

การพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบซีโอไลต์ที่ห่อหุ้มของเหลวไอออนิกเพื่อกำจัด
ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าถ่านหินและโรงงานอุตสาหกรรม

Development of Encapsulation of Ionic Liquids with Zeolite
for Sulfur Dioxide Removal: A Prototype for Coal Power
Plants and Industrial Factories

ศิริชัย สุขสถิตย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา เคมีประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบซีโอไลต์ที่ห่อหุ้มของเหลวไอออนิกเพื่อกำจัด
ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าถ่านหินและโรงงานอุตสาหกรรม

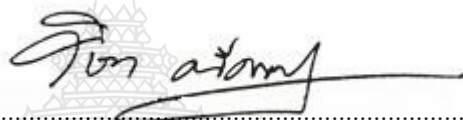
ศิริชัย สุขสถิตย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา เคมีประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบซีโอไลต์ที่ห่อหุ้มของเหลวไอออนิกเพื่อกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าถ่านหินและโรงงานอุตสาหกรรม
Development of Encapsulation of Ionic Liquids with Zeolite for Sulfur Dioxide Removal: A Prototype for Coal Power Plants and Industrial Factories

ชื่อ – นามสกุล นายศิริชัย สุขสถิตย์
สาขาวิชา เคมีประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์การ์นต์ บ่อบัวทอง, ปร.ด.
ปีการศึกษา 2563

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์วิชา ตรีสุวรรณ, ปร.ด.)



.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมพงษ์ แสนเสนยา, ปร.ด.)



.....กรรมการ
(อาจารย์การ์นต์ บ่อบัวทอง, ปร.ด.)

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิพัทธ์ จงสวัสดิ์, ปร.ด.)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วันที่ 13 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบซีโอไลต์ที่ห่อหุ้มของเหลวไอออนิกเพื่อกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าถ่านหินและโรงงานอุตสาหกรรม
ชื่อ – นามสกุล	นายศิริชัย สุขสถิตย์
สาขาวิชา	เคมีประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์การ์นต์ บ่อบัวทอง, ปร.ด.
ปีการศึกษา	2563

บทคัดย่อ

การกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าถ่านหินและโรงงานอุตสาหกรรมได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางเนื่องจากเป็นประเด็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อม การศึกษานี้เป็นการพัฒนาซีโอไลต์ที่ห่อหุ้มของเหลวไอออนิกด้วยระเบียบวิธีเคมีคำนวณ เพื่อเพิ่มปริมาณการดูดซับ ประสิทธิภาพการดูดซับ และศึกษากลไกการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยของเหลวไอออนิก

ทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่น (The density functional theory: DFT) ถูกนำมาใช้เพื่อค้นคว้าหาข้อมูลที่สำคัญในระดับโมเลกุลที่เกี่ยวข้องต่อการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยของเหลวไอออนิก โดยเลือกของเหลวไอออนิกที่มีเสถียรภาพทางความร้อนจาก 4 กลุ่มคือ กัวนิตีเนียมไฮดรอกซิลแอมโมเนียม อิมิดาโซล และควอเทอร์นารีแอมโมเนียม รวมทั้งสิ้น 1,200 ตัวอย่างค่าพลังงานการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้จากการคำนวณด้วย DFT ร่วมกับชุดเซต (basis sets) จากนั้นวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กับของเหลวไอออนิกด้วยช่องว่างแถบพลังงาน HOMO-LUMO การถ่ายโอนประจุ และผลของหมู่ฟังก์ชันที่ผูกแทนที่บนของเหลวไอออนิก

จากผลการวิจัยพบว่าปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คืออันตรกิริยาระหว่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไอออนที่มีประจุลบบนของเหลวไอออนิก การคำนวณโดยเปลี่ยนหมู่ให้อิเล็กตรอนของประจุลบบนของเหลวไอออนิกได้ถูกดำเนินการเพื่อปรับปรุงปริมาณการดูดซับให้ดีขึ้น โดยพบว่าหมู่ให้อิเล็กตรอนชนิดอีเธอร์นั้นเพิ่มความสามารถในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์บนของเหลวไอออนิกได้ดี ด้วยพลังงานในการดูดซับที่อยู่ในช่วงระหว่าง -25 ถึง -30 กิโลแคลอรีต่อโมล ในขณะที่หมู่ฟังก์ชันประจุบวกไม่ส่งผลกระทบต่อพลังงานการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์บนของเหลวไอออนิก

คำสำคัญ: ซีโอไลต์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ของเหลวไอออนิก

Thesis Title	Development of Encapsulation of Ionic Liquids with Zeolite for Sulfur Dioxide Removal: A Prototype for Coal Power Plants and Industrial Factories
Name – Surname	Mr. Sirichai Sooksathit
Program	Applied Chemistry
Thesis Advisor	Mr. Karan Bobuatong, Ph.D.
Academic Year	2020

ABSTRACT

Removal of sulfur dioxide (SO₂) emitted from coal power plants and industrial factories has been a subject of interest because of its environmental impacts. In this study, the development of encapsulation of ionic liquids with zeolite was performed using the computational chemistry method in order to enhance the SO₂ absorption capacity and the SO₂ desorption performance of ionic liquids. Moreover, it aimed to investigate the SO₂ absorption mechanisms of ionic liquids.

The density functional theory (DFT) was carried out to obtain information at the molecular level on the key parameters related to efficient SO₂ absorption by four types of ionic liquids (ILs). A set of 1,200 ionic liquids including guanidinium based ionic liquids, hydroxyl ammonium ionic liquids, imidazolium based ionic liquids, and quaternary ammonium based ionic liquids was selected. The SO₂ absorption energy was calculated based on DFT and basis sets. Then, the interactions between SO₂ and ionic liquids were analyzed to identify the HOMO-LUMO gaps, the charge transfer interactions, and the effects of substituted functional groups of ions on ionic liquid retention.

The study results indicated that the key factor of the SO₂ absorption was the interaction between SO₂ and the anion of ionic liquids. In order to improve the absorption level, the calculations on a series of the functionalized anions with various electron donating groups were performed. It was found that the ether functional group (-OR) had a significant improvement towards the SO₂ absorption capacity with the absorption energies range of -25 to -30 kcal/mol. On the other hand, the functionalized cations did not affect the SO₂ absorption energies of ionic liquids.

Keywords: zeolite, sulfur dioxide, ionic liquids

กิตติกรรมประกาศ

การทำดัชนีนิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความกรุณาเป็นอย่างยิ่งจากทุนพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (Research and Researchers for Industries : RRI) (Project No. MSD60I0096) ที่ให้การสนับสนุนในเรื่องของงานวิจัย ขอขอบคุณ Professor Masahiro Ehara ที่ได้ให้การช่วยเหลือสำหรับเครื่องคำนวณเคมีคอมพิวเตอร์ รวมถึงขอขอบคุณ ผศ.ดร. บุญธิดา เอื้อพิพัฒนากุล และดร. สมชาย เอื้อพิพัฒนากุล ที่ได้ให้ความกรุณาในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ ดร. การันต์ บ่อบัวทอง ที่ให้คำแนะนำ ติดตามและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ในการทำดัชนีนิพนธ์ครั้งนี้อย่างใกล้ชิดตลอดมา นับตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสำเร็จเรียบร้อยสมบูรณ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านเป็นอย่างยิ่ง

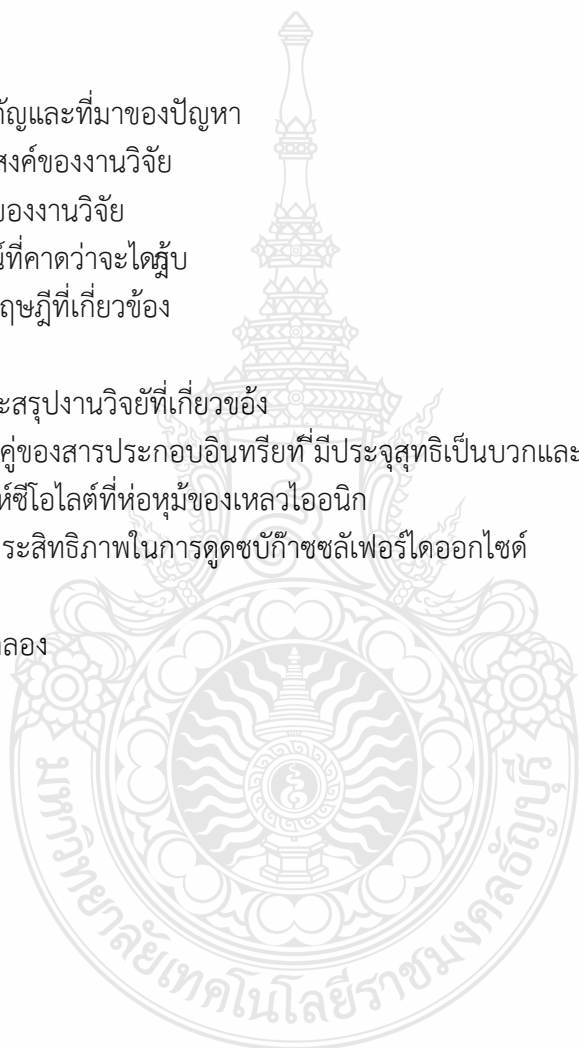
สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานชิ้นนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจหากดัชนีนิพนธ์ในครั้งนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขอภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ศิริชัย สุขสถิตย์



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	
กิตติกรรมประกาศ	
สารบัญ	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
บทที่ 3 การทดลอง	24
3.1 ค้นหาและสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
3.2 ออกแบบคู่มือของสารประกอบอินทรีย์ที่มีประจุสุทธิเป็นบวกและลบ	25
3.3 สังเคราะห์ซีไอไลต์ที่ห่อหุ้มของเหลวไอออนิก	27
3.4 ทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	27
บทที่ 4 ผลการทดลอง	28
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	69
บรรณานุกรม	70
ภาคผนวก	73
ประวัติผู้เขียน	82

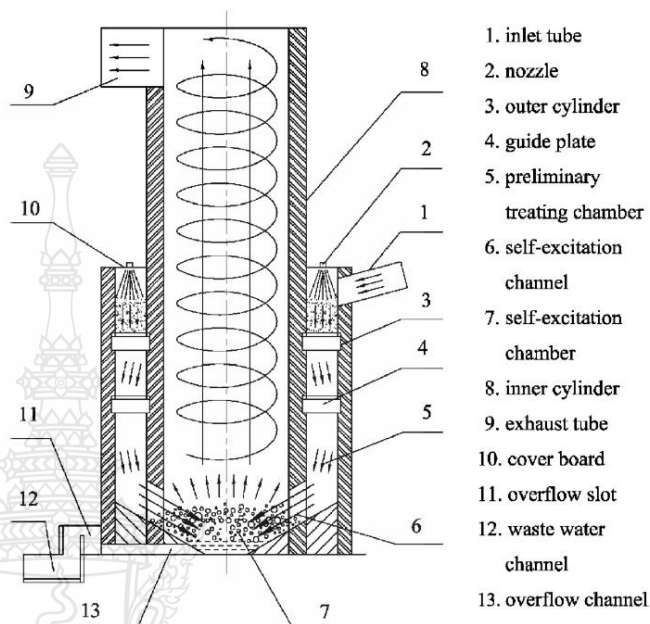
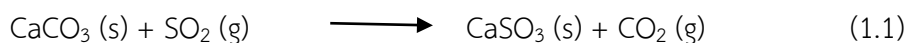


บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

มลพิษทางอากาศ เป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เห็นชัดเจนทั้งในเขตชุมชนขนาดใหญ่ และพื้นที่พัฒนาที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วของกิจกรรมอุตสาหกรรม การคมนาคม การจราจร และการก่อสร้าง รวมทั้งบริเวณพื้นที่ตั้งของโรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรม สารมลพิษทางอากาศที่เป็นปัญหาหลักซึ่งจะยังคงเป็นปัญหาในอนาคตที่สำคัญนั้น ได้แก่ ฝุ่นละออง ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และ ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) โดยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นสารมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่มีกำมะถัน (S) เป็นองค์ประกอบ มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง อวัยวะภายในร่างกาย เป็นสารประกอบของการเกิดฝนกรด นำมาซึ่งการเปลี่ยนแปลง pH ของทรัพยากรแหล่งน้ำ ดิน และการกัดกร่อน สถาปัตยกรรมต่าง ๆ ได้ โดยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีแหล่งกำเนิดที่สำคัญ ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมันดีเซลล์ น้ำมันเบนซิน เต้าเผาขยะ เป็นต้น ปริมาณที่ถูกปลดปล่อยจากการเผาไหม้จะสัมพันธ์กับปริมาณของซัลเฟอร์ที่พบในเชื้อเพลิง โดยกรมควบคุมมลพิษได้กำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศทั่วไปว่าควรมีปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (24 ชม.) ไม่เกิน 0.12 ppm [1] ในปัจจุบันก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ยังเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะบริเวณรอบโรงงานไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้มีการต่อต้านการสร้างโรงงานไฟฟ้าถ่านหินและเป็นอุปสรรคในการขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรมไปในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศไทย ถึงแม้ว่ารัฐบาลได้ดำเนินการเพื่อการแก้ไขปัญหามลพิษทางอากาศโดยมีนโยบายและแนวทางดำเนินการป้องกันและขจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ทั้งในด้านการกำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศจากแหล่งกำเนิด (pre-combustion) มาตรฐานคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง มาตรฐานน้ำมันหล่อลื่น การควบคุมปริมาณสารมลพิษทางอากาศจากโรงงานอุตสาหกรรมที่จะต้องควบคุมมลพิษทางอากาศ (during and post-combustion) และเพิ่มเติมปรับปรุงมาตรฐานมลพิษ แต่ก็สามารถแก้ไขปัญหาได้เพียงแต่ระดับหนึ่งเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากการควบคุมป้องกันและแก้ไขปัญหามลพิษทางอากาศยังขาดความเป็นเอกภาพมีหลายหน่วยงานรับผิดชอบ หน่วยงานที่ทำหน้าที่ตรวจสอบและควบคุมการระบายมลพิษทางอากาศ ยังขาดอุปกรณ์และบุคลากรที่มีความรู้ความชำนาญด้านการตรวจวัดและจัดระบบฐานข้อมูลไม่เพียงพอ

ในปัจจุบันระบบขจัดเขม่าควันกลืน (Flue-gas desulfurization, FGD) ถูกนำมาใช้ในการจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากก๊าซจากการเผาไหม้ (flue gas) ในโรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ดังรูปที่ 1.1 โดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังสมการเคมี (1) (2) และ (3) ตามลำดับ

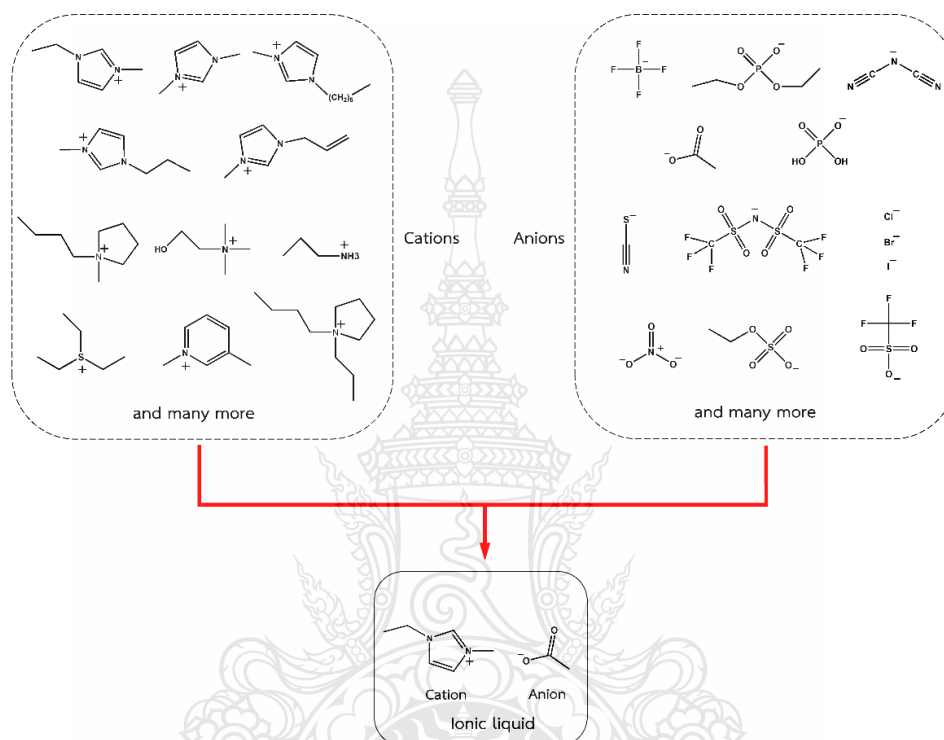


รูปที่ 1.1 ระบบขจัดเขม่าควันกลืน (Flue-gas desulfurization, FGD)

แต่เนื่องจากหลักการทางานของระบบดังกล่าวเป็นการจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพื่อเปลี่ยนเป็นสารละลายหรือของแข็งที่เป็นพิซ (CaSO₃) รวมถึงผลิตก๊าซเรือนกระจก (CO₂) ในปริมาณมากและต่อเนื่องเป็นเวลานาน จึงจำเป็นต้องมีขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสีย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการกำจัดของแข็งที่เป็นพิซ อาจกล่าวได้ว่าเป็นวิธีที่สามารถลดมลพิษทางอากาศแต่สร้างมลพิษทางน้ำ (รูปที่ 1.1 ข้อที่ 12) และดิน (รูปที่ 1.1 ข้อที่ 7) ขึ้นแทน ส่งผลให้ในปัจจุบันมีความพยายามในการคิดค้นเทคโนโลยีในด้านอื่น ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากก๊าซเผาไหม้ และสามารถนำก๊าซดังกล่าวกลับไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ด้วยกระบวนการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมให้มากขึ้น

ของเหลวไอออนิก (ionic liquid) ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นสารที่ใช้ในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากก๊าซเผาไหม้ของโรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าของเหลวไอออนิกซึ่งประกอบด้วยสารประกอบอินทรีย์ที่มีประจุสุทธิเป็นบวก (organic cations) และสารประกอบอินทรีย์หรือสารประกอบอนินทรีย์ที่มีประจุสุทธิเป็นลบ (organic or inorganic anions) ดังรูปที่ 2 มีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพที่ดีในการนำมาใช้ดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เช่น มีความดันไอต่ำ ระเหยได้ยากมาก (non-volatile solvent) ช่วงอุณหภูมิของการคง

สถานะของเหลวว้าง เสถียรภาพทางความร้อนสูง (thermal stability) ไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม นำกลับมาใช้ได้ใหม่หลายครั้ง ลดขั้นตอนการกำจัดของเสียปริมาณมากจาก FGD [3-13] อีกทั้งยังสามารถเปลี่ยนชนิดของคู่สารประกอบอินทรีย์ที่มีประจุสุทธิเป็นบวกและลบได้อย่างหลากหลาย เพื่อให้เหมาะสมกับประเภทของโรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เนื่องจากแต่ละอุตสาหกรรมปลดปล่อยก๊าซเผาไหม้ที่มีองค์ประกอบของก๊าซที่เป็นมลพิษทางอากาศในอัตราส่วนที่ไม่เท่ากัน



รูปที่ 1.2 สารประกอบอินทรีย์หรือสารประกอบอนินทรีย์ที่มีประจุสุทธิเป็นบวกและลบที่สามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นผลิตของเหลวไอออนิกสำหรับการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของ ของเหลวไอออนิกบางประการยังต้องได้รับการปรับปรุงก่อนนำไปใช้จริง เช่น ช่วงอุณหภูมิที่ดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แคบ และอันตรกิริยาระหว่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และของเหลวไอออนิกบางชนิดมีมากเกินไป ส่งผลให้การคายออก (desorption) ของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกิดขึ้นได้ยาก [3-8] ต้องเพิ่มอุณหภูมิแก่ของเหลวไอออนิก เพื่อช่วยในการคายออกดังกล่าว ซึ่งทำให้ต้องสิ้นเปลืองพลังงานและเสี่ยงต่อการสลายตัวหรือเสื่อมสภาพของ ของเหลวไอออนิก นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อนำไปใช้กับก๊าซเผาไหม้ที่มีการแปรผันของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์สูงจะทำให้ความจำเพาะเจาะจง (selectivity) ในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่ำลงเมื่อเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ [10-13] ทางคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการเลือกใช้ ซีโอไลต์เป็นวัสดุรองรับของเหลวไอออนิกเพื่อใช้ในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เพราะซีโอไลต์มีความจำเพาะเจาะจงในการแยกก๊าซหลาย ๆ ชนิดออกจากกัน ทำให้สามารถขจัดปัญหาอิทธิพลของก๊าซชนิดอื่น ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อีกทั้งซีโอไลต์มีพื้นที่ผิวในการ

รองรับของเหลว ไอออนิกสูง และมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี โดยการดำเนินงานวิจัยจะเริ่มจากการ ค้นหาคุณสมบัติของสารประกอบอินทรีย์ที่มีประจุสุทธิเป็นบวกและลบที่ดูดซับและคายออกก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยระเบียบวิธีทางเคมีคำนวณ (computational chemistry) เนื่องจาก เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการกลั่นกรอง (screening) หาสารประกอบอินทรีย์ที่เหมาะสมจากการใช้ สารประกอบอินทรีย์ที่มีจำนวนหลากหลายชนิด และลดขั้นตอนการลองถูกลองผิด (trial and error) จึง ช่วยประหยัดงบประมาณค่าดำเนินการ สารเคมีและย่นระยะเวลาในการออกแบบของเหลวไอออนิก รวมถึงเอนทัลปี พลังงานอิสระและกลไกการดูดซับและคายออกของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูก ศึกษาด้วยระเบียบวิธีนี้เช่นกัน จากนั้นข้อมูลจากเทคนิคทางเคมีคำนวณ จะถูกใช้เป็นแนวทางทำการ เลือกชนิดซีโอไลต์ที่มีพรขนาดกลาง (mesoporous zeolites) สำหรับห่อหุ้มของเหลวไอออนิก ก่อน การสังเคราะห์ขึ้นจริงและทดสอบการดูดซับของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ยัง ได้รับความร่วมมือจากผู้ประกอบการ บริษัท ไคเนติกส์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่มีประสบการณ์ในการเป็น ตัวแทนจัดจำหน่าย ออกแบบและจัดสร้าง อุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ ให้กับหลาย หน่วยงานของรัฐบาลและเอกชน ช่วยให้คำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญ อำนวยความสะดวกด้านสถานที่ การ วิเคราะห์ทางกายภาพ ตลอดจนทุนวิจัยบางส่วนเพื่อออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับการกำจัดก๊าซ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ออกแบบของเหลวไอออนิกชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ด้วยระเบียบวิธีทางเคมีคอมพิวเตอร์

1.2.2 ออกแบบซีโอไลต์เพื่อใช้เป็นวัสดุรองรับของเหลวไอออนิก

1.2.3 สังเคราะห์ซีโอไลต์ที่ห่อหุ้มของเหลวไอออนิก

1.2.4 ออกแบบเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยซีโอไลต์ที่ ห่อหุ้มของเหลวไอออนิก

1.2.5 ทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยเครื่องมือที่ออกแบบ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ด้านพื้นที่ พื้นที่ในเขตที่ทำการทดลอง ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และ ห้องปฏิบัติการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ บริษัท ไคเนติกส์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด

1.3.2 ด้านเนื้อหา คณะผู้วิจัย มุ่งเน้นการพัฒนาซีโอไลต์ที่ห่อหุ้มของเหลวไอออนิกเพื่อใช้ดูด ซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับใช้งานในอุตสาหกรรมโดยมีขอบเขต ด้านเนื้อหาดังต่อไปนี้

1.3.2.1 ระเบียบวิธีการคำนวณทางเคมีคอมพิวเตอร์จะถูกนำมาใช้ในออกแบบคู่ของสารประกอบอินทรีย์ที่มีประจุสุทธิเป็นบวกและลบ (ของเหลวไอออนิก) ในการดูดซับและคายออกของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยจะพิจารณาเลือกคู่สารประกอบอินทรีย์ดังกล่าวที่มีเอนทัลปีและพลังงานอิสระในการดูดซับอยู่ในช่วงอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิโดยรอบ (ambient temperature) ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานภายนอกเพื่อขับเคลื่อนการทำงานของของเหลวไอออนิก

1.3.2.2 ศึกษาอิทธิพลของการกักขังของเหลวไอออนิกด้วยซีโอไลต์ (confinement effect of zeolites) ด้วยระเบียบวิธีทางเคมีคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นอิทธิพลที่สำคัญในการยึดเหนี่ยวของเหลวไอออนิกภายในโพรงของซีโอไลต์และส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

1.3.3.3 ศึกษาการเตรียมการเติมของเหลวไอออนิกเข้าไปในซีโอไลต์ด้วยวิธีการเคลือบฝัง (impregnation method) และไมโครเวฟ (microwave-assisted synthesis) โดยให้มีปริมาณและการกระจายตัวของ ของเหลวไอออนิกภายในโพรงซีโอไลต์เป็นไปตามข้อมูลที่ได้จากการศึกษาด้วยระเบียบวิธีทางเคมีคอมพิวเตอร์

1.3.3.4 ออกแบบและจัดสร้างอุปกรณ์สำหรับดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยซีโอไลต์ที่ห่อหุ้มของเหลวไอออนิก

1.3.3.5 ประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกประเมินโดยการตรวจวัดเศษส่วนโมลการละลาย (mole fraction solubility) ทั้งในสภาวะที่ปรากฏและปราศจากก๊าซมลพิษชนิดอื่นเช่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์

1.3.3 ด้านเวลา

เดือนตุลาคม 2559 – เดือนพฤษภาคม 2562

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่ได้จากการทำวิจัยหรือแก้ปัญหา (ในเชิงปริมาณ)

เพิ่มประสิทธิภาพในการบริการบำบัดมลพิษทางอากาศสำหรับโรงไฟฟ้าและอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นมูลค่าในการสร้างรายได้ให้ผู้ประกอบการ 10 ล้านบาทต่อปี ต้นแบบอุปกรณ์ดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยซีโอไลต์ที่ห่อหุ้มของเหลวไอออนิกถูกประเมินเป็นมูลค่าในการสร้างรายได้ให้ผู้ประกอบการ 5 ล้านบาทต่อเครื่อง

1.4.2 องค์กรความรู้ใหม่

คาดว่าจะได้รับองค์ความรู้ใหม่ด้านการออกแบบของเหลวไอออนิกเพื่อใช้ในการดูดซับและคายออกก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กลไกและขั้นตอนการดูดซับก๊าซดังกล่าวในระดับโมเลกุล รวมไปถึงความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะพื้นผิวภายในรูพรุนของซีโอไลต์และการยึดเกาะของเหลวไอออนิก ที่จะส่งผลถึงประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในสภาวะที่มีก๊าซอื่น ๆ เจือปนอยู่เช่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์

1.4.3 สิทธิบัตร

ยื่นคำขอสิทธิบัตรการประดิษฐ์ 2 เรื่อง ซึ่งประกอบด้วยสิทธิบัตรการประดิษฐ์กระบวนการเตรียมซีโอไลต์ที่ห่อหุ้มของเหลวไอออนิกและการขึ้นรูปเป็นอุปกรณ์ในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

1.4.4 บทความตีพิมพ์

งานตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติที่มีรายชื่อในฐานข้อมูล ISI 1 เรื่อง



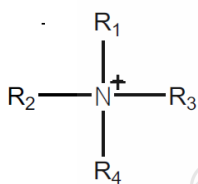
บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

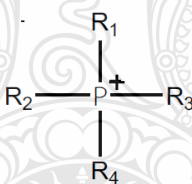
2.1 ของเหลวไอออนิก (Ionic Liquids, IL)

ของเหลวไอออนิก คือ สารประกอบไอออนิก (เกลือ) ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส [14] และมีชื่อเรียกอื่น ๆ เช่น molten salt, liquid organic salt, fused salt, Task Specific Ionic Liquid (TSIL), liquid organic salt และ neoteric solvent ionic liquid. ตามปกติสารประกอบไอออนิกประกอบด้วยอะตอมของไอออนบวกและไอออนลบที่ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไอออนิก ส่วนของเหลวไอออนิกประกอบด้วยไอออนบวกอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่ไม่สมมาตร (bulky asymmetric organic cation) และไอออนลบอินทรีย์หรืออนินทรีย์ยึดกันด้วยแรงคูลอมบ์ (Coulomb interaction) และในกรณีที่สารประกอบไอออนิกหนึ่งๆ หลอมเหลวได้ที่อุณหภูมิห้องจะเรียกว่า room temperature molten salt, ambient temperature molten salt/ionic liquid หรือ Room Temperature Ionic Liquid (RTIL)

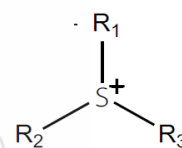
ไอออนบวก (Cations)



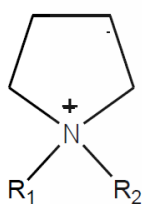
Ammonium



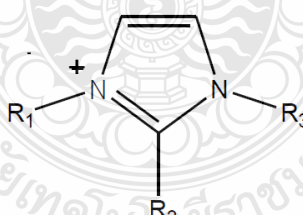
Phosphonium



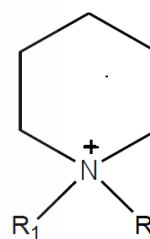
Sulfonium



Pyrrolidinium



Imidazolium

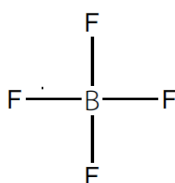
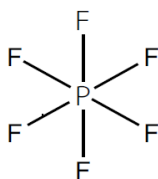
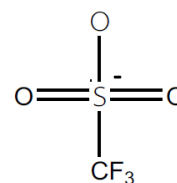


Piperidinium

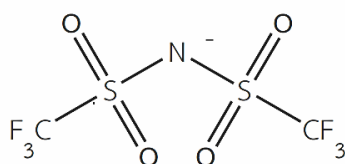
R1, R2, R3 และ R4 = Alkyl or Alkoxy groups or H

รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างไอออนบวกของของเหลวไอออนิก

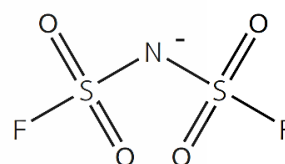
ไอออนลบ (Anions)

Tetrafluoroborate, BF_4^- Hexafluorophosphate, PF_6^- 

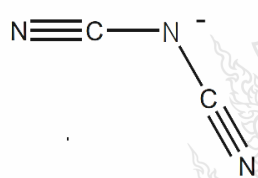
Trifluoromethane sulfonate, Tf



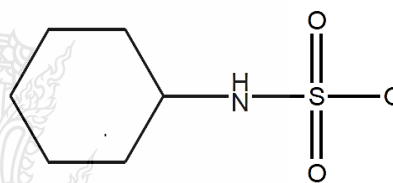
Bis (Trifluoromethane sulfonyl) imide, TFSI



Bis (Fluorosulfonyl) imide, FSI



Dicyanamide, DC



Cyclamate, CYC

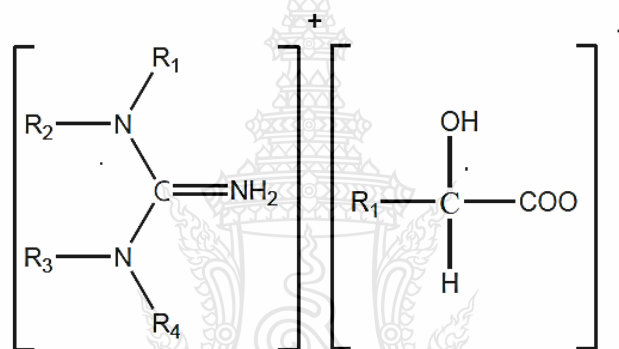
รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างไอออนลบของของเหลวไอออนิก

โดยมีคุณสมบัติเด่นดังนี้

- ระเหยยาก ความดันไอต่ำ ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
- ติดไฟยาก และทนต่อความร้อนได้มากกว่า 350 องศาเซลเซียส
- จุดหลอมเหลวต่ำ กว่า 100 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของไอออนในกรณีที่ใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์
- มีช่วงสถานะเป็นของเหลวกว้าง
- มีความหนืดและความหนาแน่นสูงกว่าตัวทำละลายทั่วไปอาจเป็นประโยชน์ในการแยกสารหรือปฏิกิริยาที่มีความแตกต่างของเฟสตัวทำละลาย
- เป็นตัวทำละลายที่ดีและมีช่วงการทำงานที่ค่อนข้างกว้าง คือ สามารถละลายได้ทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ (ขึ้นอยู่กับชนิดของของเหลวไอออนิก)
- มีความสามารถในการซอลเวชัน (solvation)

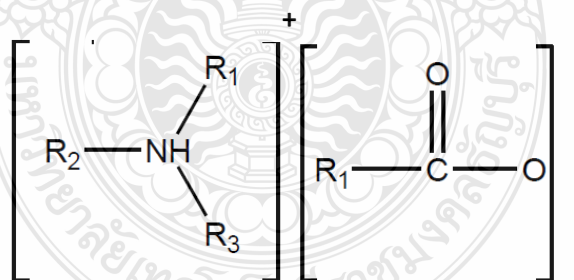
- สามารถออกแบบสมบัติจากโครงสร้างได้หลากหลาย (designability) เช่น ความสามารถในการละลายในน้ำหรือตัวทำละลายอินทรีย์ขึ้นอยู่กับความยาวของโซ่ข้าง (sidechain) บนไอออนบวกและชนิดของไอออนลบ หรือเพิ่มความสามารถหรือหน้าที่เฉพาะในความเป็นกรด-เบส หรือลิแกนด์ลงในโครงสร้างได้

- มีช่วงเสถียรภาพทางไฟฟ้าเคมีที่กว้าง (wide electrochemical potential window) จากนั้นการพัฒนาของเหลวไอออนิกจึงดำเนินเรื่อยมาจนสามารถแบ่งของเหลวไอออนิกออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้กลุ่มกัวนิดีนีน (Guanidinium based Ionic liquids), กลุ่มไฮดรอกซิลแอมโมเนียม (Hydroxyl ammonium based Ionic liquids), กลุ่มอิมิดาโซล (Imidazolium based Ionic liquids) และกลุ่มควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (Quaternary ammonium based Ionic liquids) [15-16]



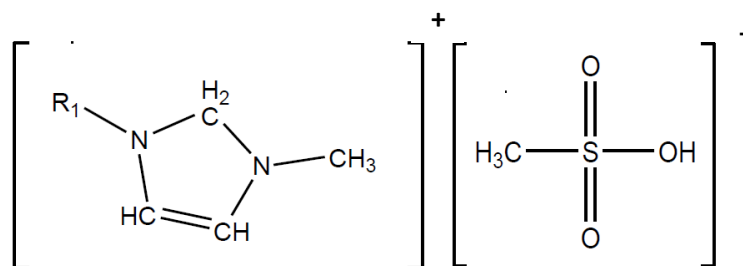
รูปที่ 2.3 โครงสร้างกัวนิดีนีนของของเหลวไอออนิก

R1, R2, R3 และ R4 = Alkyl หรือ Alkoxy groups หรือ H



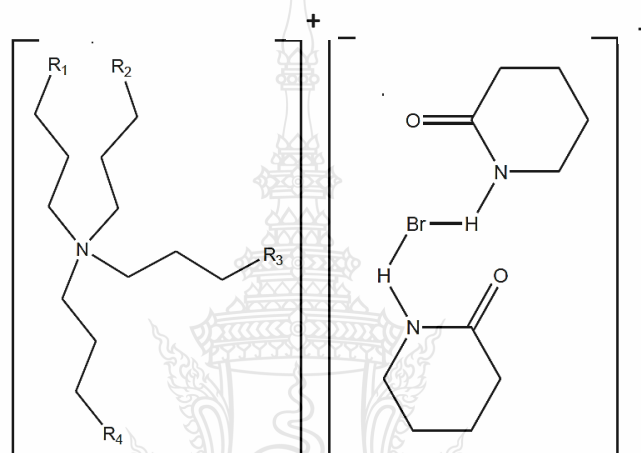
รูปที่ 2.4 โครงสร้างไฮดรอกซิลแอมโมเนียมของของเหลวไอออนิก

R1, R2 และ R3 = Alkyl หรือ Alkoxy groups หรือ H



รูปที่ 2.5 โครงสร้างอิมิดาโซลของของเหลวไอออนิก

R₁ = Alkyl หรือ Alkoxy groups หรือ H



รูปที่ 2.6 โครงสร้างควอเทอร์นารีแอมโมเนียมของของเหลวไอออนิก

R₁, R₂, R₃ และ R₄ = Alkyl หรือ Alkoxy groups หรือ H

2.2 ตัวอย่างการนำของเหลวไอออนิกไปใช้ในด้านต่าง ๆ

2.2.1 กระบวนการทางเคมี (Chemical Processes)

ใช้เป็นตัวทำละลายในปฏิกิริยาสังเคราะห์สารอินทรีย์ เช่น Diels-Alder, Heck reaction, esterification, isomerization reaction และ coupling reaction

2.2.2 อุปกรณ์ทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Device)

ใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) สำหรับตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบตเตอรี่ลิเทียม เซลล์เชื้อเพลิง และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (dye-sensitized solar cell) ในกรณีที่ใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมนั้นของเหลวไอออนิกจะแสดงสมบัติที่ดีกว่าสารประกอบคาร์บอนेटซึ่งเป็นสารอิเล็กโทรไลต์แบบเดิม เนื่องจากของเหลวไอออนิกมีความเสถียรต่อปฏิกิริยาให้และรับอิเล็กตรอนที่ดีกว่าสังเกตได้จาก electrochemical window ซึ่งบ่งชี้ถึงช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สามารถใช้งานได้โดยไม่เสียสภาพทางเคมีไม่ติดไฟ มีความดันไอต่ำทนต่อความร้อนได้ดีกว่ามีจุดเดือดสูงและสามารถละลายเกลือลิเทียมได้ดีนอกจากนี้ของเหลวไอออนิกระเหยยากจึงช่วย

ลดปัญหาสารอิเล็กทรอนิกส์แห้งระหว่างใช้งานแต่ความหนืดที่มากอาจส่งผลกระทบต่อค่าการนำไฟฟ้าของลิเทียมไอออน [17]

2.2.3 เทคโนโลยีการสกัดสาร (Extraction Technology)

ใช้สกัดแยกโลหะไอออนสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ หรือสารชีวโมเลกุล เช่น การสกัดแยกไซโทโครมซี (cytochrome C) ออกจากฮีโมโพรตีนที่ละลายอยู่ในชั้นน้ำ (aqueous phase) โดยใช้คราวน์อีเทอร์ (crown ether) เพื่อทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนขนาดใหญ่ (crown ether + cytochrome C) ที่สามารถละลายในชั้นของของเหลวไอออนิก

2.3 ทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่น (Density Functional Theory, DFT)

การคำนวณโดยใช้พื้นฐานความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของอะตอมและโมเลกุลใช้ในการคำนวณหาค่าตอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ใช้อธิบายสมบัติต่างๆ ของโลหะ สารกึ่งตัวนำและฉนวนยังสามารถนำไปใช้คำนวณหาสมบัติต่างๆ ของโปรตีน และวัสดุนาโน ทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่นเป็นหนึ่งในกระบวนการแบบแอบอินิซิอ (ab - initio method) โดยจะเริ่มจากกฎเกณฑ์หรือทฤษฎีพื้นฐานในระบบอนุภาคและใช้การประมาณเพื่อทำนายสมบัติของสารทั้งก้อน โดยไม่ได้พึ่งพาหรือนำผลการทดลองมาใช้ในการคำนวณ

Density functional Theory จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ

- Kohn-Sham Formalism ใช้หาคุณสมบัติของอิเล็กตรอนเดี่ยวตัวเดียว เช่น พลังงานจลน์ พลังงานศักย์จากนิวเคลียสของอะตอม เป็นต้น

- Exchange Energy ใช้อธิบายถึงอิเล็กตรอนสองตัวที่มีลักษณะเหมือนกันมี spin ที่เหมือนกัน เมื่ออยู่ใกล้กันจะทำอันตรกิริยาต่อกัน เช่น Dirac Exchange

- Correlation Energy ใช้อธิบายพลังงานของอิเล็กตรอนสองตัวที่ spin ต่างกันมีอันตรกิริยาหรือการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์ต่อกัน

ซึ่งทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่นเหมาะสมสำหรับการหาค่าตอบโดยวิธีการคำนวณด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ในการคำนวณหาอิเล็กตรอนของอะตอมและโมเลกุล โดยที่กระบวนการดังกล่าวไม่จำเป็นต้องพึ่งพาหรือนำผลการทดลองมาคำนวณแต่อย่างใด ซึ่งสามารถทำนายสมบัติของสารก้อนใหญ่ได้เป็นกระบวนการที่ประสบความสำเร็จในระดับหนึ่งในการนำทฤษฎีในระดับอนุภาคมาทำนาย แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่ในการอธิบายระบบโดยใช้ฟังก์ชันคลื่นจะมีปัญหาสำคัญคือ ฟังก์ชันคลื่นเป็นฟังก์ชันซึ่งขึ้นกับตำแหน่งของอิเล็กตรอนทุกตัวในระบบ $\Psi (X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2, \dots, X_n, Y_n, Z_n)$ ในการแก้สมการจะได้ลำบากเนื่องจากมีตัวแปรเป็นจำนวนมาก

2.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมของการดูดซับ อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุลกับจำนวนของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ที่มีการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ

2.4.1 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ในปี ค.ศ. 1916 แลงเมียร์ (Lrving Langmuir) ให้เสนอไอโซเทอมแบบง่ายสุดโดยมีสมมติฐานคือ

- ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption)
- โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน
- ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุก ๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ
- โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้

สมการแลงเมียร์เป็นสมการง่ายๆ แบบจำลองเป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงที่กว้าง ในขณะที่สมการของแลงเมียร์มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อน ๆ ที่สามารถผันกลับได้และใช้ได้ในการที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังนี้

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{(1 + b C_e)} \quad (2.1)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่สภาวะสมดุล หรือเรียกว่าค่าการดูดซับที่สมดุล

q_m คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (mg/g) ที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (Monolayer)

b คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของแรงการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L/mg)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

สมการที่ 2.2 จัดรูปให้เป็นสมการเส้นตรง คือ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad (2.2)$$

จากสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ (สมการ 3.3) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ค่า q_m และ b หาได้จากความชัน (Slop) และจุดตัดแกน (Intercept) สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ยังอาจแสดงได้ด้วยปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (Separation factor or equilibrium parameter, R_L) ดังสมการ

$$R_L = \frac{1}{1 + b C_0} \quad (2.3)$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (mg/L) โดยค่า R_L จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอมว่าสอดคล้องกับการดูดซับหรือไม่ ถ้า $R_L > 1$ การดูดซับไม่ดี (Unfavorable), $R_L = 1$ การดูดซับเป็นเส้นตรง (Linear), $0 < R_L < 1$ การดูดซับดี (Favorable) และ $R_L = 0$ การดูดซับเกิดผันกลับได้ (Irreversible)

2.4.2 ไอโซเทอมแบบ Freundlich (Freundlich Isotherm)

สมการของ Freundlich มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (พื้นผิวของการดูดซับมีลักษณะขรุขระ) พื้นผิวและพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ไอโซเทอมแบบ Freundlich เป็นไอโซเทอมที่พัฒนาจากไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าไม่เป็นเนื้อเดียว (Heterogeneous) โดยการดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer)

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2.4)$$

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad (2.5)$$

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)
 q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่สภาวะสมดุล
 K_F คือ ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)
 n คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $\log K_F$ จากสมการการดูดซับแบบ Freundlich ความสามารถในการดูดซับพิจารณาจากความชันของกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ โดยถ้าเส้นกราฟที่ได้มีค่าความชันต่ำ ค่า $1/n$ อธิบายถึงไอโซเทอมของการดูดซับ ถ้าเท่ากับ 1 ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง แต่ค่ามากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ [18]

2.5 ซีโอไลต์ (Zeolites)

ซีโอไลต์เป็นกลุ่มของแร่ที่เรียกว่า ไฮเดรตอะลูมิเนียมซิลิเกต (hydrated aluminosilicates) คำว่าซีโอไลต์ มาจากภาษากรีก “ซีโอ (zeo)” แปลว่า “เดือด” และ “ลิธอส (lithos)” แปลว่า “หิน” เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนซีโอไลต์จะปลดปล่อยน้ำออกมาและซีโอไลต์สามารถดูดซับน้ำกลับคืนได้ง่าย กล่าวคือเป็นกระบวนการผันกลับได้ ซีโอไลต์พบได้ทั้ง ในธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ซึ่งซีโอไลต์ที่ได้จากสังเคราะห์จะสามารถควบคุมขนาดและโครงสร้างที่ต้องการได้โดยอาศัยการควบคุมกระบวนการสังเคราะห์ นอกจากนี้จะพบซีโอไลต์ในรูปของโครงสร้างผลึกอะลูมิเนียมซิลิเกตแล้วยังพบได้ในรูปอื่น ๆ เช่น โครงสร้างอะลูมิเนียมฟอสเฟต (aluminophosphates) หรือเมทัลโลซิลิเกต (metallo-silicates) เป็นต้น ซึ่งซีโอไลต์แต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกันตามลักษณะทางโครงสร้างส่งผลให้ซีโอไลต์ได้รับความสนใจและนำมาใช้ประโยชน์อย่างหลากหลายในปัจจุบัน

2.5.1 องค์ประกอบของซีโอไลต์ (Zeolite Compositions)

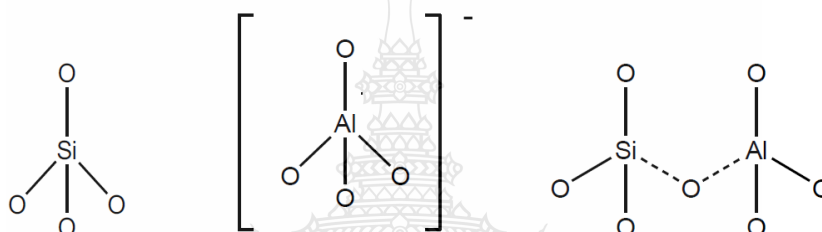
สูตรทั่วไปของโครงสร้างซีโอไลต์ คือ $M_x/n(AlO_2)_x(SiO_2)_y$

เมื่อ n คือ ประจุของไอออนบวก M

$x+y$ คือ จำนวนหน่วยเตตระฮีดรอลต่อ หน่วยเซลล์

y/x คือ อัตราส่วน Si/Al แปรผันได้จาก 1 ถึง ∞

ประกอบด้วยโครงสร้างหน่วยปฐมภูมิเตตระฮีดรอล (tetrahedral structure) ของ TO_4 เมื่อ TO_4 แทน SiO_4 และ/หรือ AlO_4^{4-} เชื่อมกันด้วยอะตอมออกซิเจนเขียนแทนด้วย T-O-T เมื่อหน่วย TO_4 หลายหน่วยจัดเรียงตัวกันซ้ำ ๆ จะก่อตัวเป็นผลึกพอลิเมอร์ (polymeric crystalline) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 กระบวนการก่อตัวของ โครงสร้างจะเริ่มจาก TO_4 ก่อตัวเป็นหน่วยย่อย (subunit) และขยายโครงสร้างใหญ่ขึ้นเป็นแลตทิซ (lattice) ที่เป็นหน่วยซ้ำของหน่วยที่เล็กที่สุดหรือเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) ได้เป็นผลึกที่สมบูรณ์ที่มีโครงสร้างเป็นสองมิติหรือสามมิติ



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างปฐมภูมิ TO_4 (SiO_4 และ AlO_4^{4-}) และ T-O-T

2.5.2 โครงสร้างรูพรุนของซีโอไลต์ (Pore Structure)

การประยุกต์ซีโอไลต์กับกระบวนการดูดซับหรือการเร่งปฏิกิริยา ต้องอาศัยหลักการแพร่ของโมเลกุลสารผ่านรูพรุนซีโอไลต์ ซึ่งขนาดรูพรุนของซีโอไลต์จะหาได้จากการพิจารณาโพรงเปิด (aperture) ที่เกิดจากการเชื่อมต่อของโครงสร้างเตตระฮีดรอล TO_4 โดยขนาดโพรงเปิดที่เล็กที่สุดที่สารสามารถแพร่ผ่านได้ต้องประกอบด้วย T 8 หน่วย (8T) หรือเรียกว่า 8-membered ring (8MR) โดยโครงสร้างซีโอไลต์สามารถจำแนกตามขนาดรูพรุน ได้เป็น 3 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การจำแนกชนิดของซีโอไลต์ตามขนาดรูพรุน (Guisnet and Gilson, 2002)

Small pore zeolites	Middle pore zeolites	Large pore zeolites
8-membered ring	10-membered ring	12-membered ring
3.0-4.5 Å	4.5-6.0 Å	6.0-8.0 Å
Zeolite A	Zeolite ZSM-5	Zeolite L
Erionite	ZSM-11	Faujasite (X, Y)
Chabazite	Ferriete	Mordenite
Gismonite	Stibite	ZSM-12
Phillipsite	ZSM-23	Zeolite Beta

2.5.3 ตำแหน่งกัมมันต์ของซีโอไลต์ (active site)

องค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับขั้นตอนการสังเคราะห์และการผ่านกรรมวิธีบำบัด (treatment) หลังการสังเคราะห์รวมถึงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในรูพรุนของซีโอไลต์ก็สามารถทำได้ ซึ่งเหล่านี้ทำให้ซีโอไลต์มีตำแหน่งกัมมันต์ที่แสดงสมบัติเป็นได้ทั้งกรด-เบส ริดอกซ์หรือไบฟังก์ชัน (bifunction) ซึ่งส่วนใหญ่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะอยู่ในรูพรุนหรือไบฟังก์ชัน

2.5.4 คุณสมบัติของซีโอไลต์

- มีโครงสร้างผลึกและสามารถกำหนดขนาด ผลึกได้
- สามารถกำหนดขนาดของรูพรุนและรูปร่างทางเรขาคณิตได้
- มีสมบัติจำเพาะต่อรูปร่างโมเลกุล (shape selectivity)
- มีสมบัติความแข็งแรงและสามารถปรับค่าความแข็งแรงของกรดได้
- มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง
- โครงสร้างของซีโอไลต์สามารถปรับปรุงได้หลังจากการสังเคราะห์

2.5.5 การสังเคราะห์ซีโอไลต์

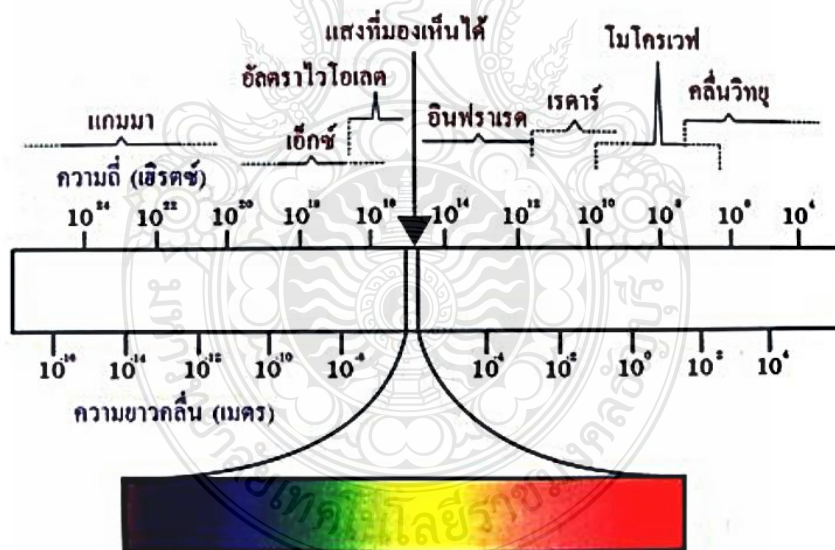
ปัจจุบันการสังเคราะห์ซีโอไลต์มีหลายวิธีการ เช่น การใช้ Microwave ในการให้ความร้อน การใช้สารละลายที่มีฟลูออไรด์การสังเคราะห์โดยไม่ใช้น้ำ เป็นต้น การสังเคราะห์แบบดั้งเดิมใช้สารละลายเบสเป็นตัวกลางสังเคราะห์เลียนแบบซีโอไลต์ที่พบในธรรมชาตินำไปสู่การสังเคราะห์ซีโอไลต์ใหม่ๆ ที่มีชนิดโครงสร้างและอัตราส่วนธาตุต่าง ๆ ตามที่ต้องการกระบวนการก่อผลึกจะเกิดในระบบปิด (Autogeneous Pressure) ผ่านการเป็นเจลของสารประกอบภายใต้สมดุลการเป็นสารละลายและเจล เรียกว่า กระบวนการโซล-เจล (Sol-Gel Process) [19 -22]

2.5.6 ทฤษฎีการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความถี่คลื่นอยู่ระหว่าง 300 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) - 300 จิกะเฮิร์ตซ์ (GHz) และความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 1 มิลลิเมตร - 1 เมตร ดังที่แสดงในรูปภาพ 2.8 ความถี่คลื่นที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปคือ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 2.45 จิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งใช้กับเตาไมโครเวฟอุ่นอาหารในครัวเรือนโดยทั่วไปและยังมีความถี่ 5.8 จิกะเฮิร์ตซ์ และ 24.124 จิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งใช้กับงานเฉพาะทางวิทยาศาสตร์และทางการแพทย์อื่น ๆ

กลไกในการเกิดความร้อนภายใต้คลื่นไมโครเวฟเกิดจากการที่วัสดุร้อนขึ้นได้ภายใต้ คลื่นไมโครเวฟนั้น เกิดขึ้นจากกลไก 2 ประการ คือ กระบวนการโพลาไรเซชัน (Polarization process) หรือเกิดจากการนำไฟฟ้าของวัสดุ (Conduction process) กระบวนการโพลาไรเซชันนั้นจะเกี่ยวข้องกับการจัดเรียงตัวประจุใหม่ การสั้นหรือการหมุนของไดโพลภายใต้สนามไฟฟ้าหรือแม่เหล็กซึ่งถือเป็นการเคลื่อนที่ของประจุในระยะสั้น (Short - range displacement) เมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของประจุซึ่งเกิดจากกระบวนการราไฟฟ้า

คลื่นไมโครเวฟจะถูกดูดกลืนและนำไปเหนี่ยวนำเข้ามาในเนื้อวัสดุให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นภายในและสนามไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุต่าง ๆ หรือเกิดกระบวนการโพลาไรเซชันขึ้นภายในวัสดุนั้น แรงต้านทานการเคลื่อนที่ซึ่งรวมไปถึงแรงเฉื่อย, แรงยึดหยุ่น และแรงเสียดทานจากการชนกันของประจุต่าง ๆ เหล่านี้เอง ทำให้เกิดเป็นความร้อนในที่สุดหรือที่เรียกกันว่า Losses ในเนื้อวัสดุ ซึ่งจะเป็นความร้อนที่เกิดขึ้นทั่วทั้งวัสดุ (Volumetric heating) หลังการเกิดความร้อนนี้สามารถอธิบายว่าน้ำภายใต้เตาไมโครเวฟร้อนได้ เนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่ไม่เป็นกลางทางไฟฟ้ากลับตัวไปตามความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ (2.45 จิกะเฮิรตซ์) เป็นจำนวน 2,450 ล้านรอบต่อวินาที ซึ่งในหนึ่งรอบคลื่นจะประกอบด้วยคลื่นช่วงบวกและคลื่นช่วงลบของโมเลกุลไปทางขั้วบวกของสนามไฟฟ้าอีก 2,450 ล้านครั้งต่อวินาที รวมแล้วโมเลกุลต้องกลับขั้วถึง 4,900 ล้านครั้งต่อวินาที ทำให้เกิดการชนเสียดสีเกิดเป็นความร้อนทำให้อุณหภูมิน้ำสูงขึ้นในที่สุด นอกจากนี้การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟยังช่วยลดระยะเวลาในการสังเคราะห์เพิ่มอัตราการเร่งปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นและลดการใช้พลังงานอีกด้วย ดังนั้นจึงทำให้การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งความร้อนในการสังเคราะห์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการให้ความร้อนแบบทั่วไป พบว่าเป็นการให้ความร้อนจากภายนอกวัตถุและแพร่เข้าสู่ภายในวัตถุ ซึ่งส่งผลให้เนื้อวัสดุได้รับความร้อนที่ไม่ทั่วถึงเกิดปฏิกิริยาได้ไม่ดีใช้ระยะเวลานานในสังเคราะห์และสิ้นเปลืองพลังงานเป็นอย่างมาก [23-25]



รูปที่ 2.8 ความถี่คลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา : http://www.oocities.org/nawo_chemicalsandbeauty/what_is_UV_ray.htm

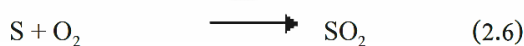
2.5.7 การเคลือบฝัง (Impregnation method)

วิธีการเคลือบฝัง (Impregnation method) เป็นวิธีในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ทั่วไป เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายไม่มีขั้นตอนกระบวนการที่ซับซ้อนแต่จะมีข้อกำหนดในการเตรียม

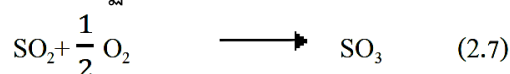
การเคลือบฝัง คือ ความสามารถในการละลาย (Solubility) ของโลหะตั้งต้นกับน้ำหรือตัวทำละลายอื่นๆ นอกจากนั้นแล้วตัวรองรับต้องมีลักษณะเปียก ถ้ากรณีที่ตัวรองรับไม่มีคุณสมบัติเปียก ระบบนั้นต้องดำเนินการภายใต้สุญญากาศหรือเปลี่ยนชนิดของตัวทำละลายที่มีคุณสมบัติเปียกกับตัวรองรับที่นำมาใช้งานโดยทั่วไปโลหะที่เติมลงบนตัวรองรับต้องมีปริมาณอยู่ในช่วงร้อยละ 20-40 ของตัวรองรับผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ต้องผ่านการอบแห้งและแคลซิเนชัน เพื่อกำจัดสารปนเปื้อนในตัวเร่งปฏิกิริยาและเป็นการเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของตัวเร่งปฏิกิริยา การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเคลือบฝังตัว สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ การเคลือบฝังตัวแบบเปียก (Wetness impregnation method) วิธีนี้ทำได้โดยการเติมตัวรองรับลงในสารละลายของเกลือโลหะที่มีปริมาณมากเกินพอ ด้วยกระบวนการระเหยตัวทำละลาย ดังนั้น ปริมาณของเกลือโลหะที่เกาะบนตัวรองรับ จะมีค่าเท่ากับ ปริมาณเกลือ โลหะที่อยู่ในสารละลายเริ่มต้นของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและวิธีการเคลือบฝังตัวชนิดแห้ง (Dry impregnation method) วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้ในทางอุตสาหกรรม เริ่มต้นโดยทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยากระจายตัวบนตัวรองรับ โดยหยดสารละลายที่มีความเข้มข้นเหมาะสม โดยปริมาตรของสารละลายที่ใช้ต้องมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของรูพรุนทั้งหมดของตัวรองรับหรือน้อยกว่าเล็กน้อย ข้อดีของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาวิธีนี้ คือ โลหะที่ต้องการเติมลงไปในตัวรองรับ ที่มีอยู่ในสารละลายที่ใช้เคลือบฝังสามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวรองรับได้เกือบทั้งหมดมีตกค้างอยู่บนผิวภาชนะที่ใช้ในการเคลือบฝังน้อยซึ่งเหมาะแก่การเติมโลหะที่มีราคาสูง (เช่น Pt Pd และAg เป็นต้น) การเตรียมวิธีนี้มีอาจเกิดปัญหาขึ้น เนื่องจากปริมาตรรูพรุนของตัวรองรับนั้นต่ำไป ซึ่งจะทำให้ปริมาตรตัวทำละลายนั้นต่ำไปด้วยและเกลือของโลหะที่ต้องการเติมนั้นละลายในตัวทำละลายได้น้อยทำให้ไม่สามารถละลายเกลือของโลหะที่ต้องการในการละลายเพียงครั้งเดียวจึงต้องทำการเคลือบฝังหลายครั้งโดยค่อยๆ ละลายเกลือโลหะทีละน้อย ๆ ในตัวทำละลายที่มีปริมาตรเท่ากับรูพรุน จากนั้นจึงนำสารละลายนั้นไปทำการเคลือบฝังอบตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการเคลือบฝังแล้วให้แห้งและทำการเคลือบฝัง-อบแห้งซ้ำอีกเพื่อให้สามารถเติมโลหะได้ในปริมาณที่ต้องการ [26]

2.6 ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide)

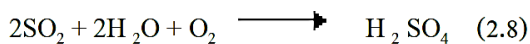
เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่ติดไฟ มีกลิ่นแสบจมูก ละลายได้ดีในน้ำโดยจะเปลี่ยนเป็นกรดซัลฟูริก ในธรรมชาติทั่วไปจะมีปริมาณน้อยในบรรยากาศคือ 0.02 - 0.1 ppm. แต่ถ้าพบในปริมาณสูงแล้วส่วนมากจะเกิดจากการเผาไหม้ โดยใช้เชื้อเพลิงหรือวัสดุที่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบปฏิกิริยาการเกิดกซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂)



ถ้า SO₂ ทำปฏิกิริยากับ O₂ ในอากาศจะได้ SO₃ ยิ่งถ้าในบรรยากาศมีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น แมงกานีส เหล็กหรือกลุ่ม metallic oxide จะทำให้ปฏิกิริยาเร็วขึ้น



ถ้าในบรรยากาศมีละอองน้ำหรือความชื้นสูง SO₂ จะเกิดการรวมตัวเป็นฝนกรด (acid rain) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ, ป่าไม้, แหล่งน้ำ, สิ่งมีชีวิตและมีฤทธิ์กัดกร่อนอาคาร

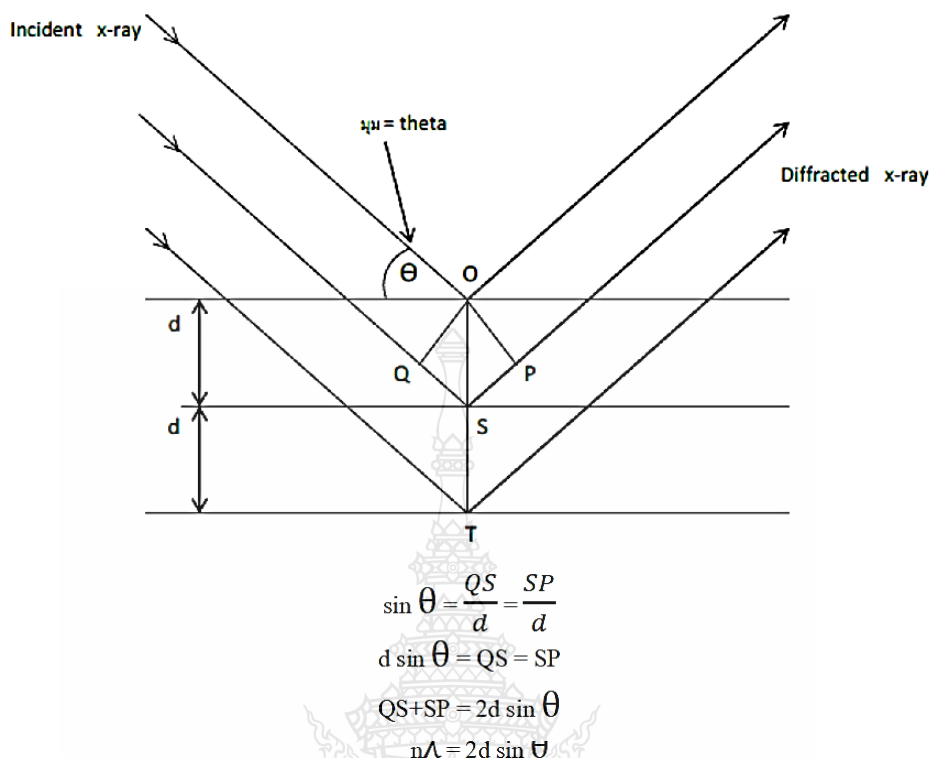


ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นก๊าซที่สามารถเกิดจากเครื่องจักรเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมันเตา, น้ำมันดีเซล และถ่านหิน ซึ่งมีกำมะถันหรือซัลเฟอร์ผสมอยู่ นอกจากนี้อาจเกิดจากกระบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมได้อีกด้วย ในธรรมชาติก๊าซนี้อาจเกิดในปริมาณได้เนื่องมาจากภูเขาไฟระเบิดทั่วโลกประมาณกันว่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์ราวร้อยละ 60 เกิดจากการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง แม้จะมีวิธีใหม่ที่ทำให้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงบริสุทธิ์แต่ถ่านหินก็ยังมีกำมะถันปะปนอยู่มาก มีผลกระทบต่อสุขภาพ เมื่อสูดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เข้าไปหลอดลมส่วนบนจะดูดซึมก๊าซนี้กระจายสู่เลือดทั่วร่างกาย ถ้าหากก๊าซนี้มีในระดับสูงอาจมีอาการซีพจรเต้นถี่หายใจเข้าออกน้อยลง นอกจากนี้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มักกระจายมาพร้อมกับฝุ่นพิษ เมื่อรวมกันทำให้เกิดอาการระคายคอแสบตา กระทั่งแน่นหน้าอก ผู้ที่เคยถูกควันดำของรถประจำทางหรือรถบรรทุกพ่นใส่ในระยะใกล้ติดต่อกันนาน ๆ อาจมีอาการทำนองนี้ได้ นอกจากนี้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เมื่อฟุ้งกระจายไปในบรรยากาศ มักจะเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) รวมกับน้ำกลายเป็นกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ถูกฝนชะลงมากลายเป็นฝนกรด

2.7 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer)

เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่าง ๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่า ในตัวอย่างนั้น ๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง

นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหาค่าขององค์ประกอบของตัวอย่างได้แล้วนั้นยังสามารถคำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell, ความเครียดของตัวอย่างและค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถทำการวิเคราะห์ห่องค์ประกอบของฟิล์มบางและคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย [27-28]



รูปที่ 2.9 การกำเนิดของรังสีเอ็กซ์

ที่มา : WILSON (1987), XRD, accessed May 10, 2014, available from
<http://www.vijairid.com/x-ray%20technic.htm>

โดยกำหนดให้ ดังนี้

λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

θ = มุมตกกระทบระหว่างรังสีเอ็กซ์กับระนาบในผลึก

d = ระยะห่างระหว่างระนาบในผลึก

n = ลำดับการเลี้ยวเบนโดยเป็นเลขจำนวนเต็ม

2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) เป็นเครื่องมือวิทยาศาสตร์ขั้นสูงที่มีความสำคัญต่อการวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันนิยม เรียกสั้นๆ ว่า SEM ถูกสร้างขึ้นครั้งแรกเมื่อปี ค .ศ. 1938 โดย Manfred Von Ardenne นักฟิสิกส์และนักประดิษฐ์ชาวเยอรมัน กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดทำงานโดยควบคุมให้ลำอิเล็กตรอนกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ต้องการศึกษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา เช่น ลักษณะรูปร่าง, ลวดลายบนพื้นผิวและขนาดของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้เป็นภาพสามมิติสามารถศึกษาได้ทั้งตัวอย่างทางชีวภาพและตัวอย่างทางด้านวัสดุศาสตร์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นกล้องจุลทรรศน์

ที่มีกำลังขยายสูง จึงมีบทบาทต่อการศึกษาและวิจัยด้านต่าง ๆ มากมาย เช่น ในงานด้านพฤกษศาสตร์, สัตวศาสตร์, จุลชีววิทยา, ใช้ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและการจัดจำแนกสิ่งมีชีวิต ด้านอุตสาหกรรมเกษตร ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอาหารและตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์และบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ประดิษฐ์คิดค้นขึ้น การศึกษาทางเคมี, ฟิสิกส์และวิศวกรรม เช่น การผลิตท่อนาโน, ซีเมนต์, ดินและการตรวจสอบอนุภาคต่าง ๆ ที่สังเคราะห์ขึ้น ด้านการแพทย์ การผลิตยารวมถึงการศึกษาความเปลี่ยนแปลงทางด้านปฐพีวิทยา เช่น ศึกษาความเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ต่าง ๆ ว่าในอดีตเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไรบ้าง อาทิเคยเป็นทะเลมาก่อนหรือ การศึกษาลักษณะของหินแร่ต่าง ๆ หรือศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของดินและหิน เช่น น้ำ และลม เป็นต้น การศึกษาฟอสซิลต่าง ๆ เพื่อบ่งชี้ถึงวิวัฒนาการการเปลี่ยนแปลงของโลกในยุคต่าง ๆ นอกจากนี้ ยังมีความสำคัญต่องานด้านนิติวิทยาศาสตร์และการตรวจสอบทางด้านศิลปะ เช่น การตรวจสอบสีหรือวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ในงานจิตรกรรมอีกด้วย จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเครื่องมือวิทยาศาสตร์ขั้นสูงที่ใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ มากมายจึงควรทำความเข้าใจถึงความแตกต่างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดซึ่งมีหลายชนิดอันจะก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อผู้วิจัยในการเลือกใช้งานได้ตรง ตามวัตถุประสงค์ในการศึกษารายละเอียดของตัวอย่างต่อไป ทั้งนี้สามารถแบ่งตามความแตกต่างของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนมีผลให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแต่ละชนิดมีสมรรถนะในการการศึกษารายละเอียดของตัวอย่างแตกต่างกันไป แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Source) หรือปืนยิงอิเล็กตรอน (Electron Gun) มี 3 ชนิดด้วยกัน

- Tungsten Hairpin Electron Gun ปลดปล่อยอิเล็กตรอนโดยใช้ความร้อน เรียกว่าเทอร์มิโอนิกเอมิชัน (thermionic emission) ภายในจะประกอบด้วยไส้หลอดทังสเตน (tungsten filament) ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นลวดทังสเตน (tungsten) ที่งอเป็นรูปตัววี (V) ต้องทำงานที่ความดันสุญญากาศสูง ประมาณ 10⁻⁴ ถึง 10⁻⁵ ทอร์ มีอายุการใช้งานประมาณ 30-100 ชั่วโมง

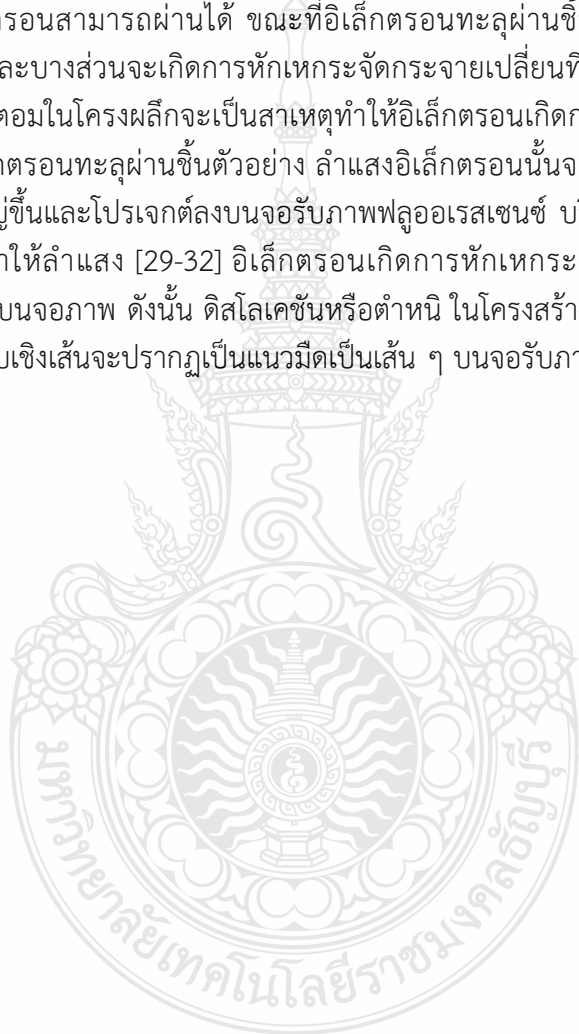
- Lanthanum hexaboride (LaB₆) Electron Gun ปลดปล่อยอิเล็กตรอนโดยใช้ความร้อนเช่นเดียวกัน ผลึกของ LaB₆ จะให้ความสว่างของอิเล็กตรอนสูงกว่าชนิดทังสเตนและมีอายุการใช้งานนานกว่า ต้องทำงานที่ความดันสุญญากาศสูงประมาณ 10⁻⁶ ถึง 10⁻⁷ ทอร์ บริเวณปลายของผลึกมีขนาดเล็กกว่าลวดทังสเตน จึงทำให้สามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้ดีกว่า

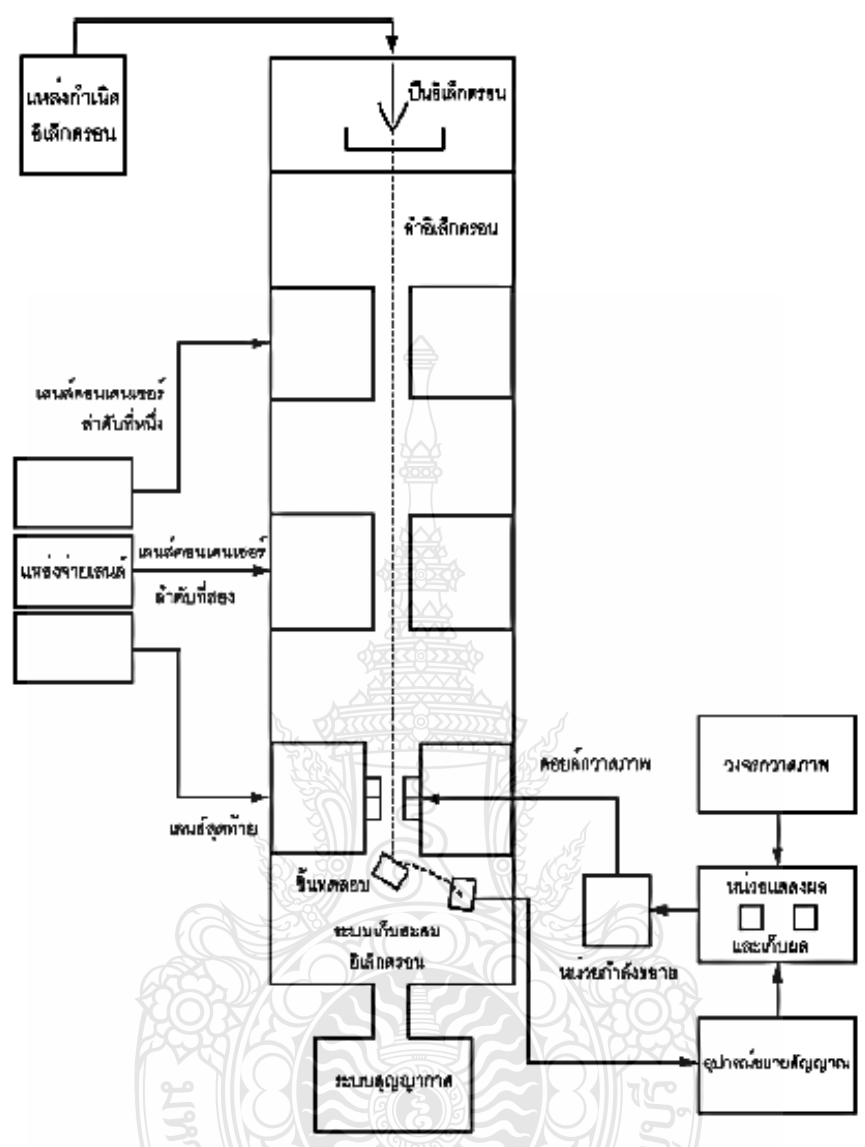
- Field Emission Gun ใช้สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนจากปลายโลหะแหลมให้หลุดออกมา ทำจากผลึกของทังสเตนมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่เกิดจากการดึงอิเล็กตรอนออกมาจากผลึกด้วยสนามไฟฟ้าตรงบริเวณปลายซึ่งมีรัศมีประมาณ 100 นาโนเมตรหรือน้อยกว่าทำงานที่ความดันสุญญากาศสูงประมาณ 10⁻⁹ ถึง 10⁻¹⁰ ทอร์ ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีผลให้สามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้สูงกว่า LaB₆ และทังสเตน [29-32]

2.9 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope)

จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope) หรือเรียกสั้นๆ ว่า TEM เป็นกล้องที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่มีกำลังขยายถึง 10,000 เท่า และวิเคราะห์

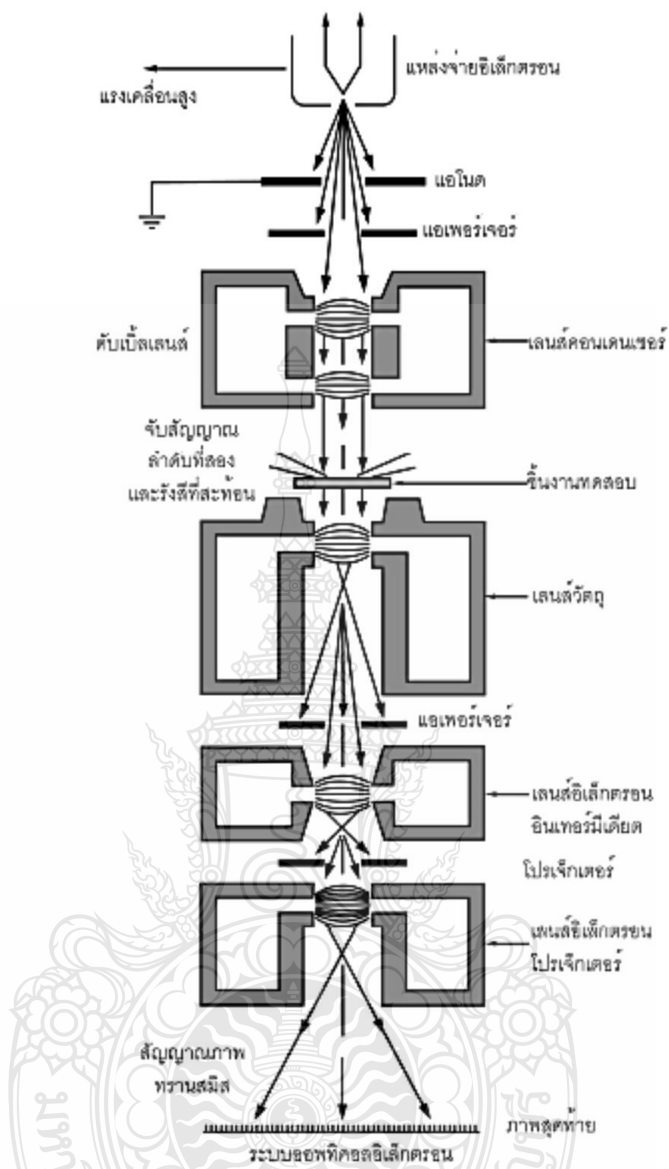
โครงสร้างผลึกและการจัดเรียงตัวของอะตอมในเนื้อวัสดุ TEM ใช้การยิงอิเล็กตรอนทะลุผ่านชิ้นงานบาง ๆ แล้วตรวจจับสัญญาณบนจอร์รับภาพหรือแผ่นฟิล์ม โดยมีหลักการทางานดังนี้ คือ ลำแสงอิเล็กตรอนถูกผลิตขึ้นจาก พิลาเมนต์ทั้งสแตนท์ที่อยู่ในส่วนบนของคอลัมน์สุญญากาศด้านบนด้วยความร้อนและลำแสงอิเล็กตรอนดังกล่าวจะถูกเร่งให้พุ่งลงสู่ด้านล่างด้วยความต่างศักย์ที่สูง ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 75 - 120 กิโลโวลต์ จากนั้นขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic coils) จะถูกใช้ในการควบคุมลำแสงอิเล็กตรอน จากนั้นลำแสงอิเล็กตรอนจะพุ่งผ่านชิ้นส่วนของโลหะที่บางมากโดยมีความหนาประมาณ 100 นาโนเมตรหรือน้อยกว่า ที่วางบนชิ้นวางตัวอย่าง ชิ้นงานตัวอย่างจะต้องมีความบางเพียงพอที่จะยอมให้อิเล็กตรอนสามารถผ่านได้ ขณะที่อิเล็กตรอนทะลุผ่านชิ้นงานตัวอย่าง อิเล็กตรอนบางส่วนจะถูกดูดซับและบางส่วนจะเกิดการหักเหกระจายเปลี่ยนทิศทางไปความแตกต่างของการจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างจะเป็นสาเหตุทำให้อิเล็กตรอนเกิดการหักเหกระจายขึ้นหลังจากที่ลำแสงอิเล็กตรอนทะลุผ่านชิ้นตัวอย่าง ลำแสงอิเล็กตรอนนั้นจะถูกรวบรวมด้วยเลนส์วัตถุ จากนั้นจะถูกทำให้ใหญ่ขึ้นและโปรเจกต์ลงบนจอร์รับภาพฟลูออเรสเซนต์ บริเวณในชิ้นตัวงานอย่างของโลหะที่มีแนวโน้มที่ทำให้ลำแสง [29-32] อิเล็กตรอนเกิดการหักเหกระจายออกไปมากจะสังเกตเห็นเป็นแนวมืดบนจอร์ภาพ ดังนั้น ดิสโลเคชันหรือตำหนิ ในโครงสร้างผลึกที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมที่ไม่เป็นระเบียบเชิงเส้นจะปรากฏเป็นแนวมืดเป็นเส้น ๆ บนจอร์รับภาพของเครื่อง TEM





รูปที่ 2.10 การทำงานของเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

ที่มา : http://www.ea.muti.ac.th/2009/news_files/Metallurgy

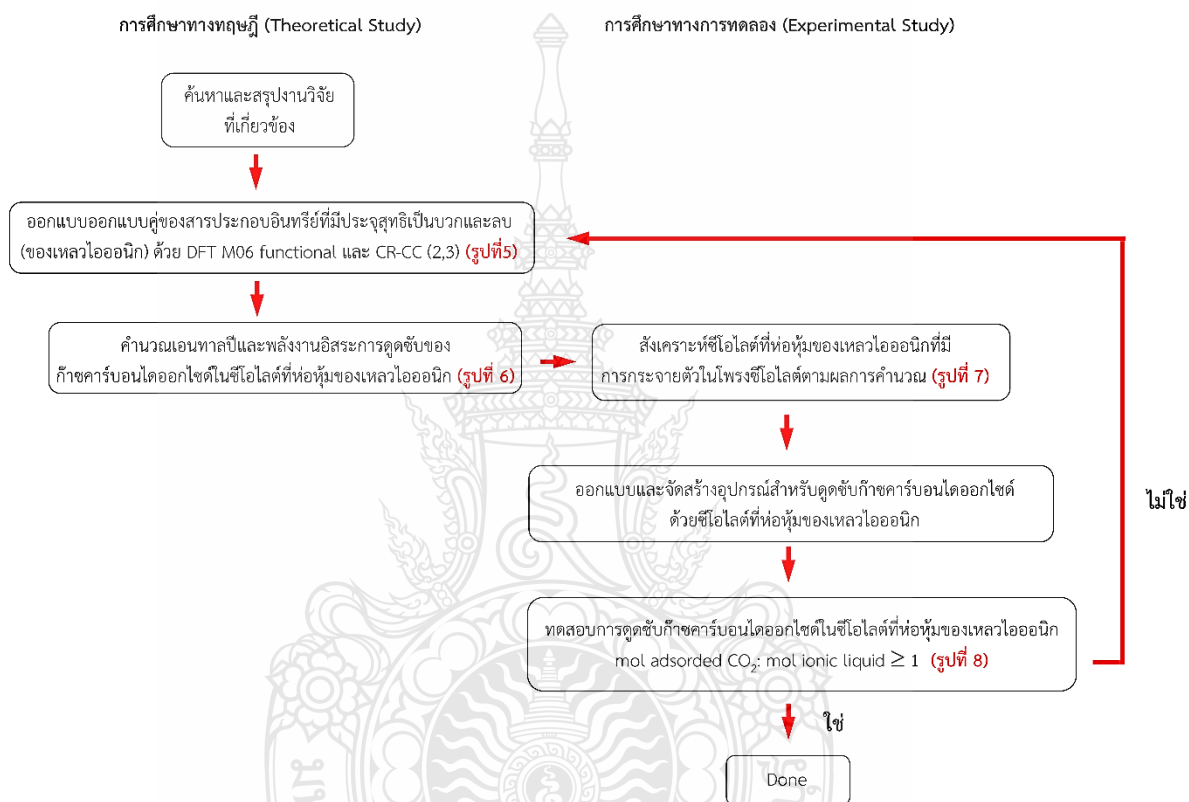


รูปที่ 2.11 การทำงานของเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope)
ที่มา : http://www.ea.rmuti.ac.th/2009/news_files/Metallurgy

บทที่ 3

การทดลอง

ในการศึกษาการพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบซีไอโอไลต์ที่ห่อหุ้มของเหลวไอออนิกเพื่อกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าถ่านหินและโรงงานอุตสาหกรรมนั้นจะมีขั้นตอนในการศึกษาดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนและระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ค้นหาและสรุปรงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

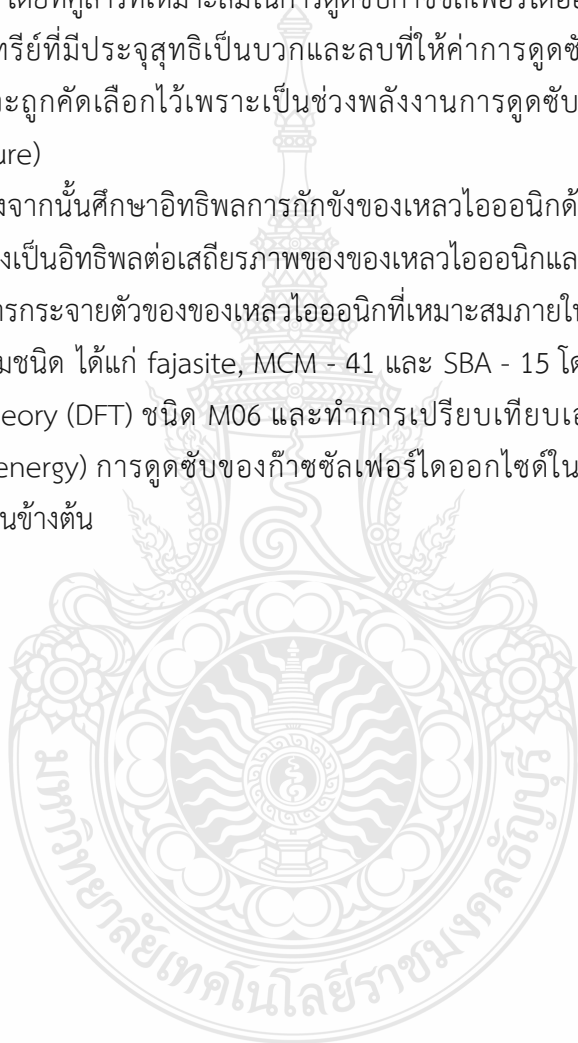
การออกแบบคู่ของสารประกอบอินทรีย์ที่มีประจุสุทธิเป็นบวกและลบ (ของเหลวไอออนิก) ทั้งในและนอกห้องปฏิบัติการและสืบค้นงานข้อมูลของงานวิจัยเพื่อใช้งานได้จริงจากฐานข้อมูลทางวิชาการ เช่น Ionic Liquids Database - ILThermo (v2.0) เป็นต้น

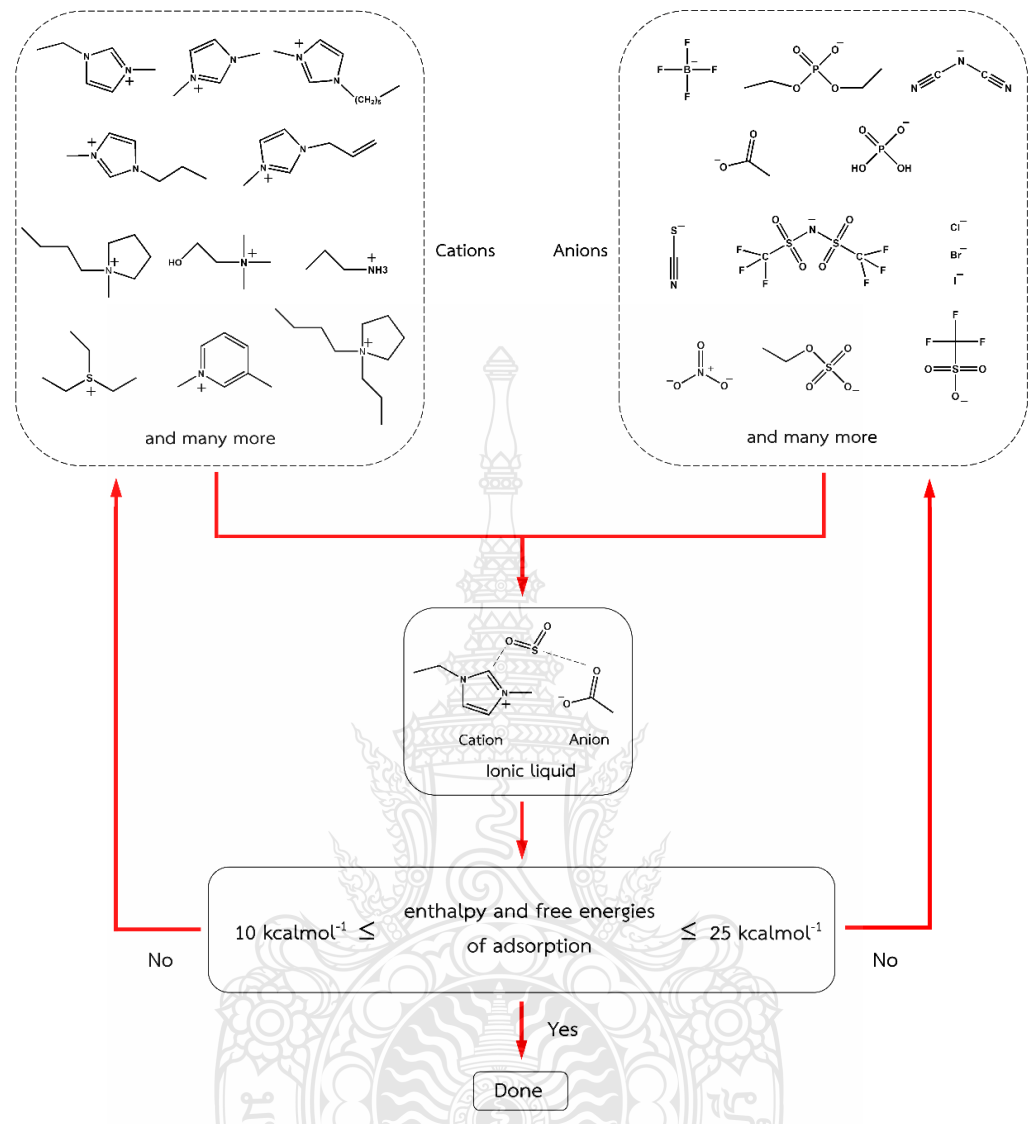
3.2 ออกแบบคู่ของสารประกอบอินทรีย์ที่มีประจุสุทธิเป็นบวกและลบ

ทำการศึกษาคู่สารที่เหมาะสมของของเหลวไอออนิกสำหรับในการดูดซับและคายออกของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

- เนื่องจากชนิดของของเหลวไอออนิกมีความแตกต่างกัน แล้วเมื่อทำการเปลี่ยนชนิดของสารประกอบอินทรีย์ที่มีประจุสุทธิเป็นบวกหรือลบของเหลวไอออนิกใหม่ จะส่งผลให้ค่าเอนทาลปี (enthalpy) และพลังงานอิสระ (free energy) ของการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก็จะเปลี่ยนแปลงตามตามไปด้วยออกไป โดยที่คู่สารที่เหมาะสมในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์บนของเหลวไอออนิกที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีประจุสุทธิเป็นบวกและลบที่ให้ค่าการดูดซับและการคายอยู่ระหว่าง $10 - 25 \text{ kcal mol}^{-1}$ จะถูกคัดเลือกไว้เพราะเป็นช่วงพลังงานการดูดซับที่สภาวะอุณหภูมิโดยรอบ (ambient temperature)

- หลังจากนั้นศึกษาอิทธิพลการกักขังของเหลวไอออนิกด้วยซีโอไลต์ (confinement effect of zeolites) ซึ่งเป็นอิทธิพลต่อเสถียรภาพของของเหลวไอออนิกและก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในซีโอไลต์เพื่อให้ทราบการกระจายตัวของของเหลวไอออนิกที่เหมาะสมภายในโพรงซีโอไลต์ที่มีขนาดของโพรงแตกต่างกันทั้งสามชนิด ได้แก่ fajasite, MCM - 41 และ SBA - 15 โดยใช้ระเบียบวิธีเคมีคำนวณ Density Fictional Theory (DFT) ชนิด M06 และทำการเปรียบเทียบเอนทาลปี (enthalpy) และพลังงานอิสระ (free energy) การดูดซับของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในซีโอไลต์ที่ห่อหุ้มของเหลวไอออนิกที่ได้จากขั้นตอนข้างต้น





รูปที่ 3.2 การออกแบบคู่อองสารประกอบอินทรีย์ที่มีประจุสุทธิเป็นบวกและลบ

3.3 สังเคราะห์ซีโอไลต์ที่ห่อหุ้มของเหลวไอออนิก

คัดกรองข้อมูล (screening) ด้วยระเบียบวิธีเคมีคำนวณ เพื่อทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่ห่อหุ้มสำหรับห่อหุ้มของเหลวไอออนิก โดยเลือกชนิดซีโอไลต์และของเหลวไอออนิกที่ให้ค่าการดูดซับและการคายออกก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ในช่วง 10 - 25 kcal mol⁻¹ โดยไม่มีการถูกแทนที่ตำแหน่งการดูดซับด้วยก๊าซชนิดอื่น ๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์ โดยขั้นตอนนี้ใช้วิธีเคลือบฝัง (impregnation method) และไมโครเวฟ (microwave-assisted synthesis) และทำการตรวจสอบลักษณะพื้นผิว ปริมาณของเหลวไอออนิกที่ถูกเคลือบฝังภายในโพรงซีโอไลต์ ด้วยเครื่องเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

3.4 ทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ศึกษาการออกแบบและจัดสร้างอุปกรณ์สำหรับดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยซีโอไลต์ที่ห่อหุ้มของเหลวไอออนิกโดยอุปกรณ์และทำการติดตั้งซีโอไลต์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.3 ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียสและหาเศษส่วนโมลการละลาย (mole fraction solubility) ทั้งในสถานะที่ปรากฏและปราศจากก๊าซมลพิษชนิดอื่นเช่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์

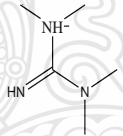
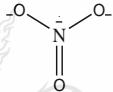
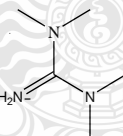
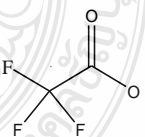
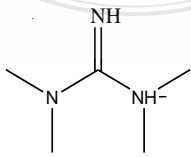
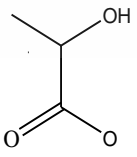


บทที่ 4

ผลการทดลอง

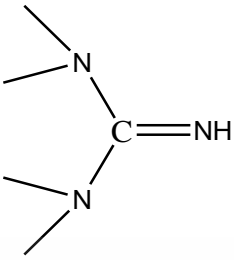
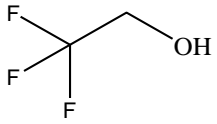
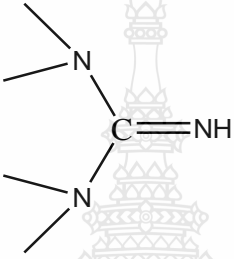
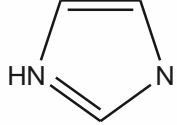
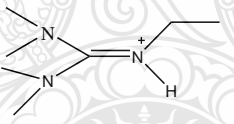
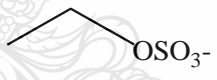
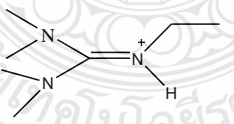
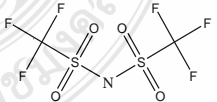
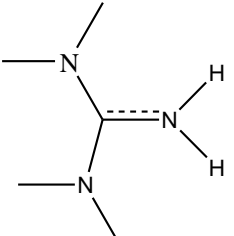
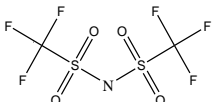
จากการศึกษาการออกแบบคู่ของสารประกอบอินทรีย์ที่มีประจุสุทธิเป็นบวกและลบ (ของเหลวไอออนิก) ทั้งในและนอกห้องปฏิบัติการและสืบค้นงานข้อมูลของงานวิจัยเพื่อใช้งานได้จริงจากฐานข้อมูลทางวิชาการและทำการศึกษาคู่สารที่เหมาะสมของของเหลวไอออนิก สำหรับในการดูดซับและคายออกของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ได้ผลออกมาเป็นดังนี้

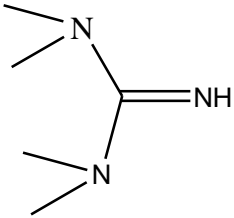
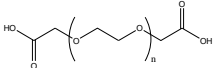
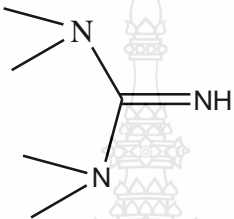
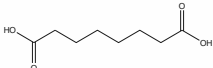
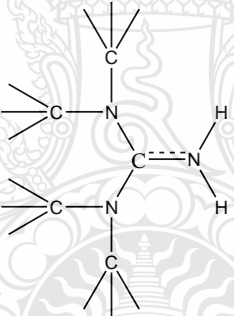
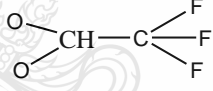
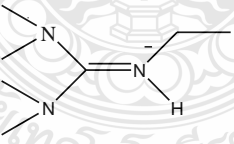
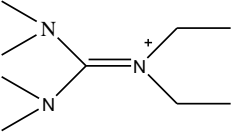
ตารางที่ 4.1 Ionic Liquids : Guanidinium based Ionic liquids

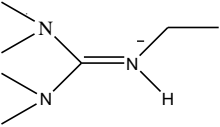
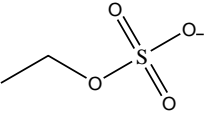
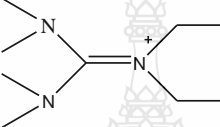
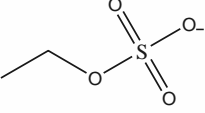
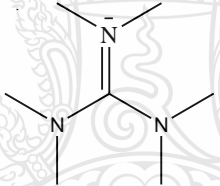
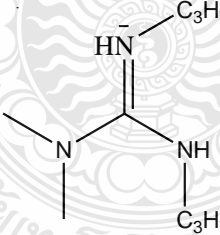
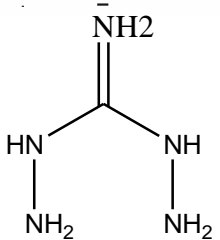
NO.	Name	Ionic Liquid		Reference First author et al., journal, year, page no. DOI
		Guanidinium based ILs		
		Cation	Anion	
1	tetramethylguanidinium nitrate			Vitorino, J.; Agapito, F.; Piedade, M. F. M.; Bernardes, C. E. S.; Diogo, H. P.; Leal, J. P.; Piedade, M. E. M. d. (2014) J. Chem. Thermodyn. 77, 179-189.
2	N,N,N',N'- tetramethylguanidine 2,2,2-trifluoroacetate			Gao, H.; Han, B.; Li, J.; Jiang, T.; Liu, Z.; Wu, W.; Chang, Y.; Zhang, J. (2004) Synth. Commun. 34(17), 3083-3089.
3	1,1,3,3- tetramethylguanidinium lactate			Gao, H.; Han, B.; Li, J.; Jiang, T.; Liu, Z.; Wu, W.; Chang, Y.; Zhang, J. (2004) Synth. Commun. 34(17), 3083-3089.

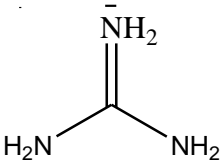
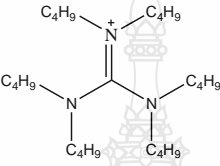
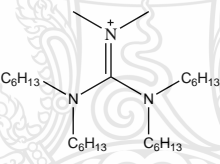
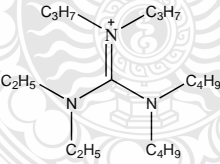
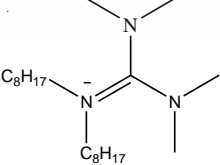
4	1,1,3,3-tetramethylguanidinium formate			Gao, H.; Han, B.; Li, J.; Jiang, T.; Liu, Z.; Wu, W.; Chang, Y.; Zhang, J. (2004) Synth. Commun. 34(17), 3083-3089.
5	1,1,3,3-tetramethylguanidinium trifluoromethanesulfonate			Gao, H.; Han, B.; Li, J.; Jiang, T.; Liu, Z.; Wu, W.; Chang, Y.; Zhang, J. (2004) Synth. Commun. 34(17), 3083-3089.
6	guanidinium sulfate			Kumar, A. (2007) J. Solution Chem. 36(11-12), 1569-1584.
7	1,1,3,3-tetramethylguanidinium imidazol-1-ide			Ye, F.; Zhu, J.; Yu, K.; Zhu, R.; Xu, Y.; Chen, J.; Chen, L. (2016) J. Chem. Thermodyn. 97, 39-47.
8	2-ethyl-1,1,3,3-tetramethylguanidinium ethyl sulfate			Lu, X.; Wu, D.; Ye, D.; Wang, Y.; Guo, Y.; Fang, W. (2015) J. Chem. Eng. Data 60(9), 2618-2628.
9	2-ethyl-1,1,3,3-tetramethylguanidinium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide			Lu, X.; Wu, D.; Ye, D.; Wang, Y.; Guo, Y.; Fang, W. (2015) J. Chem. Eng. Data 60(9), 2618-2628.
10	Guanidinium bis (bis(perfluoroethyl)phosphoryl)imide			Ondo, D.; Dohnal, V. (2014) J. Chem. Thermodyn. 75, 86-95.
11	guanidinium tetraphenylborate			Ondo, D.; Dohnal, V. (2014) J. Chem. Thermodyn. 75, 86-95.

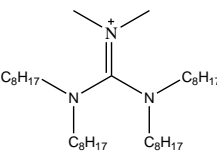
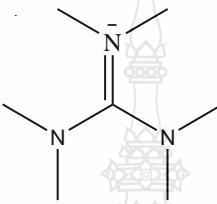
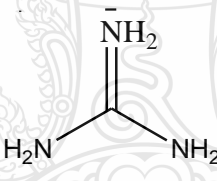
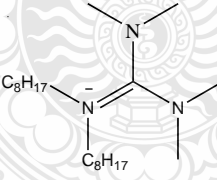
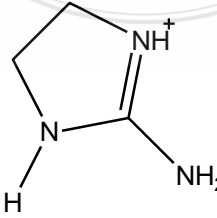
12	1,1,3,3-tetramethylguanidinium tetrafluoroborate			Ren, S.; Hou, Y.; Wu, W.; Liu, Q.; Xiao, Y.; Chen, X. (2010) J. Phys. Chem. 114, 2175-2179.
13	guanidinium trifluoromethanesulfonate			Sairi, N. A.; Ghani, N. A.; Aroua, M. K.; Yusoff, R.; Alias, Y. (2015) Fluid Phase Equilib. 385, 79-91.
14	Guanidinium bromide		Br^-	Kumar, A. (2001) J. Solution Chem. 30(3), 281-290.
15	bis(trifluoromethanesulfonylimide)			Mingtao Li a, Li Yanga,b, Shaohua Fanga, Siming Donga, Yide Jin a, Shin-ichi Hiranob, Kazuhiro Tachibanac. (2011) J. Power Sources 196, 6502–6506
16	[1,1,3,3-tetramethylguanidinium] [phenol] ([TMG])[PHE]			Ying Shanga,b, Hongping Li a, Suojiang Zhangb, Hui Xub, Zanzia Wangb, Li Zhangb, Jianmin Zhangb. (2011) J. Chemical Engineering 175, 324– 329

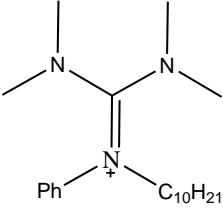
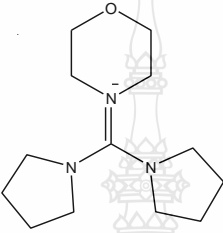
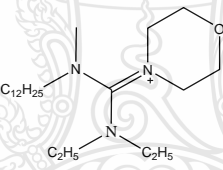
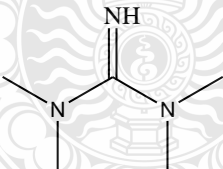
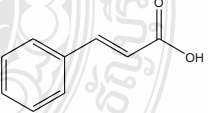
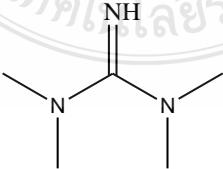
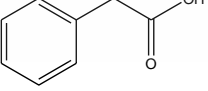
17	[1,1,3,3-tetramethylguanidinium] [2,2,2-trifluoroethanol] ([TMG][TE])			Ying Shanga,b, Hongping Li a, Suojiang Zhangb, Hui Xub, Zanxia Wangb, Li Zhangb, Jianmin Zhangb. (2011) J. Chemical Engineering 175, 324– 329
18	[1,1,3,3-tetramethylguanidinium] [imidazole] ([TMG][IM])			Ying Shanga,b, Hongping Li a, Suojiang Zhangb, Hui Xub, Zanxia Wangb, Li Zhangb, Jianmin Zhangb. (2011) J. Chemical Engineering 175, 324– 329
19	2-ethyl- 1,1,3,3-tetramethylguanidinium methylsulfate			Xiaoxing Lu, Jing Yu, Jianzhou Wu, Yongsheng Guo,, Hujun Xie,, and Wenjun Fang. (2015) J.Physical Chemistry 119, 8054–8062
20	2-ethyl- 1,1,3,3-tetramethylguanidinium bis(trifluoromethylsulfonyl)- imide			Xiaoxing Lu, Jing Yu, Jianzhou Wu, Yongsheng Guo,, Hujun Xie,, and Wenjun Fang. (2015) J.Physical Chemistry 119, 8054–8062
21	1,1,3,3-tetramethylguanidinium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide ([tmgHH][Tf2N])			Guangren Yu and Xiaochun Chen. (2011) J. Physical Chemistry 115, 3466–3477

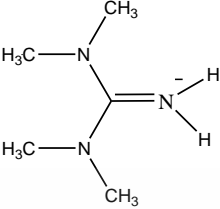
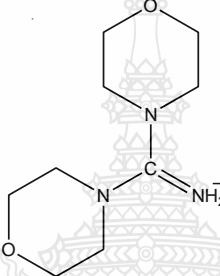
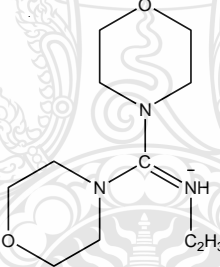
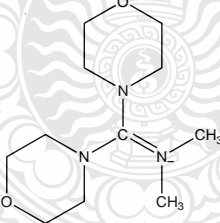
22	[1,1,3,3-tetramethylguanidinium] [Poly(ethylene glycol) bis(carboxymethyl) ether] ([TMG][PBE])			Meng Xiaocaia,c, Wang Jianyingb, Jiang Haichaob, Zhang Xiangjingb, Liu Shuoleib, Hu Yongqi. (2016) J. Chemical Engineering.
23	1,1,3,3-tetramethylguanidinium [Suberic acid] ([TMG][SUB])			Meng Xiaocaia,c, Wang Jianyingb, Jiang Haichaob, Zhang Xiangjingb, Liu Shuoleib, Hu Yongqi. (2016) J. Chemical Engineering.
24	1,1,3,3-tetramethylguanidinium trifluoroacetate ([tmgH][T])			Guangren Yu, Xiaochun Chen and Charles Asumana, Suojang Zhang and Xiaomin Liu, Guohui Zhou.(2011) J. Chemical Engineering 57, 507– 516
25	2-Ethyl-1,1,3,3-tetramethylguanidinium iodide		I	Jing Yu, Shanshan Zhang, Yitong Dai, Xiaoxing Lu, Qunfang Lei, Wenjun Fang. (2016) J. Hazardous Materials 307, 73–81
26	2,2-Diethyl-1,1,3,3-tetramethylguanidinium iodide		I	Jing Yu, Shanshan Zhang, Yitong Dai, Xiaoxing Lu, Qunfang Lei, Wenjun Fang. (2016) J. Hazardous Materials 307, 73–81

27	2-Ethyl-1,1,3,3-tetramethylguanidinium ethyl sulfate			Jing Yu, Shanshan Zhang, Yitong Dai, Xiaoxing Lu, Qunfang Lei, Wenjun Fang. (2016) J. Hazardous Materials 307, 73–81
28	2,2-Diethyl-1,1,3,3-tetramethylguanidinium ethyl sulfate			Jing Yu, Shanshan Zhang, Yitong Dai, Xiaoxing Lu, Qunfang Lei, Wenjun Fang. (2016) J. Hazardous Materials 307, 73–81
29	Exploration of quantitative structure–property relationships (QSPR) for the design of new guanidinium ionic liquids		Cl	Goncalo V.S.M. Carrera, Lui´s C. Branco, Joao Aires-de-Sousa, Carlos A.M. Afonso. (2008) J.Elsevier 64, 2216-2224
30			Cl	Goncalo V.S.M. Carrera, Lui´s C. Branco, Joao Aires-de-Sousa, Carlos A.M. Afonso. (2008) J.Elsevier 64, 2216-2224
31			Cl	Goncalo V.S.M. Carrera, Lui´s C. Branco, Joao Aires-de-Sousa, Carlos A.M. Afonso. (2008) J.Elsevier 64, 2216-2224

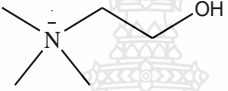
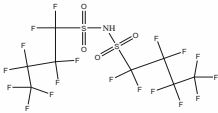

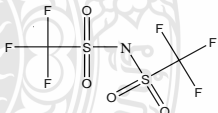
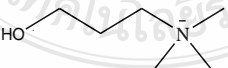
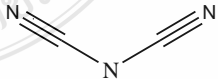
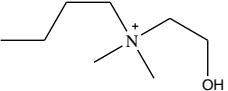
32	Guanidine hydrochloride		Cl	Goncalo V.S.M. Carrera, Lui´s C. Branco, Joao Aires- de-Sousa, Carlos A.M. Afonso. (2008) J.Elsevier 64, 2216- 2224
33			Cl	Goncalo V.S.M. Carrera, Lui´s C. Branco, Joao Aires- de-Sousa, Carlos A.M. Afonso. (2008) J.Elsevier 64, 2216- 2224
34			Cl	Goncalo V.S.M. Carrera, Lui´s C. Branco, Joao Aires- de-Sousa, Carlos A.M. Afonso. (2008) J.Elsevier 64, 2216- 2224
35			Cl	Goncalo V.S.M. Carrera, Lui´s C. Branco, Joao Aires- de-Sousa, Carlos A.M. Afonso. (2008) J.Elsevier 64, 2216- 2224
36			Cl	Goncalo V.S.M. Carrera, Lui´s C. Branco, Joao Aires- de-Sousa, Carlos A.M. Afonso. (2008) J.Elsevier 64, 2216- 2224

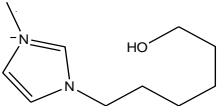
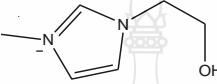
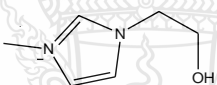
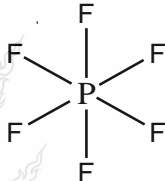
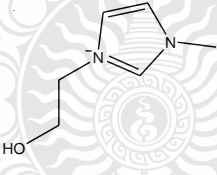
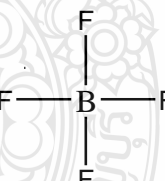
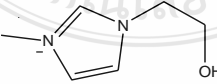
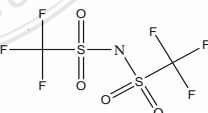
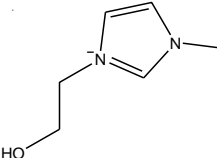
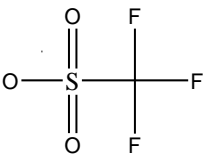
37			Cl	<p>Goncalo V.S.M. Carrera, Luí s C. Branco, Joao Aires- de-Sousa, Carlos A.M. Afonso. (2008) J.Elsevier 64, 2216- 2224</p>
38			BPh ₄	<p>Goncalo V.S.M. Carrera, Luí s C. Branco, Joao Aires- de-Sousa, Carlos A.M. Afonso. (2008) J.Elsevier 64, 2216- 2224</p>
39			BPh ₄	<p>Goncalo V.S.M. Carrera, Luí s C. Branco, Joao Aires- de-Sousa, Carlos A.M. Afonso. (2008) J.Elsevier 64, 2216- 2224</p>
40			BPh ₄	<p>Goncalo V.S.M. Carrera, Luí s C. Branco, Joao Aires- de-Sousa, Carlos A.M. Afonso. (2008) J.Elsevier 64, 2216- 2224</p>
41			BPh ₄	<p>Goncalo V.S.M. Carrera, Luí s C. Branco, Joao Aires- de-Sousa, Carlos A.M. Afonso. (2008) J.Elsevier 64, 2216- 2224</p>

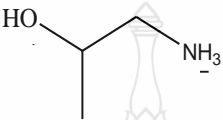
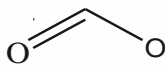

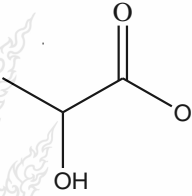
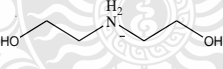
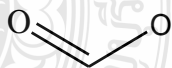
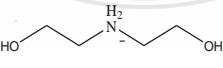
42			Br	<p>Goncalo V.S.M. Carrera, Lui´s C. Branco, Joao Aires- de-Sousa, Carlos A.M. Afonso. (2008) J.Elsevier 64, 2216- 2224</p>
43			Br	<p>Goncalo V.S.M. Carrera, Lui´s C. Branco, Joao Aires- de-Sousa, Carlos A.M. Afonso. (2008) J.Elsevier 64, 2216- 2224</p>
44			I.	<p>Goncalo V.S.M. Carrera, Lui´s C. Branco, Joao Aires- de-Sousa, Carlos A.M. Afonso. (2008) J.Elsevier 64, 2216- 2224</p>
45	1,1,3,3- tetramethylguanidinium cinnamate			<p>Indrajit Das, Bharath kumar Chennuri, V. Ramkumar, Ramesh L. Gardas. (2017) J. Elsevier 242, 129- 136</p>
46	1,1,3,3- tetramethylguanidinium phenylacetate			<p>Indrajit Das, Bharath kumar Chennuri, V. Ramkumar, Ramesh L. Gardas. (2017) J. Elsevier 242, 129- 136</p>

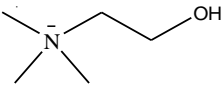
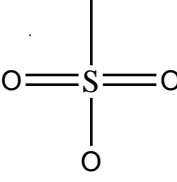
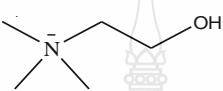
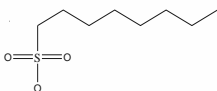

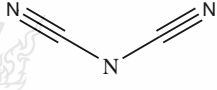

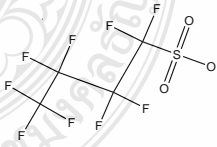
47	tetramethylguanidinium chlorosulfonate Tetramethyl guanidinium chlorosulfonate as a highly efficient and recyclable organocatalyst for the preparation of bis(indolyl) methane derivatives		CISO ₃	Reddi Mohan Naidu Kalla, Johnson V. John, Huiju Park, Il Kim. (2014) J. Elsevier 57, 55–59
48	4,4- iminomethylenedimorp holinium azide		N ₃	Anthony J. Papa, Grand Blanc, Mich. (1969) United States Patent Office, 544
49	N-ethyl-4,4- iminomethylenedimorp holinium azide		N ₃	Anthony J. Papa, Grand Blanc, Mich. (1969) United States Patent Office, 544
50	N-dimethyl-4,4- iminomethylenedimorp holinium azide		N ₃	Anthony J. Papa, Grand Blanc, Mich. (1969) United States Patent Office, 544

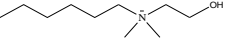
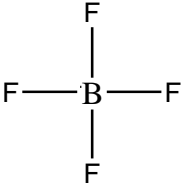
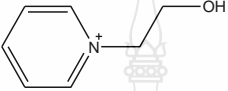
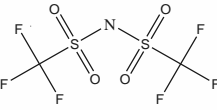

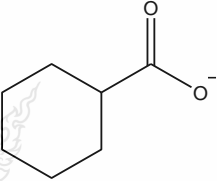
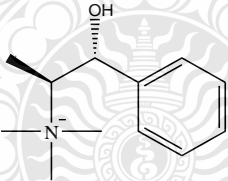
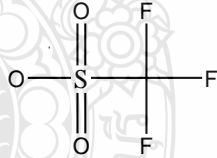
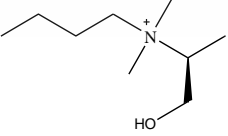
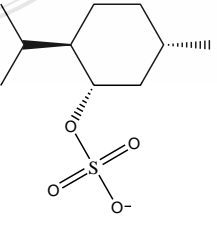
ตารางที่ 4.2 Ionic Liquids : Hydroxy ammonium based Ionic liquids

NO.	Name	Ionic Liquids		Reference First author et al., journal, year, page no. DOI
		Hydroxy ammonium IIs		
		Cation	Anion	
1	cholinium bis(nonafluorobutylsulfonyl)imide			Vieira, N. S. M.; Luis, A.; Reis, P. M.; Carvalho, P. J.; Lopes-da-Silva, J. A.; Esperanca, J. M. S. S.; Araujo, J. M. M.; Rebelo, L. P. N.; Freire, M. G.; Pereiro, A. B. (2016) J. Chem. Thermodyn. 97, 354-361.
2	choline bis(trifluoromethylsulfonyl)imide			Villanueva, M.; Parajo, J. J.; Sanchez, P. B.; Garcia, J.; Salgado, J. (2015) J. Chem. Thermodyn. 91, 127-135.
3	N-ethyl-2-hydroxyethyl-N,N-dimethylammonium dicyanamide			Domanska, U. (2006) Thermochim. Acta 448(1), 19-30.
4	N-(2-hydroxyethyl)-N,N-dimethylbutanaminium bromide		Br	Domanska, U. (2006) Thermochim. Acta 448(1), 19-30.

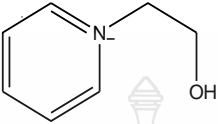
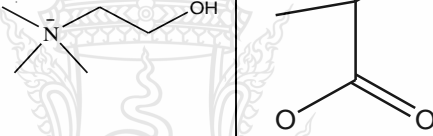
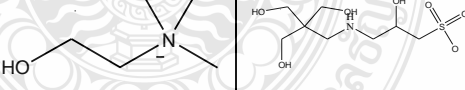
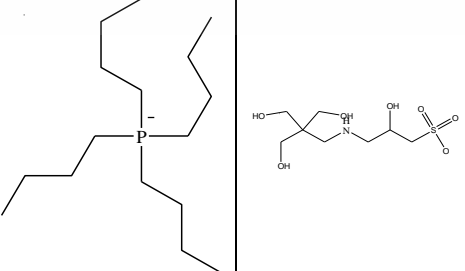
5	3-(6-hydroxyhexyl)-1-methylimidazolium chloride		Cl	Hossain, M. I.; Babaa, M.-R.; El-Harbawi, M.; Man, Z.; Hefter, G.; Yin, C.-Y. (2011) J. Chem. Eng. Data 56(11), 4188-4193.
6	1-(2-hydroxyethyl)-3-methyl-1H-imidazolium chloride		Cl	Nie, N.; Zheng, D.; Dong, L.; Li, Y. (2012) J. Chem. Eng. Data 57(12), 3598-3603.
7	3-(2-hydroxyethyl)-1-methylimidazolium hexafluorophosphate			Sakhaeina, H.; Taghikhani, V.; Jalili, A. H.; Mehdizadeh, A.; Safekordi, A. A. (2010) Fluid Phase Equilib. 298(2), 303-309.
8	1-(2-hydroxyethyl)-3-methylimidazolium tetrafluoroborate			Kim, K.-S.; Park, S.-Y.; Choi, S.; Lee, H. (2004) J. Chem. Eng. Data 49(6), 1550-1553
9	1-(2-hydroxyethyl)-3-methylimidazolium bis[(trifluoromethyl)sulfonyl]imide			Sakhaeina, H.; Taghikhani, V.; Jalili, A. H.; Mehdizadeh, A.; Safekordi, A. A. (2010) Fluid Phase Equilib. 298(2), 303-309.
10	3-(2-hydroxyethyl)-1-methylimidazolium 1,1,1-			Sakhaeina, H.; Taghikhani, V.; Jalili, A. H.; Mehdizadeh,

	trifluoromethanesulfonate			A.; Safekordi, A. A. (2010) Fluid Phase Equilib. 298(2), 303-309.
11	2-hydroxypropanaminium formate			Greaves, T. L.; Weerawardena, A.; Fong, C.; Krodkiewska, I.; Drummond, C. J. (2006) J. Phys. Chem. B 110(45), 22479-22487.
12	2-aminoethanol-2-hydroxypropanoate			Greaves, T. L.; Weerawardena, A.; Fong, C.; Krodkiewska, I.; Drummond, C. J. (2006) J. Phys. Chem. B 110(45), 22479-22487.
13	diethanolammonium formate			Li, X.-m.; Shen, C.; Li, C.-X. (2012) J. Chem. Thermodyn. 53, 167-175.
14	2-hydroxy-N-(2-hydroxyethyl)-N-methylethanaminium chloride		Cl	Zhao, Y.; Zhang, X.; Dong, H.; Li, G.; Zeng, S.; Zhang, S. J. (2011) Fluid Phase Equilib. 302(1-2), 60-64.

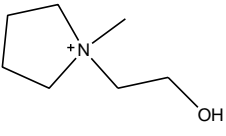
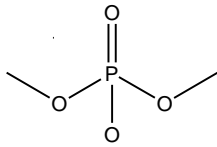
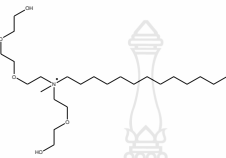
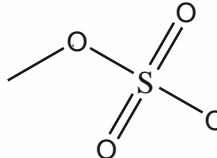
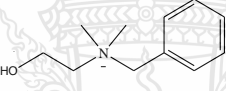
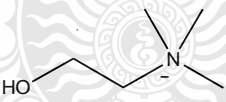

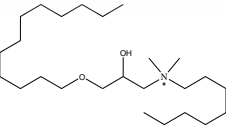
15	choline methanesulfonate			Mahrova, M.; Vilas, M.; Dominguez, A.; Gomez, E.; Calvar, N.; Tojo, E. (2012) J. Chem. Eng. Data 57(2), 241-248.
16	2-hydroxy-N,N,N-trimethylethanaminium 1-octanesulfonate			Mahrova, M.; Vilas, M.; Dominguez, A.; Gomez, E.; Calvar, N.; Tojo, E. (2012) J. Chem. Eng. Data 57(2), 241-248.
17	(2-hydroxyethyl)- dimethylundecyloxymethylammonium dicyanamide			Domanska, U.; Zolek-Tryznowska, Z.; Krolkowski, M. (2007) J. Chem. Eng. Data 52(5), 1872-1880.
18	cholinium perfluorobutanesulfonate			Vieira, N. S. M.; Luis, A.; Reis, P. M.; Carvalho, P. J.; Lopes-da-Silva, J. A.; Esperanca, J. M. S.; Araujo, J. M. M.; Rebelo, L. P. N.; Freire, M. G.; Pereiro, A. B. (2016) J. Chem. Thermodyn. 97, 354-361.

19	hexyl(2-hydroxyethyl)dimethylammonium tetrafluoroborate			Domanska, U.; Zolek-Tryznowska, Z.; Krolkowski, M. (2007) J. Chem. Eng. Data 52(5), 1872-1880.
20	1-(2-hydroxyethyl)pyridinium bis(trifluoromethylsulfonyle)imide			Makinoa, T.; Kanakuboa, M.; Umecky, T.; Suzuki, A. (2013) Fluid Phase Equilib. 357, 64-70.
21	2-hydroxy-N,N,N-trimethylethan-1-aminium cyclohexanecarboxylate			Zhou, Q.; Song, Y.; Yu, Y.; He, H.; Zhang, S. (2010) J. Chem. Eng. Data 55(3), 1105-1108.
22	(1S,2R)-1-hydroxy-N,N,N-trimethyl-1-phenylpropan-2-aminium trifluoromethanesulfonate			Scurto, A. M.; Newton, E.; Weikel, R. R.; Draucker, L. C.; Hallett, J.; Liotta, C. L.; Leitner, W.; Eckert, C. A. (2008) Ind. Eng. Chem. Res. 47(2), 493-501.
23	N-[(2S)-1-hydroxybutan-2-yl]-N,N-dimethylbutan-1-aminium (1S,2R,5S)-5-methyl-2-(propan-2-yl)cyclohexyl sulfate			Scurto, A. M.; Newton, E.; Weikel, R. R.; Draucker, L. C.; Hallett, J.; Liotta, C. L.; Leitner, W.; Eckert, C. A. (2008) Ind. Eng. Chem. Res. 47(2), 493-501.

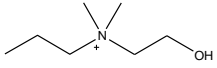

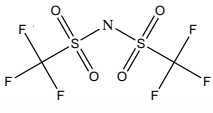
24	hydroxylammonium perchlorate			Zimmer, M. F.; Barody, E. E.; Carpenter, G. A.; Robb, R. A. (1968) J. Chem. Eng. Data 13(2), 212-214.
25	2-hydroxy-N,N,N-trimethyl-ethanaminium 1-butananesulfonate			Mahrova, M.; Vilas, M.; Dominguez, A.; Gomez, E.; Calvar, N.; Tojo, E. (2012) J. Chem. Eng. Data 57(2), 241-248.
26	ethanolammonium nitrate			Greaves, T. L.; Weerawardena, A.; Fong, C.; Krodziewska, I.; Drummond, C. J. (2006) J. Phys. Chem. B 110(45), 22479-22487.
27	2,2-dihydroxydiethylamine			Medard, L.; Thomas, M. (1954) Mem. Poudres 36, 97.
28	1-(2-hydroxyethyl)-3-methylimidazolium acetate			Brunig, T.; Krekic, K.; Bruhn, C.; Pietschnig, R. (2016) Chem. Eur. J. 22(45), 16200-16212
29	ethanolammonium methyl sulfate			Greaves, T. L.; Weerawardena, A.; Fong, C.; Krodziewska, I.; Drummond, C. J.

				(2006) J. Phys. Chem. B 110(45), 22479-22487.
30	1-(2-hydroxyethyl)pyridinium bromide		Br	Meyer, K. L.; Marasco, C. J.; Morris-Natschke, S. L.; Ishaq, K. S.; Piantadosi, C. (1991) J. Med. Chem. 34, 1377-1383.
31	choline pivalate			Muhammad, N.; Hossain, M. I.; Man, Z.; El-Harbawi, M.; Bustam, M. A.; Noaman, Y. A.; Alitheen, N. B. M.; Ng, M. K.; Hefter, G.; Yin, C.-Y. (2012) J. Chem. Eng. Data 57(8), 2191-2196.
32	2-hydroxy-N,N,N-trimethylethanaminium 3-((1,3-dihydroxy-2-(hydroxymethyl)propan-2-yl)amino)-2-hydroxypropanesulfonate			Lee, S. Y.; Vicente, F. A.; Coutinho, J. A. P.; Khoiroh, I.; Show, P. L.; Ventura, S. P. M. (2016) J. Chem. Eng. Data 61(7), 2260-2268.
33	tetrabutylphosphonium 3-((1,3-dihydroxy-2-(hydroxymethyl)propan-2-yl)amino)-2-hydroxypropanesulfonate			Lee, S. Y.; Vicente, F. A.; Coutinho, J. A. P.; Khoiroh, I.; Show, P. L.; Ventura, S. P. M. (2016) J. Chem. Eng. Data 61(7), 2260-2268.

34	2-hydroxyethanaminium tetrafluoroborate			Zhu, J.; Bai, L.; Chen, B.; Fei, W. (2009) Chem. Eng. J. 147, 58-62.
35	N-ethyl-2-hydroxyethyl-N,N-dimethylammonium dicyanamide			Domanska, U.; Pobudkowska, A.; Rogalski, M. (2008) J. Colloid Interface Sci. 322, 342-350.
36	N-methyl-2-hydroxyethylammonium butanoate			Li, Y.; Figueiredo, E. J. P.; Santos, M. J.; Santos, J. B.; Talavera-Prieto, N. M. C.; Carvalho, P. J.; Ferreira, A. G. M.; Mattedi, S. (2016) J. Chem. Thermodyn. 97, 191-205.
37	dodecyl(2-hydroxyethyl)dimethylammonium bromide			Qiu, X.; Fang, W.; Lei, Q.; Lin, R. (2008) J. Chem. Eng. Data 53(4), 942-945.
38	4-(3-hydroxypropyl)-4-methylmorpholinium bis(trifluoromethylsulfonamide)			Wlazlo, M.; Marciniak, A.; Zawadzki, M.; Dudkiewicz, B. (2015) J. Chem. Thermodyn. 86, 154-161.
39	ammonium 2-hydroxypropane-1,2,3-tricarboxylate			Li, Y.; Yang, L.; Zhao, X.; Guan, W. (2012) Thermochim. Acta 550, 5-12

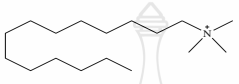
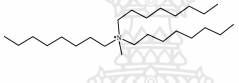
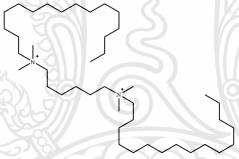
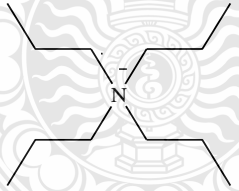
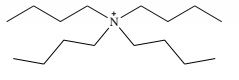
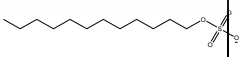
40	1-(2-hydroxyethyl)-1-methylpyrrolidinium dimethyl phosphate			Paduszynski, K.; Krolikowska, M. (2016) <i>J. Mol. Liq.</i> 221, 235-244.
41	N-{2-[2-(2-hydroxyethoxy)ethoxy]ethyl}-N-[2-(2-hydroxyethoxy)ethyl]-N-methyltridecan-1-aminium methyl sulfate			Muldoon, M. J.; Aki, S. N. V. K.; Anderson, J. L.; Dixon, J. K.; Brennecke, J. F. (2007) <i>J. Phys. Chem. B</i> 111(30), 9001-9009.
42	benzyl(2-hydroxyethyl)dimethylammonium chloride		Cl	Sintra, T. E.; Cruz, R.; Ventura, S. P. M.; Coutinho, J. A. P. (2014) <i>J. Chem. Thermodyn.</i> 77, 206-213.
43	2-hydroxy-N,N,N-trimethylethanaminium hexanoate			Patinha, D. J. S.; Tome, L. C.; Garcia, H.; Ferreira, R.; Pereira, C. S.; Rebelo, L. P. N.; Marrucho, I. M. (2015) <i>J. Chem. Thermodyn.</i> 84, 93-100.
44	N-(3-(dodecyloxy)-2-hydroxypropyl)-N,N-dimethyloctan-1-aminium bromide		Br	Zhou, T.; Liu, S.; You, Y.; Xu, R.; Zhao, J. (2016) <i>J. Chem. Eng. Data</i> 61(9), 2915-2922.

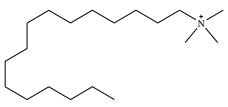
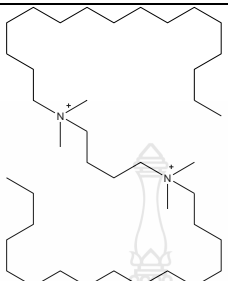
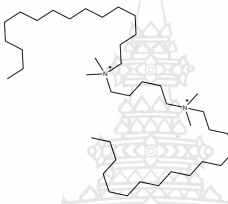
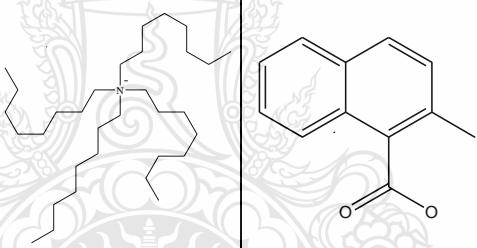
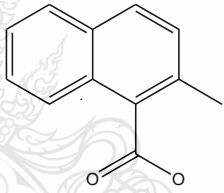


45	N-(3-(hexadecyloxy)-2-hydroxypropyl)-N,N-dimethyloctan-1-aminium bromide		Br	Zhou, T.; Liu, S.; You, Y.; Xu, R.; Zhao, J. (2016) J. Chem. Eng. Data 61(9), 2915-2922.
46	N-ethyl-2-hydroxy-N,N-dimethylethanaminium methanesulfonate			Mahrova, M.; Vilas, M.; Dominguez, A.; Gomez, E.; Calvar, N.; Tojo, E. (2012) J. Chem. Eng. Data 57(2), 241-248.
47	N-ethyl-2-hydroxy-N,N-dimethylethanaminium 1-octanesulfonate			Mahrova, M.; Vilas, M.; Dominguez, A.; Gomez, E.; Calvar, N.; Tojo, E. (2012) J. Chem. Eng. Data 57(2), 241-248.
48	propylcholinium bis((trifluoromethyl)sulfonyl)imide			Hong, G.; Jacquemin, J.; Deetlefs, M.; Husson, P.; Gomes, M. F. C. (2007) Fluid Phase Equilib. 257(1), 27-34.
49	N-(2-hydroxyethyl)-N,N-dimethylpropanaminium bromide		Br	Domanska, U.; Bogel-Lukasik, R. (2005) J. Phys. Chem. B 109, 12124-12132.

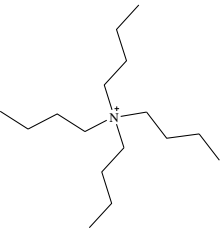
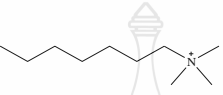
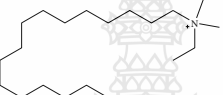
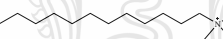
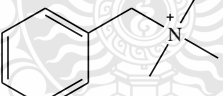
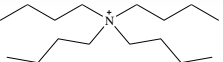
50	N-(2-hydroxyethyl)-N,N-dimethyl-1-propanaminium bis((trifluoromethyl)sulfonyl)amide	 		Costa, A. J. L.; Soromenho, M. R. C.; Shimizu, K.; Marrucho, I. M.; Esperanca, J. M. S. S.; Lopes, J. N. C.; Rebelo, L. P. N. (2012) J. Phys. Chem. B 116, 9186-9195.
----	---	--	--	---

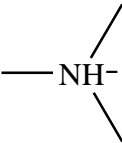
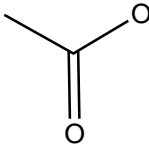
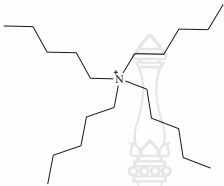
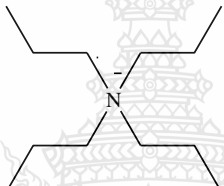
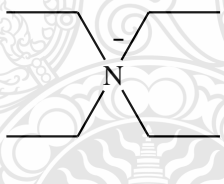


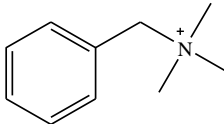


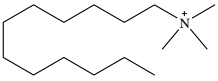
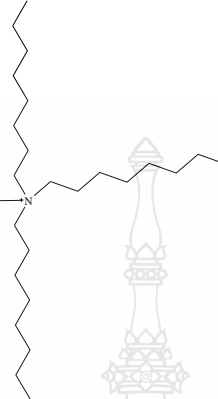
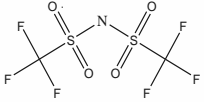
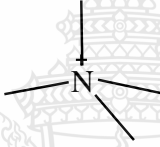
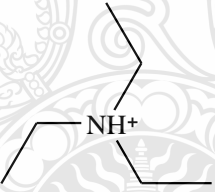
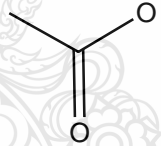

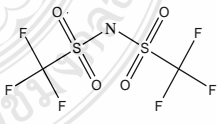
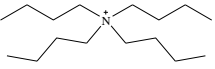
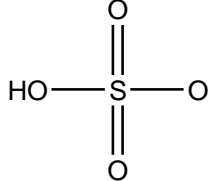
ตารางที่ 4.3 Ionic Liquids : Quaternary ammonium Ionic liquids

NO.	Name	Ionic Liquids		Reference First author et al., journal, year, page no. DOI
		Quaternary ammonium		
		Cation	Anion	
1.	tetradecyltrimethylamm onium bromide		Br	De Lisi, R.; Milioto, S.; Triolo, R. (1988) J. Solution Chem. 17(7), 673-697.
2.	N-methyl-N,N-dioctyl-1-octanaminium thiocyanate		N≡S	Cai, F.; Zhu, W.; Ibrahim, J. J.; Xiao, G. (2015) J. Chem. Thermodyn. 89, 35-40.
3.	N1,N6-dihexadecyl-N1,N1,N6,N6-tetramethylhexane-1,6-diaminium bromide		Br Br	Khan, I. A.; Khanam, A. J.; Khan, Z. A.; Kabir-ud-Din (2010) J. Chem. Eng. Data 55(11), 4775-4779.
4.	tetrapropylammonium bromide		Br	Ahmad, T.; Ghazali, A.; Sulaiman, O.; Hashim, R.; Khan, Z.; Kabir-ud-Din (2010) J. Chem. Eng. Data 55(11), 5055-5058.
5.	tetrabutylammonium dodecyl sulfate			Ahmad, T.; Ghazali, A.; Sulaiman, O.; Hashim, R.; Khan, Z.; Kabir-ud-Din (2010) J. Chem. Eng. Data 55(11), 5055-5058.

6.	N,N,N-trimethyl-1-hexadecanaminium bromide		Br	Ozdil, S. E.; Akbas, H.; Boz, M. (2016) J. Chem. Eng. Data 61(1), 142-150.
7.	N1,N4-dihexadecyl-N1,N1,N4,N4-tetramethylbutane-1,4-diaminium bromide		Br Br	Khan, I. A.; Khanam, A. J.; Khan, Z. A.; Kabir-ud-Din (2010) J. Chem. Eng. Data 55(11), 4775-4779.
8.	N1,N5-dihexadecyl-N1,N1,N5,N5-tetramethylpentane-1,5-diaminium bromide		Br Br	Khan, I. A.; Khanam, A. J.; Khan, Z. A.; Kabir-ud-Din (2010) J. Chem. Eng. Data 55(11), 4775-4779.
9.	tetraoctylammonium 2-methyl-1-naphthoate			Garcia-Chavez, L. Y.; Shazad, M.; Schuur, B.; de Haan, A. B. (2012) J. Chem. Thermodyn. 55, 85-91.
10	N,N,N-trimethyl-1-decanaminium bromide		Br	Gomez-Diaz, D.; Navaza, J. M.; Sanjurjo, B. (2007) J. Chem. Eng. Data 52(3), 889-891.
11.	tetrapentylammonium thiocyanate		S ≡ N	Yermalayeu, A. V.; Zaitsau, D. H.; Emel'yanenko, V. N.; Verevkin, S. P. (2015) J. Solution Chem. 44, 754-768.

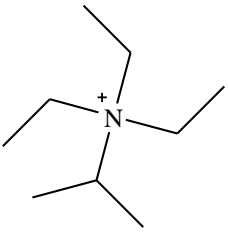
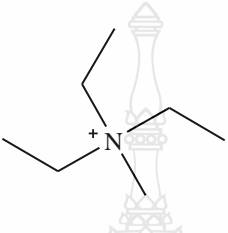
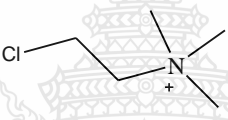
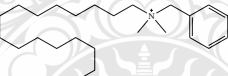
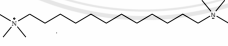
12	tetrabutylammonium thiocyanate		$\text{N}\equiv\text{S}$	Yermalayeu, A. V.; Zaitsau, D. H.; Emel'yanenko, V. N.; Verevkin, S. P. (2015) J. Solution Chem. 44, 754-768.
13	hexyltrimethylammonium bromide		Br	Wasiak, M.; Kunz, W.; Piekarski, H. (2013) Fluid Phase Equilib. 358, 78-82.
14	ethylhexadecyldimethyl ammonium bromide		Br	Sheikh, F. A.; Bhat, P. A. (2012) J. Chem. Eng. Data 57(12), 3368-3374.
15	dodecyltrimethylammo nium bromide		Br	Xing, H.; Yan, P.; Zhao, K.-S.; Xiao, J.- X. (2011) J. Chem. Eng. Data 56(4), 865- 873.
16	benzyltrimethylammoni um bromide		Br	Tutaj, B.; Gonzalez- Perez, A.; Czapkiewicz, J.; Del Castillo, J. L.; Rodriguez, J. R. (2001) J. Solution Chem. 30(12), 1101- 1109.
17	tetrabutylammonium fluoride		F	Aladko, L. S.; Dyadin, Yu. A. (1996) Zh. Neorg. Khim. 41(5), 828-834.

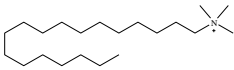
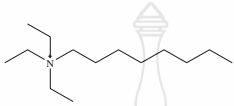
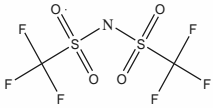
18	trimethylammonium acetate			Umapathi, R.; Attri, P.; Venkatesu, P. (2014) J. Phys. Chem. B 118, 5971-5982.
19	tetrapentylammonium bromide		Br	Chauhan, S.; Kaur, M.; Rana, D. S.; Chauhan, M. S. (2016) J. Chem. Eng. Data 61(11), 3770-3778.
20	tetrapropylammonium chloride		Cl	Perron, G.; Desrosiers, N.; Desnoyers, J. E. (1976) Can. J. Chem. 54, 2163-83.
21	tetraethylammonium chloride		Cl	Perron, G.; Desrosiers, N.; Desnoyers, J. E. (1976) Can. J. Chem. 54, 2163-83.
22	octyl trimethyl ammonium bromide		Br	Wasiak, M.; Kunz, W.; Piekarski, H. (2013) Fluid Phase Equilib. 358, 78-82
23	N1,N10-dihexadecyl-N1,N1,N10,N10-tetramethyldecane-1,10-diaminium bromide		$\left[\begin{array}{c} \text{Br} \\ - \\ \end{array} \right]_2$	Tikariha, D.; Ghosh, K. K.; Quagliotto, P.; Ghosh, S. (2010) J. Chem. Eng. Data 55(10), 4162-4167.
24	trimethylbenzylammonium chloride		Cl	Duman, O.; Ayranci, E. (2009) J. Chem. Thermodyn. 41(8), 911-915.

25	N,N,N-trimethyl-1-dodecanaminium chloride		Cl	De Lisi, R.; Fiscaro, E.; Milioto, S. (1988) J. Solution Chem. 17(11), 1015-1041.
26	methyltrioctylammonium 1,1,1-trifluoro-N-[(trifluoromethyl)sulfonyl]methanesulfonamide			Kurnia, K. A.; Quental, M. V.; Santos, L. M. N. B. F.; Freire, M. G.; Coutinho, J. A. P. (2015) Phys. Chem. Chem. Phys. 17, 4569--4577.
27	tetramethylammonium chloride		Cl	Golabiazar, R.; Sadeghi, R. (2014) J. Chem. Thermodyn. 76, 29-44.
28	triethylammonium acetate			Umapathi, R.; Attri, P.; Venkatesu, P. (2014) J. Phys. Chem. B 118, 5971-5982.
29	tributylmethylammonium bis((trifluoromethyl)sulfonyl)imide			Kurnia, K. A.; Quental, M. V.; Santos, L. M. N. B. F.; Freire, M. G.; Coutinho, J. A. P. (2015) Phys. Chem. Chem. Phys. 17, 4569--4577.
30	tetrabutylammonium hydrogen sulfate			Sarkar, A.; Pandit, B. K.; Sinha, B. (2016) J. Chem. Thermodyn. 103, 36-43.

31	butyltrimethylammonium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide			Kurnia, K. A.; Quental, M. V.; Santos, L. M. N. B. F.; Freire, M. G.; Coutinho, J. A. P. (2015) Phys. Chem. Chem. Phys. 17, 4569--4577.
32	benzenemethanaminium N-dodecyl-N,N-dimethyl, bromide		Br	Zdziennicka, A.; Szymczyk, K.; Krawczyk, J.; Janczuk, B. (2012) Fluid Phase Equilib. 318, 25-33.
33	tetrabutylammonium chloride		Cl	Jain, P.; Sharma, S.; Shukla, R. K. (2013) Phys. Chem. Liq. 51(5), 547-566.
34	N-methyl-N,N-dioctyl-1-octanaminium chloride		Cl	Chandra, A.; Patidar, V.; Singh, M.; Kale, R. K. (2013) J. Chem. Thermodyn. 65, 18- 28.
35	tetramethylammonium bromide		Br	Sadeghi, R.; Golabiazar, R. (2015) J. Chem. Eng. Data 60(4), 1063-1071.
36	tetramethylammonium iodide		I	Sadeghi, R.; Golabiazar, R. (2015) J. Chem. Eng. Data 60(4), 1063-1071.

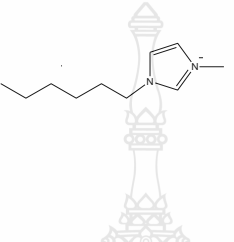
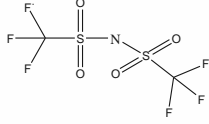
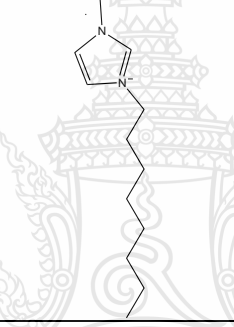
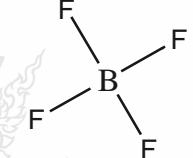
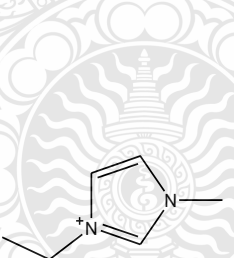
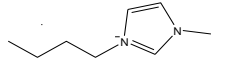
37	tributylmethylammonium m tridecafluoro-1- hexanesulfonate			Ondo, D.; Dohnal, V. (2014) J. Chem. Thermodyn. 75, 86- 95.
38	tributylmethylammonium m bis(bis(perfluoroethyl)ph osphoryl)imide			Ondo, D.; Dohnal, V. (2014) J. Chem. Thermodyn. 75, 86- 95.
39	benzenemethanaminium m, N-dodecyl-N,N- dimethyl, chloride		Cl	Gonzalez-Perez, A.; Ruso, J. M.; Nimo, J.; Rodriguez, J. R. (2003) J. Chem. Thermodyn. 35(12), 1983-1992.
40	tetraethylammonium bromide		Br	Sadeghi, R.; Golabiazar, R. (2015) J. Chem. Eng. Data 60(4), 1063-1071.
41	tetrapropylammonium bromide		Br	Sadeghi, R.; Golabiazar, R. (2015) J. Chem. Eng. Data 60(4), 1063-1071.
42	N,N,N- triethylbutanaminium acetate			Wang, G.; Hou, W.; Xiao, F.; Geng, J.; Wu, Y.; Zhang, Z. (2011) J. Chem. Eng. Data 56(4), 1125- 1133.
43	benzyl dimethyl tetradec ylammonium chloride		Cl	Gonzalez-Perez, A.; Ruso, J. M.; Nimo, J.; Rodriguez, J. R. (2003) J. Chem. Thermodyn. 35(12), 1983-1992.

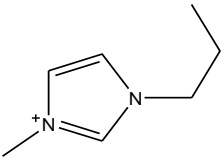
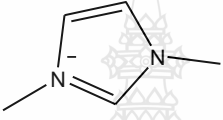
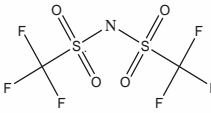

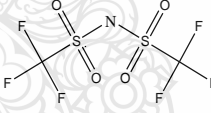
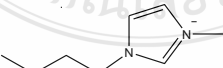
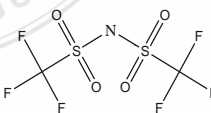
44	triethylisopropylammonium iodide		I	Blanco, L. H.; Amado, E.; Avellaneda, J. A. (2006) Fluid Phase Equilib. 249(1-2), 147-152.
45	methyltriethylammonium iodide		I	Blanco, L. H.; Amado, E.; Avellaneda, J. A. (2006) Fluid Phase Equilib. 249(1-2), 147-152.
46	2-chloro-N,N,N-trimethylethanaminium chloride		Cl	Shaukat, S.; Buchner, R. (2011) J. Chem. Eng. Data 56(12), 4944-4949.
47	cetalkonium chloride		Cl	Gonzalez-Perez, A.; Ruso, J. M.; Nimo, J.; Rodriguez, J. R. (2003) J. Chem. Thermodyn. 35(12), 1983-1992.
48	N1,N1,N1,N12,N12,N12-hexamethyldodecane-1,12-diaminium bromide		$\left[\text{Br}^- \right]_2$	Ribeiro, A. C. F.; Santos, C. I. A. V.; Murtinho, D. B.; Lobo, V. M. M.; Valente, A. J. M. (2012) J. Chem. Thermodyn. 50, 89- 93.

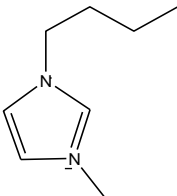
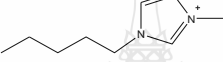
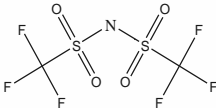
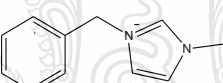
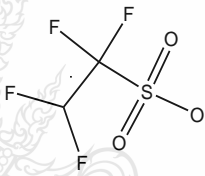
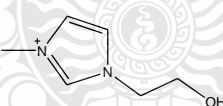
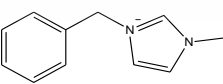
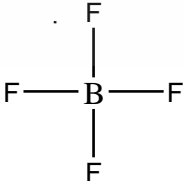
49	N,N,N-trimethyl-1-octadecanaminium bromide		Br	Gomez-Diaz, D.; Navaza, J. M.; Sanjurjo, B. (2007) J. Chem. Eng. Data 52(5), 2091-2093.
50	triethyloctylammonium bis[(trifluoromethyl)sulfonyl]imide			Domanska, U.; Okuniewska, P.; Krolkowski, M. (2016) Fluid Phase Equilib. 423, 109-119.



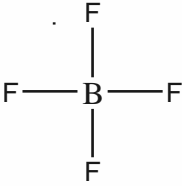

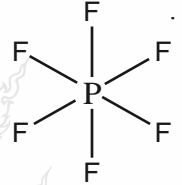
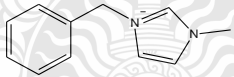
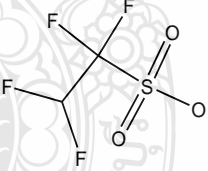

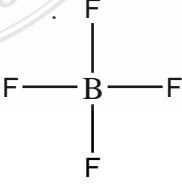


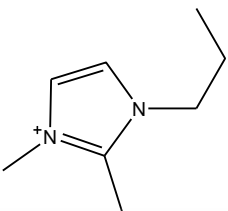
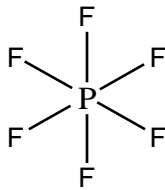
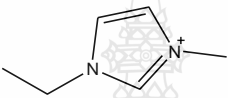
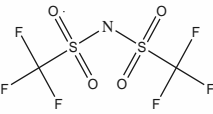
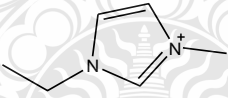
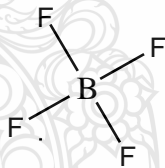
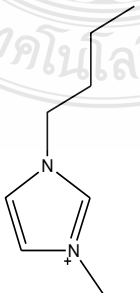
ตารางที่ 4.4 Ionic Liquids : Imidazolium based Ionic liquids

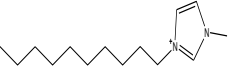
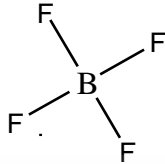
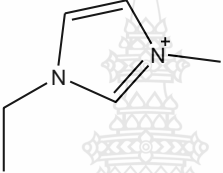
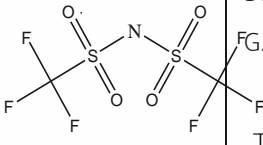
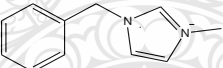
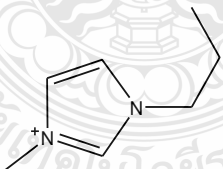
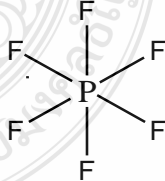
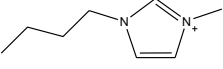
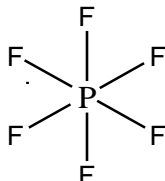
NO.	Name	Ionic Liquid		Reference First author et al., journal, year, page no. DOI
		Imidazolium based		
		Cation	Anion	
1.	1-hexyl-3-methylimidazolium bis[(trifluoromethyl)sulfonyl]imide			Shimizu, Y.; Ohte, Y.; Yamamura, Y.; Saito, K.; Atake, T. (2006) J. Phys. Chem. B 110(28), 13970-13975.
2.	1-methyl-3-octylimidazolium tetrafluoroborate			Paulechka, Y. U.; Blokhin, A. V.; Kabo, G. J. (2015) Thermochim. Acta 604, 122-128.
3.	1-ethyl-3-methylimidazolium iodide		I	Vila, J.; Fernandez-Castro, B.; Rilo, E.; Carrete, J.; Dominguez-Perez, M.; Rodriguez, J. R.; Garcia, M.; Varela, L. M.; Cabeza, O. (2012) Fluid Phase Equilib. 320, 1-10
4.	1-butyl-3-methylimidazolium iodide		I	Paulechka, Y. U.; Blokhin, A. V. (2014) J. Chem. Thermodyn. 79, 94-99.

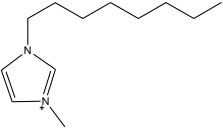

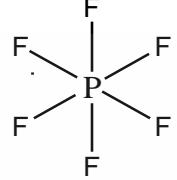
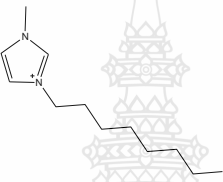
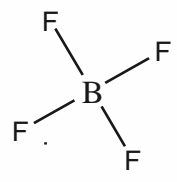
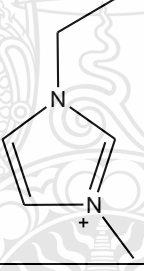


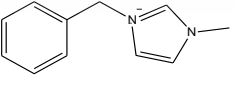
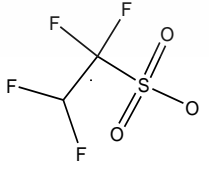
5.	1-methyl-3-propylimidazolium bromide		Br	Paulechka, Y. U.; Kabo, G. J.; Blokhin, A. V.; Shaplov, A. S.; Lozinskaya, E. I.; Vygodskii, Y. S. (2007) <i>J. Chem. Thermodyn.</i> 39(1), 158-166.
6.	1,3-dimethylimidazolium bis((trifluoromethyl)sulfonyl)amide			Tokuda, H.; Tsuzuki, S.; Susan, M. A. B. H.; Hayamizu, K.; Watanabe, M. (2006) <i>J. Phys. Chem. B</i> 110(39), 19593-19600.
7.	1-heptyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl)amide			Xue, L.; Gurung, E.; Tamas, G.; Koh, Y. P.; Shadeck, M.; Simon, S. L.; Maroncelli, M.; Quitevis, E. L. (2016) <i>J. Chem. Eng. Data</i> 61(3), 1078-1091.
8.	1-butyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide			Blokhin, A. V.; Paulechka, Y. U.; Strechan, A. A.; Kabo, G. J. (2008) <i>J. Phys. Chem. B</i> 112(14), 4357-4364.

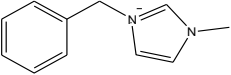
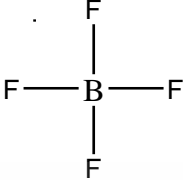
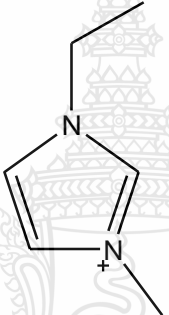

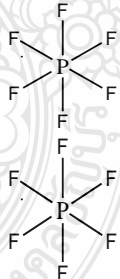
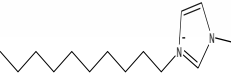
9.	1-butyl-3-methylimidazolium bromide		Br	Paulechka, Y. U.; Kabo, G. J.; Blokhin, A. V.; Shaplov, A. S.; Lozinskaya, E. I.; Vygodskii, Y. S. (2007) J. Chem. Thermodyn. 39(1), 158-166.
10.	1-methyl-3-pentylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide			Shirota, H.; Mandai, T.; Fukazawa, H.; Kato, T. (2011) J. Chem. Eng. Data 56(5), 2453-2459.
11.	1-benzyl-3-methylimidazolium 1,1,1,2-tetrafluoroethanesulfonate			Serra, P. B. P.; Ribeiro, F. M. S.; Rocha, M. A. A.; Fulem, M.; Ruzicka, K.; Santos, L. M. N. B. F. (2016) J. Chem. Thermodyn. 100, 124-130.
12.	1-(2-hydroxyethyl)-3-methyl-1H-imidazolium chloride		Cl	Sun, J.; Zhang, S.; Cheng, W.; Ren, J. (2008) Tetrahedron Lett. 49, 3588-3591.
13.	1-benzyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate			Serra, P. B. P.; Ribeiro, F. M. S.; Rocha, M. A. A.; Fulem, M.; Ruzicka, K.; Santos, L. M. N. B. F. (2016) J. Chem. Thermodyn. 100, 124-130.

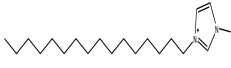
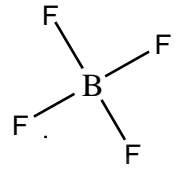
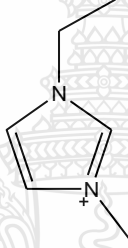
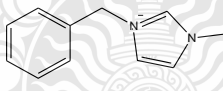
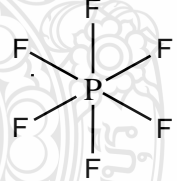
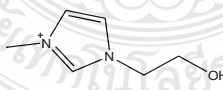
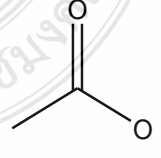
14.	1-hexadecyl-3-methylimidazolium bromide		Br	Zhu, J.; Bai, L.; Chen, B.; Fei, W. (2009) Chem. Eng. J. 147, 58-62.
15.	1-dodecyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate			Vila, J.; Fernandez-Castro, B.; Rilo, E.; Carrete, J.; Dominguez-Perez, M.; Rodriguez, J. R.; Garcia, M.; Varela, L. M.; Cabeza, O. (2012) Fluid Phase Equilib. 320, 1-10.
16.	1-decyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate			Serra, P. B. P. (2013) M.Sc. Thesis, Universidade do Porto.
17.	1-benzyl-3-methylimidazolium 1,1,2,2-tetrafluoroethanesulfonate			Serra, P. B. P.; Ribeiro, F. M. S.; Rocha, M. A. A.; Fulem, M.; Ruzicka, K.; Santos, L. M. N. B. F. (2016) J. Chem. Thermodyn. 100, 124-130.
18.	1-methyl-3-octylimidazolium tetrafluoroborate			Paulechka, Y. U.; Blokhin, A. V.; Kabo, G. J. (2015) Thermochim. Acta 604, 122-128.

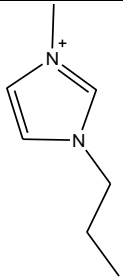
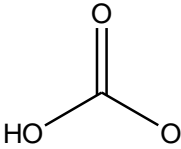
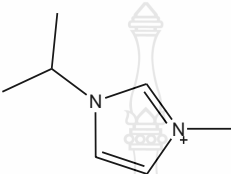
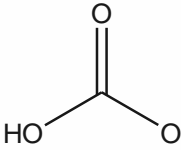

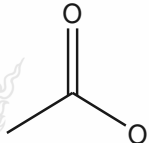
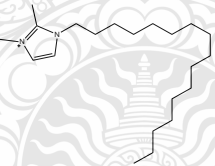
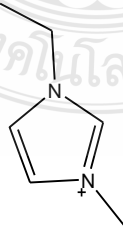
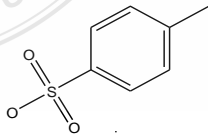
19.	1,2-dimethyl-3-propylimidazolium hexafluorophosphate			<p>Ngo, H. L.; LeCompte, K.; Hargens, L.; McEwen, A. B. (2000) <i>Thermochim. Acta</i> 357-358, 97-102.</p>
20.	1-ethyl-3-methylimidazolium bis[(trifluoromethyl)sulfonyl]imide			<p>Paulechka, Y. U.; Blokhin, A. V.; Kabo, G. J.; Strechan, A. A. (2007) <i>J. Chem. Thermodyn.</i> 39(6), 866-877.</p>
21.	1-ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate			<p>Vila, J.; Fernandez-Castro, B.; Rilo, E.; Carrete, J.; Dominguez-Perez, M.; Rodriguez, J. R.; Garcia, M.; Varela, L. M.; Cabeza, O. (2012) <i>Fluid Phase Equilib.</i> 320, 1-10.</p>
22.	1-butyl-3-methylimidazolium chloride		Cl	<p>Yamamuro, O.; Minamimoto, Y.; Inamura, Y.; Hayashi, S.; Hamaguchi, H.-o. (2006) <i>Chem. Phys. Lett.</i> 423, 371-375.</p>

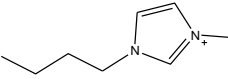
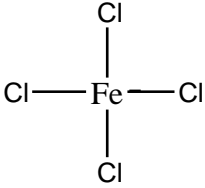

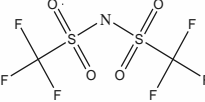
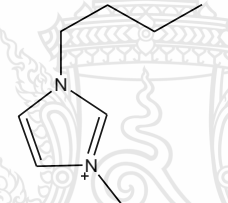
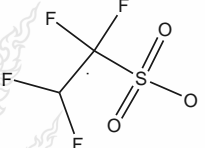
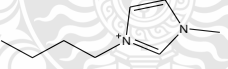
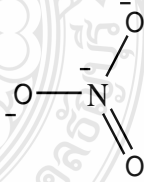
23.	1-decyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate			Vila, J.; Fernandez-Castro, B.; Rilo, E.; Carrete, J.; Dominguez-Perez, M.; Rodriguez, J. R.; Garcia, M.; Varela, L. M.; Cabeza, O. (2012) Fluid Phase Equilib. 320, 1-10.
24.	1-ethyl-3-methylimidazolium bis[(trifluoromethyl)sulfonyl]imide			Paulechka, Y. U.; Blokhin, A. V.; Kabo, G. J.; Strechan, A. A. (2007) J. Chem. Thermodyn. 39(6), 866-877.
25.	1-benzyl-3-methyl-1H-imidazolium chloride		Cl	Serra, P. B. P.; Ribeiro, F. M. S.; Rocha, M. A. A.; Fulem, M.; Ruzicka, K.; Santos, L. M. N. B. F. (2016) J. Chem. Thermodyn. 100, 124-130.
26.	1-methyl-3-propylimidazolium hexafluorophosphate			Serra, P. B. P. (2013) M.Sc. Thesis, Universidade do Porto.
27.	1-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate			Kabo, G. J.; Blokhin, A. V.; Paulechka, Y. U.; Kabo, A. G.; Shymanovich, M. P.; Magee, J. W. (2004) J. Chem. Eng. Data 49(3), 453-461.

28.	1-methyl-3-octylimidazolium chloride		Cl	Domanska, U.; Bogel-Lukasik, E.; Bogel-Lukasik, R. (2003) Chem. Eur. J. 9, 3033-3041.
29.	1-dodecyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate			Serra, P. B. P. (2013) M.Sc. Thesis, Universidade do Porto.
30.	1-methyl-3-octylimidazolium tetrafluoroborate			Paulechka, Y. U.; Blokhin, A. V.; Kabo, G. J. (2015) Thermochim. Acta 604, 122-128.
31.	1-ethyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate			Serra, P. B. P. (2013) M.Sc. Thesis, Universidade do Porto.
32.	1-hexyl-3-methylimidazolium iodide		I	Yamamuro, O.; Kofu, M. (2017) IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 196, 012001-1-012001-4
33.	1-benzyl-3-methylimidazolium 1,1,2,2-tetrafluoroethanesulfonate			Serra, P. B. P. (2013) M.Sc. Thesis, Universidade do Porto.

34.	1-benzyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate			Serra, P. B. P.; Ribeiro, F. M. S.; Rocha, M. A. A.; Fulem, M.; Ruzicka, K.; Santos, L. M. N. B. F. (2016) J. Chem. Thermodyn. 100, 124-130.
35.	1-ethyl-3-methylimidazolium chloride		Cl	Vila, J.; Fernandez- Castro, B.; Rilo, E.; Carrete, J.; Dominguez-Perez, M.; Rodriguez, J. R.; Garcia, M.; Varela, L. M.; Cabeza, O. (2012) Fluid Phase Equilib. 320, 1-10.
36.	3,3'-(butane-1,4-diyl)bis(1-methyl-1H-imidazolium) hexafluorophosphate(V)			yang, x.; Wang, J.; Sun, X. (2011) Beijing Huagong Daxue Xuebao, Ziran Kexueban 38(2), 27-31.
37.	1-decyl-3-methylimidazolium bromide		Br	Zhu, J.; Bai, L.; Chen, B.; Fei, W. (2009) Chem. Eng. J. 147, 58-62.

38.	1-hexadecyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate			Vila, J.; Fernandez-Castro, B.; Rilo, E.; Carrete, J.; Dominguez-Perez, M.; Rodriguez, J. R.; Garcia, M.; Varela, L. M.; Cabeza, O. (2012) Fluid Phase Equilib. 320, 1-10.
39.	1-ethyl-3-methylimidazolium bromide		Br	Vila, J.; Fernandez-Castro, B.; Rilo, E.; Carrete, J.; Dominguez-Perez, M.; Rodriguez, J. R.; Garcia, M.; Varela, L. M.; Cabeza, O. (2012) Fluid Phase Equilib. 320, 1-10.
40.	1-benzyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate			Serra, P. B. P. (2013) M.Sc. Thesis, Universidade do Porto.
41.	1-(2-hydroxyethyl)-3-methylimidazolium acetate			Brunig, T.; Krekic, K.; Bruhn, C.; Pietschnig, R. (2016) Chem. Eur. J. 22(45), 16200-16212.

42.	1-methyl-3-propylimidazolium hydrogen carbonate			Brunig, T.; Krekic, K.; Bruhn, C.; Pietschnig, R. (2016) Chem. Eur. J. 22(45), 16200-16212.
43.	1-isopropyl-3-methylimidazolium hydrogen carbonate			Brunig, T.; Krekic, K.; Bruhn, C.; Pietschnig, R. (2016) Chem. Eur. J. 22(45), 16200-16212.
44.	1,3-dimethylimidazolium acetate			Brunig, T.; Krekic, K.; Bruhn, C.; Pietschnig, R. (2016) Chem. Eur. J. 22(45), 16200-16212.
45.	1-hexadecyl-2,3-dimethylimidazolium bromide		Br	Zhu, J.; Bai, L.; Chen, B.; Fei, W. (2009) Chem. Eng. J. 147, 58-62.
46.	1-ethyl-3-methylimidazolium 4-methylbenzenesulfonate			Vila, J.; Fernandez-Castro, B.; Rilo, E.; Carrete, J.; Dominguez-Perez, M.; Rodriguez, J. R.; Garcia, M.; Varela, L. M.; Cabeza, O. (2012) Fluid Phase Equilib. 320, 1-10.

47.	1-butyl-3-methylimidazolium tetrachloroferrate			Yamamuro, O.; Inamura, Y. (2006) AIP Conf. Proc. 832, 73.
48.	1-decyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl)amide			Paulechka, E.; Blokhin, A. V.; Rodrigues, A. S. M. C.; Rocha, M. A. A.; Santos, L. M. N. B. F. (2016) J. Chem. Thermodyn. 97, 331-340.
49.	1-butyl-3-methylimidazolium trifluoromethanesulfonate			Paulechka, Y. U.; Kohut, S. V.; Blokhin, A. V.; Kabo, G. J. (2010) Thermochim. Acta 511(1-2), 119-123.
50.	1-butyl-3-methylimidazolium nitrate			Strechan, A. A.; Kabo, A. G.; Paulechka, Y. U.; Blokhin, A. V.; Kabo, G. J.; Shaplov, A. S.; Lozinskaya, E. I. (2008) Thermochim. Acta 474(1-2), 25-31.

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบซีโอไลต์ที่ห่อหุ้มของเหลวไอออนิกเพื่อกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จากก๊าซเผาไหม้ของโรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรม ด้วยระเบียบวิธีเคมีค่านวนพบว่าของเหลวของเหลวไอออนิกซึ่งประกอบด้วยสารประกอบอินทรีย์ที่มีประจุสุทธิเป็นบวก และสารประกอบอินทรีย์หรือสารประกอบอนินทรีย์ที่มีประจุเป็นลบสามารถนำมาใช้ดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพในการละลายก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้สูง ในการศึกษาของเหลวไอออนิกถูกแบ่งออกเป็น 4 ชนิดคือ กัวนิดีนีน ไฮดรอกซิลแอมโมเนียม อิมิดาโซลควอเทอร์นารีแอมโมเนียมของเหลวไอออนิก และเลือกใช้ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 และ FAU เป็นวัสดุห่อหุ้มของเหลวไอออนิกเพื่อใช้ในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เพราะลักษณะเฉพาะของซีโอไลต์ดังกล่าวที่มีต่อการการแยกก๊าซหลายๆ ชนิดออกจากกัน ทำให้สามารถจัดปัญหาอิทธิพลของก๊าซชนิดอื่นๆ ที่มีผลต่อการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในโพรงของซีโอไลต์ได้ การศึกษาด้วยระเบียบวิธีทางเคมีค่านวนช่วยค้นกรองหาสารประกอบอินทรีย์ที่เหมาะสมจากการใช้สารประกอบอินทรีย์ที่มีจำนวนหลากหลายชนิด และลดขั้นตอนการลองถูกลองผิด ลดงบประมาณค่าดำเนินการและสารเคมีได้

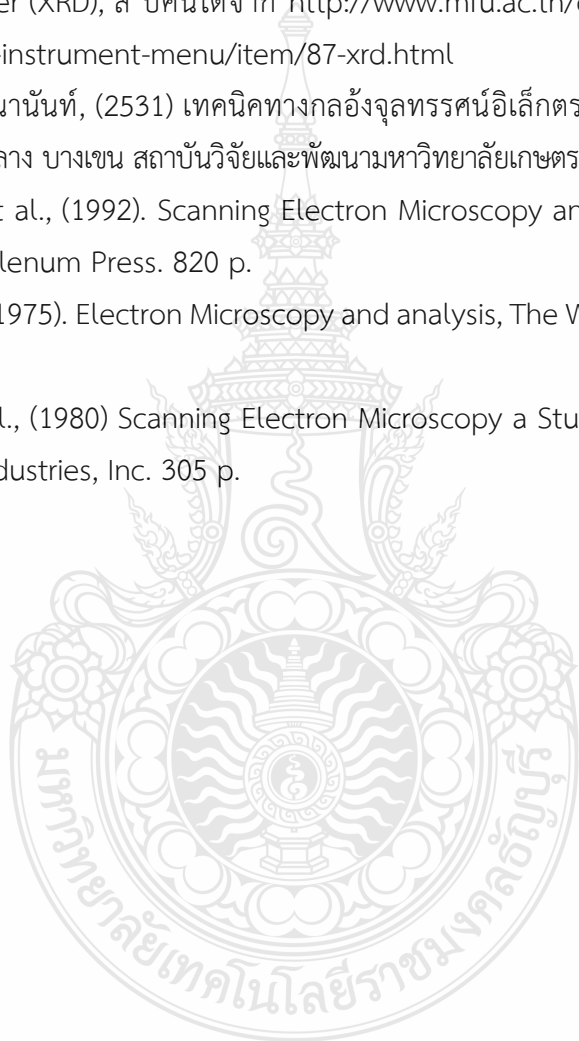
จากผลการวิจัยพบว่าปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คืออันตรกิริยาระหว่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไอออนที่มีประจุลบบนของเหลวไอออนิก การคำนวณโดยเปลี่ยนหมู่ให้อิเล็กตรอนของประจุลบบนของเหลวไอออนิก ถูกปรับปรุงให้ดูดซับได้ดียิ่งขึ้น โดยพบว่าหมู่ให้อิเล็กตรอนชนิดอีเธอร์นั้น เพิ่มความสามารถในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์บนของเหลวไอออนิกด้วยพลังงานในการดูดซับที่อยู่ในช่วงระหว่าง -25 ถึง -30 กิโลแคลอรีต่อโมล ในขณะที่หมู่ฟังก์ชันประจุบวกจะไม่ส่งผลกระทบต่อพลังงานการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์บนของเหลวไอออนิก

บรรณานุกรม

1. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติฉบับที่ 24 (พ.ศ. 2547) เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติพ.ศ. 2535 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 121 ตอนพิเศษ 104 ง. วันที่ 22 กันยายน พ.ศ. 2547
2. H. Gao, C. Li, G. Zeng, W. Zhang, L. Shi, X. Fan, Y. Zeng, Q. Wen, X. Shu, (2011). Experimental study of wet flue gas desulphurization with a novel type PCF device, Chem. Eng.Prog., (50), 189 -195.
3. H. LIN, P. BAI, X.-G. GUO, (2014). Ionic liquids for SO₂ capture: development and progress, Asian J. Chem., 26 (9) 2501 -2506.
4. A. Mondal, S, Balasubramanian, (2016). Understanding SO₂ capture by ionic liquids, J. Phys. Chem B., (120) 4457 -4466.
5. G. Cui, Y. Huang, R. Zhang, F. Zhang, J. Wang, (2015). Highly efficient and reversible SO₂ capture by halogenated carboxylate ionic liquids, RSC. Adv., (5) 60975 -60982.
6. W. Wu, B. Han, H. Gao, Z. Liu, T. Jiang and J. Huang, (2004). Desulfurization of flue gas: SO₂ absorption by an ionic liquid, Angew. Chem. Int. Ed., (43) 2415 -2417.
7. J. Huang, A. Riisager, P. Wasserscheid, R. Fehrmann, (2006). Reversible physical absorption of SO₂ by ionic liquids, Chem. Commun., (38) 4027 -4029.
8. J. Huang, A. Riisager, R. W. Berg, R. Fehrmann, (2008). Tuning ionic liquids for high gas solubility and reversible gas sorption, J. Mol. Catal. A., (279) 170 -176.
9. X .L. Yuan, S. J. Zhang, X. M. Lu, (2007). Hydroxyl ammonium ionic liquids: synthesis, properties, and solubility of SO₂, J. Chem. Eng. Data., (52) 596 -599.
10. B. Liu, F. Wei, J. Zhao and Y. Wang, (2003). Characterization of amide-thiocyanate eutectic ionic liquids and their application in SO₂ absorption, RSC Adv., (3) 2470-2476.
11. M. B. Shiflett, A. Yokozeki, (2010). Chemical absorption of Sulfur dioxide in room temperature ionic liquids, Ind. Eng. Chem. Res., (49) 1370-1377. 61
12. B. Liu, Y. Liu, (2016). Characterization of functionalized imidazolium ionic liquids and their application in SO₂ absorption, Environ. Eng. Sci., 33 (6) 384 - 393.

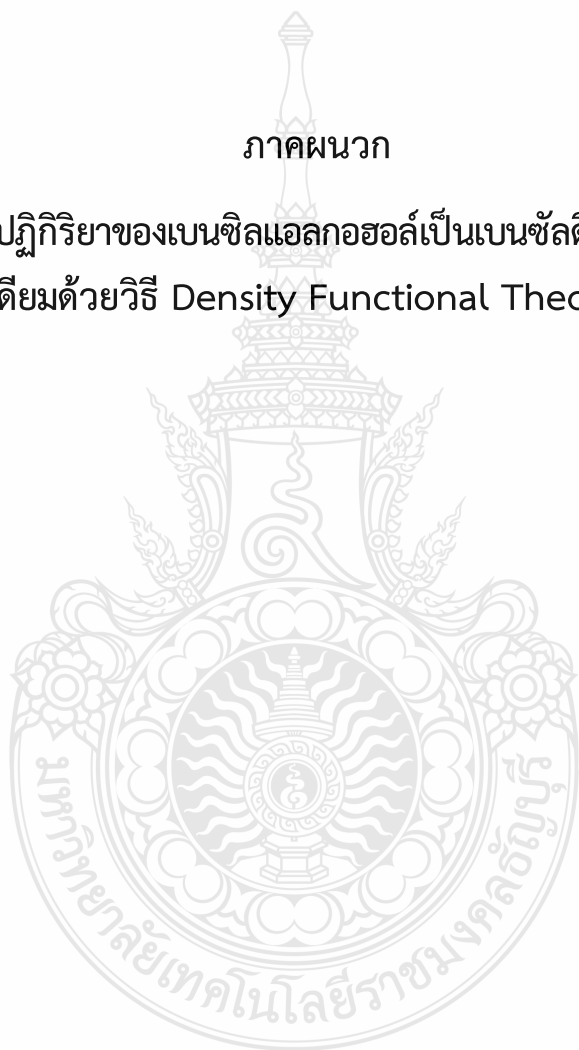
13. C. M. Wang, G. K. Cui, X. Y. Luo, Y. J. Xu, H.R. Li, S. Dai, (2011). Highly efficient and reversible SO₂ capture by tunable azole - based ionic liquids through multiple-site chemical absorption. *J. Am. Chem. Soc.* (133) 11916 - 11919.
14. M. Freemantle, (2010). *An Introduction to ionic liquids*, RSC Pub, Cambridge, UK.
15. P. Walden, *Bull. Acad. Imper. Sci.* 1914 (n.d.) 1800.
16. V.N. Emel'yanenko, G. Boeck, S.P. Verevkin, R.L. udwig, *Volatile Times for the Very First Ionic Liquid : Understanding the Vapor Pressures and Enthalpies of Vaporization of Ethy lammonium Nitrate*, *Chem. - Eur. J.* 11640 - 11645, doi:10.1002/chem.201403508, 2014.
17. J.B. Goodenough, Y. Kim, (2010). Challenges for Rechargeable Li Batteries †, *Chem. Mater.* (22) 587–603. doi:10.1021/cm901452z.
18. W. Chansuvarn, Ph.D, (2014). Adsorption efficiency of lead (II) ion from aqueous solution by using an aerated concrete as adsorbent.
19. จตุพร วิทยาคุณ และ นุรักษ์กฤษฎานุรักษ์, การเร่ง ปฏิกิริยา : พื้นฐานและการประยุกต์ (พิมพ์ครั้งที่ 1), กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 146 - 149, 2547.
20. J.H. Baik, S.D. Yim, I.S. Nam, Y.S. Mok, J.H. Lee, B.K. Cho, S.H. oh, (2013). Control of NO_x emissions from diesel engine by selective catalytic reduction (SCR) with urea, *Top, Catal.* 37 -41.
21. G. Carja, Y. Kameshima, K. Okada, C.D. Madhusoodana, (2003). Mn - Ce/ZSM5 as a new superior catalyst for NO reduction with NH₃, *Appl, Catal, Environ*, 60 -64.
22. G. Centi, C. Nigro, S. Perathoner, G. Stella, (1993). Role of the support and of adsorbed species on the behavior of Cu-based catalysts for No conversion, *Catal*, 159-166.
23. A.N. Ergun, Z.O. Kocabas, M. Baysal, A. Yurum, Y. Yurum, (2015). Synthesis of mesoporus MCM -41 meterial with low -power microwave heating, *Chem Eng Comm*, 200, 1057-1070. 62
24. D.S. Kim, J.S. Chang, W.Y. Kim, (2015). Synthesis of MCM - 41 using microwave heating with ethylene glycol, Sang - Eon Park Corresponding author contact information, *Catal Today*, 44, 301 -308.
25. W. Tongon, C. Chawengkijwanich, C., S. Chiarakorn, (2014). Visible light responsive Ag/Tio₂/MCM – 41 nanocomposite films synthesized by a microwave assisted sol – gel technique, *Superlattice Microst*, 69, 108 - 121.

26. H. Zhuang, Bai, S., Liu, X., & Yan, Z., (2015). Structural and performance of Cu/ZrO₂ catalyst for the synthesis of methanol from CO₂ hydrogenation. *J Fuel Chem Technol*, 38(4), 462-467.
27. S. Makul, (2014). Forensic analysis of soil sample by the X - ray diffraction (XRD) method.
28. ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง, (2555). X - ray Diffractometer (XRD), สืบค้นได้จาก <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/x-ray-analysis-instrument-menu/item/87-xrd.html>
29. อุไรวรรณ ดิลกคุณานันท์, (2531) เทคนิคทางกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเบื้องต้น, ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์กลาง บางเขน สถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 74 น.
30. J.I. Goldstein, et al., (1992). *Scanning Electron Microscopy and X - ray Microanalysis*, New York: Plenum Press. 820 p.
31. P.L. Goodhew, (1975). *Electron Microscopy and analysis*, The Wykeham Science Series, 191 p.
32. T. Michael, et al., (1980) *Scanning Electron Microscopy a Student's Handbook*, Ladd Research Industries, Inc. 305 p.



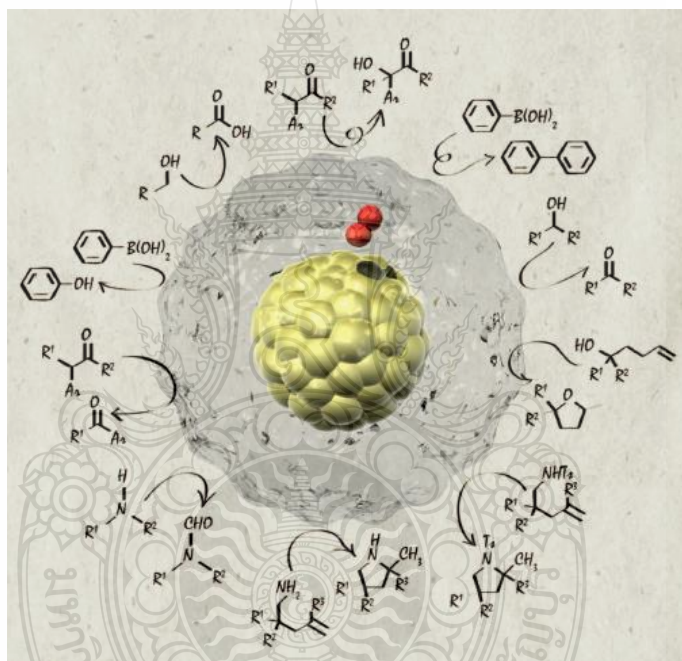
ภาคผนวก

การศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาของเบนซิลแอลกอฮอล์เป็นเบนซิลดีไฮด์บนทองและทอง
พลาติเนียมด้วยวิธี Density Functional Theory (DFT)



การศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาของเบนซิลแอลกอฮอล์เป็นเบนซัลดีไฮด์บนทองและทองพาลาเดียม
ด้วยวิธี Density Functional Theory (DFT)
Catalytic oxidation of benzyl alcohol to benzaldehyde on Gold and
Gold/Palladium clusters : A DFT study

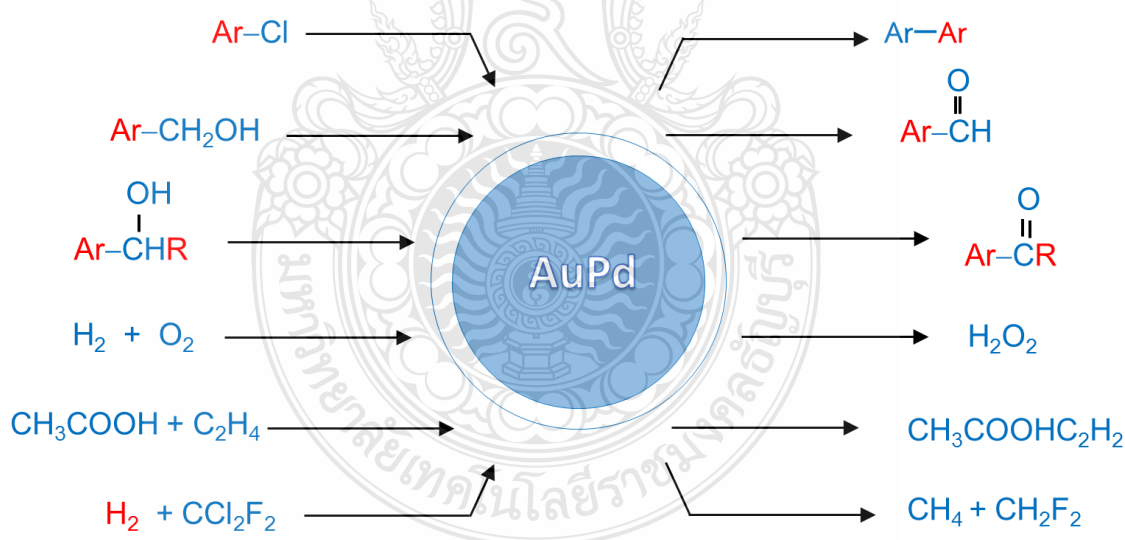
ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาตัวเร่งปฏิกิริยาทาง เคมีอินทรีย์สังเคราะห์ได้รับการพัฒนาออกมา
มากมาย โดยมีจุดมุ่งหมายหลักคือเพื่อให้ได้สารผลิตภัณฑ์ใน ปริมาณที่สูง ในขณะที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาใน
ปริมาณที่ น้อย และปฏิกิริยาสามารถดำเนินไปได้อย่างรวดเร็ว ภายใต้สภาวะอุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิต่ำ
ที่สุด รวมทั้ง ก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดด้วย



รูปที่ 1 Gold nanoclusters ในตัวกลางที่เป็นของเหลวจะถูกงานในรูปของ
ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันแอโรบิกต่างๆ

หนึ่งในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้รับความสนใจและ ได้รับการพัฒนาเป็นอย่างมากในปัจจุบัน ก็คือ
ตัวเร่ง ปฏิกิริยาที่มีส่วนผสมของโลหะทอง (gold catalyst) โดยมักจะทำให้อยู่ในรูปของอนุภาคขนาด
เล็กระดับนา โนมเมตรที่เรียกว่า nanoparticles ทั้งนี้ในช่วงหลายปี มานี้มีงานวิจัยที่ใช้ gold
nanoparticles เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยาถูกตีพิมพ์ออกมาเป็นจำนวนมาก เป็นที่ทราบกันดีว่า ทองใน
ลักษณะที่เป็นทอง บริสุทธิ์ (bulk gold) เป็นโลหะที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา แต่เมื่อถูกพัฒนาให้อยู่ใน
รูปแบบที่เป็น gold nanoparticles พบว่าสามารถเร่งปฏิกิริยาทางเคมี อินทรีย์สังเคราะห์ต่างๆ ได้ดี
กว่าเดิม และปฏิกิริยาเคมีอินทรีย์เหล่านั้นดำเนินไปแบบมีความเฉพาะเจาะจง มากขึ้นทั้งด้าน chemo-

และ regio-selectivity เมื่อ เทียบกับการใช้โลหะทรานสิชันอื่นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ในขั้นตอนของการสังเคราะห์ gold nanoparticles นั้นเรายังสามารถควบคุมขนาดของ gold nanoparticles เพื่อให้เหมาะกับการใช้งานได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามในการสังเคราะห์ gold nanoparticles นั้นจำเป็นต้องมีโมเลกุลที่เรียกว่าตัวรองรับ (support) เพื่อให้โลหะทองสามารถเกาะติดอยู่ บนโมเลกุลของตัวรองรับเหล่านั้น ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้และการนำกลับมาใช้ใหม่ในภายหลัง แต่ การใช้ gold nanoparticles นั้นอาจจะมีปัญหาที่เกิด จากการจับตัวกันเองของ gold nanoparticles ที่ เรียกว่า aggregation ทำให้ขนาดของ gold nanoparticles มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ดังนั้นจึงน่าจะเป็นการดีถ้าสามารถพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่จำเป็นต้องใช้ตัวรองรับสำหรับโลหะขึ้นมาได้แนวคิดนี้จึงนำไปสู่การพัฒนา nanoporous gold ขึ้นมาสำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่ง nanoporous gold นั้นเป็นโครงสร้างที่มี ขนาดเล็ก มีรูพรุนขนาดเล็กระดับนาโนเมตร มี อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่สูง ไม่มีพิษ และโลหะทองที่อยู่บนพื้นผิวของ nanoporous gold นี้มี ความว่องไวต่อปฏิกิริยามาก ด้วยข้อดีของ nanoporous gold เหล่านี้จึงทำให้มันเป็น heterogeneous catalyst ที่น่าสนใจ นอกจากนี้การที่ไม่มีตัวรองรับเหมือนกับกรณีของ nanoparticles ยังทำให้ ง่ายต่อการเข้าใจ catalytic activity ที่แท้จริงของ ตัวเร่งปฏิกิริยานั้น โดยไม่ต้องคำนึงถึง support effect ของตัวรองรับอีกด้วยทั้งนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ยังง่ายต่อการนำ กลับมาใช้ใหม่ โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนที่ยุ่งยากเหมือน อย่างกับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเก่า เช่น กรณีของ metal nanoparticles



ได้ศึกษาวิธีการเร่งปฏิกิริยาของ AuPd รูปแบบ Bimetallic ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ของ Benzyl alcohol เป็น Benzaldehyde เพื่อทดสอบคุณสมบัติของโครงสร้างกับระบบ Bimetallic โดยที่ขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ Bimetallic จะสามารถทำงานได้ดีกว่ารูปแบบ Gold nanoparticle และยังสามารถนำมาใช้งานทางอุตสาหกรรมได้หลายประการ

เริ่มต้นจะทำการ Generating โครงสร้างให้มีความเสถียรของ Au and Au/Pd bimetallic nanoclusters (NC) ด้วย

Computational Details

1. Generating the stable Au and Au/Pd bimetallic nanoclusters (NC)

Gupta many-body empirical potential

Genetic Algorithm

Birmingham Cluster Genetic Algorithm (BCGA) program

2. DFT calculations: Reaction mechanisms

M06 functional

6-31G(d,p) for H, C, and Br

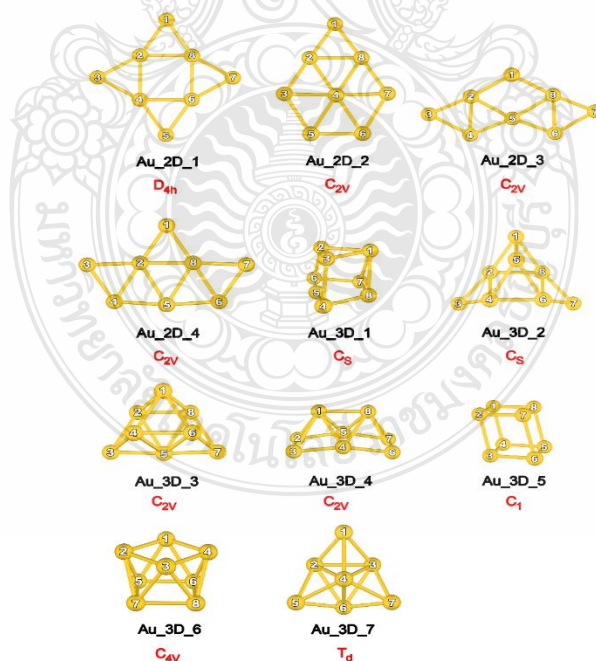
LANL2DZ for Au and Pd

SMD solvation model (Solvent = water)

GAUSSIAN09

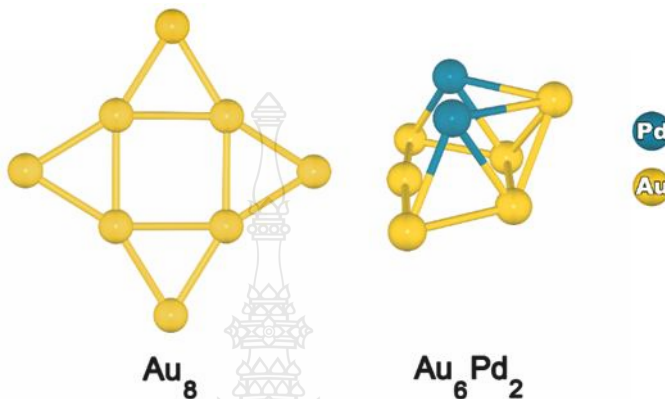
วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีและตรวจสอบกลไกของการเกิดปฏิกิริยาแอโรบิกออกซิเดชันของเบนซิลแอลกอฮอล์เป็นเบนซิลดีไฮด์บนทองและทองพลาเลียม
2. เพื่ออธิบายบทบาทของออกซิเจนและพลาเลียมของทองพลาเลียมที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยา

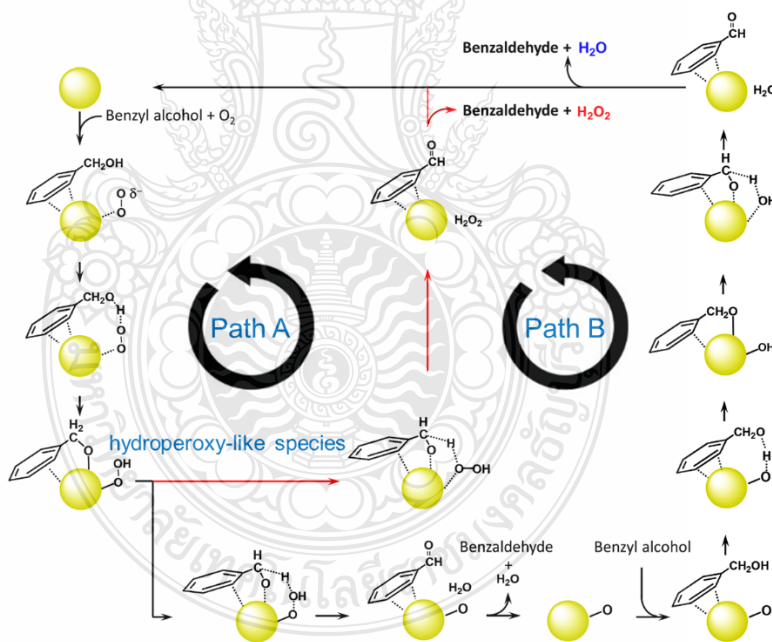


รูปที่ 2. Optimized 2D และ 3D โครงสร้างของ Au₈

เริ่มต้นจะทำการคำนวณ Generated Au₈ และ Pd₂ ซึ่งจะมีอยู่หลาย Isomer หลังจากนั้นจะทำการ Optimized โครงสร้างใหม่เพื่อให้ได้ตัวที่มีความเสถียรที่สุดด้วยวิธีการคำนวณ Density Functional Theory (DFT) ซึ่งตัวของ Au₈ และ Au₆Pd₂ เป็นตัวที่เสถียรที่สุด



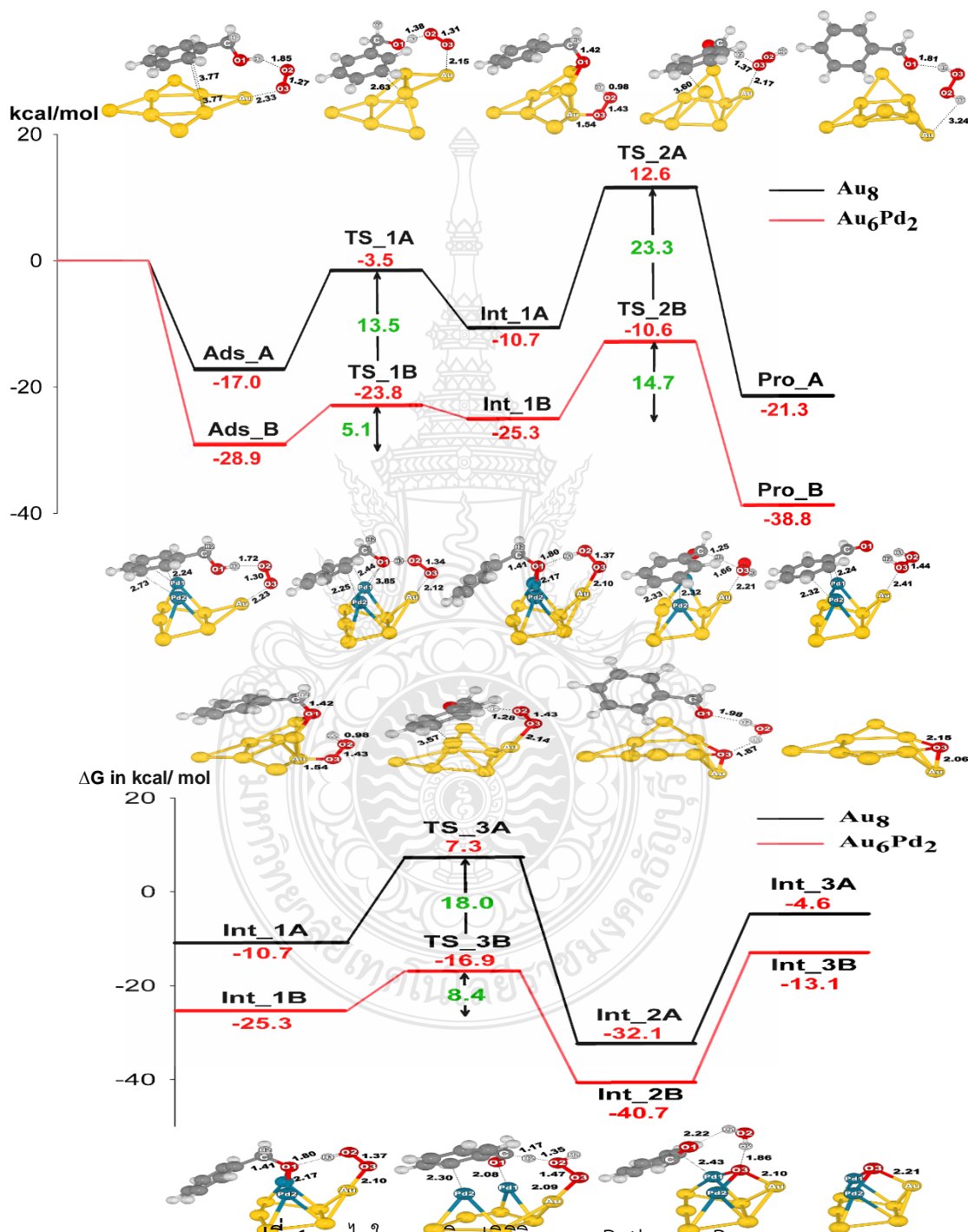
รูปที่ 3. โครงสร้างที่เสถียรที่สุดของ Au₈ and Au₆Pd₂



รูปที่ 4. กลไกของการเกิดปฏิกิริยาแอโรบิกออกซิเดชัน

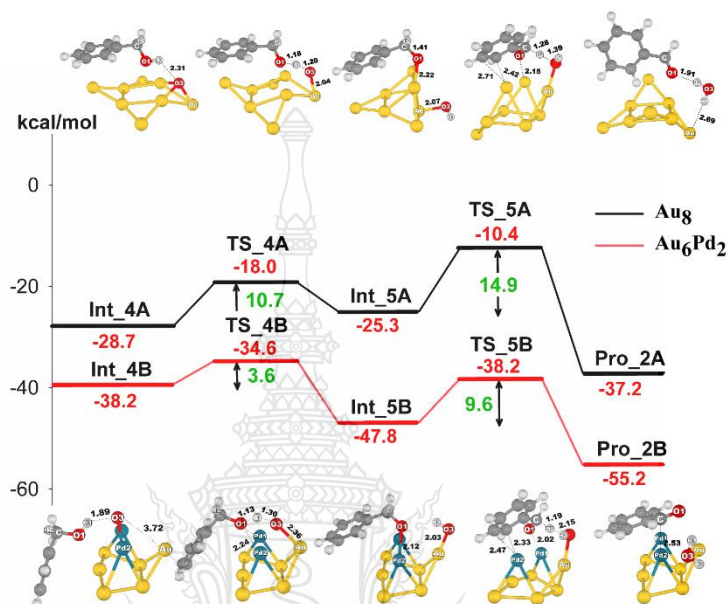
ในกระบวนการนี้จะเป็นการศึกษากลไกของปฏิกิริยาแอโรบิกออกซิเดชัน โดยเริ่มจากที่มี Benzyl alcohol กับ O₂ มา adsorbed อิเล็กตรอนจาก Au จะถ่ายเทมาที่ Molecule O₂ ก็จะกลายเป็น Superoxo-like species เกิดที่ Transition state โดยการดึง atom H มาจากหมู่ไฮดรอกซิล

ลของ Benzyl alcohol โดยตัว Superoxo-like species จะเกิดเป็น Hydroperoxy-like species โดยโมเดลที่หยิบมาใช้สามารถกระตุ้น Molecule O_2 ได้ จึงได้ทำการ Optimized โครงสร้างออกมา



รูปที่ 6. กลไกในการเกิดปฏิกิริยาของ Path way B

ที่ปฏิกิริยาของ Pathway B จะเกิดการดึงไฮโดรเจนอะตอมจาก alkoxide จนเกิดเป็นน้ำและ Benzaldehyde หลังจากที่มีการคายชั้นน้ำกับ Benzaldehyde จะเหลืออะตอมของ O₂ ติดอยู่บน Au₆Pd₂ และบน Au₈ Cluster พบว่าขั้นตอนดังกล่าวที่เกิดขึ้นบน Au₆Pd₂ จะใช้พลังงานกระตุ้นน้อยกว่าบน Au₈ Cluster คือ 8.4 กับ 14.0 kcal mol⁻¹



รูปที่ 6. กลไกในการเกิดปฏิกิริยาของ Path way B (ต่อ)

ต่อไปสารตั้งต้น Benzyl alcohol อีก 1 molecule จะถูกดูดซับบน Au₆Pd₂ และบน Au₈ Cluster จากนั้นจะเกิดการดึงไฮโดรเจนอะตอมจากหมู่ไฮดรอกซิลของ alkoxide จนเกิดเป็นน้ำกับสารผลิตภัณฑ์ พบว่าขั้นตอนดังกล่าวที่เกิดขึ้นบน Au₆Pd₂ จะใช้พลังงานกระตุ้นน้อยกว่าบน Au₈ Cluster คือ 9.6 กับ 14.9 kcal mol⁻¹ โดยที่ขั้นตอนดังกล่าวที่เกิดขึ้นบน Au₆Pd₂ ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาแอโรบิกออกซิเดชันของ Benzyl alcohol จะเกิดบน Au₆Pd₂ ได้ดีกว่าบน Au₈ Cluster

สรุปผลงานวิจัย

1. ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้จากการกระตุ้นของ O₂ molecule บน Au₆Pd₂ และบน Au₈ Cluster เกิดเป็น Peroxide-like species.
2. บทบาทของ Pd₂ ในการทำปฏิกิริยานี้คือ

2.1 เพิ่มการกระจายตัวของอิเล็กตรอนจาก Pd₂ ไปสู่อะตอมของ Au₆ ที่ใกล้ที่สุด ซึ่งจะช่วยให้กระตุ้น O₂ ได้ดีขึ้น

2.1 ช่วยทำให้พลังงาน Transition state มีความเสถียรภาพสูงระหว่าง NBO donor-acceptor orbital ส่งผลให้พลังงานการกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดบน Au_6Pd_2 ต่ำกว่าปฏิกิริยาที่เกิดบน Au_8 Cluster

3. ที่ปฏิกิริยา Pathway B ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเกิดการ Deprotonation พันธะ O-H ของ benzyl alcohol ตามด้วยเกิดการ dissociation พันธะ C-H β ที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็น Benzaldehyde กับน้ำ

4. ที่ปฏิกิริยา Pathway A มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สามารถที่จะทำปฏิกิริยาที่มีความเหมาะสมได้โดยตัวเร่งปฏิกิริยา เพราะเนื่องจากมีพลังงานการกระตุ้นที่ต่ำ



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายศิริชัย สุขสถิตย์
วันเดือนปีเกิด	14 กรกฎาคม 2563
ที่อยู่	129/9 หมู่ 3 ตำบลคลองใหญ่ อำเภอคลองใหญ่ จังหวัดตราด 23110
การศึกษา	ปริญญาโท คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	นักวิชาการศึกษาประจำสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ. 2562 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	09-8416-2366
อีเมล	sirichai_so@mail.rmutt.ac.th

