การสังเคราะห์ของเหลวไอออนิก AmimCl และ HmimCl สำหรับผลิตโครงร่างโฟมเซลลูโลส-ไคโตซาน

Syntheses of AmimCl and HmimCl Ionic Liquids for Producing Cellulose-Chitosan Foam Scaffold

ศศิวิมล ชุมแวงวาปี[1*] และสินีนาฏ ศิริ[2]

Sasiwimon Chumwangwapee and Sineenat Siri

[1] นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

[2] รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาชีววิทยา สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Abstract

Cellulose and chitosan are biopolymers for biomedical applications. However, both biopolymers cannot dissolve in the same solvent, making the limitation to use both biopolymers together. Thus, this work was aimed to study the syntheses of 2 ionic liquids (1-Allyl-3-methylimidazolium Chloride, AmimCl) and (1-Hydro-3-methylimidazolium Chloride, HmimCl) and the optimized condition to dissolve both biopolymers. In addition, production of cellulose-chitosan foam scaffold dissolved in ionic liquids was investigated. Results showed that the synthesized AminCl and HminCl had refractive indices of 1.5450 and 1.5228, respectively and yielded 93% and 90%, respectively. From a comparison on different ratios of ionic liquids to dissolve both cellulose and chitosan, results showed that cellulose was mostly dissolved in AminCl and chitosan was in AmimCl:HmimCl in a volume ratio of 9:2. In addition, both solutions could be mixed in a volume ratio of 1:1 and cellulose-chitosan foam scaffold could be produced.

Keyword: *cellulose, chitosan, ionic liquid, foam*

บทคัดย่อ

เซลลูโลสและไคโตซานเป็นชีวพอลิเมอร์ที่มีการใช้ประโยชน์ทางชีวการแพทย์ แต่เนื่องจากสารทั้งสองไม่สามารถละลายในตัวทำละลายชนิดเดียวกัน ทำให้ไม่มีการใช้ประโยชน์ร่วมกัน ในการศึกษานี้จึงต้องการศึกษาการสังเคราะห์ของเหลวไอออนิก 2 ชนิด คือ 1-แอลิล -3-เมทิลอิมมิดาโซลเลียม คลอไรด์ (1-Allyl-3-methylimidazolium Chloride, AmimCl) และ 1- ไฮโดร-3-เมทิลอิมมิดาโซลเลียม คลอไรด์ (1-Hydro-3-methylimidazolium Chloride, HmimCl) และหาสภาวะที่เหมาะสมในการละลายเซลลูโลสร่วมกับไคโตซาน ตลอดจนศึกษาการผลิตโครงร่างโฟมเซลลูโลส-ไคโตซานที่ละลายในของเหลวไอออนิก ผลการสังเคราะห์ของเหลวไอออนิก พบว่าได้ของเหลวไอออนิก AmimCl และ HmimCl ที่มีค่าดัชนีหักเหของสารเท่ากับ 1.5450 และ 1.5228 ตามลำดับ และผลผลิตของสารที่สังเคราะห์ได้คิดเป็นร้อยละ 93 และ 90 ตามลำดับจากการเปรียบเทียบสัดส่วนที่เหมาะสมของของเหลวไอออนิกในการละลายเซลลูโลสและไคโตซาน พบว่าเซลลูโลสละลายได้ดีที่สุดใน AminCl และไคโตซานละลายได้ดีที่สุดใน AminCl:HminCl ในสัดส่วน 9:2 โดยปริมาตร โดยสารละลายทั้งสองสามารถผสมกันได้ในสัดส่วน 1:1 โดยปริมาตร และสามารถผลิตเป็นโครงร่างโฟมเซลลูโลส-ไคโตซานได้

คำสำคัญ: *เซลลูโลส, ไคโตซาน, ของเหลวไอออนิก, โฟม*

บทนำ

ของเหลวไอออนิก (ionic liquids) จัดเป็นสารประเภทเกลืออินทรีย์ที่มีสถานะเป็นของเหลว ณ อุณหภูมิห้อง และภายในโมเลกุลมีทั้งประจุบวกและประจุลบ ของเหลวไอออนิกมีสมบัติที่น่าสนใจ คือ เป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง มีจุดเดือดสูง และจุดหลอมเหลวต่ำ ของเหลวไอออนิกสามารถใช้เป็นตัวทำละลายได้ทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ นอกจากนี้ยังมีความเสถียรต่อความร้อนและปฏิกิริยาเคมีได้ดี และมีความหนาแน่นของประจุสูง ทำให้สามารถละลายสารชีวพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีโครงสร้างภายในที่แข็งแรงได้ (Zare et al., 2013)

ชีวพอลิเมอร์ธรรมชาติสองชนิดที่ได้รับความสนใจในการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ คือ เซลลูโลส และไคโตซาน โดยเซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรทที่พืชสร้างขึ้น ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกเป็นสายยาวมากกว่า 2,000 หน่วย สำหรับไคโตซานจัดเป็นพอลิแซคคาไรด์เช่นเดียวกัน พบมากในธรรมชาติรองจากเซลลูโลส แต่โครงสร้างภายในของไคโตซานประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคซามีน ทั้งเซลลูโลสและไคโตซานมีสมบัติทางชีวภาพที่ดี คือ สามารถถูกย่อยสลายทางชีวภาพ เข้ากันได้กับเซลล์สัตว์และมนุษย์ และไม่เป็นพิษต่อเซลล์ดังกล่าว (Ma et al., 2012) ดังนั้นทั้งเซลลูโลสและไคโตซานจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ทางชีวการแพทย์และเวชสำอาง อย่างไรก็ดีเซลลูโลสและไคโตซานเป็นชีวพอลิเมอร์ที่ละลายได้ยาก และละลายในตัวทำละลายคนละประเภท ทำให้การผลิตสารผสมเซลลูโลสและไคโตซานและการผลิตชีววัสดุจากสารผสมดังกล่าวทำได้ยาก

เนื่องจากของเหลวไอออนิกมีสมบัติในการละลายชีวพอลิเมอร์ได้ดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาการสังเคราะห์ของเหลวไอออนิก 2 ชนิด คือ AmimCl และ HmimCl เพื่อใช้ในการละลายเซลลูโลสและไคโตซานสำหรับนำมาผลิตเป็นโครงร่างโฟมเซลลูโลส-ไคโตซาน โดยของเหลวไอออนิก AmimCl เป็นสารที่พีเอชเป็นกลางและไอออนบวกมีขนาดเล็ก ทำให้มีความสามารถในการทำลายพันธะไฮโดรเจนของเซลลูโลสได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังสังเคราะห์ได้ง่ายและได้ปริมาณผลผลิตสูง สำหรับของเหลวไอออนิก HmimCl มีโครงสร้างโมเลกุลเล็ก มีความหนืดต่ำ และมีความเป็นกรดสูง ซึ่งน่าจะละลายไคโตซานได้ดี ทั้งนี้ของเหลวไอออนิกทั้งสองชนิดจะถูกใช้ในสัดส่วนต่างๆเพื่อผลิตสารละลายผสมเซลลูโลสและไคโตซาน สำหรับนำไปผลิตโครงร่างโฟมเซลลูโลส-ไคโตซาน

วิธีการวิจัย

การสังเคราะห์ AmimCl และ HmimCl

การสังเคราะห์ AmimCl ทำโดยการผสมโทลูอีนและ1-เมทิลอิมมิดาโซล (1-Methylimidazole) ในอัตราส่วน 1.25 : 1.25 ก่อนที่จะเติมแอลิลคลอไรด์ (Allyl Chloride) 1.25 โมล และผสมกันที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ก่อนที่จะบ่มที่อุณหภูมิ -5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12-24 ชั่วโมง เก็บสารละลายชั้นล่างซึ่งเป็นของเหลวไอออนิก แล้วล้างด้วยโทลูอีน1-2 ครั้ง นำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยเอทิลอะซิเตท (1:1 โดยปริมาตร) 2 ครั้ง และกำจัดเอทิลอะซิเตทที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส คำนวณหาปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้และวัดค่าดัชนีหักเหของแสงด้วยเครื่อง refractrometer (Abbe, Germany)

การสังเคราะห์ HmimCl ทำโดยผสม 1-เมทิลอิมมิดาโซล (1-methylimidazole) ที่มีความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ และกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) ที่มีความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำสารละลายที่ได้อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นคำนวณหาปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้และวัดค่าดัชนีหักเหของแสง

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการละลายเซลลูโลสและไคโตซาน

ทดสอบการละลายเซลลูโลสจากเยื่อกระดาษ 1-5 กรัม ในของเหลวไอออนิก AmimCl หรือ HmimCl ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ละลายที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการละลายเซลลูโลส

สำหรับไคโตซาน ทดสอบการละลายโดยใช้ไคโตซานชนิดที่มีความหนืดปานกลางและต่ำปริมาณ 1 กรัม ละลายในของเหลวไอออนิกผสมระหว่าง AmimCl และ HmimCl ในอัตราส่วน 9:0, 9:1, 9:2, 9:3, 9:4, 9:5, 9:6, 9:7, 9:8 และ 9:9 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการละลายไคโตซาน

สารละลายผสมเซลลูโลส-ไคโตซาน ได้จากการผสมสารละลายเซลลูโลสและไคโตซานที่ละลายในของเหลวไอออนิกที่เหมาะสมในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร เพื่อนำมาผลิตโครงร่างโฟมเซลลูโลส-ไคโตซาน

การผลิตโครงร่างโฟมเซลลูโลส-ไคโตซาน

นำสารละลายเซลลูโลส-ไคโตซานปริมาตร 10 มิลลิลิตร เทลงบนวัสดุรองรับที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ค่อยๆหยดน้ำให้ทั่วผิวหน้าของสารละลาย เพื่อให้เกิดเป็นไฮโดรเจล ล้างของเหลวไอออนิกออกจนหมด โดยตรวจสอบด้วยซิลเวอร์ไนเทรต จากนั้นนำแผ่นไฮโดรเจลที่ได้ไปบ่มที่อุณหภูมิ -110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วทำแห้งด้วยความเย็นด้วยเครื่อง Lyophilizer (Scanlaf, Denmark) จนตัวอย่างเริ่มแห้ง ศึกษาลักษณะของแผ่นโฟมเซลลูโลส-ไคโตซานด้วยกล้องจุลทรรศน์ สเตอริโอ (Olympus, USA) เปรียบเทียบกับโครงร่างโฟมเซลลูโลส

ผลการวิจัย

การสังเคราะห์ AmimCl และ HmimCl

ในการสังเคราะห์ของเหลวไอออนิก AmimCl จากสารตั้งต้น 2 ชนิด คือ 1-เมทิลอิมมิดาโซล และแอลิลคลอไรด์ และของเหลวไอออนิก HmimCl จากสารตั้งต้น 2 ชนิด คือ 1-เมทิลอิมมิดาโซล และกรดไฮโดรคลอริก สมการแสดงในรูปที่ 1

ผลการสังเคราะห์ของเหลวไอออนิกทั้งสองชนิดแสดงในรูปที่ 2 และตารางที่ 1 สำหรับการสังเคราะห์ของเหลวไอออนิก AmimCl พบว่าได้ของเหลวสีเหลืองส้มใส สามารถละลายน้ำได้ มีความหนืด มีค่าดัชนีหักเหแสงเท่ากับ 1. 5450 และได้ผลผลิต 93 % สำหรับการสังเคราะห์ของเหลวไอออนิก HmimCl พบว่าได้ของเหลวสีเหลืองอ่อนใส มีความหนืดต่ำกว่า AmimCl มีความเป็นกรดสูง มีค่าดัชนีหักเหแสงเท่ากับ 1.5228 และได้ผลผลิต 90%

สภาวะที่เหมาะสมในการละลายเซลลูโลสและไคโตซาน

การละลายเซลลูโลสในของเหลวไอออนิก AmimCl และ HmimCl พบว่าของเหลวไอออนิก AmimCl สามารถละลายเซลลูโลสจากเยื่อกระดาษได้อย่างสมบูรณ์ โดยสามารถละลายเซลลูโลสจากเยื่อกระดาษได้สมบูรณ์ในอัตราส่วน 1:100 – 4:100 (กรัมต่อมิลลิลิตร) นอกจากนี้พบว่าความหนืดของสารละลายเซลลูโลสแปรผันตามปริมาณเยื่อกระดาษที่ใช้ละลาย สำหรับอัตราส่วน 5:100 (กรัมต่อมิลลิลิตร) พบว่าการละลายเยื่อกระดาษเกิดไม่สมบูรณ์ ดังนั้นอัตราส่วนสูงที่สุดในการละลายเยื่อกระดาษในของเหลวไอออนิก AmimCl คือ 4:100 (กรัมต่อมิลลิลิตร) สำหรับของเหลวไอออนิก HmimCl พบว่าไม่สามารถละลายเยื่อกระดาษที่สภาวะทดสอบได้

ในการศึกษาการละลายไคโตซานทั้ง 2 ชนิด คือ ไคโตซานที่มีความหนืดระดับปานกลาง และ ไคโตซานที่มีความหนืดต่ำ ในของเหลวไอออนิกผสมระหว่าง AmimCl และ HmimCl ในสัดส่วนต่างๆ พบว่าไคโตซานทั้งสองชนิดไม่ละลายในทั้งของเหลวไอออนิก AmimCl และ HmimCl แต่พบว่าเมื่อใช้สัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างของเหลวไอออนิก AmimCl และ HmimCl สามารถละลายไคโตซานได้ โดย ไคโตซานที่มีความหนืดระดับปานกลางสามารถละลายในสารละลายของเหลวไอออนิกผสมระหว่างAmimCl และ HmimCl ได้ค่อนข้างน้อย แม้ว่าจะมีการเพิ่มสัดส่วนของของเหลวไอออน HmimCl มากขึ้นและใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นก็ตาม สำหรับไคโตซานที่มีความหนืดต่ำสามารถละลายได้ดีในสารละลายของเหลวไอออนิกผสมระหว่าง AmimCl และ HmimCl ในอัตราส่วนตั้งแต่ 9:2 โดยปริมาตรเป็นต้นไป เมื่อสารละลายทั้งสองส่วนมาผสมกันในอัตราส่วน 1: 1 โดยปริมาตร พบว่าได้สารละลายเซลลูโลส- ไคโตซานที่เป็นเนื้อเดียวกัน

โครงร่างโฟมเซลลูโลส-ไคโตซาน

ในการศึกษาการผลิตโครงร่างโฟมเซลลูโลสและโครงร่างโฟมเซลลูโลส-ไคโตซานจากสารที่ละลายในของเหลวไอออนิก พบว่าโครงร่างโฟมที่ได้มีลักษณะเป็นไฮโดรเจลใส เมื่อผ่านกระบวนการทำแห้งแล้ว พบว่าได้โครงร่างโฟมทั้งสองชนิดมีลักษณะเหมือนฟองน้ำ น้ำหนักเบา และมีความเหนียว (รูปที่ 3) ทั้งนี้พบว่าโครงร่างโฟมเซลลูโลส-ไคโตซานสามารถทนต่อการยืดได้ต่ำกว่าโครงร่างโฟมเซลลูโลส เมื่อศึกษาลักษณะโครงร่างโฟมเบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ พบว่าจากภาพถ่ายพื้นผิวและภาพตัดขวาง มีลักษณะเป็นเส้นใยที่สานกันและมีความเป็นรูพรุน (รูปที่ 4)

อภิปรายผล

ของเหลวไอออนิก AmimCl และ HmimCl เป็นตัวทำละลายที่สามารถละลายพอลิเมอร์สังเคราะห์และพอลิเมอร์ธรรมชาติได้หลากหลายชนิด ในงานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์ของเหลวไอออนิก AmimCl ที่มีค่าดัชนีหักเหแสงเท่ากับ 1.5450 ซึ่งสอดคล้องกับการสังเคราะห์สารดังกล่าวโดย Zhang และคณะ (Zhang et al., 2005) สำหรับของเหลวไอออนิก HmimCl ที่สังเคราะห์ได้มีความหนืดต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Xiao และคณะ (Xiao et al., 2011) อย่างไรก็ดียังมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาสมบัติของสารที่สังเคราะห์ได้ในด้านอื่นๆ ต่อไป เช่น จุดเดือด จุดหลอมเหลว และความบริสุทธิ์

ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการละลายเซลลูโลสและไคโตซาน โดยอาศัยของเหลวไอออนิก AmimCl และ HmimCl เป็นตัวทำละลาย การที่เซลลูโลสสามารถละลายได้ดีในของเหลวไอออนิก AmimCl ที่สัดส่วนของ

เซลลูโลสต่อ AmimCl เท่ากับ 4:100 โดยมวลต่อปริมาตร แต่ไม่ละลายในของเหลวไอออนิก HmimCl คาดว่าเกิดจากการที่ของเหลวไอออนิก AmimCl มีความแรงของประจุสูงทำให้สามารถเข้าไปทำลายพันธะไฮโดรเจนและแทรกตัวเข้าไประหว่างสายพอลิเมอร์ได้ ส่วนของเหลว ไอออนิก HmimCl มีโครงสร้างของโมเลกุลเล็ก ทำให้ประจุของของเหลวไอออนิกไม่สามารถทำลายพันธะไฮโดรเจนของเซลลูโลสได้ (Zhang et al., 2005) สำหรับไคโตซานไม่สามารถละลายในของเหลวไอออนิกทั้งสองชนิด ทั้งนี้อาจเกิดจากไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ที่มีค่า pI เท่ากับ 6.3 ซึ่งจะละลายได้ดีในตัวทำละลายที่มีพีเอชต่ำกว่าค่าดังกล่าว ดังนั้นเพิ่มใช้ ของเหลวไอออนิกผสมระหว่าง AmimCl และ HmimCl เพียง 9:2 โดยปริมาตร น่าจะมีผลให้ได้ pH ที่เหมาะสมต่อการละลายของไคโตซาน และทำให้ของเหลวไอออนิก AmimCl สามารถทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของไคโตซานได้

ในการผลิตโครงร่างโฟมเซลลูโลส-ไคโตซาน เมื่อสารละลายเซลลูโลส-ไคโตซานในของเหลวไอออนิกสัมผัสกับน้ำแล้วทำให้เกิดเป็นไฮโดรเจลนั้น เนื่องจากของเหลวไอออนิกเป็นสารละลายที่มีขั้ว และสามารถจับกับโมเลกุลของน้ำได้ดีกว่าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ทำให้ของเหลวไอออนิกถูกดึงออกจากโมเลกุลของเซลลูโลสและไคโตซาน จึงทำให้ความเข้มข้นของเซลลูโลสและไคโตซานสูงขึ้นจนเกิดเป็นไฮโดรเจล สำหรับการทำแห้งไฮโดรเจลด้วยความเย็น มีผลให้โครงร่างของเซลลูโลส-ไคโตซานมีความคงรูปและมีรูพรุน เนื่องจากน้ำระหว่างและภายในโมเลกุลของเซลลูโลสและไคโตซานระเหิดออกไป ทำให้ได้เกิดเป็นโครงร่างโฟมเซลลูโลส-ไคโตซานที่คงรูป แม้ว่าจะมีรายงานวิจัยถึงการสร้างโครงร่างโฟมเซลลูโลสมาก่อนหน้านี้ซึ่งละลายในของเหลวไอออนิก EmimCl (Deng et al., 2009) แต่ยังไม่มีรายงานถึงโครงร่างโฟมเซลลูโลส-ไคโตซานที่ผลิตจากพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่ละลายในของเหลวไอออนิก

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

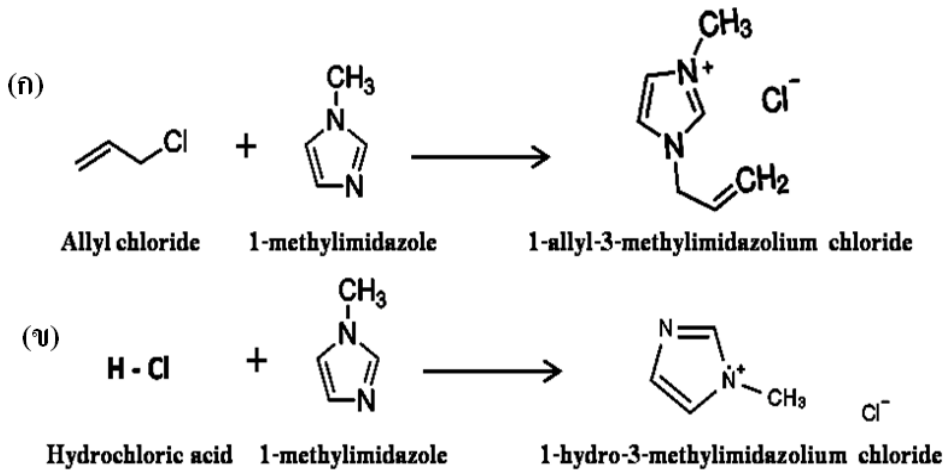
Deng, M., Zhou, Q., Du, A., Kasteren, J.V., and Wang, Y. 2009. Preparation of nanoporous cellulose foams from cellulose-ionic liquid solutions. Materials Letters 63: 1851-1854.

Ma, B., Zhang, M., He, C., and Sun, J. 2012. New binary ionic liquid system for the preparation of chitosan/cellulose composite fibers. Carbohydrate Polymers 88: 347-351.

Xiao, W., Chen, Q., Wu, Y., Wu, T., and Dai, L. 2011. Dissolution and blending of chitosan using 1,3-dimethylimidazolium chloride and 1-H-3-methylimidazolium chloride binary ionic liquid solvent. Carbohydrate Polymers 83: 233-238.

Zare, A., Abi, F., Zare, A.R.M., Beyzavi, M.H., and Zolfigol, M.A. 2013. Synthesis, characterization and application of ionic liquid 1,3-disulfonic acid imidazolium hydrogen sulfate as an efficient catalyst for the preparation of hexahydroquinolines. Journal of Molecular Liquids 178: 113-121.

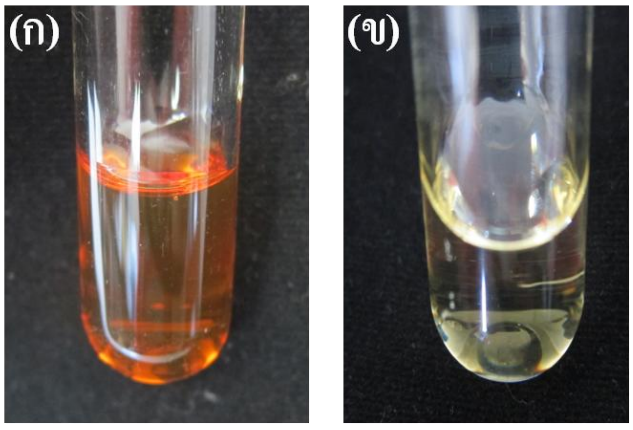
Zhang, H., Wu, J., Zhang, J., and He, J. 2005. 1-Allyl-3-methylimidazolium chloride room temperature ionic liquid: a new and powerful nonderivatizing solvent for cellulose. Macromolecules 38**:** 8272-8277.



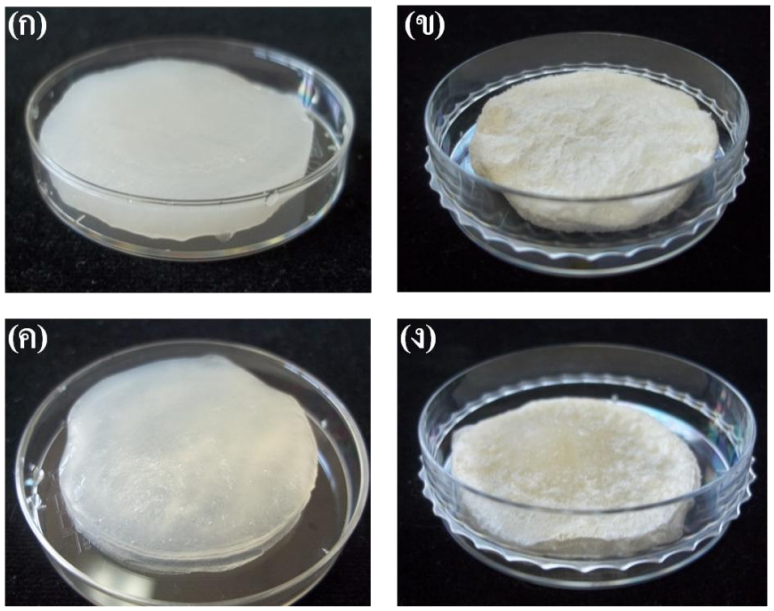
รูปที่ 1. ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ของเหลวไอออนิก AmimCl (ก) และ HmimCl (ข)

ตารางที่ 1. ผลการสังเคราะห์ของเหลวไอออนิก AmimCl และ HmimCl

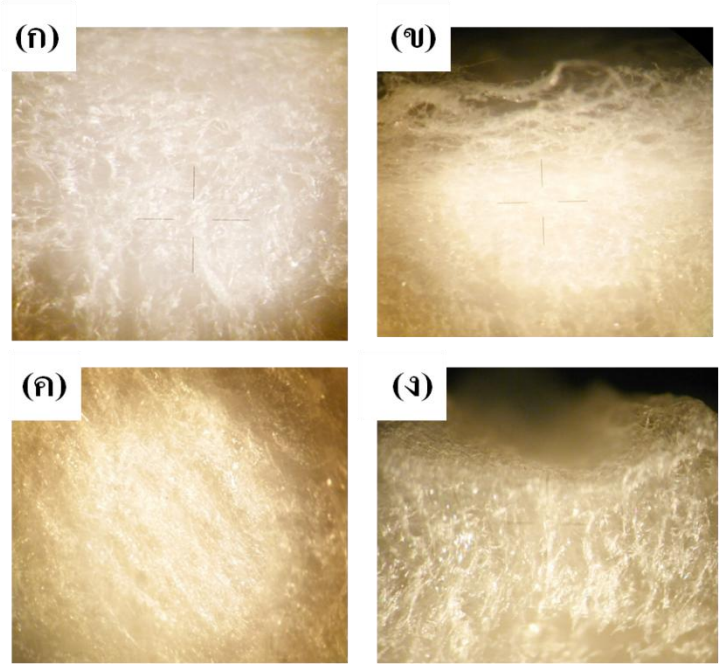
ของเหลวไอออนิก	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าดัชนีหักเหแสง	ร้อยละของผลผลิต
AmimCl	25.3	1.5450	93
HmimCl	25.3	1.5228	90



รูปที่ 2. ของเหลวไอออนิก AmimCl (ก) และ HmimCl (ข) ที่สังเคราะห์ได้



รูปที่ 3. ไฮโดรเจลและโครงร่างโฟมที่ผลิตได้ คือ ไฮโดรเจลของเซลลูโลส (ก) โครงร่างโฟมเซลลูโลส (ข) ไฮโดรเจลของเซลลูโลส-ไคโตซาน (ค) และโครงร่างโฟมเซลลูโลส-ไคโตซาน (ง)



รูปที่ 4. ภาพถ่ายโครงร่างโฟมเซลลูโลสที่ผิวและด้านตัดขวาง (ก-ข) และโครงร่างโฟมเซลลูโลส-ไคโตซานที่ผิวและด้านตัดขวาง (ค-ง)