ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
247460

การสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่มีโลหะทรานซิชัน โดยการเติมเกลือโลหะโคบอลต์ ลงในรีโซซินอล/ฟอร์มอลดีไฮด์ เรซิน

นางสาวศิรัญญา คุ้มไข่น้ำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

b 00252471

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
247460

การสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่มีโลหะทรานซิชัน โดยการเติมเกลือโลหะโดยตรงลงในรีโซซินอล/ฟอร์มอลดีไฮด์ เจล

นางสาวหิรัญญา คุ้มไข่น้ำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5070500321

SYNTHESIS OF TRANSITION METAL-DOPED POROUSCARBONACEOUS MATERIALS BY DIRECT ADDITION OF METAL SALT TO RESORCINOL/FORMALDEHYDE GEL

Miss Hiranya Khoomkhainum

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่มีโลหะทรานซิชันโดยการเติมเกลือโลหะโดยตรงลงในรีโซซินอล/ฟอร์มอลดีไฮด์เจล
โดย	นางสาวหิรัญญา คุ้มไข่น้ำ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารธวัช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารธวัช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรงค์ ปวราจารย์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. นาวิน วิริยะเอี่ยมพิกุล)

หิรัญญา คุ้มไข่น้ำ : การสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนรองรับโลหะทรานซิชันโดยการเติมเกลือโลหะลงในรีโซซินอล/ฟอร์มอลดีไฮด์ เจล (SYNTHESIS OF TRANSITION METAL-DOPED POROUSCARBONACEOUS MATERIALS BY DIRECT ADDITION OF METAL SALT TO RESORCINOL/FORMALDEHYDE GEL) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร.อภินันท์ สุทธิธารธวัช, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล, หน้า.

247460

วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนรองรับโลหะทรานซิชันนิกเกิลและเหล็กสามารถเตรียมได้จากกระบวนการโซล-เจล ด้วยวิธีการควบแน่นสารผสมระหว่างรีโซซินอล/ฟอร์มอลดีไฮด์ Pluronic F127 และโลหะอะซีเทต ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนและทำการเผาให้เป็นคาร์บอนภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยในระหว่างขั้นตอนการเผา Pluronic F127 ถูกกำจัดออก ส่งผลให้เกิดรูพรุนภายในวัสดุคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ โดยศึกษารูปแบบโครงสร้างของวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนรองรับโลหะทรานซิชันและการกระจายตัวของโลหะทรานซิชันบนวัสดุคาร์บอนรูพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านและคุณสมบัติของรูพรุนโดยกระบวนการดูดซับ-คายซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส พบว่าที่อัตราส่วนระหว่างรีโซซินอล/ฟอร์มอลดีไฮด์เท่ากับ 1:1.4 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนรูพรุน ซึ่งแสดงพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 444 ตารางเมตรต่อกรัมและ 0.46 ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม ตามลำดับ มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่ 3.09 นาโนเมตร โดยวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนรองรับโลหะนิกเกิลที่สังเคราะห์ได้มีสมบัติรูพรุนที่ดีกว่าวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนรองรับโลหะเหล็ก และมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 282 ตารางเมตรต่อกรัม เนื่องจากปริมาณของโลหะที่เติมและชนิดของโลหะเป็นตัวควบคุมรูปแบบโครงสร้างและลักษณะรูพรุนของวัสดุคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ โดยปริมาณของโลหะทรานซิชันที่เติมลงไปเป็นตัวกำหนดความเป็นกรด-ด่างที่สภาวะเริ่มต้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบควบแน่นต่างกัน เมื่อศึกษาถึงองค์ประกอบเฟสของวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนรองรับโลหะทรานซิชันนิกเกิลและเหล็กด้วยเครื่องเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกโตมิเตอร์และเครื่องรามาน สเปกโทรสโกปี พบว่านิกเกิลอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์และโลหะนิกเกิล ซึ่งโลหะนิกเกิลทำให้เกิดโครงสร้างวัสดุคาร์บอนแบบท่อ รวมทั้งยังพบโครสร้างวัสดุคาร์บอนเป็นแบบแผ่นกราฟีนและแคปซูล ในของส่วนเหล็กพบว่าอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ ซึ่งพบโครงสร้างของคาร์บอนเป็นแบบหนอนและแบบแคปซูล

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา..... 2553..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5070500321: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: METAL-DOPED, RESORCINOL/FORMALDEHTDE GEL, RF GEL

HIRANYA KHOOMKHAINUM: SYNTHESIS OF TRANSITION METAL-DOPED POROUSCARBONACEOUS MATERIALS BY DIRECT ADDITION OF METAL SALT TO RESORCINOL/FORMALDEHYDE GEL, THESIS ADVISOR: APINAN SOOTTITANTAWAT, D.Eng., THESIS CO-ADVISOR: ASSOC.PROF.TAWATCHAI CHARINPANITKUL, D.Eng., pp.

217460

Ni and Fe metal-doped porous carbonaceous materials were prepared by the Sol-gel method through the polycondensation of resorcinol/formaldehyde and Pluronic F127mixture containing the metal acetate, dried by evaporation. It was carbonized under nitrogen flow at 800 °C. In carbonization step, Pluronic F127 was removed and developed to porosity in carbon materials. Their morphology and pore texture of metal-containing phase were characterized by transmission electron microscopy and N_2 adsorption-desorption at -196 °C. The 1:1.4 of resorcinol/formaldehyde ratio was suitable for synthesis of porous carbon materials that showed 444 m^2/g of surface area and 0.46 m^3/g of pore volume with the average pore diameter 3.09 nm. Ni metal-doped porous carbon materials showed porous properties higher than Fe metal-doped porous carbon materials, was 282 m^2/g of surface area. The morphology and pore texture were controlled by the nature of the metal. It generated difference of initial pH mixtures, which made difference rate of polycondensation. The phase component of metal-doped porous carbonaceous materials was analyzed by X-ray diffraction and Raman spectroscopy. The results showed nickel particle and nickel oxide of Ni metal-doped. The structure of carbon materials were sheet capsule in the case of Ni metal-doped .A part of Fe metal-doped showed iron oxide, the structure of carbon were worm-like and capsule structure. Nature of metal was influenced both the metal phase of transition metal.

Department: .....Chemical Engineering.....Student's signature.....

Field of Study: .....Chemical Engineering.....Advisor's signature.....

Academic Year: .....2010.....Co-Advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ได้วางไว้ด้วยดี เนื่องจากการได้รับการดูแลเอาใจใส่ คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำงานวิจัย ตลอดจนข้อคิดเห็นต่างๆ จากบุคคลหลายท่าน

ท่านแรกขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารธวัช อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ และให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องของงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุลอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมของงานวิจัย และขอขอบพระคุณ ดร.นาวิน วิริยะเอี่ยมพิกุล และ ดร.ขจรศักดิ์ เฟื่องนวกิจ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ ในการทำงานวิจัยตลอดจนรองศาสตราจารย์ ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรงค์ ปวราจารย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการสอบวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางเทคโนโลยีอนุภาค คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ ตลอดจนสมาชิกของศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางเทคโนโลยีอนุภาคทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์ ที่สนับสนุนเงินวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่คอยเป็นกำลังใจ คอยสนับสนุนในเรื่องของทุนการศึกษาและคอยดูแลในทุกๆ ด้านมาโดยตลอด ซึ่งเป็นแรงใจที่สำคัญที่สุด ที่ทำให้มีแรงผลักดัน ในการทำงานวิจัย และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนที่ช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน

จึงขอกล่าวนามและแสดงความขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญรูปภาพ..... ญ

สารบัญตาราง..... ฌ

บทที่

1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 4

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 4

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 5

2. ความรู้เบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 6

2.1 วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนและรีโซซินอล-ฟอร์มอลดีไฮด์เจล (Resorcinol-Formaldehyde gel: RF เจล หรือ RF gel)..... 6

2.2 กระบวนการโซล-เจล (Sol-Gel processing)..... 7

2.2.1 การอบแห้ง (Drying processing)..... 12

2.3 แม่แบบ (Template) หรือ แบบจำลองโครงสร้าง (Structure directing agent).. 14

2.3.1 กระบวนการจัดระเบียบหรือสร้างโครงสร้างได้ด้วยตนเอง (Self-assembly)..... 16

2.3.2 สารลดแรงตึงผิว Poloxamer (Poloxamer surfactant)..... 19

2.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทรานซิชันบนตัวรองรับวัสดุรูพรุนคาร์บอน (Preparation of transition metal doped porous carbon materials)..... 24

2.5 กราฟีน (Graphene)..... 29

2.6 ท่อนาโนคาร์บอน 30

3. การดำเนินงานวิจัย..... 33

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 33

บทที่ หน้า

3.2 การสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทรานซิชัน..... 34
3.3 การวิเคราะห์วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทรานซิชัน..... 36
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง..... 40
4.1 ศึกษาอิทธิพลของสารลดแรงตึงผิว Pluronic F127 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างรีโซซินอลต่อฟอร์มอลดีไฮด์ ปริมาณโลหะและประเภทของโลหะทรานซิชันที่มีผลต่อลักษณะและสมบัติรูพรุน..... 40
4.1.1 ศึกษาอิทธิพลของสารลดแรงตึงผิว Pluronic F 127 ต่อลักษณะและสมบัติรูพรุน..... 40
4.1.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างรีโซซินอลต่อฟอร์มอลดีไฮด์ (R/F ratio) ต่อลักษณะและสมบัติรูพรุน..... 44
4.1.3 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณโลหะนิกเกิลต่อลักษณะและสมบัติรูพรุน..... 48
4.1.4 อิทธิพลของปริมาณโลหะเหล็กต่อคุณลักษณะรูพรุน..... 52
4.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณและประเภทของโลหะทรานซิชันต่อรูปแบบโครงสร้าง 58
4.2.1 อิทธิพลของปริมาณของโลหะนิกเกิลต่อรูปแบบโครงสร้าง..... 58
4.2.2 อิทธิพลของปริมาณโลหะเหล็กต่อรูปแบบโครงสร้าง..... 61
4.2.3 อิทธิพลของประเภทของโลหะทรานซิชันต่อรูปแบบโครงสร้าง..... 63
4.3 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณและประเภทของโลหะทรานซิชันต่อโครงสร้างผลึก.... 65
4.3.1 อิทธิพลของปริมาณโลหะนิกเกิลต่อโครงสร้างผลึก..... 65
4.3.2 อิทธิพลของปริมาณโลหะเหล็กต่อโครงสร้างผลึก 67
4.3.3 อิทธิพลของประเภทของโลหะทรานซิชันต่อโครงสร้างผลึก 68
4.4 อิทธิพลของปริมาณโลหะทรานซิชันต่อประเภทของวัสดุคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ 69
5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 72
5.1 สรุปผลงานวิจัย..... 72
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 73
รายการอ้างอิง..... 74
ภาคผนวก..... 77
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 82

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ลักษณะทั่วไปของกระบวนการโซลเจล.....	8
2.2	กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องในการสังเคราะห์ RF gel.....	9
2.3	แสดงการเกิดวัสดุรูพรุนของ RF gel.....	10
2.4	กระบวนการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนรูพรุนโดย SBA-15(แม่แบบซนิดฮาร์ด).....	15
2.5	แบบจำลองลักษณะโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวประเภท Amphiphilic.....	16
2.6	รูปแบบเบื้องต้นของสารกลุ่ม Pluronic® (PEO-PPO-PEO) ในรูปแบบไมเซลล์	17
2.7	แผนภาพแบบโครงสร้างไมเซลล์ที่ความเข้มข้นต่างกัน ของ Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide.....	18
2.8	ลักษณะการจัดเรียงตัวโคพอลิเมอร์แบบบล็อค (Block copolymer).....	19
2.9	โครงสร้างต่างของวัสดุคาร์บอน.....	30
2.10	ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียวและแบบผนังหลายชั้น.....	31
2.11	โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียวรูปแบบต่างๆ.....	32
3.1	BET analyzer รุ่น BEL sorp-mini (Japan).....	36
3.2	X-ray Diffractometor รุ่น JEOL JDX350 (Japan).....	37
3.3	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องทะลุผ่าน รุ่น JEOL JEM 2100F (Japan)..	38
3.4	รามาน สเปกโทรสโกปี รุ่น NT-MDT model NTEGRA Spectra (Russia).....	39
4.1	ไอโซเทอร์มในการดูดซับ-คายซับไนโตรเจน (Nitrogen adsorption-desorption isotherm) ที่ -196 องศาเซลเซียส ของ () วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่ปราศจากโลหะทรานซิชันที่ไม่ใช้ Pluronic F127 และ () วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่ปราศจากโลหะทรานซิชันที่ใช้ Pluronic F127 หลังจากทำการเผาให้เป็นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้ก๊าซไนโตรเจนที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างR/F เท่ากับ 1:1.4.....	42

4.2 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ (□) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่ปราศจากโลหะทรานซิชันที่ไม่เติม Pluronic F127 และ (△) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่ปราศจากโลหะทรานซิชันที่ไม่เติม Pluronic F127 หลังจากทำการเผาให้เป็นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้ก๊าซไนโตรเจนที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง R/F เท่ากับ 1:1.4..... 43

4.3 ไอโซเทอร์มในการดูดซับ-คายซับไนโตรเจน (Nitrogen adsorption-desorption isotherm) ที่ -196 องศาเซลเซียส ของ (□) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่ปราศจากโลหะทรานซิชันนิกเกิลที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างR/F เท่ากับ 1:1 (△) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่ปราศจากโลหะทรานซิชันที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างR/F เท่ากับ 1:1.4 และ (○) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่ปราศจากโลหะทรานซิชันที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างR/F เท่ากับ 1:2 หลังจากทำการเผาให้เป็นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้ก๊าซไนโตรเจน..... 46

4.4 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ () วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่ปราศจากโลหะทรานซิชันนิกเกิลที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างR/F เท่ากับ 1:1 () วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่ปราศจากโลหะทรานซิชันที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างR/F เท่ากับ 1:1.4 และ () วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่ปราศจากโลหะทรานซิชันที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างR/F เท่ากับ 1:2 หลังจากทำการเผาให้เป็นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้ก๊าซไนโตรเจน..... 47

4.5 ไอโซเทอร์มในการดูดซับ-คายซับไนโตรเจน (Nitrogen adsorption-desorption isotherm) ที่ -196 องศาเซลเซียสของ () วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่ปราศจากโลหะทรานซิชันนิกเกิล () วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะนิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ () วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะนิกเกิลร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก หลังจากทำการเผาให้เป็นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้ก๊าซไนโตรเจนที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างR/F เท่ากับ 1:1.4..... 50

4.6 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน ของ ( ) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่ปราศจากโลหะทรานซิชันนิกเกิล () วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะนิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ () วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะนิกเกิลร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก หลังจากทำการเผาให้เป็นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้ก๊าซไนโตรเจนที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างR/F เท่ากับ 1:1.4..... 51

4.7 ไอโซเทอร์มในการดูดซับ-คายซับไนโตรเจน (Nitrogen adsorption-desorption isotherm) ที่ -196 องศาเซลเซียส ของ () วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่ปราศจากโลหะทรานซิชัน () วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะเหล็กร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ () วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะเหล็กร้อยละ 10โดยน้ำหนัก หลังจากทำการเผาให้เป็นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้ก๊าซไนโตรเจน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างR/F เท่ากับ 1:1.4..... 53

4.8 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน ของ ( ) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่ปราศจากโลหะทรานซิชันเหล็ก () วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะเหล็กร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ () วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะเหล็กร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก หลังจากทำการเผาให้เป็นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้ก๊าซไนโตรเจนที่อัตราส่วนโดยโมลของR/F เท่ากับ 1:1.4..... 54

4.9 ไอโซเทอร์มในการดูดซับ-คายซับไนโตรเจน (Nitrogen adsorption-desorption isotherm) ที่ -196 องศาเซลเซียส ของ (£) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่ปราศจากโลหะทรานซิชัน (r) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะนิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ () วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะเหล็กร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หลังจากทำการเผาให้เป็นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้ก๊าซไนโตรเจน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง R/F เท่ากับ 1:1.4..... 56

4.10 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน ของ (£) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่ปราศจากโลหะทรานซิชัน (r) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะนิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ () วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะเหล็กร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หลังจากทำการเผาให้เป็นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้ก๊าซไนโตรเจนที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง R/F เท่ากับ 1:1.4..... 57

4.11 ภาพ TEM ของ (ก, ข) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่ปราศจากโลหะทรานซิชันนิกเกิล (ค, ง) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะนิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ (จ, ฉ) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะนิกเกิลร้อยละ 10โดยน้ำหนัก หลังจากทำการเผาให้เป็นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสภายใต้ก๊าซไนโตรเจน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง R/F เท่ากับ 1:1.4..... 60

4.12 ภาพ TEM ของ (ก, ข) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่ปราศจากโลหะทรานซิชัน (ค, ง) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะเหล็กร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ (จ, ฉ) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะเหล็กร้อยละ 10โดยน้ำหนัก หลังจากทำการเผาให้เป็นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสภายใต้ก๊าซไนโตรเจน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง R/F เท่ากับ 1:1.4..... 62

4.13 ภภาพ TEM ของ (ก, ข) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะนิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (ค, ง) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะเหล็กร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ (จ, ฉ) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะนิกเกิลร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก หลังจากทำการเผาให้เป็นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสภายใต้ก๊าซไนโตรเจน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง R/F เท่ากับ 1:1.4..... 64

4.14 รูปแบบ XRD ของ (ก) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะนิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ (ข) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะนิกเกิลร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก หลังจากทำการเผาให้เป็นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสภายใต้ก๊าซไนโตรเจนที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง R/F เท่ากับ 1:1.4..... 66

4.15 รูปแบบ XRD ของ (ก) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะเหล็กร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ (ข) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะนิกเกิลร้อยละ 10โดยน้ำหนัก หลังจากทำการเผาให้เป็นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้ก๊าซไนโตรเจน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง R/F เท่ากับ 1:1.4..... 67

4.16 รูปแบบ XRD ของ (ก) วัสดุ รูพรุนที่รองรับโลหะนิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ (ข) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะเหล็กร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หลังจากทำการเผาให้เป็นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้ก๊าซไนโตรเจน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างR/F เท่ากับ 1:1.4..... 68

4.17 สเปกตรารามานของ (ก) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะนิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ (ข) วัสดุคาร์บอนรูพรุนที่รองรับโลหะนิกเกิลร้อยละ 10โดยน้ำหนัก หลังจากทำการเผาให้เป็นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้ก๊าซไนโตรเจน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างR/F เท่ากับ 1:1.4..... 70

4.18 แถบความถี่รามานสเปกตราของวัสดุคาร์บอนระบบแบบ sp^2 ออร์บิทัล (Dresselhaus และคณะ (2010))..... 71

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่าความเข้มข้นวิกฤติการเกิดไมเซลล์ของ Pluronic® F127 ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	20
2.2	คุณสมบัติเฉพาะของรูพรุนและโครงสร้างของวัสดุคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้.....	23
2.3	สมบัติรูพรุนของวัสดุคาร์บอนรูพรุน (CMK-1) ที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก (III) และวัสดุคาร์บอนรูพรุน ชนิด CMK-1 ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก (III).....	26
4.1	คุณสมบัติเฉพาะของรูพรุนงของวัสดุคาร์บอนรูพรุนที่ปราศจากโลหะทรานซิชันที่ไม่ใช้ Pluronic F127และวัสดุคาร์บอนรูพรุนที่ปราศจากโลหะทรานซิชันที่ใช้ Pluronic F127ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างR/F เท่ากับ 1:1.4.....	44
4.2	คุณสมบัติเฉพาะของรูพรุนงของวัสดุคาร์บอนรูพรุนที่ปราศจากโลหะทรานซิชันสังเคราะห์ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างรีโซซินอลต่อฟอร์มอลดีไฮด์เท่ากับ 1:1 1:1.4 และ 1:2.....	48
4.3	คุณสมบัติเฉพาะของรูพรุนงของวัสดุคาร์บอนที่ปราศจากโลหะและวัสดุคาร์บอนที่รองรับโลหะนิกเกิลที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างR/F เท่ากับ 1:1.4.....	51
4.4	คุณสมบัติเฉพาะของรูพรุนงของวัสดุคาร์บอนที่ปราศจากโลหะและวัสดุคาร์บอนที่รองรับโลหะเหล็กที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างR/F เท่ากับ 1:1.4.....	54
4.5	คุณสมบัติเฉพาะของรูพรุนงของวัสดุคาร์บอนที่ปราศจากโลหะและวัสดุคาร์บอนที่รองรับโลหะนิกเกิลและเหล็กที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างR/F เท่ากับ 1:1.4.....	57