



โครงการ

การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การสังเคราะห์อนุภาคระดับไมโครเมตรของซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าวและดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิก
Synthesis of silica microparticles from rice husk ash and surface modification with humic acids

ชื่อนิสิต นางสาวสิริรามล มีมุสิทธิ์

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2559

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การสังเคราะห์อนุภาคระดับไมโครเมตรของซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าวและดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิก

Synthesis of silica microparticles from rice husk ash and surface modification
with humic acids

โดย

นางสาวสิรامل มีมุสิทธิ์

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

โครงการ การสังเคราะห์อนุภาคระดับไมโครเมตรของซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าวและตัดแปรผิวด้วยกรดอิวมิก

โดย นางสาวสิราภล มีมุสิทธิ์


ได้รับอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

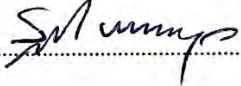
คณะกรรมการสอบโครงการ

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วัลภา เอื้องไมตรีภรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ อี่ยมรัมย์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรัชย์ พรภคกุล)

รายงานฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบและอนุมัติโดยหัวหน้าภาควิชาเคมี

..... หัวหน้าภาควิชาเคมี

(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย พาราสุข)

วันที่ 16 เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2560

คุณภาพของการเขียนรายงานเล่มนี้อยู่ในระดับ ดีมาก ดี พอใช้

ชื่อโครงการ การสังเคราะห์อนุภาคระดับไมโครเมตรของซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าวและดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิก

ชื่อนิสิตในโครงการ นางสาวสิริมาล มีมุสิทธิ์ เลขประจำตัว 5633153823

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ อิ่มยิ้ม

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคระดับไมโครเมตรของซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าวและดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิก ซิลิกาเตรียมได้จากกาน้ำเถ้าแกลบข้าวมาละลายและตกตะกอนด้วยกระบวนการโซลเจลในสองรูปแบบ คือ สกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2.5 โมลต่อลิตร และสกัดด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1.5 โมลต่อลิตร ก่อนที่จะทำการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2.5 โมลต่อลิตร เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความบริสุทธิ์ของซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าวที่สังเคราะห์ผ่านทั้งสองวิธี จากการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) พบพันธะในกลุ่มซิลินอลและกลุ่มไฮดรอกซิล และจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบพีคที่กว้างที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 22-23 ปรากฏเฟสที่เป็นอสัณฐาน จึงสามารถยืนยันเฟสและโครงสร้างที่แท้จริงของซิลิกาได้ เมื่อทำการเปรียบเทียบซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากสองวิธี พบว่าการสกัดเถ้าแกลบข้าวด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกก่อนที่จะทำการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ซิลิกาที่มีประสิทธิภาพดีกว่าการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว ผลการทดลองจากเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) พบว่า การสกัดเถ้าแกลบข้าวด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกก่อนที่จะทำการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่า จากปริมาณซิลิการ้อยละ 93.8 และ 79.0 ตามลำดับ ภาพถ่ายจากเทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) และเทคนิคการวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ (PSD) พบว่าพื้นผิวค่อนข้างเรียบ รูปร่างค่อนข้างกลม เล็ก มีการเกาะเป็นกลุ่ม และมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 7 และ 9 ไมโครเมตร ตามลำดับ พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 775 และ 660 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และนำซิลิกาที่สังเคราะห์ได้มาดัดแปรพื้นผิวโดยการเคลือบด้วยกรดฮิวมิก พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) พบว่าซิลิกาที่สังเคราะห์จากเถ้าแกลบข้าวสามารถดัดแปรพื้นผิวโดยการเคลือบด้วยกรดฮิวมิกได้


คำสำคัญ: ซิลิกา, อนุภาคระดับไมโครเมตร, เถ้าแกลบข้าว, กรดฮิวมิก, ซิลิกาที่ดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิก

Project Title Synthesis of silica microparticles from rice husk ash and surface modification with humic acids

Student Name Miss Siramon Meemusith Student ID 5633153823

Advisor Name Assistant Professor Apichat Imyim, Ph.D.

Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic Year 2016



Abstract

This research aimed to synthesize silica microparticles from rice husk ash and modify its surface with humic acids. Silica was obtained by dissolution and thermal precipitation of rice husk ash using the sol-gel method via two approaches. Method I: the rice husk ash was refluxed with 2.5 M NaOH and Method II: the rice husk ash was refluxed with 1.5 M HCl before being refluxed with 2.5 M NaOH. The efficiency and purity of silica were compared. Fourier transform infrared spectral data showed the presence of hydrogen bonded silinol and siloxane groups in silica. X-ray diffraction pattern showed that the obtained products were amorphous silica. Silica that obtained by the method II has higher efficiency and purity than silica that obtained by the method I. The purity of the synthesized silica was 93.8 and 79.0 % respectively using X-Ray fluorescence spectroscopy. The imaging by SEM and particle size distribution determined by PSD showed that the synthesized silica was in the agglomerate form which dimension of 7 and 9 μm . The specific surface area was found to be 775 and 660 m^2/g , respectively. And the synthesized silica was modified with humic acids and characterized by Fourier transform infrared spectroscopy. The results showed that humic acids could be successfully coated on silica surface.

Keyword: Silica, Microparticles, Rice hush ash, Humic acids, Humic acids-modified silica

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและรายงานฉบับนี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้หากไม่ได้รับความกรุณาอย่างสูงจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ อิ่มยิ้ม อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวคิด ความรู้ วิธีการ คำปรึกษาตลอดการทำวิจัย และ สละเวลาอันมีค่าแก้ไขข้อบกพร่องของเนื้อหา ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง ผู้วิจัย ขอขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วัลภา เอื้องไมตรีภิมมย์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรัชย์ พรหมกุล ที่ให้เกียรติเป็น คณะกรรมการสอบ และขอขอบพระคุณสมาชิกในหน่วยปฏิบัติการวิจัยการวิเคราะห์เชิงสภาวะแวดล้อม (Environmental Analysis Research Unit) ที่คอยให้คำแนะนำ และช่วยเหลือจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วง



สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
1.5.1 แกลบข้าวและเถ้าแกลบข้าว	4
1.5.2 ซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์	4
1.5.3 กรดอิมิก	7
1.5.4 การสังเคราะห์วัสดุขนาดต่ำกว่าไมครอนด้วยกระบวนการทางเคมี	8
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
บทที่ 2 การทดลอง	10
2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	10
2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	10
2.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	11
2.4 การเตรียมสารละลาย	11

2.5	วิธีการทดลอง	12
2.5.1	การสังเคราะห์ซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าว (วิธีที่ 1)	12
2.5.2	การสังเคราะห์ซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าว (วิธีที่ 2)	12
2.5.3	การดัดแปรผิวของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ด้วยกรดฮิวมิก (SiO ₂ -HA)	13
บทที่ 3	ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	14
3.1	การสังเคราะห์ซิลิกาที่จากเถ้าแกลบข้าว	14
3.2	การพิสูจน์เอกลักษณ์ของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าแกลบข้าว	14
3.2.1	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันนัลของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ ด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR)	14
3.2.2	การตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction	16
3.3	การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าแกลบข้าวทั้งสองวิธี	17
3.3.1	การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์	18
3.3.2	การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าวด้วยเทคนิคการวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ (PSD)	18
3.3.3	การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าวด้วยเทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	19
3.4	การดัดแปรผิวของซิลิกาด้วยกรดฮิวมิก	21
3.5	การพิสูจน์เอกลักษณ์ของซิลิกาที่ดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิกด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR)	22
บทที่ 4	สรุปผลการทดลอง	23
4.1	สรุปผลการทดลอง	23
4.2	ข้อเสนอแนะ	23
	เอกสารอ้างอิง	25
	ประวัติผู้วิจัย	28

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำแก้วข้าว	4
ตารางที่ 3.1 เลขคลื่นและชนิดของการสั่นในอินฟราเรดสเปกตรัมของซิลิกา	15
ตารางที่ 3.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของนาโนซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากถ้ำแก้วข้าว ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)	17
ตารางที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของซิลิกาที่สังเคราะห์จากถ้ำแก้วข้าว	18



สารบัญรูป

รูปที่ 1.1 รูปแบบต่าง ๆ ของการเชื่อมต่อของ SiO ₂ Tetrahedral ในโครงสร้างพื้นฐานของซิลิเกต	5
รูปที่ 1.2 โครงสร้างของอัญมณีซิลิกา	6
รูปที่ 1.3 หมู่ซิลินอลชนิดต่าง ๆ	7
รูปที่ 1.4 โครงสร้างของกรดฮิวมิก (Humic acids)	7
รูปที่ 3.1 ปฏิกริยาเคมีของการเกิดซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าว	14
รูปที่ 3.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าแกลบข้าว	15
รูปที่ 3.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD Diffractogram) ของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าแกลบข้าว	16
รูปที่ 3.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าแกลบข้าว ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)	18
รูปที่ 3.5 ภาพถ่าย SEM ของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากวิธีที่ 1	19
รูปที่ 3.6 ภาพถ่าย SEM ของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากวิธีที่ 2	20
รูปที่ 3.7 รูปเปรียบเทียบสีของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ก่อนและหลังทำการดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิก	21
รูปที่ 3.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของซิลิกา (Nanosilica), กรดฮิวมิก (Humic acid) และซิลิกาที่ดัดแปรผิวด้วย กรดฮิวมิก (SiO ₂ -HA)	22

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางและมีความสำคัญต่อการพัฒนาทางวิทยาศาสตร์เป็นอย่างมาก เนื่องด้วยโครงสร้างและประสิทธิภาพการใช้งานของอนุภาคในขนาดเพียง 1-100 นาโนเมตร [1] จึงทำให้สามารถเพิ่มโอกาสที่จะพัฒนาวัสดุรูปแบบใหม่ที่ตอบสนองต่อความต้องการจากการใช้เทคโนโลยีขั้นสูงได้ [2] นาโนซิลิกาเป็นอนุภาคที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง ซึ่งได้มาจากการปรับปรุงอนุภาคซิลิกาให้อยู่ในระดับนาโนเมตรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน เป็นอีกหนึ่งรูปแบบของนาโนเทคโนโลยีที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ กาว ไยแก้วนำแสง วัสดุเคลือบ วัสดุก่อสร้าง ซีเมนต์ [3] ตัวเร่งปฏิกิริยา และโครมาโทกราฟี [4]

ซิลิกาสามารถเตรียมได้จากหลายแหล่ง มีงานวิจัยพบว่า สารเทอร์อะโอไซล็คอนและเตตระเมทโรไซล็คอนถูกใช้เพื่อเป็นแหล่งซิลิกาเพื่อสังเคราะห์นาโนซิลิกาได้ แต่สารนี้ค่อนข้างมีราคาแพงและมีความเป็นพิษสูงด้วย [5-6] นอกจากนี้พบว่าควอตซ์ทราย และเถ้าแกลบข้าวก็เป็นแหล่งที่สามารถเตรียมซิลิกาได้ จากงานวิจัยพบว่า เถ้าแกลบข้าวเป็นแหล่งซิลิกาตามธรรมชาติที่นอกจากจะมีความบริสุทธิ์สูงสุด ซึ่งสามารถเตรียมซิลิกาได้ในปริมาณมากถึง 98% [7-8] แล้ว ยังหาได้ง่ายและมีราคาถูกอีกด้วย นอกจากนี้ด้วยโครงสร้างออสณฐานตามธรรมชาติและซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าวมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้สามารถสกัดออกมาได้ที่อุณหภูมิต่ำ จึงช่วยเอื้อให้แก่วิธีการสังเคราะห์ที่ใช้พลังงานต่ำ [9]

ซิลิกาถูกดัดแปรพื้นผิวในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานที่หลากหลายมากขึ้น หนึ่งในรูปแบบการดัดแปรผิวของซิลิกาที่น่าสนใจ ได้แก่ การเคลือบด้วยกรดฮิวมิก เนื่องจากกรดฮิวมิกเป็นส่วนประกอบหลักของสารฮิวมิก ซึ่งเป็นสารประกอบหลักอินทรีย์วัตถุในดิน เกิดขึ้นโดยกระบวนการย่อยสลายในทางชีวภาพของสารอินทรีย์ที่ตายลงและเป็นการผสมของกรดหลาย ๆ ชนิดที่อยู่ในกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกและฟีนอล [10] ดังนั้นกรดฮิวมิกจึงสามารถจับและดูดซับมลพิษ เช่น ไอออนโลหะหนักและสารกำจัดศัตรูพืช ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่และการดูดซึมในสิ่งแวดล้อมได้ [11] กรดฮิวมิกจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแง่ของการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำและการปรับปรุงคุณภาพของดินทางการเกษตร

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีการใช้กรดฮิวมิกในการดัดแปรพื้นผิวของซิลิกาในรูปแบบต่าง ๆ แล้วนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้แก่ มีการศึกษาการเคลือบติดของกรดฮิวมิกบนอนุภาคซิลิกาและอะมิโนโพรพิลซิลิกา ผลการศึกษาพบว่า กรดฮิวมิกสามารถเคลือบติดบนผิวของซิลิกาได้ [12] และสามารถใช้เป็นวัสดุเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการสังเคราะห์เอพดียู 1-ซิลิกา ซึ่งเป็นเมโซพอร์ัสซิลิกาที่มีพื้นที่ผิว $740 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ และมีขนาดรูพรุน 12 nm แล้วดัดแปรพื้นผิวด้วยการเคลือบกรดฮิวมิก [13] ผลการศึกษาพบว่า เอพดียู 1-ซิลิกาที่ถูกดัดแปรพื้นผิวด้วยกรดฮิวมิกมีประสิทธิภาพในการใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่าเอพดียู 1-ซิลิกา

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงสนใจสังเคราะห์อนุภาคระดับไมโครเมตรของซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าวและดัดแปรพื้นผิวซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ด้วยการเคลือบกรดฮิวมิก รวมทั้งตรวจสอบสมบัติของซิลิกาที่เตรียมได้และศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของวัสดุพื้นผิวสูงและใช้เป็นวัสดุในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

สังเคราะห์อนุภาคระดับไมโครเมตรของซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าวและดัดแปรพื้นผิวของซิลิกาโดยการเคลือบด้วยกรดฮิวมิก

1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 2000 Kalapathy และคณะ [14] ศึกษาการสกัดซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าวโดยวิธีอัลคาไลน์ โดยนำเถ้าแกลบข้าวที่ล้างด้วยน้ำที่มีภาวะแตกต่างกัน คือ มีความเป็นกรดเท่ากับ 1, 3, 5 และ 7 ตามลำดับ ก่อนนำมาสกัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ผลการทดลองพบว่า เถ้าแกลบข้าวที่ล้างด้วยน้ำที่มีสภาพเป็นกลางและนำมาสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของ 1 นอร์มอล สามารถสกัดซิลิกาได้มากที่สุด 91 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเมื่อนำซิลิกาที่สกัดได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR พบว่าสารที่สกัดได้ประกอบด้วยซิลิกา จากการบ่งชี้ด้วยกลุ่มซิลอกเซน (siloxane) ซึ่งมีพันธะ Si-O-Si และกลุ่มซิลานอล (silanol) ซึ่งมีพันธะ Si-OH

ในปี 2000 Souza และคณะ [15] ศึกษาหากระบวนการที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาจากเถ้าแกลบ โดยนำเถ้าแกลบไปต้มในกรดไฮโดรคลอริก 20 เปอร์เซ็นต์ และกรดซัลฟิวริก 20 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แลวนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำเถ้าแกลบไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าซิลิกาที่ได้มีโครงสร้างเป็นออสัณฐาน เมื่อวิเคราะห์ปริมาณซิลิกาที่ได้พบว่า เถ้าแกลบที่ได้ซิลิกาเป็นองค์ประกอบในปริมาณ 99.69 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

ในปี 2001 Yalcin และ Sevinc [16] ได้ทดลองแช่เถ้าแกลบข้าวด้วยสารละลายสามชนิด ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศปกติ พบว่าเถ้าแกลบที่เตรียมจากการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมีความสามารถในการสกัดซิลิกามากที่สุด เนื่องจากได้ซิลิกอนไดออกไซด์หรือซิลิกาที่มีโครงสร้างเป็นแบบออสัณฐาน มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.66 ขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.030 - 100 มิลลิเมตร พื้นผิวจำเพาะของอนุภาคมีขนาด 321 ตารางเมตรต่อกรัม รูพรุนมีขนาด 0.0045 มิลลิเมตร และการกระจายขนาดของรูพรุนอยู่ที่ 4.7297 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

ในปี 2002 Della และคณะ [17] ศึกษาการเตรียมซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าวที่เผาในบรรยากาศปกติ โดยนำเถ้าแกลบข้าวไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีก่อนเผาด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) พบว่ามีซิลิกาเป็นองค์ประกอบประมาณ 72.10 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นได้นำเถ้าแกลบข้าวไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าในเถ้าแกลบข้าวมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบประมาณ 94.95 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำเถ้าแกลบไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าซิลิกาที่ได้มีโครงสร้างเป็นแบบออสัณฐาน และเมื่อนำไปบดได้ซิลิกาที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคเพิ่มขึ้นจาก 54 เป็น

81 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้การสังเคราะห์ซิลิกาได้ปริมาณและความบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้น สามารถกำจัดสิ่งที่ไม่ใช่ซิลิกาออกไปได้ และอนุภาคซิลิกาที่สังเคราะห์ได้เมื่อนำไปบดจะได้จำนวนรูพรุนเพิ่มขึ้น

ในปี 2004 Jal และคณะ [18] ศึกษาการเตรียมนาโนซิลิกาด้วยวิธีการตกผลึก ทดลองโดยนำซิลิกาไปทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 6 นอร์มอล เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนและนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 นอร์มอล เป็นเวลา 2 วัน หลังจากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกลงไปในสารละลายอัลคาไลน์ซิลิกेटจนกระทั่งมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.5-8.5 จากนั้นนำซิลิกาที่ได้ศึกษาด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 50 นาโนเมตร พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 560 ตารางเมตรต่อกรัม

ในปี 2008 Witoon และคณะ [19] ศึกษาการใช้ถ่านแกลบข้าวและเป็นวัตถุดิบ และใช้โคโคซานเป็นแม่แบบในการผลิตซิลิกาชนิดเมโซพอร์รัสและแมโครพอร์รัส เพื่อใช้ในงานเชิงสิ่งแวดล้อม ในส่วนของการผลิตซิลิกาจากถ่านแกลบข้าว พบว่าสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ รีฟลักซ์แกลบเป็นเวลา 15 นาที และเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเตรียมซิลิกา ได้ปริมาณร้อยละของซิลิกาสูงสุด คือ 98.49 และลักษณะของซิลิกาที่ได้เป็นสีขาว เมื่อนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ได้ซิลิการ้อยละ 99.8685

ในปี 2008 Silva และคณะ [20] ศึกษาการสังเคราะห์เอฟดียู-1-ซิลิกา ซึ่งเป็นเมโซพอร์รัสซิลิกาด้วยเตตระเอทิลอโทซิลิกेट (TEOS) และโคพอลิเมอร์ไตรบิล็อกของพอลิเอทิลีนออกไซด์ - พอลิบิวทิลีนออกไซด์ - พอลิเอทิลีนออกไซด์ ในสภาวะที่เป็นกรด แล้วดัดแปรพื้นผิวด้วยการเคลือบกรดฮิวมิก ผลการศึกษาพบว่า เอฟดียู-1-ซิลิกาที่สังเคราะห์ได้สามารถเคลือบติดด้วยกรดฮิวมิก และเอฟดียู-1-ซิลิกาที่ถูกดัดแปรพื้นผิวด้วยกรดฮิวมิกมีประสิทธิภาพในการใช้เป็นตัวดูดซับไอออนของโลหะหนัก ได้แก่ Pb^{2+} , Cu^{2+} และ Cd^{2+} ได้ดีกว่าเอฟดียู-1-ซิลิกา

ในปี 2015 Silva และคณะ [13] ศึกษาการสังเคราะห์เอฟดียู-1-ซิลิกา ซึ่งเป็นเมโซพอร์รัสซิลิกาที่มีพื้นที่ผิว 740 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุน 12 นาโนเมตร แล้วดัดแปรพื้นผิวด้วยการเคลือบกรดฮิวมิก ผลการศึกษาพบว่า เอฟดียู-1-ซิลิกาที่ถูกดัดแปรพื้นผิวด้วยกรดฮิวมิกมีประสิทธิภาพในการใช้เป็นตัวดูดซับไอออนของโลหะหนัก เช่นปรอท ได้ดีกว่าเอฟดียู-1-ซิลิกา

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสังเคราะห์อนุภาคระดับไมโครเมตรซิลิกาจากถ่านแกลบข้าว พิสูจน์เอกลักษณ์และเปรียบเทียบสมบัติของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากการสกัดด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกก่อนการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียว ด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) เทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) เทคนิคการวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ (PSD) และเทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แล้วศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมอนุภาคระดับไมโครเมตรซิลิกาเคลือบด้วยกรดฮิวมิก ตรวจสอบการเคลือบติดของกรดฮิวมิกบนซิลิกาที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR)

1.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.5.1 แกลบข้าวและเถ้าแกลบข้าว [21]

แกลบข้าวเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว เป็นส่วนผสมของเปลือกเมล็ด กลิบเลี้ยง ฟาง และข้าวเมล็ดประมาณร้อยละ 20-24 โดยน้ำหนักของข้าวเปลือก องค์ประกอบส่วนใหญ่ของแกลบข้าว ได้แก่ เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสประมาณร้อยละ 30-40 ลิกนินประมาณร้อยละ 19-47 และเถ้าประมาณร้อยละ 20-25 โดยน้ำหนัก ส่วนประกอบต่าง ๆ ของแกลบข้าวในแต่ละแห่งจะแตกต่างกันแปรเปลี่ยนไปตามภาวะต่าง ๆ เช่น สภาพของดิน ธรรมชาติของการเพาะปลูก และสายพันธุ์ข้าว

การวิเคราะห์ทางเคมีของแกลบข้าวพบซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide, SiO_2) ร้อยละ 22.12 คาร์บอนและน้ำรวมกันร้อยละ 74 และอลูมินา (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ปูนขาวหรือแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) รวมกันประมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก หากการเผาแกลบข้าวเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ จะได้เถ้าแกลบข้าวซึ่งมีอัตราส่วนของซิลิกาเป็นส่วนประกอบ โดยองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบข้าวสามารถแสดงได้ดังตาราง ดังนี้

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบข้าว

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบข้าว	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	91 - 97
โปแตสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.6 - 2.5
นิกเกิลออกไซด์ (Ni_2O)	< 1.75
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.2 - 1.5
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.1 - 2
เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)	< 0.5
ฟอสฟอรัส (P_2O_5)	0.2 - 2.85
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)	0.1 - 1.15
คลอไรด์ (Cl_2)	< 0.4

1.5.2 ซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ [22, 23]

1.5.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับซิลิกา

ซิลิกา หรือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นสารประกอบที่เกิดจากการรวมตัวของซิลิกอนและออกซิเจน เป็นผลึกไม่มีสีหรือเป็นผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส มีความถ่วงจำเพาะในช่วง 2.2-2.6 จุดหลอมเหลว 1,170 องศาเซลเซียส ขึ้นกับรูปแบบของซิลิกา ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้เล็กน้อย ไม่ละลายในกรดทุกชนิด ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก แต่สามารถละลายได้โดยการหลอมกับด่าง และรวมตัวกับออกไซด์ของโลหะส่วนใหญ่ได้ โมลกุลติดไฟที่สามารถหลอมเป็นแก้วที่มีสมบัติการแตกตัวต่ำ ค่า

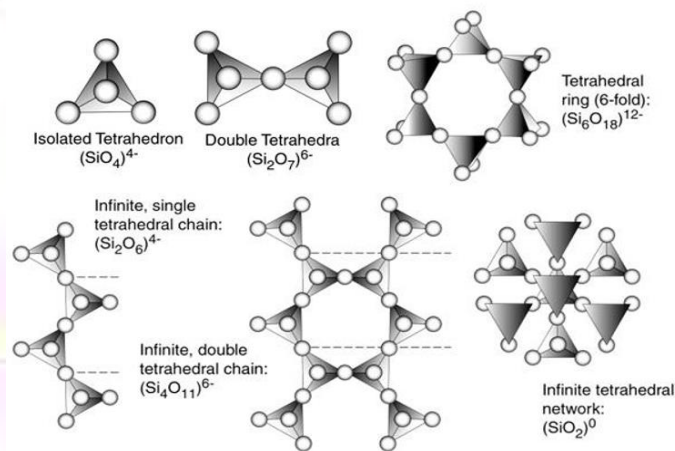
dielectric constant สูง ในทางการค้าซิลิกาเป็นแหล่งผลิตซิลิกอนและถูกใช้ในปริมาณมาก ซึ่งเป็นส่วนของวัสดุก่อสร้าง ส่วนซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica) ถูกใช้เป็นสารดูดความชื้น สารดูดซับ สารเพิ่มความแข็งแรง สารเติมแต่ง และองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

1.5.2.2 สมบัติทางกายภาพทั่วไปของซิลิกา

ชื่อทั่วไป	silica, quartz, free crystalline silica, silica flour, silica
สูตรเคมี	SiO ₂
น้ำหนักตามสูตร	60.1
สถานะ	ของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่น
ความถ่วงจำเพาะ	2.2
จุดเดือด	> 2,200 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	1,713 องศาเซลเซียส

1.5.2.3 โครงสร้างและพันธะทางเคมี

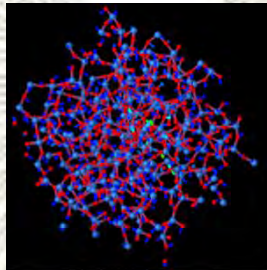
ซิลิกาเป็นสารประกอบที่ประกอบด้วยธาตุ 2 ธาตุ คือ ซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) ลักษณะที่พบอาจอยู่ในรูปซิลิเกต โครงสร้างพื้นฐานของซิลิกาและซิลิเกตจะมีการจัดเรียงตัวแบบเตตระฮีดรอล (tetrahedral) ซิลิกอนเป็นอะตอมกลาง และล้อมด้วยออกซิเจน 4 อะตอม เป็น SiO₄ ซึ่งมีอะตอมของออกซิเจนเป็นตัวเชื่อมต่อกับออกซิเจน เป็นตัวเชื่อมต่อกับตัวซิลิกอนที่อยู่ใน SiO₄ ที่อยู่ใกล้เคียงกัน โดยทางโครงสร้างซิลิกาจะมีลักษณะเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติแบบไม่รูจบ (infinite three dimensional network) การเปลี่ยนแปลงรูปของซิลิกาจะเกิดขึ้นได้มากมาย เนื่องจากการจัดเรียงตัวของ SiO₄ ซึ่งเป็นรูปแบบเตตระฮีดรอล แต่จะเกิดขึ้นได้เร็วมากเมื่อหลอมรวมด้วย alkali, vanadate, chloride หรือ borate การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของซิลิกาจะไม่ทำให้สมบัติทางกายภาพของซิลิกาเปลี่ยนแปลงไปมากนัก



รูปที่ 1.1 รูปแบบต่าง ๆ ของการเชื่อมต่อของเตตระฮีดรอล SiO₄ ในโครงสร้างพื้นฐานของซิลิเกต [23]

1.5.2.4 สมบัติทางเคมีของซิลิกา

ซิลิกามีสมบัติทางเคมีที่ค่อนข้างเสถียรที่อุณหภูมิปกติ และไม่ทำปฏิกิริยาต่อสารเคมีหลายชนิด แต่อย่างไรก็ตามไม่ได้หมายความว่าซิลิกาจะไม่ทำปฏิกิริยาใด ๆ เลย เพราะซิลิกาสามารถเปลี่ยนรูปแบบได้ และอุณหภูมิสูงความว่องไวในปฏิกิริยาของซิลิกาจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของซิลิกา การเตรียมและสถานะของซิลิกาชนิดอสัณฐาน (amorphous silica) ดังรูปที่ 1.2 จะว่องไวมากกว่าผลึกซิลิกา (crystalline silica) ที่เป็นเช่นนั้นเพราะอสัณฐานซิลิกามีพื้นที่ผิวมาก



รูปที่ 1.2 โครงสร้างของอสัณฐานซิลิกา [23]

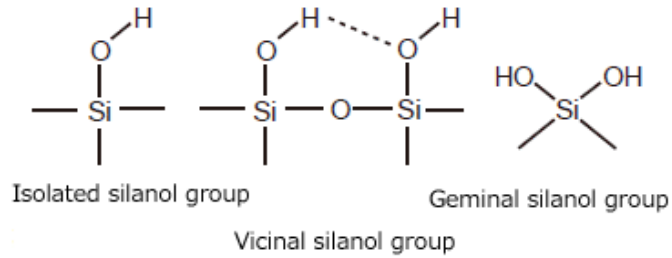
1.5.2.5 รูปแบบของซิลิกา

- ซิลิกาผลึก (crystalline silica)

ผลึกซิลิกาในธรรมชาติที่พบบ่อยมี 3 รูปแบบ ได้แก่ Quartz Tridymite และ Cristobalite รูปผลึกทั้ง 3 แบบมีสูตรทางเคมีเป็นสูตรเดียวกันคือ SiO_2 แต่แตกต่างกันในตำแหน่งการจัดเรียงอะตอมของซิลิกอนและออกซิเจนที่อยู่ในโครงสร้าง กล่าวคือในรูปผลึกของ Tridymite และ Cristobalite นั้น อะตอมต่าง ๆ จัดวางอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กันน้อยกว่า Quartz

- ซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica) [24]

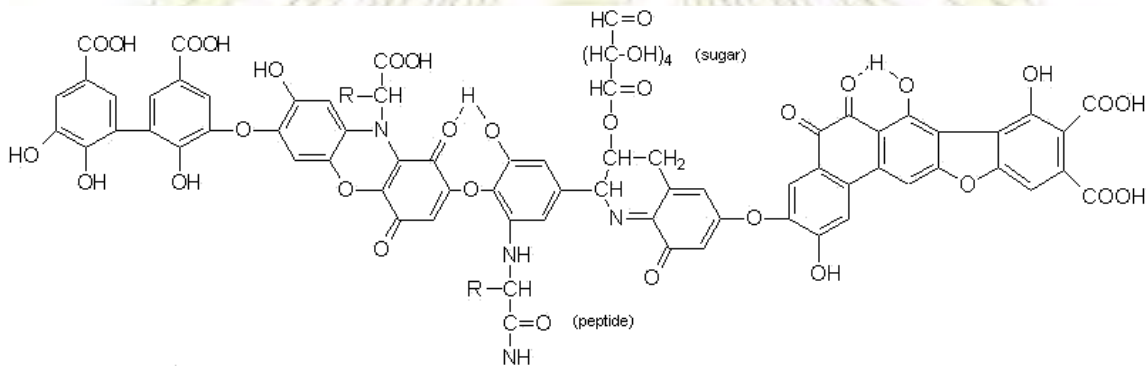
ซิลิกาอสัณฐานเกิดจากการรวมตัวกันของซิลิกอนและออกซิเจนอย่างไม่เป็นระเบียบ ประกอบไปด้วยอนุภาคขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวสูง มีรูพรุน สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ Vitreous silica, Silica M, และ Micro amorphous silica หรือซิลิกาอสัณฐานชนิดเล็ก ซึ่งรวมถึง โซล (sols) ผงเจล (gels powder) และแก้วที่มีความพรุนสูง (porous glasses) ซิลิกาประกอบด้วยพันธะซิลอกเซน (siloxane: Si-O-Si) ผิวของซิลิกาประกอบไปด้วยหมู่ของซิลานอล (silanol) ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ isolated silanols (SiOH), geminal หรือ silanediols ($\text{Si}(\text{OH})_2$) หรือ germinal silanols และ vicinal silanols ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 หมู่ซิลินอลชนิดต่าง ๆ

หมู่ของซิลานอล (silanol) บนพื้นผิวของซิลิกาสามารถตัดแปรพื้นผิวให้เฉพาะเจาะจงกับไอออนโลหะได้ง่าย จึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับได้ อีกทั้งมีความเฉื่อยทางเคมีสูง ราคาถูก จึงมักใช้ซิลิกาเป็นตัวดูดซับ

1.5.3 กรดฮิวมิก [25]



รูปที่ 1.4 โครงสร้างของกรดฮิวมิก (humic acids) [26]

กรดฮิวมิก (humic acids) มีมวลโมเลกุลอยู่ในช่วง 10,000 – 100,000 สูตรเอมพิริคัล คือ $C_{10}H_{12}O_5N$ ประกอบด้วยวงอะโรมาติกภายในโครงสร้างมีหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) และหมู่ฟีนอลิก (-OH) ดังรูปที่ 1.4 ซึ่งทั้งสองหมู่นี้มีบทบาทสำคัญมากต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cations exchange capacity; CEC) และความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงพีเอชของดิน (soil buffering capacity) หมู่ฟังก์ชันอื่นที่มีมากรองลงมา ได้แก่ หมู่แอลกอฮอล์ (alcohol, -OH) อีนาลิก (enalic, $-CH=C-OH$) และคาร์บอนิล (carbonyl, $=C=O$) ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปควินิน (quinine) และคีโตน (ketone)

กรดฮิวมิกมีสีน้ำตาลเข้มจนถึงสีดำ สามารถเกิดสารประกอบโคออร์ดิเนชันระหว่างหมู่แอโรมาติกของกรดฮิวมิกกับกรดอะมิโน (amino acids) น้ำตาลอะมิโน (amino sugars) และเพปไทด์ (peptides) เนื่องจากกรดฮิวมิกมีมวลโมเลกุลสูงจึงไม่ละลายในน้ำในสถานะที่พีเอชน้อยกว่า 2 และสามารถสังเคราะห์ได้จากสสารฮิวมิก (humic substances)

ที่พีเอชตั้งแต่ 3 ขึ้นไปพบว่าหมู่คาร์บอกซิลจะแตกตัวให้โปรตอน (H^+) ทำให้โมเลกุลของกรดฮิวมิกมีประจุลบ ขณะที่พีเอชตั้งแต่ 9 ขึ้นไปหมู่ฟีนอลิกจะแตกตัวให้โปรตอนเพิ่มขึ้น ทำให้โมเลกุลของกรดฮิวมิกมีประจุลบเพิ่มมากขึ้น และที่พีเอชน้อยกว่า 3 จะเกิดประจุลบบนโมเลกุลของกรดฮิวมิกน้อยหรือไม่มีประจุ

ประโยชน์ของกรดฮิวมิก [27- 28]

1. มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของดิน ทำให้เกิดเม็ดดิน (granulation) การดูดซึมน้ำ (cohesion) มีความจุความชื้นสูง (water holding capacity) ช่วยให้น้ำในดินมีปริมาณเพิ่มขึ้น
2. มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุสูงและมีความสามารถในการดูด (adsorbing power) สูง
3. เป็นตัวช่วยจับธาตุอาหาร ช่วยเพิ่มการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ในดิน สามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ดี
4. ช่วยควบคุมความเป็นกรด – ด่างในดิน ทำให้ดินมีสภาวะเหมาะกับการเจริญเติบโตของพืช
5. เป็นตัวช่วยตรึงไอออนของโลหะหนักในดิน
6. สามารถช่วยจับสารพิษในน้ำ และเป็นตัวช่วยตกตะกอนโลหะหนักในน้ำ

1.5.4 การสังเคราะห์วัสดุนาโนตัวกรองด้วยกระบวนการทางเคมี [29]

นาโนวิทยา (nanoscience) และ นาโนเทคโนโลยี (nanotechnology) เป็นวิทยาการที่เกิดจากการบูรณาการของหลายสาขาวิชา ได้แก่ เคมี ฟิสิกส์ คณิตศาสตร์ ชีววิทยา และวิศวกรรมศาสตร์ ปัจจุบันแนวโน้มของการนำวัสดุอุปกรณ์ที่ประยุกต์จากงานดานนาโนมาใช้ทดแทนวัสดุเดิมในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ทั้งด้านชีวภาพ และกายภาพ อาทิ อาหาร การแพทย์ อิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ พลังงานสิ่งแวดล้อมกำลังขยายขอบเขตไปทั่วโลก

อนุภาคที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับนาโน (10^9 เมตร) เป็นที่นิยมในการนำมาประยุกต์กับอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เช่น ใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยา สารเคลือบผิว สารเคลือบเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ พลังงานสิ่งแวดล้อม หรือผสมลงในวัสดุเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับผลิตภัณฑ์

วัสดุนาโนในกลุ่มเมโซพอร์ (mesopore nanoparticle)

วัสดุเมโซพอร์เป็นวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็กอยู่ในระดับนาโนเมตร มีหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับชนิดและการจัดเรียงโครงสร้างของรูพรุน โดยมีขนาดรูพรุนในช่วง 2-50 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงถึง 700-1,500 ตารางเมตรต่อกรัม

วัสดุเมโซพอร์มีหลายชนิด ได้แก่ ซิลิกาเมโซพอร์จำพวก MCM-41, SBA-15, MSU, FDU, HMS และ KIT โดยซิลิกาเมโซพอร์ที่นิยมสังเคราะห์กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดคือ MCM-41 เนื่องจากมีการกระจายขนาดของรูพรุนแคบ และรูพรุนมีความเป็นระเบียบสูง จึงนิยมนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ

การสังเคราะห์ซิลิกาเมโซพอร์ [13, 29] มักนิยมใช้สารกำหนดโครงสร้าง (structure-directing agents) เพื่อช่วยในการกำหนดคุณลักษณะรูพรุน และใช้สารประกอบซิลิกา เช่น เทตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (tetraethylorthosilicate, TEOS) หรือ โซเดียมซิลิเกต (sodium silicate หรือ water glass) เป็นวัตถุดิบ โดยกระบวนการสังเคราะห์ซิลิกาเมโซพอร์ มี 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการเคมีไมเซลล์ (micelle chemistry) ใช้สารอนินทรีย์ (inorganic materials) ซึ่งมีโครงสร้างหลักเป็นซิลิกาหรือโซเดียมซิลิเกต โดยเริ่มจากการนำสารกำหนดโครงสร้างมาละลายในตัวทำละลาย จากนั้นโมเลกุลสารกำหนดโครงสร้างในตัวทำละลายซึ่งมีสภาพเป็นขั้วเกาะกันเป็นกลุ่มในใจกลางที่เป็นน้ำหรือตัวทำละลายอื่น โดยโมเลกุลที่มีขั้วเกาะกันล้อมรอบโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ซึ่งสามารถเกาะกลุ่มกันเป็นรูปทรงกลม ทรงรี หรือแท่ง ขึ้นกับความเข้มข้นของสารกำหนดโครงสร้างในตัวทำละลายนั้น ๆ

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการโซลเจล (sol-gel process) เป็นขั้นตอนที่มีการเติมสารอนินทรีย์ซึ่งในที่นี้คือ ซิลิกา เพื่อกำหนดให้เป็นโครงสร้างหลักเพื่อให้ไปเกาะกับสารกำหนดโครงสร้าง ในขั้นตอนของกระบวนการโซลเจลเริ่มจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ได้อนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่เรียกว่า โซล อนุภาคโซลเหล่านี้เกิดการรวมตัวกลายเป็นโครงข่ายผ่านกลไกการเกิดพอลิเมอร์แบบคอนเดนเซชัน (condensation polymerization) เกิดเป็นเจล

ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการอบแห้งและการเผาที่อุณหภูมิสูง (drying and calcination) โดยมีการใช้ตัวทำละลาย เช่น เอทานอลและน้ำ มาล้างแล้วนำไปอบแห้งและเผาให้เกิดการผืนตัว โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงภายใต้บรรยากาศของออกซิเจนหรืออากาศ เพื่อกำจัดสิ่งเจือปน เช่น สารอินทรีย์ต่าง ๆ เมื่อสารกำหนดโครงสร้างสลายตัวออกไป เหลือเพียงโครงสร้างของสารที่เราต้องการที่มีรูพรุนขนาดนาโน

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ซิลิกาอนุภาคระดับไมโครเมตรที่ตัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิก

บทที่ 2

การทดลอง

2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. X-ray powder diffraction (XRD), D/max-2200 Ultima-plus, Rigaku
2. Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR), NICOLET 6700, THERMO SCIENTIFIC
3. Laser particle size distribution analyzer (MALVERN, Mastersizer 3000)
4. Field Emission Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (FESEM-EDS), JSM-7610F and X-MaxN 20
5. X-Ray Fluorescence Spectrometer (WDXRF), S8 Tiger
6. ตู้ให้ความร้อน, UM 500, MEMMERT
7. มาตรฐานพีไอเอช, LE409, METTLER TOLEDO
8. เครื่องเซนทริฟิวจ์, Centaur2, SANYO
9. เครื่องกวนแม่เหล็ก, MS-115, HL
10. เครื่องกรองสุญญากาศ, ADVANTEC MFS (Filter holder 47 mm area 9.6 cm²)
11. เครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง, SI-234, DENVER INSTRUMENT (max 230 g d = 0.1 mg)

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- | | |
|--------------------|--------------------|
| 1. ปีกเกอร์ | 6. แท่งแก้วคนสาร |
| 2. ขวดกำหนดปริมาตร | 7. หลอดหยดสาร |
| 3. กระจกบอทวง | 8. กระจกนาฬิกา |
| 4. ขวดใส่น้ำกลั่น | 9. แท่งกวนแม่เหล็ก |
| 5. ซ้อนตักสาร | 10. ไมโครปิเปต |

11. หลอดทดลองพลาสติกที่มีฝาปิด

14. ขวดดูดสุญญากาศ

12. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1

15. ครกหิน

13. กรวยบุคเนอร์

2.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เถ้าแกลบข้าว (rice husk ash)

2. กรดฮิวมิก (humic acids), Technical grade, SIGMA-ALDRICH

3. กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 37%, (hydrochloric acid; HCl), AR grade, MERCK

4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide; NaOH), AR grade, SIGMA-ALDRICH

5. น้ำปราศจากไอออน (DI water)

6. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ammonium hydroxide; NH_4OH)

2.4 การเตรียมสารละลาย

2.4.1 สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.5 M ปริมาตร 50 mL

เปิดสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 37% ปริมาตร 6.25 mL ค่อย ๆ หยดสารละลายกรดไฮโดรคลอริกลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำปราศจากไอออน ปรับปริมาตรเป็น 50 mL

2.4.1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.5 M ปริมาตร 100 mL

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 g ลงในบีกเกอร์ ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน คนสารละลายด้วยแท่งแก้วคน ปรับปริมาตรเป็น 100 mL บรรจุสารละลายลงในขวดพลาสติกที่มีฝาปิด

2.4.3 สารละลายกรดฮิวมิกความเข้มข้น 10 g/L ปริมาตร 60 mL

ชั่งกรดฮิวมิก 0.6 g เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M ปริมาตร 60 mL คนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 15 นาที

2.4.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พีเอช 10

ปิเปตสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 0.25 mL ลงในบีกเกอร์ปรับ ปริมาตรเป็น 250 mL ปรับพีเอชให้เป็น 10 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก บรรจุสารละลายลงในขวดพลาสติกที่มีฝาปิด

2.5 วิธีการทดลอง

2.5.1 การสังเคราะห์ซิลิกาจากเถ้าแกลบขาว (วิธีที่ 1)

นำเถ้าแกลบขาว 1 g มาทำการรีฟลักซ์ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.5 M ปริมาตร 15 mL เป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำมารองและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนร้อนอย่างช้า ๆ และนำเถ้าแกลบขาวที่ได้อบเป็นเวลา 10 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

นำเถ้าแกลบขาวที่ผ่านการรีฟลักซ์ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกแล้ว มาทำการรีฟลักซ์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.5 M เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำมารองแยกตะกอนออกและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนร้อนอย่างช้า ๆ ตั้งไว้ให้เย็นและปรับพีเอชให้เป็น 2 และ 8.7 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการปั่นเหวี่ยงสารละลายด้วยเครื่องเซนทริฟิวจ์เพื่อแยกเอาส่วนตะกอน ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน 4-5 รอบ หลังจากนั้นนำไปอบเป็นเวลา 10 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส บดสารตัวอย่างให้ละเอียด แล้วนำไปตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค XRD ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค SEM และศึกษาขนาดของอนุภาคด้วยเครื่อง Laser particle size distribution analyzer

2.5.2 การสังเคราะห์ซิลิกาจากเถ้าแกลบขาว (วิธีที่ 2)

นำเถ้าแกลบขาว 1 g มาทำการรีฟลักซ์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.5 M เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำมารองแยกตะกอนออกและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนร้อนอย่างช้า ๆ ตั้งไว้ให้เย็นและปรับพีเอชให้เป็น 2 และ 8.7 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการปั่นเหวี่ยงสารละลายด้วยเครื่องเซนทริฟิวจ์เพื่อแยกเอาส่วนตะกอน ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน 4-5 รอบ หลังจากนั้นนำไปอบเป็นเวลา 10 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส บดสารตัวอย่างให้ละเอียด แล้วนำไปตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค XRD ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค SEM ศึกษาขนาดของอนุภาคด้วยเครื่อง Laser particle size distribution analyzer และเปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของซิลิกาที่สกัดด้วยวิธีที่ต่างกันทั้งแบบที่ 1 และแบบที่ 2 ด้วยเทคนิค XRF

2.5.3 การดัดแปรผิวของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ด้วยกรดฮิวมิก (SiO₂-HA)

ซึ่งซิลิกาที่สกัดได้ประมาณ 1 g ใส่บีกเกอร์ขนาด 250 mL เติมสารละลายกรดฮิวมิกความเข้มข้น 10 g/L ปริมาตร 30 mL ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 7.5-8.0 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 20 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นปั่นเหวี่ยงสารละลายด้วยเครื่องเซนทริฟิวจ์เป็นเวลา 5 นาที ล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำปราศจากไอออน 4-5 รอบ นำไปอบอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ล้างตะกอนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พีเอช 10 ทำให้แห้ง จะได้นาโนซิลิกาที่ดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิก (SiO₂-HA) พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR

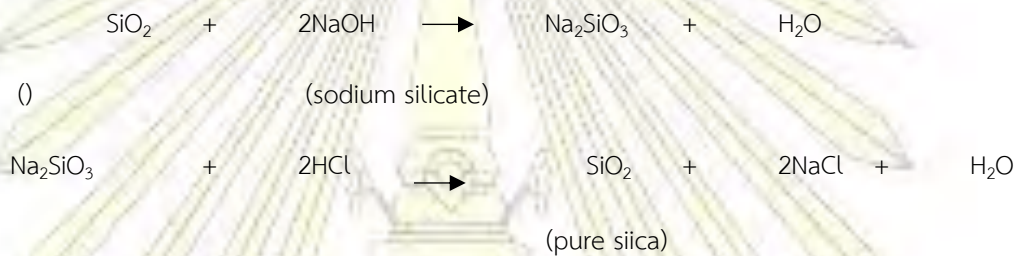


บทที่ 3

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 การสังเคราะห์ซิลิกาจากเถ้าแกลบขาว

จากการทดลองสังเคราะห์ซิลิกาจากเถ้าแกลบขาวโดยการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2.5 โมลต่อลิตร ทำการรีฟลักซ์เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และปรับพีเอชให้เป็น 2 และ 8.7 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ จะได้นาโนซิลิกาที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวอมน้ำตาล เป็นไปตามปฏิกิริยาเคมี [30] ดังนี้



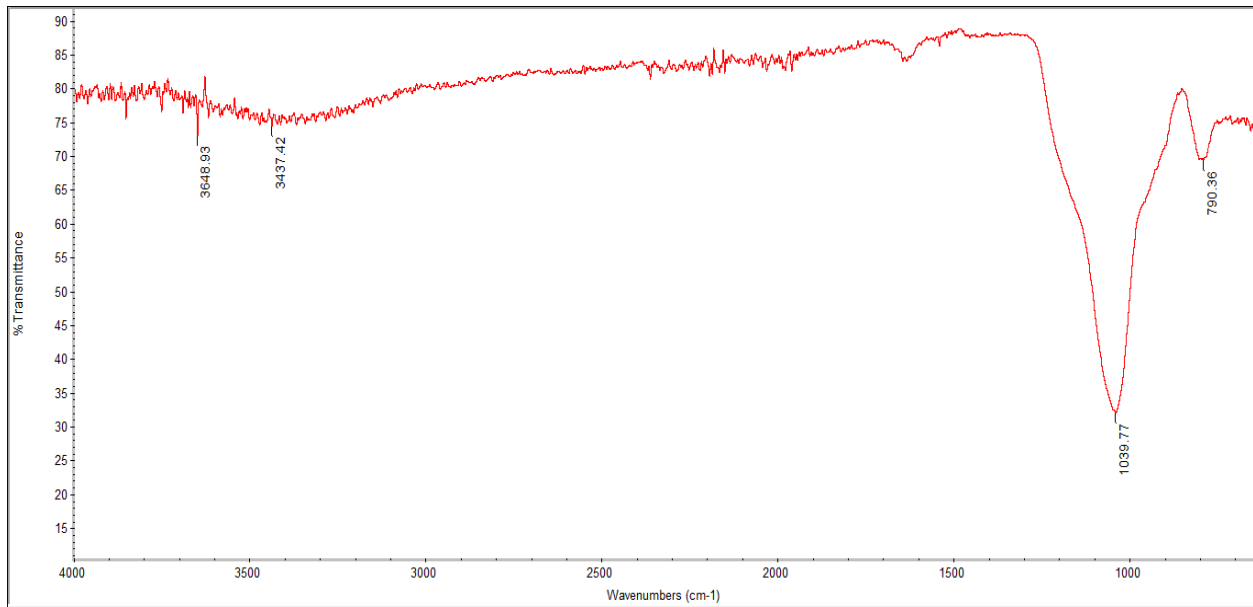
รูปที่ 3.1 ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดซิลิกาจากเถ้าแกลบขาว

ส่วนเถ้าแกลบขาวที่ผ่านการรีฟลักซ์ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1.5 โมลต่อลิตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก่อนที่จะถูกสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2.5 โมลต่อลิตร จะให้ซิลิกาที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวอมน้ำตาลอ่อน ซึ่งมีสีที่ขาวกว่าซิลิกาที่ไม่ได้ผ่านการรีฟลักซ์ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริกสามารถช่วยกำจัดไอออนของโลหะและสารอื่นที่ปนอยู่ในเถ้าแกลบขาวได้

3.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าแกลบขาว

3.2.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันนัลของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคเทคนิคฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR)

ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีนั้น จะวิเคราะห์ถึงหมู่ฟังก์ชันที่บ่งบอกวาสารตัวอย่างคือซิลิกา ผลการวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัม แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าแกลบข้าว

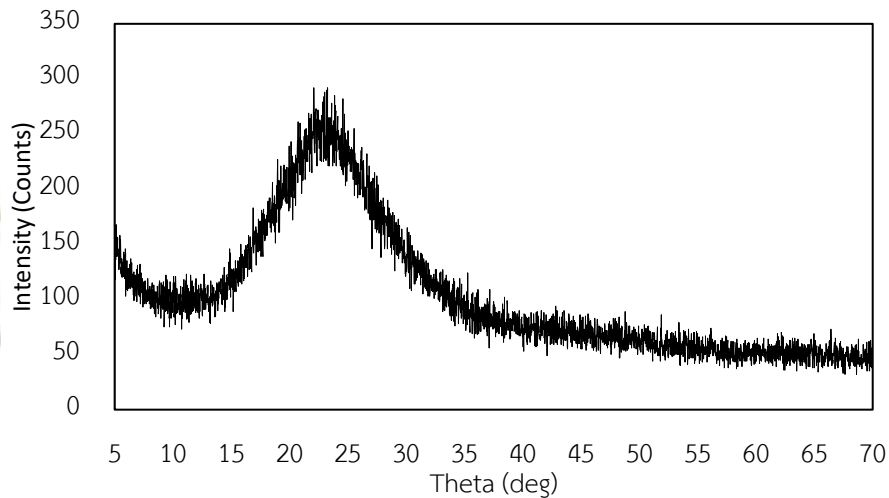
จากอินฟราเรดสเปกตรัมของซิลิกาที่สกัดได้ พบพีคลักษณะกว้างของ O-H stretching ช่วงตำแหน่งที่ 3,000-3,700 cm^{-1} พบพีคความเข้มสูง ตำแหน่งที่ 1,039 cm^{-1} เป็นตำแหน่งของพันธะ Si-O-Si ของกลุ่มไซโลเซน และเป็นตำแหน่งของพันธะ Si-OH ของกลุ่มซิลานอล ซึ่งทั้งสองเป็นกลุ่มสำคัญในพันธะของซิลิกา นาสันนิษฐานได้ว่าตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ คือ ซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) สรุปลักษณะและชนิดของการสั่นในอินฟราเรดสเปกตรัมรูปที่ 3.2 แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เลขคลื่นและชนิดของการสั่นในอินฟราเรดสเปกตรัมของซิลิกา [14]

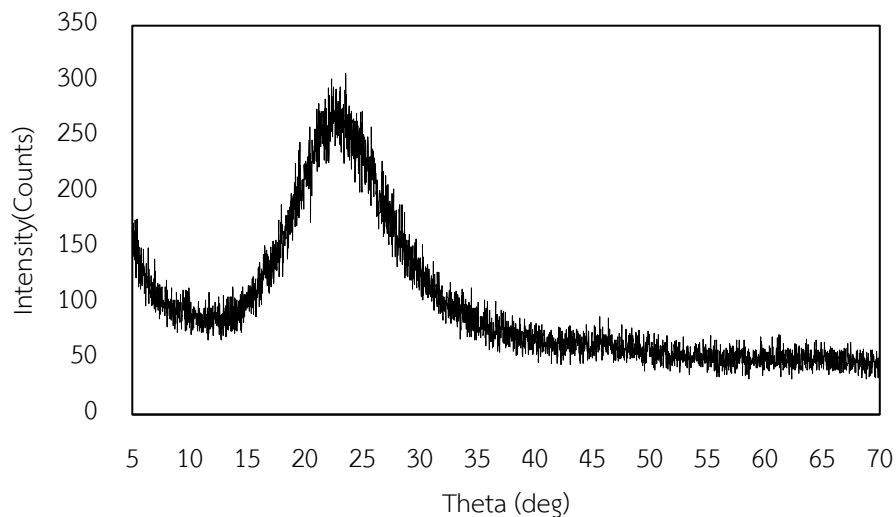
ชนิดของการสั่น	เลขคลื่นจากการทดลองนี้	เลขคลื่นจากเอกสารอ้างอิง [14]
O-H strength and adsorbed water	3,000-3,700	3,000-3,800
O-H bending (molecular water)	1645	1625
Asymmetric Si-O-Si ใน SiO_4 tetrahedron	1039	1115-1050
Si-OH bond str.	-	980-935
Si-O bond rocking	790	470-800

3.2.2 การตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction

นำผงตัวอย่างที่สกัดได้จากเถาแกลบขาว มาตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากการวิเคราะห์พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มีลักษณะเป็นอสัณฐาน คือการจัดเรียงตัวของโมเลกุลในโครงสร้างซิลิกานั้นไม่เป็นระเบียบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kalapathy และคณะ [14] โดยจะพบพีคที่กว้างที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 22-23 ไม่ปรากฏพีคของที่แสดงรูปผลึก แต่ปรากฏเฟสของซิลิกาที่เป็นอสัณฐาน (amorphous phase) ซึ่งการวิเคราะห์นี้สามารถยืนยันได้ว่าสารที่สังเคราะห์ได้เป็นซิลิกา ดังรูปที่ 3.3



(a)



(b)

รูปที่ 3.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD diffractogram) ของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากเถาแกลบขาว

(a) สารที่สกัดได้ในการทดลองวิธีที่ 1 (b) สารที่สกัดได้ในการทดลองวิธีที่ 2

3.3 การเปรียบเทียบสมบัติของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าแกลบข้าวทั้งสองวิธี

3.3.1 การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)

องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าแกลบข้าว จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.2

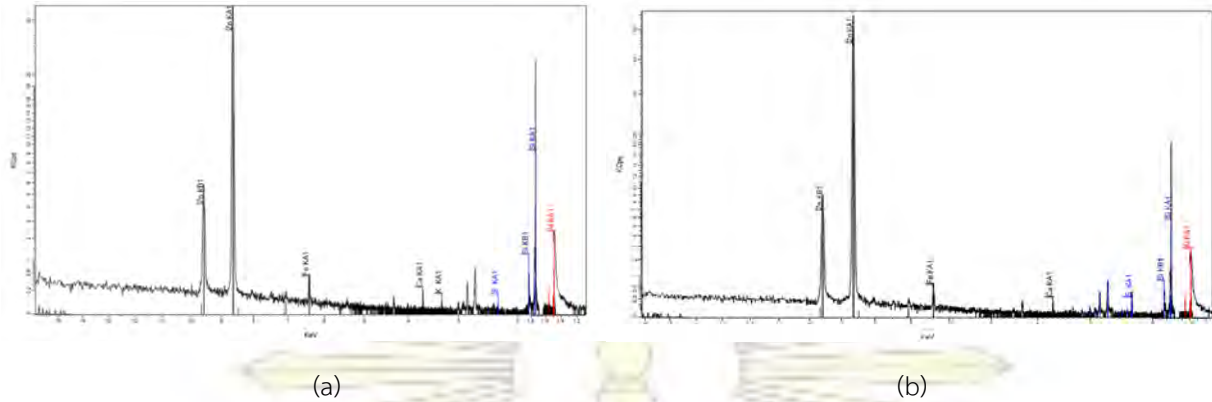
ตารางที่ 3.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าแกลบข้าวด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

Substance	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
	ซิลิกา 1	ซิลิกา 2
SiO ₂	93.8	79.0
ZnO	2.81	4.48
Al ₂ O ₃	2.91	3.35
SO ₃	0.19	1.22
CaO	0.27	0.18
Fe ₂ O ₃	0.01	0.90
K ₂ O	0.01	ND
Na ₂ O	ND	ND
P ₂ O ₅	ND	ND
Cl	ND	ND
Sc ₂ O ₃	ND	ND
TiO ₂	ND	ND

หมายเหตุ

ซิลิกา 1 คือ ซิลิกาที่ได้จากการนำเถ้าแกลบข้าวสกัดด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกก่อนการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ซิลิกา 2 คือ ซิลิกาที่ได้จากการนำเถ้าแกลบข้าวสกัดด้วยสารละลายดรอไซด์



รูปที่ 3.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าแกลบข้าวด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) (a) ซิลิกา 1 (b) ซิลิกา 2

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของนาโนซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าแกลบข้าวด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ในตารางที่ 3.2 พบว่า ปริมาณซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) จากการสังเคราะห์ซิลิกาด้วยเถ้าแกลบข้าว ในตัวอย่างซิลิกา 1 และ ซิลิกา 2 มี 93.8 และ 79.0 % แสดงให้เห็นว่า การนำเถ้าแกลบข้าวสกัดด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกก่อนการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่า เนื่องจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริกสามารถช่วยกำจัดไอออนของโลหะหนักและสิ่งเจือปนอื่น ๆ ออกจากกระบวนการสกัดซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าวได้

3.3.2 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าว ด้วยเทคนิคการวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ (PSD)

ผลการวิเคราะห์ขนาดของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าแกลบข้าวด้วยเทคนิคการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ (PSD) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของซิลิกาที่สังเคราะห์จากเถ้าแกลบข้าว

	ซิลิกาจากการสังเคราะห์วิธีที่ 1	ซิลิกาจากการสังเคราะห์วิธีที่ 2
ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (μm)	7.74	9.10
ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	775	660

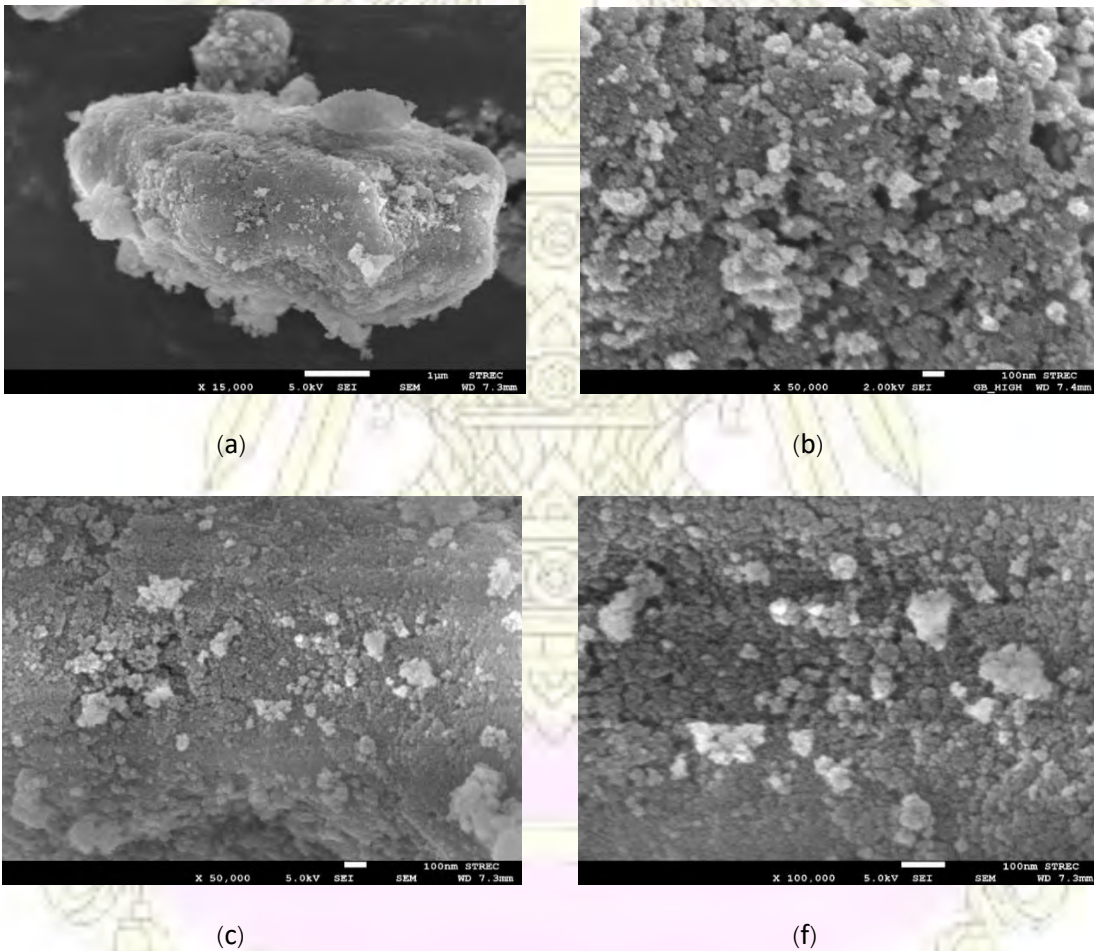
หมายเหตุ ซิลิกาจากการสังเคราะห์วิธีที่ 1 คือ ซิลิกาที่ได้จากการนำเถ้าแกลบข้าวสกัดด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกก่อนการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ซิลิกาจากการสังเคราะห์วิธีที่ 2 คือ ซิลิกาที่ได้จากการนำเถ้าแกลบข้าวสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

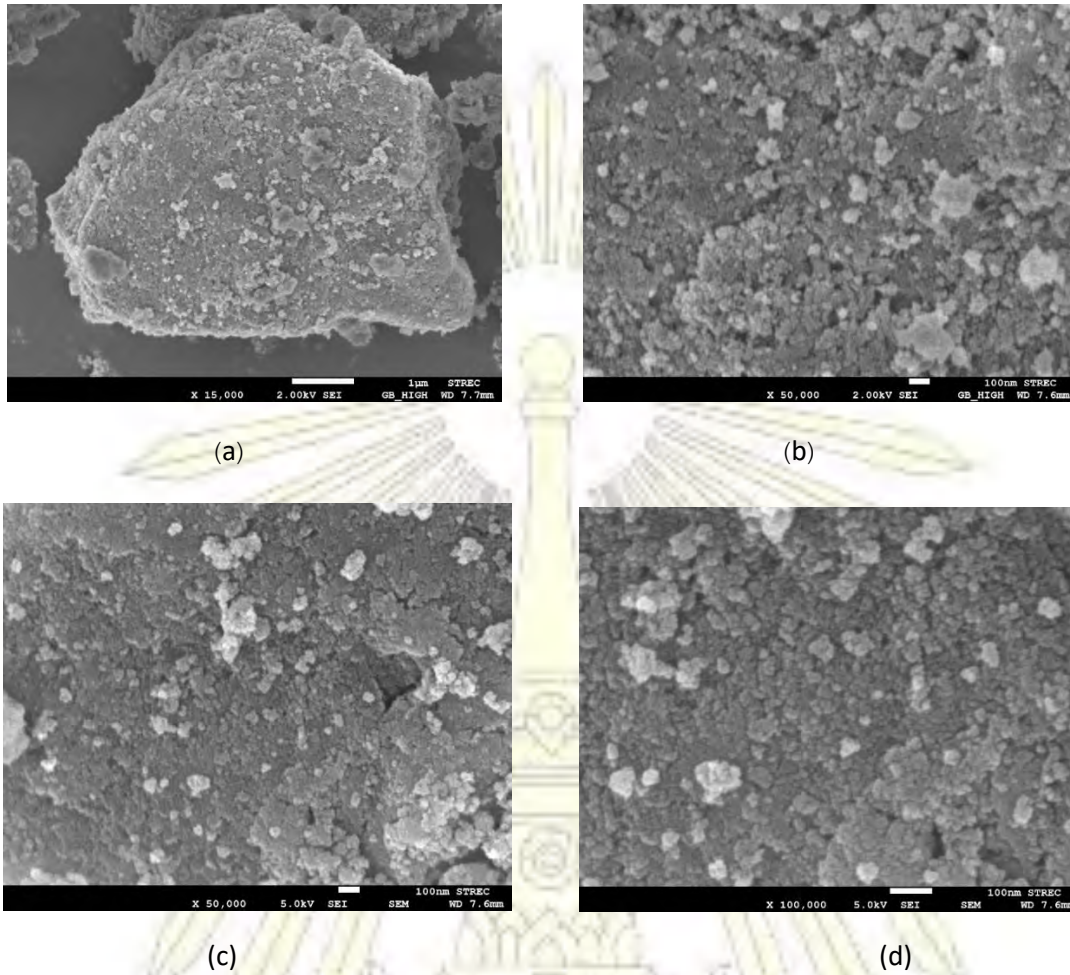
จากผลการทดลองตารางที่ 3.3 พบว่า ซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ยังมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ กล่าวคือ ซิลิกาจากการสังเคราะห์วิธีที่ 1 มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 7.74 ไมโครเมตร ส่วนซิลิกาจากการสังเคราะห์วิธีที่ 2 มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 9.10 ไมโครเมตร ทั้งนี้ อาจมีสาเหตุมาจากขั้นตอนในการทำการสังเคราะห์ อาจตกตะกอนช้าเกินไป หรือบดสารตัวอย่างได้ไม่ละเอียด ทำให้เมื่อทำการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของซิลิกาจากแก้วแอลบขาว ด้วยเทคนิคการวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ (PSD) อนุภาคซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จึงมีขนาดระดับไมโครเมตร และไม่ได้ซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร

3.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของซิลิกาจากแก้วแอลบขาว ด้วยเทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของซิลิกาจากแก้วแอลบขาว ด้วยเทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ได้ผลแสดงดังในรูปที่ 3.5 และ 3.6



รูปที่ 3.5 ภาพถ่าย SEM ของนาโนซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากวิธีที่ 1
 (a) 15,000x (b) 50,000x 2.0 kV (c) 50,000x 5.0 kV และ (f) 100,000x



รูปที่ 3.6 ภาพถ่าย SEM ของนาโนซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากวิธีที่ 2

(a) 15,000x (b) 50,000x 2.0 kV (c) 50,000x 5.0 kV และ (d) 100,000x

หมายเหตุ

ซิลิกาจากการสังเคราะห์วิธีที่ 1 คือ ซิลิกาที่ได้จากการนำเอาแก้วข้าวสากัดด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกก่อนการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

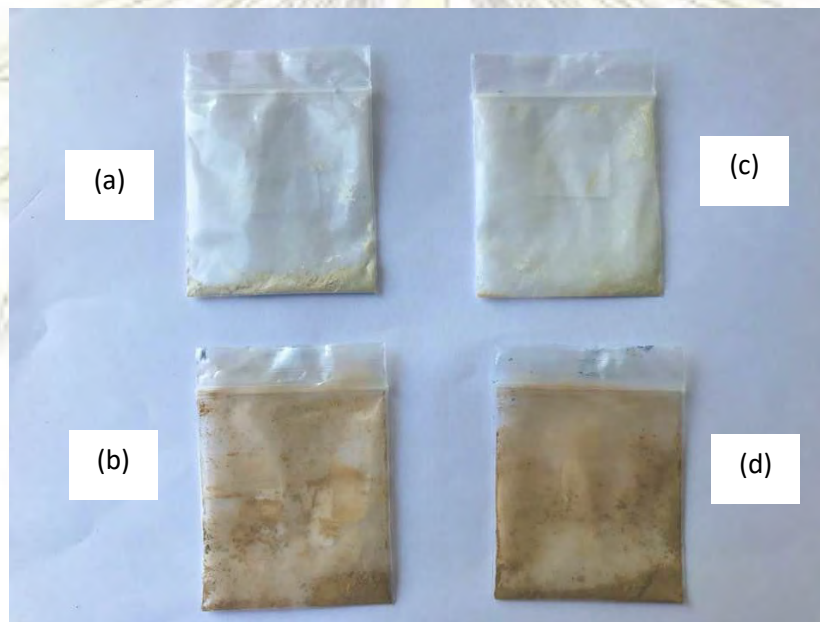
ซิลิกาจากการสังเคราะห์วิธีที่ 2 คือ ซิลิกาที่ได้จากการนำเอาแก้วข้าวสากัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากรูปที่ 3.5 และ 3.6 แสดงภาพถ่าย SEM ของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากทั้งสองวิธี พบว่ามีลักษณะผิวของซิลิกาที่ค่อนข้างคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ พื้นผิวค่อนข้างเรียบ รูปร่างค่อนข้างกลม เล็ก มีการเกาะเป็นกลุ่มเล็กน้อย และจะสังเกตเห็นได้ว่าซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากวิธีที่ 1 นั้นค่อนข้างมีรูพรุนมากกว่า

3.4 การดัดแปรผิวของซิลิกาด้วยกรดฮิวมิก

การสังเคราะห์ซิลิกาที่ดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิก ($\text{SiO}_2\text{-HA}$) เกิดผ่านปฏิกิริยาการควบแน่น (condensation reaction) โดยการเชื่อมกันระหว่างหมู่ซิลินอล (silanol) ของซิลิกากับหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) ของกรดฮิวมิก

จากการทดลองดัดแปรผิวของซิลิกาด้วยกรดฮิวมิก พบว่า สีของซิลิกาเปลี่ยนจากสีขาวอมน้ำตาลอ่อนเป็นสีน้ำตาลของซิลิกาที่ดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิก ($\text{SiO}_2\text{-HA}$) และสีของซิลิกาที่สกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มกว่าสีของซิลิกาที่สกัดด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกก่อนการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทั้งก่อนและหลังการดัดแปรผิวซิลิกาด้วยกรดฮิวมิก ดังแสดงในรูปที่ 3.7

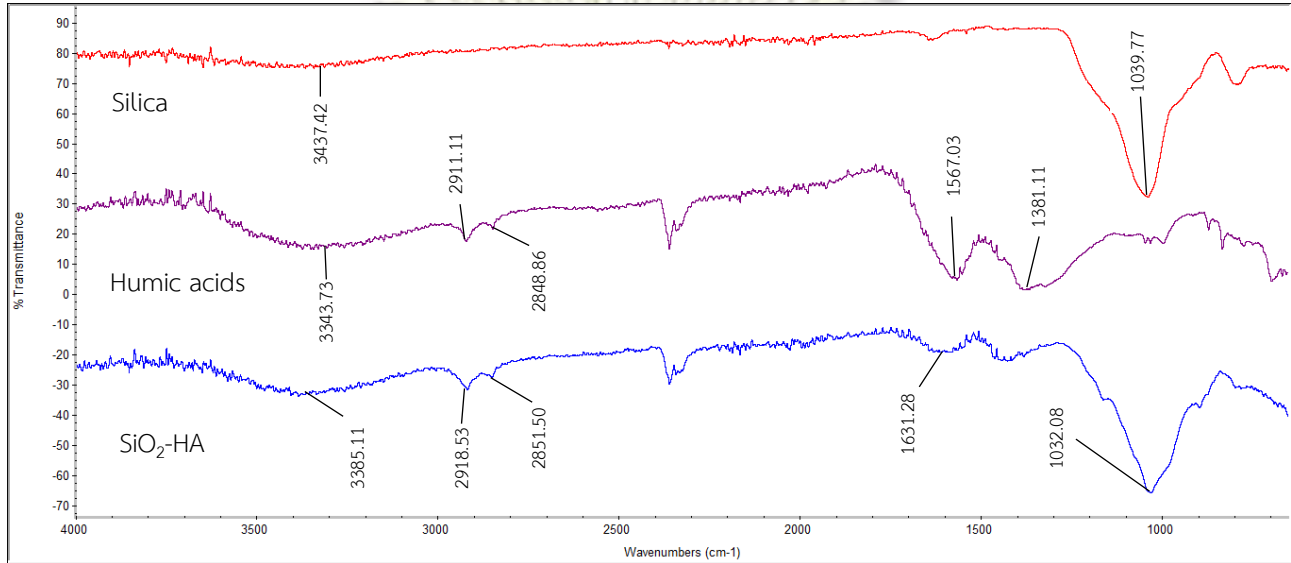


รูปที่ 3.7 รูปเปรียบเทียบสีของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ก่อนและหลังทำการดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิก

(a) ซิลิกาที่ได้จากการสกัดด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกก่อนการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ก่อนการดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิก (b) ซิลิกาที่ได้จากการสกัดด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกก่อนการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หลังการดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิก (c) ซิลิกาที่ได้จากการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ก่อนการดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิก (d) ซิลิกาที่ได้จากการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หลังการดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิก

3.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของซิลิกาที่ดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิกด้วยเทคนิค FTIR

พิสูจน์เอกลักษณ์ของซิลิกาที่ดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิก (SiO₂-HA) ด้วยเทคนิค FTIR ได้ผลแสดงดังรูปที่ 3.8 ดังนี้



รูปที่ 3.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของซิลิกา (Silica), กรดฮิวมิก (Humic acids) และซิลิกาที่ดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิก (SiO₂-HA)

จากอินฟราเรดสเปกตรัมของซิลิกาพบพิคลักษณะกว้างของ O-H stretching ช่วงตำแหน่งที่ 3700-3000 cm⁻¹ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และเป็นตำแหน่งของพันธะ Si-OH ของกลุ่มซิลานอล อีกทั้งพบพิคความเข้มสูง ตำแหน่งที่ 1039 cm⁻¹ เป็นตำแหน่งของพันธะ Si-O-Si ของกลุ่มซิลอกเซน

จากอินฟราเรดสเปกตรัมของกรดฮิวมิก (humic acids) พบพิคลักษณะกว้างของ O-H stretching และ N-H stretching และ ตำแหน่ง 3600-3100 cm⁻¹ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของหมู่เอมีน (-NH₂) หมู่คาร์บอกซิล (-COOH) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) อีกทั้งพบพิคความเข้มอ่อนของ C-H stretching ที่ตำแหน่ง 2911 cm⁻¹ และ 2849 cm⁻¹ และพบพิค C=C stretching ของหมู่อะโรมาติกที่ตำแหน่ง 1567 cm⁻¹

จากอินฟราเรดสเปกตรัมของซิลิกาที่ดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิก (SiO₂-HA) พบพิค Si-O-Si ความเข้มสูงของซิลิกาที่ตำแหน่ง 1032 cm⁻¹ อีกทั้งพบพิคความเข้มอ่อนของ C-H stretching ที่ตำแหน่ง 2918 cm⁻¹ และ 2851 cm⁻¹ นอกจากนี้ยังพบพิค C=O stretching จากหมู่เอไมด์และ C=C stretching ของหมู่อะโรมาติกที่ตำแหน่ง 1631 cm⁻¹

จากการเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมทั้งสาม จึงพิสูจน์ให้ทราบว่า อนุภาคระดับไมโครเมตรของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากแก้วแอลบสามารถดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิกได้

บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

4.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าว โดยนำเถ้าแกลบข้าวที่ผ่านการเผามาทำการสกัดซิลิกา 2 วิธี ได้แก่ วิธีที่ 1 ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.5 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และช่วงพีเอชที่ใช้คือ พีเอชประมาณ 7.5-8.7 และวิธีที่ 2 นำเถ้าแกลบข้าวมาทำการสกัดด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.5 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก่อนทำการสกัดซิลิกาโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อช่วยเพิ่มความบริสุทธิ์ให้แก่ซิลิกา เนื่องจากสารละลายไฮโดรคลอริกสามารถช่วยกำจัดไอออนของโลหะและสารเจือปนต่าง ๆ ในเถ้าแกลบข้าว ซิลิกาที่เตรียมได้จากวิธีการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกก่อนมีความบริสุทธิ์สูงกว่า

เมื่อนำสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจสอบหาลักษณะเฉพาะ พบว่า เมื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM และขนาดอนุภาคด้วยเทคนิค PSD พบว่า พื้นผิวค่อนข้างเรียบ รูปร่างค่อนข้างกลม เล็ก ไม่ค่อยมีการเกาะปนกลุ่ม ซิลิกาจากการสกัดด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกก่อนทำการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และซิลิกาจากการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียว มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 7.74 และ 9.10 ไมโครเมตร ตามลำดับ และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 775 และ 660 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และผลการทดลองจากเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) พบว่าการสกัดเถ้าแกลบข้าวด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกก่อนที่จะทำการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่าจากปริมาณซิลิการ้อยละ 93.8 และ 79.0 ตามลำดับ นำตัวอย่างมาตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) พบพันธะหลักในโมเลกุลของซิลิกาคือกลุ่มซิลานอล (Si-OH) และกลุ่มไซโลเซน (Si-O-Si) และทำการยืนยันเฟสของตัวอย่างที่เตรียมได้ด้วยการตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค XRD พบว่ามีลักษณะออสถูเนียน พิคแถบกว้างที่ตำแหน่ง 22-23 องศา แสดงถึงตัวอย่างมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างซิลิกาไม่เป็นระเบียบ

ทำการดัดแปรผิวด้วยการนำซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ด้วยสารละลายกรดฮิวมิกความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ช่วงพีเอชประมาณ 7.5 - 8.0 และพิสูจน์เอกลักษณ์ของซิลิกาที่ดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิก (SiO₂-HA) ด้วยเทคนิค FTIR พบว่า อนุภาคระดับไมโครเมตรของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าแกลบข้าวสามารถดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิกได้

4.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทำงานวิจัยเรื่อง การสังเคราะห์ซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าวและดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิก ทำให้ทราบถึงวิธีการนำเถ้าแกลบข้าวที่เหลือใช้มาพัฒนาให้เกิดประโยชน์และสมบัติของซิลิกา ซิลิกาที่ถูกดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิกที่สามารถนำมาใช้ในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของวัสดุพื้นผิวสูงและใช้เป็นวัสดุในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการดูดซับต่าง ๆ ต่อไป แต่ทั้งนี้การนำซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าวไปใช้ก็ยังมีข้อจำกัดและมีจุดที่ต้องปรับปรุงแก้ไข โดยแยกเป็นข้อเสนอ ดังนี้

1. จากการสกัดซิลิกาจากเถาแก่กลบข้าวด้วยวิธีการต้มรีฟลักซ์ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ต้องต้มภายในตู้หรืออุปกรณ์ดูดควัน เนื่องจากไอของกรดไฮโดรคลอริกมีความเป็นพิษและระคายเคืองต่อระบบหายใจ

2. ซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากเถาแก่กลบข้าวมีขนาดอนุภาคเล็กมาก เกิดการฟุ้งกระจายได้ง่ายเมื่อเข้าสู่ปอดแล้วไม่สามารถกำจัดออกได้ อาจส่งผลต่อปัญหาสุขภาพ ดังนั้นในการทำงานวิจัยกับวัสดุนี้จึงควรมีอุปกรณ์ป้องกันอย่างดี เช่น ต้องสวมหน้ากากอนามัยที่มีความสามารถในการกรองฝุ่นระดับนาโนเมตรในขณะที่ทำงานวิจัย

3. นาโนซิลิกาจากเถาแก่กลบข้าวมีประโยชน์หลายอย่าง สามารถประยุกต์ในงานวิจัย และในอุตสาหกรรมได้ อีกทั้งประเทศไทยเป็นแหล่งปลูกข้าวที่สำคัญ จึงควรมีการสนับสนุนและส่งเสริมงานวิจัยโดยใช้วัสดุชนิดต่อไป

สำหรับงานวิจัยเรื่องการสังเคราะห์ซิลิกาจากเถาแก่กลบข้าวและดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิก ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

1. ศึกษาสภาวะและขั้นตอนที่เหมาะสมและดีที่สุดในการสังเคราะห์ซิลิกาจากเถาแก่กลบข้าว เพื่อให้ได้อนุภาคนาโนซิลิกาที่มีขนาดเล็กกว่าเดิม
2. ศึกษาปริมาณซิลิกาที่ดัดแปรผิวด้วยกรดฮิวมิก ที่สามารถสกัดได้มากที่สุด และเหมาะสมที่สุด
3. ศึกษาวิธีการสังเคราะห์ซิลิกาในรูปแบบอื่น เพื่อให้ได้ซิลิกาที่มีพื้นที่ผิวสูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. Stone, V.; Nowack, B.; Baun, A.; Brink, N. V. D.; Kammer, F. V. D.; Dusinska, M.; Handy, R.; Hankin, S.; Hasselov, M.; Joner, E.; Fernandes, T. F. Nanomaterials for environmental studies: Classification, reference material issues, and strategies for physico-chemical characterization. *Science of the Total Environment*. **2010**, *408*, 1745-1754.
2. Kharisov, B. I.; Kharissova, O. V.; Jose-Yacaman, M. Nanostructures with animal like shapes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. **2010**, *49*, 8289-8309.
3. Hessien, M. M.; Rashad, M. M.; Zaky, R. R.; Abdel-Aal, E. A.; El-Barawy, K. A. Controlling the synthesis conditions for silica nanosphere from semiburnd rice straw. *Materials Science and Engineering B*. **2009**, *162*, 14-21.
4. Dagiisurent, T.; Enkhurt, E.; Nyam-Ochir, L.; Tegshjargalt, K.; Ganzorigt, C.; Javkhlantugs, N. Synthesis and characterization of nanosilica and adsorption of metal ion. In Mongolian University of Science and Technology, Proceedings of the International Forum on Strategic Technology, Momgolia, October 13-16, 2013.
5. Kim, K. D.; Kim, H. T. Formation of silica nanoparticles by hydrolysis of TEOS using a mixed semi-batch/batch method. *The Journal of Sol-Gel Science and Technology*. **2002**, *25*, 183-189.
6. Hassan, A. F.; Abdelghny, A. M.; Elhadidy, H.; Youssef, A. M. Synthesis and characterization of high surface area nanosilica from rice husk ash by surfactant-free sol-gel method. *The Journal of Sol-Gel Science and Technology*. **2014**, *69*, 465-472.
7. Abu, B. H.; Putrajaya, R.; Abdulaziz, H. Malaysian ricehusk ash—improving the durability and corrosion resistance of concrete. *Concrete Research Letters*. **2010**, *1*, 6–13.
8. Van, L. H.; Thuc, C. N. H.; Thuc, H. H. Synthesis of silica nanoparticles from Vietnamese rice husk by sol-gel method. *Nanoscale Research Letters*. **2013**, *8*, 58-68.
9. Liou, T. H.; Yang, C. C. Synthesis and surface characteristics of nanosilica produced from alkali-rice husk ash. *Materials Science and Engineering B*. **2011**, 521-529.
10. Klavins, M.; Eglite, L. Immobilisation of humic substances. *Colloids and Surfaces*. **2002**, *203*, 47-54.

11. Ferro-Garcia, M. A.; Rivera-Utrilla, J.; Bautista-Toledo, I.; Moreno-Castilla, C. Adsorption of humic substances on activated carbon from aqueous solutions and their effect on the removal of Cr(III) ions. *Langmuir*. **1998**, *14*, 1880-1886.
12. Sandor, M.; Nistor, C. L.; Szalontai, G.; Stoca, R.; Nicolae, C. A.; Alexandrescu, E.; Fazakas, J.; Oancea, F.; Donescu, D. Aminopropyl-silica hybrid particles as supports for humic acid immobilization. *Materials*. **2016**, *9*, 34-44.
13. Cides da Silva, L. C.; Abate, G.; Andrea, N. A.; Fantini, M. C. A.; Mazini, J. C. L.; Mercuri, P.; Olkhovyk, O.; Matos, J. R. Adsorption/Desorption on Hg(II) on FDU-1 silica and FDU-1 silica modified with humic acid. *Microporous and Mesoporous Materials*. **2015**, *50*, 984-992.
14. Kalaphathy, U.; Protor, A.; Shultz, J. A simple method for production of pure silica from rice husk ash. *Bioresource Technology*. **2000**, *73*, 257-262.
15. Souza, M. F.; Batista, P. S.; Regiani, I.; Liborio, J. B.; Souza, D. P. Rice husk derived silica: Application in Portland cement and mullite whiskers. *Materials Research*, **2000**, *3*, 25-30.
16. Yalcin, N.; Sevinc, V. Studies on silica obtained from rice husk. *Ceramic International*, **2001**, *27*, 219-224.
17. Della, V. P.; Kuhn, I.; Houtza, D. Rice husk ash as an alternate source for active silica production. *Materials Letters*. **2002**, *57*, 818-821.
18. Jal, P. K.; Sudarshan, M.; Saha, A.; Sabita, P.; Mishra, B. K. Synthesis and characterization of nanosilica prepared by precipitation method. *Colloids and Surface A*. **2004**, *240*, 173-178.
19. Witoon, T.; Chareonpanich, M.; Limtrakul, J. Synthesis of bimodal porous silica from rice husk ash via sol-gel process using chitosan as template. *Materials Letters*. **2008**, *62*, 1476-1479.
20. Cides da Silva, L. C.; Abate, G.; Andrea, N. A.; Fantini, M. C. A.; Mazini, J. C. L.; Mercuri, P.; Olkhovyk, O.; Matos, J. R. Adsorption of Pb²⁺, Cu²⁺, and Cd²⁺ on FDU-1 silica and FDU-1 silica modified with humic acid. *Microporous and Mesoporous Materials*. **2008**, *110*, 250-259.
21. Liou, T. H. Evolution of chemistry and morphology during the carbonization and combustion of rice husk. *Carbon*. **2004**, *42*, 785-794.

- 
22. Kota, S. R.; Khalil, E. H.; Kodaki, T.; Matsushige, K.; Makino, K. A novel method for synthesis of silica nanoparticles. *Journal of Colloid and Interface Science*. **2005**, *289*, 125-131.
23. Zulfiqar, U.; Subhani, T.; Husain, S. W. Synthesis and characterization of silica nanoparticles from clay. *Journal of Asian Ceramic Societies*. **2016**, *4*, 91-96.
24. Pagliaro, M. Silica-based Materials for Advanced Chemical Applications. *Royal Society of Chemistry*. **2009**.
25. Aiken, G. R.; McKnight, D. M.; Wershaw, R. L.; MacCarthy, P. Humic substances in soil, sediment and water: Geochemistry, isolation and characterization. *Geological Journal*. **1995**, *21*, 213-214.
26. Stevenson, F. J. Humus Chemistry: Genesis Composition Reactions, 2nd ed.; Wiley: New York, **1994**.
27. Fong, S. S.; Seng, L. A comparative evaluation on the oxidative approaches for extraction of humic acids from low rank coal of Mukah, Sarawak. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. **2007**, *18*, 34-40.
28. Efanov, M. V.; Galochkin, A. I.; Chernenko, P. P. Preparation of sodium oxyhumates from peat. *Solid Fuel Chemistry*. **2008**, *42*, 82-85.
29. Nandiyanto, A. B. D.; Kim, S. G.; Iskandar, F.; Okuyama, K. Synthesis of spherical mesoporous silica nanoparticles with nanometer-size controllable pores and outer diameters. *Microporous and Mesoporous Materials*. **2009**, *120*, 447-453.
30. Liou, T. H.; Yang, C. C. Synthesis and surface characteristics of nanosilica produced from alkali-extracted rice husk ash. *Materials Science and Engineering*. **2011**, *176*, 521-529.

ประวัติผู้วิจัย

นางสาวสิรامل มีมุสิทธิ์ เกิดเมื่อวันที่ 12 พฤศจิกายน พ.ศ. 2537 ที่จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนหาดใหญ่วิทยาลัย จังหวัดสงขลา เมื่อปีการศึกษา 255๓ และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2556 ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ บ้านเลขที่ 209 ถนนเฉลิมราชฎร์ หมู่ที่ 3 ตำบลควนลัง อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา รหัสไปรษณีย์ 90110 อีเมล pang_222@windowslive.com

