การดัดแปลงในขั้นตอนการทำเจลสำหรับปรับปรุงคุณสมบัติความพรุนเมโซพอร์ของรีซอร์ซินอลเฟอฟูรอลคาร์บอนไครโอเจล

Modification in gelation step for development of mesoporous properties of resorcinol-furfural carbon cryogels

เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์[1]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

รีซอร์ซินอลและเฟอฟูรอลได้รับผสมด้วยสารละลายเบสซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก่อน แล้วจึงนำสารที่ได้ทั้งสองส่วนมาผสมในขั้นตอนการเกิดเจล รีซอร์ซินอลเฟอฟูรอลเจลได้รับการบ่มที่ 90 องศาเซลเซียส และแลกเปลี่ยนตัวทำละลายกับบิวทานอล หลังจากนั้นจะนำไปทำให้แห้งแบบแช่แข็ง และ เผาในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยตามลำดับเพื่อได้รีซอร์ซินอลเฟอฟูรอลคาร์บอนไครโอเจล ผลการทดลองแสดงว่า การดัดแปลงการทำเจลสามารถเปลี่ยนรูปร่างของไอโซเทอร์มของไนโตรเจนของรีซอร์ซินอลเฟอฟูรอลคาร์บอนไครโอเจลได้ และปริมาตรรูพรุนขนาดเมโซพอร์ที่ดัดแปลงนี้มีค่า 0.28 ลบ.ซม. ต่อกรัม ซึ่งมากกว่าปริมาตรรูพรุนขนาดเมโซพอร์ของรีซอร์ซินอลเฟอฟูรอลคาร์บอนไครโอเจลที่เตรียมโดยวิธีปกติ (0.11 ลบ.ซม. ต่อกรัม) ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นอีกว่า เราสามารถควบคุมโครงสร้างของรูพรุนของรีซอร์ซินอลเฟอฟูรอลคาร์บอนไครโอเจลโดยการเปลี่ยนอัตราส่วนของสารเคมีแม้จะใช้วิธีการดัดแปลงนี้ร่วมด้วย

คำสำคัญ: คาร์บอนไครโอเจล; โซล-เจล; การทำแห้งแบบแช่แข็ง; เมโซพอร์; การดัดแปลง

Abstract

Resorcinol and furfural are mixed with a basic solution as catalyst individually. Those 2 mixtures are blended in gelation step. Resorcinol-furfural (RFu) carbon cryogel is cured at 90 ^{o}C and solvent-exchanged with butanol. Later RFu gel is dried by freeze drying and carbonized under inert atmosphere, respectively, to obtain the RFu carbon cryogel. The results show that RFu carbon cryogel with this gelation modification can change the shape of nitrogen isotherm of RFu carbon cryogel possessing 0.28 cm^3/g of mesopore volume larger than that of RFu carbon cryogel prepared by classical method (0.11 cm^3/g). The results also show that we can control the pore structure of RFu carbon cryogel by changing the chemical ratio even using this pretreatment.

Key words: Carbon cryogel; Sol-gel; Freeze drying; Porosity; Mesopore; Modification.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

หลังจากได้มีการสังเคราะห์รีซอร์ซินอลฟอร์มัลดีไฮด์แอโรเจลหรืออาร์เอฟแอโรเจล (RF carbon aerogel) ด้วยกระบวนการโซลเจลพอลิคอนเดนเซชัน (sol-gel polycondensation) โดยทำให้แห้งแบบเหนือวิกฤติของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Supercritical drying) ในปี ค.ศ. 1989 [1] จึงมีการวิจัยเพื่อศึกษาคุณสมบัติต่างๆ โดยเฉพาะคุณสมบัติความพรุนของ RF aerogel และ RF carbon aerogel [2-9] โดยจะมีปริมาตรรูพรุนขนาดเมโซพอร์สูง (V_{mes}) และมีพื้นที่ผิวสูง จึงนิยมนำมาใช้เป็น ตัวรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง สารดูดซับ สารบรรจุในเครื่อง HPLC เป็นต้น

ต่อมา ได้มีการสังเคราะห์รีซอร์ซินอลเฟอฟูรอลแอโรเจล โดยใช้สารละลายอินทรีย์ (Organic solvent) คือ ไอโซโพรพานอล [10-11] และเอทานอล [12] เป็นตัวทำละลายแทนที่จะเป็นน้ำ โดยใช้อัตราส่วนความเข้มข้นของรีซอร์ซินอลต่อตัวเร่งปฏิกิริยา (R/C) ในช่วง 50-300 ซึ่งจะได้ V_{mes} สูง และมีพื้นที่ผิวมาก แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะแตกตัวเป็นไอออน ในสารละลายอินทรีย์ได้ไม่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำ

กระบวนการทำให้แห้งแบบเหนือวิกฤติ เป็นกรรมวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการทำให้เจลแห้ง โดยหลีกเลี่ยงผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลว ซึ่งเป็นสาเหตุหลักในการพังทลายของโครงสร้างจากแรงคาปิลารีภายในรูพรุน ความพรุนของคาร์บอนแอโรเจลจึงมีค่ามาก แต่มีต้นทุนที่สูง และมีความซับซ้อนในการทำการทดลอง จึงได้นำกระบวนการทำให้แห้งแบบแช่แข็ง ซึ่งมีต้นทุนที่ถูกกว่าและใช้งานได้สะดวกกว่ามาประยุกต์ใช้ คาร์บอนที่ได้จะมีชื่อเรียกว่า คาร์บอนไครโอเจล (Carbon cryogel) [13-18] เนื่องจากน้ำทำให้เกิดการแตกตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นไอออนได้ดี แต่ไม่ได้มีการรายงานไว้ ในขณะที่เฟอฟูรอลมีขนาดโมเลกุลใหญ่และมีขั้วเพียงเล็กน้อย จึงละลายในสารละลายอินทรีย์ได้ดี ถ้าใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย จะทำให้ได้คาร์บอนที่ไม่มีความพรุน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เสนอการดัดแปลงในขั้นตอนการทำเจลเพื่อสังเคราะห์รีซอร์ซินอลเฟอฟูรอลคาร์บอนไครโอเจล (RFu carbon cryogel) เปรียบเทียบกับการไม่ใช้ โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายแทนสารละลายอินทรีย์ และทำให้แห้งแบบแช่แข็งและเผาในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย ความคิดริเริ่มของงานนี้ คือ ขั้นตอนการดัดแปลงในขั้นตอนการทำเจลซึ่งยังไม่เคยมีผู้ใดเคยนำเสนอ

2. การทดลอง

2.1 การสังเคราะห์ RFu carbon cryogel

รีซอร์ซินอล (Wako Pure Chemical Industries Inc., research grade, 99%) เฟอฟูรอล (Wako Pure Chemical Industries Inc., research grade, 98%) น้ำ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (Wako Pure Chemical Industries Inc., research grade, 5 mol/l) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามาการผสมและปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้น เทสารละลายลงในขวดแก้ว ซึ่งบรรจุเต็มไปด้วยหลอดแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาด 4 มม. และยาว 40 มม. แล้วปล่อยให้แข็งตัวเป็นเจลที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้น จะบ่ม (Curing) ที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน ที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน และ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 วัน นำเจลที่ได้มาแลกเปลี่ยนตัวทำละลายด้วยบิวทานอล 3 ครั้ง ครั้งละ 1 วัน แล้วนำมาผ่านกระบวนการทำให้แห้งแบบแช่แข็ง ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำเจลที่ได้ไปเผาภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่อัตราการไหล 200 ลบ.ซม. ต่อนาที ณ อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้ RFu carbon cryogel เงื่อนไขการ

ตารางที่ 1 อัตราส่วนของสารเคมีในการสังเคราะห์

Sample	R/Fu (mol/mol)	R/C (mol/mol)	R/W (mol/cm^3)	pH เริ่มต้น [-]
N1_0.25	0.5	1	0.25	11.90
N1.7_0.25	0.5	1.7	0.25	10.85
N3.8_0.25	0.5	3.8	0.25	9.60
D3.8_0.25	0.5	3.8	0.25	9.29
D3.8_0.20	0.5	3.8	0.20	9.19
D3.8_0.15	0.5	3.8	0.15	910

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเคราะห์ (Synthesis conditions) และชื่อย่อของสารตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 1 ชื่อย่อจะใช้ตัวอักษร N ตามด้วยค่าอัตราส่วนของ R/C และ อัตราส่วนของรีซอร์ซินอลต่อน้ำ (R/W)

2.2 การสังเคราะห์ RFu carbon cryogel ด้วยการดัดแปลงในขั้นตอนการทำเจล

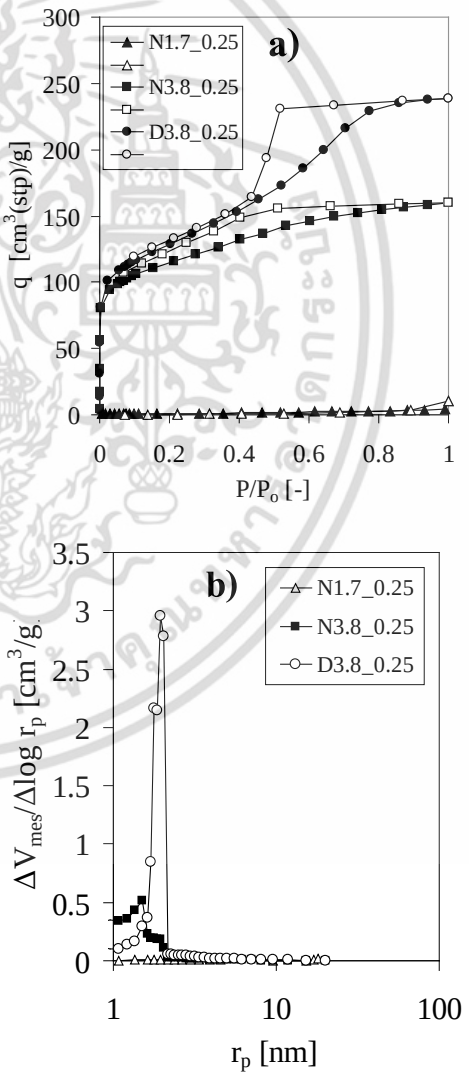
น้ำ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับการผสมแล้วจึงแบ่งออกเป็นสองส่วนเท่าๆ กัน นำส่วนแรกผสมกับรีซอร์ซินอลและนำส่วนที่สองผสมกับเฟอฟูรอล สารผสมทั้งสองส่วนได้รับการปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงนำมาผสมกัน จากนั้น เทสารละลายลงในขวดแก้ว ซึ่งบรรจุเต็มไปด้วยหลอดแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4 มม. และยาว 40 มม. แล้วปล่อยให้แข็งตัวที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้น ทำการบ่มแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย ทำให้แห้งแบบแช่แข็ง และเผาภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน เหมือนในหัวข้อ 2.1 เพื่อได้ RFu carbon cryogel ชื่อย่อจะใช้ตัวอักษร D ตามด้วยค่าอัตราส่วนของ R/C และ R/W ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

2.3 การวิเคราะห์

นำ Carbon cryogel ที่ได้ มาทดสอบด้วยเครื่องดูดซับไนโตรเจน (BEL Japan Inc.; BELSORP 28) เพื่อคำนวณหาคุณสมบัติความพรุน (Porous properties) ได้แก่ พื้นที่ผิวแบบบีอีที ปริมาตรรูพรุนขนาดไมโครพอร์ (V_{mic}) ด้วยวิธีของดูบินินและราดัชเควิช (Dubinin and Radushkevich) [19] จากไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm) ปริมาตรรูพรุนขนาดเมโซพอร์ (V_{mes}) ขนาดรูพรุน (Pore size) และการกระจายตัวของรูพรุน (Pore size distribution) ด้วยวิธีของดอลลิมอร์และฮีล (Dollimore and Heal) [20] จากไอโซเทอร์มของการคายซับ (Desorption isotherm)

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

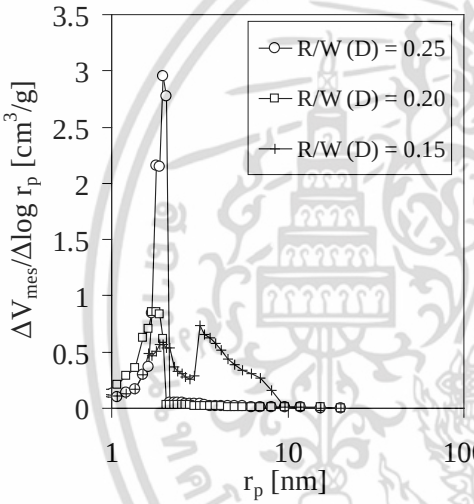
รูปที่ 1a) แสดงถึงไอโซเทอร์มของการดูดซับไนโตรเจน บน RFu carbon cryogel จากผลการทดลองพบว่า N1_0.25 และ N1.7_0.25 ไม่มีความพรุน ทำให้มีการดูดซับไนโตรเจนได้น้อยมาก เมื่อเพิ่ม R/C เป็น 3.8 N3.8_0.25 มีค่าการดูดซับของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้น ถ้าเตรียม RFu โดยใช้ R/C น้อยกว่า 1.7 จะได้ carbon cryogel ที่ไม่มีความพรุน แต่ถ้าใช้ R/C เท่ากับ 3.8 จะได้ carbon cryogel ที่มีความพรุน ไอโซเทอร์มของ N3.8_0.25 จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ และมีฮิสเตอริซิสลูป (Hysteresis loop) แสดงว่า เป็นไอโซเทอร์มชนิดที่ 4 N3.8_0.25 จะมีปริมาณรูพรุนขนาดไมโครพอร์และเมโซพอร์ อย่างไรก็ตาม ปริมาณเมโซพอร์มีค่าน้อย เมื่อทำการดัดแปลงในขั้นตอนการทำเจล D3.8_0.25 มีปริมาณไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำใกล้



รูปที่ 1 ไอโซเทอร์มของการดูดซับของไนโตรเจนและ การกระจายตัวของรูพรุนของ RFu carbon cryogel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดียงกับ N3.8_0.25 แต่มี Hysteresis loop ที่ใหญ่กว่า นั่นคือ มีปริมาณเมโซพอร์ที่มากกว่า รูป 1b) แสดงถึงการกระจายตัวของรูพรุน พบว่า N1_0.25 และ N1.7_0.25 ไม่มีรูพรุนในช่วงเมโซพอร์เลย ในขณะที่ N3.8_0.25 มีรูพรุนขนาดเมโซพอร์เพียงเล็กน้อย เมื่อทำการดัดแปลงนี้ รูพรุนขนาดเมโซพอร์ได้รับการเพิ่มอย่างชัดเจน D3.8_0.25 มีรูพรุนขนาดเมโซพอร์ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่ 4 นาโนเมตร และมีปริมาณมาก นอกจากนี้ การกระจายตัวของรูพรุนที่ได้ มีขนาดสม่ำเสมอ ดังนั้น การดัดแปลงในขั้นตอนการทำเจลก่อนการผสม มีส่วนช่วยในการปรับปรุงเมโซพอร์ของ RFu carbon cryogel ได้



รูปที่ 2 การกระจายตัวของรูพรุนของ RFu carbon cryogel โดยลดค่า R/W

ตารางที่ 2 คุณสมบัติความพรุนของ RFu carbon cryogel

Sample	S_{BET} (m^2/g)	S_{mic} (m^2/g)	V_{mes} (cm^3/g)	V_{mic} (cm^3/g)
N1_0.25	20	10	0.01	0.01
N1.7_0.25	5	0	0.01	0.00
N3.8_0.25	420	280	0.11	0.13
D3.8_0.25	460	190	0.28	0.15
D3.8_0.20	390	200	0.16	0.12
D3.8_0.15	470	260	0.34	0.15

รูปที่ 2 แสดงถึงการกระจายตัวของรูพรุนเมื่อมีการลด R/W ในการสังเคราะห์ด้วยการดัดแปลงในขั้นตอนการทำเจลนี้ D3.8_0.25 จะมีการกระจายตัวของรูพรุนที่แคบมาก แต่เมื่อลด R/W D3.8_0.20 มีการกระจายตัวของรูพรุนจะกว้างขึ้น เมื่อลด R/W ลงอีก จะพบว่า D3.8_0.15 จะมีการกระจายตัวที่กว้าง และมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้น เนื่องจากการลด R/W เป็นการเพิ่มช่องว่างภายในโครงสร้าง ซึ่งเกิดจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น และเป็นการเพิ่มปริมาตรของช่องว่าง และขนาดของงรูพรุน ดังนั้น จึงทำให้ V_{mes} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อลด R/W ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกับ RF carbon cryogel [18]

ตารางที่ 2 แสดงถึงคุณสมบัติความพรุนของ Carbon cryogel จะเห็นได้ว่า ถ้าสังเคราะห์ RFu carbon cryogel โดยวิธีปกติ ถ้าใช้ R/C ที่น้อยมาก ความพรุนที่ได้จะไม่มีดังใน N1_0.25 และ N1.7_0.25 เมื่อเพิ่ม R/C เป็น 3.8 N3.8_0.25 มีความพรุนดังตารางที่ 2 แต่จะมี V_{mes} เพียง 0.11 ลบ.ซม. ต่อ กรัม เมื่อใช้การดัดแปลงนี้ในการสังเคราะห์ RFu carbon cryogel D3.8_0.25 จะมีความพรุนมากกว่า N3.8_0.25 โดยสามารถเพิ่ม V_{mes} ได้มากกว่า 2 เท่า พื้นที่ผิว และ V_{mic} ไม่ต่างกันมากนัก เมื่อลด R/W พร้อมกับการดัดแปลงนี้ Carbon cryogel ที่ได้ จะเป็นการเพิ่ม V_{mes} ดังนั้น การสังเคราะห์ที่ใช้การดัดแปลงในขั้นตอนการทำเจลจะช่วยปรับปรุงเมโซพอร์ของ RFu carbon cryogel ได้ โดยไม่มีผลกระทบต่อแนวโน้มในการควบคุมขนาดรูพรุน เช่นการลด R/W เช่นเดียวกับการควบคุมขนาดรูพรุนของ RF carbon gels ด้วยการเปลี่ยนอัตราส่วนของสารตั้งต้นต่างๆ [9,17]

การปรับปรุงเมโซพอร์ของ RFu carbon cryogel ได้ด้วยวิธีการดัดแปลงในขั้นตอนการทำเจล อาจเกิดจากค่าพีเอชเริ่มต้นในสารละลายเมื่อผสมกัน ถ้าค่าพีเอชของสารละลายมีค่าสูง จะเป็นการเร่งให้เกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชันอย่างรวดเร็ว (Rapid polycondensation) อนุภาคจะอัดตัวกันแน่น ทำให้ไม่มีรูพรุน [21] หรือมีรูพรุนเพียงเล็กน้อย ดังเช่น N3.8_0.25 สำหรับการดัดแปลงในขั้นตอนการทำเจลเป็นการลดค่าพีเอชของสารตั้งต้นแต่ละส่วน ซึ่งเกิดจากการที่รีซอร์ซินอล และเฟอฟูรอลละลายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายเบส เมื่อนำสารละลาย 2 ส่วนมาผสมกัน พีเอช เริ่มต้นจะมีค่าลดลง D3.8_0.25 จึงเกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชันช้าลง ทำให้มีช่องว่างในโครงสร้างของเจล หรือรูพรุนเกิดขึ้นได้มากกว่า อย่างไรก็ตาม การเพิ่ม R/C ให้สูงขึ้น สำหรับ RF carbon cryogel เช่น R/C เท่ากับ 200 เป็น 500 สามารถเพิ่มความพรุนได้ แต่สำหรับ RFu carbon cryogel เมื่อใช้ R/C สูงขึ้น โดย R/C เท่ากับ 5 สารตั้งต้นจะทำปฏิกิริยาได้ไม่ดี จะเกิดลักษณะคล้ายของเหลว 2 วัฏภาคที่ละลายได้เป็นส่วนใหญ่ จึงไม่เกิดเป็นผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับของเหลวอย่างชัดเจน ดังเช่นน้ำกับน้ำมัน เจลที่ได้จะเกิดอย่างไม่สมบูรณ์และไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จึงต้องใช้ค่า R/C ต่ำมากพอ นอกจากค่าพีเอชแล้ว การละลายของเฟอฟูรอลก็น่าจะเป็นอีกสาเหตุหนึ่งด้วย เมื่อใช้สารละลายอินทรีย์ ถึงแม้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาจะแตกตัวได้ไม่ดีในสารละลายอินทรีย์ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำ แต่การละลายจะช่วยทำให้อนุภาคขนาดเล็กลอยอยู่ในของเหลว จนกระทั่งเกิดเป็นโครงสร้างของเจลในที่สุด ในขณะที่การใช้น้ำเป็นตัวทำละลายจะแตกตัวตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นไอออนได้ดี แต่เฟอฟูรอลจะละลายไม่สมบูรณ์ เมื่อใช้ R/C สูง จะเกิดลักษณะของของเหลว 2 วัฏภาค ถ้าใช้ R/C ต่ำมากพอ ทั้งสองจะละลายได้ดียิ่งขึ้น แต่ถ้า R/C มากเกินไป จะเป็นการเร่งการเกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชันอย่างรวดเร็ว ดังนั้น เงื่อนไขในการสังเคราะห์ ของ RFu carbon cryogel โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายจะถูกจำกัดไม่กว้างเหมือน RF carbon cryogel

4. สรุปผลการทดลอง

RFu carbon cryogel สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยปฏิกิริยาโซลเจลพอลิคอนเดนเซชัน ทำให้แห้งแบบแช่แข็งและเผาในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย พบว่า จะมีปริมาตรเมโซพอร์ต่ำ เมื่อใช้การดัดแปลงในขั้นตอนการทำเจล สามารถปรับปรุงคุณสมบัติความพรุนของ RFu carbon cryogel ได้ ปริมาตรของเมโซพอร์ที่ได้จะเพิ่มมากกว่า 2 เท่า และเราสามารถที่จะควบคุมขนาดของรูพรุนได้โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนของสารตั้งต้น เช่นเดียวกับการควบคุมขนาดของรูพรุนเช่นเดียวกับการสังเคราะห์ RF carbon gel แม้จะใช้วิธีการดัดแปลงในขั้นตอนการทำเจลนี้ร่วมด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้การสนับสนุนทางเงินทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] R.W. Pekala, J Mater. Sci. 24 (1989) 3221.

[2] R.W. Pekala, C.T. Alviso, F.M. Kong, S.S. Hulsey, J. Non-Cryst. Solids 145 (1992) 90.

[3] R.W. Pekala, C.T. Alviso, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 270 (1992) 3.

[4] R.W. Pekala, D.W. Schaefer, Macromolecules 26 (1993) 5487.

[5] H. Tamon, H. Ishizaka, M. Mikami, M. Okazaki, Carbon 35 (1997) 791.

[6] H. Tamon, H. Ishizaka, Carbon 36 (1998) 1397.

[7] A.C. Pierre, G.M. Pajonk, Chem. Rev. 102 (2002) 4243.

[8] S.A. Al-Muhtaseb, J.A. Ritter, Adv. Mater. 15 (2003) 101.

[9] H. Tamon, H. Ishizaka. T. Araki, M. Okazaki, Carbon 36 (1998) 1257.

[10] R. Fu, B. Zheng, J. Liu, M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, J.H. Satcher, T.F. Baumann, Adv. Func. Mater. 13 (2003) 558.

[11] D. Wu, R. Fu, S. Zhang, M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus. J. Non-Cryst. Solids 336 (2004) 26.

[12] D. Wu, R. Fu, Z. Yu. J. Appl. Polym. Sci 96 (2005) 1429.

[13] R. Kocklenberg, B. Mathieu, S. Blacher, R. Pirard, J.P. Pirard, R. Sobry, G. Van den Bossche. J. Non-Cryst. Solids 225 (1998) 8.

[14] H. Tamon, H. Ishizaka, T. Yamamoto, T. Suzuki, Carbon 37 (1999) 2049.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[15] H. Tamon, H. Ishizaka, T. Yamamoto, T. Suzuki, Carbon 38 (2000) 1099.

[16] H. Tamon, H. Ishizaka, T. Yamamoto, T. Suzuki, Drying Technol. 19 (2001) 313.

[17] T. Yamamoto, T. Nishimura, T. Suzuki, H. Tamon, J. Non-Cryst. Solids 288 (2001) 46.

[18] T. Yamamoto, T. Nishimura, T. Suzuki, H. Tamon, Drying Technol. 19 (2001) 1319.

[19] M.M. Dubinin, L.V. Radushkevich, Dokl. Akad. Nauk. SSSR. 55 (1947) 327.

[20] D. Dollimore, G.R. Heal, J. Appl. Chem. 14 (1964) 109.

[21] K. Kraiwattanawong, S.R. Mukai, H. Tamon, A.W. Lothongkum. Micropor. Mesopor. Mater. 98 (2007) 258.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้