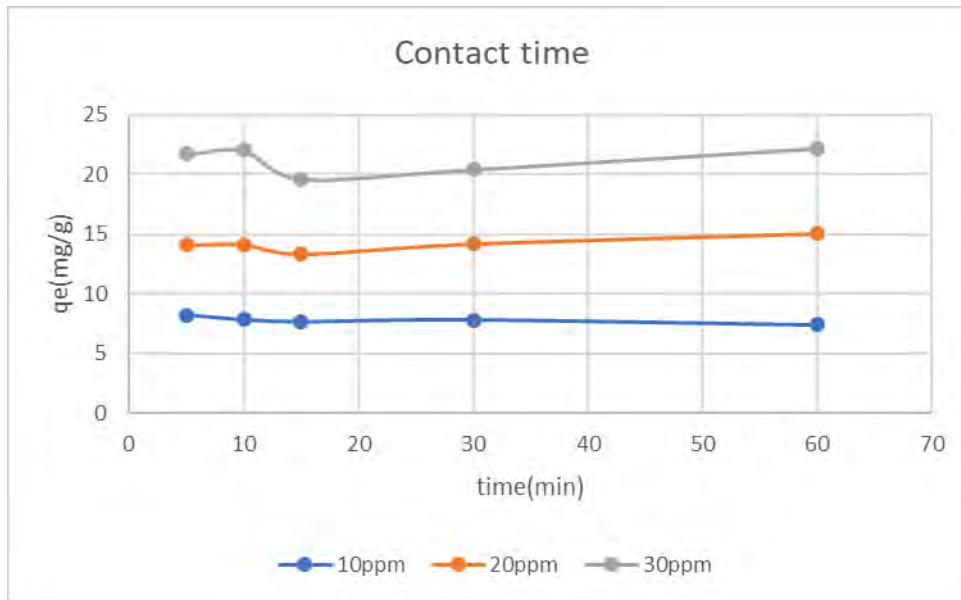
$$y = 0.036x + 0.016$$

##### 4.1.1 ผลของเวลา (Contact time) กับการดูดซับสีย้อม

ตารางที่ 4.1 แสดงผลของตัวแปรเวลากับค่าขีดความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

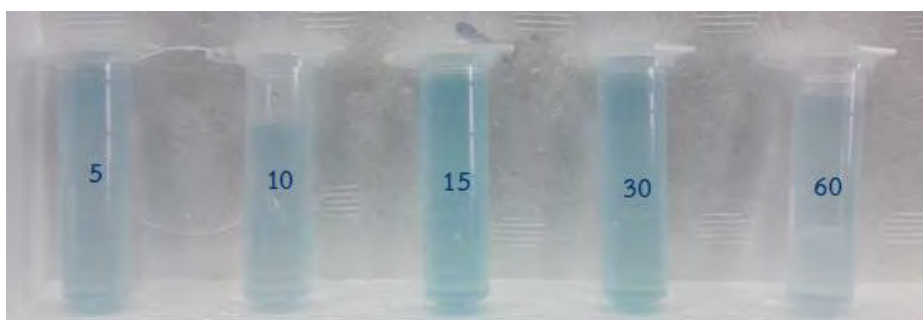
เวลา (นาที)	ค่าขีดความสามารถในการดูดซับ ( $q_e$ )		
	10 ppm	20 ppm	30 ppm
5	8.24	14.10	21.69
10	7.85	14.14	22.04
15	7.68	13.33	19.63
30	7.82	14.19	20.42
60	7.41	15.07	22.20





**รูปที่ 4.1** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูกับค่าขีดความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นสีย้อม 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

สำหรับผลการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยนาโนคอมพอสิตโคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์-ออกไซด์ของโลหะ ที่เวลา 5, 10, 15, 30, 60 นาที พบว่าเมื่อเราทำการเพิ่มเวลาในการดูดซับ ในช่วงแรกของการดูดซับจะเกิดขึ้นเร็วเนื่องจาก concentration gradient ในสารละลายกับที่บริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับที่ช่วงแรกยังมีพื้นที่ว่างในการดูดซับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมเกิดการดูดซับได้ดีที่สุดที่ 15 นาที และจะเริ่มเข้าสู่สมดุล เนื่องจากพื้นที่ว่างของตัวดูดซับได้ดูดซับสีย้อมไว้เต็มที่สุดแล้ว

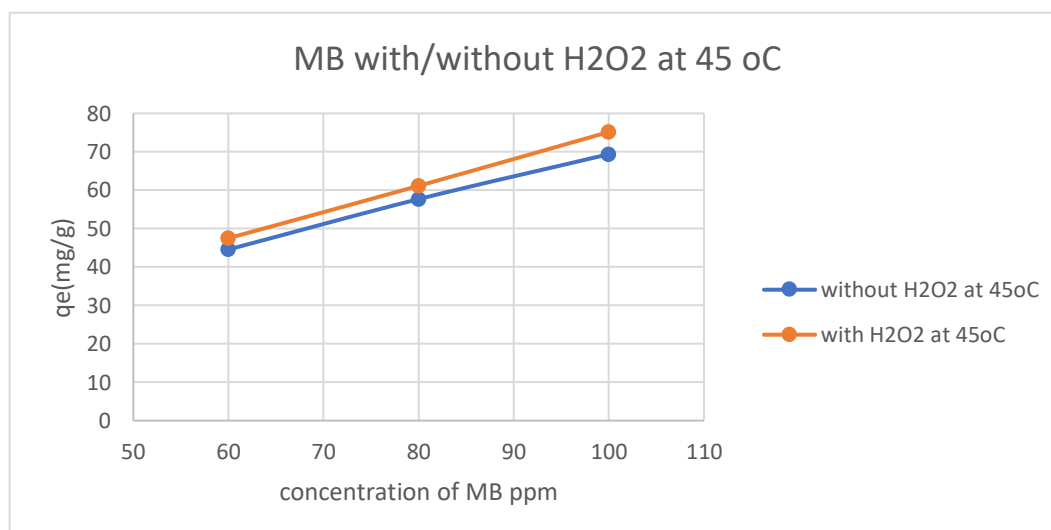


**รูปที่ 4.2** แสดงผลการทดลองในตัวแปรเวลา (นาที) ในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

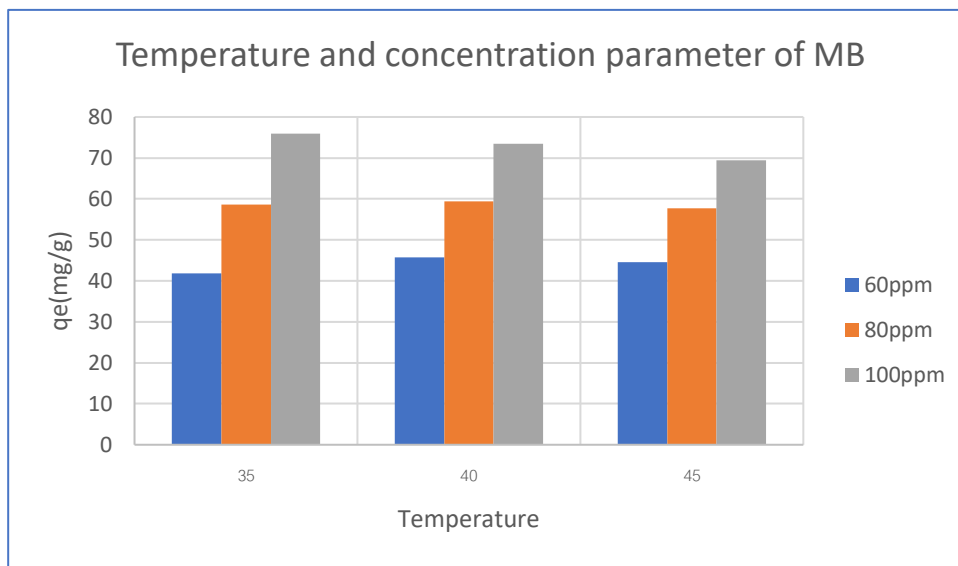
#### 4.1.2 ผลของอุณหภูมิ (Temperature) และความเข้มข้นสีย้อม (Concentration)กับการดูดซับสีย้อม

ตารางที่ 4.2 แสดงผลของตัวแปรอุณหภูมิและความเข้มข้นสีย้อม กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับสีย้อม เมทิลีนบลู

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าขีดความสามารถในการดูดซับ ( $q_e$ )		
	60 ppm	80 ppm	100 ppm
35	41.88	58.63	75.95
40	45.72	59.40	73.47
45	44.56	57.68	69.38
45 (เติม $H_2O_2$ 0.2 มิลลิลิตร)	47.5	61.13	75.16



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูที่ 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรในสถานะเติม/ไม่เติม  $H_2O_2$  กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส



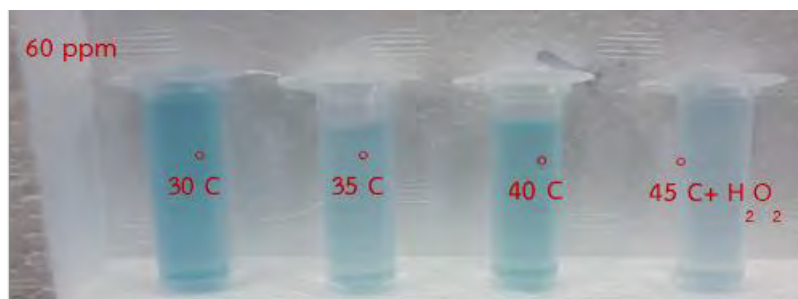
**รูปที่ 4.4** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูที่ 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับ

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิมีผลต่อการดูดซับในสีย้อมเมทิลีนบลู ซึ่งจากการคำนวณเพิ่มเติมในอุณหพลศาสตร์พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับในสีย้อมเมทิลีนบลูมีค่าเท่ากับ 12 kJ/mol โดยการที่ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีมีค่าเป็นบวกบ่งบอกว่าระบบการดูดซับเป็นกระบวนการดูดความร้อน จากแนวโน้มของผลการทดลองที่มีการเพิ่มอุณหภูมิ 35 40 45 องศาเซลเซียสพบว่ามีการดูดซับเพิ่มขึ้น เป็นไปตามหลักของกระบวนการดูดซับที่เป็นแบบดูดความร้อนที่ว่า การเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้สมดุลในระบบเปลี่ยนแปลงไป จึงทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ค่าพลังงานจลน์จะเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิของตัวดูดซับสามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้นจึงส่งผลให้อัตราการการแพร่ของตัวถูกดูดซับเข้าสู่ตัวถูกดูดซับไปยังบริเวณตัวดูดซับได้เร็วยิ่งขึ้น

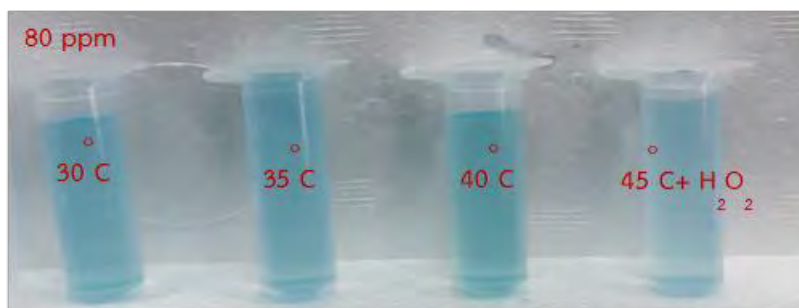
ในส่วนของความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูพบว่า เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม ทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นทำให้การเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวล ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นสารบนตัวดูดซับกับสารละลาย (concentration gradient) ส่งผลให้มีการดูดซับที่มากขึ้นตามไปด้วย โดยความสามารถการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่มากที่สุด คือ ค่าความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

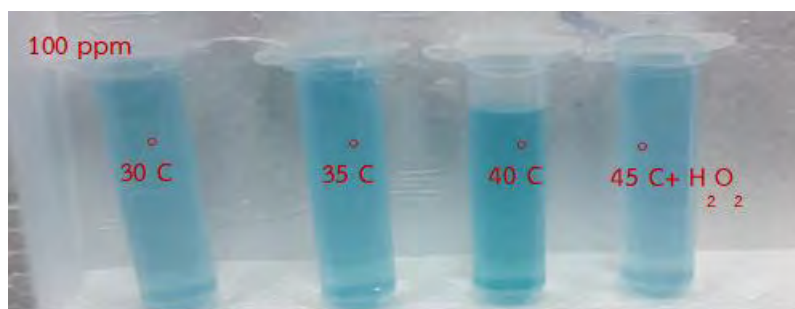
ตัวดูดซับ	$\Delta H^\circ$ (kJ/mol)	$\Delta S^\circ$ (kJ/mol. K)	$\Delta G^\circ$ (kJ/mol)		
			35	40	45
นาโนคอมพอสิตโคโตซาน/พอลิไวนิล แอลกอฮอล์-ออกไซด์ของโลหะ	12	0.14	-3.73	-5.69	-5.08



(ก)



(ข)



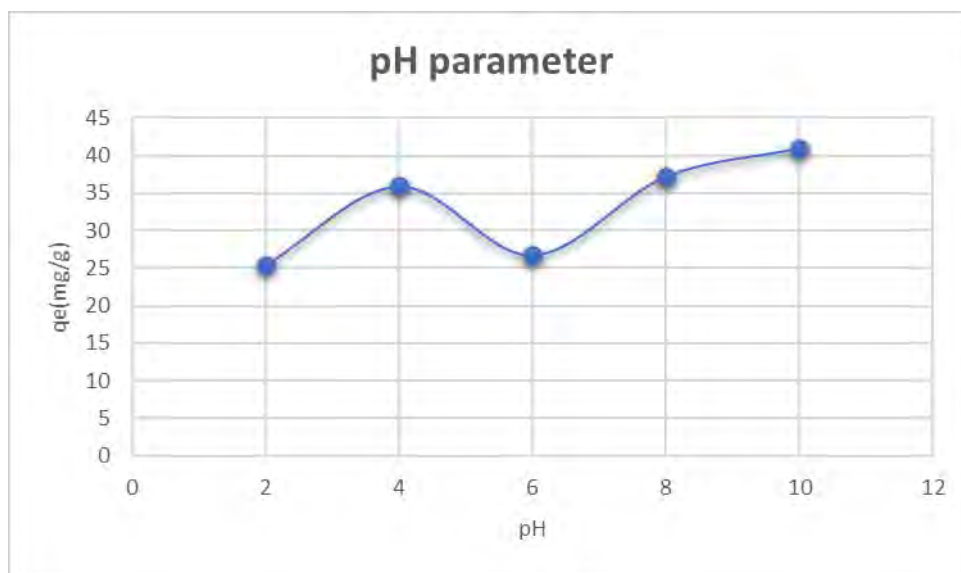
(ค)

รูปที่ 4.5 แสดงผลการทดลองตัวแปรอุณหภูมิและความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูที่ 35, 40, 45°C ที่ความเข้มข้น (ก) 60, (ข) 80 และ (ค) 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

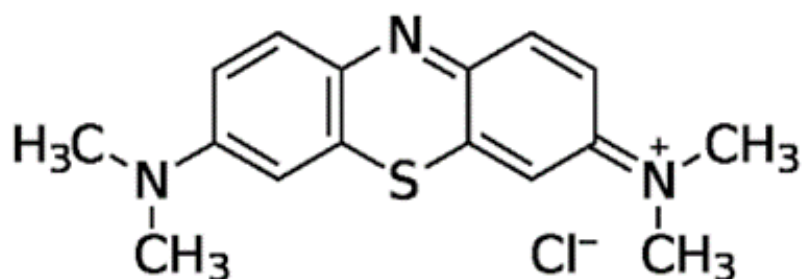
#### 4.1.3 ผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH) กับการดูดซับสีย้อม

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของตัวแปร pH กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

pH	ค่าขีดความสามารถในการดูดซับ ( $q_e$ )
2	25.46
4	35.92
6	26.76
8	37.22
10	41.00

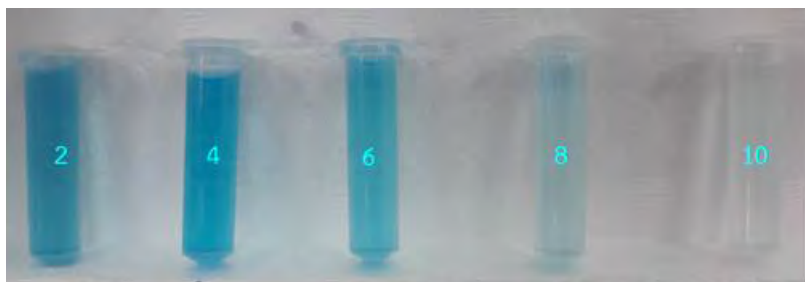


รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมเมทิลีนบลู

จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นผลของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่ขึ้นกับประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับและประจุของสีย้อม และจากรูปที่ 4.7 ประจุของสีย้อมเมทิลีนบลูเป็นประจุบวก ในทางทฤษฎีนั้นสีย้อมที่มีประจุเป็นบวกจะถูกดูดซับได้ดีที่สภาวะที่มีค่าพีเอชสูง ซึ่งประจุบนผิวของตัวดูดซับจะขึ้นกับความเป็นกรดต่างของสารละลายในขณะนั้น พบว่าการดูดซับในสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูจะถูกดูดซับได้ดีที่ พีเอชเท่ากับ 10 อธิบายได้ว่าสภาวะที่สารละลายสีย้อมมีค่าพีเอชที่สูงขึ้นทำให้ผิวประจุรวมของตัวดูดซับเป็นลบเนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออน (OH<sup>-</sup>) ทำให้สามารถดูดซับสีย้อมที่เป็นประจุบวกเช่นสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดี



รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดลองตัวแปร pH ของสีย้อมเมทิลีนบลู

#### 4.2 ผลการทดลองของสีย้อมคองโกเรด

ในการแปรผลข้อมูลการทดลองเพื่อหาค่าการดูดซับสีย้อมจากค่าการดูดกลืนแสง ทำได้โดยเทียบกับกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (Calibration curve) ของสีย้อมแต่ละชนิด ได้ดังนี้

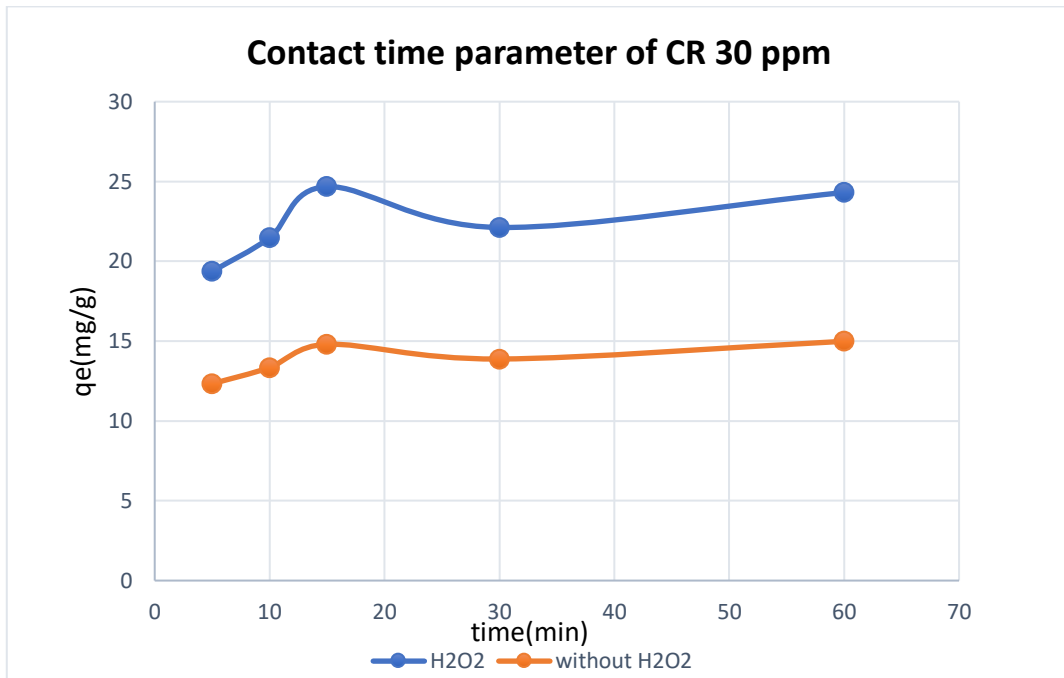
สมการความเข้มข้นมาตรฐานของสีย้อมคองโกเรด

$$y = 0.0623x - 0.0073$$

##### 4.2.1 ผลของเวลา (Contact time) กับการดูดซับสีย้อม

ตารางที่ 4.5 แสดงผลของตัวแปรเวลากับค่าขีดความสามารถในการดูดซับสีย้อมคองโกเรดที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะเติม/ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% w/w 0.2 มิลลิลิตร

เวลา (นาที)	ค่าขีดความสามารถในการดูดซับ ( $q_e$ )	
	เติม $H_2O_2$	ไม่เติม $H_2O_2$
5	19.36	12.33
10	21.48	13.34
15	24.67	14.80
30	22.12	13.88
60	24.31	15.00



**รูปที่ 4.9** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมคองโกเรดกับค่าขีดความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นสีย้อม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสถานะเต็ม/ไม่เต็มไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

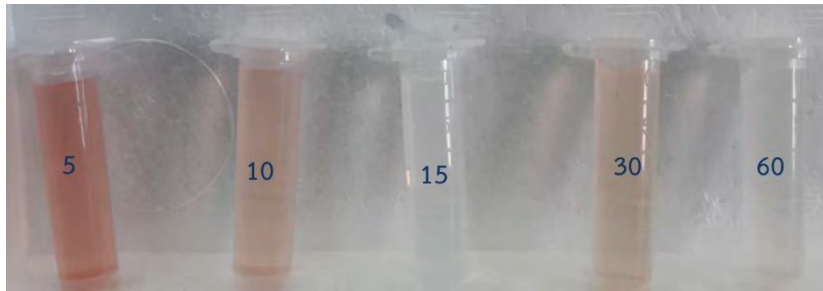
จากการทดลองผลของระยะเวลาในการดูดซับ พบว่าตัวดูดซับนาโนคอมพอสิตโคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์-ออกไซด์ของโลหะให้ผลความสามารถในการดูดซับสีย้อมคองโกเรดได้ดีที่สุดที่เวลา 15 นาที ซึ่งตามหลักการที่เพิ่มเวลาในการดูดซับเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มโอกาสของสารละลายสีย้อมในการสัมผัสกับพื้นผิวของตัวดูดซับได้ ดังนั้นการเพิ่มเวลามากขึ้นค่าการดูดซับย่อมต้องเพิ่มตาม จากผลการทดลองที่เวลาที่ 30 นาทีค่าความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลงตามรูปที่ 4.5 อาจเป็นเพราะความคาดเคลื่อนจากการทดลองของผู้วิจัย ซึ่งทำให้ผลไม่เป็นไปตามแนวโน้มของทฤษฎีเท่าที่ควร

เปรียบเทียบระหว่างสถานะที่เต็มและไม่เต็มไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าสถานะที่เต็มไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีการดูดซับสีย้อมที่ดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical;  $\bullet\text{OH}$ ) ซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดซ์พวกสารอินทรีย์ได้ทำให้สีของสีย้อมลดลงได้



(ก)





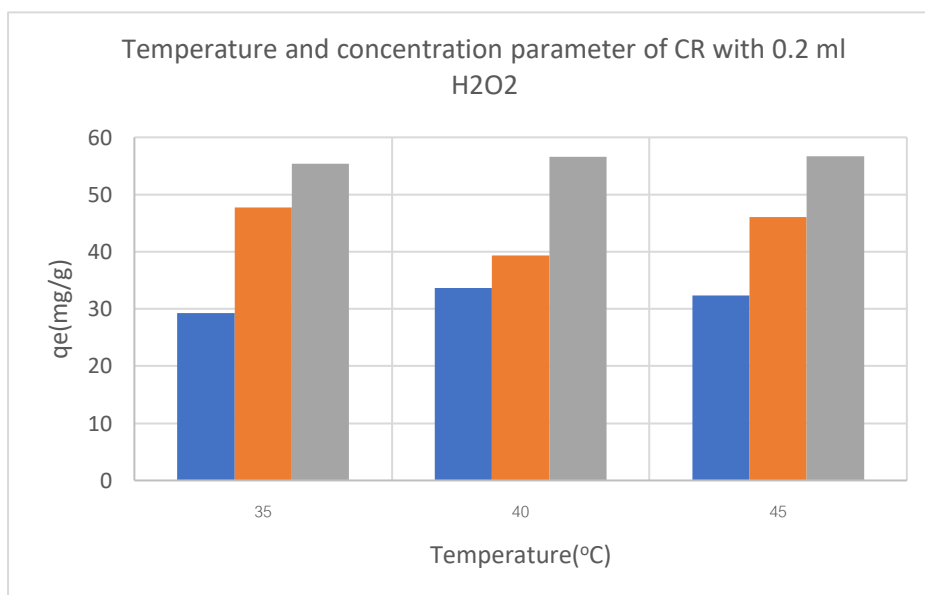
(ข)

รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดลองในตัวแปรเวลา (นาที) ในการดูดซับสีของคอนกรีตในสถานะไม่เติม (ก) /เติม (ข) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

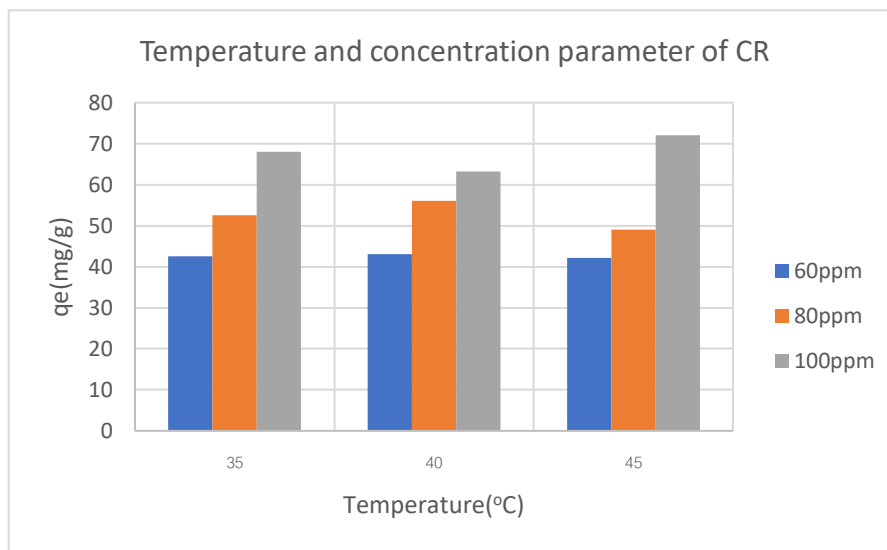
#### 4.2.2 ผลของอุณหภูมิ (Temperature) และความเข้มข้นสี (Concentration)กับการดูดซับสี

ตารางที่ 4.6 แสดงผลของตัวแปรอุณหภูมิและความเข้มข้นสี กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับสีของคอนกรีต ที่สถานะเติม/ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% w/w 0.2 มิลลิลิตร

	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าขีดความสามารถในการดูดซับ ( $q_e$ )		
		60 ppm	80 ppm	100 ppm
เติม $H_2O_2$	35	42.53	52.60	68.06
	40	43.04	56.02	63.18
	45	42.18	49.00	72.05
ไม่เติม $H_2O_2$	35	29.31	47.72	55.36
	40	33.66	39.36	56.63
	45	32.32	46.05	56.69



(ก)



(ข)

**รูปที่ 4.11** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นสีย้อมคองโกเรดที่ 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับในสภาวะเต็ม (ก) /ไม่เต็ม (ข) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระบวนการดูดซับสำหรับการดูดซับของสีย้อมคองโกเรดนั้น ค่าอุณหภูมิศาสตร์ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของระบบจากการคำนวณนั้น ค่าที่ได้มีค่าเป็นบวกซึ่งจัดเป็นกระบวนการดูดความร้อน จากรูป 4.11 ผลที่ได้มีแนวโน้มไปตามทฤษฎีที่ว่า การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ค่าการดูดซับสีย้อมมีมากขึ้น แต่จากการที่ผู้ทดลองยังไม่ได้ทำการทดลองซ้ำ ทำให้ผลที่ได้ยังคงมีความคลาดเคลื่อน

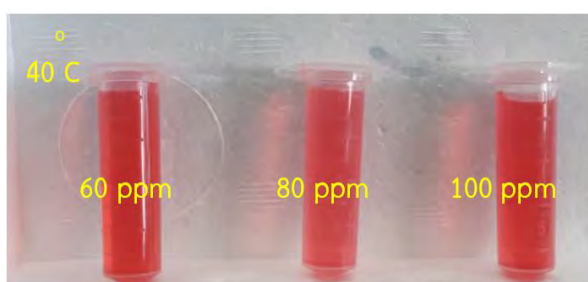
ในขณะที่ผลของความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมคองโกเรดสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมคองโกเรดมีค่าสูงขึ้นตาม เนื่องจากเกิดความแตกต่างระหว่างสารละลายและบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับทำให้เกิดแรงกระทำและการชนกันของโมเลกุล (Driving force) มากขึ้น โดยความสามารถการดูดซับสีย้อมคองโกเรดที่มากที่สุด คือค่าความเข้มข้นสารละลายสีย้อมคองโกเรด 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

**ตารางที่ 4.7** แสดงค่าอุณหภูมิศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมคองโกเรด

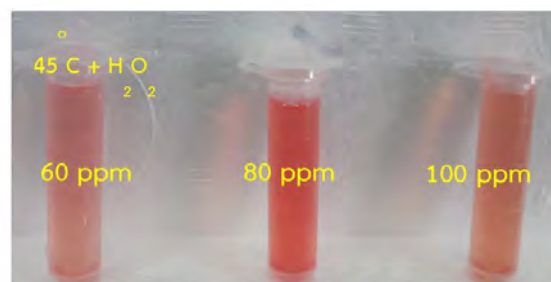
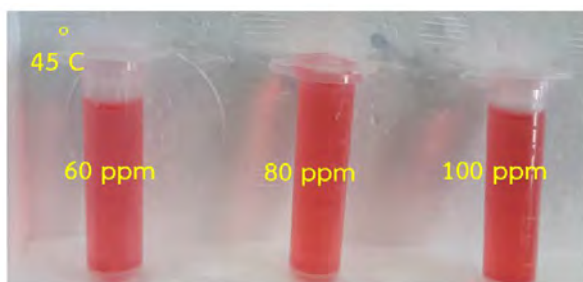
ตัวดูดซับ	$\Delta H^\circ$ (kJ/mol)	$\Delta S^\circ$ (kJ/mol.K)	$\Delta G^\circ$ (kJ/mol)		
			35	40	45
นาโนคอมพอสิตโคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์-ออกไซด์ของโลหะ	6.64	0.07	-3.02	-4.47	-4.03



(ก)



(ข)



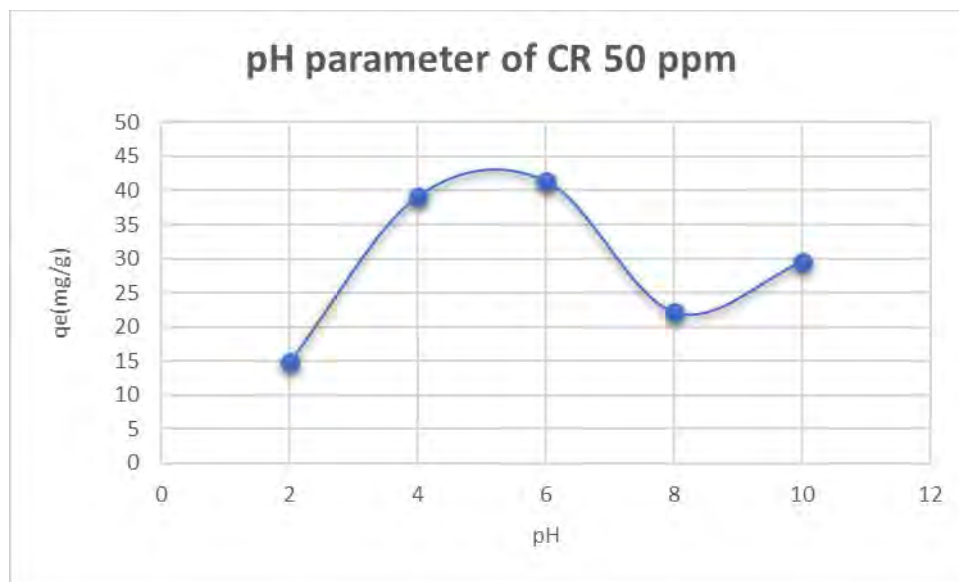
(ค)

รูปที่ 4.12 แสดงผลการทดลองตัวแปรอุณหภูมิและความเข้มข้นสีย้อมคองโกเรดที่(ก) 35, (ข) 40, (ค) 45°C ที่ความเข้มข้น 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

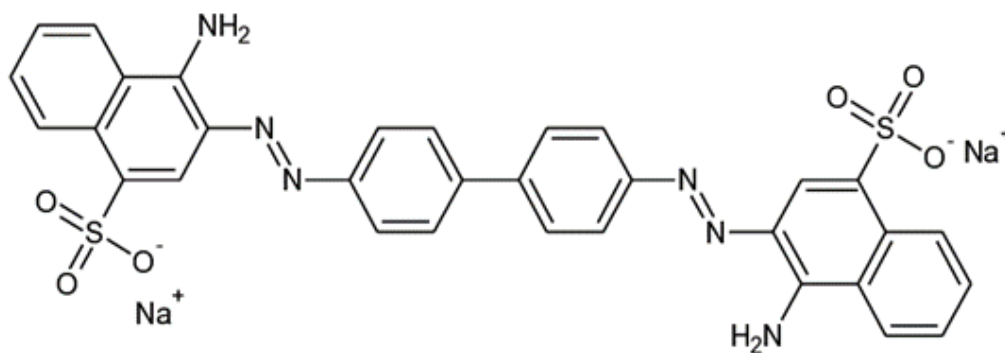
#### 4.2.3 ผลของความเป็นกรด-ด่าง pH กับการดูดซับสีย้อม

ตารางที่ 4.8 แสดงผลของตัวแปร pH กับการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสีย้อมคองโกเรด ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

pH	ค่าขีดความสามารถในการดูดซับ ( $q_e$ )
2	14.83
4	39.13
6	41.38
8	22.12
10	29.53



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับการขีดความสามารถในการดูดซับสีย้อมคองโกเรดความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมคองโกเรด

สำหรับผลการทดลองค่าความเป็นกรด-ด่างของสีย้อมคองโกเรดนั้น พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่ดีที่สุดอยู่ที่พีเอชเท่ากับ 6 ที่ อธิบายได้จากรูปที่ 4.14 สีย้อมคองโกเรดมีประจุเป็นลบจึงทำให้สามารถถูกดูดซับได้ดีในสถานะที่ค่าพีเอชต่ำ เมื่อในสารละลายมีความเป็นกรดจะมีไอออนบวกของไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) มาอยู่ในบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับ ทำให้สีย้อมประจุลบเช่นสีย้อมคองโกเรดสามารถถูกดูดซับได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับสถานะที่เป็นเบส



รูปที่ 4.15 แสดงผลการทดลองตัวแปร pH ของสีย้อมคองโกเรด

#### 4.3 ผลการทดลองของสีย้อมแอซิดบลู (Acid blue)

ในการแปรผลข้อมูลการทดลองเพื่อหาค่าการดูดซับสีย้อมจากค่าการดูดกลืนแสง ทำได้โดยเทียบกับกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (Calibration curve) ของสีย้อมแต่ละชนิด ได้ดังนี้

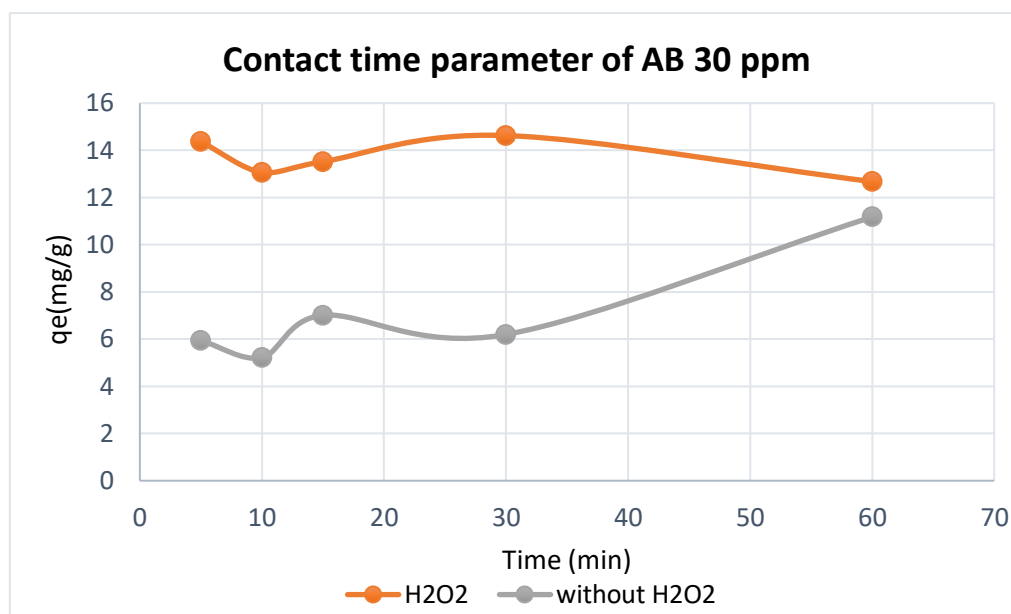
สมการความเข้มข้นมาตรฐานของสีย้อมแอซิดบลู

$$y = 0.0256x - 0.003$$

#### 4.3.1 ผลของเวลา (Contact time) กับการดูดซับสีย้อม

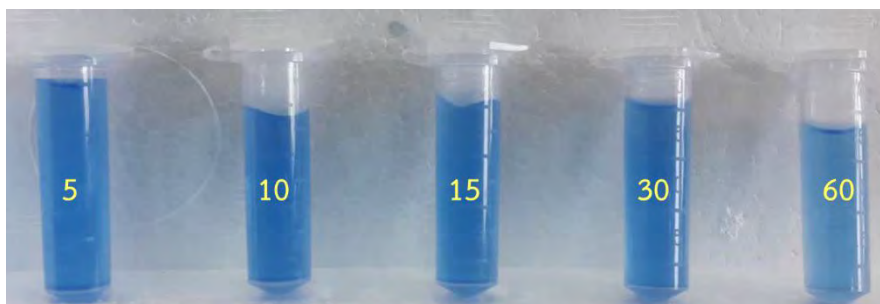
ตารางที่ 4.9 แสดงผลของตัวแปรเวลากับค่าขีดความสามารถในการดูดซับสีย้อมแอซิดบลู ที่ความเข้มข้น 37.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะเติม/ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% w/w 0.2 มิลลิลิตร

เวลา (นาที)	ค่าขีดความสามารถในการดูดซับ ( $q_e$ )	
	เติม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	ไม่เติม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
5	14.37	5.94
10	13.07	5.22
15	13.52	7.01
30	14.63	6.20
60	12.68	11.18

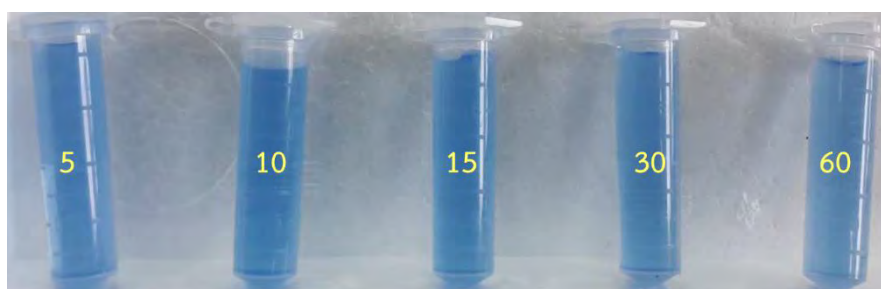


รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมแอซิดบลูกับค่าขีดความสามารถในการดูดซับ ที่ความเข้มข้นสีย้อม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสภาวะเติม/ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากผลการทดลองจะพบว่าที่สภาวะที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่มากกว่า สภาวะที่ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แต่แนวโน้มของผลที่ได้ค่อนข้างมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นอย่างมาก ทำให้ไม่สามารถระบุได้ว่าที่เวลาใดที่ค่าการดูดซับเริ่มเข้าสู่สมดุล โดยผู้ทดลองคาดว่าอาจเกิดจากผลของแสงในห้องทดลองระหว่างทำการทดลอง และระยะเวลาในการนำไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ทั้งระยะเวลาไว้นานหลายชั่วโมงทำให้ผลที่ได้คลาดเคลื่อนไป หรืออาจเกิดจากความไม่เหมาะสมกันของตัวดูดซับและสีย้อมแอซิดบลู



(ก)



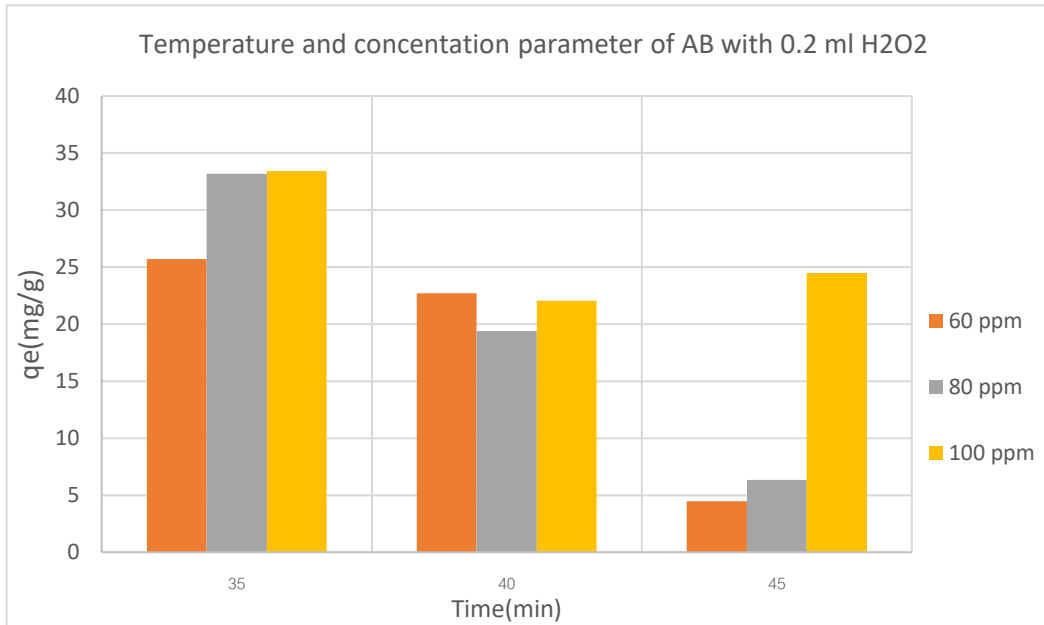
(ข)

รูปที่ 4.17 แสดงผลการทดลองในตัวแปรเวลา (นาที) ในการดูดซับสีย้อมแอสิตบลูในสภาวะ  
ไม่เต็ม (ก) /เต็ม (ข) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

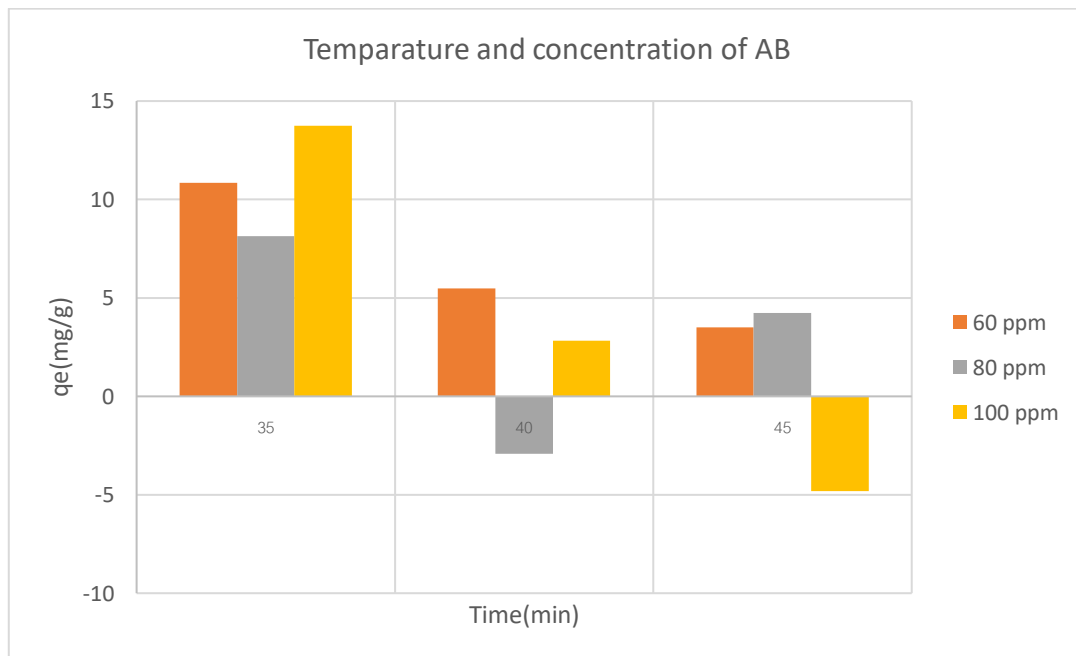
#### 4.3.2 ผลของอุณหภูมิ (Temperature) และความเข้มข้นสีย้อม (Concentration) กับการดูดซับสีย้อม

ตารางที่ 4.10 แสดงผลของตัวแปรอุณหภูมิและความเข้มข้นสีย้อม กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับสีย้อม  
แอสิตบลู ที่สภาวะเต็ม/ไม่เต็มไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% w/w 0.2 มิลลิลิตร

	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าขีดความสามารถในการดูดซับ ( $q_e$ )		
		60 ppm	80 ppm	100 ppm
เต็ม $H_2O_2$	35	25.70	33.20	33.43
	40	22.73	19.37	22.04
	45	4.49	6.35	24.48
ไม่เต็ม $H_2O_2$	35	10.84	8.14	13.74
	40	5.47	-2.93	2.83
	45	3.52	4.23	-4.82



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นสีย้อมแอซิดบลูที่ 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับ ในสถานะเต็ม (ค) /ไม่เต็ม (ง) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

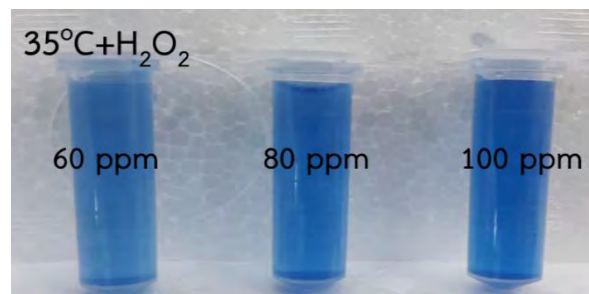
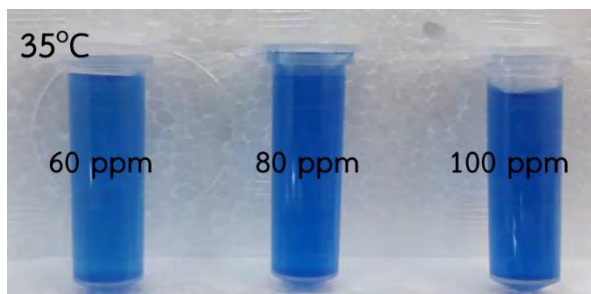


จากการทดลองอุณหภูมิมีผลต่อการในการดูดซับเราพบว่าในผลของการคำนวณทางอุณหพลศาสตร์ของสีย้อมแอซิดบลู ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของระบบเป็นลบซึ่งจัดเป็นกระบวนการคายความร้อนซึ่งจากรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้การดูดซับสีย้อมแอซิดบลูลดลง ซึ่งอาจเป็นเพราะเมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การละลายของสีย้อมดีขึ้นทำให้แรงดึงดูดระหว่างสีย้อมแอซิดบลูกับตัวดูดซับลดลง ถึงแม้แนวโน้มจะเป็นไปตามทฤษฎีแต่ผลการทดลองยังมีการผิดพลาดอยู่มาก

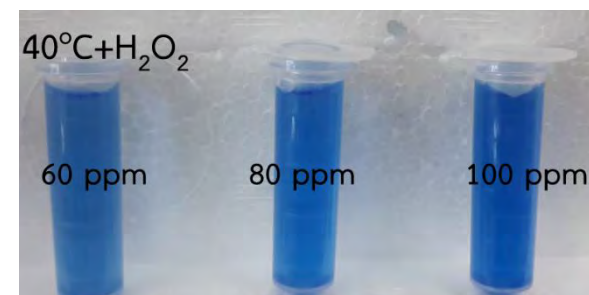
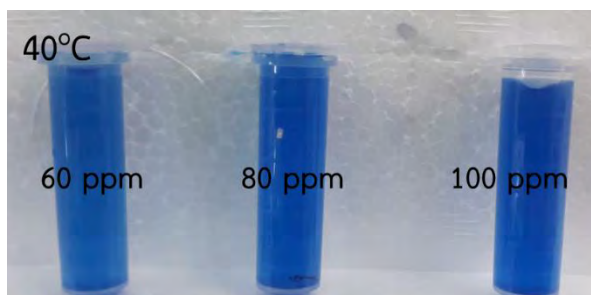
ในส่วนผลของความเข้มข้นของสีย้อมนั้นหากเรามองผลในแต่ละอุณหภูมิจะเห็นว่าที่สภาวะที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมแอซิดบลูแนวโน้มค่อนข้างไปตามทฤษฎีที่ว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมจะเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวล อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร ณ บริเวณตัวดูดซับ กับสารละลาย ในขณะที่ผลที่สภาวะที่ไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ผลค่อนข้างผิดพลาดอย่างมาก แต่หากพิจารณาในแต่ละอุณหภูมิจะพบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับลดลงอย่างมากซึ่งน่าจะเกิดจากปัจจัยของอุณหภูมิที่ยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้น การดูดซับจะลดลงสำหรับในกระบวนการคายความร้อน

**ตารางที่ 4.11** แสดงค่าอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมแอซิดบลู

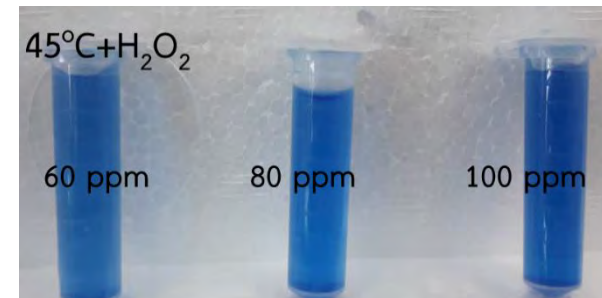
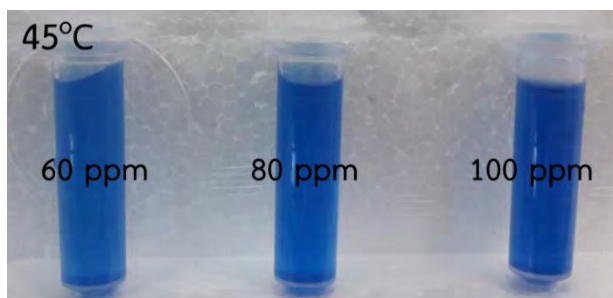
ตัวดูดซับ	$\Delta H^\circ$ (kJ/mol)	$\Delta S^\circ$ (kJ/mol.K)	$\Delta G^\circ$ (kJ/mol)		
			35	40	45
นาโนคอมพอสิตไคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์-ออกไซด์ของโลหะ	-33.11	-0.356	3.75	5.93	7.30



(ก)



(ข)



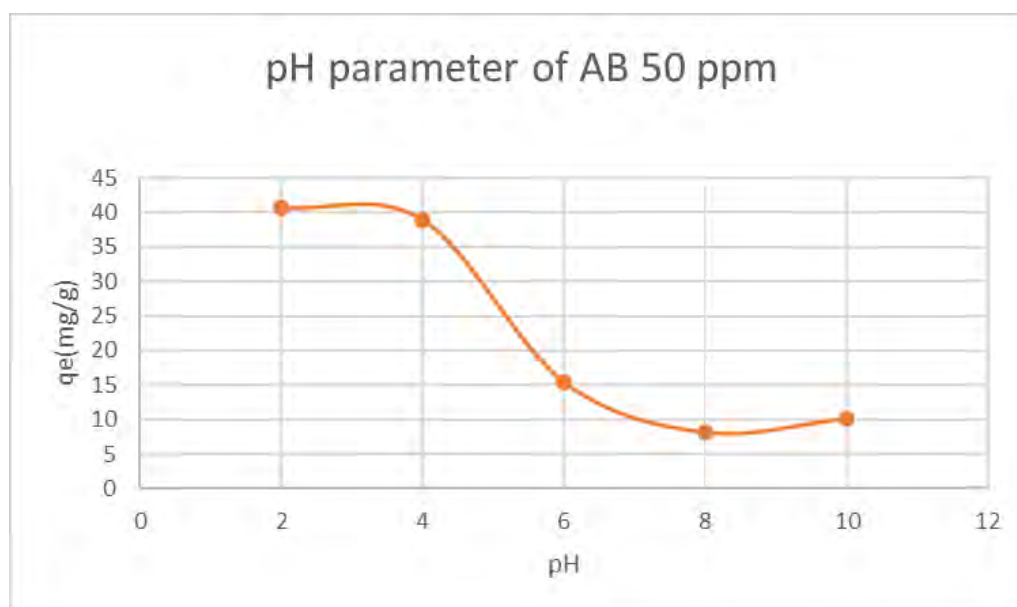
(ค)

รูปที่ 4.19 แสดงผลการทดลองตัวแปรอุณหภูมิและความเข้มข้นสีย้อมแอสซิดบลูที่ (ก) 35, (ข) 40, (ค) 45°C ที่ความเข้มข้น 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

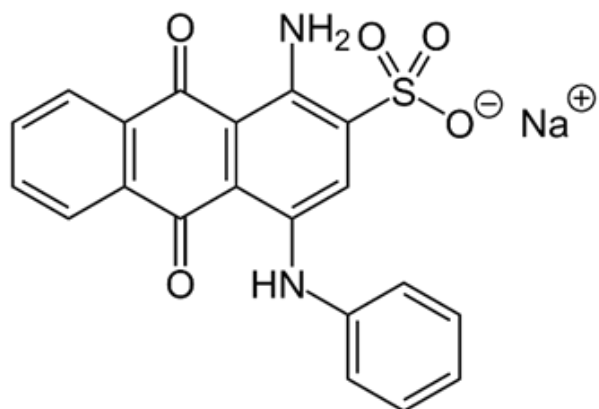
### 4.3.3 ผลของ pH กับการดูดซับสีย้อม

ตารางที่ 4.12 แสดงผลของตัวแปร pH กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับสีย้อมคองโกเรด ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

pH	ค่าขีดความสามารถในการดูดซับ ( $q_e$ )
2	40.67
4	38.88
6	15.48
8	8.20
10	10.17

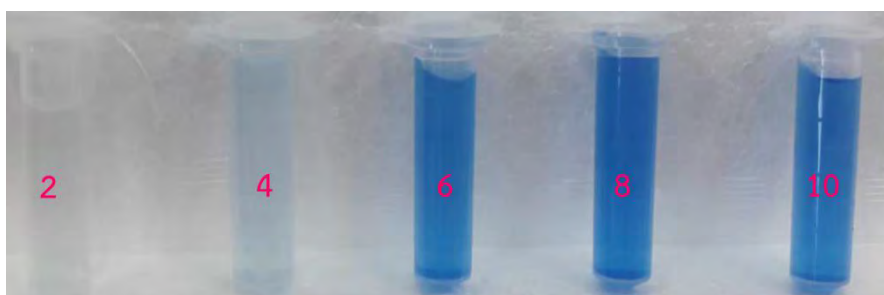


รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับค่าขีดความสามารถในการดูดซับสีย้อมแอสิตบลูความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.21 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมแอซิดบลู

ในผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของสีย้อมแอซิดบลูนั้นเราพบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมได้ดีที่สุดอยู่ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 โดยพิจารณา จากค่า  $pH_{zpc}$  (point of zero charge) หรือ pH ที่ทำให้ประจุบนผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นศูนย์ ถ้า ณ ขณะนั้นพีเอชของสารละลายต่ำกว่า  $pH_{zpc}$  ประจุรวมบนตัวดูดซับจะเป็นบวกเนื่องจากไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ดังนั้นด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างโมเลกุลที่เป็นประจุบวกบนตัวดูดซับจะทำให้สามารถดูดซับสีย้อมแอซิดบลูที่เป็นประจุลบดังรูปที่ 4.21 ได้ดี



รูปที่ 4.22 แสดงผลการทดลองตัวแปร pH ของสีย้อมแอซิดบลู

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยเรื่องการกำจัดสีย้อมโดยการใช้นาโนคอมพอสิตไคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์-ออกไซด์ โลหะนี้ ได้ทำการทดลองปัจจัยต่างๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมของนาโนคอมพอสิตไคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์-ออกไซด์โลหะ โดยใช้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการกำหนดปัจจัยการทดลอง ได้ทั้งหมด 3 ปัจจัยดังนี้

#### 5.1 ปัจจัยด้านเวลา

ทดลองทั้งหมด 35 ชุด แบ่งเป็นการทดลองสีย้อม 3 ชนิด

โดยการทดสอบปัจจัยด้านเวลา เก็บตัวอย่างผลที่ 5 , 10 , 15, 30 และ 60 นาที เพื่อหาเวลาที่ถึงจุดสมดุลซึ่งตัวดูดซับสามารถดูดซับสีย้อมได้มากที่สุดก่อนจะคงที่ ในสีย้อมเมทิลีนบลูซึ่งเป็นสีย้อมแรกที่ทำ การทดสอบ แบ่งการทดลองย่อยเป็นที่ 3 ความเข้มข้นคือ 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตรเพื่อหาว่าตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมในความเข้มข้นที่แตกต่างกันเป็นเช่นไร ผลคือตัวดูดซับที่ใช้สามารถดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้เป็นอย่างดี ที่ความเข้มข้นสีย้อมน้อยผลคือมีการดูดซับสีย้อมเกือบทั้งหมดออกได้ ในการทดลองสีย้อมอีกสองชนิดคือคองโกเรดและแอสิตบลูจึงได้เริ่มทำการทดลองปัจจัยด้านเวลา ที่ความเข้มข้นสีย้อม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อลดปริมาณการใช้ตัวดูดซับที่มีจำกัด โดยเริ่มทดลองจากสีย้อมคองโกเรด ผลที่ได้พบว่าตัวดูดซับดูดซับสีย้อมคองโกเรดได้น้อย มีความเป็นไปได้ว่าตัวดูดซับอาจมีประสิทธิภาพน้อยเมื่อใช้ดูดซับสีย้อมชนิดคองโกเรด จึงมีการปรับการทดลองโดยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้ามาเป็นตัวเร่งการดูดซับสีย้อม ผลที่ได้คือการดูดซับเพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกันกับในการทดลองสีย้อมแอสิตบลู ผลพบว่ามี การดูดซับสีย้อมที่ต่ำ จึงปรับการทดลองโดยเพิ่มการทดสอบการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าไปเช่นกัน เมื่อพิจารณาผลวิเคราะห์พบว่าเวลาที่ตัวดูดซับสามารถดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูและสีย้อมคองโกเรดได้มากที่สุดก่อนสู่สมดุลคือที่เวลา 15 นาที ส่วนสีย้อมแอสิตบลูไม่สามารถบอกได้ว่าเวลาไหนเป็นเวลาที่ดีที่สุดก่อนเข้าสู่สมดุล ทั้งนี้สามารถเกิดได้จากความไม่เหมาะสมของตัวดูดซับกับชนิดของสีย้อมหรืออาจเกิดจากความผิดพลาดในกระบวนการ

#### 5.2 ปัจจัยด้านอุณหภูมิ

ทดลองทั้งหมด 48 ชุด แบ่งเป็นการทดลองสีย้อม 3 ชนิด

การทดสอบปัจจัยด้านอุณหภูมิ ทำที่อุณหภูมิ 3 ค่า คือ 35, 40 และ 45 องศาเซลเซียส และที่ความเข้มข้น 3 ความเข้มข้นคือ 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยในสีย้อมเมทิลีนบลูจะไม่ทดสอบกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ครบทุกอุณหภูมิเนื่องจากปริมาณตัวดูดซับที่จำกัด และตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่สูงที่สุดนี้ได้จากการทดลองปัจจัยด้านเวลา ในสีย้อมเมทิลีนบลูพบว่าแนวโน้มการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเพิ่มมากขึ้น ผลของอุณหภูมิต่อสีย้อมคองโกเรดมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจน ในขณะที่ผลของความเข้มข้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมคองโกเรดมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ขณะที่สีย้อมแอสิตบลู เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้การดูดซับสีย้อมแอสิตบลูลดลง อาจเป็นเพราะเมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การละลายของสีย้อมดีขึ้นทำให้แรงดึงดูด

ระหว่างสีย้อมแอสิตบลูกับตัวดูดซับลดลง ผลของความเข้มข้นของสีย้อมนั้นหากพิจารณาในแต่ละอุณหภูมิพบว่าที่สภาวะที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมแอสิตบลูแนวโน้มค่อนข้างไปตามทฤษฎีที่ว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมจะเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวล อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร ณ บริเวณตัวดูดซับ กับสารละลาย ในขณะที่ผลที่สภาวะที่ไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่าที่ขีดความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับติดลบ เป็นไปได้สองกรณีคือตัวดูดซับไม่เหมาะสมกับชนิดสีย้อมหรือความผิดพลาดจากการทดลอง

### 5.3 ปัจจัยด้านค่าความเป็นกรด-ด่าง

ทดลองทั้งสิ้น 15 ชุด แบ่งเป็นการทดลองสีย้อม 3 ชนิด

การทดสอบปัจจัยด้านค่าความเป็นกรด-ด่างของสีย้อม ทดสอบที่ค่าพีเอช 2, 4, 6, 8 และ 10 ในปัจจัยนี้จะไม่มีการทดสอบที่สภาวะการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพราะอาจไปรบกวนค่าพีเอช ได้ พบว่าการดูดซับในสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูจะถูกดูดซับได้ดีที่พีเอชที่มีค่าเท่ากับ 10 เพราะที่สภาวะที่สารละลายสีย้อมมีค่าพีเอชที่สูงขึ้นทำให้ผิวประจุรวมของตัวดูดซับเป็นลบเนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ทำให้สามารถดูดซับสีย้อมที่เป็นประจุบวกอย่างสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดี สีย้อมคองโกเรดพบว่าค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่ดีที่สุดอยู่ที่พีเอชเท่ากับ 6 ที่เพราะ สีย้อมคองโกเรดมีประจุเป็นลบจึงทำให้สามารถถูกดูดซับได้ดีในสภาวะที่พีเอชต่ำเมื่อในสารละลายมีความเป็นกรดจะมีไอออนบวกของไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) มาอยู่ในบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับ และผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของสีย้อมแอสิตบลูนั้นพบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมได้ดีที่สุดอยู่ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 โดยพิจารณา จากค่า  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  (point of zero charge) หรือ pH ที่ทำให้ประจุบนผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นศูนย์ ถ้า ณ ขณะนั้นพีเอชของสารละลายต่ำกว่า  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  ประจุรวมบนตัวดูดซับจะเป็นบวกเนื่องจากไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) ดังนั้นด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างโมเลกุลที่เป็นประจุบวกบนตัวดูดซับจะทำให้สามารถดูดซับสีย้อมแอสิตบลูที่เป็นประจุลบได้ดี

โดยสรุปในงานวิจัยนี้ ปัจจัยที่มีส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับนาโนคอมพอสิตไคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์-ออกไซด์โลหะ ได้แก่ เวลา, อุณหภูมิ, ความเข้มข้นสีย้อม และค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยผลของเวลาที่เพิ่มมีผลต่อโอกาสที่ตัวถูกดูดซับจะไปจับกับพื้นผิวตัวดูดซับที่มากขึ้น ในช่วงแรกของการดูดซับจะเกิดขึ้นเร็วเนื่องจาก concentration gradient ในสารละลายกับที่บริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับที่ช่วงแรกยังมีพื้นที่ว่างในการดูดซับและจะเริ่มเข้าสู่สมดุล เนื่องจากพื้นที่ว่างของตัวดูดซับได้ดูดซับสีย้อมไว้เต็ม ผลของความเข้มข้นสีย้อม ระดับความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเกิดความแตกต่างระหว่างสารละลายและบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับทำให้เกิดแรงกระทำและการชนกันของโมเลกุล (Drive force) ที่มากขึ้นตาม ขณะที่ผลของอุณหภูมิมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจนจึงไม่สามารถสรุปได้ และผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ส่งผลต่อค่าประจุบนผิวของตัวดูดซับ และธรรมชาติของสีย้อมประจุบวกจะถูกดูดซับได้ดีที่ค่าพีเอชสูง ส่วนสีย้อมประจุลบจะถูกดูดซับได้ดีที่ค่าพีเอชต่ำ

หมายเหตุ เนื่องด้วยข้อจำกัดด้านเวลาทำให้การทดลองทุกตัวแปรที่กำหนดขึ้นมาทำได้เพียงตัวแปรละหนึ่งครั้ง ซึ่งอาจเป็นการลดทอนความน่าเชื่อถือของข้อมูลเพราะมีความเป็นไปได้ว่าเกิดข้อผิดพลาดขึ้นระหว่างกระบวนการ จึงควรมีการทำการทดลองซ้ำ ข้อจำกัดอีกประการคือปริมาณนาโนคอมพอสิตโคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ของซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมได้จากวิธี one-pot มีปริมาณไม่เพียงพอต่อการทดลองซ้ำหลายรอบ ปัญหาเหล่านี้อาจจะแก้ไขได้โดยการเตรียมตัวดูดซับเพิ่มและเริ่มทดลองซ้ำ

### บรรณานุกรม

- [1] Radha K.V., Sridevi V. & Kalaivani K. (2009). **Electrochemical oxidation for the treatment of textile industry wastewater**. *Bioresource Technology*, 100, 987-990.
- [2] กัญฑรีย์ ศรีพงศ์พันธุ์. (2547). มลพิษทางน้ำ. (พิมพ์ครั้งที่ 3) กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [3] สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์. (2549). ระบบบำบัดน้ำเสีย: การเลือกใช้ การออกแบบ การควบคุม และการแก้ปัญหา. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- [4] นายพิเชษฐ์ หนูหมื่น. (2557). การดูดซับสีในน้ำเสียจากกระบวนการทำผ้าบาติกด้วยอิฐมอญอบ. *วิทยานิพนธ์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์*, 1-3.
- [5] เสาวลักษณ์ บุญยอด, ชัยวุฒิ วัดจิ่ง, มหาหะสูโฮมี มะแซ. การเตรียมพอลิเมอร์เชื่อมโยงกิ่งโครงร่างตาข่ายจากน้ำยางธรรมชาติ และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์. วารสารสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการยาง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย. 2560. ปีที่7. ฉบับที่1: 78-87.
- [6] Xinghou, G., Chak, Y., Ling, P., Zhonghua, H., Chipong Tsui., 2014. **Characterization of poly (vinyl alcohol) (PVA)/ZnO nanocomposites prepared by a one-pot method**. *Composites Part B: Engineering*. 60, (2014), pp 144-149.
- [7] Anonymous. (2012). ความหมายของสี. สืบค้นเมื่อวันที่ 11 เม.ย. 2563, จากเว็บไซต์ <http://narisaraom552223.blogspot.com/>
- [8] รศ.ดร. อรุณี คงดี อัลเดร. การจำแนกและชนิดของสีย้อม. สืบค้นเมื่อวันที่ 11 เม.ย. 2563, จากเว็บไซต์ [http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/a\\_kongdee/%E0%B8%84%E0%B8%A1362-%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%203%20%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%A2%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B8%A1%E0%B8%AA%E0%B8%B5-4p.pdf](http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/a_kongdee/%E0%B8%84%E0%B8%A1362-%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%203%20%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%A2%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B8%A1%E0%B8%AA%E0%B8%B5-4p.pdf)
- [9] ขนิษฐา. (2007). ประเภทของสีย้อม. สืบค้นเมื่อวันที่ 11 เม.ย. 2563, จากเว็บไซต์ [https://www.tpa.or.th/writer/read\\_this\\_book\\_topic.php?bookID=370&pageid=6&read=true&count=true](https://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=370&pageid=6&read=true&count=true)
- [10] ชำนาญ ราษฎร์ (2544). การศึกษาสมบัติทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาบัณฑิต สาขาวิชา เคมีอนินทรีย์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.



- [11] วิโรจน์ สารการโกศล. (2560). มลภาวะและอันตรายของน้ำทิ้งจากการย้อมผ้า. สืบค้นเมื่อวันที่ 11 เม.ย. 2563, จากเว็บไซต์ <http://www.eric.chula.ac.th/ej/v21y2560/no1/a1p7.pdf>
- [12] Perfect Solution & Consultant Co., Ltd. (2013). การวัดค่าสี ในหน่วยADMI และเทคโนโลยีสำหรับการกำจัดสี. สืบค้นเมื่อวันที่ 11 เม.ย. 2563, จากเว็บไซต์ <http://library.dip.go.th/multim6/edoc/2558/23705.pdf>
- [13] Walker G.M. & Weatherley L.R. (2000). **Biodegradation and biosorption of acid anthraquinone dye.** Environmental Pollution, 108, 2, 219-223.
- [14] วีรานูช หลาง, ธนสิริ มีชัย และ วิชชุพร จันทร์ศรี. (2551). ความสามารถในการกำจัดสีย้อมผ้าประเภทรีแอกทีฟของ Burkholderia glumae. Environment and Natural Resources Journal, 6, 66-81.
- [15] Pradthana's Weblog. (2008). กระบวนการดูดซับ(Adsorption Process). สืบค้นเมื่อวันที่ 18 เม.ย. 2563, จากเว็บไซต์ <https://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process/>
- [16] ดร. สุพิณ แสงสุข. (2551). นาโนซิงค์ออกไซด์. สืบค้นเมื่อวันที่ 19 เม.ย. 2563, จากเว็บไซต์ <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=5&ID=6>
- [18] M. Vakili, M. Rafatullah, B. Salamatinia, A. Zuhairi Abdullah, M. Hakimi Ibrahim, K. Bing Tan, Z. Gholami, P. Amouzgar. **Application of chitosan and its derivatives as adsorbents for dye removal from water and wastewater: A review.** Carbohydrate Polymers. 113 (2014), pp. 115-130
- [19] Wensheng, C., and Gupta, R.B. 2002. "Hydrogels", Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology.
- [20] X. Gong, C. Y. Tang, L. Pan, Z. Hao, C. P. Tsui. **Characterization of poly(vinyl alcohol) (PVA)/ZnO nanocomposites prepared by a one-pot method.** Composites Part B: Engineering. 60,(2014). pp. 144-149.
- [21] รวินิภา ศรีมูล. (2016). การบำบัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับ. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 44(3). 420-433.

[22] M.C.Somasekhara Reddy, L. Sivaramakrishna, A. Varada Reddy. **The use of an agricultural waste material, Jujuba seeds for the removal of anionic dye (Congo red) from aqueous medium.** Hazardous Materials. 203–204. (2012). 118-127

[23] อาทิตย์ อัสวสุชี และ สิรินาถร โมพันดุง. 2557. การใช้เคลย์ที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน เพื่อกำจัดสีน้ำทิ้งจากการย้อมผ้า. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ 17(1). 22-29.