

การดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 45 และการตัดแยกตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกภายใต้  
สนามแม่เหล็กด้วยเส้นใยสแตนเลสที่ดัดแปรพื้นผิว



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2557  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ADSORPTION OF ACID BLUE 45 AND SEPARATION OF SUPERPARAMAGNETIC  
ADSORBENTS UNDER MAGNETIC FIELD BY SURFACE MODIFIED STAINLESS FIBERS

MISS NUTHAPORN EIAMSA-ARD



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS  
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING PROGRAM IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
CHULALONGKORN UNIVERSITY  
ACADEMIC YEAR 2014  
COPYRIGHT OF CHULALONGKORN UNIVERSITY



ณัฐพร เอี่ยมสะอาด : การดูดซับสีย้อมแอสซิดบลู 45 และการคัดแยกตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติ  
 ซุปเปอร์พาราแมกเนติกภายใต้สนามแม่เหล็กด้วยเส้นใยสแตนเลสที่ดัดแปรพื้นผิว (ADSORPTION  
 OF ACID BLUE 45 AND SEPARATION OF SUPERPARAMAGNETIC ADSORBENTS UNDER  
 MAGNETIC FIELD BY SURFACE MODIFIED STAINLESS FIBERS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:  
 รศ. ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล, 4 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดสีย้อมชนิด แอสซิดบลู 45 (AB45) ด้วยกระบวนการดูดซับที่มีสมบัติเป็น  
 ซุปเปอร์พาราแมกเนติกการคัดแยกด้วยเส้นใยสแตนเลสภายใต้สนามแม่เหล็ก โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2  
 ส่วน ในส่วนแรกศึกษากระบวนการดูดซับแบบที่ละเทโดยเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์และสมดุลการดูดซับ  
 จากตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซุปเปอร์พาราแมกเนติกทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่ เฮกซะโกนอลเมโสพอร์สซิลิเกต  
 (HMS-SP), เฮกซะโกนอลเมโสพอร์สซิลิเกตที่นำไปต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโน (A-HMS-SP), เฮกซะโกนอลเมโส  
 พอร์สซิลิเกตที่นำไปต่อติดหมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโต (M-HMS-SP), ซิลิเกต (S-SP), ซิลิเกตที่นำไปต่อติดหมู่  
 ฟังก์ชันอะมิโน (A-S-SP) และ ซิลิเกตที่นำไปต่อติดหมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโต (M-S-SP) จากการศึกษา  
 จลนพลศาสตร์การดูดซับพบว่าตัวกลางดูดซับทั้ง 6 ชนิดเป็นไปตามจลนพลศาสตร์การดูดซับลำดับที่ 2  
 เสมือนทั้งหมด การศึกษาสมดุลการดูดซับของ AB45 ควบคุมค่า pH 7, ความแรงประจุ 0.01 โมล/ลิตร พบว่า  
 ตัวกลางดูดซับทั้ง 6 ชนิดเป็นไปตามสมดุลการดูดซับของฟรอนด์ลิชทั้งหมด สำหรับการทดลองในส่วนที่ 2  
 ศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับออกจากน้ำเสียโดยใช้ตัวกรองเส้นใยสแตนเลสภายใต้สนามแม่เหล็ก และใช้  
 ตัวกลางดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดคือ A-HMS-SP สำหรับการศึกษาผลกระทบจาก  
 สนามแม่เหล็กที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับ 0.5-5 กรัมต่อลิตร ที่ความสูงชั้นกรอง 1.5-3 เซนติเมตร ความ  
 พรุณ 95.28% - 98.43% และความเร็วการไหล 16.43 - 65.73 เซนติเมตรต่อนาที จากผลการทดลองพบว่  
 การใส่สนามแม่เหล็กลงไปบนเส้นใยสแตนเลสส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการแยกอนุภาค A-HMS-SP สูงขึ้น  
 และการเพิ่มขึ้นของความสูงและความพรุณของชั้นเส้นใยสแตนเลสส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกอนุภาค A-  
 HMS-SP สูงขึ้น ส่วนการเพิ่มขึ้นของอัตราเร็วของการไหลและความเข้มข้นของตัวกลางดูดซับส่งผลให้  
 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาค A-HMS-SP ลดลง นอกจากนี้การปรับแต่งความขอบน้ำของเส้นใยสแตน  
 เลสไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาค A-HMS-SP และในกรณีอนุภาคแบบรูปพรุณและอนุภาคแบบ  
 กลมเกลี้ยงมีประสิทธิภาพการคัดแยกไม่แตกต่างกัน

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2557

# # 5470196621 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: สีย้อม (DYE) / ตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (SUPERPARAMAGNETIC ADSORBENT) / การคัดแยก (SEPARATION) / การดูดซับ (ADSORPTION)

NUTHAPORN EIAMSA-ARD: ADSORPTION OF ACID BLUE 45 AND SEPARATION OF SUPERPARAMAGNETIC ADSORBENTS UNDER MAGNETIC FIELD BY SURFACE MODIFIED STAINLESS FIBERS. ADVISOR: ASST. PROF. PATIPARN PUNYAPALAKUL, Ph.D., 4 pp.

THE OBJECTIVE OF THIS RESEARCH IS TO STUDY THE REMOVAL OF ACID BLUE 45 FROM SYNTHETIC WASTEWATER BY USING SURFACE MODIFIED SUPERPARAMAGNETIC ADSORBENTS. THIS RESEARCH WAS SEPARATED INTO 2 PARTS. THE FIRST PART IS THE STUDY OF ADSORPTION EFFICIENCY IN BATCH SYSTEM BY COMPARING 6 TYPES OF SUPERPARAMAGNETIC ADSORBENTS; HEXAGONAL MESOPOROUS SILICA (HMS-SP), HEXAGONAL MESOPOROUS SILICA FUNCTIONALIZED WITH AMINO FUNCTIONAL GROUP (A-HMS-SP), HEXAGONAL MESOPOROUS SILICA FUNCTIONALIZED WITH MERCAPTO FUNCTIONAL GROUP (M-HMS-SP), SILICA (S-SP), SILICA FUNCTIONALIZED WITH AMINO FUNCTIONAL GROUP (A-S-SP) AND SILICA FUNCTIONALIZED WITH MERCAPTO FUNCTIONAL GROUP (M-S-SP). AB-45 ADSORPTION KINETIC OF ALL ADSORBENTS CAN BE FITTED BY PSEUDO 2ND ORDER MODEL WITH HIGH CORRELATION. THE STUDY OF ADSORPTION ISOTHERM WAS CONDUCTED BY CONTROLLING pH AT 7 AND IONIC STRENGTH AT 0.01 M. THE OBTAINED ADSORPTION ISOTHERMS OF ALL ADSORBENTS ARE COMPATIBLE WITH FREUNDLICH ISOTHERM. THE SECOND PART IS THE STUDY OF ADSORBENT SEPARATION BY STAINLESS FIBER UNDER MAGNETIC FIELD. THE A-HMS-SP WHICH HAS THE HIGHEST AB-45 ADSORPTION CAPACITY WAS APPLIED IN THIS STUDY. THE EFFECT OF MAGNETIC FIELDS ON STAINLESS FIBER FILTER COLUMN STUDY WAS OPERATED BY THIS FOLLOWED CONDITION; 1.5-3 CM HEIGHT, 95.28% - 98.43% POROSITY, CONCENTRATION OF ADSORBENT AT 0.5-5 G/L, VELOCITY AT 16.43 - 65.73 CM/MIN. FROM OBTAINED RESULTS; APPLYING MAGNETIC FIELD INTO STAINLESS FIBER CAN INCREASE THE A-HMS-SP SEPARATION EFFICIENCY. INCREASE OF THE HEIGHT AND POROSITY OF STAINLESS FIBER COLUMN CAN INCREASE THE SEPARATION EFFICIENCY OF A-HMS-SP. HOWEVER, INCREASE OF FLOW VELOCITY AND PARTICLE CONCENTRATION DECREASE THE SEPARATION EFFICIENCY OF A-HMS-SP. HYDROPHOBICITY MODIFICATION OF STAINLESS FIBER DID NOT AFFECT THE SEPARATION EFFICIENCY OF A-HMS-SP. MOREOVER, SEPARATION EFFICIENCIES OF POROUS AND PARTICLE ADSORBENTS WERE NOT DIFFERENT, SIGNIFICANTLY.

DEPARTMENT: ENVIRONMENTAL ENGINEERING STUDENT'S SIGNATURE .....

FIELD OF STUDY: ENVIRONMENTAL ENGINEERING ADVISOR'S SIGNATURE .....

ACADEMIC YEAR: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ความเข้าใจ และให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดจนดูแลเอาใจใส่ตรวจสอบอย่างละเอียดในทุกขั้นตอนของการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภู่งประเสริฐ, รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน ลิ้มปิยากร และ ดร.พินิตา พรารัตน์ ที่สละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำ ทิชม แก่ชิ้นงานวิจัยนี้ให้เป็นไปในแนวทางที่ดีที่สุด

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่าน ที่คอยอบรมสั่งสอน และให้ความรู้ในวิชาต่างๆ รวมถึงวิธีการดำเนินชีวิตในมหาวิทยาลัย เป็นแนวทางการปฏิบัติตนเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ และเจ้าหน้าที่ผู้ดูแลห้องปฏิบัติการและเครื่องมือของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆทุกคน ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทั้งจากปริญญาตรีและปริญญาโท รวมถึงเพื่อนจากโรงเรียนสาธิตแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาการศึกษา ที่คอยให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ทั้งทางด้านวิชาการ และกำลังใจความเชื่อมั่นอย่างสม่ำเสมอ รวมถึงเพื่อนๆ จากสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่เป็นกำลังใจ และช่วยเหลือเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณแม่ คุณป้า คุณพ่อ และญาติๆ ทุกคน ที่ให้โอกาสทางการศึกษา สนับสนุนทั้งกำลังใจ กำลังกาย และกำลังทรัพย์เป็นอย่างดีตลอดมา ขอขอบคุณที่เชื่อมั่นอย่างเข้มแข็งเสมอมาในตัวลูกสาว และหลานสาวคนนี้ค่ะ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	1
ตารางที่ 2.1 ประเภทสีย้อม .....9	1
ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยบางประเภทกับประเภทของสี ย้อม..11	1
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของแอซิดบลู 45 .....12	1
ตารางที่ 2.4 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำรีโกล .....14	1
ตารางที่ 2.5 การจำแนกประเภทของแม่เหล็กตามคุณสมบัติ .....27	1
ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ ด้วยวิธีต่อติดหมู่ฟังก์ชัน (POST-SYNTHETIC GRAFTING) และ ควบแน่นร่วม (Co- CONDENSATION OR DIRECT SYNTHESIZE).....32	1
ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติของ (3-AMINOPROPYL) TRIMETHOXYSILANE .....33	1
ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของ (3-MERCAPTOPROPYL) TRIMETHOXYSILANE .....34	1
ตารางที่ 2.9 สรุปข้อมูลที่ได้จากการศึกษางานวิจัย .....46	1

ตารางที่ 3.1 โครงสร้างของหมู่ฟังก์ชันหลังการปรับแต่งพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ .....54.....	1
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของตัวกลางดูดซับ .....55.....	1
ตารางที่ 3.3 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 45 .....57.....	1
ตารางที่ 3.4 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาสมดุลการดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 45 .....58.....	1
ตารางที่ 3.5 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาลักษณะสมบัติของเส้นใยสแตนเลสและเส้นใย สแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว .....61.....	1
ตารางที่ 3.6 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของสนามแม่เหล็กบนเส้นใยสแตนเลสต่อ ประสิทธิภาพในการแยกตัวกลางดูดซับ .....63.....	1
ตารางที่ 3.7 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นเส้นใยสแตนเลส .....65.....	1
ตารางที่ 3.8 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของความพรุนของชั้นเส้นใยสแตนเลส .....66.....	1
ตารางที่ 3.9 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบจากความเร็วการไหลของน้ำเสีย .....68.....	1
ตารางที่ 3.10 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้เส้นใยสแตนเลสที่ ทำการปรับปรุงพื้นผิวในระบบ HGMS .....69.....	2
ตารางที่ 3.11 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของปริมาณอนุภาคตัวกลางดูดซับต่อ ประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS .....71.....	2
ตารางที่ 3.12 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของชนิดอนุภาคตัวกลางดูดซับชนิดมีรูพรุน และอนุภาคกลมเกลี้ยงต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS .....73.....	2
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ ด้วยเครื่อง CNS/O ANALYZER .....77.....	2



ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับ	
.....80 .....	2
ตารางที่ 4.3 สมบัติทางการภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด	
.....83 .....	2
ตารางที่ 4.4 ค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ AB45 บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ	
.....85 .....	2
ตารางที่ 4.5 ค่าตัวแปรสมดุลการดูดซับ AB45 บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ	
.....88 .....	2
ตารางที่ 4.6 มุมของหยดน้ำบนผิวสแตนเลสที่ปรับปรุงพื้นผิวแล้ว และไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว	
.....92.....	2
สารบัญรูป .....	3
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 อุตสาหกรรมสิ่งทอ .....	5
2.1.1 กระบวนการปั่นด้าย (SPINNING PROCESS).....	5
2.1.2 กระบวนการทอผ้า (WEAVING PROCESS) .....	5
2.1.3 กระบวนการย้อมสี และตกแต่งผ้า (DYEING AND FINISHING PROCESS).....	5
2.2 สีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ .....	7
2.2.1 การจำแนกสีย้อม .....	7
2.2.1.1 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะทางกายภาพ .....	7

2.2.1.2 การจำแนกสีย้อมตามส่วนประกอบทางเคมี.....	7
2.2.1.3 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการนำไปใช้งาน.....	8
2.2.2 คุณสมบัติของสีย้อม แอซิด บลู 45.....	11
2.2.3 ความเป็นพิษของสีย้อม แอซิด บลู 45.....	12
2.2.4 ค่าของสีย้อมที่ยอมให้ปนเปื้อนได้มากที่สุดในมาตรฐานน้ำดื่ม .....	13
2.3 ทฤษฎีการย้อมสี.....	14
2.4 น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ .....	15
2.4.1 แหล่งที่มาของน้ำเสีย .....	15
2.4.1.1 น้ำที่ใช้ในกระบวนการ.....	15
2.4.1.2 น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ.....	15
2.4.1.3 น้ำหล่อเย็น.....	15
2.4.1.4 น้ำที่ใช้ในการล้างทำความสะอาดเครื่องจักรและโรงงาน.....	16
2.4.2 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอต่อสิ่งแวดล้อม.....	16
2.4.2.1 สารอินทรีย์.....	16
2.4.2.2 อุณหภูมิ.....	16
2.4.2.3 ของแข็งแขวนลอย.....	16
2.4.2.4 ของแข็งละลายน้ำ.....	16
2.4.2.5 สี.....	17
2.4.2.6 โลหะหนัก.....	17
2.5 กระบวนการดูดซับ (ADSORPTION PROCESS).....	17
2.5.1 แรงที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับ.....	17
2.5.1.1 แรงทางกายภาพ.....	17
2.5.1.2 แรงทางเคมี.....	18

2.5.2 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (RATE OF MOLECULE TRANSFER).....	20
2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ .....	21
2.5.3.1 อุณหภูมิ .....	21
2.5.3.2 ธรรมชาติของตัวทำละลาย .....	21
2.5.3.3 พื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับ.....	21
2.5.3.4 โครงสร้างรูพรุนของตัวกลางดูดซับ .....	22
2.5.3.5 ธรรมชาติของตัวถูกละลาย .....	22
2.5.3.6 ค่า PH ของสารละลาย .....	22
2.5.3.7 น้ำหนักและขนาดโมเลกุล.....	22
2.5.3.8 ความปั่นป่วน.....	22
2.5.3.9 เวลาสัมผัส.....	23
2.5.4 การศึกษาความสามารถในการดูดซับ (ADSORPTION ISOTHERM).....	23
2.5.4.1 แลงเมียร์ไอโซเทอร์ม (LANGMUIR ISOTHERM).....	24
2.5.4.2 ฟรุนด์ลิชไอโซเทอร์ม (FREUNDLISH ISOTHERM).....	24
2.5.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (ADSORPTION KINETIC).....	25
2.5.5.1 สมดุลการดูดซับอันดับ 1 เสมือน .....	25
2.5.5.2 สมดุลการดูดซับอันดับ 2 เสมือน .....	26
2.6 ตัวกลางดูดซับ .....	26
2.6.1 อนุภาคที่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก.....	26
2.6.2 เมโสพอร์ซิลิกา (MESOPOROUS SILICA).....	28
2.6.3 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ .....	30
2.6.3.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนที่มีสมบัติแม่เหล็ก.....	30

2.6.3.2 การเคลือบแมกนีไทต์ด้วยเมโสพอร์สซิลิเกต.....	30
2.6.3.3 การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ .....	30
2.6.4 หมู่ฟังก์ชัน .....	32
2.6.4.1 หมู่ฟังก์ชันอะมิโน .....	32
2.7.4.2 หมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโต.....	33
2.6.5 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ .....	34
2.6.5.2 โครงสร้างผลึก .....	34
2.6.5.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว .....	34
2.6.5.3 ลักษณะพื้นที่ผิว .....	34
2.7 การแยกด้วยแม่เหล็กแรงสูง (HGMS) .....	35
2.7.1 ความเข้มสนามแม่เหล็ก (MAGNETIC STRENGTH FIELD) (H) .....	35
2.7.2 ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (MAGNETIC FLUX DENSITY) (B).....	35
2.7.3 แรงแม่เหล็ก (MAGNETIC FORCE) .....	36
2.7.4 แรงดึงดูดของโลก (GRAVITATIONAL FORCE) .....	37
2.7.5 แรงสู่ศูนย์กลาง (CENTRIFUGAL FORCE).....	38
2.7.6 แรงต้าน (FRICTIONAL FORCE).....	38
2.7.7 ความพรุนของชั้นตัวกลาง (POROSITY).....	38
2.7.8 ความเร็วในเส้นใย .....	39
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
2.8.1 การดูดซับสีย้อม แอซิด บลู 45 .....	39
2.8.2 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ .....	40
2.8.3 การแยกตัวกลางดูดซับด้วยสนามแม่เหล็ก .....	42
2.8.4 การสังเคราะห์เส้นใยสแตนเลส .....	43

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย .....	48
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี .....	49
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	49
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	49
3.2 วิธีการทดลอง.....	50
3.2.1 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก .....	50
3.2.1.1 อนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก .....	50
3.2.1.1.1 การสังเคราะห์อนุภาคแมกนีไทต์ (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ).....	50
3.2.1.1.2 การเคลือบ Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ด้วยซิลิกา เพื่อให้ได้อนุภาคซูเปอร์พาราแมกเนติก (SCP).....	51
3.2.1.1.3 การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันที่ผิวหน้าตัวกลางดูดซับด้วยวิธีการ Co-CONDENSATION .....	51
3.2.1.2 อนุภาคเคลือบเมโสพอร์ซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก.....	52
3.2.1.2.1 การสังเคราะห์อนุภาคแมกนีไทต์ (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ) .....	52
3.2.1.2.2 การเคลือบ Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ด้วยเมโสพอร์ซิลิกา เพื่อให้ได้อนุภาคซูเปอร์พาราแมกเนติก (HMSS) .....	52
3.2.1.2.3 การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันที่ผิวหน้าตัวกลางดูดซับด้วยวิธีการ Co-CONDENSATION .....	52
3.2.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ .....	55
3.2.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก.....	55
3.2.2.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว .....	55
3.2.2.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว .....	55
3.2.2.4 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ และขนาดอนุภาค .....	56
3.2.3 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบที่ละเท.....	56

3.2.3.1 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับแอซิดบลู 45.....	56
3.2.3.2 การวิเคราะห์สมดุลการดูดซับแอซิดบลู 45 .....	57
3.2.3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณแอซิดบลู 45 ในสารละลาย.....	58
3.2.4 การศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้ HIGH GRADIENT MAGNETIC SEPARATE FILTER.....	58
3.2.4.1 การเตรียมเส้นใยสแตนเลส .....	60
3.2.4.1.1 เส้นใยสแตนเลสที่ไม่ทำการปรับปรุงพื้นผิว .....	60
3.2.4.1.2 เส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว.....	60
3.2.4.2 การศึกษาลักษณะสมบัติของเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการ ปรับปรุงพื้นผิว .....	60
3.2.4.3 การศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้เส้นใยสแตนเลสในระบบ HGMS.....	62
3.2.4.3.1 การศึกษาผลกระทบจากสนามแม่เหล็กบนเส้นใยสแตนเลส ....	62
3.2.4.3.2 การศึกษาผลกระทบจากความสูงของชั้นเส้นใยสแตนเลส.....	64
3.2.4.3.3 การศึกษาผลกระทบความพรุนของชั้นเส้นใยสแตนเลส .....	65
3.2.4.3.4 การศึกษาผลกระทบจากความเร็วการไหลของน้ำเสีย.....	67
3.2.4.3.5 การศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้เส้นใยสแตนเลสที่ทำการ ปรับปรุงพื้นผิวในระบบHGMS.....	68
3.2.4.3.6 การศึกษาผลของปริมาณอนุภาคตัวกลางดูดซับต่อประสิทธิภาพ การแยกด้วย HGMS .....	70
3.2.4.3.7 การศึกษาผลของชนิดอนุภาคตัวกลางดูดซับชนิดมีรูพรุน และ อนุภาคกลมเกลี้ยงต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS.....	71
3.2.4.3.8 การวิเคราะห์หาปริมาณตัวกลางดูดซับในสารละลาย .....	74
บทที่ 4 ผลการวิจัย .....	75
4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ.....	75

4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก .....	75
4.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว .....	77
4.1.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับ .....	77
4.1.4 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ และขนาดอนุภาค .....	80
4.2 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบที่ละเท .....	83
4.2.1 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับแอซิดบลู 45 .....	83
4.2.2 การวิเคราะห์สมดุลการดูดซับแอซิดบลู 45 .....	86
4.3 การศึกษาลักษณะสมบัติของเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว .....	90
4.4 การศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้ HIGH GRADIENT MAGNETIC SEPARATE FILTER (HGMS) .....	92
4.4.1 การศึกษาผลกระทบจากสนามแม่เหล็กบนเส้นใยสแตนเลส .....	92
4.4.2 การศึกษาผลกระทบจากความสูงของชั้นเส้นใยสแตนเลส .....	94
4.4.3 การศึกษาผลกระทบความพรุนของชั้นเส้นใยสแตนเลส .....	95
4.4.4 การศึกษาผลกระทบจากความเร็วการไหลของน้ำเสีย .....	96
4.4.5 การศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้เส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวในระบบ HGMS .....	98
4.4.6 การศึกษาผลของปริมาณอนุภาคตัวกลางดูดซับต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS .....	99
4.4.7 การศึกษาผลของชนิดอนุภาคตัวกลางดูดซับชนิดมีรูพรุน และอนุภาคกลมเกลี้ยงซับต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS .....	101
4.5 การพิจารณาร่วมระหว่างการศึกษากระบวนการดูดซับแบบที่ละเท และการศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้ HIGH GRADIENT MAGNETIC SEPARATE FILTER (HGMS) .....	102
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย .....	104

5.1 สรุปผลการวิจัย .....	104
5.1.1 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบทีละเท.....	104
5.1.1.1 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับแอซิดบลู 45.....	104
5.1.1.2 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับแอซิดบลู 45.....	104
5.1.2 การศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้เส้นใยสแตนเลสในระบบ HGMS.....	104
5.1.2.1 การศึกษาผลกระทบจากสนามแม่เหล็กบนเส้นใยสแตนเลส.....	104
5.1.2.2 การศึกษาผลกระทบจากความสูงของชั้นเส้นใยสแตนเลส .....	105
5.1.2.3 การศึกษาผลกระทบความพรุนของชั้นเส้นใยสแตนเลส.....	105
5.1.2.4 การศึกษาผลกระทบจากความเร็วการไหลของน้ำเสีย .....	105
5.1.2.5 การศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้เส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุง พื้นผิวในระบบ HGMS .....	105
5.1.2.6 การศึกษาผลของปริมาณอนุภาคตัวกลางดูดซับต่อประสิทธิภาพการแยก ด้วย HGMS.....	106
5.1.2.7 การศึกษาผลของชนิดอนุภาคตัวกลางดูดซับชนิดมีรูพรุนและอนุภาคกลม เกลี้ยงต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS .....	106
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	106
รายการอ้างอิง .....	107
ภาคผนวก.....	110
ภาคผนวก ก.....	111
ภาคผนวก ข .....	113
ภาคผนวก ค.....	123
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	141



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	ประเภทสีย้อม .....	9
ตารางที่ 2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยบางประเภทกับประเภทของสีย้อม..	11
ตารางที่ 2.3	คุณสมบัติของแอซิดบลู 45 .....	12
ตารางที่ 2.4	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค .....	14
ตารางที่ 2.5	การจำแนกประเภทของแม่เหล็กตามคุณสมบัติ .....	27
ตารางที่ 2.6	เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ ด้วยวิธีต่อติดหมู่ฟังก์ชัน (POST-SYNTHETIC GRAFTING) และ ควบแน่นร่วม (CO-CONDENSATION OR DIRECT SYNTHESIZE).....	32
ตารางที่ 2.7	คุณสมบัติของ (3-AMINOPROPYL) TRIMETHOXYLANE .....	33
ตารางที่ 2.8	คุณสมบัติของ (3-MERCAPTOPROPYL) TRIMETHOXYLANE .....	34
ตารางที่ 2.9	สรุปข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัย .....	46
ตารางที่ 3.1	โครงสร้างของหมู่ฟังก์ชันหลังการปรับแต่งพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ .....	54
ตารางที่ 3.2	พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของตัวกลางดูดซับ .....	55
ตารางที่ 3.3	สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 45 .....	57
ตารางที่ 3.4	สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาสมดุลการดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 45 .....	58
ตารางที่ 3.5	สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาลักษณะสมบัติของเส้นใยสแตนเลสและเส้นใย สแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว .....	61
ตารางที่ 3.6	สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของสนามแม่เหล็กบนเส้นใยสแตนเลสต่อ ประสิทธิภาพในการแยกตัวกลางดูดซับ .....	63
ตารางที่ 3.7	สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นเส้นใยสแตนเลส .....	65
ตารางที่ 3.8	สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของความพรุนของชั้นเส้นใยสแตนเลส .....	66
ตารางที่ 3.9	สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบจากความเร็วการไหลของน้ำเสีย .....	68

ตารางที่ 3.10	สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้เส้นใยสแตนเลสที่ ทำการปรับปรุงพื้นผิวในระบบ HGMS .....	69
ตารางที่ 3.11	สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของปริมาณอนุภาคตัวกลางดูดซับต่อ ประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS .....	71
ตารางที่ 3.12	สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของชนิดอนุภาคตัวกลางดูดซับชนิดมีรูพรุน และอนุภาคกลมเกลี้ยงต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS .....	73
ตารางที่ 4.1	ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ ด้วยเครื่อง CNS/O ANALYZER .....	77
ตารางที่ 4.2	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับ .....	80
ตารางที่ 4.3	สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด .....	83
ตารางที่ 4.4	ค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ AB45 บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ .....	85
ตารางที่ 4.5	ค่าตัวแปรสมดุลการดูดซับ AB45 บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ .....	88
ตารางที่ 4.6	มุมมองของหยดน้ำบนผิวสแตนเลสที่ปรับปรุงพื้นผิวแล้ว และไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว .....	92

## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	โครงสร้างโมเลกุลของ สีแอสิต บลู 45 (AB 45) .....	11
รูปที่ 2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า MAGNETIZATION (M) กับ ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ของอนุภาคซูเปอร์พาราแมกเนติก .....	28
รูปที่ 2.3	ลักษณะพื้นผิวของอนุภาคเมโสพอร์สซิลิกาขนาดนาโนจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	29
รูปที่ 2.4	โครงสร้างโมเลกุลของสารปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันอะมิโนที่จะ นำมาใช้ในการปรับแต่งพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ ได้แก่ 3-AMINOPROPYLTRIMETHOXY SILANE .....	33
รูปที่ 2.5	โครงสร้างโมเลกุลของสารปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันเมอแคปโตที่จะนำมาใช้ในการปรับแต่งพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ ได้แก่ (3-MERCAPTOPROPYL) TRIMETHOXY SILANE .....	34
รูปที่ 3.1	แผนการทดลองศึกษาการดูดซับสีย้อมและการตัดแยกตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกภายใต้สนามแม่เหล็กด้วยเส้นใยสแตนเลสที่ปรับปรุงพื้นผิว .....	48
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก .....	50
รูปที่ 3.3	แผนผังแสดงการติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดลอง โดยลูกศรแสดงทิศทางการไหลของน้ำเสีย .....	59
รูปที่ 3.4	การติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดลอง.....	59
รูปที่ 3.5	การศึกษาลักษณะสมบัติของเส้นใยสแตนเลส และเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว .....	61
รูปที่ 3.6	การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ .....	61
รูปที่ 3.7	การแบ่งประเภทความชอบน้ำตามมุมสัมผัสของหยดน้ำ .....	62
รูปที่ 3.8	การศึกษาผลกระทบของสนามแม่เหล็กบนเส้นใยสแตนเลส .....	63
รูปที่ 3.9	การศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นเส้นใยสแตนเลส .....	64
รูปที่ 3.10	การศึกษาผลกระทบของความพรุนของชั้นเส้นใยสแตนเลส .....	66
รูปที่ 3.11	การศึกษาผลกระทบจากความเร็วการไหลของน้ำเสียผ่านเส้นใยสแตนเลส .....	67

รูปที่ 3.12 การศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้เส้นใยสแตนเลส ที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว ในระบบHGMS .....	69
รูปที่ 3.13 การศึกษาผลของปริมาณอนุภาคตัวกลางดูดซับต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS .....	71
รูปที่ 3.14 การศึกษาผลของชนิดอนุภาคตัวกลางดูดซับชนิดมีรูพรุน และอนุภาคกลมเกลี้ยง ต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS .....	73
รูปที่ 4.1 ผล XRD ของตัวกลางดูดซับชนิด HMS-SP .....	76
รูปที่ 4.2 ผล XRD ของตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP .....	76
รูปที่ 4.3 ผล XRD ของตัวกลางดูดซับชนิด M-HMS-SP .....	76
รูปที่ 4.4 การจำแนกไอโซเทอมการดูดซับก๊าซทั้ง 6 ชนิดตาม IUPAC .....	78
รูปที่ 4.5 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ (A) HMS-SP (B) A-HMS-SP (C) M-HMS-SP.....	79
รูปที่ 4.6 การกระจายขนาดของรูพรุน (PORE SIZE DISTRIBUTION) (BJH) ของ (A) HMS-SP (B) A-HMS-SP (C) M-HMS-SP .....	80
รูปที่ 4.7 รูปถ่ายตัวกลางดูดซับชนิด S-SP, HMS-SP, A-S-SP และ A-HMS-SP.....	82
รูปที่ 4.8 จลนพลศาสตร์การดูดซับ AB45 บนตัวกลางดูดซับชนิด HMS-SP, A-HMS-SP, M-HMS-SP, S-SP, A-S-SP และ M-S-SP .....	84
รูปที่ 4.9 ความเข้ากันได้ของสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับที่ 1 เสมือน และ 2 เสมือน ของการดูดซับ AB45 บนตัวกลางดูดซับชนิด A) HMS-SP, B) A-HMS-SP, C) M-HMS-SP, D) S-SP, E) A-S-SP และ F) M-S-SP .....	86
รูปที่ 4.10 สมดุลการดูดซับ AB45 บนตัวกลางดูดซับชนิด HMS-SP, A-HMS-SP, M-HMS-SP, S-SP, A-S-SP และ M-S-SP .....	88
รูปที่ 4.11 ความเข้ากันได้ของสมการสมดุลการดูดซับแลงก์เมียร์ และฟรุนด์ลิชของ การดูดซับ AB45 บนตัวกลางดูดซับชนิด A) HMS-SP, B) A-HMS-SP, C) M-HMS-SP, D) S-SP, E) A-S-SP และ F) M-S-SP .....	89

รูปที่ 4.12 รูปถ่ายเปรียบเทียบลักษณะผิวหน้าของสแตนเลส .....	90
รูปที่ 4.13 รูปถ่ายการวัดมุมของหยดน้ำบนผิวสแตนเลส .....	91
รูปที่ 4.14 รูปถ่ายการวัดมุมของหยดน้ำบนผิวสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว .....	91
รูปที่ 4.15 ผลการศึกษาผลกระทบจากสนามแม่เหล็กในการแยกตัวกลางดูดซับออกจากน้ำ ที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับ 5 กรัมต่อลิตร .....	93
รูปที่ 4.16 ผลการศึกษาผลกระทบจากความสูงของชั้นกรอง ในการแยกตัวกลางดูดซับ ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตรออกจากน้ำที่ความสูงชั้นกรอง 1.5, 3 และ 5 เซนติเมตร .....	94
รูปที่ 4.17 ผลการศึกษาผลกระทบจากความสูงของชั้นกรอง ในการแยกตัวกลางดูดซับ ความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตรออกจากน้ำ ที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 และ 3 เซนติเมตร.....	95
รูปที่ 4.18 ผลการศึกษาผลกระทบจากความพรุนของชั้นกรอง ในการแยกตัวกลางดูดซับ ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตรออกจากน้ำ ที่ความพรุนชั้นกรอง 95.28%, 96.85% และ 98.43% .....	96
รูปที่ 4.19 ผลการศึกษาผลกระทบจากความเร็วการไหล ในการแยกตัวกลางดูดซับ ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตรออกจากน้ำ ที่ความเร็วการไหล 16.43, 32.87 และ 65.73 เซนติเมตรต่อนาที .....	97
รูปที่ 4.20 ผลการศึกษาผลกระทบจากชั้นกรองเส้นใยสแตนเลส และชั้นกรองเส้นใย สแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว ในการแยกตัวกลางดูดซับความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตรออกจากน้ำ .....	99
รูปที่ 4.21 ผลการศึกษาผลกระทบจากชั้นกรองเส้นใยสแตนเลส ในการแยกตัวกลางดูดซับ ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 5 กรัมต่อลิตรออกจากน้ำ .....	100
รูปที่ 4.22 ผลการศึกษาผลกระทบจากชนิดอนุภาคตัวกลางดูดซับชนิดมีรูพรุนและ อนุภาคกลมเกลี้ยงต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS .....	101

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มา และความสำคัญของปัญหา

ปัญหาจากมลภาวะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอเป็นผลกระทบที่ตามมาจากการขยายตัวของสถานะเศรษฐกิจที่พัฒนาไปอย่างรวดเร็วย่อมเป็นสิ่งที่ไม่สามารถจะหลีกเลี่ยงได้ อันเนื่องมาจากการพยายามเพิ่มความสามารถในการผลิต เพื่อตอบสนองความต้องการของตลาด และกระแสแฟชั่นที่มีเพิ่มขึ้นและเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ไม่เว้นแม้แต่อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มในประเทศไทย

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมฟอกย้อม นับเป็นอุตสาหกรรมชั้นกลางในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นขั้นตอนที่จะเปลี่ยนวัสดุสิ่งทอที่อยู่ในรูปของเส้นด้าย หรือผ้าดิบ ให้เป็นวัสดุสำเร็จรูปที่สามารถนำไปผลิตต่อ หรือจำหน่ายให้แก่ผู้บริโภคต่อไป กระบวนการผลิตที่เกิดในอุตสาหกรรมสีฟอกย้อมต้องใช้สารเคมีเป็นส่วนประกอบทั้งสิ้น ทั้ง กรด ต่าง สารปรับปรุงคุณภาพ สารฟอกขาว ทำให้ต้องมีการใช้น้ำเป็นปริมาณมากเพื่อให้กระบวนการต่างๆ ดำเนินไปอย่างเรียบร้อยเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสู่ตลาดต่อไป

สำหรับสีย้อมที่ใช้กันทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ มักเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างซับซ้อนทำให้ยากต่อการบำบัดด้วยกระบวนการทางชีววิทยาทั่วไป หรือหากย่อยสลายได้ก็ จะเกิดผลิตภัณฑ์ในกระบวนการย่อยสลายซึ่งมักจะเป็นสารประกอบที่เป็นพิษ (PUNYAPALAKUL และ TAKIZAWA, 2006) ทำให้น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอทั่วไปมีสีที่นํารังเกียจต่อผู้ที่ได้พบเห็น ซ้ำยังก่อให้เกิดปัญหาทางมลพิษที่มากกว่าแค่มลภาวะทางสายตา และหากมลพิษด้านสีมีค่า สูงเกินไปจะไปขัดขวางการเดินทางของแสงอาทิตย์ทำให้พืชใต้น้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ (สมาคม วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544) และเนื่องจากน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอเหล่านี้มีความเข้มข้นสีค่อนข้างสูงจึงจำเป็นต้องบำบัดสีก่อนปล่อยออกสู่ธรรมชาติ กระบวนการดูดซับด้วย ถ่านกัมมันต์เป็นที่นิยมและมักถูกเพิ่มเติมเข้ามาในกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอก ย้อมสิ่งทอเพื่อกำจัดสีที่ตกค้างซึ่งไม่สามารถกำจัดได้โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไป แต่ เนื่องจากความสามารถของถ่านกัมมันต์ที่สามารถดูดซับมลสารได้หลากหลายมาก ทำให้ต้องใช้ ปริมาณมากกว่าที่จะบำบัดสีของน้ำเสียให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และพบว่าไม่คุ้มค่าที่จะฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ เนื่องจากการชะละลายมลสารออกจากถ่านกัมมันต์นั้นทำได้ยาก จำเป็นต้องนำไปกำจัด ด้วยการเผาที่ความร้อนสูง ซึ่งต้องใช้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง ด้วยสาเหตุของปัญหาดังกล่าวจึงมีความสนใจในการหาหนทางและพัฒนาตัวกลางดูดซับที่เป็นสารอนินทรีย์ที่มีคุณสมบัติการคัดเลือกมล

สารที่เป็นเป้าหมายสูง และสามารถทำการฟื้นฟูสภาพได้ง่ายโดยกระบวนการชะละลาย ซึ่งตัวกลางดูดซับที่มีศักยภาพในการพัฒนามากที่สุดได้แก่วัสดุรูพรุนซิลิกา เนื่องจากพื้นที่ผิวและโครงสร้างซิลิกาสามารถปรับปรุงพื้นที่ผิวได้ง่าย, มีพื้นที่ผิวมาก, มีความเป็นเอกรูป และมีความเสถียรทางชีวภาพมาก (VOGT และคณะ, 2010) ด้วยความสามารถของซิลิกาที่สามารถปรับปรุงพื้นที่ผิวได้ง่าย จึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมต่อการใช้กับการต้องการดูดซับมลสารที่มีความจำเพาะเจาะจง ทำให้มีแนวโน้มในการลดการแย่งชิงพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับของมลสารที่ไม่ใช่เป้าหมาย ส่งผลให้สามารถลดปริมาณตัวกลางดูดซับลงได้ ช่วยแก้ปัญหาของถ่านกัมมันต์ที่สามารถดูดซับมลสารได้หลากหลายชนิดมากเกินไป และสามารถฟื้นฟูสภาพตัวกลางดูดซับได้ง่ายอีกด้วย

ถึงแม้ว่าการประยุกต์ใช้ตัวกลางดูดซับในระบบแบบคอลัมน์ (COLUMN) เป็นที่นิยมมากกว่าระบบแบบทีละเท (BATCH) เนื่องจากไม่มีความจำเป็นต้องคัดแยกตัวกลางดูดซับออกจากน้ำเสีย แต่อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้ตัวกลางดูดซับแบบทีละเท จะมีประสิทธิภาพการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักตัวกลางดูดซับสูงกว่าแบบคอลัมน์ (COONEY, 1998) แต่อย่างไรก็ตามระบบแบบทีละเทมีข้อจำกัดในการคัดแยกตัวกลางดูดซับออกจากน้ำเสีย ซึ่งยุ่งยากและต้องการพื้นที่ในการสร้างระบบคัดแยกเฉพาะ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ตัวกลางดูดซับสังเคราะห์ที่มีคุณสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกและสามารถปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเพื่อแก้ปัญหาด้านการดูดซับแบบคัดเลือกและง่ายต่อการแยกออกจากน้ำเสียโดยอาศัยคุณสมบัติทางแม่เหล็กหลังจากกระบวนการดูดซับเสร็จสิ้น

โดยงานวิจัยนี้จะดำเนินการสังเคราะห์อนุภาคนาโนที่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก ( $Fe_3O_4$ ) (DENG และคณะ, 2005; QU และคณะ, 2010) และเคลือบทับด้วย เมโสพอร์ัสซิลิเกต (MESOPOROUS SILICATE) (VOGT และคณะ, 2010) และต่อติดหมู่ฟังก์ชันชนิดต่างๆ ที่มีคุณสมบัติความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำแตกต่างกัน จากนั้นจึงนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวกลางดูดซับเพื่อกำจัดสีย้อม แอซิดบลู 45 ในน้ำเสียแบบทีละเท และทำการแยกตัวกลางดูดซับออกจากน้ำเสียโดยการไหลออกผ่านคอลัมน์ตัวกลางสแตนเลสที่มีพื้นที่ผิวที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำภายใต้สนามแม่เหล็ก (DITSCH และคณะ, 2003) และสภาวะการเดินระบบแบบต่างๆก่อนปล่อยน้ำทิ้งออกนอกระบบ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความสามารถในการกำจัดสีย้อม แอซิด บลู 45 ในน้ำเสีย ด้วยตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก โดยเปรียบเทียบระหว่างอนุภาคแบบกลมเกลี้ยงและแบบมีรูพรุน

1.2.2 เพื่อศึกษาความสามารถในการกำจัดสีย้อม แอซิด บลู 45 ในน้ำเสีย ด้วยตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก โดยเปรียบเทียบระหว่างตัวกลางดูดซับที่ไม่ได้ทำการต่อติดหมู่ฟังก์ชัน ตัวกลางดูดซับที่ทำการต่อติดหมู่ฟังก์ชันด้วยหมู่อะมิโน และตัวกลางดูดซับที่ทำการต่อติดหมู่ฟังก์ชันด้วยหมู่เมอร์แคปโต

1.2.3 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกออกจากระบบหลังจากทำการดูดซับแล้วด้วยสนามแม่เหล็กผ่านตัวกลางเส้นใยสแตนเลส โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ไม่ได้ทำการปรับผิว และตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับพื้นผิวแล้ว

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3.2 ทำการทดลองการดูดซับแบบที่ละเท (BATCH REACTOR)

1.3.3 ตัวกลางดูดซับที่ทำการศึกษาได้แก่ชนิดอนุภาคกลมเกลี้ยงและแบบมีรูพรุน ซึ่งถูกปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยการต่อติดหมู่ฟังก์ชัน โดยจะใช้แมกนีไทต์ ( $Fe_3O_4$ ) เป็นตัวกลางดูดซับชนิดอนุภาคกลมเกลี้ยง และแมกนีไทต์ ( $Fe_3O_4$ ) เคลือบซิลิกา ตัวกลางดูดซับชนิดอนุภาคแบบมีรูพรุน แล้วทำการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันที่ผิวหน้าด้วยหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์อะมิโน (3-AMINOPROPYLTRIMETHOXY) และเมอร์แคปโต (-MERCAPTOTRIMETHOXY)

1.3.4 การศึกษาลักษณะของตัวกลางดูดซับ ได้แก่ ลักษณะพื้นผิวของตัวกลางดูดซับด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสแกน (SCANNING ELECTRON MICROSCOPE, SEM), พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณพื้นที่ผิว (BET SURFACE AREA ANALYZER), การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FOURIER TRANSFORM INFRARED SPECTROMETER, FTIR)

1.3.5 สารถูกดูดซับได้แก่ สีแอซิด บลู 45 (ACID BLUE 45 : AB45) และวัดค่าสีย้อมในน้ำด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์



1.3.6 ตัวกลางที่ใช้ในการแยกตัวกลางดูดซับออกจากระบบคือ เส้นใยสแตนเลส โดยใช้ฝอยสแตนเลสสำหรับงานขัดล้าง ทรายก๊อตซ์-ไบรต์ ของบริษัท 3เอ็ม ประเทศไทย และเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับพื้นผิว ทำการเคลือบเส้นใยด้วยสารประกอบของซิลิกาและเฮกซะเมทิลไดซิลิโคน (HMDS) โดยการเคลือบด้วยวิธีการจุ่ม (DIP COAT TECHNIQUE)

1.3.7 ศึกษาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคตัวกลางดูดซับออกจากระบบ ของชนิดตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ไม่ได้ทำการปรับพื้นผิว และตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับพื้นผิวแล้ว ที่สภาวะต่างๆ คือความสูงของชั้นตัวกลาง 1.5 เซนติเมตรและความเร็วการไหลเข้าของน้ำเสีย 32.87 เซนติเมตรต่อนาที ภายใต้สนามแม่เหล็ก

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อทราบถึงความสามารถในการดูดซับสีย้อม แอซิด บลู 45 ด้วยตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดอนุภาคแบบกลมเกลี้ยงและแบบมีรูพรุน

1.4.2 เพื่อทราบถึงประสิทธิภาพของการนำเส้นใยสแตนเลสมาใช้เป็นตัวกลางในการคัดแยกอนุภาคตัวกลางดูดซับออกจากระบบ ทั้งเส้นใยสแตนเลสแบบไม่ปรับปรุงผิวหน้า และเส้นใยสแตนเลสแบบปรับปรุงผิวหน้า

1.4.3 เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบบำบัดสีย้อมออกจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการดูดซับ และแยกตัวกลางดูดซับออกจากระบบโดยใช้เส้นใยสแตนเลสเป็นตัวกลางได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 อุตสาหกรรมสิ่งทอ

อุตสาหกรรมสิ่งทอ หมายถึง อุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการถักทอเส้นใยต่างๆ ทั้งเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ และเส้นใยที่เกิดจากการสังเคราะห์หรือเส้นใยประดิษฐ์ อุตสาหกรรมสิ่งทอเริ่มจากการผลิตเส้นใยแล้วนำมาปั่นเป็นเส้นด้าย ก่อนจะทอให้เป็นผืนผ้า หรือเป็นผลิตภัณฑ์เส้นด้ายที่มีคุณสมบัติต่อการนำไปใช้ต่อ ไม่ว่าจะเป็นการนำไปพิมพ์ ย้อม หรือทำชาว เมื่อเรียบเรียงแล้วจึงนำมาตกแต่งด้วยสารเคมีเพื่อให้ได้คุณสมบัติเป็นไปตามที่ตลาดต้องการ

โดยทั่วไป เส้นใยที่นำมาเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมสิ่งทอจะแบ่งออกได้เป็นสองประเภทคือ เส้นใยจากธรรมชาติ (NATURAL FIBER) ได้แก่ เส้นใยที่ได้จากพืชและสัตว์ เช่น ฝ้าย ป่าน ไหม และเส้นใยที่ได้จากการสังเคราะห์ หรือเส้นใยประดิษฐ์ (MAN-MADE FIBER) ได้แก่ เส้นใยที่มนุษย์เป็นผู้ผลิตขึ้นเอง ได้แก่ ไนลอน โพลีเอสเตอร์ เรยอน

ในอุตสาหกรรมโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอจะแบ่งการผลิตคร่าวๆ เป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ การปั่นด้าย การทอ และการย้อมสี (มณฑา จันท์เกตุเลียด, 2541)

##### 2.1.1 กระบวนการปั่นด้าย (SPINNING PROCESS)

เป็นกระบวนการที่นำเอาเส้นด้ายสั้นๆมารวมกันให้เป็นเส้นด้ายยาวที่ขนาดที่ต้องการ แล้วทำการบิดเกลียวให้เส้นใยยึดกันแน่น

##### 2.1.2 กระบวนการทอผ้า (WEAVING PROCESS)

เป็นกระบวนการที่ใช้ด้ายพุ่ง (WEFT) และด้ายยืน (WRAP) มาขัดกันให้ได้เป็นผ้าทอ ในการสอดด้ายพุ่งและด้ายยืนนั้นมีอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน แต่ตามหลักการสอดขัดกันขึ้นเบื้องต้น สามารถแบ่งลายทอได้ 3 แบบ คือ การทอลายขัด การทอลายสอง และการทอลายตัวน

##### 2.1.3 กระบวนการย้อมสี และตกแต่งผ้า (DYEING AND FINISHING PROCESS)

เป็นกระบวนการผลิตขั้นสุดท้ายของอุตสาหกรรมสิ่งทอก่อนจะได้ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย คือ ผ้าทอสีสันท่างๆตามที่ต้องการ โดยสำหรับกระบวนการสุดท้ายสามารถแบ่งย่อยได้อีก 2 ขั้นตอนคือ

- กระบวนการเตรียมผ้า (PRETREATMENT) เพื่อให้การย้อมสีและการตกแต่งผ้าสามารถทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นนั้น ในกรณีที่ใช้เส้นใยจากธรรมชาติจำเป็น

จะต้องผ่านการขจัดสิ่งสกปรกที่เจือปนมากับเส้นใยออกก่อน รวมทั้งต้องกำจัดแป้งที่ลงตัวยีนออกด้วย แต่ถ้าหากเส้นใยที่เลือกใช้เป็นเส้นใยประดิษฐ์ก็จะเป็นเส้นใยที่สะอาดอยู่แล้ว ทำให้การล้างแป้งออกจากเส้นใยนั้นทำได้ง่ายขึ้นด้วย

- กระบวนการฟอกย้อม (DYEING PROCESS) มีสองขั้นตอนที่ต้องจัดเตรียมคือ การเตรียมวัสดุสิ่งทอ และขั้นตอนการย้อม นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่จะส่งผลต่อการย้อม ซึ่งมีผลต่อลักษณะของน้ำเสียที่ออกจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ ดังนี้

1. สีย้อม (DYE) สีย้อมผ้ามีอยู่หลายชนิด โดยแต่ละชนิดก็จะมีความสามารถในการย้อมติดกับเส้นใยแต่ละประเภทได้ไม่เหมือนกัน

2. สารช่วยย้อม (ADDITIVES) สารช่วยย้อมเป็นสารเคมีที่มีการเพิ่มลงไปในการย้อมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมให้มากขึ้น ทำให้ดูดติดสีง่ายขึ้น สีติดทนทานมากขึ้น เส้นใยผ้าหลังเคลือบมีความคงทนมากขึ้น สารช่วยย้อมที่สำคัญสามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ประเภท คือ

- กรด ใช้สำหรับย้อมเส้นใยจำพวกโปรตีน และใช้สำหรับเส้นใยไนลอน เมื่อใช้สีย้อมแอซิด
- ด่าง ใช้สำหรับย้อมเส้นใยเซลลูโลสด้วยสีย้อมอะโซอิก แวต และกำมะถัน
- เกลือ ใช้สำหรับย้อมแอซิด และใช้ได้กับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสทุกชนิด
- สารช่วยให้สีสม่ำเสมอใช้กับสีแวต ดิสเพอร์ส และสีแอซิดบางชนิด
- สารพา (CARRIER) ใช้เมื่อย้อมเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด
- สารละลายอินทรีย์ ใช้สำหรับย้อมขนสัตว์ และใยสังเคราะห์บางชนิด
- สารรีดิวซ์ ใช้รีดิวซ์สีบางชนิด เพื่อประโยชน์ในการดูดซึมเข้าเส้นใย

## 2.2 สีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ (ธนพร คำขจร, 2552)

สีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอในแต่ละโรงงานจะแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์ของการผลิต โดยประเภทของสีย้อมที่เลือกใช้จะมีอิทธิพลต่อลักษณะน้ำเสีย และการบำบัดน้ำเสียได้

### 2.2.1 การจำแนกสีย้อม

สีย้อมที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอในปัจจุบัน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

#### 2.2.1.1 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะทางกายภาพ

การจำแนกสีย้อมตามลักษณะทางกายภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ สีย้อม (DYES) แบ่งเป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้ และพิกเมนต์ (PIGMENT) คือสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมจะต้องทำการละลายในตัวกลาง หรือแขวนลอยในเรซิน คือจะต้องทำให้สีย้อมอยู่ในสภาพที่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่เส้นใยได้ เพื่อให้เกิดการติดกับเส้นใยได้ ซึ่งอาจเป็นกระบวนการเชิงกลหรือเชิงเคมี แต่เมื่อสีย้อมอยู่ในสภาพสารละลายแล้วก็ยากที่จะจำแนกได้ว่าสีย้อมนั้นละลายอยู่ในน้ำ หรืออยู่ในตัวทำละลาย ทำให้ยากต่อการจำแนกประเภทว่าเป็นสีย้อมหรือสียพิกเมนต์ การแบ่งแยกตามลักษณะทางกายภาพจึงทำให้เกิดความสับสนได้ง่าย

#### 2.2.1.2 การจำแนกสีย้อมตามส่วนประกอบทางเคมี

การจำแนกสีย้อมตามส่วนประกอบทางเคมีเป็นเรื่องซับซ้อน ต้องใช้ความรู้ทางด้านเคมีขั้นสูง นอกจากนี้ถึงแม้ว่าจะเป็นสีเดียวกันก็อาจจะมีวิธีย้อมที่แตกต่างกันได้ และใช้กับเส้นใยต่างชนิดกัน เช่นสีในกลุ่มแอโซ (AZO) สำหรับบางตัวที่สามารถย้อมได้โดยตรงก็จะจัดให้เป็นสีจำพวกไดเรกต์ (DIRECT DYE) ส่วนบางตัวที่จะติดกับเส้นใยได้ก็ต่อเมื่อน้ำย้อมมีสถานะเป็นกรด ก็จะจัดให้เป็นสีจำพวกแอซิด (ACID DYE) และบางตัวก็ต้องใช้สารบางอย่างช่วยในการทำให้ติดกับเส้นใย จึงจัดเป็นสีมอร์แดนต์ (MORDANT) ดังนั้นการจำแนกสีย้อมตามส่วนประกอบทางเคมีจึงเป็นเรื่องที่ยู่ยากต่อการเข้าใจและจดจำโดยเฉพาะกับผู้ที่มีพื้นฐานความรู้ทางด้านเคมีไม่เพียงพอ แต่สำหรับผู้มีความรู้นั้น การจำแนกตามส่วนประกอบทางเคมีนั้นว่ามีประโยชน์อย่างมาก

สีย้อมสามารถจำแนกตามส่วนประกอบทางเคมีได้ 11 ประเภท ได้แก่

- 1) AZO COLORANTS
- 2) PHENYLMETHANE DYES
- 3) XANTHENE DYES

- 4) INDIGOID DYES
- 5) POLYCYCLICQUINONE DYES
- 6) SULFUR FUSION DYES
- 7) AMINE OXIDATIONS COLORANTS
- 8) PHTHALOCYANINE COLORANTS
- 9) ONIUM DYES
- 10) REACTIVE DYES
- 11) PIGMENTS

### 2.2.1.3 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการนำไปใช้งาน

การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการนำไปใช้งานนับว่าเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในบรรดาผู้ใช้และอุตสาหกรรมผลิตสี เนื่องจากสะดวกแก่ผู้นำไปใช้มากที่สุด แม้แต่สมาคมผู้ย้อมและผู้ผลิตสี (THE SOCIETY OF DYES AND COLORANTS) ต่างยอมรับว่าเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด โดยสามารถจำแนกสีย้อมตามลักษณะการนำไปใช้งานได้ดังตารางที่

2.1

ตารางที่ 2. 1 ประเภทสีย้อม (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544)

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพและทางเคมี	เส้นใยที่เหมาะสม	พันธะหรือกลไกติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีย้อมแอซิด (ACID DYE)	-ประจุลบ -ละลายน้ำได้ดี -สีติดไม่แน่น	-ไนลอน -ขนสัตว์	-พันธะไอออนิก	-แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 3-5 -สมมติว่าเส้นใยมีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50-100 °ซ
สีย้อมเมทัลคอมเพล็กซ์เอซิด (METAL COMPLEX ACID DYE)	-ประจุลบ -ละลายน้ำได้ดี -สีติดแน่น	-ไนลอน -ขนสัตว์	-พันธะไอออนิก	-แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 5-7 -สมมติว่าเส้นใยมีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50-100 °ซ
สีย้อมไดเร็กต์ (DIRECT DYE)	-ประจุลบ -ละลายน้ำได้ดี -สีติดไม่แน่น	-ฝ้าย -วิสคอส	-พันธะไอออนิก	-แช่เส้นใยในสารละลายต่างอ่อน -เติมอิเล็กโตรไลต์ โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต และสีย้อม ที่อุณหภูมิ 98°ซ

ตารางที่ 2.1 ประเภทสีย้อม (ต่อ) (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544)

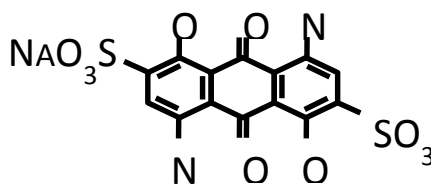
สีย้อมเบสิก (BASIC DYE OR CATIONIC DYE)	-ประจุบวก -ละลายน้ำได้ดี	-อะครีลิก	-พันธะไอออนิก	-แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 4-6 -เติมกับสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิ 100-105 °ซ
สีย้อมดิสเพอร์ส (DISPERSE DYE)	-ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยมาก -กระจายเป็นอนุภาคคอลลอยด์ -สีติดแน่นดี	-โพลีเอสเทอร์ -ไนลอน -อะครีลิก -เซลลูโลส -อะซิเตต	-เนื่องจากเป็นคอลลอยด์ จึงเป็นการดูดติดผิวเส้นใย	-แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 4-5 -เติมกับสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิ 130 °ซ
สีย้อมอะโซอิก (ASOIC DYE)	-เป็นคอลลอยด์หลังเกิดปฏิกิริยา -ไม่ละลายน้ำ -สีติดแน่นดี	-ฝ้าย -วิสคอส	-เกิดการตกผลึกขึ้นในเส้นใย	-ละลายสีย้อมในสารละลายต่างที่มีโซเดียมซัลเฟต -สีย้อมจะแพร่กระจายไปสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์
สีย้อมแว้ต (VAT DYE)	-เป็นคอลลอยด์หลังเกิดปฏิกิริยา -ไม่ละลายน้ำ -สีติดแน่นดี	-ฝ้าย -วิสคอส	-เกิดการตกผลึกขึ้นในเส้นใย	-ละลายสีย้อมในสารละลายต่างที่มีโซเดียมซัลเฟต -สีย้อมจะแพร่กระจายไปสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์
สีย้อมมอร์แดนต์ หรือ โครม (MORDANT OR CHROME)	-ประจุลบ -ละลายน้ำได้ดี -สีติดแน่น	-ขนสัตว์	-เกิดพันธะเชิงซ้อนของเส้นใยโครมและสีย้อม	-แช่เส้นใยในสารละลายกรด -เติมโซเดียมไดโครเมต เติมสีย้อม เพิ่มอุณหภูมิถึง 98 °ซ

ตารางที่ 2. 2 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยบางประเภทกับประเภทของสีย้อม (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544)

เส้นใย	โครงสร้างทางเคมีของเส้นใย	สีย้อมที่ใช้
ขนสัตว์	$\text{NH}_2\text{COOH}$ , $\text{CONH}$	แอซิด เมทัลคอมเพล็กซ์ โครม รีแอคทีฟ
ไหม	$\text{NH}_2\text{COOH}$ , $\text{CONH}$	แอซิด เมทัลคอมเพล็กซ์ เบสิก แว้ด
CUPROMMONIUM RAYON	$\text{OH}$ , $\text{COOH}$	ไดเร็กซ์ แว้ด ซัลเฟอร์
วิสคอส เรยอน	$\text{OH}$ , $\text{COOH}$	ไดเร็กซ์ แว้ด ซัลเฟอร์
ฝ้าย	$\text{OH}$	ไดเร็กซ์ แว้ด ซัลเฟอร์ รีแอคทีฟ
SECONDARY CELLULOSE ACETATE	$\text{OH}$ , $\text{COOH}$	ดิสเพอร์ส
CELLULOSE TRIACETATE	$\text{COOH}$	ดิสเพอร์ส
ไนลอน	$\text{NH}_2$ , $\text{COOH}$ , $\text{CONH}$	แอซิด เมทัลคอมเพล็กซ์ ไดเร็กซ์ ดิสเพอร์ส รีแอคทีฟ
อะครีลิก	$\text{COOH}$ , $\text{SO}_2\text{H}$ , $\text{OSO}_3\text{H}$	เบสิก ดิสเพอร์ส
โพลีเอสเตอร์	$\text{OH}$ , $\text{COOH}$ , $\text{COO}$	ดิสเพอร์ส

### 2.2.2 คุณสมบัติของสีย้อม แอซิด บลู 45

แอซิด บลู 45 เป็นสีย้อมชนิดแอซิด ที่ให้สีน้ำเงิน โดยปกติจะอยู่ในรูปของผงสีน้ำเงิน หรือสีม่วงเข้ม สามารถละลายได้ดีในน้ำ ละลายได้เล็กน้อยในเอทานอล ละลายติดกับเส้นใยได้ดี แต่ไม่ละลายในอะซิโตน, เบนซีน และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอจะใช้สำหรับย้อมสีของขนสัตว์ ไหม ผ้าผสมขนสัตว์ กระจดาช หนัง สบู่ และเป็นสีผสมในเครื่องสำอางค์ เกลือของโลหะหนักสามารถนำมาใช้เป็นหมึกได้



รูปที่ 2. 1 โครงสร้างโมเลกุลของ สีย้อมแอซิด บลู 45 (AB 45)

ตารางที่ 2. 3 คุณสมบัติของแอซิด บลู 45 (CORPORATION, 2008)



ชื่ออื่น (SYNONYMS)	C.I. 63010, 4, 8-DIAMINO-1, 5-DIHYDROXYANTHRAQUINONE-2, 6-DISULFONIC ACID, DISODIUM SALT.
หมายเลข CAS (CAS No.)	2861-02-1
ลักษณะทางกายภาพ (PHYSICAL STATE)	เป็นผงสีน้ำเงินหรือม่วงเข้ม
สูตรโมเลกุล (CHEMICAL FORMULA)	$\text{CH}_{14}\text{H}_8\text{N}_2\text{NA}_2\text{O}_{10}\text{S}_2$
น้ำหนักโมเลกุล (MOLECULAR WEIGHT)	474.32
โครงสร้างโมเลกุล (MOLECULE STRUCTURE)	แอนทราควิโนน
จุดหลอมเหลว (FREEZING/MELTING POINT)	>300 องศาเซลเซียส
ขนาดโมเลกุล (MOLECULAR SIZE)	กว้าง 0.69 นาโนเมตร x ยาว 1.13 นาโนเมตร
ประจุ (CHARGE)	ลบ
ความสามารถละลายน้ำ (DISSOLVE ABILITY)	20-30 กรัมต่อลิตร
PKA	2.0
ความยาวคลื่นที่ดูดซับ	595 นาโนเมตร

### 2.2.3 ความเป็นพิษของสีย้อม แอซิด บลู 45 (CORPORATION, 2008)

ในด้านความเป็นพิษของสีย้อม ถึงแม้ว่า แอซิด บลู 45 จะยังไม่มีการระบุแน่ชัด สำหรับการออกฤทธิ์เมื่อเข้าสู่ร่างกายทางระบบทางเดินอาหาร และระบบทางเดินหายใจ แต่มีข้อมูลเบื้องต้นสำหรับวิธีปฏิบัติตัว เมื่อสารเคมีเกิดการปนเปื้อนเข้าสู่ร่างกายดังนี้คือ

1. หากปนเปื้อนเข้าสู่ดวงตา อาจทำให้เกิดการระคายเคือง การรักษาคือ ให้ใช้น้ำสะอาดไหลผ่านตาเป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาที โดยสลับกับการกลอกตาไปมา ก่อนจะทำการปฐมพยาบาลขั้นต่อไป

2. หากมีการสัมผัสผิวหนัง อาจทำให้เกิดการระคายเคืองผิวหนัง การรักษาคือ ให้ใช้น้ำสะอาดปริมาณมากไหลผ่านผิวหนังบริเวณที่ปนเปื้อนเป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาที หากเสื้อผ้าหรือรองเท้ามีการปนเปื้อนด้วย ให้ถอดออกจากร่างกายไปซักก่อนนำกลับมาใช้

3. หากเข้าสู่ระบบทางเดินอาหาร อาจทำให้เกิดการระคายเคืองทางเดินอาหาร และอาจเป็นอันตรายหากมีการดื่มกลืนเข้าสู่ร่างกาย หากหมดสติ ห้ามป้อนอะไรเข้าสู่ทางเดินอาหารโดยเด็ดขาด ห้ามทำให้อาเจียน หากผู้ถูกปนเปื้อนยังมีสติ ให้บ้วนปากด้วยน้ำสะอาด และดื่มน้ำสะอาดหรือนม 2-4 แก้ว

4. หากหายใจเข้าไป อาจทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ สำหรับความเสียหายของร่างกายที่อาจปนเปื้อนจากการหายใจยังไม่ได้ระบุแน่ชัด การรักษาขั้นต้นคือ ให้รีบย้ายออกจากบริเวณที่มีอากาศปนเปื้อนโดยเร็วที่สุด หากผู้ถูกปนเปื้อนไม่หายใจให้ใส่เครื่องช่วยหายใจ หากหายใจลำบาก ให้ใส่เครื่องให้ออกซิเจน ก่อนจะทำการปฐมพยาบาลขั้นต่อไป

สีแอสิตบลูสามารถกำจัดได้ด้วยวิธีนำไปละลายหรือผสมกับตัวทำละลายที่เผาไหม้ได้แล้วนำไปเผาในเตาอบที่มีระบบห้องเผาแบบ AFTERBURNER เมื่อสิ้นสุดกระบวนการจะได้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ ซัลเฟอร์ออกไซด์ และไฮโดรเจนออกไซด์ ซึ่งเป็นก๊าซพิษที่ต้องนำไปบำบัดก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศโดยการผ่านเครื่องสครับเบอร์

#### 2.2.4 ค่าของสีที่ยอมให้ปนเปื้อนได้มากที่สุดในมาตรฐานน้ำดื่ม (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2521)

เนื่องจากในมาตรฐานคุณภาพน้ำที่จากรองงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2521) ไม่มีข้อกำหนดของสีที่ยอมในน้ำทิ้ง แต่อย่างไรก็ตาม ข้อบังคับที่มีอยู่ได้แก่มาตรฐานน้ำดื่มตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332 (พ.ศ. 2521) ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511 เรื่องกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคยอมให้น้ำมีสีปนเปื้อนได้สูงสุด 5 ในหน่วยแพลตินัม-โคบอลต์ และอนุโลมได้สูงสุด 15 ในหน่วยแพลตินัม-โคบอลต์ ดังที่ได้ระบุไว้ในตารางที่

2.4

ตารางที่ 2. 4 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2521)

คุณลักษณะ	ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	มาตรฐาน	
			เกณฑ์กำหนด สูงสุด (MAXIMUM ACCEPTABLE CONCENTRATION)	เกณฑ์อนุโลมสูงสุด <sup>A</sup> (MAXIMUM ALLOWABLE CONCENTRATION)
ทาง กายภาพ	1.สี (COLOR)	แพลตินัม-โคบอลท์ (PLATINUM-COBALT)	5	15
	2.รส (TASTE)	-	ไม่เป็นที่รังเกียจ	ไม่เป็นที่รังเกียจ
	3.กลิ่น (ODOR)	-	ไม่เป็นที่รังเกียจ	ไม่เป็นที่รังเกียจ
	4.ความขุ่น (TURBIDITY)	ซิลิกา สเกล ยูนิต (SILICA SCALE UNIT)	5	20
	5.ความเป็น กรด-ด่าง(PH)	-	6.5-8.5	9.2

### 2.3 ทฤษฎีการข้มสี

สีข้มเป็นสารเคมีที่ได้จากการสกัดน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน โดยเมื่อผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซีน ไทลีน แอนทราซีน โทลูอิน แนพทาลีน และพาราฟิน สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวดังกล่าวจะถูกนำไปผ่านกระบวนการจนกลายเป็นสีข้มหลากหลายชนิดซึ่งมีความเหมาะสมกับเส้นใยแต่ละชนิดต่างกันไป สีข้มที่เหมาะสมกับเส้นใยนั้นขึ้นอยู่กับศักยภาพการรวมตัวของสีกับเส้นใย ที่ต้องมีศักยภาพมากกว่าน้ำ โดยสภาวะดังกล่าวเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อโมเลกุลของสีข้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติดเส้นใยได้เอง (SUBSTANTIVELY) กับเส้นใยที่นำมาข้อม แล้วเกิดเป็นพันธะ (BOND) ยึดกันแน่น โดยสามารถแยกอิทธิพลเชิงเคมีที่ทำให้สีดูดติดเส้นใยออกเป็น 4 ชนิด คือ

- พันธะไฮโดรเจน (HYDROGEN BOND)
- แรงแวนเดอวาลส์ (VAN DER WAAL'S FORCE)
- แรงไอออน (IONIC FORCE)
- พันธะโควาเลนต์ (COVALENT BOND)

การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใย จำต้องอาศัยกำลังแรงที่เหล่านี้ไม่น้อยกว่าสองแรงขึ้นไป หรืออาจผสมผสานกันทั้ง 4 แรงก็เป็นได้ โดยแรงยึดติดทางเคมีที่มีความแรงสูงสุดคือ พันธะโควาเลนต์

สำหรับการดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใย นอกจากจะมีอิทธิพลเชิงเคมีทั้ง 4 ชนิดแล้ว ยังมีอิทธิพลด้านเรขาคณิต กล่าวคือรูปร่างและขนาดของโมเลกุลของสีย้อมมีผลต่อการยึดติดหรือมีผลกระทบต่อการใช้ย้อมอย่างมาก เช่น ถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีขนาดเล็กและยาวมาก โมเลกุลของสีย้อมนั้นก็จะสามารถผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้น ซึ่งทำให้การติดสีเกิดขึ้นได้ดียิ่งขึ้น หรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบนและมีด้านกว้างมากกว่าด้านยาวมากๆ จะทำให้สีติดทนนานยิ่งขึ้น อาจกล่าวได้ว่าการที่โมเลกุลของสีย้อมยึดเกาะกับโมเลกุลของเส้นใยเป็นผลเนื่องมาจากแรงทางเคมีและผลทางฟิสิกส์ร่วมกัน

## 2.4 นำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544)

### 2.4.1 แหล่งที่มาของน้ำเสีย

แหล่งที่มาของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอมาจากแหล่งต่างๆ ดังนี้

#### 2.4.1.1 น้ำที่ใช้ในกระบวนการ

น้ำที่ใช้ในกระบวนการได้แก่ น้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม พิมพ์ และตกแต่ง โดยน้ำในส่วนนี้จะมีสีเหลือจากกระบวนการย้อมไหลปะปนมากับน้ำที่ใช้ในกระบวนการซักล้าง หลังการฟอกย้อม

#### 2.4.1.2 น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ

เนื่องจากในกระบวนการฟอกย้อมจะมีการอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ในกรณีที่ใช้น้ำจากการเย็นตัวของไอน้ำนี้ และกลั่นตัวในหม้อไอน้ำก็จะได้น้ำสะอาดซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ได้ อีก แต่สำหรับไอน้ำที่ถูกส่งไปให้ความร้อนแก่น้ำย้อมโดยตรง จะไปรวมตัวกับน้ำย้อมให้เพิ่มปริมาณมากขึ้นและออกไปรวมกับน้ำเสีย

#### 2.4.1.3 น้ำหล่อเย็น

ในกระบวนการย้อมสำหรับบางโรงงานที่มีความจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของน้ำย้อมลงภายในระยะเวลาอันสั้น ก็จะใช้ น้ำหล่อเย็น ส่วนใหญ่เป็นน้ำสะอาดซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

#### 2.4.1.4 น้ำที่ใช้ในการล้างทำความสะอาดเครื่องจักรและโรงงาน

ส่วนใหญ่จะมีการปนเปื้อนของสารที่ใช้ในการทำมาความสะอาดและสิ่งสกปรกต่างๆ เช่น น้ำมันเครื่องจักร ดิน ทราาย เป็นต้น

#### 2.4.2 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอต่อสิ่งแวดล้อม

##### 2.4.2.1 สารอินทรีย์

1) ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ลดลง ส่งผลดังนี้

- สิ่งมีชีวิตในน้ำตาย
- ทำให้แหล่งน้ำฟอกตัวเอง (SELF PURIFICATION) ไม่ทัน
- ทำให้เกิดกลิ่น
- ทำให้สูญเสียโอกาสที่จะใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำนั้นในทางเศรษฐกิจ

2) สารอินทรีย์บางชนิดอาจส่งผลต่อสิ่งมีชีวิต ส่งผลดังนี้

- หากเป็นสารที่สลายตัวได้ยาก จะทำให้เกิดการสะสมตัวอยู่ในระบบนิเวศ (BIOACCUMULATION) เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

##### 2.4.2.2 อุณหภูมิ

น้ำเสียอุณหภูมิสูง ส่งผลดังนี้

- เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ
- ทำให้ความสามารถการละลายของออกซิเจนในน้ำค่าสูงสุดจะมีค่าลดลง
- เพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์

##### 2.4.2.3 ของแข็งแขวนลอย

น้ำเสียที่มีของแข็งแขวนลอยปริมาณมาก ส่งผลดังนี้

- เพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ
- ความสามารถในการตกตะกอนของสารแขวนลอยจะทำให้แหล่งน้ำตื้นเขินได้
- ทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ

##### 2.4.2.4 ของแข็งละลายน้ำ

ถ้าความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำได้บางชนิดมีส่วนประกอบของโลหะหนักก็อาจส่งผลต่อระบบนิเวศได้ เช่น เฮกซะวาเลนซ์โครเมียม มีความเข้มข้นสูงกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเป็นอันตรายต่อปลา หรือมีทองแดงความเข้มข้น 0.1-0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ก็จะมี

เป็นพิษต่อจุลชีพในน้ำ ทำให้สูญเสียโอกาสที่จะใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำนั้นในทางเศรษฐกิจได้

#### 2.4.2.5 สี

- ทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ
- ทำให้ปริมาณแสงที่จะผ่านลงสู่แหล่งน้ำลดลง ส่งผลให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ส่งผลไปถึงการที่ออกซิเจนสามารถละลายลงไปในน้ำได้น้อยลงด้วย

#### 2.4.2.6 โลหะหนัก

- ทำให้เกิดโรคร้ายแรงทั้งต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิตในน้ำและมนุษย์ได้
- เกิดการสะสมอยู่ในระบบนิเวศ

## 2.5 กระบวนการดูดซับ (ADSORPTION PROCESS)

กระบวนการดูดซับ เป็นหนึ่งในตัวช่วยของกระบวนการบำบัดมลสารโดยใช้การแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายที่เป็นของไหล คืออยู่ในเฟสของเหลวหรือเฟสก๊าซ ด้วยหลักการเคลื่อนย้ายมวลสารของตัวถูกดูดซับ (ADSORBATE) ไปยังตัวกลางดูดซับ (ADSORBENT) ซึ่งเป็นเฟสของแข็ง ทำให้เกิดการสะสมของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวกลางดูดซับ

### 2.5.1 แรงที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับ

แรงที่มีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ แรงทางกายภาพ และแรงทางเคมี

#### 2.5.1.1 แรงทางกายภาพ

##### 1. แรงแวนเดอร์วาลส์ (VAN DER WAAL'S FORCE)

อะตอมที่อยู่อย่างอิสระ หรือโมเลกุลที่ไม่มีสภาพขั้ว สามารถเกิดแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบของอิเล็กตรอนในโมเลกุลนั้นได้ ทำให้เกิดความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนที่ไม่สม่ำเสมอ ก่อให้เกิดสภาพขั้ว และสามารถถูกดูดด้วยตัวกลางดูดซับได้ แต่การดูดซับประเภทนี้มีระดับพลังงานต่ำ ซึ่งมีข้อดีคือจะทำให้การคายการดูดซับ (DESORPTION) เกิดได้ง่ายขึ้น และคุณสมบัตินี้จะทำให้การฟื้นฟูสภาพของตัวกลางดูดซับสามารถทำได้ง่ายขึ้น (เป็น REVERSIBLE REACTION)

##### 2. แรงทางไฟฟ้าสถิต (ELECTROSTATIC FORCE)

- แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วตรงข้ามทั้งสองโมเลกุล เกิดการจัดเรียงโมเลกุล (ORIENTATION EFFECT) ทำให้เกิดแรงดึงดูดกับโมเลกุลที่มีประจุขั้วตรงข้าม

- แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากผลของการกระจายอิเล็กตรอน (DISPERSION EFFECT) ทำให้อิเล็กตรอนของโมเลกุลไม่มีขั้วนั้น เคลื่อนที่อย่างไม่สม่ำเสมอไปกองอยู่ด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้เกิดสภาพขั้วดึงดูดโมเลกุลประเภทเดียวกันอย่างอ่อนๆ
- แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว กับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำ (INDUCTION EFFECT) ของโมเลกุลที่มีขั้วเมื่อเคลื่อนเข้าใกล้อีกโมเลกุลหนึ่งที่ตอนแรกไม่มีขั้ว แต่หลังจากเข้าใกล้โมเลกุลที่มีขั้ว จึงเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม และมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน

#### 2.5.1.2 แรงทางเคมี

เกิดจากการยึดเหนี่ยวจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือการให้อิเล็กตรอนระหว่างไอออนของตัวถูกดูดซับกับตัวกลางดูดซับ ได้เป็นสารประกอบใหม่ขึ้นที่บริเวณผิวของตัวกลางดูดซับ โดยแรงทางเคมีนี้จะมีค่ามากกว่าแรงทางกายภาพ และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นไม่สามารถย้อนกลับได้ (IRREVERSIBLE)

1. พันธะไฮโดรเจน (HYDROGEN BONDING) เป็นแรงที่เกิดจากการมีสภาพขั้วที่แข็งแรงระหว่างอะตอมไฮโดรเจน และ ELECTRONEGATIVE ATOM เช่นออกซิเจนและไนโตรเจน
2. พันธะโคเวเลนต์ (COVALENT BONDING) เป็นพันธะเคมีที่ใช้อิเล็กตรอนคู่กันระหว่างอะตอมทั้งสอง
3. HYDROPHOBIC FORCE: เป็นแรงที่เกิดจากสภาพความชอบน้ำของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิว ซึ่งการดูดซับที่ดีจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อตัวถูกดูดซับไม่ชอบน้ำ หรือไม่ค่อยละลายในน้ำ ทำให้เกิดโอกาสที่ตัวถูกดูดซับนั้นจะถูกดูดซับด้วยตัวกลางดูดซับมากกว่าละลายอยู่ในน้ำ

ลักษณะการดูดซับสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี มีรายละเอียดดังนี้คือ

1. การดูดซับทางกายภาพ (PHYSICAL ADSORPTION) (ชฎาภรณ์ บุญแท้, 2545)  
เป็นการดูดซับโมเลกุลของสารตัวถูกดูดซับในสารละลายด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลาย ทำให้โมเลกุลของสารสามารถยึดติดบนผิวของตัวกลางดูดซับได้ดีกว่าละลายอยู่ในสารละลายนั้น

สำหรับกรณีที่ตัวกลางดูดซับมีความพรุนสูง ของเหลวหรือก๊าซที่ควบแน่นจะซึมผ่านเข้าสู่ช่องว่างภายในตัวกลางดูดซับได้ แม้ความดันในระบบจะมีค่าต่ำกว่าความดันไอของระบบนั้นก็ตาม ปฏิกิริยาการดูดซับที่เกิดขึ้นได้ในอุณหภูมิปกติ แต่เมื่อลดความดันหรือเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง และเกิดการผันกลับ (REVERSIBLE INTERACTION) ซึ่งจะทำให้ตัวกลางดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวกลางดูดซับนั้น โดยจะเรียกปฏิกิริยาการดูดซับในช่วงดังกล่าวว่า DESORPTION

## 2. การดูดซับทางเคมี (CHEMICAL ADSORPTION) (ชฎาภรณ์ บุญแท้, 2545)

ปฏิกิริยาการดูดซับทางเคมีจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม เป็นการดูดซับที่สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูง (สำหรับสารบางชนิดจะไม่เกิดการดูดซับทางเคมีที่อุณหภูมิต่ำ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับได้) และมีความแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพอย่างมาก การดูดซับทางเคมีจะมีการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างพื้นผิวของตัวกลางดูดซับและตัวถูกดูดซับ โดยจะสร้างพันธะเกิดเป็นสารประกอบใหม่ขึ้นมา ทำให้ปริมาณของตัวกลางดูดซับลดลง และเนื่องจากการดูดซับไม่ได้เกิดทั่วทั้งพื้นผิว แต่เกิดเฉพาะพื้นผิวบริเวณที่สามารถเกิดพันธะเคมีได้เท่านั้นแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพที่ไม่เลือกที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปเกาะยังพื้นผิวส่วนใดก็ได้ ทำให้อัตราส่วนตัวถูกดูดซับต่อตัวกลางดูดซับสำหรับการดูดซับทางเคมี มีปริมาณน้อยกว่าการดูดซับทางกายภาพ

เนื่องจากการดูดซับทางเคมี เป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมี และเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของตัวกลางดูดซับ จึงทำให้การดูดซับประเภทนี้ไม่สามารถเกิดการคายดูดซับ (DESORPTION) และปฏิกิริยาย้อนกลับ (IRREVERSIBLE) ได้

ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพกับการดูดซับทางเคมี (ธนพร คำขจร, 2552)

1. การดูดซับทางกายภาพไม่เกี่ยวข้องกับการใช้อิเลคตรอนร่วมกัน และไม่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนอิเลคตรอน
2. การดูดซับทางกายภาพไม่มีการจำกัดเกี่ยวกับบริเวณที่ทำการเกิดปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกตัวกลางดูดซับดูดซับเข้าไบนั้น สามารถที่จะไปเกาะบนพื้นผิวส่วนใดก็ได้ แต่หากเป็นการดูดซับทางเคมีจะเลือกเฉพาะบริเวณที่โมเลกุลของมลสารและโมเลกุลบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับสามารถเกิดพันธะเคมีได้เท่านั้น
3. การดูดซับทางกายภาพสามารถทำให้เกิดชั้นของโมเลกุลได้หลายชั้น



4. การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยพลังงานมากระตุ้น ต่างจากกระบวนการดูดซับทางกายภาพที่สามารถเกิดขึ้นได้เอง
5. เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ค่าความร้อนของการดูดซับทางกายภาพมักจะมีค่าต่ำ คือมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของการกลายเป็นของเหลวเท่านั้น ส่วนค่าความร้อนของการดูดซับทางเคมีจะมีค่าสูงมาก โดยจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าความร้อนในกระบวนการดูดซับก็มีผลต่อระบบน้อยมากจนมักจะไม่นำมาพิจารณา (ในอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้การดูดซับแบบกายภาพมากกว่าการดูดซับแบบเคมี)

## 2.5.2 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (RATE OF MOLECULE TRANSFER)

(PUNYAPALAKUL และ TAKIZAWA, 2006)

อัตราการดูดซับ (ADSORPTION RATE) เป็นตัวบ่งชี้ถึงความเร็วที่ระบบจะใช้ในการเข้าสู่สมดุล โดยอัตราการดูดซับจะถูกควบคุมด้วยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุด คือใช้เวลานานที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล สำหรับขั้นตอนในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลสำหรับการดูดซับสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่

### 1. BULK TRANSFER

เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่จาก BULK SOLUTION ไปยังผิวหน้าของฟิล์มน้ำ หรือโมเลกุลที่ล้อมรอบตัวกลางดูดซับ โดยขั้นตอนนี้จะเป็ขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด

### 2. FILM TRANSPORT

การขนส่งชั้นฟิล์ม เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลชั้นผิวหน้าบางๆของของเหลวแทรกเข้าสู่ผิวหน้าของตัวกลางดูดซับ ทำให้เกิดกระบวนการแพร่ผ่านฟิล์ม (FILM DIFFUSION) สำหรับสภาวะที่มีความปั่นป่วนน้อย การขนส่งในชั้นฟิล์มนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญของอัตราการดูดซับ

### 3. INTERPARTICLE TRANSPORT

เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าสู่โพรง หรือรูพรุนของตัวกลางดูดซับ เรียกอีกชื่อหนึ่งคือ PORE DIFFUSION ทำให้เกิดการดูดซับขึ้น โดยทั่วไปและในสภาวะที่มีความปั่นป่วนมากเพียงพอ ขั้นตอนการแพร่สู่รูพรุนเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ

#### 4. ADSORPTION

การดูดซับเป็นขั้นตอนสุดท้ายที่ตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนตัวกลางดูดซับ

สำหรับการแพร่เข้าสู่รูพรุน (INTRAPARTICLE DIFFUSION) โดยส่วนมากแล้วมักจะใช้สมการ (2.1) เพื่ออธิบายกลไกการดูดซับ

$$Q_T = K_D T^{1/2} \quad (2.1)$$

$K_D$  คือ ค่าคงที่อัตราการแพร่เข้าสู่รูพรุน (มิลลิกรัม/กรัม<sup>๑/๒</sup> นาที<sup>๑/๒</sup>)

$Q_T$  คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวกลางดูดซับที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

#### 2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ

##### 2.5.3.1 อุณหภูมิ

มีผลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับ โดยอัตราเร็วจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิ และสำหรับในกรณีทั่วไป การเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ระบบจะเป็นการลดความสามารถในการดูดซับ เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

##### 2.5.3.2 ธรรมชาติของตัวทำละลาย

สมบัติของมลสารในน้ำเสียในเรื่องของการดูดติดผิวมีผลต่อการแย่งประจุในน้ำกับตัวกลางดูดซับ แต่ถือว่ามีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับผลที่เกิดจากการแตกตัวเป็นประจุของไอออนเกลือในน้ำเสีย

##### 2.5.3.3 พื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับ

โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการดูดซับจะแปรผันตามพื้นที่ผิว แต่ทั้งนี้ต้องพิจารณาขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับประกอบกันไปด้วย การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าขนาดของโพรงเล็กน้อย (พอดีที่จะสามารถเข้าโพรงได้) ถ้าขนาดของตัวถูกดูดซับมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนจะทำให้เกิดการดูดซับเฉพาะที่พื้นผิวภายนอก ส่งผลความสามารถในการเข้าสู่รูพรุนของตัวกลางดูดซับ โดยโมเลกุลขนาดเล็กจะสามารถถูกดูดเข้าไปในโพรงของตัวกลางดูดซับได้ดีกว่าโมเลกุลขนาดใหญ่

เนื่องจากค่าพื้นที่ผิวตัวกลางดูดซับตรวจวัดได้จากกระบวนการแทนที่โมเลกุลก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ ) เข้าไปในช่องว่าง ดังนั้นสำหรับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของ  $N_2$  จึงอาจไม่สามารถเข้าไปยังพื้นที่ในรูพรุนบางส่วนได้

#### 2.5.3.4 โครงสร้างรูพรุนของตัวกลางดูดซับ

สำหรับตัวกลางดูดซับที่มีโครงสร้างของรูพรุนที่เป็นเอกรูป (UNIFORM) คือมีขนาดใกล้เคียงกันจะให้ประสิทธิภาพในการจับมลสารเป้าหมายได้มากกว่า

#### 2.5.3.5 ธรรมชาติของตัวถูกละลาย

สารที่ละลายน้ำได้ หรือสารที่สามารถแตกตัวเป็นไอออนในสารละลายได้ จะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างมาก ทำให้ยากต่อการดูดซับ ในขณะที่สารที่ละลายน้ำได้น้อยหรือไม่ละลายน้ำจะสามารถเกาะติดบนผิวได้ดีกว่า เนื่องจากในการดูดซับนั้นตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย

#### 2.5.3.6 ค่า PH ของสารละลาย

ผลกระทบที่เกิดจากค่า PH ในสารละลายนั้นมีผลอย่างมากต่อกระบวนการดูดซับ โดยมีผลต่อการแตกตัวของประจุ และการละลายของสารต่างๆ ทำให้คุณสมบัติของสารและตัวกลางดูดซับเปลี่ยนไป เช่นที่ค่า PH ต่ำๆ โลหะหนักจะละลายน้ำมากกว่าตกตะกอน และจะมีไฮโดรเจนไอออนสูง ถ้าที่พื้นผิวเป็นประจุลบและมลสารที่ถูกดูดซับเป็นประจุบวก ไฮโดรเจนไอออนจะไปแย่งกับตัวกลางดูดซับ แต่ถ้ามลสารที่ถูกดูดซับเป็นประจุลบ มลสารนั้นก็จะเป็นรวมตัวกับไฮโดรเจนไอออน ทำให้มลสารเปลี่ยนรูปไป ในทางตรงกันข้าม ที่ค่า PH สูงๆ จะมีไฮดรอกซิลไอออนเป็นจำนวนมาก ทำให้พื้นที่ผิวที่ชอบน้ำจะถูกไฮดรอกซิลไอออนแย่ง ทำให้มลสารไปสร้างสารประกอบกับไฮดรอกซิลไอออนแทน ซึ่งก็จะทำให้มลสารเปลี่ยนรูปไป

#### 2.5.3.7 น้ำหนักและขนาดโมเลกุล

โดยส่วนมาก อัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราควบคุมกลไกการดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อตัวถูกละลายมีขนาดเล็กกว่าขนาดของโพรงเล็กน้อย (พอดีที่จะสามารถเข้าโพรงได้) ถ้าขนาดของตัวถูกละลายมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนจะทำให้เกิดการดูดซับเฉพาะที่พื้นผิว ส่งผลต่อการเข้าถึงพื้นที่ (ACCESSIBILITY) ของตัวกลางดูดซับ โดยโมเลกุลขนาดเล็กจะสามารถถูกดูดซับเข้าไปในโพรงของตัวกลางดูดซับได้ดีกว่าโมเลกุลขนาดใหญ่

#### 2.5.3.8 ความปั่นป่วน

ที่ความปั่นป่วนสูงๆ จะทำให้ชั้นฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบตัวกลางดูดซับจะมีความบางกว่าที่ระดับความปั่นป่วนต่ำ ที่ซึ่งยิ่งฟิล์มน้ำมีความหนามากก็จะเป็นอุปสรรคการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าหาตัวกลางดูดซับ ดังนั้นยิ่งความปั่นป่วนของน้ำมาก ชั้นฟิล์มจะบางขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่เข้าหาตัวกลางดูดซับเกิดได้รวดเร็วกว่า เป็นผลให้การแพร่ในรูพรุนเป็นตัวกำหนด

อัตราเร็วการดูดซับ จึงสามารถสรุปได้ว่าอัตราเร็วการดูดซับจะขึ้นกับการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำที่ล้อมรอบตัวกลางดูดซับ

#### 2.5.3.9 เวลาสัมผัส

เวลาสัมผัสเป็นตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ในการทดลองต้องใช้เวลาให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด โดยตัวกลางดูดซับแต่ละชนิดก็จะใช้เวลาไม่เท่ากัน ผู้ทดลองควรทำการทดสอบก่อนนำไปใช้งานจริง

#### 2.5.4 การศึกษาความสามารถในการดูดซับ (ADSORPTION ISOTHERM)

การดูดซับจากสารละลายมีผลต่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของของแข็ง ในขณะที่เกิดการดูดซับขึ้น ตัวทำละลายที่ถูกดูดติดผิวมีแนวโน้มที่จะหลุดออกมาสู่สารละลาย เมื่อถึงจุดที่อัตราการดูดซับมีค่าเท่ากับอัตราการคายและไม่มีการเปลี่ยนแปลงอีกต่อไป คือการเข้าสู่สภาวะคงที่ (EQUILIBRIUM STATE) ซึ่งเรียกว่า สมดุลของการดูดซับ (ADSORPTION EQUILIBRIUM) ที่จุดสมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของตัวกลางดูดซับหรือในของเหลว สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมด รวมไปถึงตัวถูกละลาย ตัวกลางดูดซับ ตัวทำละลาย พีเอช อุณหภูมิ และอื่นๆ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติด ณ จุดสมดุล โดยปกติจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย การแสดงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยของสารตัวกลางดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับ (ADSORPTION ISOTHERM) หรือสมดุลการดูดซับ นิยมใช้ศึกษาความสามารถในการดูดซับ โดยเรียกผลของความสัมพันธ์นี้ซึ่งเป็นค่าคงที่ว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับ (ADSORPTION ISOTHERM) ใช้ในการอธิบายสมดุลของระบบที่เกิดขึ้น เพื่อคำนวณออกแบบระบบ เพื่อหาปริมาณตัวกลางดูดซับที่ต้องใช้ในกระบวนการดูดซับตามแต่กรณี มีประโยชน์ในการหาความสามารถในการดูดซับของตัวกลางดูดซับ และเปรียบเทียบตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

สมการไอโซเทอร์มการดูดซับสามารถหาได้จากการทดลอง โดยใช้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวกลางดูดซับ และค่าความเข้มข้นของสารนั้นที่ยังเหลืออยู่ในน้ำ (ที่อุณหภูมิคงที่)

สมการไอโซเทอร์มการดูดซับมีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีที่อธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลายภาพแบบที่นำมาใช้อธิบายถึงข้อมูลของการดูดซับ ซึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาทฤษฎี สำหรับการนำมาใช้นั้น จะเลือก

สมการที่เมื่อนำมาแทนค่าและเขียนกราฟแล้วให้รูปร่างออกมามีความใกล้เคียงผลที่ได้จากการทดลองมากที่สุด

#### 2.5.4.1 แลงเมียร์ไอโซเทอร์ม (LANGMUIR ISOTHERM) (ชนพร คำขจร, 2552)

แลงเมียร์ไอโซเทอร์มเป็นสมการไอโซเทอร์มภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. โมเลกุลถูกดูดติดอยู่ที่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ
2. แต่ละบริเวณสามารถดูดติดผิวได้เพียงชั้นเดียว เป็นชั้นฟิล์มเดียว (MONOLAYER) และที่พื้นผิวของตัวกลางดูดซับมีประเภทหมู่ฟังก์ชันเพียงหมู่เดียว (HOMOGENOUS SURFACE ADSORPTION)
3. พื้นที่ของบริเวณที่ดูดติดผิวมีจำนวนที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว
4. พลังงานการดูดซับที่ทุกจุดจะมีค่าเท่ากัน

แลงเมียร์ไอโซเทอร์มภายใต้สมมติฐานทั้งหมดเป็นไปตามสมการ (2.2)

$$q = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2.2)$$

โดยที่	Q	คือปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สถานะสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)
	$Q_M$	คือปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับที่สถานะสมดุลต่อปริมาณสารดูดซับที่สถานะสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)
	$C_E$	คือความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร หรือ โมล/ลิตร)
	$K_L$	คือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (ลิตร/มิลลิกรัม)

#### 2.5.4.2 ฟรอนด์ลิชไอโซเทอร์ม (FREUNDLISH ISOTHERM) (ชนพร คำขจร, 2552)

ฟรอนด์ลิชไอโซเทอร์มมักใช้กับกรณีสารที่เข้ทดลองเป็นสารละลายเหลว (AQUEOUS SOLUTION) ที่มีหลายชั้นฟิล์ม (MULTILAYER) และที่พื้นผิวของตัวกลางดูดซับมีประเภทหมู่ฟังก์ชันที่หลากหลาย (HETEROGENEOUS SURFACE ADSORPTION) โดยจะเป็นไปตามสมการ (2.3)

$$q = K_F c_e^{1/n} \quad (2.3)$$

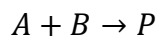
โดยที่	Q	คือปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่ สถานะสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)
	K <sub>F</sub>	คือค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช ซึ่งมีความสอดคล้องกับ ความสามารถในการดูดซับ ADSORPTION CAPACITY และ ADSORPTION INTENSITY ของ FREUNDLISH
	1/N	คือค่า FREUNDLISH INTENSITY PARAMETER

## 2.5.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (ADSORPTION KINETIC) (ปรางศิริ ศรีศุภพัชร, 2551)

จลนพลศาสตร์การดูดซับ (ADSORPTION KINETIC) ใช้ในการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยา และกลไกของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น และสามารถใช้เวลา อัตราการดูดซับ (RATE OF ADSORPTION) โดยจะขึ้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ ส่วนมากจะนิยมนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการออกแบบระยะเวลาสัมผัส (CONTACT TIME) ที่จะพอดีกับจุดสมดุล (EQUILIBRIUM ADSORPTION) โดยโมเดลสมการที่จะนำมาใช้ทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับได้แก่ สมดุลการดูดซับอันดับ 1 เสมือน (PSEUDO-FIRST ORDER) และ สมดุลการดูดซับอันดับ 2 เสมือน (PSEUDO-SECOND ORDER) เช่นเดียวกับโมเดลการทำนายการแพร่สู่รูพรุนภายในตัวกลางดูดซับ (INTRAPARTICLE DIFFUSION MODEL)

### 2.5.5.1 สมดุลการดูดซับอันดับ 1 เสมือน

สมดุลการดูดซับอันดับ 1 เสมือน คือปฏิกิริยาที่อัตราเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังหนึ่ง



ใช้ศึกษาภายใต้เงื่อนไขว่า ผู้ทดสอบจะสนใจสารตั้งต้น (REACTANT) เพียงตัวเดียวเท่านั้น; สมการ FIRST ORDER ตามสมการที่ (2.4)

$$\text{LN}(q_e - q_t) = \text{LN } q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.4)$$

โดยที่ Q<sub>E</sub> คือปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับที่จุดสมดุล ต่อหน่วยน้ำหนักของตัวกลางดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

$Q_T$  คือปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับที่เวลาใดๆ ต่อหน่วยน้ำหนัก  
ของตัวกลางดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

$K_1$  คือค่าคงที่อัตราเทียมอันดับ 1 (PSEUDO FIRST RATE CONSTANT)  
(ชั่วโมง<sup>-1</sup>)

### 2.5.5.2 สมดุลการดูดซับอันดับ 2 เสมือน

สมดุลการดูดซับอันดับ 2 เสมือน คือปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังสอง หรือขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นสองชนิด แต่ละชนิดยกกำลังหนึ่ง ส่วนมากจะใช้กับการดูดซับสารเคมี (CHEMICAL ADSORPTION)

ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนจะเป็นการบอกถึงกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการทางเคมีที่เกิดจากประจุของสารดูดซับและสารถูกดูดซับ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับจำนวนสารถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล; สมการ SECOND ORDER สมการที่ (2.5)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2.5)$$

โดย  $k_2$  คือค่าคงที่อัตราเทียมอันดับ 2 (PSEUDO SECOND RATE CONSTANT)  
(กรัม/มิลลิกรัม·ชั่วโมง)

## 2.6 ตัวกลางดูดซับ

### 2.6.1 อนุภาคที่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก

สมบัติทางแม่เหล็กเป็นหนึ่งในสมบัติพิเศษที่เกิดขึ้นจากวัสดุระดับนาโน ซึ่งสมบัติทางแม่เหล็กนี้จะขึ้นกับโครงสร้างและลักษณะการจับตัวของอะตอม/ธาตุที่ประกอบตัวกันขึ้นเป็นวัสดุ โดยสามารถแยกออกเป็นกลุ่มต่างๆ ตามคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กได้ดังนี้

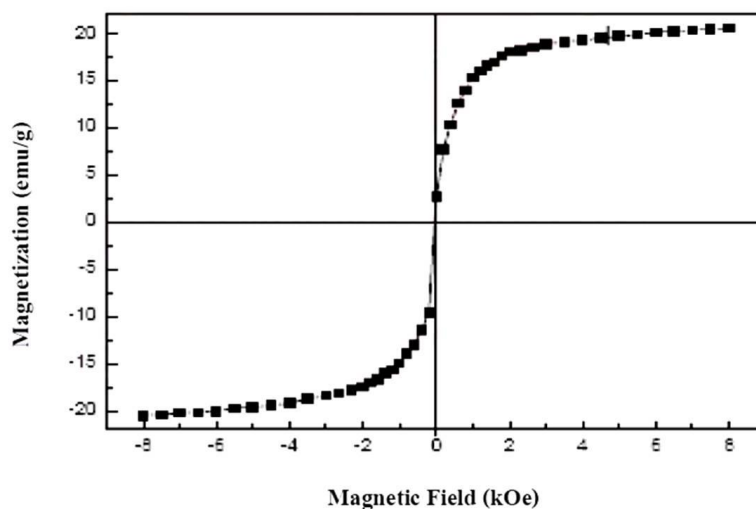
ตารางที่ 2. 5 การจำแนกประเภทของแม่เหล็กตามคุณสมบัติ (พิชชาภา บุญคง, 2551)

ประเภทตาม คุณสมบัติความเป็น แม่เหล็ก	เมื่ออยู่ใน สนามแม่เหล็ก	เมื่อไม่อยู่ใน สนามแม่เหล็ก	พิจารณาจากลักษณะ การจัดเรียงอิเล็กตรอน
1.กลุ่มไดอามกเนติก (DIAMAGNETIC)	แสดงค่าสภาพรับไว้ ได้ทางแม่เหล็กในเชิง ลบเล็กน้อย	ไม่มีการแสดงค่าสภาพ รับไว้ได้ทางแม่เหล็ก	เกิดในออบิทอลโมเลกุล ที่มีอิเล็กตรอนเข้าคู่ ออบิทอล
2.กลุ่มพาราแมกเนติก (PARAMAGNETIC)	แสดงค่าสภาพรับไว้ ได้ทางแม่เหล็กในเชิง บวกเล็กน้อย	ไม่มีการแสดงค่าสภาพ รับไว้ได้ทางแม่เหล็ก	เกิดได้ดีถ้าในออบิทอล โมเลกุล มีอิเล็กตรอนไม่ เข้าคู่
3.กลุ่มเฟอร์โรแมก เนติก (FERROMAGNETIC)	แสดงค่าสภาพรับไว้ ได้ทางแม่เหล็กในเชิง บวกอย่างแรง	สามารถรักษาสภาพ แม่เหล็กให้คงอยู่ได้แม้จะ ไม่อยู่ในสนามแม่เหล็ก หรือทำให้หมดสภาพ แม่เหล็กไปได้	

สำหรับวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติกสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภท ได้แก่ แอนติเฟอร์โรแมกเนติก และเฟอร์ริแมกเนติก วัสดุประเภทแอนติเฟอร์โรแมกเนติก เช่น MN, CR, MNO, NIO, COO และ  $MNCL_2$  จะไม่แสดงสภาพแม่เหล็ก เนื่องจากตัวของอิเล็กตรอนคู่ตรงข้ามกันและหักล้างกันหมด ส่วนวัสดุประเภทเฟอร์ริแมกเนติก เช่น FERRITES และ MAGNETITE จะมีการแสดงสภาพทางแม่เหล็ก เนื่องจากโมเมนต์ของอิเล็กตรอนตรงข้ามในโมเลกุลมีค่าไม่เท่ากัน

สำหรับกรณีของวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติก พบว่าเมื่อมีขนาดเล็กลงจนถึง 20-30 นาโนเมตร จะเกิด “ปรากฏการณ์ซูเปอร์พาราแมกเนติก” (SUPERPARAMAGNETIC PHENOMENON) ซึ่งเป็นสมบัติทางแม่เหล็กแบบใหม่ โดยอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (SUPERPARAMAGNETIC PARTICLES) จะมีสมบัติความเป็นแม่เหล็กที่ไม่มั่นคงจากการแปรปรวนของอุณหภูมิ โดยอนุภาคเหล่านี้จะไม่แสดงสมบัติแม่เหล็กเมื่อไม่ได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก และเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กก็จะแสดงสมบัติแม่เหล็ก ซึ่งสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า MAGNETIZATION (M) กับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ของอนุภาคซูเปอร์พาราแมกเนติกได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2





รูปที่ 2. 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า MAGNETIZATION (M) กับ ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ของอนุภาคซูเปอร์พาราแมกเนติก (ณัฐพันธุ์ ศุภกา, 2549)

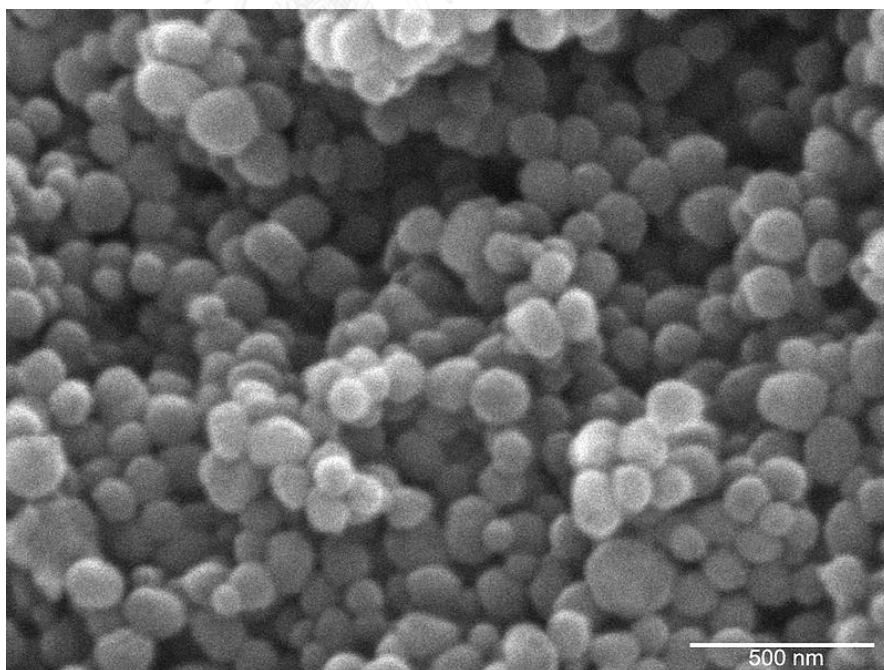
เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า BLOCKING TEMPERATURE ( $T_B$ ) ตามทฤษฎีของ NEEL-BROWN อนุภาคนั้นจะประพฤติตัวเหมือนวัสดุประเภท PARAMAGNETISM ซึ่งเรียกว่า SUPERPARAMAGNETISM (MARTIEN, 1994; FORNARA, 2008; DAVE AND GAO, 2009)

อนุภาคที่มีสมบัติแม่เหล็ก (MAGNETIC PARTICLES) มีการใช้มาตั้งแต่ช่วงกลางของปี 1970 โดยมักใช้ด้านชีววิทยาและการแพทย์ คุณสมบัติแม่เหล็กเป็นลักษณะเฉพาะที่ทำให้เคลื่อนที่ได้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กสูง ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ เช่น การใช้นำส่งยา หรือสารออกฤทธิ์ไปยังอวัยวะเป้าหมายโดยการควบคุมด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกร่างกาย และการแยกทางชีวภาพ (BIOSEPERATIONS) และยังมี การปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาค และเพิ่มประสิทธิภาพการนำส่งและทำปฏิกิริยา ซึ่งการศึกษาในห้องปฏิบัติการนั้นแสดงให้เห็นว่า IRON NANOPARTICLES มีผลต่อการเคลื่อนย้ายของมลพิษในสิ่งแวดล้อมทั่วไป เช่น CHLORINATED ORGANIC SOLVENTS, ORGANOCHLORINE PESTICIDES, PCBs, ORGANIC DYES, สารประกอบอนินทรีย์อื่นๆ รวมถึงไอออนของโลหะ เช่น As (+3), Pb (+2), Cu (+2), Ni (+2) และ Cr (+6) เป็นต้น (SUN และคณะ, 2006)

### 2.6.2 เมโสพอร์สซิลิกา (MESOPOROUS SILICA)

เมโสพอร์สซิลิกามีลักษณะทั่วไปเป็นผงละเอียดสีขาว เป็นรูปแบบหนึ่งของซิลิกา และได้รับการพัฒนาทางด้านนาโนเทคโนโลยี โดยโครงสร้างที่พบโดยทั่วไปจะเป็นแบบ

MOBILE CRYSTALLINE MATERIAL (MCM-41) และ SANTA BARBARA AMORPHOUS (SBA-15) (KATIYAR AMIT และคณะ, 2006) โดยได้ถูกผลิตขึ้นเป็นครั้งแรกในปี 1997 ด้วยความบังเอิญร่วมกับสารอื่นในความพยายามที่จะสังเคราะห์ซิลิกาที่มีความหนาแน่นต่ำ อย่างไรก็ตามในปี 1990 ได้มีการพยายามสังเคราะห์เมโสพอร์ซิลิกาขึ้นเดี่ยวๆ เป็นอนุภาคนาโนในญี่ปุ่น (YANAGISAWA TSUNEO และคณะ, 1990) หลังจากนั้นก็ได้มีการปรับแต่งโครงสร้างจนได้ MOBIL CRYSTALLINE MATERIALS (MCM-41) (J.S. BECK และคณะ, 1992) และในปี 1998 มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย, ซานตาบาร์บารา ได้ทำการสังเคราะห์เมโสพอร์ซิลิกาชนิดใหม่ได้สำเร็จ และตั้งชื่อว่า SANTA BARBARA AMORPHOUS (SBA-15) (DONGYUAN ZHAO และคณะ, 1988) โดย SBA-15 นี้จะมีโครงสร้างรูพรุนแบบ HEXAGONAL ARRAY และหลายปีต่อมาได้มีการพัฒนาอนุภาคเมโสพอร์ซิลิกานาโนนี้ไปใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากตัวกลางดูดซับประเภทซิลิกามีความเป็นพิษต่ำ, สามารถปรับปรุงพื้นที่ผิวได้ง่าย, มีพื้นที่ผิวมาก, ดูดซับได้ปริมาณมาก และมีความเสถียรทางชีวภาพมาก (VOGT และคณะ, 2010) จึงมีการนำไปใช้ทั้งในการแพทย์ และการทำให้ยาออกฤทธิ์เฉพาะที่ตามอวัยวะเป้าหมายที่ต้องการทำการรักษา (DRUG DELIVERY และ BIOSENSORS) (MELLAERTS, 2007)



รูปที่ 2. 3 ลักษณะพื้นผิวของอนุภาคเมโสพอร์ซิลิกานาโน จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (LIN, 2008)

### 2.6.3 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ

#### 2.6.3.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนที่มีสมบัติแม่เหล็ก (Qu และคณะ, 2010)

อนุภาคนาโนแมกนีไทต์ ( $Fe_3O_4$ ) เป็นสารประเภทเฟอร์ริคแมกเนติกขนาดนาโนที่มีโครงสร้างเป็น CUBIC INVERSE SPINAL STRUCTURE สารแมกนีไทต์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ต่อกับวงการแพทย์ อันเนื่องมาจากคุณสมบัติเฉพาะ เช่น ปรากฏการณ์ซูเปอร์พาราแมกเนติก และมีสนามแม่เหล็กหนาแน่น

#### 2.6.3.2 การเคลือบแมกนีไทต์ด้วยเมโสพอร์ซิลิเกต (VOGT และคณะ, 2010)

ในศตวรรษที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยมากมายเกี่ยวกับการเคลือบผิวของแมกนีไทต์ด้วยสารหลายชนิด เช่น สารอนินทรีย์, โพลีเมอร์ และ โลหะมาเคลือบบนพื้นผิวอนุภาคตัวกลางดูดซับ อย่างไรก็ตาม สารที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือซิลิกา เนื่องจากตัวซิลิกาเองมีความเป็นพิษต่ำ, สามารถปรับปรุงพื้นที่ผิวได้ง่าย, มีพื้นที่ผิวเยอะ, ดูดซับได้ปริมาณมาก และมีความเสถียรทางชีวภาพมาก

#### 2.6.3.3 การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยมีแรงกระทำระหว่างตัวกลางดูดซับและมลสาร แต่อาจเกิดขึ้นอย่างไม่ทั่วถึงทั้งพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่จะทำให้เกิดการดูดซับขึ้นในบริเวณที่ต้องการ ซึ่งการดูดซับนั้นอาจเกิดเนื่องมาจากแรงทางประจุ หรือปฏิกิริยาเคมี

การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมมากสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับให้แก่ตัวกลางดูดซับ และเพิ่มความเฉพาะเจาะจงในการเลือกดูดซับมลสารแต่ละชนิด ซึ่งการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวนี้อาจได้ผลดีเป็นพิเศษกับตัวกลางดูดซับสังเคราะห์ที่มีลักษณะของเคมีบนพื้นผิวที่ใกล้เคียงกัน เช่น ซิลิกาเจล เมโสพอร์ซิลิเกต หรืออลูมินา

การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับนั้นสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

##### 1. การต่อติดหมู่ฟังก์ชัน (POST-SYNTHETIC GRAFTING) (VICHUDA TIPSUNAVE, 2010)

การต่อติดหมู่ฟังก์ชันเป็นการนำหมู่ฟังก์ชันทางเคมี เช่น อะมิโน, เมอร์แคปโต และไฮดรอกซิล มายึดบนผิวของตัวกลางดูดซับต่อจากหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเดิม โดยเป็นวิธีการที่ง่ายและคงไว้ซึ่งโครงสร้างเดิมของตัวกลางดูดซับ

การต่อติดหมู่ฟังก์ชันนี้มีข้อเสียคือยากที่จะควบคุมความเข้มข้นและการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันที่ทำการต่อติดเข้าไป และการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันส่วน

ใหญ่จะเกิดขึ้นเฉพาะบนพื้นผิวด้านนอกและภายในรูพรุนที่สารตัวกลางปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันสามารถเข้าถึงได้เท่านั้น

อย่างไรก็ตาม การต่อติดหมู่ฟังก์ชันก็มีข้อดีคือจะยังรักษาโครงสร้างของตัวกลางดูดซับหลังจากที่ทำการปรับแต่งผิวหน้าแล้ว

## 2. การควบแน่นร่วม (CO-CONDENSATION OR DIRECT SYNTHESIZE) (VICHUDA TIPSUNAVE, 2010)

การควบแน่นร่วม จะเป็นการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวไปพร้อมกับการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับที่สามารถใช้ได้กับทั้งหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยมีข้อดีของการควบแน่นร่วมคือเกิดการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันอย่างทั่วถึงทั้งพื้นผิวของตัวกลางดูดซับและสามารถรับหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ได้มากกว่าการต่อติดหมู่ฟังก์ชัน ถึงแม้ว่าการควบแน่นร่วมนี้จะทำให้สูญเสียโครงสร้างของสารตั้งต้นไปก็ตาม เนื่องจากตัวกลางดูดซับที่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันด้วยการควบแน่นร่วมนี้จะมีการจัดเรียงโครงสร้างของตัวกลางดูดซับใหม่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2. 6 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับด้วยวิธีต่อติดหมู่ฟังก์ชัน (POST-SYNTHETIC GRAFTING) และ ควบแน่นร่วม (CO-CONDENSATION OR DIRECT SYNTHESIZE)

	POST-SYNTHETIC GRAFTING	DIRECT SYNTHESIZE
--	-------------------------	-------------------

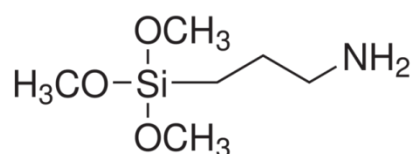
ข้อดี	- รักษาโครงสร้างของตัวกลางดูดซับหลังจากที่ทำการปรับแต่งผิวหน้า	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ทำงาน ไม่ซับซ้อน</li> <li>- ใช้เวลาน้อย</li> <li>- ควบคุมปริมาณหมู่ฟังก์ชันได้ดีกว่า และรับหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ได้มากกว่า</li> <li>- เกิดการกระจายตัวอย่างทั่วถึงทั้งพื้นผิว</li> <li>- ทำให้หมู่ฟังก์ชันอินทรีย์มีความเสถียรมากกว่า</li> </ul>
ข้อเสีย	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีราคาแพง เนื่องจากการควบคุมปริมาณ และการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ที่มีความซับซ้อนจะทำได้ยาก</li> <li>- ทำให้รูพรุนบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับมีขนาดเล็กลง ปริมาตรรูพรุนก็น้อยลงด้วย</li> <li>- สามารถรับหมู่ฟังก์ชันมาอยู่บนพื้นผิวได้น้อย</li> </ul>	- สูญเสียโครงสร้างต้นแบบของตัวกลางดูดซับที่นำมาสังเคราะห์

#### 2.6.4 หมู่ฟังก์ชัน

หมู่ฟังก์ชัน คือหมู่อะตอม หรือกลุ่มอะตอมของธาตุ เป็นโครงสร้างย่อยของโมเลกุลที่มีองค์ประกอบและโครงสร้างเฉพาะตัว หมู่ฟังก์ชันมักเป็นตัวกำหนดการทำปฏิกิริยาเคมีและสมบัติทางเคมีอื่นๆ ของโมเลกุลที่หมู่ฟังก์ชันนี้เป็นส่วนประกอบอยู่

##### 2.6.4.1 หมู่ฟังก์ชันอะมิโน

หมู่ฟังก์ชันอะมิโน มีคุณสมบัติเป็นเบส (PH = 8) ชอบน้ำ และเป็น MONOMER ของโปรตีน มักนิยมใช้ในการนำมาปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ เพื่อเพิ่มความชอบน้ำ และทำให้พื้นผิวเป็นประจุบวก เนื่องจากเมื่อละลายน้ำจะได้รับโปรตอนจากน้ำ



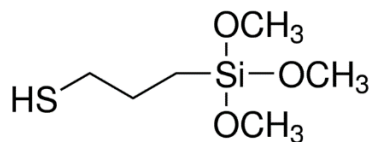
รูปที่ 2. 4 โครงสร้างโมเลกุลของสารปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันอะมิโนที่จะ นำมาใช้ในการปรับแต่งพื้นผิว  
ของตัวกลางดูดซับ ได้แก่ 3-AMINOPROPYLTRIMETHOXY SILANE

ตารางที่ 2. 7 คุณสมบัติของ (3-AMINOPROPYL)TRIMETHOXY SILANE (MATERIAL SAFETY DATA SHEET,  
SIGMA-ALDRIC, 2012)

ชื่อ	(3-AMINOPROPYL)TRIMETHOXY SILANE
สูตรเคมี	C <sub>6</sub> H <sub>17</sub> NO <sub>3</sub> Si
มวลโมเลกุล	179.29 กรัมต่อโมล
ความหนาแน่น	1.027 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ 25 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	91-92 องศาเซลเซียส
ความสามารถในการละลายน้ำ	ละลายน้ำได้

#### 2.7.4.2 หมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโต

หมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโต เป็นหมู่ฟังก์ชันที่ไม่มีขั้ว และไม่ชอบน้ำ มักนิยมใช้ในการนำมาปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ เพื่อเพิ่มความไม่ชอบน้ำ เมื่อนำไปปรับแต่งบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับชนิดซิลิกา จะมีจุดเดือด/จุดหลอมเหลว 213-215 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 196.34 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 2. 5 โครงสร้างโมเลกุลของสารปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโตที่จะนำมาใช้ในการปรับแต่งพื้นผิว  
ของตัวกลางดูดซับ ได้แก่ (3-MERCAPTOPROPYL)TRIMETHOXY SILANE

เมื่อนำไปปรับแต่งผิวหน้าตัวกลางดูดซับประเภทซิลิกาแล้วจะได้พื้นผิวที่มี หมู่ (3-MERCAPTOPROPYL)TRIMETHOXYSILANE ซึ่งมีคุณสมบัติตามตาราง 2.8

ตารางที่ 2. 8 คุณสมบัติของ (3-MERCAPTOPROPYL)TRIMETHOXYSILANE (MATERIAL SAFETY DATA SHEET, SIGMA-ALDRIC, 2012)

ชื่อ	(3-MERCAPTOPROPYL)TRIMETHOXYSILANE
สูตรเคมี	$\text{HS}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$
มวลโมเลกุล	196.34 กรัมต่อโมล
ความหนาแน่น	1.057 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ 25 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	213-215 องศาเซลเซียส
ความสามารถในการละลายน้ำ	ละลายน้ำได้

#### 2.6.5 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ

##### 2.6.5.2 โครงสร้างผลึก (PUNYAPALAKUL และ TAKIZAWA, 2006)

วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวกลางดูดซับที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้เครื่อง POWDER X-RAY DIFFRACTOMETER (XRD) RIGAKU DMAX 2200 POWDER X-RAY DIFFRACTOMETER EQUIPPED WITH  $\text{Cu K}\alpha$  RADIATION โดยใช้ SCANNING RATE  $1,000 \text{ DEG MIN}^{-1}$  ในช่วง  $0.5^\circ - 6.0^\circ (2\theta)$

##### 2.6.5.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว

ในการวิเคราะห์การดูดซับของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนบนพื้นผิวของสารดูดซับ สามารถวิเคราะห์ได้จากปริมาณไนโตรเจนโดยใช้ เครื่อง CNS/O ANALYZER ของ THERMO SCIENTIFIC™ รุ่น FLASH 2000

##### 2.6.5.3 ลักษณะพื้นผิว (วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2543)

การตรวจวัดลักษณะพื้นผิวของสารดูดซับจะวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SCANNING ELECTRON MICROSCOPE, SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนแทนลำแสง มีกำลังขยายละเอียดมากถึง 10-30,000 เท่า

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน คือจะมีอิเล็กตรอนถูกปล่อยออกจากต้นกำเนิด และถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (HIGH VOLTAGE) ผ่านสนามไฟฟ้าในสุญญากาศ ซึ่งทำให้ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนสั้นกว่าความยาวคลื่นของแสงมาก และด้วยการที่อิเล็กตรอนมีประจุลบ และมีสนามแม่เหล็กอยู่รอบตัวในแนวตั้งฉากขณะที่อิเล็กตรอนกำลังเคลื่อนที่ ทำให้เราสามารถใช้อำนาจสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในการบังคับแม่เหล็กให้เบี่ยงเบนได้ คุณสมบัตินี้จะมีประโยชน์ในการสร้างระบบเลนส์ให้เกิดกำลังขยายขึ้นภายในกล้อง

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนใช้ในการศึกษาโครงสร้างหรือองค์ประกอบต่างๆในวัตถุตัวอย่าง โดยจะให้กวาดลำอิเล็กตรอนไปบนพื้นผิว โดยอุปกรณ์ตรวจจับที่อยู่ภายใน จะจับเอาอิเล็กตรอนที่กระเจิงออกจากชิ้นงาน มาแสดงผลบนจอโทรทัศน์เป็นภาพสามมิติที่สามารถบันทึกภาพได้

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนมีการทำงานที่เหมือนกับกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน แต่แตกต่างที่ระบบภาพแสดงผล โดยภาพที่ได้จะถูกส่งสัญญาณเพื่อไปขยาย แล้วแปลงภาพลงจอซีอาร์ที (CRT) ซึ่งสามารถดูได้ด้วยตาเปล่า และสามารถบันทึกได้ ความสว่างของภาพจะขึ้นกับพื้นผิวของตัวอย่าง โดยถ้าพื้นผิวมีความราบเรียบมาก ภาพก็จะสว่างน้อยกว่าพื้นผิวที่ขรุขระขึ้นมา

นอกจากนี้ยังมีเลนส์ใกล้วัตถุที่มีช่องรับแสงเพื่อช่วยเพิ่มความลึกของภาพ หากติดตั้งอุปกรณ์พิเศษเสริมอาจตรวจสอบตัวอย่างได้มากขึ้น เพื่อบอกรายละเอียดของภาพร่างและองค์ประกอบของตัวอย่างในส่วนลึกกว่าที่กล้องอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะตรวจสอบได้ เพื่อหาปริมาณและคุณภาพโมเลกุลของธาตุได้

## 2.7 การแยกด้วยแม่เหล็กแรงสูง (HGMS) (WARITTA RUANGTRAKUL, 2010)

### 2.7.1 ความเข้มสนามแม่เหล็ก (MAGNETIC STRENGTH FIELD) (H)

ความเข้มสนามแม่เหล็ก ขึ้นกับจำนวนของฟลักซ์ของแม่เหล็กที่ทำให้เกิดสารที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่สามารถแผ่สนามแม่เหล็กออกมาได้

### 2.7.2 ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (MAGNETIC FLUX DENSITY) (B)

ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก คือปริมาณแรงแม่เหล็กภายในวัสดุที่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก เช่นแม่เหล็กถาวร เป็นตัวสร้างขึ้นมาเอง โดยค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก



จะขึ้นกับค่าคงตัวของสารที่จะทำให้เป็นแม่เหล็ก ( $\mu_m$ ) ซึ่งเป็นค่าคงตัวของคุณสมบัติของตัวกลาง แม่เหล็กและความเข้มสนามแม่เหล็ก ดังจะแสดงให้เห็นในสมการที่ (2.6)

$$B = \mu_m H \quad (2.6)$$

โดยที่	H	คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (แอมแปร์ต่อเมตร)
	B	คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (เทสลา)
	$M_M$	คือ ค่าคงตัวของสารที่จะทำให้เป็นแม่เหล็กได้ของวัตถุ (แอมแปร์ต่อเมตร)

### 2.7.3 แรงแม่เหล็ก (MAGNETIC FORCE)

แรงแม่เหล็กเป็นแรงของการทำให้ประจุเคลื่อนที่ สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของลอเรนซ์ (LORENTZ LAW) ตามสมการ (2.7)

$$F_m = q(v \times B) \quad (2.7)$$

โดยที่	$F_m$	คือ แรงในการเคลื่อนย้ายประจุ (นิวตัน)
	Q	คือ ประจุไฟฟ้าบนอนุภาค (คูลอมบ์)
	v	คือ ความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายประจุ (เมตรต่อวินาที)
	B	ความหนาแน่นฟลักซ์ (เทสลา)

แรงแม่เหล็กของอนุภาคเมื่อนำไปใช้ในสนามแม่เหล็กสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ (2.8)

$$F_M = M_0 V_p M_p \times \nabla H \quad (2.8)$$

โดยที่	$F_m$	คือ แรงในการเคลื่อนย้ายประจุ (นิวตัน)
	$M_0$	คือ ค่าคงตัวของสารที่จะทำให้เป็นแม่เหล็กได้ของวัตถุในสถานะสุญญากาศ (แอมแปร์ต่อเมตร)
	$V_p$	คือ ปริมาตรของอนุภาค (ลูกบาศก์เมตร)
	$M_p$	คือ PARTICLE MAGNETIZATION (แอมแปร์ต่อเมตร)
	$\nabla H$	คือ เกรเดียนท์ของความเข้มสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งที่

อนุภาคอยู่

นอกจากนี้ยังมีแรงอีก 3 แรงที่มีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการแยกด้วยแม่เหล็กดังต่อไปนี้

#### 2.7.4 แรงดึงดูดของโลก (GRAVITATIONAL FORCE)

แรงดึงดูดของโลกเป็นแรงที่ดึงให้วัตถุตกลงไปด้วยตัวเองในของเหลวด้วยน้ำหนักของตัววัตถุเอง สามารถอธิบายได้ดังสมการ (2.9)

$$F_G = (P_p - P_G)V_p G \quad (2.9)$$

โดยที่

$F_G$  คือ แรงดึงดูดของโลก (นิวตัน)

$P_p$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาค (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$P_G$  คือ ความหนาแน่นของของเหลว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$V_p$  คือ ความเร่งของแรงดึงดูดของโลก (เมตรต่อวินาที<sup>2</sup>)

### 2.7.5 แรงสู่ศูนย์กลาง (CENTRIFUGAL FORCE)

แรงสู่ศูนย์กลางเป็นแรงที่มีการเคลื่อนที่ซึ่งจะเกิดก็ต่อเมื่ออนุภาคมีความปั่นป่วนสามารถอธิบายได้ดังสมการ (2.10)

$$F_c = (p_p - p_g)\omega V_p R \quad (2.10)$$

โดยที่	$F_c$	คือ แรงสู่ศูนย์กลาง (นิวตัน)
	$\omega$	คือ ความเร็วเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)
	$r$	คือ รัศมีของอนุภาค (เมตร)

### 2.7.6 แรงต้าน (FRICTIONAL FORCE)

แรงต้าน ในที่นี้เป็นแรงที่เกิดขึ้นเพื่อต้านแรงโน้มถ่วงของโลก อธิบายได้ด้วยกฎของสโตค (STOKE'S LAW) ดังสมการ (2.11)

$$F_d = 3\pi\sigma d_p(v_f - v_p) \quad (2.11)$$

โดยที่	$F_d$	คือ แรงต้าน (นิวตัน)
	$\sigma$	คือ ความหนืดของของเหลว (นิวตัน*วินาทีต่อตารางเมตร)
	$D_p$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (เมตร)
	$(v_f - v_p)$	คือ ความเร็วสัมพัทธ์ของอนุภาคเทียบกับของเหลว (เมตรต่อวินาที)

### 2.7.7 ความพรุนของชั้นตัวกลาง (POROSITY)

ความพรุนของชั้นตัวกลาง ( $\epsilon$ ) คืออัตราส่วนแสดงช่องว่างในปริมาตรทั้งหมดของชั้นตัวกลาง โดยในงานวิจัยนี้จะใช้เส้นใยสแตนเลสเป็นชั้นตัวกลาง ทำหน้าที่ช่วยให้เกิดการฟุ้งกระจายของเส้นแรงแม่เหล็ก เพื่อให้ตัวกลางดูดซับมีโอกาสได้รับอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมากขึ้น สำหรับการกำหนดความพรุนของชั้นตัวกลางในการทดลองสามารถกำหนดได้โดยให้ปริมาตรคอลัมน์คงที่ คือมีเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวคงที่ แล้วใส่เส้นใยสแตนเลสที่น้ำหนักต่างๆไป โดยการคำนวณน้ำหนักเส้นใยสแตนเลสที่ความพรุนต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังสมการ (2.12)

$$\varepsilon = 1 - \frac{\text{น้ำหนักของเส้นใยสแตนเลส/ปริมาตรรวมช่องว่างของเส้นใยสแตนเลสในชั้นกรอง}}{\text{ความหนาแน่นของเส้นใยสแตนเลส}} \quad (2.12)$$

สำหรับความพรุนของชั้นตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 95.28, 96.85 และ 98.43%

### 2.7.8 ความเร็วในเส้นใย

เมื่อในชั้นตัวกลางมีเส้นใยมาขัดขวางการไหลของสารละลายภายในคอลัมน์ จะมีผลทำให้ความเร็วในชั้นเส้นใยมีค่าเปลี่ยนไป โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.13)

$$\text{ความเร็วในคอลัมน์} = \frac{\text{ความเร็วก่อนเข้าคอลัมน์}}{\text{ความพรุน}} \quad (2.13)$$

สำหรับความเร็วในคอลัมน์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ 16.43, 32.87 และ 65.73 เซนติเมตรต่อนาที

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.8.1 การดูดซับสีย้อม แอซิด บลู 45

PUNYAPALAKUL และ TAKIZAWA (2006) ศึกษาการคัดเลือกมลสารในดูดซับสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (TRITON X-100) ที่อยู่ในสีย้อมมีประจุ ได้แก่ สีย้อมเบสิกเยลโล่ 1 (BASIC YELLOW 1) เป็นสีย้อมที่แตกตัวให้ประจุบวก และสีย้อมแอซิด บลู 45 (ACID BLUE 45) เป็นสีย้อมที่แตกตัวให้ประจุลบ โดยใช้ตัวกลางดูดซับชนิดเฮกซะโกนอลเมโสพอร์รัสซิลิเกต (HEXAGONAL MESOPOROUS SILICATE, HMSs) ที่มีหมู่ฟังก์ชัน N-OCTYLDIMETHYL-(OD-HMS), 3-AMINOPROPYLTRIETHOXY-(AM-HMS), 3-MERCAPTOPROPYL-(MP-HMS), SILANOL (HMS, TI-HMS) และถ่านกัมมันต์ จากผลการทดลองพบว่า OD-HMS, MP-HMS และ TI-HMS สามารถดูดซับสารลดแรงตึงผิวได้สูงกว่าถ่านกัมมันต์ โดย HMSs จะดูดซับสีย้อมเบสิกเยลโล่ 1 และสีย้อมแอซิด บลู 45 ด้วยพันธะไฮโดรเจน และ TRITON X-100 มีผลต่อการดูดซับสีย้อมเบสิกเยลโล่ 1 ด้วย เนื่องจากเป็นการดูดซับด้วยแรงไฟฟ้าเช่นเดียวกัน

ATIA และคณะ (2009) ศึกษาการดูดซับสีย้อม ACID ORANGE 10 โดยใช้ MAGNETIC SILICA ที่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันด้วยหมู่อะมิโน โดยทำการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับซิลิกาที่มีและไม่มีอนุภาคแมกเนไทต์ และนำไปปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวด้วย

3-AMINOPROPYLTRIMETHOXYSILANE และทำการทดลองการดูดซับสีย้อม ACID ORANGE 10 ในแบบที่ละเทโดยใช้ ระยะเวลา PH และความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ พบว่าตัวกลางดูดซับที่มีอนุภาคแมกเนไทต์ที่ทำการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันด้วยหมู่อะมิโน (MAMMS) มีความสามารถในการดูดซับมากกว่าและเร็วกว่าตัวกลางดูดซับที่ไม่มีอนุภาคแมกเนไทต์ (MAMPS) โดยมีความจุการดูดซับของ MAMMS ที่ 61.33 มก./ก. และ MAMPS ที่ 48.98 มก./ก. โดยสมมูลการดูดซับของตัวกลางดูดซับทั้งสองเป็นแบบแลงเมียร์ และมีจลนพลศาสตร์การดูดซับตามสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับที่ 2 เสมือน นอกจากนี้ยังทำการ REGENERATE ตัวกลางดูดซับที่ผ่านการดูดซับสีย้อมโดยใช้สารละลาย NaOH ที่ PH 10 พบว่ามีประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ 98% หลังจากที่ผ่านมาการใช้งานมาแล้ว 3 รอบ

## 2.8.2 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ

XIANQIAO LIU และคณะ (2003) ศึกษาคุณสมบัติของ ซุปเปอร์พาราแมกเนติก ซิลิกา นาโนสเฟียร์ ที่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวด้วย AMINO-SILANE โดยใช้อนุภาคแมกเนไทต์ขนาดนาโนซึ่งเตรียมจากสารละลายอิเล็กโตรไลติกของเฟอร์รัสและเฟอร์ริก ซึ่งได้อนุภาค ซุปเปอร์พาราแมกเนติก ขนาด 8-10 NM. จากนั้นจึงนำไปเคลือบผิวด้วยซิลิกาเพื่อให้ได้อนุภาคทรงกลม และนำไปปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวด้วย N-(2-AMINOETHYL)-3-AMINOPROPYLTRIMETHOXYSILANE (AEAPS) ซึ่งจะได้อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ย 100-200 นาโนเมตร ที่มีคุณสมบัติซุปเปอร์พาราแมกเนติก โดยจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี POWDER X-RAY DIFFRACTION พบว่าอนุภาคแมกเนไทต์ภายในมีโครงสร้างแบบ SPINAL และขนาดของอนุภาคทรงกลมสามารถกำหนดได้โดยใช้สัดส่วนของ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Fe}_3\text{O}_4$

LUI, MA และคณะ (2004) ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโน (MAGNETITE SILICA NANOPARTICLES) ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมของเหล็กเฟอร์รัส ( $\text{Fe}^{2+}$ ) และเหล็กเฟอร์ริก ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ในสัดส่วน 1:2 ในสารละลาย  $\text{NH}_4\text{OH}$  ภายใต้สภาวะที่ไร้ออกซิเจน โดยจะได้ MAGNETITE  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ที่มีขนาด 8-10 นาโนเมตร จากนั้นทำการเคลือบด้วยซิลิกา (ใช้โซเดียมซิลิเกต) ที่พีเอช 12-13 จะได้อนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโนที่มีรูปทรงกลมเกลี้ยง (MAGNETITE SILICA NANOSPHERES) โดยขนาดของอนุภาคแม่เหล็กที่ได้นั้น สามารถควบคุมได้ด้วยการแปรสัดส่วนระหว่าง  $\text{SiO}_2$  ต่อ  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  จากนั้นทำการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโนด้วยการใช้ N-(2-AMINOETHYL)-3-AMINOPROPYLTRIMETHOXYSILANE (AEAPS) แล้วนำไปทำการกระตุ้นด้วย GLUTARALDEHYDE ทำให้ได้อนุภาคขนาด 100-200 นาโนเมตร ที่มีสมบัติซุปเปอร์พาราแมกเนติก เมื่ออนุภาคที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบด้วยวิธี POWDER X-RAY DIFFRACTION (XRD) พบว่า

อนุภาคที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าว มีการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนที่ทั่วทั้งอนุภาคเมื่อนำอนุภาคที่ต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโนไปทดลองการจับโปรตีน (PROTEIN IMMOBILIZATION) จะได้ผลดีกว่าการใช้อนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโนที่มีรูปทรงกลมเกลี้ยง ที่ไม่มีการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโน

Wu และคณะ (2006) ได้ที่การศึกษาคุณสมบัติของพื้นผิวของอนุภาคทรงกลมซิลิกาขนาดซัพไมครอนที่มีการปรับแต่งด้วยอะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีซิเลนและเมอร์แคปโตไตรเอทอกซีซิเลนด้วยวิธี CO-CONDENSATION โดยจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่าอนุภาคที่มีการปรับแต่งพื้นผิวนั้นมีลักษณะเป็นทรงกลมโดยมีรูปทรงและขนาดเป็นเอกรูป โดยอนุภาคที่ปรับแต่งด้วยหมู่อะมิโนโพรพิลนั้นมีความไอโซอิเล็กตริกและการสูญเสียมวลสูงที่สุดที่ 780 องศาเซลเซียส เนื่องจากธรรมชาติของความเป็นเบสของหมู่อะมิโนโพรพิลและความไวต่อปฏิกิริยาของอะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีซิเลน ในส่วนของอนุภาคที่ปรับแต่งด้วยหมู่เมอร์แคปโตนั้น พบว่ามีการดูดซับไอน้ำต่ำที่สุดเนื่องจากพื้นที่ผิวที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำที่สูงกว่าทั้งอนุภาคซิลิกาที่ปรับแต่งด้วยหมู่อะมิโนโพรพิลและที่ไม่ได้ปรับแต่งพื้นผิวนอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองการดูดซับสีย้อมอินทรีย์ โดยพบว่าความจุการดูดซับของอนุภาคเพิ่มขึ้นมากเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดเนื่องจากการเกิดโปรโตเนชันของหมู่ซิลานอลและหมู่เอมีนบนพื้นผิวของอนุภาค ซึ่งช่วยเพิ่มแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตต่อสีย้อมที่มีประจุลบ โดยอนุภาคที่มีการปรับแต่งด้วยหมู่อะมิโนโพรพิลนั้นจะสามารถดูดซับสีย้อมได้มากที่สุด

SUWAT SOONGLERDSONGPHA (2006) ศึกษาการกำจัดกรดไดคลอโรอะซิติก (DCAA) ช่วงความเข้มข้นต่ำด้วยเมมโพรอสซิลิเกตชนิดต่างๆ ทำการสังเคราะห์เมมโพรอสซิลิเกตและศึกษาจลนพลศาสตร์ และความสามารถในการดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติก พบว่าปัจจัยทางกายภาพไม่มีผลกับความสามารถในการดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติกในช่วงความเข้มข้นต่ำ แต่สมบัติความชอบน้ำ และแรงทางไฟฟ้า เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ นอกจากนี้ยังพบว่าเมมโพรอสซิลิเกตที่ไม่ได้ต่อติดหมู่ฟังก์ชันมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าเมมโพรอสซิลิเกตชนิดอื่นๆ เนื่องมาจากพันธะไฮโดรเจน ส่วนการต่อติดหมู่เมอร์แคปโตไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ ค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงมีผลต่อความสามารถในการดูดซับซึ่งขึ้นอยู่กับค่า  $\text{pH}_{\text{ZPC}}$  จึงบอกได้ว่าแรงทางไฟฟ้ามีผลต่อความสามารถในการดูดซับ และอุณหภูมิในการทดลองไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติกด้วย

### 2.8.3 การแยกตัวกลางดูดซับด้วยสนามแม่เหล็ก

DITSH และคณะ (2003) ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการแยกอนุภาคแม่เหล็กด้วยสนามแม่เหล็ก (HIGH-GRADIENT MAGNETIC SEPARATION FILTRATION – HGMS FILTRATION) โดยพิจารณาตัวแปร ความสูงของคอลัมน์, ความเร็วการไหลของน้ำ และขนาดของอนุภาคแม่เหล็ก โดยทำการทดลองที่ความสูงของคอลัมน์: 3.5 และ 10.5 เซนติเมตร, ความเร็วการไหลของน้ำ; 0.3, 0.6, 1, 2, 3 เซนติเมตรต่อวินาที และขนาดของอนุภาคแม่เหล็ก; 80, 110 และ 140 นาโนเมตร โดยทำการควบคุมอัตราส่วนการเรียงตัวเชิงระนาบ (PLANAR PACKING FRACTION, PPF) คืออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของระนาบที่มีอะตอมครอบครองอยู่ต่อพื้นที่ระนาบทั้งหมด ให้มีค่าเท่ากับ 0.16, อนุภาคแม่เหล็กที่มีความเข้มข้น 0.5% โดยน้ำหนัก และ ความเข้มข้นของไอออนของตัวทำละลาย NaCl 0.5 โมลลาร์ ที่โมเดลการทดลองนี้ใช้ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (IONIC STRENGTH) 1.3 เทสลา จะถูกสร้างขึ้นโดยแม่เหล็กไฟฟ้าและใช้เส้นใยสแตนเลสเป็นตัวกรองด้วยสนามแม่เหล็ก จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความยาวของคอลัมน์มากขึ้น, อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น, ความเร็วน้ำไหลน้อยลง จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกกลุ่มอนุภาคแม่เหล็กที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร ได้ประสิทธิภาพมากกว่า 99% ของประสิทธิภาพการดักจับที่ความเร็วการไหลที่สูงกว่า

WARITTA RUANGTRAKUL (2010) ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับยาชนิดนาพรอกเซน โดยมีเมโสพอร์สซิลิเกตที่มีคุณสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 0.5 ถึง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตัวกลางดูดซับทั้งหมดสามารถสังเคราะห์ได้โดยการใช้สารลดแรงตึงผิวเป็นแม่แบบ (SURFACTANT TEMPLATE) และปรับปรุงพื้นที่ด้วยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันที่ต่างกัน 3 ชนิด ด้วยวิธีโค-คอนเดนเซชัน (CO-CONDENSATION) ได้แก่ หมู่ซิลานอนหมู่อะมิโน หมู่เมอร์แคปโต หมู่ไนโตร และหมู่ฟีนอล อัตราเร็วการดูดซับนาพรอกเซนสอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน สมดุลการดูดซับนาพรอกเซนสอดคล้องกับสมการทั้งแบบเส้นตรงฟรุนด์ลิช และแลงเมียร์ จากผลการทดลองพบว่า เมโสพอร์สซิลิเกตที่คุณสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกที่ต่อติดหมู่ฟังก์ชันฟีนอลมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดตามด้วยหมู่เมอร์แคปโต หมู่ไนโตร หมู่ซิลานอล และหมู่อะมิโนตามลำดับ แต่ก็ยังมีประสิทธิภาพน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดผง ตัวกลางดูดซับที่ไม่ชอบน้ำมีประสิทธิภาพการดูดซับนาพรอกเซนได้สูงกว่าตัวกลางดูดซับที่ชอบน้ำ ส่วนแรงระหว่างประจุมีผลต่อการดูดซับนาพรอกเซนทุกหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ยกเว้นหมู่อะมิโนและซิลานอล สำหรับการทดลองการแยกตัวกลางดูดซับออกจากน้ำด้วยแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำตัวกรอง ผลการทดลองพบว่าความ

ยาวของตัวกรอง อัตราเร็วของน้ำ พื้นที่ผิวตัวกรอง และความเข้มข้นของตัวกลางดูดซับ มีผลต่อเส้นเบรคทูร์ (BREAKTHROUGH CURVE) การเพิ่มความยาวตัวกรอง การลดอัตราเร็วของน้ำ และการลดความเข้มข้นตัวกลางดูดซับจะเพิ่มเวลาในการเบรคทูร์ (BREAKTHROUGH TIME)

#### 2.8.4 การสังเคราะห์เส้นใยสแตนเลส

วุฒิวัด หล่อตระกุล (2552) ศึกษาการนำเส้นใยสแตนเลสมาใช้เป็นตัวกลางในกระบวนการโคเอเลสเซนส์เพื่อแยกน้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อนออกจากน้ำเสีย และเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยให้มีความไม่ชอบน้ำที่มากขึ้น ด้วยวิธีการจุ่มในสารประกอบของซิลิกาและเฮกซะเมทิลไดไซลาเซน (HMDS) ทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันในน้ำเสียด้วยค่า COD และขนาดอนุภาคน้ำมันด้วยกล้องจุลทรรศน์ จากการทดลองพบว่าเส้นใยสแตนเลส และเส้นใยที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว มีสมบัติความไม่ชอบน้ำที่แตกต่างกัน โดยมีขนาดมุมสัมผัสของหยดน้ำมันในน้ำเท่ากับ 19.01 และ 72.68 องศา ตามลำดับ ทำการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีโอดีของน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางความสูง 5-20 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 95.28-98.43 และ อัตราการไหลของน้ำเสีย 5-25 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่ามีค่าลดลง โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างร้อยละ 24-68 สำหรับเส้นใยสแตนเลส และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 27-72 เมื่อปรับปรุงพื้นที่ผิว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ ( $D_{32}$ ) ของอนุภาคน้ำมันเพิ่มขึ้นจาก 10.5 ไมครอน เป็น 14.8-22.6 ไมครอน และ 16.0-24.9 ไมครอนตามลำดับ ซึ่งเกิดจากกลไกการกรองและการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันในกระบวนการโคเอเลสเซนส์ นอกจากนี้สัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพการกรองได้ถูกประยุกต์ใช้ในการนำเสนอกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) เพื่อใช้ควบคุมระบบบำบัดและวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพในการจับยึดของอนุภาคน้ำมันกับตัวกลาง โดยค่า X ที่เหมาะสมจากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.367 และค่าประสิทธิภาพในการจับยึดของอนุภาคน้ำมันกับตัวกลางจากการทดลองสำหรับเส้นใยสแตนเลส และเส้นใยที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว คือ 0.8323 และ 0.9031 ตามลำดับ

BHAGAT และคณะ (2006) ศึกษาการเคลือบผิวโดยวิธีการจุ่มด้วยสารสังเคราะห์ซิลิกาที่ไม่ชอบน้ำ ณ อุณหภูมิห้อง โดยทำการศึกษาการสังเคราะห์สารเคลือบผิวของซิลิกาที่ไม่ชอบน้ำบนแผ่นสแตนเลสที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ 1,1,1,3,3,3-เฮกซะเมทิลไดไซลาเซนเป็นสารปรับปรุงพื้นผิว (SURFACE MODIFYING AGENT) ให้เกิดความไม่ชอบน้ำ และสามารถเพิ่มความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวที่เคลือบให้มากขึ้นด้วยการเพิ่มความขรุขระของโครงสร้างที่เคลือบอยู่บน



ผิวพื้นที่นั้น โดยการควบคุมสัดส่วนโมลาร์ระหว่างเมทานอลกับเตตระเมทอกซีซิลีนในการเคลือบผิว จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนโมลาร์เป็น 9.1 18.2 และ 36.4 ทำให้เกิดมุมสัมผัสที่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนโมลาร์นี้ เกิดจากผลของปริมาณซิลิกาในสารเคลือบผิวที่ลดลง ทำให้โครงสร้างของสารที่เคลือบผิวมีความพรุนสูงและพื้นผิวมีความขรุขระมากขึ้น ส่งผลให้มุมสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงถึงความไม่ชอบน้ำมากขึ้นของพื้นผิวนั้นเอง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้บอกถึงข้อดีของวิธีการเคลือบผิวสแตนเลสด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่ประหยัดเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ และสามารถทำได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง

สรุปข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัย

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นอาจสามารถกล่าวได้ว่า วิธีการสังเคราะห์ MAGNETITE NANOPARTICLE ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม (CO-CONDENSATION) ของเฟอร์รัสและเฟอร์ริกในสภาวะที่เป็นต่าง ทำให้ได้อนุภาคขนาดนาโนที่มีสมบัติเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติกที่มีการกระจายตัวที่ดี ซึ่งเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการเคลือบซิลิกา และต่อติดหมู่ฟังก์ชัน เช่นหมู่อะมิโน จะเป็นการช่วยเพิ่มความสามารถในการตรึง หรือยั้งยั้งสารไวที่ผิวของอนุภาคได้ และอนุภาคที่สังเคราะห์ได้นั้นสามารถแยกออกได้ด้วยแรงแม่เหล็กจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคอื่นๆ ในน้ำได้ด้วยแรงดูดทางไฟฟ้าสถิตอีกด้วย โดยส่วนใหญ่แล้วการนำเอาอนุภาคซูเปอร์พาราแมกเนติกมาประยุกต์ใช้ มันจะใช้กันในทางแพทย์ เช่นการซ่อมแซมเนื้อเยื่อ หรือการส่งถ่ายยา มากกว่าจะใช้ในทางสิ่งแวดล้อม

สำหรับการกำจัดสีย้อมแอซิดบลู 45 นั้น ได้มีการพัฒนาพื้นผิวของตัวกลางดูดซับให้มีความสามารถในการดูดซับมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการสังเคราะห์อนุภาคซูเปอร์พาราแมกเนติกที่มีพื้นผิวแบบกลมเกลี้ยงและแบบมีรูพรุน ประกอบด้วยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ ได้แก่ หมู่อะมิโน ซึ่งเป็นการเพิ่มความชอบน้ำให้แก่ตัวกลางดูดซับ และหมู่เมอร์แคปโต ซึ่งเป็นการเพิ่มความไม่ชอบน้ำให้แก่ตัวกลางดูดซับ และยังไม่มีการศึกษาถึงประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมแอซิดบลูในเชิงเปรียบเทียบ รวมถึงผลกระทบของค่า pH ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดแรงดึงดูดทางไฟฟ้า อันเป็นปัจจัยหลักในการดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 45

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในด้านของการแยกตัวกลางดูดซับออกจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยการดูดซับแบบระบบที่ละเท ซึ่งโดยปกติแล้วจะเป็นปัญหาทำได้ยาก แต่เมื่อมีการพัฒนาตัวกลางดูดซับให้มีแกนกลางเป็นสารแมกนีไทต์ ซึ่งมีสมบัติเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติก จึงมีแนวโน้มที่จะถูกแยกออกจากระบบน้ำเสียได้เมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก โดยเส้นใยสแตนเลสที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแต่อย่างไรก็ตาม ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวเส้นใยสแตนเลสทั้งแบบชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการดักจับตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติกยังคงไม่มีการศึกษา

อย่างชัดเจน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะทำการศึกษาปฏิสัมพันธ์ดังกล่าว เพื่อประยุกต์ใช้ตัวกลางดูดซับสังเคราะห์ดังกล่าวในการกำจัดสีย้อม



ตารางที่ 2. 9 สรุปข้อมูลที่ได้จากการศึกษางานวิจัย

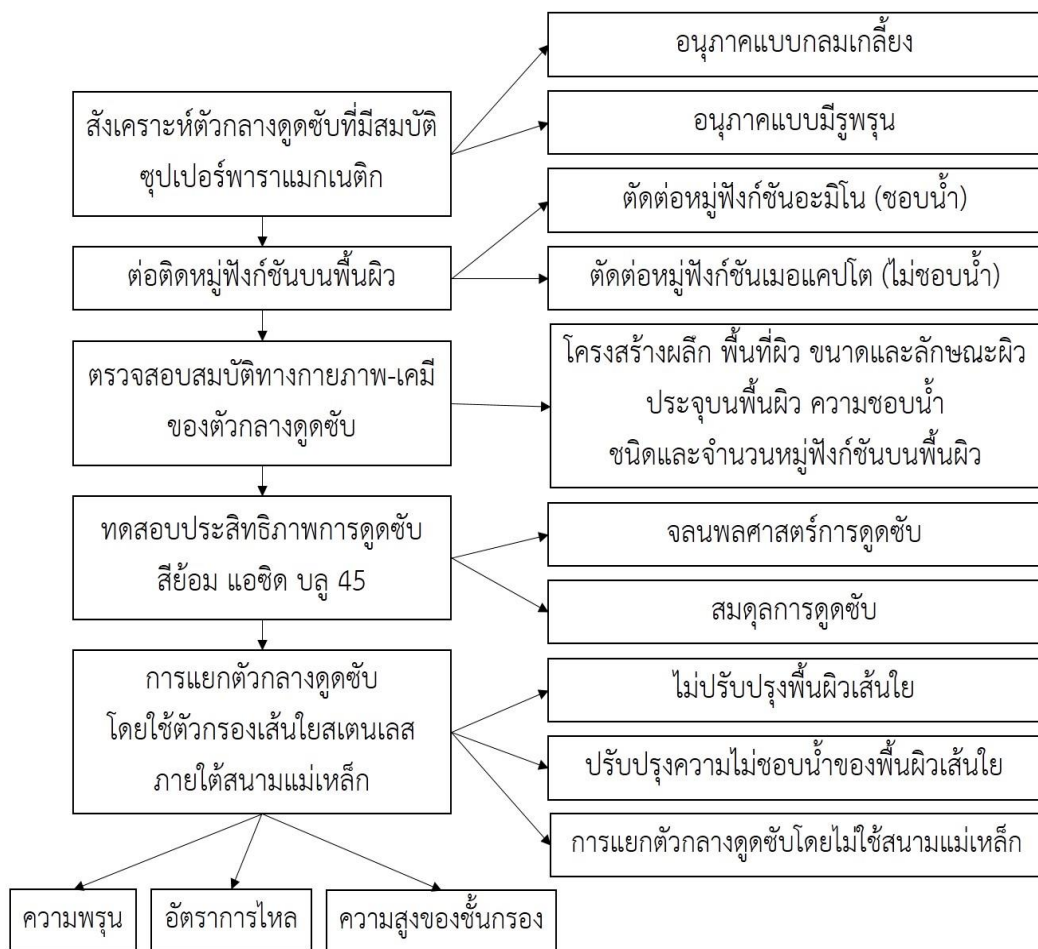
หัวข้อที่ศึกษา	รายชื่อผู้ทำการวิจัย	ข้อมูลจากงานวิจัยที่ทำมาใช้
การดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 45	PUNYAPALAKUL และ TAKIZAWA (2006)	การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับชนิดเฮกซะโกนอนลเมโสพอร์สซิลิเกต และต่อติดหมู่ฟังก์ชัน 3-AMINOPROPYL-TRIETHOXY และ 3-MERCAPTO-PROPYL ดูดซับสีย้อม AB45
	ATIA และคณะ (2009)	การใช้ตัวกลางดูดซับซิลิกาแบบอนุภาคกลมเกลี้ยงที่มีและไม่มีอนุภาคแมกเนไทต์, มีและไม่มี การต่อติดหมู่ฟังก์ชัน 3-AMINOPROPYLTRIETHOXY ดูดซับสีย้อมแอซิดออเรนจ์ 10 ซึ่งเป็นสีประเภทเดียวกับแอซิดบลู 45
การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ	XIANQIAO LIU และคณะ (2003)	การสังเคราะห์อนุภาคแมกเนไทต์ และตัวกลางดูดซับแบบอนุภาคกลมเกลี้ยงด้วยซิลิกา และต่อติดหมู่ฟังก์ชันบนผิวด้วย 3-AMINOPROPYLTRIETHOXY
	LUI, MA และคณะ (2004)	การสังเคราะห์อนุภาคแมกเนไทต์ และตัวกลางดูดซับแบบอนุภาคกลมด้วยซิลิกา และทำการต่อติดหมู่ฟังก์ชันบนผิวด้วย 3-AMINOPROPYLTRIETHOXY พบว่ามีการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนดีที่วอนุภาค
	WU และคณะ (2006)	การสังเคราะห์อนุภาคทรงกลมซิลิกา และต่อติดหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวด้วย 3-AMINOPROPYLTRIETHOXY และ 3-MERCAPTOPROPYL และทดสอบการดูดซับสีย้อมอินทรีรี่
	SUWAT SOONGLERD-SONGPHA (2006)	การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับเมโสพอร์สซิลิเกต และต่อติดหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวด้วย 3-AMINOPROPYLTRIETHOXY และ 3-MERCAPTOPROPYL

ตารางที่ 2. 9 สรุปข้อมูลที่ได้จากการศึกษางานวิจัย (ต่อ)

หัวข้อที่ศึกษา	รายชื่อผู้ทำการวิจัย	ข้อมูลจากงานวิจัยที่ทำมาใช้
การแยกตัว กลางดูดซับด้วย สนาม แม่เหล็ก	DITSH และคณะ (2003)	ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการแยกอนุภาค ด้วยแม่เหล็ก และพบว่าเมื่อความยาวของคอลัมน์มาก ขึ้น, อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น, ความเร็วน้ำไหลน้อยลง จะ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกกลุ่มอนุภาคแม่เหล็กได้
	WARITTA RUANGTRAKUL (2010)	การสังเคราะห์อนุภาคแมกเนไทต์ นำไปเคลือบด้วยเมโธ พอร์ซิลิเกต และต่อติดหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวด้วย 3- AMINOPROPYLTRIETHOXY และ 3-MERCAPTOPROPYL และ ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการแยกอนุภาค ด้วยแม่เหล็ก พบว่าเมื่อความยาวของตัวกรองมากขึ้น ลด อัตราเร็วการไหลของน้ำลง และลดความเข้มข้นของ ตัวกลางดูดซับ จะเพิ่มเวลาเบรคทुरुได้
การสังเคราะห์ เส้นใยสแตนเลส	วุฒิวัด หล่อตระกูล (2552)	การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยให้มีความไม่ชอบน้ำที่มากขึ้น ด้วยวิธีการจุ่มในสารประกอบของซิลิกาและเฮกซะเมทิล ไดซิลลาเซน
	BHAGAT และคณะ (2006)	การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยให้มีความไม่ชอบน้ำที่มากขึ้น ด้วยวิธีการจุ่มในสารประกอบของซิลิกาและเฮกซะเมทิล ไดซิลลาเซนที่อุณหภูมิห้อง ที่อัตราส่วนที่ให้ความไม่ชอบน้ำ ที่สุด

บทที่ 3  
 วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองศึกษาการดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 45 และการตัดแยกตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกภายใต้สนามแม่เหล็กด้วยเส้นใยสแตนเลสที่ปรับปรุงพื้นผิวแล้ว โดยมีแผนงานตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนการทดลองศึกษาการดูดซับสีย้อมและการตัดแยกตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกภายใต้สนามแม่เหล็กด้วยเส้นใยสแตนเลสที่ปรับปรุงพื้นผิว

### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

#### 3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สีย้อมแอซิดบลู45
2. เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (TEOS)
3. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH<sub>4</sub>OH)
4. เฟอรัรัสคลอไรด์ (FeCl<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O)
5. เฟอริกคลอไรด์ (FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O)
6. สารละลายเมทานอล (CH<sub>3</sub>OH)
7. กรดไขมัน (OLEIC ACID)
8. 3-AMINOPROPYLTRIMETHOXY SILANE
9. (3-MERCAPTOPROPYL) TRIMETHOXYSILANE
10. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NAOH)
11. โซเดียมคลอไรด์ (NACL)
12. โทลูอีน (TOLUENE)

#### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

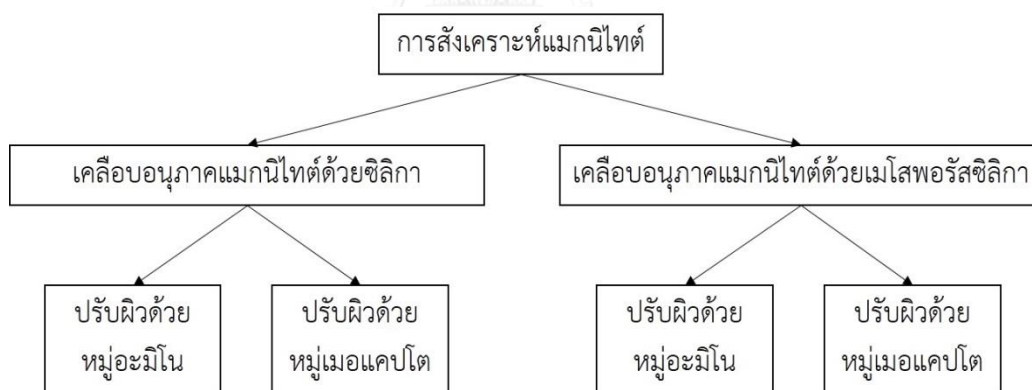
1. คอลัมน์ที่ทำจากท่ออะคริลิกใส เส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร ความสูง 5 เซนติเมตร จำนวน 3 ชั้น
2. แม่เหล็กชนิดถาวร จำนวน 6 ชั้น
3. เครื่องสูบลมสายยาง (PERISTALTIC PUMP) จำนวน 1 ตัว
4. ถังพลาสติกขนาด 80 ลิตร จำนวน 2 ถัง สำหรับเตรียมและเก็บน้ำเสีย
5. เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ
6. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณพื้นที่ผิว (BET SURFACE AREA ANALYZER) ยี่ห้อ QUANTACHROME รุ่น AUTOSORP-1, THERMO FINNIGAN / SORPTOMATIC 1990
7. เครื่องฟูเรียทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FOURIER TRANSFORM INFRARED SPECTROMETER, FT-IR) ยี่ห้อ PERKIN ELMER รุ่น SPECTRUM ONE
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสกน (SCANNING ELECTRON MICROSCOPE) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410LV
9. เครื่องวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (X-RAY FLUORESCENCE SPECTROMETER, XRD) แบบ WAVELENGTH DISPERSIVE ยี่ห้อ PHILIPS รุ่น PW2400

10. เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS SPECTROPHOTOMETER) ยี่ห้อ THERMO ELECTRON CORPORATION, USA รุ่น HELIOS ALPHA
11. เครื่องมือวัดพีเอช (PH METER) ยี่ห้อ DENVER INSTRUMENT รุ่น UB-10
12. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น DRAGON
13. โถดูดความชื้น (DESICCATORS)
14. เครื่องเขย่า (SHAKER)
15. ZETA-METER
16. เครื่องกวนด้วยแม่เหล็ก
17. ฝอยสแตนเลสสำหรับงานขัดล้าง ทรายก๊อตซ์-ไบรต์ ของบริษัท 3เอ็ม ประเทศไทย

### 3.2 วิธีการทดลอง

#### 3.2.1 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก

ขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3. 2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก

##### 3.2.1.1 อนุภาคเคลือบซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก

###### 3.2.1.1.1 การสังเคราะห์อนุภาคแมกนีไทต์ ( $Fe_3O_4$ ) (Qu และคณะ, 2010)

$Fe_3O_4$  ถูกเตรียมขึ้นจาก  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$  จำนวน 0.046 โมล และ  $FeCl_2 \cdot 4H_2O$  จำนวน 0.023 โมล นำไปผสมในน้ำปราศจากอิออนปริมาตร 150 มิลลิลิตร กวนจนเกิดการปั่นป่วนแล้วเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $NH_4OH$ ) 25% หลังจากนั้นไปกวนเป็นเวลา 30 นาที เติมกรดไขมัน (OLEIC ACID) ลงไป 3 มิลลิลิตร แล้วให้ความร้อนที่ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1

ชั่วโมง แล้วนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน ทำการแยกออกด้วยแม่เหล็ก แล้วทำให้แห้ง จะได้อนุภาค  $Fe_3O_4$

3.2.1.1.2 การเคลือบ  $Fe_3O_4$  ด้วยซิลิกา เพื่อให้ได้อนุภาคซูเปอร์พาราแมกเนติก (SCP) (LIU, MA และคณะ, 2004; LIU, XING และคณะ, 2004)

การเคลือบ  $Fe_3O_4$  ด้วยซิลิกา (หมู่ซิลานอล) เริ่มจากการเตรียม  $Fe_3O_4$  จำนวน 30 มิลลิกรัมลงไปในสารละลาย 2-โพรพานอล ปริมาตร 80 มิลลิลิตร กับน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 6 มิลลิลิตร นำไปเขย่าให้เข้ากันด้วยคลื่นโซนิคเป็นเวลา 10 นาที กวนในเครื่องกวนใบพัด 150 รอบต่อวินาที แล้วเติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 7 มิลลิลิตร และเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต 1 มิลลิลิตร แล้วกวนให้เข้ากันด้วยใบพัดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำไปแยกผลิตภัณฑ์ที่ต้องการด้วยแม่เหล็กถาวร ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน 6 ครั้ง (ครั้งละ 50 มิลลิลิตร) จะได้อนุภาคตัวกลางดูดซับซิลิกาที่มีสมบัติเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติกที่มีลักษณะกลมเกลี้ยง

3.2.1.1.3 การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันที่ผิวหน้าตัวกลางดูดซับด้วยวิธีการ CO-CONDENSATION (PUNYAPALAKUL และ TAKIZAWA, 2006)

การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันด้วยวิธี CO-CONDENSATION สามารถทำได้โดยเตรียม  $Fe_3O_4$  จำนวน 0.5 กรัม ไปผสมในกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 250 มิลลิลิตร นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วแยกออกด้วยแม่เหล็ก หลังจากนั้นผสมทานอล 3.94 กรัมกับน้ำ 27.36 กรัม ให้เข้ากัน ใช้สำหรับล้าง  $Fe_3O_4$  โดยเทผสมแล้วนำไปกวนอย่างแรงเป็นเวลา 30 นาที ในระหว่างการกวนให้เติมเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกตลงไป 2 กรัม หลังจาก 30 นาทีผ่านไปให้เติมหมู่ฟังก์ชันที่ต้องการปรับแต่งลงไปเป็นจำนวน 0.25 โมล โดยสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ต้องการปรับแต่งด้วยหมู่อะมิโน (3-AMINOPROPYLTRIMETHOXY, APTES) และหมู่เมอร์แคปโต (-MERCAPTOTRIMETHOXY) โดยใส่ลงไปกวนผสมกันอย่างแรง และเมื่อผสมเข้ากันดีแล้วให้หมักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 20 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนด ให้ทำการแยกผลิตภัณฑ์ออกด้วยแม่เหล็ก แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน ก่อนจะทำเทมเพลต (TEMPLATE) ออกด้วยการรีฟลักซ์ในเอทานอล 200 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง แล้วทำการรีฟลักซ์ซ้ำอีกทีหนึ่ง จะได้อนุภาคตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแบบมีรูพรุนที่ปรับแต่งด้วยหมู่ฟังก์ชันอะมิโน (A-HMS-SP) และอนุภาคตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแบบมีรูพรุนที่ปรับแต่งด้วยหมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโตแล้ว (M-HMS-SP)



### 3.2.1.2 อนุภาคเคลือบเมโสพอร์ซซิลิกาที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก

#### 3.2.1.2.1 การสังเคราะห์อนุภาคแมกนีไทต์ ( $Fe_3O_4$ ) (QU และคณะ, 2010)

$Fe_3O_4$  ถูกเตรียมขึ้นจาก  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$  จำนวน 0.046 โมล และ  $FeCl_2 \cdot 4H_2O$  จำนวน 0.023 โมล นำไปผสมในน้ำปราศจากอ็อกซิเจนปริมาตร 150 มิลลิลิตร กวนจนเกิดการปั่นป่วนแล้วเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $NH_4OH$ ) 25% หลังจากนั้นไปกวนเป็นเวลา 30 นาที เติมกรดไขมัน (OLEIC ACID) ลงไป 3 มิลลิลิตร แล้วให้ความร้อนที่ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปล้างด้วยน้ำปราศจากอ็อกซิเจน ทำการแยกออกด้วยแม่เหล็ก แล้วทำให้แห้ง จะได้อนุภาค  $Fe_3O_4$

#### 3.2.1.2.2 การเคลือบ $Fe_3O_4$ ด้วยเมโสพอร์ซซิลิกา เพื่อให้ได้อนุภาคซูเปอร์พาราแมกเนติก (HMSS) (TIAN และคณะ, 2009)

การเคลือบ  $Fe_3O_4$  ด้วย HEXAGONAL MESOPOROUS SILICATES โดยเริ่มจากการเตรียม  $Fe_3O_4$  จำนวน 0.5 กรัมลงไปในการดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 250 มิลลิลิตร นำไปล้างด้วยน้ำปราศจากอ็อกซิเจน แล้วแยกออกด้วยแม่เหล็ก นำไปผสมเอทานอล 3.94 กรัม และน้ำอีก 27.36 กรัม เพื่อทำการล้าง  $Fe_3O_4$  แล้วนำไปเข้าเครื่องกวนอย่างแรงเป็นเวลา 30 นาที แล้วผสมเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกตลงในของเหลวนี้อีก 2 กรัม เมื่อกวนให้เข้ากันเรียบร้อยแล้วให้หมักไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 ชั่วโมง แล้วนำไปล้างด้วยน้ำปราศจากอ็อกซิเจน แยกออกด้วยแม่เหล็กอีกครั้งหนึ่ง ก่อนจะเอาเทมเพลท (TEMPLATE) ออกด้วยการรีฟลักซ์ในเอทานอล 200 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง แล้วทำการรีฟลักซ์ซ้ำอีกทีหนึ่ง จะได้อนุภาคตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแบบมีรูพรุน (SUPERPARAMAGNETIC HEXAGONAL MESOPOROUS- SILICATE, HMS-SP)

#### 3.2.1.2.3 การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันที่ผิวหน้าตัวกลางดูดซับด้วยวิธีการ CO-CONDENSATION (PUNYAPALAKUL และ TAKIZAWA, 2006)

การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันด้วยวิธี CO-CONDENSATION สามารถทำได้โดยเตรียม  $Fe_3O_4$  จำนวน 0.5 กรัม ไปผสมในการดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 250 มิลลิลิตร นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปล้างด้วยน้ำปราศจากอ็อกซิเจนแล้วแยกออกด้วยแม่เหล็ก หลังจากนั้นนำเอทานอล 3.94 กรัมผสมน้ำ 27.36 กรัม ให้เข้ากัน ใช้สำหรับล้าง  $Fe_3O_4$  โดยเทผสมแล้วนำไปกวนอย่างแรงเป็นเวลา 30 นาที ในระหว่างการกวนให้เติมเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกตลงไป 2 กรัม หลังจาก 30 นาทีผ่านไปให้เติมหมู่ฟังก์ชันที่ต้องการปรับแต่งลงไปเป็นจำนวน 0.25 โมล โดยสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้นี้ต้องการปรับแต่งด้วยหมู่อะมิโน

(3-AMINOPROPYLTRIMETHOXY, APTES) และหมู่เมอร์แคปโต (-MERCAPTOTRIMETHOXY) โดยใส่ลงไปกวนผสมกันอย่างแรง และเมื่อผสมเข้ากันดีแล้วให้หมักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอีก 20 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนด ให้ทำการแยกผลิตภัณฑ์ออกด้วยแม่เหล็ก แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากอ็อกซิเจน ก่อนจะเอาเทมเพลตออกด้วยการรีฟลักซ์ในเอทานอล 200 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง แล้วทำการรีฟลักซ์ซ้ำอีกทีหนึ่ง จะได้อนุภาคตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแบบมีรูพรุนที่ปรับแต่งด้วยหมู่ฟังก์ชันอะมิโน (A-HMS-SP) และอนุภาคตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกแบบมีรูพรุนที่ปรับแต่งด้วยหมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโตแล้ว (M-HMS-SP)



ตารางที่ 3. 1 โครงสร้างของหมู่ฟังก์ชันหลังการปรับแต่งพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ

ตัวกลางดูดซับ	โครงสร้าง	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว	ความชอบน้ำ/ ไม่ชอบน้ำ
S-SP		ซิลานอล (Si-OH)	ชอบน้ำ
A-S-SP		เอมีน (Si-NH <sub>2</sub> ) ซิลานอล (Si-OH)	ชอบน้ำ
M-S-SP		เมอร์แคปโต (Si-SH) ซิลานอล (Si-OH)	ไม่ชอบน้ำ
HMS-SP		ซิลานอล (Si-OH)	ชอบน้ำ
A-HMS-SP		เอมีน (Si-NH <sub>2</sub> ) ซิลานอล (Si-OH)	ชอบน้ำ
M-HMS-SP		เมอร์แคปโต (Si-SH) ซิลานอล (Si-OH)	ไม่ชอบน้ำ

### 3.2.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ

ทำการศึกษาสมบัติทางเคมี และกายภาพของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิดที่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวจากขั้นตอนข้างต้นตามพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3. 2 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของตัวกลางดูดซับ

พารามิเตอร์	เครื่องมือ/วิธีการวิเคราะห์
โครงสร้างผลึก	POWDER X-RAY DIFFRACTOMETER (XRD)
การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว	CHONS ANALYZER
การวิเคราะห์พื้นที่ผิว	SURFACE AREA AND POROSITY ANALYZER MICROMERITIC
ขนาดของอนุภาคและลักษณะพื้นผิว	SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (SEM)

#### 3.2.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (PUNYAPALAKUL และ TAKIZAWA, 2006)

วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวกลางดูดซับที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้เครื่อง POWDER X-RAY DIFFRACTOMETER (XRD) RIGAKU DMAX 2200 POWDER X-RAY DIFFRACTOMETER EQUIPPED WITH CU  $K\alpha$  RADIATION โดยใช้ SCANNING RATE 1,000 DEG MIN<sup>-1</sup> ในช่วง  $0.5^\circ - 6.0^\circ (2\theta)$

#### 3.2.2.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว

การวิเคราะห์การดูดซับของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนบนพื้นผิวของสารดูดซับ สามารถวิเคราะห์ได้จากปริมาณไนโตรเจนโดยใช้ เครื่อง CNS/O ANALYZER ของ THERMO SCIENTIFIC™ รุ่น FLASH 2000

#### 3.2.2.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว (PAISANJIT, 2008)

ทำการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน โดยใช้สมการการดูดซับของไนโตรเจน โดยเครื่อง SURFACE AREA AND POROSITY ANALYZER MICROMERITIC ASAP 2020 ที่ 77 เคลวิน ก่อนทำการวิเคราะห์ โดยนำตัวอย่าง 0.05 กรัม ไปใส่อากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆที่อาจอยู่บนพื้นผิว โดยพื้นที่ผิวจำเพาะ ( $S_{BET}$ ) จะถูกคำนวณโดยใช้สมการของ BRUNNER-ELLER-TELLER (BET) โดยการใช้ข้อมูลสมการดูดซับของไนโตรเจน และการกระจายตัวของรูพรุน ( $V_p$ ) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการของ BARRETT-JOYNER-HALENDA (BJH)

3.2.2.4 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ และขนาดอนุภาค (PUNYAPALAKUL และ TAKIZAWA, 2006)

ทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (SEM)) โดยใช้กำลังขยาย 30,000 เท่า

3.2.3 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบที่ละเท

3.2.3.1 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับแอสิตบลู 45

1. เตรียมสารละลายแอสิตบลู 45 เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ตามจำนวนตัวอย่างที่ต้องการเก็บ โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 และความแรงประจุเท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร

2. นำกลางตัวกลางดูดซับ S-SP 0.25 กรัม ใส่ลงในขวดสารละลาย นำขวดสารละลายไปเขย่าในอ่างควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบเท่ากับ 150 รอบต่อนาที

3. เก็บตัวอย่างสารละลาย 10 มิลลิลิตร ที่เวลา 0 5 10 30 60 120 180 240 300 และ 360 นาที ตามลำดับ

4. นำสารละลายไปกรองแยกตัวกลางดูดซับและวิเคราะห์หาปริมาณแอสิตบลู 45

5. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนตัวกลางดูดซับเป็น A-S-SP, P-S-SP, HMS-SP, A-HMS-SP และ P-HMS-SP

6. นำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสีที่ย้อมที่เหลืออยู่ เพื่อให้ได้เวลาที่กระบวนการดูดซับเข้าสู่สมดุล

ตารางที่ 3. 3 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 45

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	พีเอช	พีเอชเท่ากับ 7 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
	อุณหภูมิ	25±2 องศาเซลเซียส
	ค่าความแรงไอออน	0.01 โมลาร์ โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
	ปริมาณสารดูดซับ	0.5 กรัมต่อลิตร
	ปริมาณและความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม	ปริมาณ 500 มิลลิลิตร เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
	จำนวนรอบในการปั่นกวน	150 รอบต่อนาที
	ชนิดของสีย้อม	สีแอซิด บลู 45 (AB45)
ตัวแปรอิสระ	เวลา	0 5 10 15 20 25 30 45 60 75 90 105 120 135 150 165 180 240 300 และ 360 นาที
	ชนิดของสารดูดซับ	HMS-SP, A-HMS-SP, P-HMS-SP
		S-SP, A-S-SP, P-S-SP
ตัวแปรตาม	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลืออยู่	-

## 3.2.3.2 การวิเคราะห์สมดุลการดูดซับแอซิดบลู 45

- เตรียมสารละลายแอซิดบลู 45 ความเข้มข้น 25 50 100 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 และความแรงประจุเท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
- นำตัวกลางดูดซับชนิด S-SP 0.05 กรัม ใส่ลงในขวดสารละลาย
- นำขวดสารละลายไปเขย่าในอ่างควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบเท่ากับ 150 รอบต่อนาที จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลการดูดซับ
- นำสารละลายไปกรองแยกตัวกลางดูดซับและวิเคราะห์หาปริมาณแอซิดบลู 45
- นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมที่สถานะสมดุล และความสามารถในการดูดซับสีย้อม เพื่อหาประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด
- ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนตัวกลางดูดซับเป็น A-S-SP, P-S-SP, HMS-SP, A-HMS-SP และ P-HMS-SP

ตารางที่ 3. 4 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาสมดุลการดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 45

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	พีเอช	พีเอชเท่ากับ 7 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
	อุณหภูมิ	25±2 องศาเซลเซียส
	ค่าความแรงไอออน	0.01 โมลาร์ โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
	ปริมาณสารดูดซับ	0.05 กรัม
	ปริมาณสารละลายสีย้อม	ปริมาณ 50 มิลลิลิตร
	จำนวนรอบในการปั่นกวน	150 รอบต่อนาที
	ชนิดของสีย้อม	สีแอซิด บลู 45 (AB45)
	เวลา	เข้าสู่สมดุล
ตัวแปรอิสระ	ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม	25 50 100 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร
	ชนิดของสารดูดซับ	HMS-SP, A-HMS-SP, P-HMS-SP
		S-SP, A-S-SP, P-S-SP
ตัวแปรตาม	ความเข้มข้นของสีย้อม ที่เหลืออยู่	-

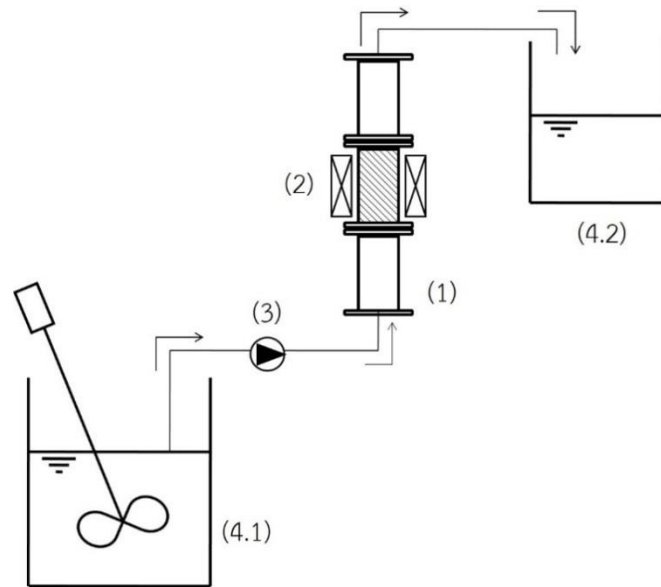
### 3.2.3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณแอซิดบลู 45 ในสารละลาย (PUNYAPALAKUL, 2006)

การวิเคราะห์หาปริมาณแอซิดบลู 45 นั้นสามารถทำได้โดยนำสารละลายแอซิดบลู 45 มาทำการกรองผ่านกระดาษกรอง (GF/C) ขนาด 0.7 ไมโครเมตร โดยใช้ชุดกรองแบบสุญญากาศ จากนั้นนำสารละลายที่ผ่านการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (ABSORBANCE) โดยใช้เครื่อง UV-VISIBLE SPECTROPHOTOMETER โดยคลื่นแสงที่ใช้มีความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร

### 3.2.4 การศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้ HIGH GRADIENT MAGNETIC SEPARATE FILTER

ทำการทดลองการดูดซับสารละลายแอซิดบลู 45 ในระบบที่ละเทโดยใช้ตัวดูดซับชนิดต่างๆ จนเข้าสู่สภาวะสมดุลการดูดซับ จากนั้นจึงใช้เครื่องสูบริดสายนำสารละลายและตัวกลางดูดซับเข้าสู่ HGMS FILTER ที่บรรจุด้วยเส้นใยสแตนเลสชนิดต่างๆ โดยในแต่ละการทดลองจะทำการเลือกตัวกลางแบบมีรูพรุนที่ทำการปรับแต่งด้วยหมู่ฟังก์ชันอะมิโน และกลมเกลี้ยงที่ทำการปรับแต่งด้วยหมู่ฟังก์ชันอะมิโน มาทำการทดลองทั้ง 2 ประเภท เพื่อ

เปรียบเทียบความสามารถในการดักจับตัวกลางดูดซับที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำบนเส้นใยสแตนเลสแบบธรรมดาเปรียบเทียบกับเส้นใยสแตนเลสแบบดัดแปรผิวให้เกิดความไม่ชอบน้ำแล้ว



รูปที่ 3. 3 แผนผังแสดงการติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดลอง โดยลูกศรแสดงทิศทางไหลของน้ำเสีย

(1) คอลัมน์ทำจากท่ออะครีลิค (2) แม่เหล็กชนิดถาวร

(3) เครื่องสูบลมสายยาง (PERISTALTIC PUMP) (4.1) ถังเตรียมน้ำเสีย (4.2) ถังเก็บน้ำเสีย



รูปที่ 3. 4 การติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดลอง



### 3.2.4.1 การเตรียมเส้นใยสแตนเลส

#### 3.2.4.1.1 เส้นใยสแตนเลสที่ไม่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

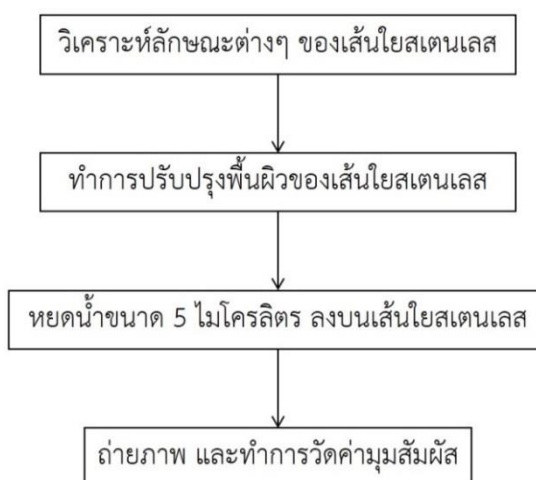
เลือกใช้เส้นใยฝอยสแตนเลสสำหรับงานขัดล้าง ตรา พูจีไบรท์ ของบริษัทยูนิลีเวลส์ (เอเชีย) จำกัด

#### 3.2.4.1.2 เส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว (วุฒิวัด หล่อตระกูล, 2009)

ทำการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยสแตนเลสโดยการเคลือบผิวของเส้นใยด้วยสารประกอบซิลิกา และเฮกซะเมทิลาเซน โดยทำการเตรียมสารละลายซิลิกาโซล (SILICA SOL) ด้วยการผสมสารเตตระเอทอกซีซิลีน, เฮกซะเมทิลไดซิลาเซน, เอทานอล และน้ำปราศจากไอออน โดยใช้สัดส่วนโมลาร์ TEOS : HMDS : ETOH : H<sub>2</sub>O เป็น 1 : 1 : 36.4 : 6.6 จากนั้นทำการกวนผสมสารละลายเป็นเวลา 5 นาที และปล่อยให้เป็นเวลา 45 นาที จากนั้นทำการเคลือบผิวสแตนเลสด้วยการจุ่มเส้นใยสแตนเลสลงในสารละลายซิลิกาโซลที่เตรียมไว้ และปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

#### 3.2.4.2 การศึกษาลักษณะสมบัติของเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว (วุฒิวัด หล่อตระกูล, 2009)

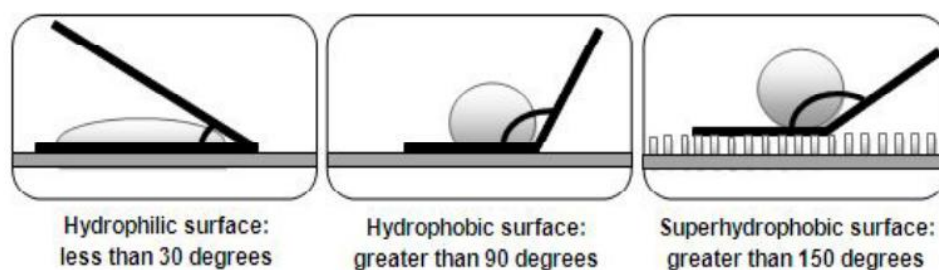
การทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติของเส้นใยสแตนเลสได้แก่ การศึกษาขนาดหน้าตัด ความหนาแน่นของเส้นใยสแตนเลส และการศึกษาพื้นผิวของเส้นใยสแตนเลส และเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว โดยเปรียบเทียบความชอบน้ำของผิวสแตนเลส และพื้นที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว



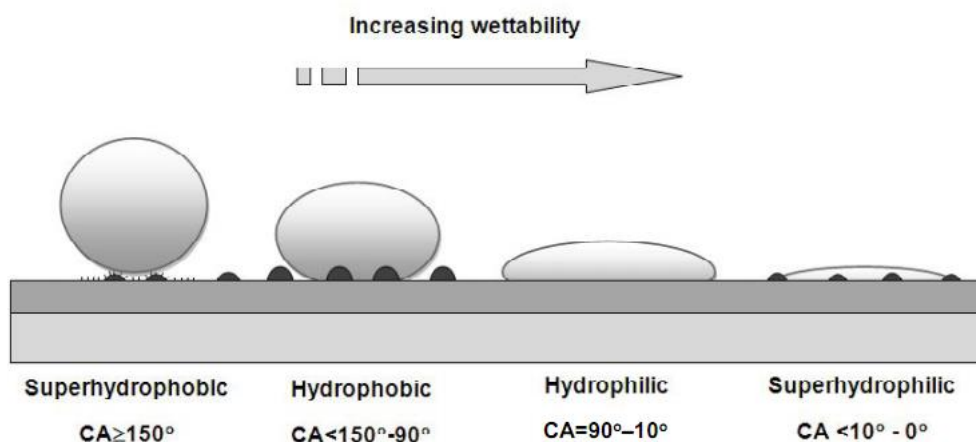
รูปที่ 3. 5 การศึกษาลักษณะสมบัติของเส้นไฮสเดนเลส และเส้นไฮสเดนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

ตารางที่ 3. 5 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาลักษณะสมบัติของเส้นไฮสเดนเลสและเส้นไฮสเดนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	ชนิดของเส้นไฮสเดนเลส	เส้นไฮสเดนเลส และเส้นไฮสเดนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว
ตัวแปรอิสระ	ชนิดของน้ำ	น้ำกลั่น
ตัวแปรตาม	ความชอบน้ำของพื้นผิว	มุมสัมผัสของหยดน้ำ



รูปที่ 3. 6 การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ (B KARTHICK AND RAMESH MAHESHWARI, 2008)



รูปที่ 3. 7 การแบ่งประเภทความชอบน้ำตามมุมสัมผัสของหยดน้ำ

(B KARTHICK AND RAMESH MAHESHWARI, 2008)

### 3.2.4.3 การศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้เส้นใยสแตนเลสในระบบ HGMS

#### 3.2.4.3.1 การศึกษาผลกระทบจากสนามแม่เหล็กบนเส้นใยสแตนเลส

ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของสนามแม่เหล็กบนเส้นใย สแตนเลสต่อประสิทธิภาพในการแยกตัวกลางดูดซับ โดยจะทำการทดลองโดยไม่มีการใช้แม่เหล็กถาวร เหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กในเส้นใยสแตนเลส

1. นำตัวกลางดูดซับ 5 กรัม มาผสมกับน้ำปราศจากประจุปริมาตร 1 ลิตร
2. ป้อนสารผสมเข้าสู่ตัวกรองโดยใช้เครื่องสูบริดสายยาง ด้วยความเร็วการไหลที่ 32.87 เซนติเมตรต่อนาที ความพรุนร้อยละ 96.85 ที่ความสูงเส้นใยสแตนเลส 1.5 เซนติเมตร โดยใช้เส้นใยสแตนเลสน้ำหนัก 1.1578 กรัมบรรจุลงในคอลัมน์ ขนาดวันผ้าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 1.5 เซนติเมตร ทำการทดลองสองครั้ง โดยครั้งแรกจะใช้แม่เหล็กถาวรขนาด 500 เกาส์ 3 คู่ และทดลองซ้ำอีกครั้งโดยไม่มีแม่เหล็กถาวรเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กในเส้นใยสแตนเลส
3. เก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านตัวกรองไปทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นจนกระทั่งถึงจุดเบรคทูร

วิธีทดลองดังรูปที่ 3.7 และทำการศึกษาดั้วแปรตามตารางที่ 3.6



รูปที่ 3. 8 การศึกษาผลกระทบของสนามแม่เหล็กบนเส้นใยสแตนเลส  
ต่อประสิทธิภาพในการแยกตัวกลางดูดซับ

ตารางที่ 3. 6 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของสนามแม่เหล็กบนเส้นใยสแตนเลสต่อ  
ประสิทธิภาพในการแยกตัวกลางดูดซับ

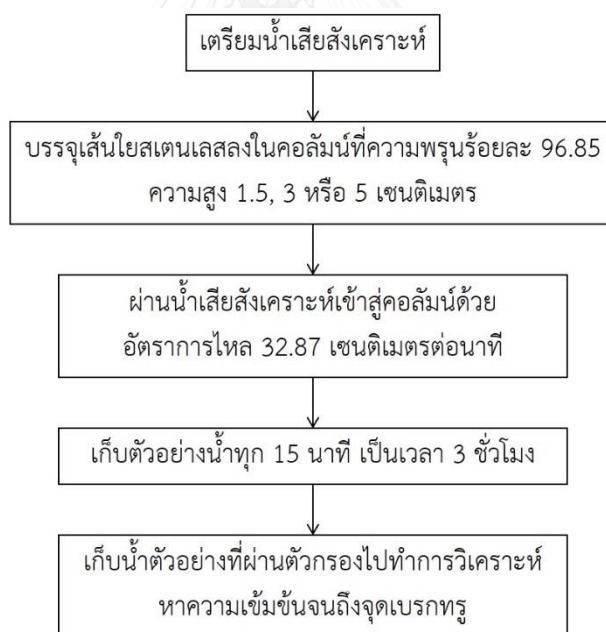
ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปร	ชนิดของเส้นใยสแตนเลส	เส้นใยสแตนเลส (ชนิดชอบน้ำ)
ควบคุม	ความพรุนของเส้นใยสแตนเลส	ร้อยละ 96.85
	ความเร็วการไหล	32.87 เซนติเมตรต่อนาที
	ความเข้มข้นของอนุภาค	5 กรัมต่อลิตร
	ความสูงของชั้นเส้นใยสแตนเลส	1.5 เซนติเมตร (ชนิดชอบน้ำ)
ตัวแปรอิสระ	การให้สนามแม่เหล็กแก่เส้นใยสแตนเลส	ให้ และไม่ให้สนามแม่เหล็ก
ตัวแปรตาม	ปริมาณตัวกลางดูดซับที่หลงเหลือ	-

### 3.2.4.3.2 การศึกษาผลกระทบจากความสูงของชั้นเส้นใยสเตนเลส

ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นเส้นใย สเตนเลสต่อประสิทธิภาพในการแยกตัวกลางดูดซับ โดย

4. นำตัวกลางดูดซับ 5 กรัม มาผสมกับน้ำปราศจากประจุปริมาตร 1 ลิตร
5. ป้อนสารผสมเข้าสู่ตัวกรองโดยใช้เครื่องสุปริตสายยาง ด้วยความเร็วการไหลที่ 32.87 เซนติเมตรต่อนาที ความพรุนร้อยละ 96.85 ที่ความสูงเส้นใยสเตนเลส 1.5, 3 และ 5 เซนติเมตร โดยใช้เส้นใยสเตนเลสน้ำหนัก 1.1578, 2.3157 และ 3.8595 กรัมบรรจุลงในคอลัมน์ขนาดเว้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 1.5, 3 และ 5 เซนติเมตร ตามลำดับ
6. เก็บตัวอย่างที่ผ่านตัวกรองไปทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นจนถึงจุดเบรคทูร

วิธีทดลองดังรูปที่ 3.8 และทำการศึกษาตัวแปรตามตารางที่ 3.7



รูปที่ 3. 9 การศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นเส้นใยสเตนเลส

ตารางที่ 3. 7 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นเส้นใยสแตนเลส

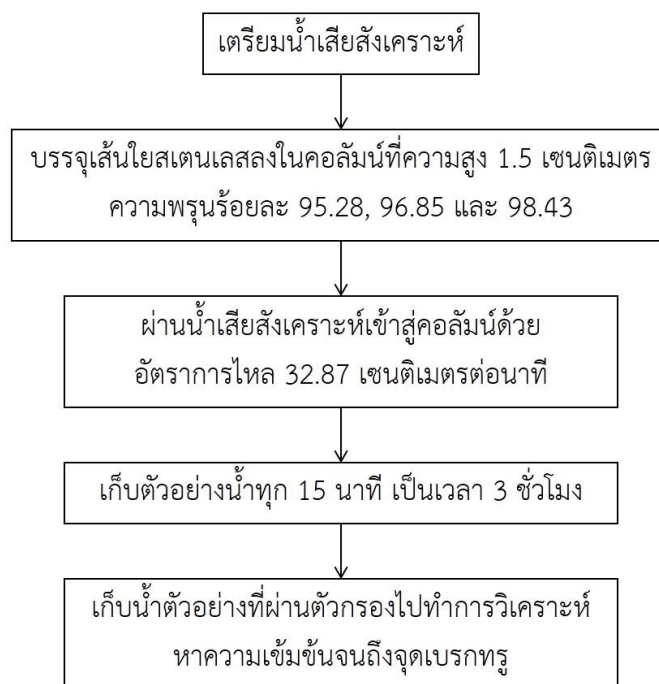
ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปร	ชนิดของเส้นใยสแตนเลส	เส้นใยสแตนเลส (ชนิดขอบน้ำ)
ควบคุม	ความพรุนของเส้นใยสแตนเลส	ร้อยละ 96.85
	ความเร็วการไหล	32.87 เซนติเมตรต่อนาที
	ความเข้มข้นของอนุภาค	5 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรอิสระ	ความสูงของชั้นเส้นใยสแตนเลส	1.5, 3 หรือ 5 เซนติเมตร
ตัวแปรตาม	ปริมาณตัวกลางดูดซับที่หลงเหลือ	-

#### 3.2.4.3.3 การศึกษาผลกระทบความพรุนของชั้นเส้นใยสแตนเลส

ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของความพรุนของชั้นเส้นใยสแตนเลสต่อประสิทธิภาพในการแยกตัวกลางดูดซับ โดย

- นำตัวกลางดูดซับ 5 กรัม มาผสมกับน้ำปราศจากประจุปริมาตร 1 ลิตร
- ป้อนสารผสมเข้าสู่ตัวกรองโดยใช้เครื่องสุปรัดสายยาง ด้วยความเร็วการไหลที่ 32.87 เซนติเมตรต่อนาที ความสูงเส้นใยสแตนเลส 1.5 เซนติเมตร ที่ความพรุนร้อยละ 95.28, 96.85 และ 98.43 โดยใช้เส้นใยสแตนเลสน้ำหนัก 1.7349, 1.1578 และ 0.5771 กรัม บรรจุลงในคอลัมน์ขนาดเว้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 1.5 เซนติเมตร ตามลำดับ
- เก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านตัวกรองไปทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นจนกระทั่งถึงจุดเบรคทอร์

วิธีทดลองดังรูปที่ 3.4 และทำการศึกษากฎตัวแปรตามตารางที่ 3.6



รูปที่ 3. 10 การศึกษาผลกระทบของความพรุนของชั้นเส้นใยสแตนเลส

ตารางที่ 3. 8สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของความพรุนของชั้นเส้นใยสแตนเลส

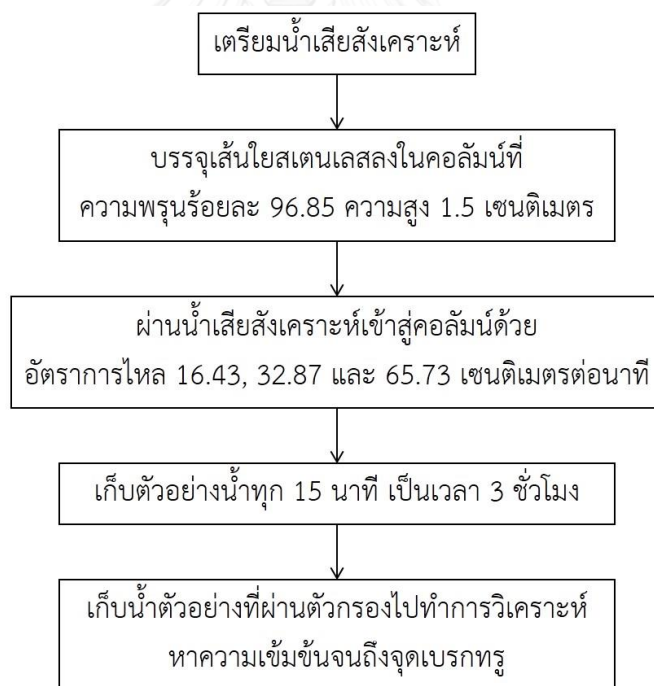
ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	ชนิดของเส้นใยสแตนเลส	เส้นใยสแตนเลส (ชนิดชอบน้ำ)
	ความสูงของชั้นเส้นใยสแตนเลส	1.5 เซนติเมตร
	ความเร็วการไหล	32.87 เซนติเมตรต่อนาที
	ความเข้มข้นของอนุภาค	5 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรอิสระ	ความพรุนของเส้นใยสแตนเลส	ร้อยละ 95.28, 96.85 และ 98.43
ตัวแปรตาม	ปริมาณตัวกลางดูดซับที่หลงเหลือ	-

### 3.2.4.3.4 การศึกษาผลกระทบจากความเร็วการไหลของน้ำเสีย

ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบจากความเร็วการไหลของน้ำเสียผ่านเส้นใยสแตนเลสต่อประสิทธิภาพในการแยกตัวกลางคูดซับ โดย

1. นำตัวกลางคูดซับ 5 กรัม มาผสมกับน้ำปราศจากประจุปริมาตร 1 ลิตร
2. ป้อนสารผสมเข้าสู่ตัวกรองโดยใช้เครื่องสูบลมสายยาง ด้วยความเร็วการไหลที่ 16.43, 32.87 และ 65.73 เซนติเมตรต่อนาที ความสูงเส้นใยสแตนเลส 1.5 เซนติเมตร ที่ความพรุนร้อยละ 96.85 โดยใช้เส้นใยสแตนเลสน้ำหนัก 1.1578 กรัมบรรจุลงในคอลัมน์ขนาดเว้าผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 1.5 เซนติเมตร
3. เก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านตัวกรองไปทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นจนกระทั่งถึงจุดเบรคทู

วิธีทดลองดังรูปที่ 3.10 และทำการศึกษาดัชนีแปรตามตารางที่ 3.9



รูปที่ 3. 11การศึกษาผลกระทบจากความเร็วการไหลของน้ำเสียผ่านเส้นใยสแตนเลส



ตารางที่ 3.9 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบจากความเร็วกาไหลของน้ำเสีย

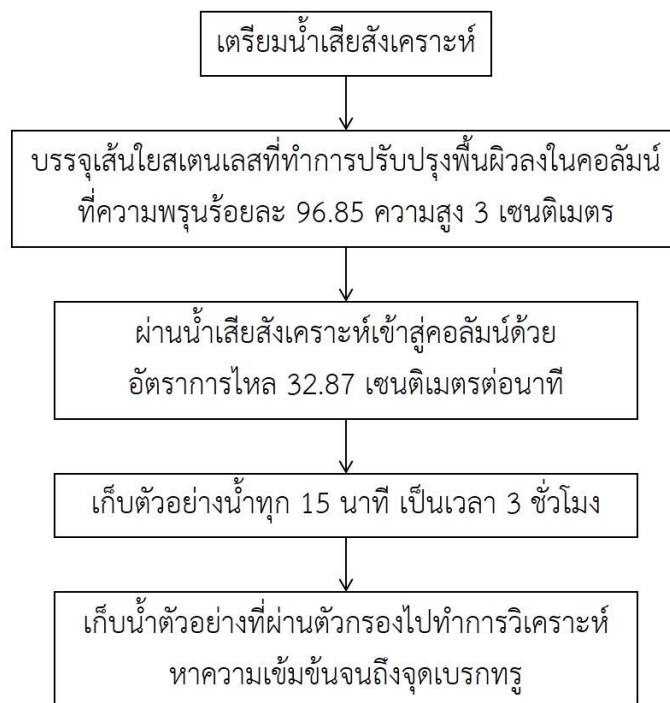
ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปร	ชนิดของเส้นใยสแตนเลส	เส้นใยสแตนเลส (ชนิดขอบน้ำ)
ควบคุม	ความสูงของชั้นเส้นใยสแตนเลส	1.5 เซนติเมตร
	ความพรุนของเส้นใยสแตนเลส	ร้อยละ 96.85
	ความเข้มข้นของอนุภาค	5 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรอิสระ	ความเร็วกาไหล	16.43, 32.87 และ 65.73 เซนติเมตรต่อนาที
ตัวแปรตาม	ปริมาณตัวกลางดูดซับที่หลงเหลือ	-

#### 3.2.4.3.5 การศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้เส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวในระบบHGMS

ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของการปรับปรุงความชอบน้ำของสแตนเลสต่อประสิทธิภาพในการแยกตัวกลางดูดซับ โดยจะทำการทดลองโดยไม่มีการใช้แม่เหล็กถาวร เหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กในเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับผิวแล้ว

- นำตัวกลางดูดซับ 5 กรัม มาผสมกับน้ำปราศจากประจุปริมาตร 1 ลิตร
- ป้อนสารผสมเข้าสู่ตัวกรองโดยใช้เครื่องสุปรัดสายยาง ด้วยความเร็วกาไหลที่ 32.87 เซนติเมตรต่อนาที ความพรุนร้อยละ 96.85 ที่ความสูงเส้นใยสแตนเลส 3 เซนติเมตร โดยใช้เส้นใยสแตนเลสน้ำหนัก 3.8595 กรัมบรรจุลงในคอลัมน์ขนาด เว้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 3 เซนติเมตร ทำการทดลองโดยใช้แม่เหล็กถาวรขนาด 500 เกาส์ 3 คู่
- เก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านตัวกรองไปทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นจนกระทั่งถึงจุดเบรคทูร

วิธีทดลองดังรูปที่ 3.11 และทำการศึกษิตัวแปรตามตารางที่ 3.10



รูปที่ 3. 12 การศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้เส้นใยสแตนเลส  
ที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวในระบบHGMS

ตารางที่ 3. 10 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้เส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุง  
พื้นผิวในระบบHGMS

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปร	ชนิดของเส้นใยสแตนเลส	เส้นใยสแตนเลสที่ดัดแปรพื้นผิวแล้ว
ควบคุม	ความพรุนของเส้นใยสแตนเลส	ร้อยละ 96.85
	ความเร็วการไหล	32.87 เซนติเมตรต่อนาที
	ความเข้มข้นของอนุภาค	5 กรัมต่อลิตร
	ความสูงของชั้นเส้นใยสแตนเลส	3 เซนติเมตร
ตัวแปรอิสระ	การให้สนามแม่เหล็กแก่เส้นใยสแตนเลส	ให้สนามแม่เหล็ก
ตัวแปรตาม	ปริมาณตัวกลางดูดซับที่หลงเหลือ	-

### 3.2.4.3.6 การศึกษาผลของปริมาณอนุภาคตัวกลางดูดซับต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS

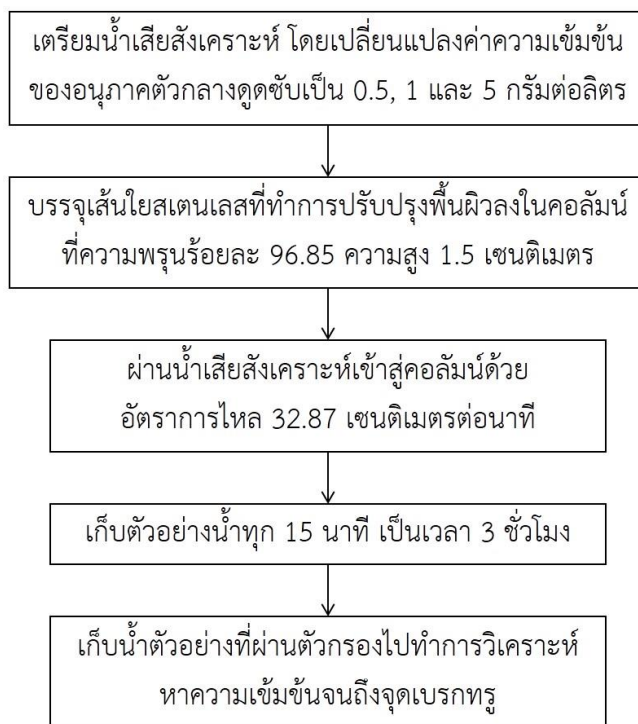
ในการศึกษาผลของปริมาณอนุภาคตัวกลางดูดซับต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS จะทำการทดลองในสภาวะเดียวกันกับการทดลองก่อนหน้านี้ โดย

1. ควบคุมความเร็วการไหลและความหนาแน่นของสารแม่เหล็กให้คงที่ และเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของอนุภาคตัวกลางดูดซับเป็น 0.5, 1 และ 5 กรัมต่อลิตร ในแต่ละรอบการทดลอง

2. ป้อนสารผสมเข้าสู่ตัวกรองโดยใช้เครื่องสุปรีดสายยาง ด้วยความเร็วการไหลที่ 32.87 เซนติเมตรต่อนาที่ เส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว ความสูง 1.5 เซนติเมตร ที่ความพรุนร้อยละ 96.85 โดยใช้เส้นใยสแตนเลสน้ำหนัก 1.1578 กรัมบรรจุลงในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 1.5 เซนติเมตร

3. เก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านตัวกรองไปทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นจนกระทั่งถึงจุดเบรคทูร

วิธีทดลองดังรูปที่ 3.12 และทำการศึกษาดั้วแปรตามตารางที่ 3.11



รูปที่ 3. 13 การศึกษาผลของปริมาณอนุภาคตัวกลางดูดซับ ต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS

ตารางที่ 3. 11 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของปริมาณอนุภาคตัวกลางดูดซับต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	ความสูงของชั้นเส้นใยสแตนเลส	1.5 เซนติเมตร
	ความพรุนของเส้นใยสแตนเลส	ร้อยละ 96.85
	ความเร็วการไหล	32.87 เซนติเมตรต่อนาที
ตัวแปรอิสระ	ความเข้มข้นของอนุภาค	0.5, 1 และ 5 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	ปริมาณตัวกลางดูดซับที่หลงเหลือ	-

3.2.4.3.7 การศึกษาผลของชนิดอนุภาคตัวกลางดูดซับชนิดมีรูพรุน และอนุภาคกลมเกลี้ยง ต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS

ในการศึกษาผลของปริมาณอนุภาคตัวกลางดูดซับต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS จะทำการทดลองในสภาวะเดียวกันกับการทดลองก่อนหน้านี้ โดย

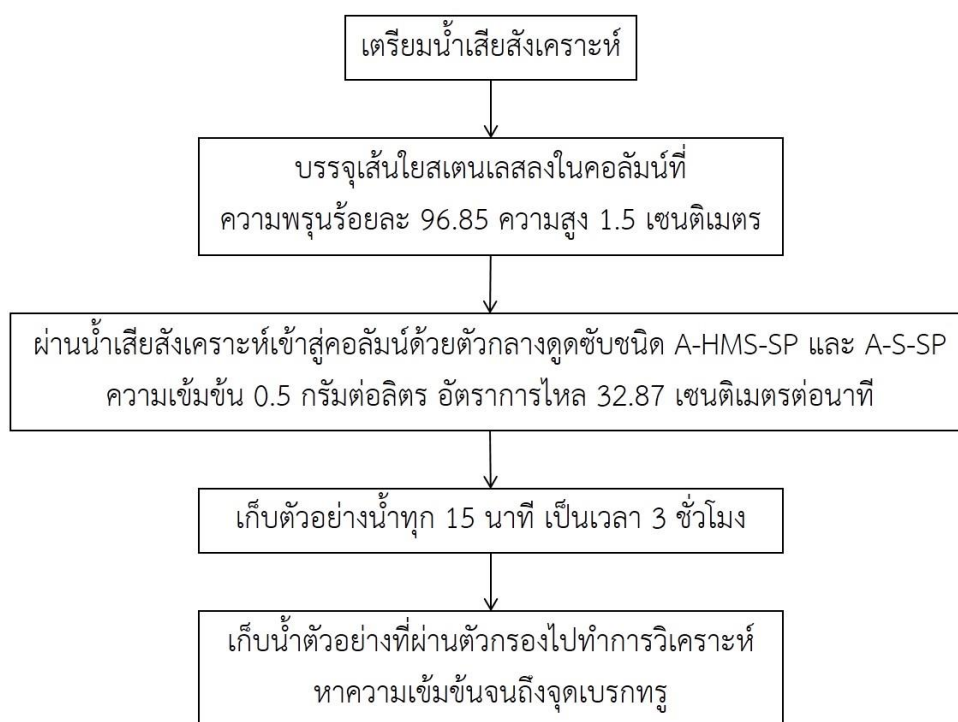
1. ควบคุมความเร็วการไหลและความหนาแน่นของสารแม่เหล็กให้คงที่ และเปลี่ยนแปลงชนิดของตัวกลางดูดซับเป็น A-HMS-SP และ A-S-SP ค่าความเข้มข้นของอนุภาคตัวกลางดูดซับ 0.5 กรัมต่อลิตร

2. ป้อนสารผสมเข้าสู่ตัวกรองโดยใช้เครื่องสูบริดสายยาง ด้วยความเร็วการไหลที่ 32.87 เซนติเมตรต่อนาที เส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว ความสูง 1.5 เซนติเมตร ที่ความพรุนร้อยละ 96.85 โดยใช้เส้นใยสแตนเลสน้ำหนัก 1.1578 กรัมบรรจุลงในคอลัมน์ขนาดเว้าผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 1.5 เซนติเมตร

3. เก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านตัวกรองไปทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้น จนกระทั่งถึงจุดเบรคทูร

วิธีทดลองดังรูปที่ 3.13 และทำการศึกษาตัวแปรตามตารางที่ 3.12





รูปที่ 3.14 การศึกษาผลของชนิดอนุภาคตัวกลางดูดซับชนิดมีรูพรุน และอนุภาคกลมเกลี้ยงต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS

ตารางที่ 3. 12 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของชนิดอนุภาคตัวกลางดูดซับชนิดมีรูพรุน และอนุภาคกลมเกลี้ยงต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	ความสูงของชั้นเส้นใยสแตนเลส	1.5 เซนติเมตร
	ความพรุนของเส้นใยสแตนเลส	ร้อยละ 96.85
	ความเร็วการไหล	32.87 เซนติเมตรต่อนาที
	ความเข้มข้นของอนุภาค	0.5 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรอิสระ	ชนิดของตัวกลางดูดซับ	A-HMS-SP และ A-S-SP
ตัวแปรตาม	ปริมาณตัวกลางดูดซับที่หลงเหลือ	-

### 3.2.4.3.8 การวิเคราะห์หาปริมาณตัวกลางดูดซับในสารละลาย

การวิเคราะห์หาปริมาณตัวกลางดูดซับในสารละลาย จะทำโดยใช้วิธีการหาปริมาณของแข็งในน้ำ โดยจะนำกระดาษกรองไปอบแห้ง แล้วชั่งน้ำหนัก แล้วนำสารละลายที่ออกจากคอลัมน์ไปกรองผ่านกระดาษกรอง (GF/C) ขนาด 0.7 ไมโครเมตร โดยใช้ชุดกรองแบบสุญญากาศ จากนั้นนำกระดาษกรองดังกล่าวไปอบให้แห้ง 105 องศาเซลเซียส รอให้เย็น แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก เมื่อหักลบกับน้ำหนักกระดาษอบแห้งแล้ว จะได้น้ำหนักของตัวกลางดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวกลางเส้นใยสแตนเลสได้



## บทที่ 4 ผลการวิจัย

### 4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ

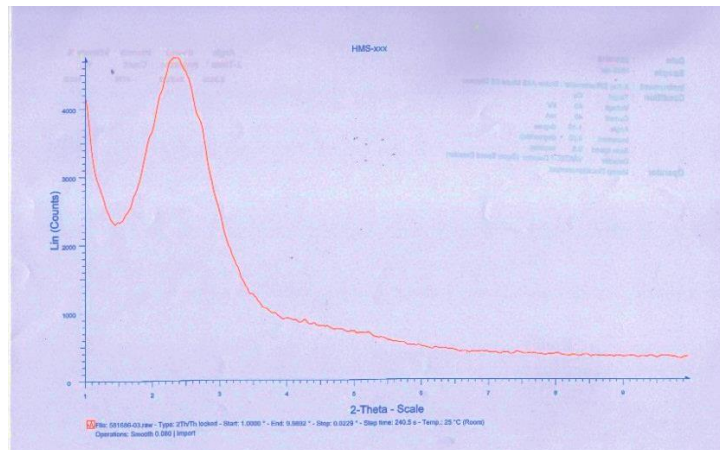
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับชนิด ซิลิกา (S-SP) , ซิลิกาที่ปรับปรุงพื้นผิว โดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่ หมู่ 3-AMINOPROPYLTRIMETHOXY (A-S-SP) และ หมู่ MERCAPTOTRIMETHOXY (M-S-SP), เฮกซะโกนอลเมโสพอร์ซซิลิเกต (HMS-SP), เฮกซะโกนอลเมโสพอร์ซซิลิเกตที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่ หมู่ 3-AMINOPROPYLTRIMETHOXY (A-HMS-SP) และหมู่ MERCAPTOTRIMETHOXY (M-HMS-SP) โดยวิธีการต่อติดหลังกระบวนการสังเคราะห์ (POST-SYNTHESIS GRAFTING METHOD) จากนั้นนำตัวกลางดูดซับที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ

#### 4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

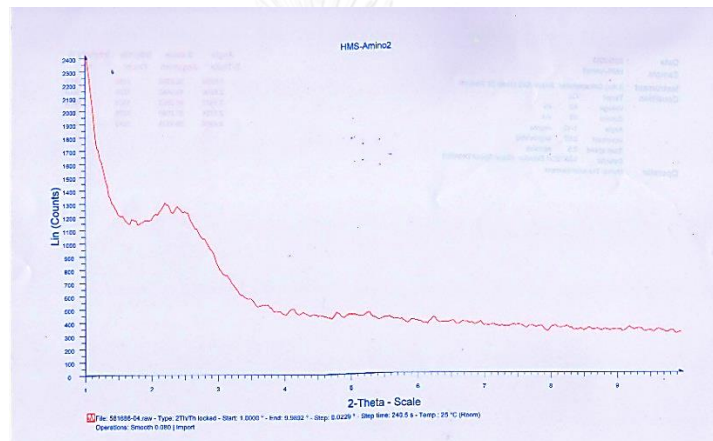
การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวกลางดูดซับที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว ทำโดยใช้ เครื่อง POWDER X-RAY DIFFRACTOMETER (XRD) RIGAKU DMAX 2200 POWDER X-RAY DIFFRACTOMETER EQUIPPED WITH CU  $K\alpha$  RADIATION โดยใช้ SCANNING RATE 1,000 DEG MIN<sup>-1</sup> ในช่วง  $0.5^\circ - 10.0^\circ (2\theta)$  ข้อมูลจากการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.1-4.3

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างของ HMS-SP A-HMS-SP และ M-HMS-SP พบว่า HMS-SP มีพีคที่  $2.30^\circ$  แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างแบบหกเหลี่ยมที่ค่อนข้างสมบูรณ์ของ HMS-SP (Q. ET AL., 2005) แต่เมื่อทำการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโนพบว่า A-HMS-SP ปรากฏพีคที่  $2\theta = 2.19^\circ$  มีความสูงลดลง แสดงดังรูปที่ 4.2 แต่ยังคงแสดงหลักฐานโครงสร้างแบบหกเหลี่ยม อาจเป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่อะมิโนและหมู่ซิลานอลด้วยพันธะไฮโดรเจนบนพื้นผิวที่ทำการปรับปรุง ทำให้โครงสร้างแบบหกเหลี่ยมพังทลายลงไปจำนวนมาก (BLITZ และคณะ, 2007) ส่วน M-HMS-SP ปรากฏพีคที่  $2\theta = 2.26^\circ$  แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าการต่อติดหมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโตไม่ทำให้โครงสร้างแบบหกเหลี่ยมพังทลายลง แต่มีค่าความสูงของพีคลดลงเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการต่อติดหมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโต

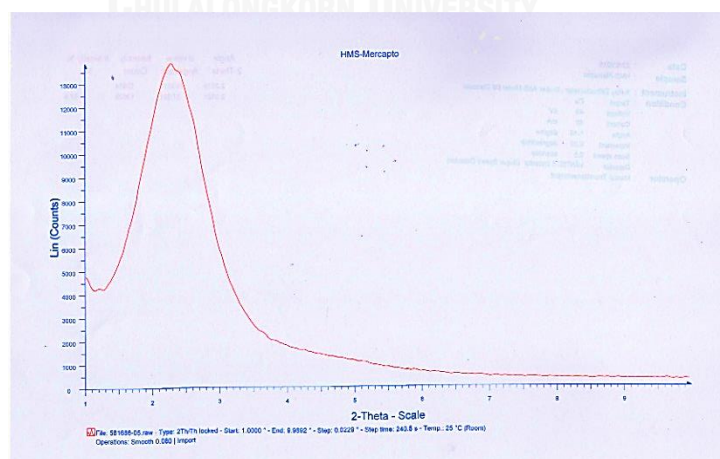




รูปที่ 4.1 ผล XRD ของตัวกลางดูดซับชนิด HMS-SP



รูปที่ 4.2 ผล XRD ของตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP



รูปที่ 4.3 ผล XRD ของตัวกลางดูดซับชนิด M-HMS-SP

#### 4.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว

การวิเคราะห์การดูดซับของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนบนพื้นผิวของสารดูดซับ สามารถวิเคราะห์ได้จากปริมาณไนโตรเจนโดยใช้ เครื่อง CNS/O ANALYZER ของ THERMO SCIENTIFIC™ รุ่น FLASH 2000 โดยสามารถวัดค่าปริมาณไนโตรเจนที่ดูดซับบนตัวกลางดูดซับได้ค่าเฉลี่ย 4.22 % โดยน้ำหนัก (%w/w) ข้อมูลจากการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.1 สามารถสรุปได้ว่าการดูดซับหมู่ฟังก์ชันอะมิโนทำได้เป็นผลสำเร็จ จากผลการตรวจวัดพื้นที่ผิวดังแสดงในหัวข้อที่ 4.1.3 พบว่า A-HMS-SP มีพื้นที่ผิวน้อยอันเนื่องมาจากเกิดการพังทลายของโครงสร้างหกเหลี่ยม นอกจากนี้ยังสามารถนำค่า %ไนโตรเจน (w/w) ไปคำนวณหาความหนาแน่นของหมู่อะมิโนบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ได้เท่ากับ  $3.22 \times 10^{19}$  โมเลกุลต่อ A-HMS-SP 1 กรัม

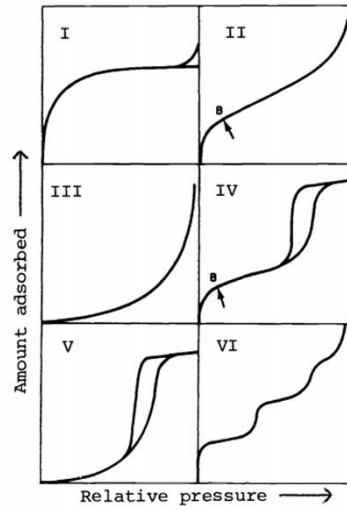
ตารางที่ 4. 1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ ด้วยเครื่อง CNS/O ANALYZER

ชื่อตัวอย่าง	ครั้งที่	คาร์บอน (%)	ไฮโดรเจน (%)	ไนโตรเจน (%)
A-HMS-SP	1	11.97	3.51	4.19
	2	12.56	3.14	4.39
	3	12.00	3.46	4.05
	4	12.59	3.10	4.25
	ค่าเฉลี่ย	12.28	3.30	4.22

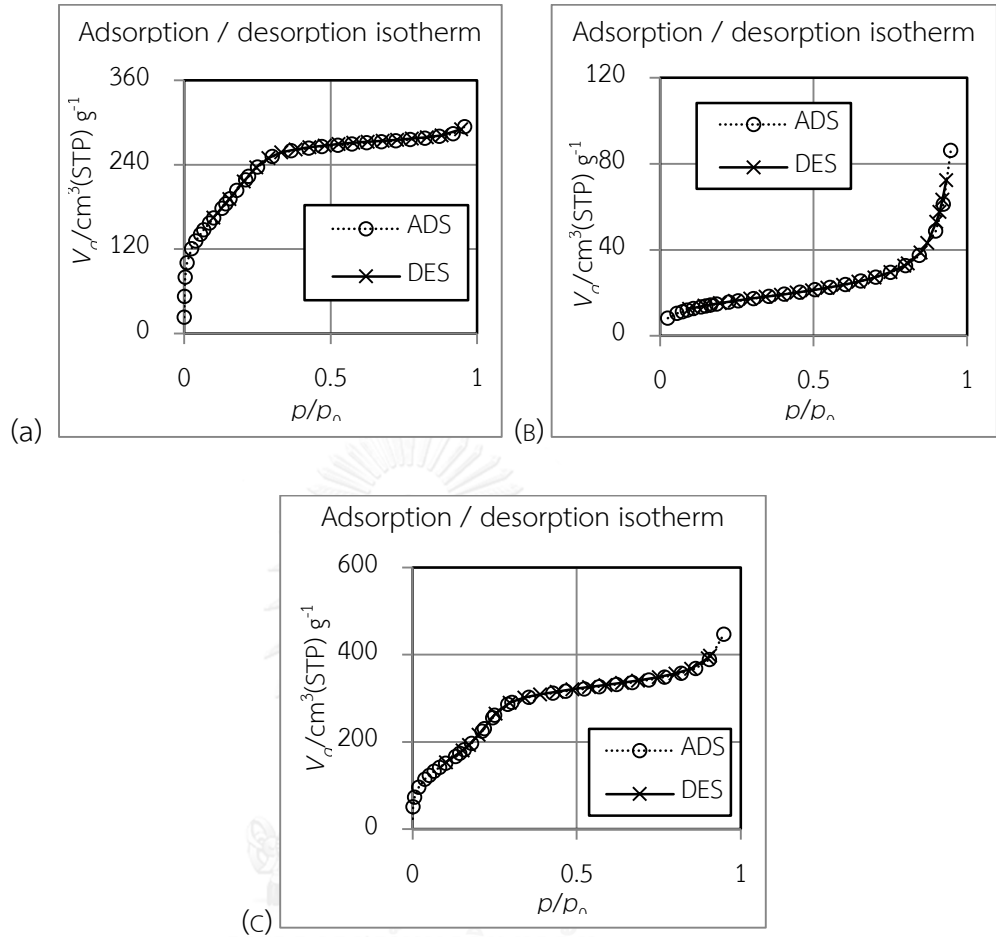
#### 4.1.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับ

จากการศึกษาการหาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน โดยใช้ สมดุลการดูดซับของไนโตรเจน โดยเครื่อง SURFACE AREA AND POROSITY ANALYZER MICROMERITIC ASAP 2020 กับตัวกลางดูดซับชนิด HMS-SP, A-HMS-SP และ M-HMS-SP พบว่ามีปริมาณการดูดซับก๊าซไนโตรเจนลดลงเมื่อมีการดูดซับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว โดยจากการวิเคราะห์พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของ HMS-SP > HMS-M > HMS-A ดังตารางที่ 4.2 โดยสมดุลการดูดซับของตัวกลางดูดซับทั้งชนิด HMS-SP เป็นสมดุลการดูดซับชนิดที่ 1 ตามทฤษฎี BET ซึ่งพบได้ในวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง (2-50 นาโนเมตร) และมีพื้นที่ผิวภายนอกน้อย โดยการดูดซับไนโตรเจนได้รับอิทธิพลมาจากความสามารถในการแพร่เข้าไปในรูพรุนมากกว่าพื้นที่ผิวภายใน, A-HMS-SP เป็นสมดุลการดูดซับชนิดที่ 2 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่สามารถพบได้ตามปกติในกรณีที่มีรูพรุนแบบไม่มีรูพรุน หรือมีรูพรุนขนาดใหญ่, M-HMS-SP เป็นสมดุลการดูดซับชนิดที่ 4 ดังรูปที่ 4.5 และเกิดฮิสเทอรีซิสลูป (HYSTERESIS LOOP) เล็กน้อย

เนื่องจากเกิดการควบแน่นภายในรูขนาดเล็ก ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่สามารถพบได้และมักเกิดขึ้นในวัสดุที่มีรูพรุนแบบรูพรุนขนาดกลาง

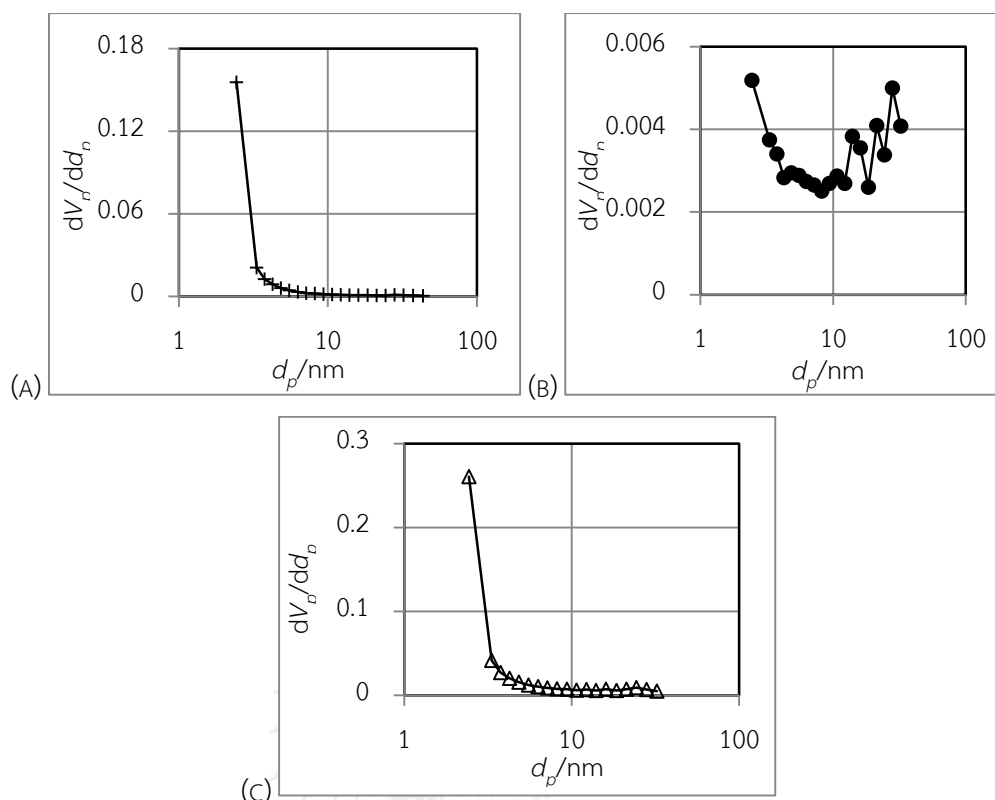


รูปที่ 4. 4 การจำแนกไอโซเทอมการดูดซับก๊าซทั้ง 6 ชนิดตาม IUPAC



รูปที่ 4.5 สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ (A) HMS-SP (B) A-HMS-SP (C) M-HMS-SP

จากรูปที่ 4.6 การกระจายขนาดของรูพรุน (PORE SIZE DISTRIBUTION) สามารถคำนวณได้ด้วยสมการของ BARRET-JOYNER-HALLEND (BJH) พบว่า HMS-SP, A-HMS-SP และ M-HMS-SP มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 2.44 นาโนเมตร เท่ากันทั้ง 3 ชนิด แต่เมื่อพิจารณาการกระจายขนาดของรูพรุนของตัวกลางดูดซับชนิด HMS-SP และ M-HMS-SP พบว่า มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนอย่างสม่ำเสมอ โดย M-HMS-SP อาจเกิดการเคลือบของหมู่ฟังก์ชันเมอแคปโตบนพื้นผิวของซิลิกา และเข้าไปเคลือบในรูที่มีขนาดใหญ่ได้ ทำให้ได้ปริมาตรรูพรุนมากขึ้น แต่พื้นที่ผิวน้อยลง ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และใน A-HMS-SP พบว่ามีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น อาจเป็นเพราะเกิดการพังทลายของผนังโครงสร้างหกเหลี่ยม



รูปที่ 4. 6 การกระจายขนาดของรูพรุน (PORE SIZE DISTRIBUTION) (BJH) ของ  
(A) HMS-SP (B) A-HMS-SP (C) M-HMS-SP

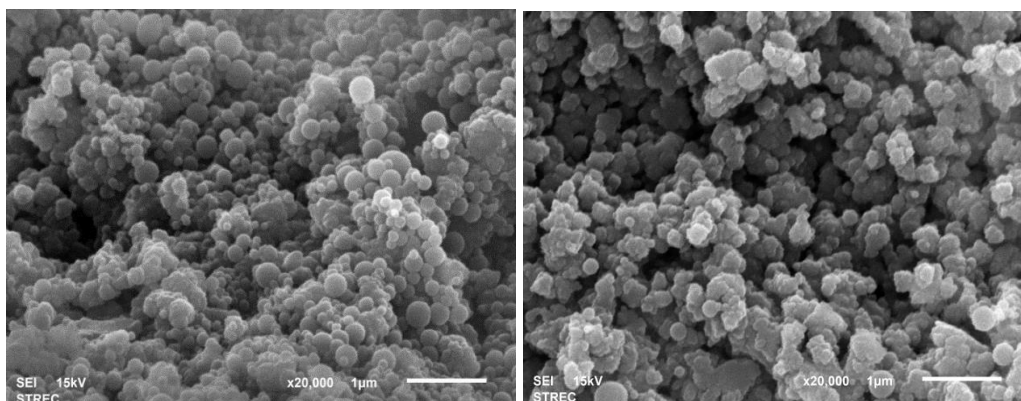
ตารางที่ 4. 2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับ

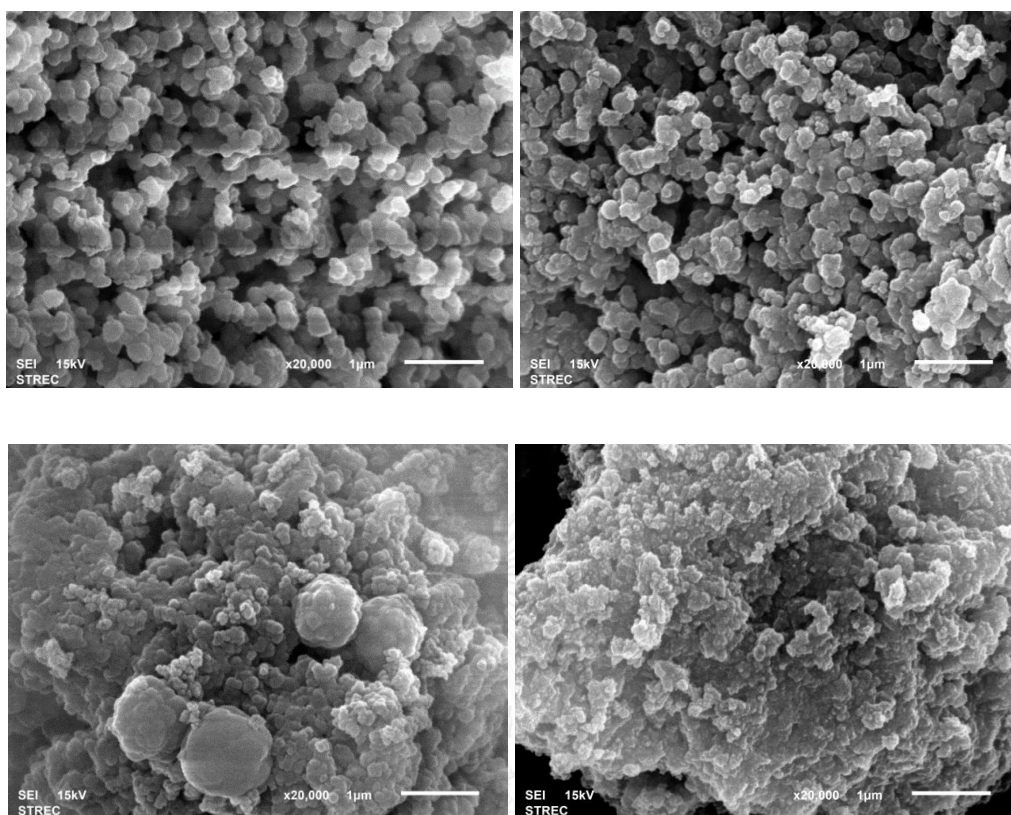
ตัวกลางดูดซับ	ขนาดรูพรุน (NM)	ปริมาตรรูพรุน (CM <sup>3</sup> /G)	พื้นที่ผิว (M <sup>2</sup> /G)
HMS-SP	2.44	0.2789	815.54
A-HMS-SP	2.44	0.1181	56.41
M-HMS-SP	2.44	0.6092	760.95

#### 4.1.4 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ และขนาดอนุภาค

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (SEM)) โดยใช้กำลังขยาย 20,000 เท่า ได้ผลดังแสดงดังรูปที่ 4.7 โดยตัวกลางดูดซับประเภท S-SP มีลักษณะค่อนข้างเป็นทรงกลม มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.277 ไมโครเมตร, HMS-SP มีลักษณะพื้นผิวเป็นเหลี่ยมเล็กน้อย มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.318 ไมโครเมตร, A-S-SP มีการจับตัวกันของอนุภาค และถูกเคลือบด้วยหมู่ฟังก์ชันตรงตามสมมติฐาน จนมีรูปร่างเปลี่ยนไป มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.333 ไมโครเมตร, A-HMS-SP มีลักษณะคล้ายคลึงกับ A-S-SP โดยพบว่าตัวกลางดูดซับถูกเคลือบด้วยหมู่

ฟังก์ชันจนวนมีลักษณะพื้นผิวเปลี่ยนไป มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.336 ไมโครเมตร, M-S-SP มีลักษณะถูกเคลือบเป็นชั้น และมีผิวขรุขระ มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.401 ไมโครเมตร และ M-HMS-SP พบว่าตัวกลางดูดซับมีการจับตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ และถูกเคลือบเป็นชั้นจนวนพื้นผิวเปลี่ยนไปเช่นกัน มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.392 ไมโครเมตร





รูปที่ 4. 7 รูปถ่ายตัวกลางดูดซับชนิด S-SP, HMS-SP, A-S-SP, A-HMS-SP, M-S-SP และ M-HMS-SP จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 20,000 เท่า

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิดที่สังเคราะห์ได้ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4. 3 สมบัติทางการภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด

+ ตัวกลาง ดูดซับ	หมู่ฟังก์ชันบน พื้นผิว	ขนาด อนุภาค (NM)	ขนาด รูพรุน (NM)	ปริมาตร รูพรุน (CC/G)	พื้นที่ผิว (M <sup>2</sup> /G)	PH <sub>ZPC</sub>	ความชอบน้ำ และไม่ชอบน้ำ
S-SP	ซิลานอล	227	-	-	58.00 <sup>(1)</sup>	6.2 <sup>(1)</sup>	ชอบน้ำ

HMS-SP <sup>(2)</sup>	-ซิลานอล	318	2.44	0.2789	815.54	4.9 <sup>(2)</sup>	ชอบน้ำ
A-S-SP	อะมิโน	333	-	-	7.80 <sup>(1)</sup>	7.8 <sup>(1)</sup>	ชอบน้ำ
A-HMS-SP	อะมิโน	336	2.44	0.1181	56.414	9.3 <sup>(2)</sup>	ชอบน้ำ
M-S-SP	เมอร์แคปโต	401	-	-	57.09 <sup>(1)</sup>	5.6 <sup>(1)</sup>	ไม่ชอบน้ำ
M-HMS-SP	เมอร์แคปโต	392	2.44	0.6092	760.95	5.0 <sup>(2)</sup>	ไม่ชอบน้ำ

<sup>(1)</sup> พิษชาภา บุญคง, <sup>(2)</sup> ฉมนรี สุขเกษม, 2558

## 4.2 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบทีละเท

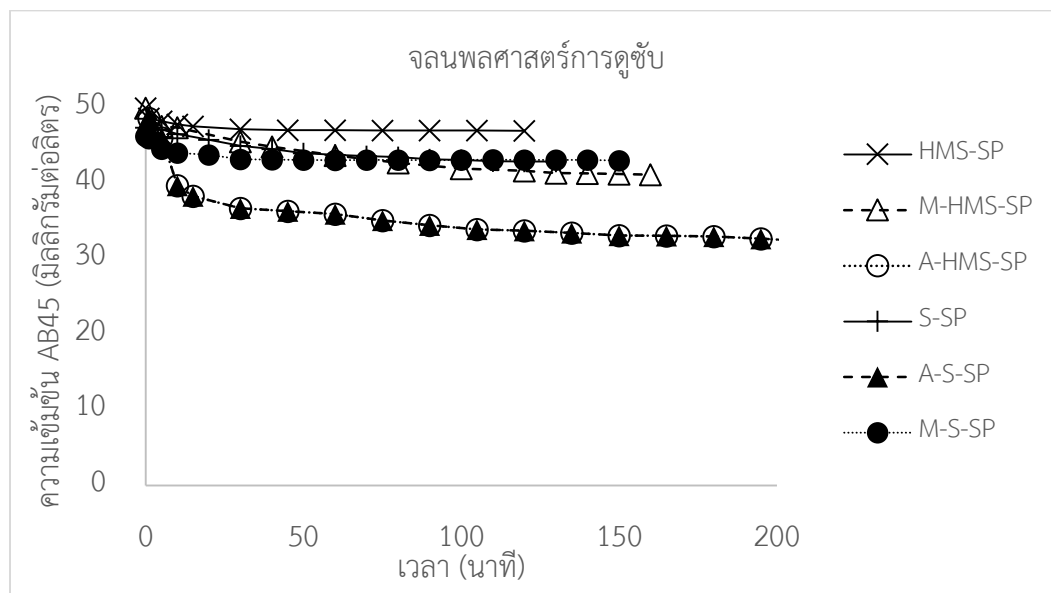
### 4.2.1 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับแอสิตบลู 45

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับแอสิตบลู 45 (AB45) บนตัวกลางดูดซับทั้ง 6 ชนิด ได้แก่ HMS-SP, A-HMS-SP, M-HMS-SP, S-SP, A-S-SP และ M-S-SP ทดลองที่ความเข้มข้นของสารละลาย AB45 มีค่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ควบคุมให้มี pH เท่ากับ 7 ด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส นำไปเขย่าแล้วเก็บตัวอย่างตั้งแต่เวลา 0-3 ชั่วโมง แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่หลงเหลืออยู่ในสารละลาย เทียบกับเวลาใดๆ เพื่อหาเวลาที่ความเข้มข้นของสารเข้าสู่สมดุล โดยจะได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าตัวกลางดูดซับที่ถูกเคลือบด้วยหมู่ฟังก์ชันอะมิโน ทั้ง A-HMS-SP และ A-S-SP มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด โดยจะเกิดการดูดซับอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรก และลดลงจนเข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 150 นาทีทั้งสองตัวกลางดูดซับ ในขณะที่ตัวกลางดูดซับประเภท M-HMS-SP, M-S-SP, S-SP และ HMS-SP จะมีเวลาในการเข้าสู่สมดุลลดลงที่เวลาประมาณ 120, 110, 45 และ 30 นาที ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาถึงประเภทของตัวกลางดูดซับที่มีการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโน ทั้ง A-HMS-SP และ A-S-SP พบว่าเป็นหมู่ฟังก์ชันมีแสดงประจุเป็นบวก และมีคุณสมบัติชอบน้ำ สอดคล้องกับลักษณะของ AB45 ที่แสดงความเป็นประจุลบ และมีคุณสมบัติชอบน้ำเช่นกัน จึงอาจกล่าวได้ว่าตัวกลางดูดซับดังกล่าวสามารถดูดซับ AB45 ได้ดี เนื่องจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตกับหมู่ฟังก์ชันอะมิโน ในขณะที่ตัวกลางดูดซับที่มีการต่อติดหมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโต ทั้ง M-HMS-SP และ M-S-SP พบว่าเป็นหมู่ฟังก์ชันมีแสดงประจุเป็นลบ และมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ ซึ่งสามารถอธิบายถึงแนวโน้มการดูดซับที่ต่ำกว่าหมู่ฟังก์ชันอะมิโน และ



อาจกล่าวได้อีกประการเกี่ยวกับตัวกลางดูดซับประเภท M-HMS-SP, M-S-SP, S-SP และ HMS-SP อาจเกิดแรงลอนดอน ที่เป็นแรงระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วกับไม่มีขั้วบนตัวกลางดูดซับ และมลสารที่เกิดขึ้นได้



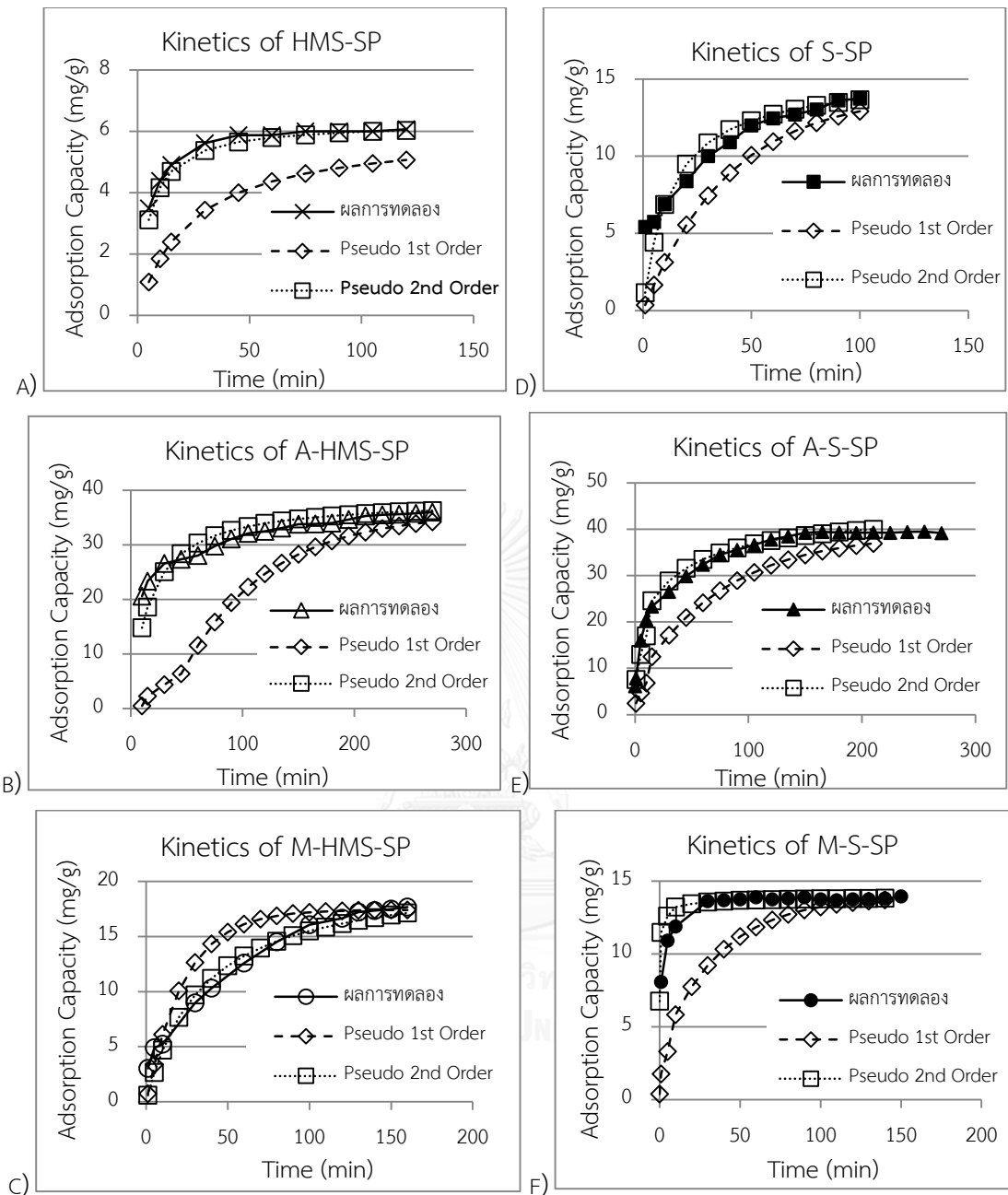
รูปที่ 4. 8 จลนพลศาสตร์การดูดซับ AB45 บนตัวกลางดูดซับชนิด HMS-SP, A-HMS-SP, M-HMS-SP, S-SP, A-S-SP และ M-S-SP

เมื่อนำข้อมูลจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ AB45 มาพิจารณาความเข้ากันได้กับสมการคณิตศาสตร์ ได้แก่ สมการจลนพลศาสตร์ อันดับ 1 เสมือน และสมการจลนพลศาสตร์ อันดับ 2 เสมือน เมื่อใช้การเปรียบเทียบค่า R-SQUARE และความเข้ากันได้ของชุดข้อมูล พบว่าตัวกลางดูดซับทั้ง 6 ชนิด มีค่าจลนพลศาสตร์การดูดซับเข้ากันได้กับสมการการดูดซับอันดับ 2 เสมือนทั้งหมด โดยแสดงดังรูปที่ 4.9 และมีค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ AB45 บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ตามตาราง 4.4

ตารางที่ 4. 4 ค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ AB45 บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

ชนิดตัวกลางดูดซับ	จลนพลศาสตร์การดูดซับ	$Q_E$ (MG/G)	$Q_{E,CAL}$ (MG/G)	$K_2$ (G/MG*MIN)	$R^2$
HMS-SP	อันดับ 2 เสมือน	6.022	6.289	0.03113	0.9999
A-HMS-SP	อันดับ 2 เสมือน	35.81	38.46	0.001625	0.9981
M-HMS-SP	อันดับ 2 เสมือน	17.44	20.83	0.001393	0.9531
S-SP	อันดับ 2 เสมือน	14.05	15.34	0.005297	0.9923
A-S-SP	อันดับ 2 เสมือน	39.16	44.25	0.000940	0.9967
M-S-SP	อันดับ 2 เสมือน	13.94	13.91	0.067843	0.9998

จากการนำผลที่ได้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ AB45 บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ พบว่าตัวกลางดูดซับชนิด A-S-SP และ A-HMS-SP มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด โดยมีค่า  $Q_E$  อยู่ที่ 39.16 และ 35.81 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เมื่อพิจารณาพร้อมกับค่าคงที่อัตราเทียมอันดับ 2 (PSEUDO SECOND RATE CONSTANT) พบว่าเป็นตัวกลางดูดซับที่มีอัตราเร็วการดูดซับต่ำ โดยมีค่าอยู่ที่ 0.000940 และ 0.001625 กรัมต่อมิลลิกรัมนาที่สามารถเรียงลำดับชนิดตัวกลางดูดซับที่มีอัตราเร็วการดูดซับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ M-S-SP > S-SP > HMS-SP > A-HMS-SP > M-HMS-SP > A-S-SP และเมื่อพิจารณาพร้อมกับค่า  $Q_E$  สามารถเรียงลำดับชนิดตัวกลางดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ A-S-SP > A-HMS-SP > M-SMH-SP > S-SP > M-S-SP > HMS-SP



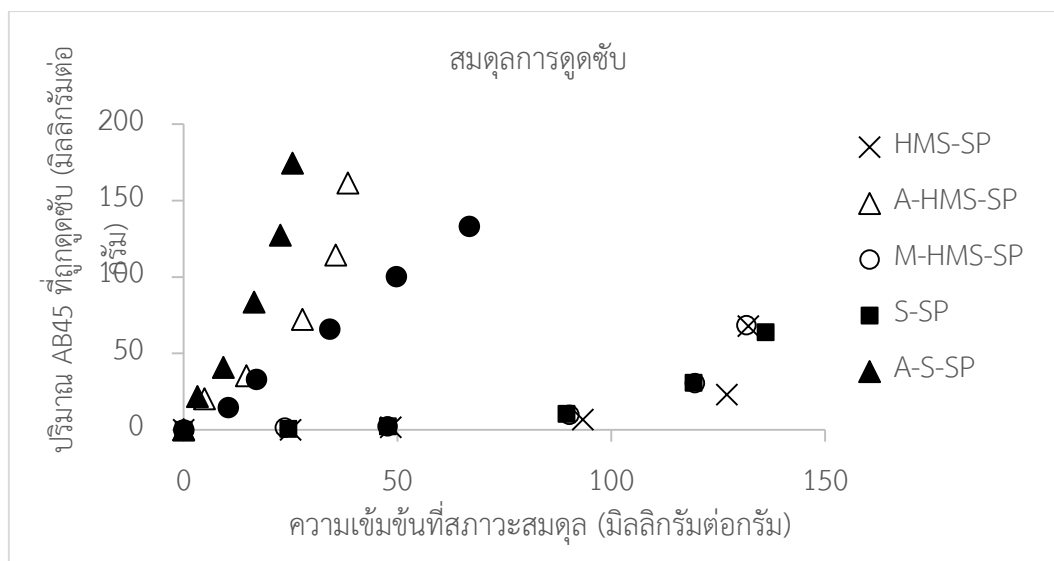
รูปที่ 4.9 ความเข้ากันได้ของสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับที่ 1 เสมือน และ 2 เสมือน ของ การดูดซับ AB45 บนตัวกลางดูดซับชนิด A) HMS-SP, B) A-HMS-SP, C) M-HMS-SP, D) S-SP, E) A-S-SP และ F) M-S-SP

#### 4.2.2 การวิเคราะห์สมดุลการดูดซับแอสิตบูลู 45

การศึกษาสมดุลการดูดซับสารละลายแอสิตบูลู 45 บนตัวกลางดูดซับทั้ง 6 ชนิด ได้แก่ HMS-SP, A-HMS-SP, M-HMS-SP, S-SP, A-S-SP และ M-S-SP ทดลองที่ความเข้มข้น

ของสารละลาย AB45 25, 50, 100, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ควบคุม PH 7 ด้วย ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตร ควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส พบว่าความสามารถในการดูดซับ AB45 ของตัวกลางดูดซับทั้ง 6 ชนิด สามารถเรียงลำดับจาก มาก ไป น้อย ได้ โดย A-HMS-SP > A-S-SP > M-HMS-SP > S-SP > M-HMS-SP > HMS-SP ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.10 และได้ค่าคงที่แสดงดังตารางที่ 4.5

จากผลการทดลอง เมื่อพิจารณาตัวกลางดูดซับชนิด A-S-SP และ A-HMS-SP ซึ่งเป็น ตัวกลางดูดซับชนิดที่มีการต่อติดฟังก์ชันหมู่อะมิโนมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดทั้งสอง ชนิดซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดซับที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลจากการเกาะติด บนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับไม่ได้ขึ้นกับการมีรูพรุนแต่อย่างใด แต่อาจอธิบายได้ว่าการดูด ติดผิวระหว่างสีย้อม เอซิด บลู 45 บนตัวกลางดูดซับทั้งสองชนิดที่มีการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิ โนด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต โดยสามารถอธิบายได้จากว่าเนื่องจากการทดลองนี้ทำ การควบคุม PH=7 ซึ่งเป็นสถานะที่หมู่ฟังก์ชันเอมีนบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับแสดงความ เป็นประจุบวก ( $A-S-SP \text{ PH}_{ZPC}=7.8$ ,  $A-HMS-SP \text{ PH}_{ZPC}=9.3$ ) จะไปดูดติดกับสีย้อม เอซิด บลู 45 ซึ่งเป็นสีย้อมชนิดเบสิก ที่แตกตัวให้ประจุลบในสารละลาย ส่วนตัวกลางดูดซับชนิด M-S- SP และ M-HMS-SP ที่มีความสามารถในการดูดซับรองลงมา อาจกล่าวได้ว่าเป็นผล เนื่องมาจากหมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโตบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับทั้งสองประเภทนี้เป็น ประเภทไม่ชอบน้ำ จึงไม่ดูดซับสีย้อม เอซิด บลู 45 ได้ดีเท่าที่ควร แต่ก็สามารถดูดซับได้ใน ปริมาณที่น้อยลงเนื่องมาจากแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างหมู่เมอร์แคปโตกับอออนของสีย้อม เอ ซิด บลู 45 และเมื่อพิจารณาถึงตัวกลางดูดซับดูดซับชนิด S-SP และ HMS-SP ที่ม ีความสามารถในการดูดซับต่ำที่สุดจนแทบไม่เกิดการดูดซับขึ้นเลย ในส่วนของสีย้อมที่ถูกดูด ซับ อาจกล่าวได้ว่าเป็นผลเนื่องมาจากความชอบน้ำที่เป็นลักษณะของพื้นผิวของตัวกลางดูด ซับที่เป็นซิลิกา และเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นระหว่างซิลิกากับอออนของสีย้อม เอซิดบลู 45

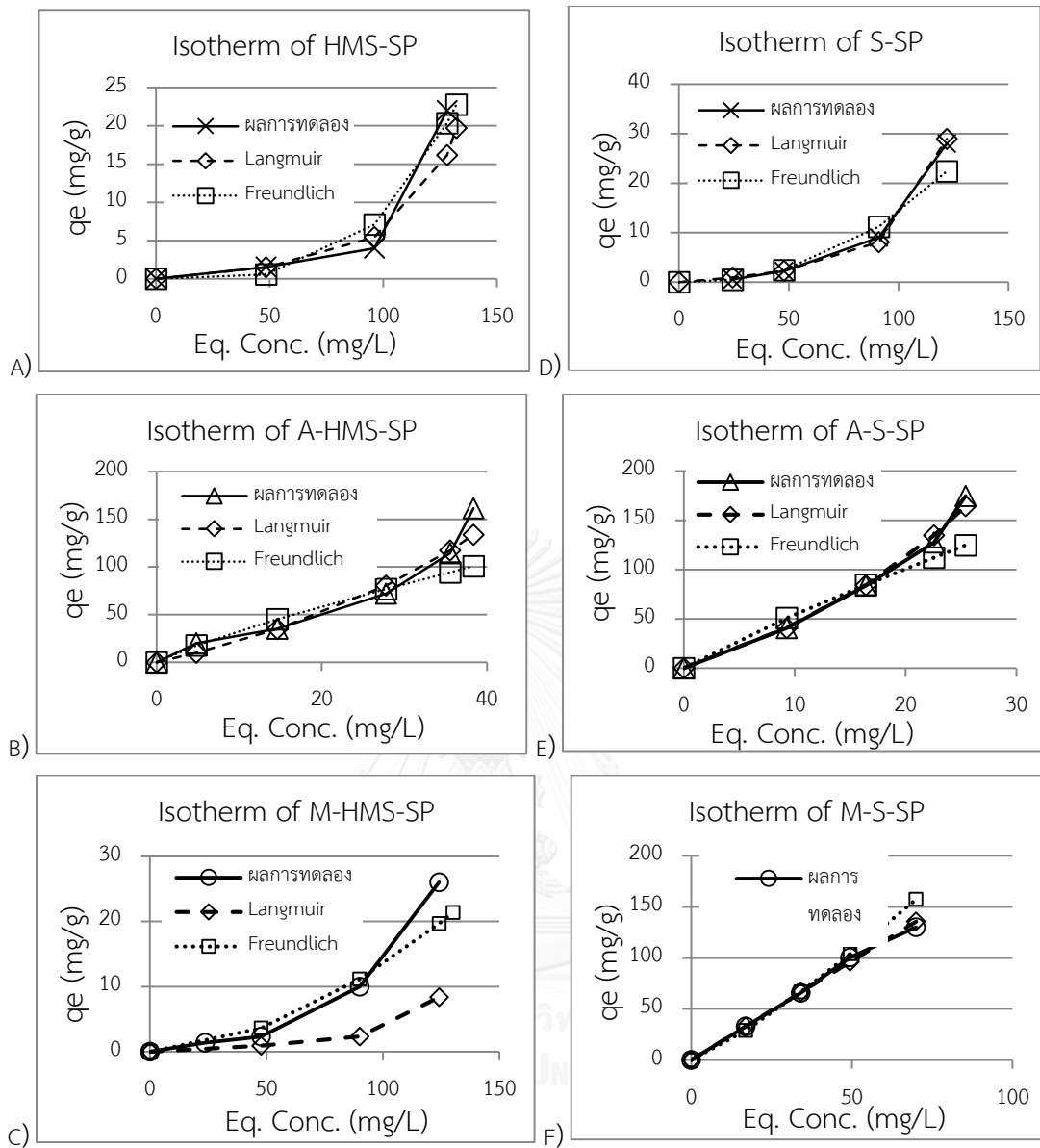


รูปที่ 4.10 สมดุลการดูดซับ AB45 บนตัวกลางดูดซับชนิด  
HMS-SP, A-HMS-SP, M-HMS-SP, S-SP, A-S-SP และ M-S-SP

เมื่อนำข้อมูลจากการศึกษาสมดุลการดูดซับ AB45 มาพิจารณาความเข้ากันได้กับสมการคณิตศาสตร์ ได้แก่ สมการแลงก์เมียร์ และสมการฟรุนด์ลิช เมื่อใช้การเปรียบเทียบค่า R-SQUARE และความเข้ากันได้ของชุดข้อมูล พบว่าตัวกลางดูดซับทั้ง 6 ชนิด มีค่าดูดซับเข้ากันได้กับสมการฟรุนด์ลิชทั้งหมด โดยแสดงดังรูปที่ 4.11 และมีค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ AB45 บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ตามตาราง 4.5

ตารางที่ 4. 5 ค่าตัวแปรสมดุลการดูดซับ AB45 บนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

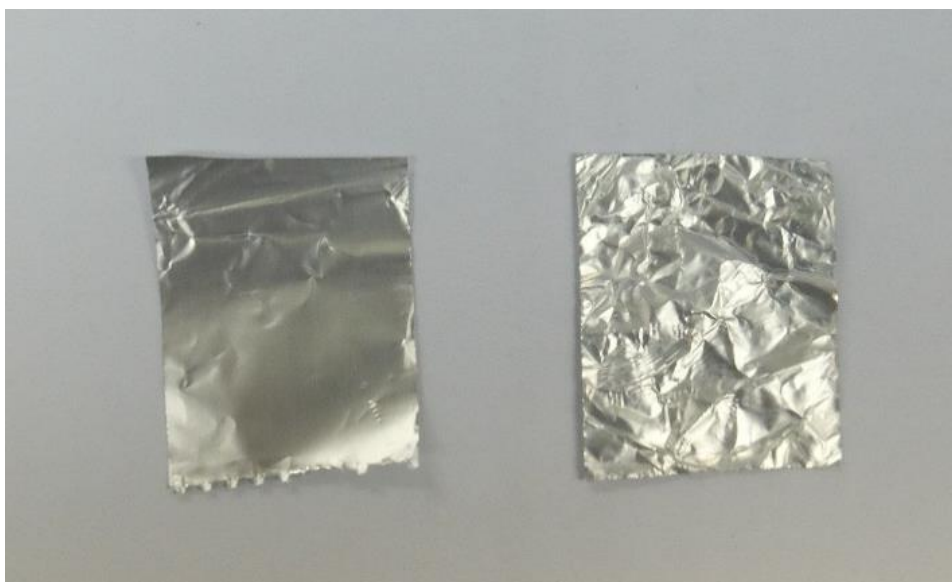
ชนิดตัวกลางดูดซับ	สมดุลการดูดซับ	$K_F$ (L/MG)	N	$R^2$
HMS-SP	ฟรุนด์ลิช	$4.100 \times 10^{-7}$	0.2738	0.9340
A-HMS-SP	ฟรุนด์ลิช	7.0113	1.1242	0.9587
M-HMS-SP	ฟรุนด์ลิช	0.0039	0.5658	0.9320
S-SP	ฟรุนด์ลิช	$2.2859 \times 10^{-4}$	0.4225	0.9872
A-S-SP	ฟรุนด์ลิช	4.888	1.2058	0.9351
M-S-SP	ฟรุนด์ลิช	0.9775	0.8361	0.9873



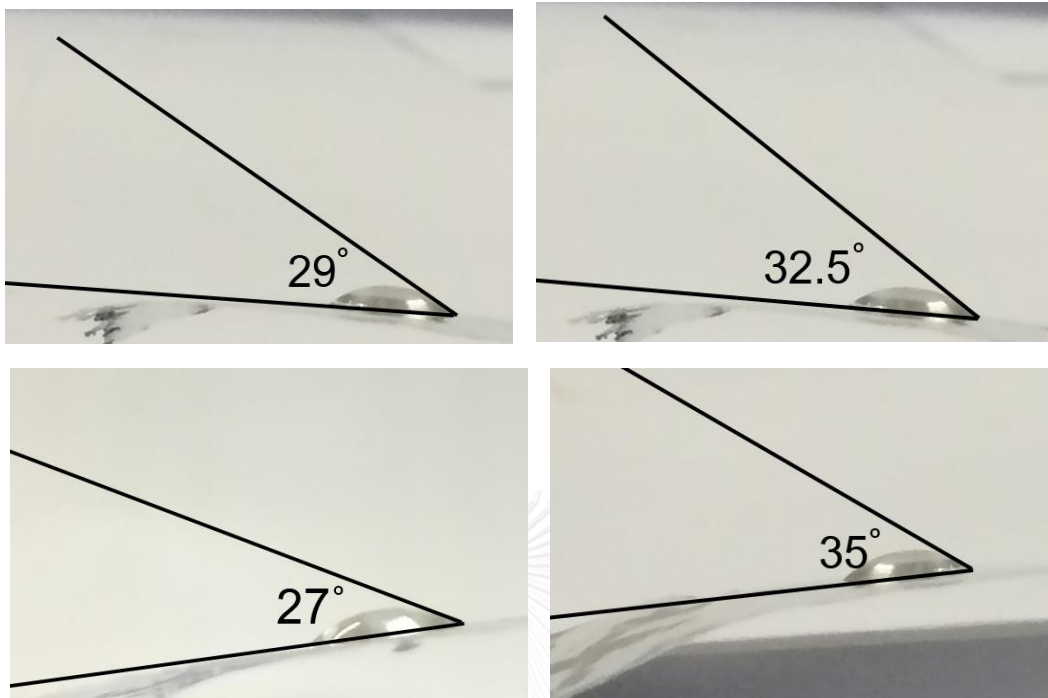
รูปที่ 4. 11 ความเข้ากันได้ของสมการสมดุลการดูดซับแลงก์เมียร์ และฟรอนด์ลิช  
ของการดูดซับ AB45 บนตัวกลางดูดซับชนิด A) HMS-SP, B) A-HMS-SP,  
C) M-HMS-SP, D) S-SP, E) A-S-SP และ F) M-S-SP

#### 4.3 การศึกษาลักษณะสมบัติของเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

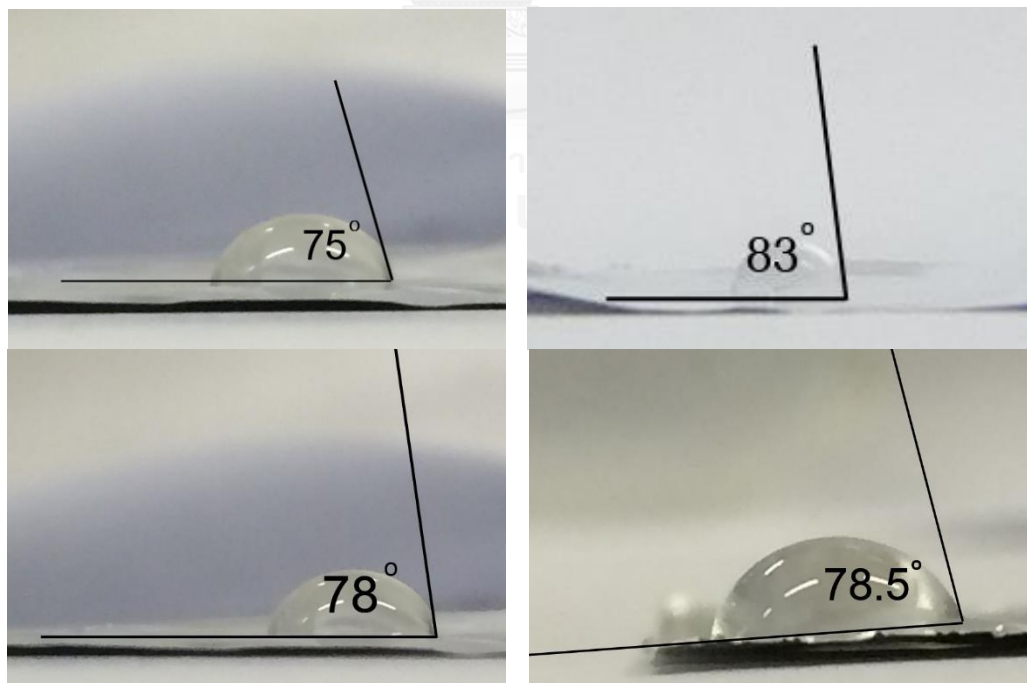
จากรูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของสแตนเลสและสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว จะเห็นได้ว่าพื้นผิวของสแตนเลสที่ถูกจุ่มลงในสารละลายซิลิกาโซลมีลักษณะเป็นฟิล์มสีขาวเคลือบอยู่บนพื้นผิวของสแตนเลส แสดงถึงการเกิดโครงสร้างอนินทรีย์ของสารละลายซิลิกาโซลเคลือบติดอยู่บนพื้นผิว และเมื่อทำไปหยดน้ำขนาด 5 ไมโครลิตรลงบนพื้นผิวเพื่อเพื่อวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ จะได้ผลของมุมสัมผัสบนสแตนเลสมีค่าเฉลี่ย 30.88 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.13 แสดงคุณสมบัติเป็นพื้นผิวประเภทชอบน้ำ และผลของมุมสัมผัสบนสแตนเลสที่มีการปรับปรุงพื้นผิวแล้วมีค่าเฉลี่ย 78.63 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.14 แสดงคุณสมบัติเป็นพื้นผิวประเภทชอบไม่น้ำ



รูปที่ 4. 12 รูปถ่ายเปรียบเทียบลักษณะผิวหน้าของสแตนเลส (ซ้าย)  
และสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว (ขวา)



รูปที่ 4. 13 รูปถ่ายการวัดมุมของหยดน้ำบนผิวสแตนเลส



รูปที่ 4. 14 รูปถ่ายการวัดมุมของหยดน้ำบนผิวสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว



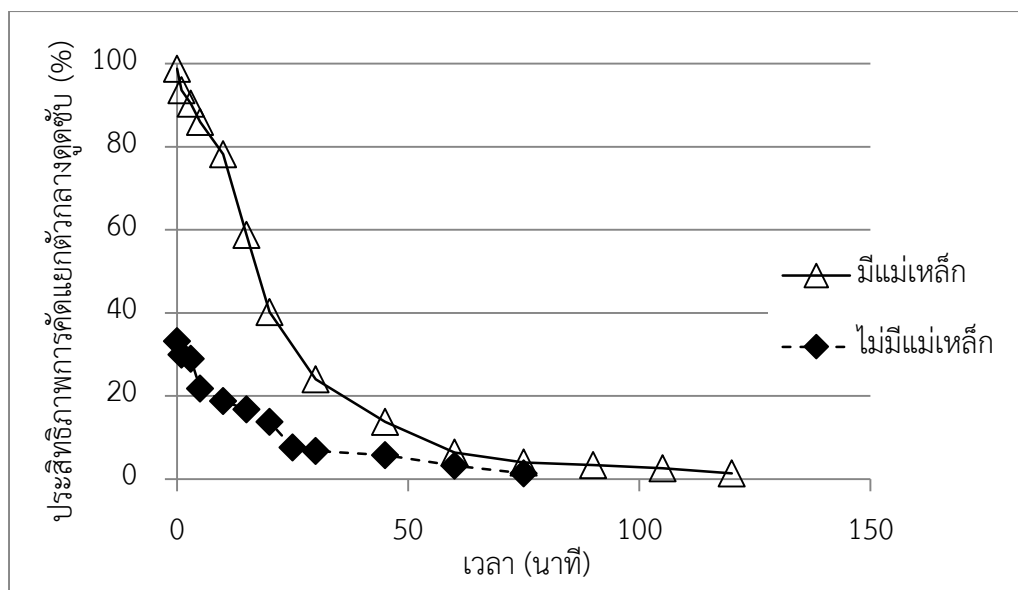
ตารางที่ 4. 6 มุมของหยดน้ำบนผิวสแตนเลสที่ปรับปรุงพื้นผิวแล้ว และไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว

สแตนเลสที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว		สแตนเลสที่ปรับปรุงพื้นผิวแล้ว	
ครั้งที่วัด	องศาที่วัดได้	ครั้งที่วัด	องศาที่วัดได้
1	29	1	75
2	32.5	2	83
3	27	3	78
4	35	4	78.5
เฉลี่ย	30.88	เฉลี่ย	78.63

#### 4.4 การศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้ HIGH GRADIENT MAGNETIC SEPARATE FILTER (HGMS)

##### 4.4.1 การศึกษาผลกระทบจากสนามแม่เหล็กบนเส้นใยสแตนเลส

จากการศึกษาผลกระทบจากสนามแม่เหล็กในกระบวนการแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร ที่ความเร็วการไหล 32.87 เซนติเมตรต่ออนาที ความสูงชั้นกรอง 1.5 เซนติเมตร ความพรุนชั้นกรอง 96.85% ทดลองสองครั้ง โดยครั้งแรกใช้แม่เหล็ก 1 คู่ ขนาด 500 เกาส์ ประคบข้างชั้นกรองเส้นใยสแตนเลส และทดลองซ้ำอีกครั้งโดยไม่ใช้แม่เหล็ก วัดค่าตัวกลางดูดซับที่หลุดออกไปจากระบบ และแปลงข้อมูลเป็นประสิทธิภาพการคัดแยกตัวกลางดูดซับ สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการคัดแยกตัวกลางดูดซับและเวลาเพื่อเปรียบเทียบจุดเบรคทูลู แสดงดังรูปที่ 4.15



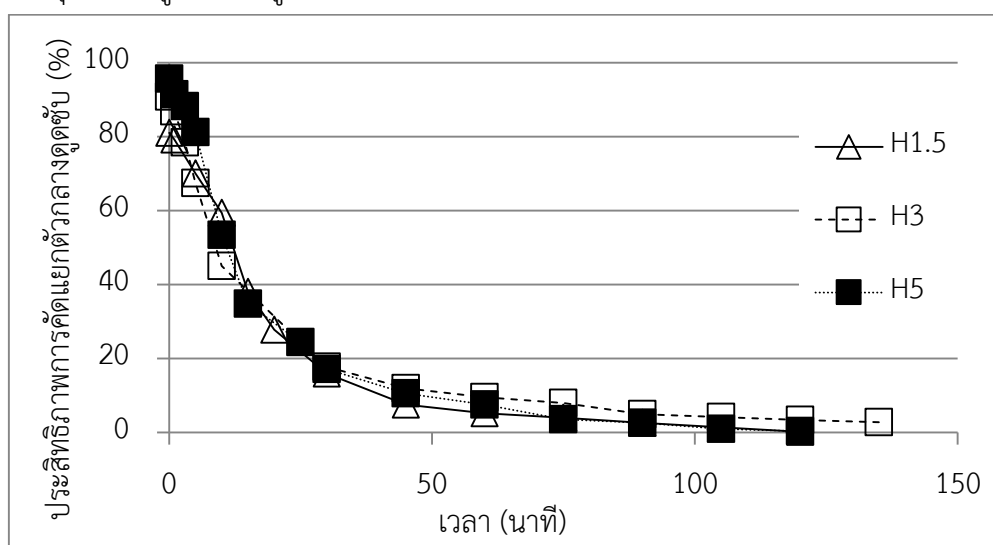
รูปที่ 4. 15 ผลการศึกษาผลกระทบจากสนามแม่เหล็กในการแยกตัวกลางดูดซับ  
ออกจากน้ำ ที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับ 5 กรัมต่อลิตร

เมื่อพิจารณาจุดเบรคทुरुของผลการทดลองที่ใช้แม่เหล็กในการตัดแยกตัวกลางดูดซับ จะได้จุดเบรคทुरुประสิทธิภาพการตัดแยกอยู่ที่ 80% ที่เวลาประมาณ 10 นาที ในขณะที่การทดลองที่ไม่ใช้แม่เหล็กในการตัดแยกตัวกลางดูดซับพบว่าความสามารถในการแยกตัวกรองดูดซับต่ำมาตั้งแต่เวลาที่ 1 ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำมาก สามารถตัดแยกตัวกลางดูดซับได้เพียง 33.4% เท่านั้น และประสิทธิภาพลดลงอย่างรวดเร็วจนเหลือเพียง 21.8% ในนาทีที่ 5 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความสามารถในการกักเก็บตัวกลางดูดซับโดยอาศัยความสามารถในการกรองของเส้นใยสแตนเลสโดยปราศจากสนามแม่เหล็กแทบไม่มีผลกระทบอย่างอื่นนอกจากขัดขวางการไหลของน้ำเสียที่มีตัวกลางดูดซับผสมอยู่ การแยกตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติกด้วยเส้นใยสแตนเลสโดยปราศจากสนามแม่เหล็กจึงไม่เหมาะแก่การนำไปใช้งาน แต่ในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กพบว่าอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กที่ส่งผลต่อชั้นกรองและสารซูเปอร์พาราแมกเนติกในตัวกลางดูดซับ ทำให้เกิดการเกาะติดของตัวกลางดูดซับบนเส้นใยสแตนเลสได้ดีกว่าผลการทดลองที่ได้จากระบบตัดแยกที่ปราศจากสนามแม่เหล็กอย่างเห็นได้ชัด

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองดังที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น จึงอาจกล่าวได้ว่าสนามแม่เหล็กมีความสำคัญอย่างมากต่อการคัดแยกมลสารที่มีสมบัติเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติกด้วยเส้นใยสแตนเลสภายใต้สนามแม่เหล็ก

#### 4.4.2 การศึกษาผลกระทบจากความสูงของชั้นเส้นใยสแตนเลส

จากการศึกษาผลกระทบจากความสูงชั้นกรองเส้นใยสแตนเลสในกระบวนการแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร ที่ความเร็วการไหล 32.87 เซนติเมตรต่อนาที่ความสูงชั้นกรอง 1.5, 3 และ 5 เซนติเมตร ความพรุนชั้นกรอง 96.85% ประกอบทั้งสองด้านของชั้นกรองด้วยแม่เหล็ก 1 คู่ ขนาด 500 เกาส์ วัดค่าตัวกลางดูดซับที่หลุดออกไปจากระบบ และแปลงข้อมูลเป็นประสิทธิภาพการคัดแยกตัวกลางดูดซับ สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการคัดแยกตัวกลางดูดซับและเวลาเพื่อเปรียบเทียบจุดเบรคทुरु แสดงดังรูปที่ 4.16

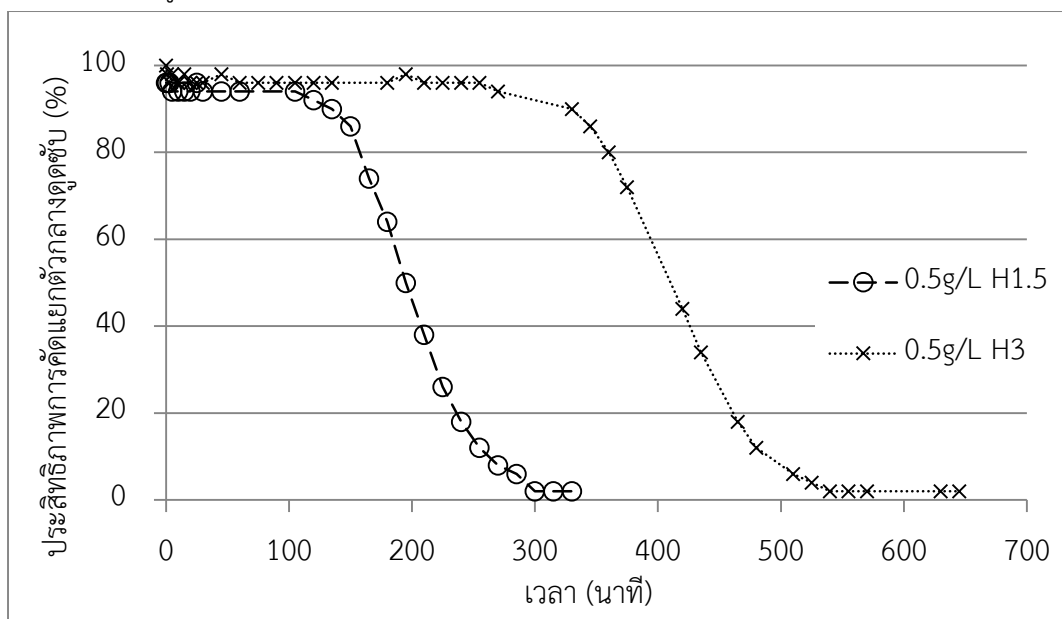


รูปที่ 4. 16 ผลการศึกษาผลกระทบจากความสูงของชั้นกรอง ในการแยกตัวกลางดูดซับ ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตรออกจากน้ำที่ความสูงชั้นกรอง 1.5, 3 และ 5 เซนติเมตร

เมื่อพิจารณาจุดเบรคทुरुของผลการทดลองที่ใช้แม่เหล็กในการคัดแยกตัวกลางดูดซับ ที่ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร จะได้จุดเบรคทुरुประสิทธิภาพการคัดแยกอยู่ที่ 80% ที่เวลา ประมาณ 5 นาที ที่ความสูงชั้นกรอง 5 เซนติเมตร และ 3 นาที สำหรับที่ความสูงชั้นกรอง 3 และ 1.5 เซนติเมตร

เนื่องจากการทดลองในรูปที่ 4.16 ให้ผลการทดลองที่ไม่แตกต่างกันมาก และไม่เด่นชัดพอที่จะอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของชั้นกรอง ผู้วิจัยจึงได้เพิ่มการทดลองที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 และ 3 เซนติเมตร โดยลดความเข้มข้นของตัวกลางดูดซับในน้ำลงเหลือ 0.5 กรัมต่อลิตร ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งจะเห็นได้จุดเบรคทुरुของแต่ละกรณีได้เด่นชัดยิ่งขึ้น โดยสำหรับการทดลองที่ความเข้มข้น 0.5 กรัม ความสูงชั้นกรอง 1.5 เซนติเมตร จะมีจุดเบรคทुरुที่ประสิทธิภาพ 80% ณ เวลาประมาณ 160 นาที

ในขณะที่เมื่อเพิ่มความสูงชั้นกรองเป็น 3 เซนติเมตร ที่ความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร เท่ากัน จะใช้เวลาเบรคทูล์ที่ประสิทธิภาพ 80% ที่เวลา 360 นาที ความสามารถในการกักเก็บตัวกลางดูดซับในชั้นกรองทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเพิ่มความสูงชั้นกรองมีค่าเท่ากับการเพิ่มปริมาณช่องว่างในชั้นกรองที่ทำให้ตัวกลางดูดซับสามารถเข้าไปกักเก็บได้มากขึ้น และได้เวลาเบรคทูล์นานขึ้น

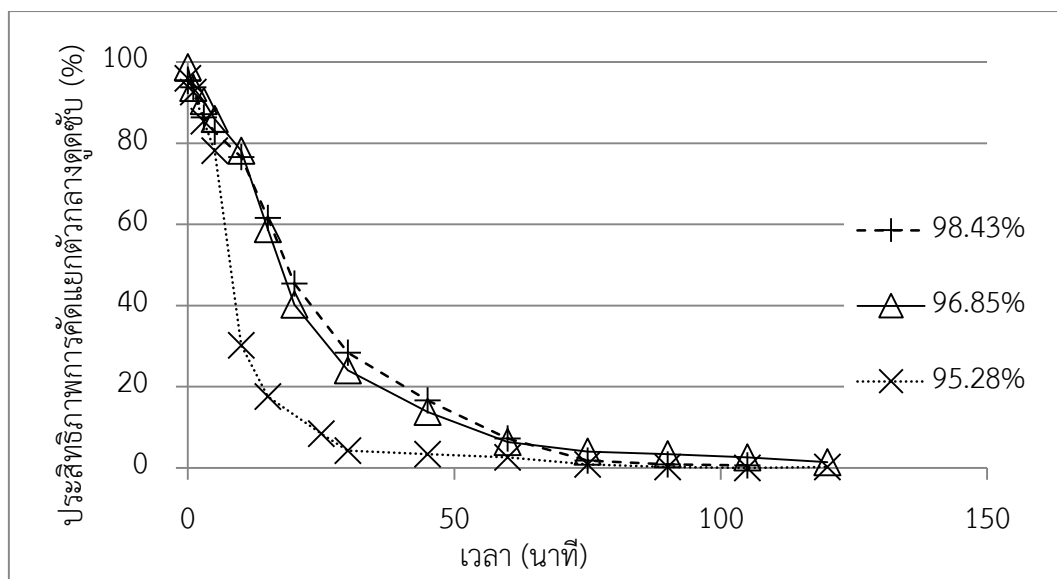


รูปที่ 4. 17 ผลการศึกษาผลกระทบจากความสูงของชั้นกรอง ในการแยกตัวกลางดูดซับความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตรออกจากน้ำ ที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 และ 3 เซนติเมตร

จึงอาจกล่าวได้ว่าความสูงของชั้นกรองที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อการตัดแยกมลสารที่มีสมบัติเป็นซูปเปอร์พาราแมกเนติกด้วยเส้นใยสแตนเลสภายใต้สนามแม่เหล็ก โดยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการตัดแยกตัวกลางดูดซับได้โดยการเพิ่มความสูงของชั้นกรอง

#### 4.4.3 การศึกษาผลกระทบความพรุนของชั้นเส้นใยสแตนเลส

จากการศึกษาผลกระทบจากความพรุนของชั้นกรองเส้นใยสแตนเลสในกระบวนการแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร ที่ความเร็วการไหล 32.87 เซนติเมตรต่อนาที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เซนติเมตร ประภททั้งสองด้านของชั้นกรองด้วยแม่เหล็ก 1 คู่ ขนาด 500 เกาส์ โดยเปลี่ยนแปลงค่าความพรุนชั้นกรองที่ 95.28%, 96.85% และ 98.43% เมื่อวัดค่าตัวกลางดูดซับที่หลุดออกไปจากระบบ และแปลงข้อมูลเป็นประสิทธิภาพการตัดแยกตัวกลางดูดซับ สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการตัดแยกตัวกลางดูดซับและเวลาเพื่อเปรียบเทียบจุดเบรคทูล์ แสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4. 18 ผลการศึกษาผลกระทบจากความพรุนของชั้นกรอง ในการแยกตัวกลางดูดซับ ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตรออกจากน้ำ ที่ความสูงชั้นกรอง 95.28%, 96.85% และ 98.43%

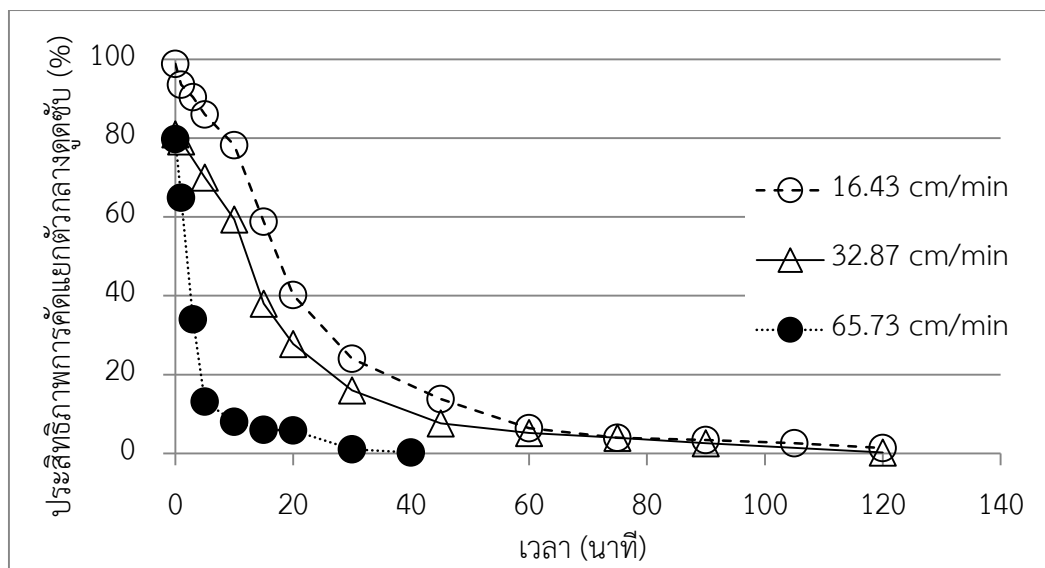
เมื่อพิจารณาจุดเบรคทुरुของผลการทดลองที่ใช้ค่าความพรุนต่าง ๆ กันในการคัดแยกตัวกลางดูดซับที่ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร ที่ความสูงชั้นกรอง 5 เซนติเมตร สำหรับค่าความพรุนที่ทำการศึกษาได้แก่ 95.28%, 96.85% และ 98.43% จะได้จุดเบรคทुरुประสิทธิภาพการคัดแยกอยู่ที่ 80% ที่เวลาประมาณ 4, 7 และ 10 นาที ตามลำดับ และเนื่องจากตัวเลขของความพรุนที่สูงขึ้นหมายถึงปริมาณช่องว่างในชั้นกรองที่สูงขึ้นตาม เมื่อช่องว่างในชั้นกรองมีมากขึ้นก็จะทำให้ตัวกลางดูดซับสามารถไปเกาะติดในช่องว่างระหว่างเส้นใยด้วยแรงแม่เหล็กบนเส้นใยสเตนเลสได้มากขึ้นตาม และส่งผลให้เวลาเบรคทुरुนานขึ้น

จากข้อมูลที่ได้กล่าวได้ว่าความพรุนของชั้นกรองที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อการคัดแยกมลสารที่มีสมบัติเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติกด้วยเส้นใยสเตนเลสภายใต้สนามแม่เหล็ก โดยตัวเลขของความพรุนที่สูงขึ้นหมายถึงปริมาณช่องว่างในชั้นกรองที่สูงขึ้น และจากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงเวลาเบรคทुरुที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีความพรุนเพิ่มขึ้น อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการกักเก็บตัวกลางดูดซับแปรผันตามที่ว่าระหว่างชั้นกรอง เมื่อมีพื้นที่ว่างให้ตัวกลางดูดซับไปเกาะติดมากขึ้น ก็ทำให้ชั้นกรองสามารถกักเก็บตัวกลางดูดซับได้มากขึ้น และได้จุดเบรคทुरुนานขึ้นด้วย

#### 4.4.4 การศึกษาผลกระทบจากความเร็วการไหลของน้ำเสีย

จากการศึกษาผลกระทบจากความเร็วการไหลของน้ำเสียในกระบวนการแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร ความสูงชั้นกรอง 1.5 เซนติเมตร

ความพรุนชั้นกรองที่ 96.85% ประกอบทั้งสองด้านของชั้นกรองด้วยแม่เหล็ก 1 คู่ ขนาด 500 เกาส์ โดยเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วการไหล 16.43, 32.87 และ 65.73 เซนติเมตรต่อนาที เมื่อวัดค่าตัวกลางดูดซับที่หลุดออกไปจากระบบ และแปลงข้อมูลเป็นประสิทธิภาพการคัดแยกตัวกลางดูดซับ สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการคัดแยกตัวกลางดูดซับและเวลาเพื่อเปรียบเทียบจุดเบรคทुरु แสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ผลการศึกษาผลกระทบจากความเร็วการไหล ในการแยกตัวกลางดูดซับความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตรออกจากน้ำ ที่ความเร็วการไหล 16.43, 32.87 และ 65.73 เซนติเมตรต่อนาที

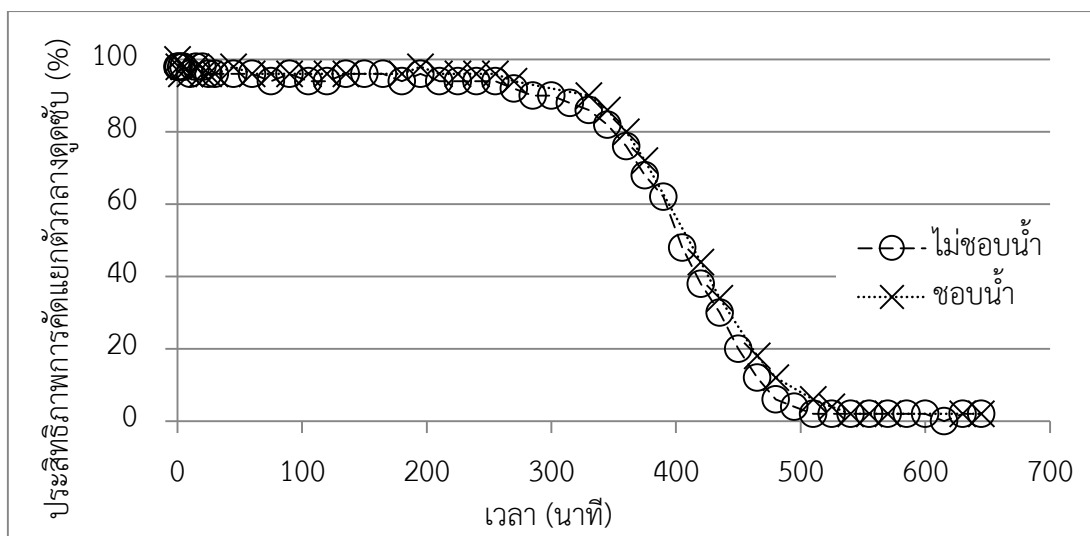
เมื่อพิจารณาจุดเบรคทुरुของผลการทดลองที่ใช้ค่าความพรุนต่าง ๆ กันในการคัดแยกตัวกลางดูดซับที่มีความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร ที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เซนติเมตร ความพรุน 96.85% โดยแปรผันอัตราเร็วการไหลที่ 16.43, 32.87 และ 65.73 เซนติเมตรต่อนาที ได้จุดเบรคทुरुประสิทธิภาพการคัดแยกอยู่ที่ 80% ที่เวลา 10, 1 และ 0 นาที ตามลำดับ อาจอธิบายได้ว่าเนื่องจากความเร็วการไหลที่สูงเกินไปจะทำให้ตัวกลางดูดซับวิ่งผ่านชั้นกรองที่มีสนามแม่เหล็กเร็ว และมีเวลาที่วนอยู่ในชั้นกรองน้อย ทำให้โอกาสที่จะถูกกักเก็บอยู่ในชั้นกรองเกิดขึ้นน้อยกว่า นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาที่ความเร็วการไหลสูงชันทำให้เกิดการพัดพาตัวกลางดูดซับปริมาณมากขึ้นในระยะเวลาเท่าเดิมผ่านชั้นกรอง ทำให้เวลาเบรคทुरुสั้นลง และที่ความเร็วการไหลสูงเกินไปอาจเกิดการพัดพาตัวกลางดูดซับที่ถูกกักเก็บอยู่ในชั้นกรองออกไปกับน้ำขาออกด้วย โดยสามารถอธิบายได้ด้วยตัวเลขที่ได้จากการคำนวณปริมาณตัวกลางดูดซับที่สะสมในชั้นกรองทั้ง 3 ความเร็วการไหล ที่เวลา 40 นาทีเท่ากัน โดยที่

ความเร็ว 16.43, 32.87 และ 65.73 เซนติเมตรต่อนาที ได้ปริมาณตัวกลางดูดซับที่สะสมในชั้นกรองเท่ากับ 98.92, 118.83 และ 170.86 กรัมที่เวลา 40 นาทีเท่ากัน

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองอาจกล่าวได้ว่าความเร็วการไหลในชั้นกรองที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อการคัดแยกมลสารที่มีสมบัติเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติกด้วยเส้นใยสแตนเลสภายใต้สนามแม่เหล็ก โดยเมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการคัดแยกตัวกลางดูดซับเวลาลดลง ซึ่งหมายถึงตัวเลขเวลาเบรคทูลูที่ต่ำลงด้วย อาจกล่าวได้ว่าความารถในการกักเก็บตัวกลางดูดซับแปรผกผันกับความเร็วการไหลในชั้นกรอง และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบได้ด้วยการลดอัตราเร็วการไหลลง

#### 4.4.5 การศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้เส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวในระบบ HGMS

จากการศึกษาผลกระทบจากความเร็วการไหลของน้ำเสียในกระบวนการแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ความเร็วการไหล 32.87 เซนติเมตรต่อนาที ความสูงชั้นกรอง 1.5 เซนติเมตร ความพรุนชั้นกรองที่ 96.85% ประกอบทั้งสองด้านของชั้นกรองด้วยแม่เหล็ก 1 คู่ ขนาด 500 เกาส์ ทำการทดลอง 2 ครั้ง โดยครั้งแรกใช้เส้นใยสแตนเลสแบบไม่ทำการปรับปรุงพื้นผิว และทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนชั้นกรองเป็นเส้นใยสแตนเลสแบบที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว เมื่อวัดค่าตัวกลางดูดซับที่หลุดออกไปจากระบบ และแปลงข้อมูลเป็นประสิทธิภาพการคัดแยกตัวกลางดูดซับ สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการคัดแยกตัวกลางดูดซับและเวลาเพื่อเปรียบเทียบจุดเบรคทูลู แสดงดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4. 20 ผลการศึกษาผลกระทบจากชั้นกรองเส้นใยสแตนเลส และชั้นกรองเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว ในการแยกตัวกลางดูดซั้บความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตรออกจากน้ำ

เมื่อพิจารณาจุดเบรคทुरुของผลการทดลองที่ใช้ค่าความพรุนต่างๆกันในการตัดแยกตัวกลางดูดซั้บที่ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร ที่ความสูงชั้นกรอง 3 เซนติเมตร ความพรุน 96.85% ที่อัตราเร็วการไหลที่ 32.87 เซนติเมตรต่อนาที เปรียบเทียบชั้นกรองเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสแบบปรับปรุงพื้นผิว พบว่าทั้ง 2 การทดลองได้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกันมากจนแทบไม่เห็นความแตกต่าง โดยได้จุดเบรคทुरुประสิทธิภาพการตัดแยกอยู่ที่ 80% ที่เวลา 360 นาที ทั้ง 2 การทดลอง

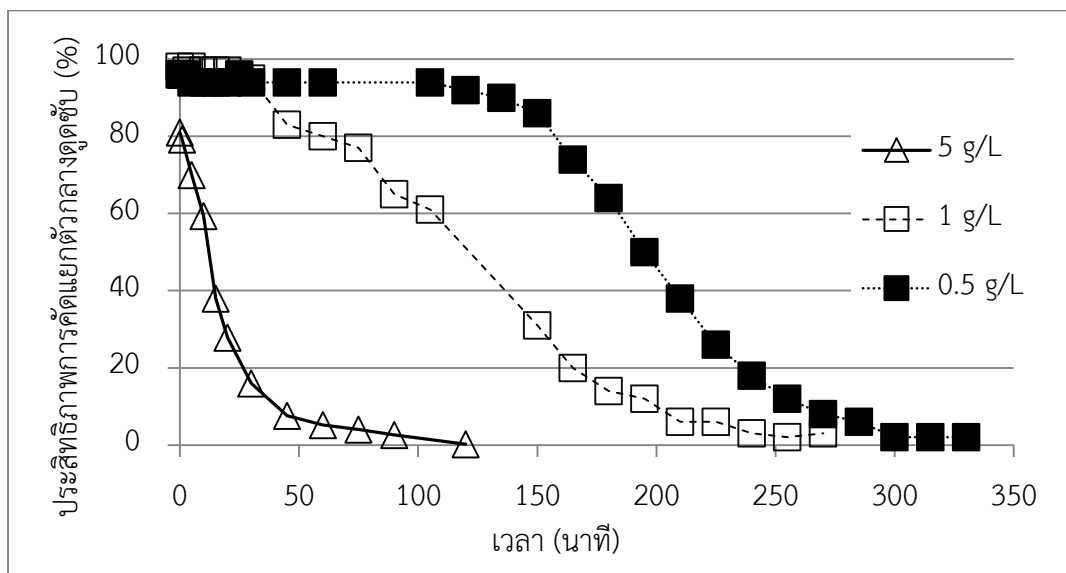
จากการทดลองอาจกล่าวได้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวของชั้นกรองเส้นใยสแตนเลสให้มีความชอบน้ำ หรือไม่ชอบน้ำ ล้วนมีผลกระทบน้อยมากต่อการตัดแยกมลสารที่มีสมบัติเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติกด้วยเส้นใยสแตนเลสภายใต้สนามแม่เหล็ก ทั้งนี้อาจเป็นผลจากแรงแม่เหล็กแสดงอิทธิพลเด่นชัดมากกว่าแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต หรือแรงทางเคมีอื่นๆ จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงพื้นผิวของชั้นกรองเส้นใยสแตนเลสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตัดแยกตัวกลางดูดซั้บแต่อย่างใด

#### 4.4.6 การศึกษาผลของปริมาณอนุภาคตัวกลางดูดซั้บต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS

จากการศึกษาผลกระทบจากปริมาณอนุภาคตัวกลางดูดซั้บในกระบวนการแยกตัวกลางดูดซั้บชนิด A-HMS-SP ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 5 กรัมต่อลิตร ที่ความเร็วการไหล 32.87 เซนติเมตรต่อนาที ความสูงชั้นกรอง 1.5 เซนติเมตร ความพรุนชั้นกรองที่ 96.85% ประกอบทั้งสองด้านของชั้นกรองด้วยแม่เหล็ก 1 คู่ ขนาด 500 เกาส์ เมื่อวัดค่าตัวกลางดูดซั้บที่



หลุดออกไปจากระบบ และแปลงข้อมูลเป็นประสิทธิภาพการคัดแยกตัวกลางดูดซับ สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการคัดแยกตัวกลางดูดซับและเวลาเพื่อเปรียบเทียบจุดเบรคทुरु แสดงดังรูปที่ 4.21



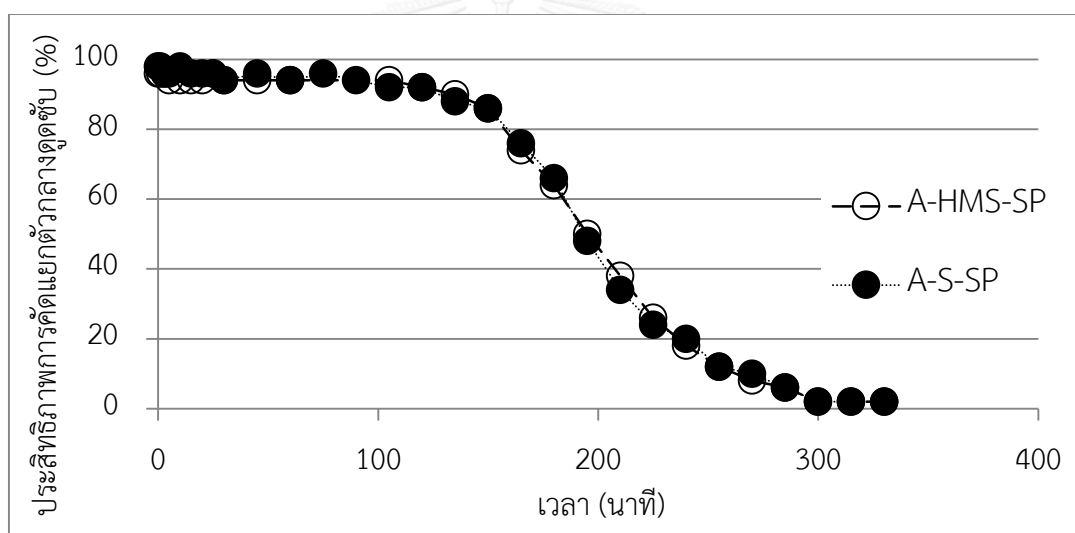
รูปที่ 4. 21 ผลการศึกษาผลกระทบจากชั้นกรองเส้นใยสเตนเลส ในการแยกตัวกลางดูดซับ ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 5 กรัมต่อลิตรออกจากน้ำ

เมื่อพิจารณาจุดเบรคทुरुของผลการทดลองที่ใช้ค่าความพรุนต่างๆกันในการคัดแยกตัวกลางดูดซับที่มีความสูงชั้นกรอง 1.5 เซนติเมตร ความพรุน 96.85% ที่อัตราเร็วการไหลที่ 32.87 เซนติเมตรต่อนาที โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นเป็น 0.5, 1 และ 5 กรัมต่อลิตร โดยได้จุดเบรคทुरुประสิทธิภาพการคัดแยกอยู่ที่ 80% ที่เวลา 160, 60 และ 1 นาที ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่พื้นที่ว่างภายในชั้นกรองถูกเติมเต็มอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวกลางดูดซับขึ้น เป็นผลให้เวลาเบรคทुरुลดลงตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นด้วย

จากการทดลองอาจกล่าวได้ว่าการลดปริมาณความเข้มข้นของตัวกลางดูดซับมีผลกับความสามารถในการคัดแยกตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติกด้วยเส้นใยสเตนเลสภายใต้สนามแม่เหล็ก โดยเมื่อลดปริมาณความเข้มข้นของตัวกลางดูดซับในน้ำลงและจะสามารถเพิ่มเวลาเบรคทुरुได้มากขึ้นด้วย โดยทั้งนี้ในกรณีที่งานวิจัยไปประยุกต์ใช้จริง ควรเลือกใช้ความเข้มข้นที่เหมาะสมในสองปัจจัย ได้แก่ความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการกำจัดมลสารด้วยกระบวนการการดูดซับให้ได้ประสิทธิภาพตามต้องการ และความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการแยกตัวกลางดูดซับด้วยเส้นใยสเตนเลสภายใต้สนามแม่เหล็ก

#### 4.4.7 การศึกษาผลของชนิดอนุภาคตัวกลางดูดซับชนิดมีรูพรุน และอนุภาคกลมเกลี้ยงซึ่งขัดต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS

จากการศึกษาผลกระทบจากปริมาณอนุภาคตัวกลางดูดซับในกระบวนการแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ที่ความเร็วการไหล 32.87 เซนติเมตรต่อนาที่ ความสูงชั้นกรอง 1.5 เซนติเมตร ความพรุนชั้นกรองที่ 96.85% ประกบทั้งสองด้านของชั้นกรองด้วยแม่เหล็ก 1 คู่ ขนาด 500 เกาส์ เมื่อวัดค่าตัวกลางดูดซับที่หลุดออกไปจากระบบ และแปลงข้อมูลเป็นประสิทธิภาพการคัดแยกตัวกลางดูดซับ สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการคัดแยกตัวกลางดูดซับและเวลาเพื่อเปรียบเทียบจุดเบรคทुरु แสดงดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4. 22 ผลการศึกษาผลกระทบจากชนิดอนุภาคตัวกลางดูดซับชนิดมีรูพรุน และอนุภาคกลมเกลี้ยงซึ่งขัดต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS

เมื่อพิจารณาจุดเบรคทुरुของผลการทดลองที่ใช้ค่าความพรุนต่างกันในการคัดแยกตัวกลางดูดซับที่ความสูงชั้นกรอง 1.5 เซนติเมตร ความพรุน 96.85% ที่อัตราเร็วการไหลที่ 32.87 เซนติเมตรต่อนาที่ โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นเป็น 0.5 กรัมต่อลิตร โดยได้จุดเบรคทुरुประสิทธิภาพการคัดแยกอยู่ที่ 80% ที่เวลา 160 นาที ทั้งสองชนิดของตัวกลางดูดซับ

จากการทดลองอาจกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงชนิดอนุภาคตัวกลางดูดซับชนิดมีรูพรุนและอนุภาคกลมเกลี้ยงของตัวกลางดูดซับมีผลกระทบน้อยมากต่อความสามารถในการคัดแยกตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติกด้วยเส้นใยสแตนเลสภายใต้

สนามแม่เหล็ก ทั้งนี้อาจเป็นผลจากแรงแม่เหล็กที่มีอิทธิพลต่อความเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติกของตัวกลางดูดซับแสดงอิทธิพลเด่นชัด ความเป็นรูพรุนหรือเป็นอนุภาคบนพื้นผิวภายนอกจึงไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับของระบบแต่อย่างใด และสามารถนำไปอธิบายการเลือกตัวกลางดูดซับที่สามารถบำบัดมลสารที่ต้องการได้มากที่สุด กล่าวคือสามารถเลือกได้โดยไม่จำเป็นต้องจำกัดชนิดของตัวกลางดูดซับทั้งแบบมีรูพรุน หรือแบบอนุภาค เนื่องจากชนิดของตัวกลางดูดซับทั้งสองชนิดดังกล่าวไม่ได้ส่งอิทธิพลให้ผลการแยกตัวกลางดูดซับด้วยเส้นใยสแตนเลสภายใต้สนามแม่เหล็กเปลี่ยนไปแต่อย่างใด

#### 4.5 การพิจารณาร่วมระหว่างการศึกษากระบวนการดูดซับแบบที่ละเท และการศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้ HIGH GRADIENT MAGNETIC SEPARATE FILTER (HGMS)

จากการศึกษากระบวนการดูดซับแบบที่ละเทพบว่าตัวกลางดูดซับชนิด A-S-SP ให้ความสามารถในการดูดซับสูงสุดอันเนื่องมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต แต่ทั้งนี้การออกแบบระบบการดูดซับแบบที่ละเทให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดก็ต้องขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นของตัวกลางดูดซับที่ใช้ต่อสัดส่วนน้ำ แต่ความเข้มข้นของตัวกลางดูดซับที่เลือกใช้ในระบบการดูดซับแบบที่ละเทก็ส่งผลกระทบต่อระบบการคัดแยกตัวกลางดูดซับด้วยแรงแม่เหล็กเช่นกัน โดยจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.4.6 เรื่องการศึกษาผลของปริมาณอนุภาคตัวกลางดูดซับต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวกลางดูดซับต่อเวลาเบรคทูที่เปลี่ยนแปลงไปได้ว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวกลางดูดซับต่อสัดส่วนน้ำจะทำให้ประสิทธิภาพในการคัดแยกลดลง ดังนั้นการนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเพื่อใช้จริงที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับสูงสามารถปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ ในระบบคัดแยกตัวกลางดูดซับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการคัดแยกด้วยการเพิ่มความสูงชั้นกรอง, ลดความพรุน หรือลดความเร็วการไหลที่ผ่านชั้นกรอง

ยกตัวอย่างการคำนวณ เช่น หากต้องการคำนวณความเข้มข้นของตัวกลางดูดซับที่เหมาะสมต่อความเข้มข้น เอชดี บลู 45 ในน้ำเสียตั้งต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 1 ลิตร ให้ความเข้มข้นหลังการบำบัดเป็น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเลือกใช้ตัวกลางดูดซับชนิดที่ให้ความสามารถในการดูดซับสูงสุด ได้แก่ A-HMS-SP และนำค่าคงที่ต่างๆ ที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.2 เรื่องการวิเคราะห์สมดุลการดูดซับแอซิดบลู 45 ( $K_F=4.888$  L/MG,  $N=1.2058$ ) เมื่อนำตัวแปรที่มีไปแทนค่าในสมการพรุนด์ลิชจะได้ปริมาณตัวกลางดูดซับที่ใช้ประมาณ 3.89 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร (19.47 กรัมต่อน้ำเสีย 5 ลิตร) ที่สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้น เอชดี บลู 45 ที่ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้เหลือ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเมื่อนำความเข้มข้นของตัวกลางดูดซับในน้ำเสียมาพิจารณาร่วมกับการทดลองในหัวข้อการศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับในหัวข้อที่ 4.4.6 เรื่องการศึกษาผลของปริมาณอนุภาคตัวกลาง

ดูดซับต่อประสิทธิภาพการแยกด้วยแรงแม่เหล็กจะพบว่าจุดเบรคทुरुที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร, ความเร็วการไหล 32.87 เซนติเมตรต่อวินาที, ความสูงชั้นกรอง 1.5 เซนติเมตร, ความพรุนของเส้นใยสแตนเลส 96.85% และใช้แม่เหล็ก 1 คู่ ขนาด 500 เกาส์ มีจุดเบรคทुरुประสิทธิภาพการคัดแยก 80% ที่เวลา 1 ชั่วโมง หากเลือกใช้ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับตามที่คำนวณในหัวข้อนี้คือ 3.89 กรัมต่อลิตร จะได้จุดเบรคทुरुที่ต่ำกว่า 1 ชั่วโมง ซึ่งน้อยมาก และสามารถเพิ่มเวลาเบรคทुरुได้โดยการเพิ่มความสูงชั้นกรอง, ลดความพรุนของชั้นกรอง และลดความเร็วการไหลลง แต่ทั้งนี้การปรับเปลี่ยนความเร็วการไหลของน้ำในชั้นกรองต้องพิจารณาทั้งในเรื่องความเร็วที่ไม่ก่อให้เกิดการตกตะกอนในเส้นท่อในช่วงตั้งแต่ถังน้ำเสียเริ่มต้นไปจนถึงในคอลัมน์ก่อนเข้าชั้นกรองเส้นใยสแตนเลส และควรเป็นความเร็วที่ช้าพอที่จะไม่ทำให้เกิดการชะของตัวกลางดูดซับที่ถูกกักเก็บไว้ในชั้นกรองแล้วหลุดออกไปกับน้ำที่ไหลออกจากชั้นกรอง



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการบำบัดสีย้อมชนิด แอซิดบลู 45 (AB45) ด้วยกระบวนการดูดซับที่มีสมบัติเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติกการคัดแยกด้วยเส้นใยสแตนเลสภายใต้สนามแม่เหล็ก ด้วยตัวกลางดูดซับชนิด HMS-SP, A-HMS-SP, P-HMS-SP, S-SP, A-S-SP และ P-S-SP และเปรียบเทียบความสามารถในการคัดแยกตัวกลางดูดซับระหว่างเส้นใยสแตนเลส และเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว สามารถสรุปได้ว่า

##### 5.1.1 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบที่ละเท

###### 5.1.1.1 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับแอซิดบลู 45

จากการทดลองจะได้เวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ AB45 บนตัวกลางดูดซับทั้ง 6 ชนิด ดังนี้ ทั้ง A-HMS-SP และ A-S-SP จะเกิดการดูดซับอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรก และลดลงจนเข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 150 นาที ในขณะที่ตัวกลางดูดซับประเภท M-HMS-SP, M-S-SP, S-SP และ HMS-SP จะมีเวลาในการเข้าสู่สมดุลลดลงที่เวลาประมาณ 120, 110, 45 และ 30 นาที ตามลำดับ และตัวกลางดูดซับทั้ง 6 ชนิด เป็นไปตามจลนพลศาสตร์การดูดซับเสมือนอันดับ 2 ทั้งหมด

###### 5.1.1.2 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับแอซิดบลู 45

จากการทดลองจะได้ความสามารถในการดูดซับ AB45 บนตัวกลางดูดซับทั้ง 6 ชนิด สามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้โดย A-HMS-SP > A-S-SP > M-HMS-SP > S-SP > M-HMS-SP > HMS-SP และตัวกลางดูดซับทั้ง 6 ชนิด มีค่าดูดซับเข้ากันได้กับสมการฟรุนด์ลิชทั้งหมด

##### 5.1.2 การศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้เส้นใยสแตนเลสในระบบ HGMS

###### 5.1.2.1 การศึกษาผลกระทบจากสนามแม่เหล็กบนเส้นใยสแตนเลส

สนามแม่เหล็กบนเส้นใยสแตนเลสมีผลกระทบต่อการทำงานมาก กล่าวคือจุดเบรคทฤษฎีของผลการทดลองที่ใช้แม่เหล็กในการคัดแยกตัวกลางดูดซับจะได้จุดเบรคทฤษฎีประสิทธิภาพการคัดแยกอยู่ที่ 80% ที่เวลาประมาณ 10 นาที ในขณะที่การทดลองที่ไม่ใช้แม่เหล็กในการคัดแยกตัวกลางดูดซับพบว่าความสามารถในการแยกตัวกรองดูดซับต่ำมาก

ตั้งแต่วันที่ 1 ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำมาก สามารถตัดแยกตัวกลางดูดซับได้เพียง 33.4% เท่านั้น และประสิทธิภาพลดลงอย่างรวดเร็วจนเหลือเพียง 21.8% ในวันที่ 5

#### 5.1.2.2 การศึกษาผลกระทบจากความสูงของชั้นเส้นใยสแตนเลส

เมื่อเพิ่มความสูงของชั้นกรองเส้นใยสแตนเลสมากขึ้น จะได้จุดเบรคทรูสูงขึ้น ดังเช่นผลที่แสดงในการทดลอง จึงอาจกล่าวได้ว่าความสูงของชั้นกรองที่เพิ่มขึ้น ทำให้ชั้นกรองมีช่องว่างในการกักเก็บตัวกลางดูดซับมากขึ้น เมื่อชั้นกรองสามารถกักเก็บตัวกลางดูดซับได้มากขึ้น ก็ทำให้เวลาเบรคทรูของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

#### 5.1.2.3 การศึกษาผลกระทบความพรุนของชั้นเส้นใยสแตนเลส

ความพรุนของชั้นกรองที่เพิ่มขึ้น บ่งบอกหมายถึงปริมาณช่องว่างในชั้นกรองที่สูงขึ้น และมีผลต่อการคัดแยกมลสารที่มีสมบัติเป็นซูปเปอร์พาราแมกเนติกด้วยเส้นใยสแตนเลสภายใต้สนามแม่เหล็กมีเวลาเบรคทรูที่เพิ่มขึ้นตาม อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการกักเก็บตัวกลางดูดซับแปรผันตามพื้นที่ว่างระหว่างชั้นกรอง เมื่อมีพื้นที่ว่างให้ตัวกลางดูดซับไปเกาะติดมากขึ้น ก็ทำให้ชั้นกรองสามารถกักเก็บตัวกลางดูดซับได้มากขึ้น

#### 5.1.2.4 การศึกษาผลกระทบจากความเร็วการไหลของน้ำเสีย

ความเร็วการไหลในชั้นกรองที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการคัดแยกมลสารที่มีสมบัติเป็นซูปเปอร์พาราแมกเนติกด้วยเส้นใยสแตนเลสภายใต้มีประสิทธิภาพในการคัดแยกตัวกลางดูดซับเวลาลดลง ซึ่งหมายถึงตัวเลขเวลาเบรคทรูที่ต่ำลงด้วย อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการกักเก็บตัวกลางดูดซับแปรผันกับความเร็วการไหลในชั้นกรอง และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบได้ด้วยการลดอัตราเร็วการไหลลง

#### 5.1.2.5 การศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้เส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวในระบบ HGMS

การปรับปรุงพื้นผิวของชั้นกรองเส้นใยสแตนเลสให้มีความชอบน้ำ หรือไม่ชอบน้ำ พบว่ามีผลกระทบน้อยมากจนแทบไม่เห็นถึงความแตกต่างต่อการคัดแยกมลสารที่มีสมบัติเป็นซูปเปอร์พาราแมกเนติกด้วยเส้นใยสแตนเลสภายใต้สนามแม่เหล็ก ทั้งนี้อาจเป็นผลจากแรงแม่เหล็กแสดงอิทธิพลเด่นชัดมากกว่าแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต หรือแรงทางเคมีอื่นๆ จึงกล่าวได้ว่าไม่มีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงพื้นผิวของชั้นกรองเส้นใยสแตนเลสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการคัดแยกตัวกลางดูดซับแต่อย่างใด

#### 5.1.2.6 การศึกษาผลของปริมาณอนุภาคตัวกลางดูดซับต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS

การลดปริมาณความเข้มข้นของตัวกลางดูดซับมีผลกับความสามารถในการคัดแยกตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติกด้วยเส้นใยสแตนเลสภายใต้สนามแม่เหล็ก โดยเมื่อลดปริมาณความเข้มข้นของตัวกลางดูดซับในน้ำลง และจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแยกตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติกด้วยเส้นใยสแตนเลสภายใต้สนามแม่เหล็กได้มากขึ้นด้วย

#### 5.1.2.7 การศึกษาผลของชนิดอนุภาคตัวกลางดูดซับชนิดมีรูพรุนและอนุภาคกลมเกลี้ยงต่อประสิทธิภาพการแยกด้วย HGMS

การเปลี่ยนแปลงชนิดอนุภาคตัวกลางดูดซับชนิดมีรูพรุนและอนุภาคกลมเกลี้ยงของตัวกลางดูดซับในการทดลอง มีผลกระทบน้อยมากต่อความสามารถในการคัดแยกตัวกลางดูดซับที่มีสมบัติเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติกด้วยเส้นใยสแตนเลสภายใต้สนามแม่เหล็ก ทั้งนี้อาจเป็นผลจากแรงแม่เหล็กแสดงอิทธิพลเด่นชัดมากกว่าแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต หรือแรงทางเคมีอื่นๆ อาจกล่าวได้ว่าชนิดของอนุภาคทั้งแบบมีรูพรุนหรือกลมเกลี้ยงต่างไม่ได้ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการคัดแยกตัวกลางดูดซับแต่อย่างใด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้เส้นใยสแตนเลสในระบบ HGMS ควรทำที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับต่ำ และอัตราเร็วการไหลต่ำ จะให้ผลการทดลองที่สามารถนำไปเปรียบเทียบได้ชัดเจนและง่ายต่อการนำข้อมูลที่ได้มีเปรียบเทียบเวลาเบรคทูล

2. ในการศึกษาการแยกตัวกลางดูดซับโดยใช้เส้นใยสแตนเลสในระบบ HGMS การเลือกอัตราเร็วการไหล ควรพิจารณาความเร็วการไหลที่สามารถปฏิบัติได้จริง และไม่เกิดการตกตะกอนของตัวกลางดูดซับในเส้นท่อ ซึ่งจะเป็นเหตุที่ทำให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนได้

## รายการอ้างอิง

- ASEM A. ATIA, A. M. D., WAHEEBA A. AL-AMRANI. (2009). ADSORPTION/DESORPTION BEHAVIOR OF ACID ORANGE 10 ON MAGNETIC SILICA MODIFIED WITH AMINE GROUPS. *CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL*, 150, 55-62.
- COONEY, D. O. (1998). *ADSORPTION DESIGN FOR WASTEWATER TREATMENT*. FLORIDA, USA: LEWIS PUBLISHERS.
- CORPORATION, D. (2008). *ACID BLUE 45*. MATERIAL SAFETY DATA SHEET. NEW JERSEY, USA.
- DAVE S. R., A. G. X. (2009). *MONODISPERSE MAGNETIC NANOPARTICLES FOR BIODETECTION, IMAGING, AND DRUG DELIVERY: A VERSATILE AND EVOLVING TECHNOLOGY* (VOL. APPLICATION NO. US 3556725D).
- DITSCH A., L. S., LAIBINIS P. E., WANG D. I. C., AND HATTON T. ALAN. (2005). HIGH-GRADIENT MAGNETIC SEPARATION OF MAGNETIC NANOCCLUSERS. *INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH*, 44(6824-6836).
- H., T. (2009). USING SHELL-TUNABLE Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> MESOPOROUS SILICATE AND MAGNETIC SEPARATION TO REMOVE DDT FROM AQUEOUS MEDIA. *JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS*, 171, 459-464.
- J. S. BECK, J. C. V., W. J. ROTH, M. E. LEONOWICZ, C. T. KRESGE, K. D. SCHMITT, C. T-W. CHU, D. H. OLSON, E. W. SHEPPARD, S. B. MCCULLEN, J. B. HIGGINS, AND J. L. SCHLENKERT. (1992). A NEW FAMILY OF MESOPOROUS MOLECULAR SIEVES PREPARED WITH LIQUID CRYSTAL TEMPLATES. *AMERICAN CHEMICAL SOCIETY*, 114, 10834–10843.
- KATIYAR, A. Y., SANTOSH; G, PANAGIOTIS; NEVILLE, SMIRNIOTIS; PINTO, G. (2006). SYNTHESIS OF ORDERED LARGE PORE SBA-15 SPHERICAL PARTICLES FOR ADSORPTION OF BIOMOLECULES. *JOURNAL OF CHROMATOGRAPHY*, 1122 (1-2), 13–20.
- LIN, V. (2008). SEM OF SOME MESOPOROUS SILICA NANOPARTICLES. FROM [HTTP://EN.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/FILE:MESOPOROUS\\_SILICA\\_SEM.JPG](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Mesoporous_silica_sem.jpg)
- MAHESHWARI, K. B. A. R. (2008). LOTUS-INSPIRED NANOTECHNOLOGY APPLICATIONS. *JOURNAL OF SCIENCE EDUCATION FROM INDIAN ACADEMY OF SCIENCES, BANGALORE*, 1141-1145.
- MELLAERTS, R. A., CAROLINE A.; HUMBEECK, JAN VAN; AUGUSTIJNS, PATRICK; DEN MOOTER, GUY VAN; MARTENS, JOHAN A. (2007). ENHANCED RELEASE OF ITRACONAZOLE FROM ORDERED MESOPOROUS SBA-15 SILICA MATERIALS. *CHEMICAL COMMUNICATIONS*, 13, 1375.



- PUNYAPALAKUL, P., & TAKIZAWA, S. (2006). SELECTIVE ADSORPTION OF NONIONIC SURFACTANT ON HEXAGONAL MESOPOROUS SILICATES (HMSs) IN THE PRESENCE OF IONIC DYES. *WATER RESEARCH*, 40, 3177-3184.
- Q., W., Z., N., HAQ., Z., C., J., Z., & W., W. (2005). DIRECT SYNTHESIS OF THIOL-LIGAND-FUNCTIONALIZED SAB-45: EFFECT OF 3-MERCAPTOPROPYLTRIMETHOXYSILANE CONCENTRATION ON PORE STRUCTURE. *MATERIAL LETTER*, 59, 3611-3615.
- QU J., L. G., WANG Y., AND HONG R. (2010). PREPARATION OF Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-CHITOSAN NANOPARTICLES USED FOR HYPERTHERMIA. *ADVANCE POWDER TECHNOLOGY*, 21, 461-467.
- RUANGTRAKUL, W. (2010). *APPLICATION OF SUPERPARAMAGNETIC MESOPOROUS SILICATES ON NAPROXEN REMOVAL*. DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING, CHULALONGKORN UNIVERSITY, BANGKOK, THAILAND.
- SOONGLERDSONGPHA, S. (2006). *REMOVAL OF HALO ACETIC ACID BY ADSORPTION ON MESOPOROUS SILICATES*. THESIS FOR MASTER DEGREE SCIENCE PROGRAM IN ENVIRONMENTAL MANAGEMENT GRADUATE SCHOOL CHULALONGKORN UNIVERSITY, BANGKOK, THAILAND.
- SUN Y. P., L. X. Q., CAO J., ZHANG W. X., AND WANG H. P. (2006). CHARACTERIZATION OF ZEROVALENT IRON NANOPARTICLES. *ADVANCES IN COLLOID AND INTERFACE SCIENCE*, 120, 47-56.
- TIPSUMAVE, V. (2010). *APPLICATION OF SUPERPARAMAGNETIC MESOPOROUS SILICATES ON NALIDIXIC ACID REMOVAL*. DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING, CHULALONGKORN UNIVERSITY, /BANGKOK, THAILAND.
- VOGT C., T. M., MUHAMMED M., LAURENT S., BRIDOT J. L., AND MULLER R. (2010). HIGH QUALITY AND TUNABLE SILICA SHELL<sup>3</sup>MAGNETIC CORE NANOPARTICLES. *JOURNAL OF NANOPARTICLE RESEARCH*, 12, 1137-1147.
- XIANQIAO LIU, Z. M., JIANMIN XING, HUIZHOU LIU. (2003). PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF AMINO-SILANE MODIFIED SUPERPARAMAGNETIC SILICA NANOSPHERES. *JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS*, 270, 1-6.
- XIANQIAO LIU, Z. M., JIANMIN XING, HUIZHOU LIU. (2004). PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF AMINO-SILANE MODIFIED SUPERPARAMAGNETIC SILICA NANOSPHERES. *JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS* 270, 1-6.

YANAGISAWA TSUNEO, S. T., KURODA KAZUYUKI, KATO CHUZO. (1990). THE PREPARATION OF ALKYLTRIMETHYLAMMONIUM-KANEMITE COMPLEXES AND THEIR CONVERSION TO MICROPOROUS MATERIALS. *BULLETIN OF THE CHEMICAL SOCIETY OF JAPAN*, 63, 988.

ZHAO, D. (1998). TRIBLOCK COPOLYMER SYNTHESIS OF MESOPOROUS SILICA WITH PERIODIC 50 TO 300 ANGSTROM PORES. *SCIENCE*, 279(5350), 548.

ZHIJIAN WU, HONG XIANG, TAEHOON KIM, MYUNG-SUK CHUN, KANGTAEK LEE. (2006). SURFACE PROPERTIES OF SUBMICROMETER SILICA SPHERES MODIFIED WITH AMINOPROPYLTRIETHOXYSILANE AND PHENYLTRIETHOXYSILANE. *JOURNAL OF COLLOID AND INTERFACE SCIENCE*, 304, 119-124.

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคน้ำ (2521).

ชฎาภรณ์ บุญแท้. (2545). การดูดซับโลหะหนักบางชนิดจากน้ำเสียด้วยดินเบา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.

ณัฐพันธ์ ศุภกา. (2549). ไชปริศนาเทคโนโลยี. FROM [HTTP://WWW.VCHARKARN.COM](http://www.vcharkarn.com)

ธนพร คำขจร. (2552). การกำจัดสีข้อมและสารลดแรงตึงผิวด้วยเศษแก้วเคลือบแมงกานีสออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.

ปรางศิริ ศรีศุภพัชร. (2551). การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมโดยถ่านกัมมันต์ และ สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ที่ย่อยสลายแล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , กรุงเทพมหานคร.

พิชชาภา บุญคง. (2551). การดูดซับกรดฮาโลอะซีติกโดยใช้อนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.

มณฑา จันทร์เกตุเลียด. (2541). วิทยาศาสตร์สิ่งทอเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร: หอรัตนชัยการพิมพ์.

วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. (2543). เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการเบื้องต้น

(*MATERIALS SCIENCE RESEARCH INSTRUMENTS: THEORIES AND BASIC PRINCIPLES*).

กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. (2544). คู่มือการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าและฟอกย้อม. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

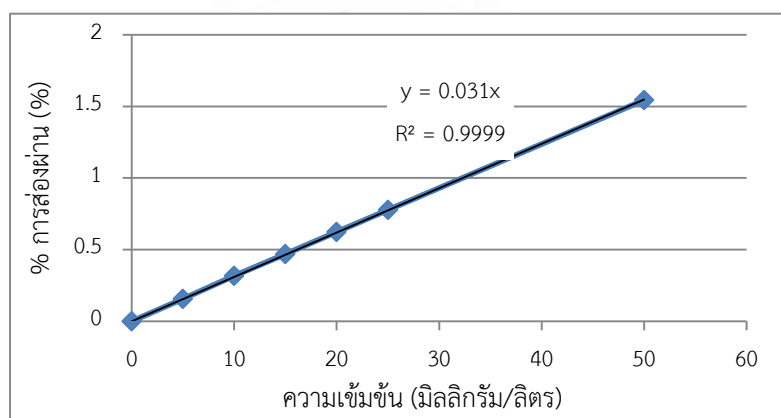


### การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายแอสิตบลู 45

1. วัดค่า BLANK ด้วยน้ำปราศจากประจุ
2. นำสารละลายแอสิตบลู 45 ที่ความเข้มข้นต่างๆ ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร
3. สร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานและค่าการดูดกลืนแสง (% ABSORBANCE)

ตารางที่ ก.1 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของแอสิตบลู 45 ด้วยเครื่องยูวีโฟโตสเปกโตรมิเตอร์

ความเข้มข้นของแอสิตบลู 45 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เปอร์เซ็นต์การส่องผ่าน (%)
0	0
5	0.155
10	0.316
15	0.468
20	0.623
25	0.777
50	1.544



รูปที่ ก. 1 กราฟมาตรฐานของแอสิตบลู 45 ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวีโฟโตสเปกโตรมิเตอร์

### การคำนวณความเข้มข้นของแอสิตบลู 45

หลังสร้างกราฟมาตรฐานของแอสิตบลู 45 แล้ว ให้นำตัวอย่างไม่ทราบความเข้มข้นไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวีโฟโตสเปกโตรมิเตอร์ จากสมการที่ได้จากกราฟมาตรฐาน



ตารางที่ ข. 1 ผลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของ AB45 บนตัวกลางดูดซับ S-SP

เวลา (นาที)	ค่าการดูดซับแสง	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความจุการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
0	1.47	47.41935	5.16129
1	1.466	47.29032	5.419355
5	1.461	47.12903	5.741935
10	1.443	46.54839	6.903226
20	1.42	45.80645	8.387097
30	1.395	45	10
40	1.381	44.54839	10.90323
50	1.364	44	12
60	1.357	43.77419	12.45161
70	1.353	43.64516	12.70968
80	1.348	43.48387	13.03226
90	1.339	43.19355	13.6129
100	1.337	43.12903	13.74194
110	1.332	42.96774	14.06452
120	1.33	42.90323	14.19355
130	1.33	42.90323	14.19355
140	1	32.25806	35.48387

ตารางที่ ข. 2 ผลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของ AB45 บนตัวกลางดูดซับ A-S-SP

เวลา (นาที)	ค่าการดูดซับแสง	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความจุการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
0	1.455	46.93548	6.129032
1	1.428	46.06452	7.870968
5	1.302	42	16
10	1.232	39.74194	20.51613
15	1.189	38.35484	23.29032
30	1.139	36.74194	26.51613
45	1.087	35.06452	29.87097
60	1.049	33.83871	32.32258
75	1.015	32.74194	34.51613
90	0.999	32.22581	35.54839
105	0.982	31.67742	36.64516
120	0.965	31.12903	37.74194
135	0.954	30.77419	38.45161
150	0.942	30.3871	39.22581
165	0.939	30.29032	39.41935
180	0.941	30.35484	39.29032
195	0.942	30.3871	39.22581
210	0.941	30.35484	39.29032
225	0.942	30.3871	39.22581
240	0.939	30.29032	39.41935
255	0.938	30.25806	39.48387
270	0.943	30.41935	39.16129



ตารางที่ ข. 3 ผลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของ AB45 บนตัวกลางดูดซับ M-S-SP

เวลา (นาที)	ค่าการดูดซับแสง	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความจุการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
0	1.434	46.25806	7.483871
1	1.425	45.96774	8.064516
5	1.381	44.54839	10.90323
10	1.366	44.06452	11.87097
20	1.358	43.80645	12.3871
30	1.339	43.19355	13.6129
40	1.338	43.16129	13.67742
50	1.337	43.12903	13.74194
60	1.335	43.06452	13.87097
70	1.337	43.12903	13.74194
80	1.336	43.09677	13.80645
90	1.335	43.06452	13.87097
100	1.337	43.12903	13.74194
110	1.338	43.16129	13.67742
120	1.337	43.12903	13.74194
130	1.337	43.12903	13.74194
140	1.336	43.09677	13.80645
150	1.334	43.03226	13.93548

ตารางที่ ข. 4 ผลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของ AB45 บนตัวกลางดูดซับ HMS-SP

เวลา (นาทีก)	ค่าการดูดซับแสง	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความจุการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
1	1.508	48.64516	2.709677
5	1.496	48.25806	3.483871
10	1.482	47.80645	4.387097
15	1.474	47.54839	4.903226
30	1.463	47.19355	5.612903
45	1.459	47.06452	5.870968
60	1.459	47.06452	5.870968
75	1.457	47	6
90	1.457	47	6
105	1.457	47	6
120	1.456	46.96774	6.064516

ตารางที่ ข. 5 ผลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของ AB45 บนตัวกลางดูดซับ A-HMS-SP

เวลา (นาทีก)	ค่าการดูดซับแสง	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความจุการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
1	1.508	48.64516	2.709677
5	1.427	46.03226	7.935484
10	1.231	39.70968	20.58065
15	1.188	38.32258	23.35484
30	1.138	36.70968	26.58065
45	1.126	36.32258	27.35484
60	1.115	35.96774	28.06452
75	1.088	35.09677	29.80645
90	1.068	34.45161	31.09677
105	1.052	33.93548	32.12903
120	1.046	33.74194	32.51613
135	1.037	33.45161	33.09677
150	1.026	33.09677	33.80645
165	1.025	33.06452	33.87097
180	1.023	33	34
195	1.013	32.67742	34.64516
210	1.003	32.35484	35.29032
225	0.999	32.22581	35.54839
240	0.998	32.19355	35.6129
255	0.995	32.09677	35.80645
270	0.992	32	36

ตารางที่ ข. 6 ผลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของ AB45 บนตัวกลางดูดซับ M-HMS-SP

เวลา (นาที)	ค่าการดูดซับแสง	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความจุการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
0	1.55	50	0
1	1.503	48.48387	3.032258
5	1.474	47.54839	4.903226
10	1.469	47.3871	5.225806
30	1.411	45.51613	8.967742
40	1.39	44.83871	10.32258
50	1.392	44.90323	10.19355
60	1.355	43.70968	12.58065
70	1.363	43.96774	12.06452
80	1.325	42.74194	14.51613
90	1.339	43.19355	13.6129
100	1.301	41.96774	16.06452
110	1.3	41.93548	16.12903
120	1.292	41.67742	16.64516
130	1.283	41.3871	17.22581
140	1.281	41.32258	17.35484
150	1.279	41.25806	17.48387
160	1.276	41.16129	17.67742

ตารางที่ ข. 7 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับของ AB45 บนตัวกลางดูดซับ S-SP

ความเข้มข้นมลสารตั้งต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดซับแสง	ความเข้มข้นที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความจุการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
0	0	0	0
25	0.758	24.45161	0.548387
50	1.48	47.74194	2.258065
100	2.776	91	9
150	3.697	122	28
200	4.218	136	64

ตารางที่ ข. 8 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับของ AB45 บนตัวกลางดูดซับ A-S-SP

ความเข้มข้นมลสารตั้งต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดซับแสง	ความเข้มข้นที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความจุการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
0	0	0	0
25	0.149	4.806452	20.19355
50	0.453	14.6129	35.3871
100	0.861	27.77419	72.22581
150	1.102	35.54839	114.4516
200	1.19	38.3871	161.6129

ตารางที่ ข. 9 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับของ AB45 บนตัวกลางดูดซับ M-S-SP

ความเข้มข้นมลสารตั้งต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดซับแสง	ความเข้มข้นที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความจุการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
0	0	0	0
25	0.321	10.35484	14.64516
50	0.526	16.96774	33.03226
100	1.057	34.09677	65.90323
150	1.54	49.5	100.5
200	2.069	70	130

ตารางที่ ข. 10 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับของ AB45 บนตัวกลางดูดซับ HMS-SP

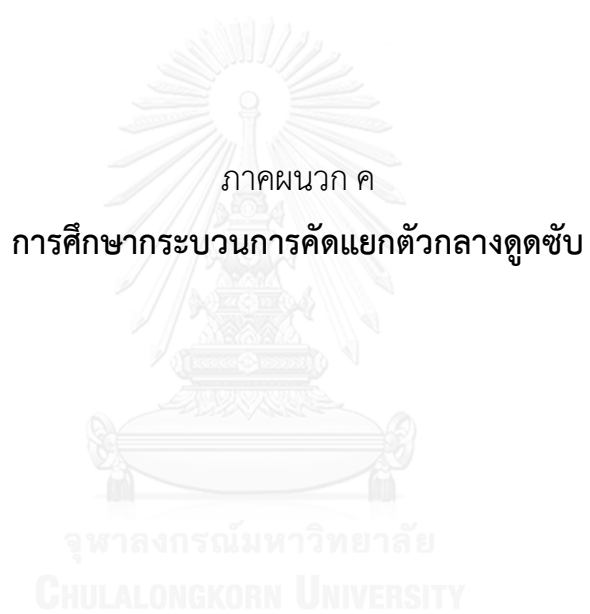
ความเข้มข้นมลสารตั้งต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดซับแสง	ความเข้มข้นที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความจุการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
0	0	0	0
25	0.774	24.96774	0.032258
50	1.502	48.45161	1.548387
100	2.894	96	4
150	3.939	128	22
200	4.094	132	68

ตารางที่ ข. 11 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับของ AB45 บนตัวกลางดูดซับ A-HMS-SP

ความเข้มข้นมลสารตั้งต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดซับแสง	ความเข้มข้นที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความจุการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
0	0	0	0
25	0.099	3.193548	21.80645
50	0.287	9.258065	40.74194
100	0.509	16.41935	83.58065
150	0.699	22.54839	127.4516
200	0.788	25.41935	174.5806

ตารางที่ ข. 12 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับของ AB45 บนตัวกลางดูดซับ M-HMS-SP

ความเข้มข้นมลสารตั้งต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดซับแสง	ความเข้มข้นที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความจุการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
0	0	0	0
25	0.732	23.6129	1.387097
50	1.478	47.67742	2.322581
100	2.795	90	10
150	3.705	124	26
200	4.079	130	70





ตารางที่ ค. 1 ผลการทดลองการคัดแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับ 5 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วการไหล 16.43 เซนติเมตรต่อนาที ความสูงชั้นกรอง 1.5 เซนติเมตร ความพรุน 96.85%

เวลา (นาที)	น้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)	น้ำหนักกระดาษกรอง และตัวกลางดูดซับ (กรัม)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อลิตร)
0	0.0873	0.0876	0.0003	0.06
1	0.09	0.0916	0.0016	0.32
3	0.0879	0.0903	0.0024	0.48
5	0.0897	0.0932	0.0035	0.7
10	0.0887	0.0996	0.0109	1.09
15	0.0885	0.1091	0.0206	2.06
20	0.0895	0.1194	0.0299	2.99
30	0.0896	0.1276	0.038	3.8
45	0.0883	0.1314	0.0431	4.31
60	0.088	0.1348	0.0468	4.68
75	0.0877	0.1357	0.048	4.8
90	0.0899	0.1382	0.0483	4.83
105	0.0887	0.1374	0.0487	4.87
120	0.0883	0.1376	0.0493	4.93

ตารางที่ ค. 2 ผลการทดลองการคัดแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับ 5 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วการไหล 32.87 เซนติเมตรต่อนาที ความสูงชั้นกรอง 1.5 เซนติเมตร ความพรุน 96.85%

เวลา (นาที)	น้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)	น้ำหนักกระดาษกรอง และตัวกลางดูดซับ (กรัม)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อลิตร)
0	0.0891	0.0986	0.0095	0.95
1	0.0887	0.0991	0.0104	1.04
3	0.0894	0.1074	0.018	1.8
5	0.0883	0.1033	0.015	1.5
10	0.0887	0.109	0.0203	2.03
15	0.0887	0.1197	0.031	3.1
20	0.0897	0.1258	0.0361	3.61
30	0.0884	0.1304	0.042	4.2
45	0.087	0.1332	0.0462	4.62
60	0.0881	0.1355	0.0474	4.74
75	0.0885	0.1365	0.048	4.8
90	0.0884	0.1371	0.0487	4.87
105	0.0873	0.1284	0.0411	4.11
120	0.0887	0.1386	0.0499	4.99

ตารางที่ ค. 3 ผลการทดลองการคัดแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับ 5 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วการไหล 65.73 เซนติเมตรต่อนาที ความสูงชั้นกรอง 1.5 เซนติเมตร ความพรุน 96.85%

เวลา (นาที)	น้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)	น้ำหนักกระดาษกรอง และตัวกลางดูดซับ (กรัม)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อลิตร)
0	0.0889	0.098	0.0091	1.01
1	0.0869	0.1027	0.0158	1.75
3	0.0878	0.1175	0.0297	3.3
5	0.0883	0.1274	0.0391	4.34
10	0.0878	0.1292	0.0414	4.6
15	0.0883	0.1306	0.0423	4.7
20	0.0872	0.1343	0.0471	4.71
25	0.0886	0.1235	0.0349	3.49
30	0.0873	0.1368	0.0495	4.95
40	0.0875	0.1374	0.0499	4.99
50	0.0895	0.1262	0.0367	3.67
60	0.0866	0.1239	0.0373	3.73

ตารางที่ ค. 4 ผลการทดลองการคัดแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับ 5 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วการไหล 32.87 เซนติเมตรต่อนาที ความสูงชั้นกรอง 3 เซนติเมตร ความพรุน 96.85%

เวลา (นาที)	น้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)	น้ำหนักกระดาษกรอง และตัวกลางดูดซับ (กรัม)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อลิตร)
0	0.0884	0.093	0.0046	0.46
1	0.0883	0.0949	0.0066	0.66
3	0.0886	0.0994	0.0108	1.08
5	0.0877	0.104	0.0163	1.63
10	0.0881	0.1156	0.0275	2.75
15	0.0889	0.1197	0.0308	3.08
20	0.0895	0.1148	0.0253	2.53
25	0.0885	0.1114	0.0229	2.29
30	0.0894	0.1305	0.0411	4.11
45	0.0882	0.1322	0.044	4.4
60	0.0887	0.1339	0.0452	4.52
75	0.0897	0.1357	0.046	4.6
90	0.0885	0.136	0.0475	4.75
105	0.0888	0.1367	0.0479	4.79
120	0.0885	0.1368	0.0483	4.83
135	0.0877	0.1363	0.0486	4.86

ตารางที่ ค. 5 ผลการทดลองการคัดแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับ 5 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วการไหล 32.87 เซนติเมตรต่อนาที ความสูงชั้นกรอง 1.5 เซนติเมตร ความพรุน 98.43%

เวลา (นาที)	น้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)	น้ำหนักกระดาษกรอง และตัวกลางดูดซับ (กรัม)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อ 10 มิลลิตร)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อลิตร)
0	0.0897	0.092	0.0023	0.23
1	0.0897	0.0928	0.0031	0.31
3	0.0869	0.0937	0.0068	0.68
5	0.0876	0.0962	0.0086	0.86
10	0.0887	0.1004	0.0117	1.17
15	0.0875	0.1067	0.0192	1.92
20	0.0891	0.1164	0.0273	2.73
25	0.0897	0.1458	0.0561	5.61
30	0.0879	0.1237	0.0358	3.58
45	0.0879	0.1296	0.0417	4.17
60	0.0871	0.1335	0.0464	4.64
75	0.0879	0.137	0.0491	4.91
90	0.0868	0.1364	0.0496	4.96
105	0.0877	0.1374	0.0497	4.97

ตารางที่ ค. 6 ผลการทดลองการคัดแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับ 5 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วการไหล 32.87 เซนติเมตรต่อนาที ความสูงชั้นกรอง 5 เซนติเมตร ความพรุน 96.85%

เวลา (นาที)	น้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)	น้ำหนักกระดาษกรอง และตัวกลางดูดซับ (กรัม)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อลิตร)
0	0.0885	0.0907	0.0022	0.22
1	0.0874	0.0917	0.0043	0.43
3	0.0886	0.0945	0.0059	0.59
5	0.0882	0.0976	0.0094	0.94
10	0.0887	0.112	0.0233	2.33
15	0.0892	0.1218	0.0326	3.26
20	0.0886	0.1365	0.0479	4.79
25	0.0875	0.1253	0.0378	3.78
30	0.0871	0.1285	0.0414	4.14
45	0.0878	0.1325	0.0447	4.47
60	0.0887	0.1349	0.0462	4.62
75	0.0891	0.1373	0.0482	4.82
90	0.0886	0.1373	0.0487	4.87
105	0.0897	0.1392	0.0495	4.95
120	0.0882	0.138	0.0498	4.98
135	0.0888	0.1387	0.0499	4.99
150	0.0885	0.1384	0.0499	4.99

ตารางที่ ค. 7 ผลการทดลองการคัดแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วการไหล 32.87 เซนติเมตรต่อนาที ความสูงชั้นกรอง 1.5 เซนติเมตร ความพรุน 96.85%

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)	น้ำหนักกระดาษกรอง และตัวกลางดูดซับ (กรัม)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อลิตร)
0	0.0893	0.0895	0.0002	0.02
1	0.0878	0.0882	0.0004	0.04
3	0.089	0.0893	0.0003	0.03
5	0.088	0.0882	0.0002	0.02
10	0.0886	0.0889	0.0003	0.03
15	0.0883	0.0886	0.0003	0.03
20	0.0887	0.089	0.0003	0.03
25	0.0896	0.0901	0.0005	0.05
30	0.0875	0.088	0.0005	0.05
45	0.088	0.0897	0.0017	0.17
60	0.089	0.091	0.002	0.2
75	0.0893	0.0916	0.0023	0.23
90	0.0882	0.0917	0.0035	0.35
105	0.088	0.0919	0.0039	0.39
120	0.0875	0.0916	0.0041	0.41
135	0.0889	0.0939	0.005	0.5
150	0.0894	0.0963	0.0069	0.69
165	0.0885	0.0965	0.008	0.8
180	0.0882	0.0968	0.0086	0.86
195	0.0879	0.0967	0.0088	0.88
210	0.0878	0.0972	0.0094	0.94
225	0.089	0.0984	0.0094	0.94
240	0.0887	0.0984	0.0097	0.97
255	0.0886	0.0984	0.0098	0.98
270	0.0892	0.0989	0.0097	0.97

ตารางที่ ค. 8 ผลการทดลองการคัดแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับ 5 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วการไหล 32.87 เซนติเมตรต่อนาที ความสูงชั้นกรอง 1.5 เซนติเมตร ความพรุน 95.28%

เวลา (นาที)	น้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)	น้ำหนักกระดาษกรอง และตัวกลางดูดซับ (กรัม)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อลิตร)
0	0.0892	0.0912	0.002	0.2
1	0.089	0.0927	0.0037	0.37
3	0.0882	0.0955	0.0073	0.73
5	0.0876	0.0985	0.0109	1.09
10	0.0885	0.1234	0.0349	3.49
15	0.0879	0.1291	0.0412	4.12
20	0.0868	0.145	0.0582	5.82
25	0.0879	0.1337	0.0458	4.58
30	0.09	0.1379	0.0479	4.79
45	0.0875	0.1358	0.0483	4.83
60	0.0873	0.136	0.0487	4.87
75	0.0869	0.1365	0.0496	4.96
90	0.0888	0.1387	0.0499	4.99
105	0.0879	0.1379	0.05	5
120	0.0886	0.1385	0.0499	4.99



ตารางที่ ค. 9 ผลการทดลองการคัดแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับ 5 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วการไหล 32.87 เซนติเมตรต่อนาที ความสูงชั้นกรอง 1.5 เซนติเมตร ความพรุน 96.85% และไม่ใช้สนามแม่เหล็ก

เวลา (นาที)	น้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)	น้ำหนักกระดาษกรอง และตัวกลางดูดซับ (กรัม)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อลิตร)
0	0.088	0.1214	0.0334	3.34
1	0.0903	0.1253	0.035	3.5
3	0.0895	0.125	0.0355	3.55
5	0.0885	0.1276	0.0391	3.91
10	0.0888	0.1294	0.0406	4.06
15	0.0882	0.1298	0.0416	4.16
20	0.0892	0.1323	0.0431	4.31
25	0.0896	0.1358	0.0462	4.62
30	0.0875	0.1341	0.0466	4.66
45	0.0901	0.1372	0.0471	4.71
60	0.0881	0.1365	0.0484	4.84
75	0.0895	0.1388	0.0493	4.93

ตารางที่ ค. 10 ผลการทดลองการคัดแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับ 0.5 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วการไหล 32.87 เซนติเมตรต่อนาที ความสูงชั้นกรอง 1.5 เซนติเมตร ความพรุน 96.85%

เวลา (นาที)	น้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)	น้ำหนักกระดาษกรอง และตัวกลางดูดซับ (กรัม)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อลิตร)
0	0.0877	0.0879	0.0002	0.02
1	0.0876	0.0878	0.0002	0.02
3	0.0879	0.0881	0.0002	0.02
5	0.0888	0.0891	0.0003	0.03
10	0.0893	0.0896	0.0003	0.03
15	0.09	0.0903	0.0003	0.03
20	0.0884	0.0887	0.0003	0.03
25	0.0879	0.0881	0.0002	0.02
30	0.0877	0.088	0.0003	0.03
45	0.088	0.0883	0.0003	0.03
60	0.0886	0.0889	0.0003	0.03
75	0.0889	0.0893	0.0004	0.04
90	0.0891	0.0895	0.0004	0.04
105	0.0902	0.0905	0.0003	0.03
120	0.0887	0.0891	0.0004	0.04
135	0.0889	0.0894	0.0005	0.05
150	0.0892	0.0899	0.0007	0.07
165	0.0876	0.0889	0.0013	0.13
180	0.0887	0.0905	0.0018	0.18
195	0.0885	0.091	0.0025	0.25
210	0.0887	0.0918	0.0031	0.31
225	0.0886	0.0923	0.0037	0.37
240	0.089	0.0931	0.0041	0.41
255	0.0879	0.0923	0.0044	0.44
270	0.088	0.0926	0.0046	0.46
285	0.0881	0.0928	0.0047	0.47
300	0.0879	0.0928	0.0049	0.49
315	0.089	0.0939	0.0049	0.49
330	0.0897	0.0946	0.0049	0.49

ตารางที่ ค. 11 ผลการทดลองการคัดแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับ 0.5 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วการไหล 32.87 เซนติเมตรต่อนาที ความสูงชั้นกรอง 3 เซนติเมตร ความพรุน 96.85%

เวลา (นาที)	น้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)	น้ำหนักกระดาษกรอง และตัวกลางดูดซับ (กรัม)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อลิตร)
0	0.0898	0.0898	0	0
1	0.089	0.0891	0.0001	0.01
3	0.0883	0.0885	0.0002	0.02
5	0.0893	0.0894	1E-04	0.01
10	0.089	0.0892	0.0002	0.02
15	0.0891	0.0892	0.0001	0.01
20	0.0889	0.0891	0.0002	0.02
25	0.09	0.0902	0.0002	0.02
30	0.0887	0.0889	0.0002	0.02
45	0.0898	0.0899	1E-04	0.01
60	0.0885	0.0887	0.0002	0.02
75	0.0882	0.0884	0.0002	0.02
90	0.0889	0.0891	0.0002	0.02
105	0.0894	0.0896	0.0002	0.02
120	0.0889	0.0891	0.0002	0.02
135	0.0892	0.0894	0.0002	0.02
150	0.0882	0.0886	0.0004	0.04
165	0.0873	0.0878	0.0005	0.05
180	0.0885	0.0887	0.0002	0.02
195	0.0895	0.0896	0.0001	0.01
210	0.0887	0.0889	0.0002	0.02
225	0.0882	0.0884	0.0002	0.02
240	0.0904	0.0906	0.0002	0.02
255	0.0882	0.0884	0.0002	0.02
270	0.0899	0.0902	0.0003	0.03

ตารางที่ ค.11 ผลการทดลองการคัดแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับ 0.5 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วการไหล 32.87 เซนติเมตรต่อนาที ความสูงชั้นกรอง 3 เซนติเมตร ความพรุน 96.85% (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)	น้ำหนักกระดาษกรอง และตัวกลางดูดซับ (กรัม)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อลิตร)
300	0.089	0.091	0.002	0.2
315	0.0912	0.0923	0.0011	0.11
330	0.0888	0.0893	0.0005	0.05
345	0.0888	0.0895	0.0007	0.07
360	0.0885	0.0895	0.001	0.1
375	0.0906	0.092	0.0014	0.14
390	0.0901	0.0932	0.0031	0.31
405	0.0894	0.093	0.0036	0.36
420	0.0891	0.0919	0.0028	0.28
435	0.0898	0.0931	0.0033	0.33
450	0.0897	0.094	0.0043	0.43
465	0.0884	0.0925	0.0041	0.41
480	0.0888	0.0932	0.0044	0.44
495	0.0885	0.0938	0.0053	0.53
510	0.088	0.0927	0.0047	0.47
525	0.0905	0.0953	0.0048	0.48
540	0.0899	0.0948	0.0049	0.49
555	0.0885	0.0934	0.0049	0.49
570	0.0887	0.0936	0.0049	0.49
585	0.0897	0.0926	0.0029	0.29
600	0.0914	0.0947	0.0033	0.33
615	0.089	0.0921	0.0031	0.31

ตารางที่ ค. 12 ผลการทดลองการคัดแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับ 0.5 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วการไหล 32.87 เซนติเมตรต่อนาที ความสูงชั้นกรอง 3 เซนติเมตร ความพรุน 96.85%

เวลา (นาที)	น้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)	น้ำหนักกระดาษกรอง และตัวกลางดูดซับ (กรัม)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อลิตร)
0	0.0894	0.0898	0.0004	0.04
1	0.0898	0.09	0.0002	0.02
3	0.0896	0.0898	0.0002	0.02
5	0.0901	0.0903	0.0002	0.02
10	0.0888	0.0891	0.0003	0.03
15	0.0899	0.0901	0.0002	0.02
20	0.089	0.0893	0.0003	0.03
25	0.0907	0.0909	0.0002	0.02
30	0.0903	0.0906	0.0003	0.03
45	0.0884	0.0888	0.0004	0.04
60	0.0899	0.0904	0.0005	0.05
75	0.0884	0.0888	0.0004	0.04
90	0.091	0.0915	0.0005	0.05
105	0.0886	0.0888	0.0002	0.02
120	0.0898	0.0899	1E-04	0.01
135	0.0894	0.0894	0	0
150	0.0888	0.0894	0.0006	0.06
165	0.0884	0.0885	1E-04	0.01
180	0.0875	0.0879	0.0004	0.04
195	0.0896	0.0899	0.0003	0.03
210	0.0896	0.0902	0.0006	0.06
225	0.0881	0.0891	0.001	0.1
240	0.089	0.0895	0.0005	0.05
255	0.088	0.0887	0.0007	0.07
270	0.0894	0.0897	0.0003	0.03

ตารางที่ ค.12 ผลการทดลองการคัดแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับ 0.5 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วการไหล 32.87 เซนติเมตรต่อนาที ความสูงชั้นกรอง 3 เซนติเมตร ความพรุน 96.85% (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)	น้ำหนักกระดาษกรอง และตัวกลางดูดซับ (กรัม)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อลิตร)
315	0.0896	0.0908	0.0012	0.12
330	0.0889	0.0893	0.0004	0.04
345	0.0895	0.09	0.0005	0.05
360	0.0891	0.0897	0.0006	0.06
375	0.0903	0.0905	0.0002	0.02
390	0.0904	0.0908	0.0004	0.04
405	0.0902	0.0906	0.0004	0.04
420	0.0898	0.0904	0.0006	0.06
435	0.0897	0.0904	0.0007	0.07
450	0.0911	0.0913	0.0002	0.02
465	0.0893	0.0897	0.0004	0.04
480	0.0891	0.0897	0.0006	0.06
495	0.0896	0.0901	0.0005	0.05
510	0.089	0.0897	0.0007	0.07
525	0.0882	0.0887	0.0005	0.05
540	0.0885	0.089	0.0005	0.05
555	0.09	0.0904	0.0004	0.04
570	0.0896	0.09	0.0004	0.04
585	0.0895	0.0902	0.0007	0.07
600	0.089	0.0894	0.0004	0.04

ตารางที่ ค. 13 ผลการทดลองการคัดแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับ 0.5 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วการไหล 32.87 เซนติเมตรต่อนาที ความสูงชั้นกรอง 3 เซนติเมตร ความพรุน 96.85% โดยใช้เส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว

เวลา (นาที)	น้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)	น้ำหนักกระดาษกรอง และตัวกลางดูดซับ (กรัม)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อลิตร)
0	0.0898	0.0899	1E-04	0.01
1	0.089	0.0891	0.0001	0.01
3	0.0885	0.0886	0.0001	0.01
5	0.0888	0.0889	0.0001	0.01
10	0.0891	0.0893	0.0002	0.02
15	0.089	0.0891	0.0001	0.01
20	0.0888	0.0889	0.0001	0.01
25	0.089	0.0892	0.0002	0.02
30	0.0885	0.0887	0.0002	0.02
45	0.0883	0.0885	0.0002	0.02
60	0.088	0.0882	0.0002	0.02
75	0.0887	0.089	0.0003	0.03
90	0.0889	0.0891	0.0002	0.02
105	0.089	0.0893	0.0003	0.03
120	0.0881	0.0884	0.0003	0.03
135	0.0883	0.0885	0.0002	0.02
150	0.0884	0.0886	0.0002	0.02
165	0.0876	0.0878	0.0002	0.02
180	0.088	0.0883	0.0003	0.03
195	0.089	0.0892	0.0002	0.02
210	0.0888	0.0891	0.0003	0.03
225	0.0885	0.0888	0.0003	0.03
240	0.089	0.0893	0.0003	0.03
255	0.0882	0.0885	0.0003	0.03
270	0.0897	0.0901	0.0004	0.04

ตารางที่ ค.13 ผลการทดลองการคัดแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-HMS-SP ที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับ 0.5 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วการไหล 32.87 เซนติเมตรต่อนาที ความสูงชั้นกรอง 3 เซนติเมตร ความพรุน 96.85% โดยใช้เส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว (ต่อ)

เวลา (นาที)	น้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)	น้ำหนักกระดาษกรอง และตัวกลางดูดซับ (กรัม)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อลิตร)
285	0.0886	0.0891	0.0005	0.05
300	0.089	0.0895	0.0005	0.05
315	0.0912	0.0918	0.0006	0.06
330	0.088	0.0887	0.0007	0.07
345	0.0888	0.0897	0.0009	0.09
360	0.0885	0.0897	0.0012	0.12
375	0.0906	0.0922	0.0016	0.16
390	0.0901	0.092	0.0019	0.19
405	0.0894	0.092	0.0026	0.26
420	0.0891	0.0922	0.0031	0.31
435	0.0898	0.0933	0.0035	0.35
450	0.0897	0.0937	0.004	0.4
465	0.0881	0.0925	0.0044	0.44
480	0.0885	0.0932	0.0047	0.47
495	0.0884	0.0932	0.0048	0.48
510	0.0879	0.0928	0.0049	0.49
525	0.0905	0.0954	0.0049	0.49
540	0.0899	0.0948	0.0049	0.49
555	0.0885	0.0934	0.0049	0.49
570	0.0887	0.0936	0.0049	0.49



ตารางที่ ค. 14 ผลการทดลองการคัดแยกตัวกลางดูดซับชนิด A-S-SP ที่ความเข้มข้นตัวกลางดูดซับ 0.5 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วการไหล 32.87 เซนติเมตรต่อนาที ความสูงชั้นกรอง 1.5 เซนติเมตร ความพรุน 96.85%

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)	น้ำหนักกระดาษกรอง และตัวกลางดูดซับ (กรัม)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อลิตร)
0	0.0889	0.089	1E-04	0.01
1	0.0888	0.0889	0.0001	0.01
3	0.0881	0.0883	0.0002	0.02
5	0.0883	0.0885	0.0002	0.02
10	0.089	0.0891	0.0001	0.01
15	0.089	0.0892	0.0002	0.02
20	0.088	0.0882	0.0002	0.02
25	0.0886	0.0888	0.0002	0.02
30	0.089	0.0893	0.0003	0.03
45	0.0882	0.0884	0.0002	0.02
60	0.0887	0.089	0.0003	0.03
75	0.0887	0.0889	0.0002	0.02
90	0.0888	0.0891	0.0003	0.03
105	0.089	0.0894	0.0004	0.04
120	0.0897	0.0901	0.0004	0.04
135	0.0887	0.0893	0.0006	0.06
150	0.0893	0.09	0.0007	0.07
165	0.0886	0.0898	0.0012	0.12
180	0.0888	0.0905	0.0017	0.17
195	0.0888	0.0914	0.0026	0.26
210	0.088	0.0913	0.0033	0.33
225	0.0885	0.0923	0.0038	0.38
240	0.0891	0.0931	0.004	0.4
255	0.0882	0.0926	0.0044	0.44
270	0.0882	0.0927	0.0045	0.45
285	0.0881	0.0928	0.0047	0.47
300	0.0878	0.0927	0.0049	0.49
315	0.0892	0.0941	0.0049	0.49
330	0.0899	0.0948	0.0049	0.49

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวณัฐพร เอี่ยมสะอาด สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน  
สาธิตแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาการศึกษา เมื่อปี พ.ศ. 2549 และสำเร็จ  
การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จนสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2553 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท  
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2554

