

การผลิตและการศึกษาสมบัติของซิลิกาเจลจากขานอ้อย ที่ผ่านการแช่กรดไฮโดรคลอริก

Production and Characterization of Silica Gel from Hydrochloric Acid Treated Sugarcane Bagasse

พิมพ์นิภา สวนสมบุญ และมะลิวรรณ บุญรักษ์

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี

ตำบลหนองบัว อำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี 71190

วรารณณ์ จังธนสมบัติ*

สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี

ตำบลหนองบัว อำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี 71190

Pimnipa Suansomboon and Malivan Bunrak

Department of General Science, Faculty of Science and Technology, Kanchanaburi Rajabhat University,

Nong Bua, Muang, Kanchanaburi 71190

Waraporn Jungtanasombut*

Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Kanchanaburi Rajabhat University,

Nong Bua, Muang, Kanchanaburi 71190

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตซิลิกาเจลจากขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรดและไม่ผ่านการแช่กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และศึกษาสมบัติของซิลิกาเจลจากขานอ้อย ได้แก่ ร้อยละผลผลิต ปริมาณความชื้น ขนาดรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาเจล จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าซิลิกาเจลจากขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรดมีสมบัติดีกว่าซิลิกาเจลจากขานอ้อยที่ไม่ผ่านการแช่กรด เนื่องจากมีปริมาณซิลิกา ร้อยละผลผลิต ขนาดรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนสูงกว่า ในขณะที่ปริมาณซิลเฟอร์ซึ่งเป็นสิ่งเจือปนต่ำกว่า โดยค่าร้อยละผลผลิต ปริมาณซิลิกา ปริมาณซิลเฟอร์ ขนาดรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนของซิลิกาเจลจากขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรด HCl คือ 35.05 %, 76.17 %, 23.83 %, 9.70 nm, 117.59 m²/g และ 0.285 cm³/g ตามลำดับ ในขณะที่ค่าร้อยละผลผลิต ปริมาณซิลิกา ปริมาณซิลเฟอร์ ขนาดรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนของซิลิกาเจลจากขานอ้อยที่ไม่ผ่านการแช่กรด HCl คือ 8.24 %, 57.80 %, 42.20%, 7.51 nm,

104.17 m²/g และ 0.196 cm³/g ตามลำดับ นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี paired sample t-test ยังบ่งชี้ว่าซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นจากขานอ้อยทั้ง 2 สภาวะ มีสมบัติต่าง ๆ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ : ขานอ้อย; ซิลิกาเจล; องค์ประกอบทางเคมี; ขนาดรูพรุน; พื้นที่ผิวจำเพาะ

Abstract

The objectives of this research were to study the production of silica gel from HCl treated and untreated sugarcane bagasse and characterization of silica gel from sugarcane bagasse including percent yield, moisture content, pore size, specific surface area, pore volume and chemical composition of silica gel. Experimental results revealed that silica gel from HCl treated sugarcane bagasse had properties better than silica gel from untreated sugarcane bagasse because of higher values of silica content, percent yield, pore size, specific surface area and pore volume. Whereas, sulfur content as contaminant was lower. The values of percent yield, silica content, sulfur content, pore size, specific surface area and pore volume of silica gel from HCl treated sugarcane bagasse were 35.05 %, 76.17 %, 23.83 %, 9.70 nm, 117.59 m²/g and 0.285 cm³/g, respectively. While, the values of percent yield, silica content, sulfur content, pore size, specific surface area and pore volume of silica gel from sugarcane bagasse untreated with HCl were 8.24 %, 57.80 %, 42.20 %, 7.51 nm, 104.17 m²/g and 0.196 cm³/g, respectively. In addition, results of statistical analysis with paired sample t-test method also indicated that silica gel produced from both conditions of sugarcane bagasse had significantly different properties.

Keywords: sugarcane bagasse; silica gel; chemical composition; pore size; specific surface area

1. บทนำ

ประเทศไทยมีการนำเข้าซิลิกาสังเคราะห์เป็นจำนวนมาก เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมกระดาษ และอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกา (silica) ซึ่งเป็นสารประกอบที่เกิดจากธาตุซิลิกอน (Si) กับธาตุออกซิเจน (O) และมีสูตรเคมี คือ SiO₂ เป็นสารที่เฉื่อย ไม่ละลายในกรดทุกชนิด (ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก) มีลักษณะโครงสร้างแบบรูพรุน มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง และมีความเป็นพิษต่ำ จึงทำให้มีการนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารดูดซับ สารเพิ่มความ

แข็งแรง และสารเติมแต่งในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากในกระบวนการผลิตสารโซเดียมซิลิเกต (สารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ซิลิกา) ต้องใช้อุณหภูมิสูง จึงทำให้ต้นทุนในการผลิตซิลิกาสังเคราะห์มีราคาสูง ส่งผลให้มูลค่าการนำเข้าซิลิกาสังเคราะห์มีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นเพื่อลดต้นทุนในการผลิตซิลิกา ปัจจุบันจึงมีการใช้เศษวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตร เช่น แกลบ เปลือกและฝักข้าวโพด และขานอ้อย มาผลิตเป็นแหล่งซิลิกาอสัณฐาน (source of amorphous silica) เพื่อใช้ในการผลิตโซเดียมซิลิเกตแทน [1-8] การ

ผลิตซิลิกาเจลจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยวิธีการตกตะกอน (precipitation method) สามารถทำได้โดย นำเศษชีวมวลไปเผาให้เป็นเถ้าที่อุณหภูมิที่เหมาะสม แล้วสกัดซิลิกา (silica extraction) ออกจากเถ้าด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะได้สารละลายโซเดียมซิลิเกต จากนั้นตกตะกอนซิลิกา (silica precipitation) ด้วยสารละลายกรด ก็จะได้ซิลิกาเจล [9-13]

อ้อย (sugarcane) จัดเป็นพืชไร่เศรษฐกิจอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในจังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งในปี พ.ศ. 2558/59 จังหวัดกาญจนบุรีมีการปลูกอ้อยเป็นพื้นที่มากถึง 7 แสนไร่ โดยพื้นที่ที่เพาะปลูกอ้อยมากที่สุด คือ บ่อพลอย (ประมาณ 1.3 แสนไร่) รองลงมา คือ เลาช้วย (ประมาณ 1.23 แสนไร่) ท่าม่วง (ประมาณ 9 หมื่นไร่) เมืองกาญจนบุรี (ประมาณ 8.9 หมื่นไร่) หนองปรือ (ประมาณ 6.7 หมื่นไร่) ท่ามะกา (ประมาณ 6.6 หมื่นไร่) ด่านมะขามเตี้ย (ประมาณ 6.5 หมื่นไร่) พนมทวน (ประมาณ 3.4 หมื่นไร่) ห้วยกระเจา (ประมาณ 2.7 หมื่นไร่) ไทรโยค (ประมาณ 2.4 หมื่นไร่) ทองผาภูมิ (ประมาณ 1 พันไร่) และศรีสวัสดิ์ (ประมาณ 4.8 พันไร่) จึงทำให้จังหวัดกาญจนบุรีมีผลผลิตอ้อยมากถึง 6 ล้านตัน [14] ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดฤดูกาลเก็บเกี่ยว และการแปรรูปผลผลิตอ้อยไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น น้ำอ้อย และน้ำตาลทราย จะทำให้มีขานอ้อย (sugarcane bagasse) เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก แม้ว่าขานอ้อยส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ และถูกจำหน่ายให้แก่โรงงานกระดาษ และโรงงานผลิตไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าการนำขานอ้อยมาผลิตเป็นซิลิกาเจล นอกจากจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่เศษชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีเป็นจำนวนมากในจังหวัดกาญจนบุรีแล้ว ยังสามารถช่วยลดภาวะมลพิษทางกลิ่นและแหล่งเพาะเชื้อโรค ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของ

มนุษย์ อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการกำจัดเศษวัสดุทางการเกษตรของเกษตรกรและโรงงานอุตสาหกรรมด้วยงานวิจัยที่ผ่านมา [15-17] มีรายงานว่าขานอ้อยซึ่งเป็นเศษชีวมวลทางการเกษตรสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งซิลิกาได้เป็นอย่างดี เนื่องจากเถ้าของขานอ้อย (sugarcane bagasse ash) ที่ได้จากการเผาขานอ้อยที่อุณหภูมิ 400-1,000 องศาเซลเซียส มีซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 60 นอกจากนี้ [12] ยังรายงานว่าหากแช่ขานอ้อยด้วยกรดต่าง ๆ เช่น กรดไนตริก (HNO_3) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ก่อนนำไปเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสม จะทำให้ซิลิกาที่ได้จากเถ้าขานอ้อยมีความบริสุทธิ์มากขึ้น เนื่องจากกรดจะเข้าไปกำจัดสิ่งเจือปนของโลหะต่าง ๆ (metallic impurity) ออกจากขานอ้อย โดยเถ้าจากขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรด HCl มีปริมาณ SiO_2 สูงที่สุด (ร้อยละ 95.55) รองลงมา คือ เถ้าจากขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรด HNO_3 (ร้อยละ 94.97) และเถ้าจากขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรด H_2SO_4 (ร้อยละ 92.89) ตามลำดับ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ (1) ศึกษาการผลิตซิลิกาเจลจากขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรดและไม่ผ่านการแช่กรด HCl และ (2) ศึกษาสมบัติทางกายภาพ (physical property) ได้แก่ ร้อยละผลผลิต ปริมาณความชื้น ขนาดรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุน และสมบัติทางเคมี (chemical property) ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นจากขานอ้อยทั้ง 2 สภาวะ ซึ่งปริมาณความชื้นและพื้นที่ผิวจำเพาะเป็นสมบัติที่ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) สำหรับการนำซิลิกาหรือซิลิคอนไดออกไซด์ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมยาปราบศัตรูพืช และอุตสาหกรรมสี [18-20] ในขณะที่ขนาดรูพรุนจะใช้ในการจำแนกว่าซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นมีรูพรุนแบบใด

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้ กรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต ($\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ หรือ KHP) ซึ่งสารเคมีทั้งหมดนี้เป็นเกรดสำหรับการวิเคราะห์ (analytical grade)

2.2 การเตรียมวัตถุดิบ

นำขานอ้อยมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จากนั้นเก็บขานอ้อยที่แห้งสนิทแล้วไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อใช้ในขั้นตอนการผลิตซิลิกาเจลต่อไป ซึ่งขานอ้อยที่ได้ คือ ขานอ้อยที่ไม่ผ่านการแช่กรด HCl (สภาวะ 1) สำหรับการเตรียมขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรด HCl (สภาวะ 2) สามารถทำได้โดยนำขานอ้อยที่แห้งสนิทและผ่านการล้างจนสะอาดแล้ว ไปแช่ในสารละลายกรด HCl ความเข้มข้น 1 M เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นหลาย ๆ ครั้ง จนค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำที่ใช้ล้างมีค่าเป็นกลาง ($\text{pH}=7$) จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส แล้วเก็บขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรด HCl ไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อใช้ในขั้นตอนการผลิตซิลิกาเจล

2.3 การผลิตซิลิกาเจลจากขานอ้อย

งานวิจัยนี้ได้ผลิตซิลิกาเจลจากขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรดและไม่ผ่านการแช่กรด HCl ด้วยวิธีการตกตะกอน โดยดัดแปลงกรรมวิธีการผลิตมาจากการประยุกต์วิธีการจากงานวิจัยต่าง ๆ [12,17,21-26] ซึ่งทำให้พลังงานที่ใช้ในการผลิตซิลิกาเจลลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขานอ้อยให้เป็นเถ้าและสกัดซิลิกาออกจากเถ้าลดลง อีกทั้งยังช่วยลดจำนวนอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตซิลิกาเจลอีกด้วย เนื่องจากในการสกัดซิลิกาออกจากเถ้าขานอ้อยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่จำเป็นต้องใช้ชุด

เครื่องแก้วสำหรับการรีฟลักซ์หรือไมโครเวฟ ซึ่งขั้นตอนการผลิตซิลิกาเจลจากขานอ้อยของงานวิจัยนี้เริ่มจากนำขานอ้อยทั้ง 2 สภาวะ ไปเผาด้วยเตาเผาไฟฟ้า (electrical furnace) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำเถ้าขานอ้อยที่ได้จากการเผา จำนวน 5 g ใส่ลงในสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.5 M โดยอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเถ้าขานอ้อยกับสารละลาย NaOH เท่ากับ 1 g/100 ml จากนั้นนำสารละลายไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ภายใต้การกวนสารละลายอยู่ตลอดเวลา เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อสกัดซิลิกาออกจากเถ้าขานอ้อย แล้วได้เป็นสารละลายโซเดียมซิลิเกต กรองสารละลายเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออกจากสารละลายโซเดียมซิลิเกต แล้วตั้งสารละลายทิ้งไว้จนอุณหภูมิของสารละลายเท่ากับอุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายให้เป็นกลาง ($\text{pH} = 7$) ด้วยสารละลายกรด H_2SO_4 ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ซึ่งในขณะที่ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต้องกวนสารละลายตลอดเวลา และหลังจากที่ pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ให้กวนสารละลายต่ออีกเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้ซิลิกาเจลเกิดการตกตะกอนอย่างช้า ๆ จากนั้นจึงกรองและล้างซิลิกาเจลด้วยน้ำกลั่น แล้วนำซิลิกาเจลที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนแห้งสนิท จากนั้นจึงบดซิลิกาเจลด้วยโกร่งบด แล้วนำผงซิลิกาเจลไปอบให้แห้งสนิทอีกครั้ง ก่อนนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาร้อยละผลผลิต ปริมาณความชื้น องค์ประกอบทางเคมี ขนาดรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนต่อไป

2.4 การหาร้อยละผลผลิต

ร้อยละผลผลิตของซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นจากขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรดและไม่ผ่านการแช่กรด HCl สามารถคำนวณหาได้จากสมการ ร้อยละผลผลิตของ

ซิลิกาเจล = [(น้ำหนักของซิลิกาเจลที่ได้ ÷ น้ำหนักของ
 ภาชนะอ้อยที่ใช้ในการผลิตซิลิกาเจล) × 100] (1)

2.5 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

งานวิจัยนี้วิเคราะห์หาปริมาณความชื้นตาม
 มาตรฐาน [27] ซึ่งค่าร้อยละความชื้นสามารถ
 คำนวณได้จากสมการ ร้อยละความชื้น = [(น้ำหนัก
 ของซิลิกาเจลก่อนอบ ÷ น้ำหนักของซิลิกาเจลหลังอบ)
 × 100] (2)

2.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) และปริมาณธาตุองค์ประกอบของซิลิกาเจลที่
 ผลิตขึ้นจากขานอ้อย ซึ่งผ่านการแช่กรดและไม่ผ่านการ
 แช่กรด HCl ศึกษาด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์
 (x-ray fluorescence spectrometer, XRF) โดย
 ผู้วิจัยได้ส่งตัวอย่างซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นจากขานอ้อยทั้ง
 2 สภาวะ ไปวิเคราะห์ ณ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม
 คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
 พระจอมเกล้าพระนครเหนือ โดยใช้เครื่อง XRF ยี่ห้อ
 Oxford รุ่น ED 2000

2.7 การวิเคราะห์ขนาดรูพรุน พื้นที่ผิว จำเพาะ และปริมาตรรูพรุน

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาขนาดรูพรุน (pore size)
 พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) และปริมาตร
 รูพรุน (pore volume) ของซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นจาก
 ขานอ้อยทั้ง 2 สภาวะ ด้วยเทคนิคเบรอนเนอร์-เอ็มเมทท์-
 เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller, BET) โดยส่ง
 ตัวอย่างไปวิเคราะห์ ณ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะ
 วิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม
 เกล้าพระนครเหนือ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ขนาดรูพรุน
 และพื้นที่ผิว (surface area and pore size analyzer)
 ของบริษัท Bel Japan, Inc. รุ่น BELSORP-mini with
 BELPREP-flow

2.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ผู้วิจัยได้ศึกษาผลของขั้นตอนการเตรียม
 วัตถุดิบขานอ้อย (แช่กรด HCl และไม่แช่กรด HCl) ต่อ
 สมบัติต่าง ๆ ของซิลิกาเจลด้วยการเปรียบเทียบความ
 แตกต่างของค่าเฉลี่ยของสมบัติต่าง ๆ ของซิลิกาเจลที่
 ผลิตขึ้นจากขานอ้อยทั้ง 2 สภาวะ โดยวิธี paired
 sample t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

การศึกษาการผลิตซิลิกาเจลจากขานอ้อยที่ผ่าน
 การแช่กรดและไม่ผ่านการแช่กรด HCl พบว่าซิลิกาเจล
 ที่ผลิตขึ้นจากขานอ้อยทั้ง 2 สภาวะ มีลักษณะเป็นผง
 ละเอียด มีสีขาว และจากการศึกษาสมบัติทางกายภาพ
 และทางเคมี ได้ผลดังต่อไปนี้

3.1 ร้อยละผลผลิต

ค่าร้อยละผลผลิตของซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้น
 จากขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรดและไม่ผ่านการแช่กรด
 HCl แสดงให้เห็นว่าการผลิตซิลิกาเจลจากขานอ้อยที่
 ผ่านการแช่กรด HCl จะให้ปริมาณผลผลิตสูงกว่าการ
 ผลิตซิลิกาเจลจากขานอ้อยที่ไม่ผ่านการแช่กรด HCl
 มากถึงร้อยละ 26 แสดงดังตารางที่ 1 โดยปริมาณ
 ผลผลิตของซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นจากขานอ้อยทั้ง 2
 สภาวะ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$)
 ทั้งนี้เนื่องจาก กรดสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อน
 ต่าง ๆ ออกจากชีวมวลทางการเกษตร หรือถ้าได้จากการ
 เผาชีวมวลทางการเกษตรได้ ดังนั้นซิลิกาที่ได้จึงมี
 ความบริสุทธิ์มากขึ้น [12,28] จึงส่งผลให้ปริมาณผล
 ผลิตของซิลิกาเจลที่ผลิตจากขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรด
 HCl สูงกว่า อย่างไรก็ตาม ปริมาณผลผลิตของซิลิกา
 เจลที่ได้จากการศึกษานี้ยังค่อนข้างน้อย ดังนั้นใน
 การศึกษาครั้งต่อไปจึงควรเพิ่มความเข้มข้นของสาร
 ละลาย NaOH ที่ใช้ในการสกัดซิลิกาออกจากขานอ้อย
 เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลาย NaOH มี
 ผลต่อการสกัดซิลิกาออกจากขานอ้อย [29] โดยความเข้มข้น

ที่สูงขึ้นจะทำให้ปริมาณผลผลิตซิลิกาที่ได้สูงขึ้น

ตารางที่ 1 ร้อยละผลผลิตและปริมาณความชื้นของซิลิกาเจลจากขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรด HCl และไม่ผ่านการแช่กรด HCl

สมบัติที่ศึกษา	ซิลิกาจากขานอ้อย		t-test
	ไม่ผ่านการแช่กรด HCl	ผ่านการแช่กรด HCl	
ร้อยละผลผลิต	8.24	35.05	**
ปริมาณความชื้น (%)	0.76	1.16	*

*ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.05$;

**ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งที่ระดับ $p < 0.01$

3.2 ปริมาณความชื้น

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นของซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นจากขานอ้อยทั้ง 2 สภาวะ แสดงดังตารางที่ 1 พบว่าปริมาณความชื้นของซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นจากขานอ้อยทั้ง 2 สภาวะ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยซิลิกาเจลจากขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรด HCl มีปริมาณความชื้นสูงกว่าซิลิกาเจลจากขานอ้อยที่ไม่ผ่านการแช่กรด HCl อย่างไรก็ตาม จากผลการวิเคราะห์หาค่าความชื้นสามารถสรุปได้ว่าค่าความชื้นของซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นจากขานอ้อยทั้ง 2 สภาวะ มีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Okoronkwo และคณะ [10] ที่วิเคราะห์หาปริมาณความชื้นของซิลิกาที่สกัดขึ้นจากขี้ข้าวโพด ซึ่งพบว่าค่าความชื้นของซิลิกาจากขี้ข้าวโพดเท่ากับ 2.89 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ มอก. 1070-2547 [18] มอก. 1071-2547 [19] และ มอก. 1072-2547 [20] ซึ่งเป็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ซิลิคอนไดออกไซด์สำหรับอุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมยาปราบศัตรูพืช และอุตสาหกรรมสี ตามลำดับ ยังบ่งชี้ว่าค่าความชื้นของซิลิกาเจลที่ผลิตได้จากการศึกษานี้มีค่าต่ำกว่า

เกณฑ์ที่กำหนด เนื่องจากมีค่าความชื้นไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก

3.3 องค์ประกอบทางเคมี

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF จะทำให้ทราบถึงชนิดและปริมาณของธาตุ (ในหน่วยร้อยละโดยน้ำหนัก) ที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่าง ซึ่งจากร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุที่พบในตัวอย่างจะสามารถใช้คำนวณหาร้อยละโดยน้ำหนักของสารประกอบออกไซด์ของธาตุนั้น ๆ ได้ โดยการคำนวณจากสมการ ร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุนั้น ๆ = [(ร้อยละโดยน้ำหนักของสารประกอบออกไซด์ของธาตุนั้น ๆ ÷ conversion factor) × 100] (3) [30] ซึ่งค่า conversion factor ของ SiO_2 มีค่าเท่ากับ 2.1392

หรือในขั้นตอนของการประมวลผล ให้เลือกโปรแกรมการประมวลผลของเครื่องมือเป็น ข้อมูลมาตรฐาน (calibration data) ของร้อยละโดยน้ำหนักของสารประกอบออกไซด์ ซึ่งเครื่อง XRF จะแปลงค่าความเข้มของรังสีเอกซ์จำเพาะที่ธาตุนั้น ๆ คายออกมาเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของสารประกอบออกไซด์ของธาตุนั้น จากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาเจลจากขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรดและไม่ผ่านการแช่กรด HCl ด้วยเทคนิค XRF พบว่าซิลิกาเจลจากขานอ้อยทั้ง 2 สภาวะ ที่ผลิตขึ้นในการศึกษานี้ ประกอบด้วยซิลิกาหรือซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และธาตุกำมะถัน (S) โดย SiO_2 ซึ่งมีปริมาณสูงกว่า จัดเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วน S ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าจัดเป็นสิ่งเจือปน แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งชนิดและปริมาณของธาตุองค์ประกอบที่ตรวจพบในซิลิกาจะขึ้นอยู่กับพันธุ์พืช ระยะการเจริญเติบโตของพืช และพื้นที่ที่เพาะปลูกพืช [17] นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมียังแสดงให้เห็นว่าซิลิกาที่ผลิตขึ้นจากขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรด HCl มีความบริสุทธิ์สูงกว่าซิลิกาที่ผลิตขึ้นจากขานอ้อยที่ไม่ผ่านการแช่กรด HCl มากถึง

ร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากกรดจะเข้าไปกำจัดสิ่งเจือปนต่าง ๆ ออกจากเศษชีวมวล ทำให้ได้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น [12,28] โดยในงานวิจัยของ Rezende และคณะ [31] Pereira และคณะ [32] และ Guilherme และคณะ [33] รายงานว่ากรดจะสามารถกำจัดเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ออกจากขานอ้อยได้ ส่วนงานวิจัยของ Embong และคณะ [34] และ Rodríguez- Machin และคณะ [35] รายงานว่ากรดจะสามารถกำจัดโลหะแอลคาไล (alkali metal) และโลหะแอลคาไลน์เอิร์ท (alkaline earth metal) เช่น โพแทสเซียม (K) โซเดียม (Na) แมกนีเซียม (Mg) และอะลูมิเนียม (Al) ออกจากขานอ้อยได้ นอกจากนี้ ในงานวิจัยของ Das และคณะ [36] ยังรายงานอีกว่าขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรด HCl จะมีปริมาณของธาตุโพแทสเซียม (K) โซเดียม (Na) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) ฟอสฟอรัส (P) และกำมะถัน (S) ลดลง ในขณะที่ปริมาณของธาตุซิลิคอน (Si) จะเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับขานอ้อยที่ไม่ผ่านการแช่กรด ดังนั้นจึงทำให้ซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นจากขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรด HCl มีปริมาณของ SiO_2 สูงกว่า อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีงานวิจัยใดที่อธิบายถึงกลไกการปฏิบัติกริยาระหว่างกรด HCl กับธาตุองค์ประกอบในขานอ้อย สำหรับสิ่งเจือปนในซิลิกาเจล งานวิจัยของ Sultana และ Rahman [16] และ Ali และคณะ [37] รายงานว่าในเถ้าของขานอ้อยจะมีธาตุ S เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นธาตุ S ที่เจือปนอยู่ในเถ้าของขานอ้อยจึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ซิลิกาเจลที่ผลิตได้จากงานวิจัยนี้มีธาตุนี้เจือปนอยู่

นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ทางสถิติยังบ่งชี้ว่าปริมาณ SiO_2 และ S ของซิลิกาที่ผลิตขึ้นจากขานอ้อยทั้ง 2 สภาวะ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$) อีกด้วย ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการ

ผลิตซิลิกาเจลจากขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรด HCl จะทำให้ได้ซิลิกาเจลที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่า และมีสิ่งเจือปนน้อยกว่า อย่างไรก็ตามซิลิกาเจลที่ผลิตได้จากการศึกษานี้ยังมีปริมาณ SiO_2 ต่ำกว่าเกณฑ์ (น้อยกว่าร้อยละ 97 โดยน้ำหนัก) ของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ซิลิคอนไดออกไซด์สำหรับอุตสาหกรรมต่าง ๆ [18-20] ดังนั้นในการศึกษาครั้งต่อไปจึงควรศึกษาผลของความเข้มข้นของกรด HCl ต่อปริมาณของ SiO_2 เนื่องจากงานวิจัยของ Amin และคณะ [38] ได้รายงานว่าการเพิ่มความเข้มข้นของกรด HCl มีผลต่อการสกัดซิลิกา โดยเมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น (ไม่เกิน 2.5 M) ปริมาณของซิลิกาที่ได้จะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของกรดสูงเกิน 2.5 M จะทำให้ซิลิกาเกิดการสลายตัว

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาเจลจากขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรด HCl และไม่ผ่านการแช่กรด HCl

องค์ประกอบทางเคมี	ซิลิกาจากขานอ้อย		t-test
	ไม่ผ่านการแช่กรด HCl	ผ่านการแช่กรด HCl	
SiO_2 (% weight)	57.80	76.17	**
S (% weight)	42.20	23.83	**

**ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งที่ระดับ $p < 0.01$

3.4 ขนาดรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุน

ผลการวิเคราะห์หาขนาดรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนของซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นจากขานอ้อยทั้ง 2 สภาวะ ด้วยเทคนิค BET แสดงให้เห็นว่าซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นจากขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรด HCl มีขนาดรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนสูงกว่าซิลิกาเจลจากขานอ้อยที่ไม่ผ่านการแช่กรด HCl

อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$) แสดงดังตารางที่ 3 อย่างไรก็ตาม จากขนาดรูพรุนบ่งชี้ว่าซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นจากขานอ้อยทั้ง 2 สภาวะ เป็นวัสดุเมโซพอร์ เนื่องจากมีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 2-50 nm [39] และจาก มอก. 1070-2547 [18] ซึ่งเป็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ซิลิคอนไดออกไซด์สำหรับอุตสาหกรรมยาง บ่งชี้ว่าซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นจากขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรด HCl มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในเกณฑ์ โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 110-240 m^2/g นอกจากนี้ขนาดรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนของซิลิกาเจลที่ผลิตได้จากงานวิจัยนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Affandi และคณะ [40] ที่ศึกษาการสังเคราะห์ซิลิกาชนิดซีโรเจลจากเถ้าของขานอ้อย ซึ่งพบว่าซิลิกาที่สังเคราะห์ได้เป็นวัสดุเมโซพอร์ โดยมีขนาดรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 3.2-3.4 nm, 69-152 m^2/g และ 0.059-0.137 cm^3/g ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีขนาดรูพรุนและปริมาณความชื้นของซิลิกาเจลที่ผลิตได้จากการศึกษานี้ พบว่าซิลิกาเจลที่มีปริมาณ SiO_2 สูงขึ้นจะมีขนาดรูพรุนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ซิลิกาเจลสามารถดูดซับความชื้นได้มากขึ้น ดังนั้นปริมาณความชื้นจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Filipović และคณะ [41] ที่ศึกษาผลของความเข้มข้นของ SiO_2 ในสารละลายโซเดียมซิลิเกต ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดเมโซพอร์ ต่อขนาดรูพรุนและความสามารถในการดูดซับน้ำมัน โดย Filipović และคณะ [41] พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ SiO_2 เพิ่มขึ้น ขนาดรูพรุนของซิลิกาจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำมันเพิ่มขึ้น

4. สรุป

ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของซิลิกาเจลที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า

การผลิตซิลิกาเจลจากขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรด HCl นอกจากจะทำให้ปริมาณผลผลิตที่ได้สูงกว่า (ร้อยละ 26) การผลิตซิลิกาเจลจากขานอ้อยที่ไม่ผ่านการแช่กรด HCl อย่างมีนัยสำคัญแล้ว ยังทำให้ซิลิกาเจลที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงกว่า (ร้อยละ 18) อย่างมีนัยสำคัญอีกด้วย แม้ว่าซิลิกาเจลที่ผลิตได้จากขานอ้อยทั้ง 2 สภาวะนี้ จะมีรูพรุนขนาดเมโซพอร์เหมือนกันก็ตาม สำหรับในการศึกษาครั้งต่อไป ควรศึกษาผลของเวลาและความเข้มข้นของกรดที่ใช้ในการแช่ขานอ้อย และความเข้มข้นของเบสที่ใช้ในการสกัดซิลิกาออกจากเถ้าขานอ้อย เพื่อให้ซิลิกาเจลที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงที่สุด และมีปริมาณเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารเสริมแรงหรือสารเติมแต่งต่อไป

ตารางที่ 3 ขนาดรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนของซิลิกาเจลจากขานอ้อยที่ผ่านการแช่กรด HCl และไม่ผ่านการแช่กรด HCl

องค์ประกอบทางเคมี	ซิลิกาจากขานอ้อย		t-test
	ไม่ผ่านการแช่กรด HCl	ผ่านการแช่กรด HCl	
ขนาดรูพรุน (nm)	7.51	9.70	**
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	104.17	117.59	**
ปริมาตรรูพรุน (cm^3/g)	0.196	0.285	**

**ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งที่ระดับ $p < 0.01$

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณพิชาภพ ปรีเปรม ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำเกี่ยวกับสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์

ประยุกต์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง XRF และ BET สำหรับการวิเคราะห์ทางองค์ประกอบทางเคมี ขนาดรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนของซิลิกาเจลสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่ วัสดุ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิจัย และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

6. รายการอ้างอิง

- [1] เขาวน ศรีเพชรดี, 2553, การศึกษาการใช้ซิลิกาเจลขนาดนาโนชนิดมีรูพรุน ที่สังเคราะห์จากเถ้าแกลบเพื่อเสริมแรงในยางธรรมชาติ โดยกระบวนการโซลเจล, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม, 245 น.
- [2] ธนาชัย จงสุวรรณไพศาล, 2553, ผนังดูดซับความชื้นด้วยซิลิกาที่สกัดจากแกลบ, ว.วิจัยและสาระสถาปัตยกรรม/การผังเมือง 6: 47-63.
- [3] พชรินทร์ วรณกุล, 2553, Sol-Gel เทคโนโลยีสังเคราะห์ซิลิกาจากขานอ้อย, ส่งเสริมเทคโนโลยี 36: 39-41.
- [4] ปิยนุช คะเนมา, 2554, ขานอ้อยและเปลือกข้าวโพด แหล่งซิลิกาผลิตสารดูดความชื้น, สารวิจัยเพื่อชุมชน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม, 5 น.
- [5] ศิริชัย ก้านกั้ง, ศิริรินทร์ ทองแสง, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, ชาคริต สิริสิงห์ และเอกชัย วิมลมาลา, 2554, อิทธิพลของแหล่งขานอ้อยและปริมาณของซิลิกาในผงเถ้าขานอ้อยที่มีต่อสมบัติการบ่มสุกและเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบของยางธรรมชาติ, การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 49 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- [6] ไกรกมล วงศ์เทพ, 2555, การหัตถ์ของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ที่ผสมด้วยอนุภาคนาโนซิลิกา, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 61 น.
- [7] โฉมศรี ศิริวงศ์, 2558, การใช้งานและความเป็นพิษของสารตัวเติมเสริมแรงในอุตสาหกรรมยาง, ว.วิทยาศาสตร์ มข. 43: 579-594.
- [8] Nayak, J.P. and Bera, J., 2011, Preparation of an efficient humidity indicating silica gel from rice husk ash, Bull. Mater. Sci. 34: 1683-1687.
- [9] เกศินี สวัสดิ์แพทย์, 2558, ศึกษาผลของการกระตุ้นนาโนซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยคลื่นไมโครเวฟต่อสมบัติของโพลีเอทิลีนเทฟลอน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, 103 น.
- [10] Okoronkwo, E.A., Imoisili, P.E. and Olusunle, S.O.O., 2013, Extraction and characterization of amorphous silica from corn cob ash by sol-gel method, Chem. Mater. Res. 3: 68-72.
- [11] Patil, R., Dongre, R. and Meshram, J., 2014, Preparation of silica powder from rice husk, International Conference on Advance in Engineering & Technology 2014, Singapore.
- [12] Ghorbani, F., Sanati, A.M. and Maleki, 2015, Production of silica nanoparticles from rice husk as agricultural waste by environmentally friendly technique, Environ. Stud. Persian Gulf 2: 56-65.

- [13] Mokhtar, H. and Tajuddin, R.M., 2016, The effect of nanosilica extracted from sugarcane bagasse on formulation of flat sheet nanofiltration membrane, *Int. J. Chem. Eng. Appl.* 7: 323-326.
- [14] กลุ่มวิชาการและสารสนเทศอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย, สำนักนโยบายอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย และสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2559, รายงานพื้นที่ปลูกอ้อยปีการผลิต 2558/59, สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย (สอน.), กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ, 124 น.
- [15] Hariharan, V. and Sivakumar, G., 2013, Studies on synthesized nanosilica obtained from bagasse ash, *Int. J. Chem Tech. Res.* 5: 1263-1266.
- [16] Sultana, M.S. and Rahman, M.A., 2013, Characterization of calcined sugarcane bagasse ash and sugarcane waste ash for industrial use, *International Conference on Mechanical, Industrial and Materials Engineering 2013*, RUET, Rajshahi, Bangladesk.
- [17] Norsuraya, S., Fazlena, H. and Norhasyimi, R., 2016, Sugarcane bagasse as a renewable source of silica to synthesize Santa Barbara Amorphous-15 (SBA-15), *Proc. Eng.* 2016: 839-846.
- [18] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ซิลิคอนไดออกไซด์สำหรับอุตสาหกรรมยาง, มอก. 1070-2547, กรุงเทพฯ.
- [19] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ซิลิคอนไดออกไซด์สำหรับอุตสาหกรรมยาปราบศัตรูพืช, มอก. 1071-2547, กรุงเทพฯ.
- [20] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ซิลิคอนไดออกไซด์สำหรับอุตสาหกรรมสี, มอก. 1072-2547, กรุงเทพฯ.
- [21] Kumar, R.S., Vinjamur, M. and Mukhopadhyay, M., 2013, A simple process to prepare silica aerogel microparticles from rice husk ash, *Int. J. Chem. Eng. Appl.* 4: 321-325.
- [22] Muljani, S., Setyawan, H., Wibawa, G. and Altway, A., 2014, A facile method for the production of high-surface-area mesoporous silica gels from geothermal sludge, *Advan. Powder Technol.* 25: 1593-1599.
- [23] Pijarn, N., Seng, H., Khanaruksombut, S., Phonprasert, P. and Vorapracha, P., 2015, Effect of synthesis conditions on % yield of silica gel from microwave process, *Int. J. Chem. Environ. Biol. Sci.* 3: 312-316.
- [24] Harish, P.R., Arumugam, A. and Ponnusami, V., 2015, Recovery of silica from various low-cost precursors for the synthesis of silica gel, *Pharm. Lett.* 6: 208-213.
- [25] Vaibhav, V., Vijayalakshmi, U. and Roopan, S.M., 2015, Agricultural waste as source for the production of silica nanoparticles, *Spectrochim. Acta A: Mol. Biomol. Spectrosc.* 139: 515-520.
- [26] Zulfiqar, U., Subhani, T. and Husain, S.W.,

- 2016, Synthesis and characterization of silica nanoparticles from clay, J. Asian Ceram. Soc. 4: 91-96.
- [27] AOAC, 1990, Official Method of Analysis, 15th Ed., Association of Analytical Chemists, Washington, D.C.
- [28] Selvakumar, K.V., Umesh, A., Ezhilkumar, P., Gayatri, S., Vinith, P. and Vignesh, V., 2014, Extraction of silica from burnt paddy husk, Int. J. Chem Tech. Res. 6: 4455-4459.
- [29] Haq, I.U., Akhtar, K. and Malik, A., 2014, Effect of experimental variables on the extraction of silica from the rice husk ash, J. Chem. Soc. Pak. 36: 382-387.
- [30] James Cook University, Element-to-stoichiometric oxide conversion factors, Available Source: <https://www.jcu.edu.au/advanced-analytical-centre/services-and-resources/resources-and-extras/element-to-stoichiometric-oxide-conversion-factors>, March 5, 2018.
- [31] Rezende, C.A., Lima, M.A., Maziero, P., Azevedo, E.R., Garcia, W. and Polikarpov, I., 2011, Chemical and morphological characterization of sugarcane bagasse submitted to a delignification process for enhanced enzymatic digestibility, Biotechnol. Biofuels 4: 1-18.
- [32] Pereira, P.H.F., Voorwald, H.C.J., Cioffi, M.O.H., Mulinari, D.R., Da Luz, S.M. and Da Silva, M.L.C.P., 2011, Sugarcane bagasse pulping and bleaching: Thermal and chemical characterization, BioResources 6: 2471-2482.
- [33] Guilherme, A.A., Dantas, P.V.F., Santos, E.S., Fernandes, F.A.N. and Macedo, G.R., 2015, Evaluation of composition, characterization and enzymatic hydrolysis of pretreated sugar cane bagasse, Braz. J. Chem. Eng. 32: 23-33.
- [34] Embong, R., Shafiq, N. and Kusbiantoro, A., 2016, Silica extraction and incineration process of sugarcane bagasse ash (SCBA) as pozzolanic materials: A review, ARPN J. Eng. Appl. Sci. 11: 7304-7308.
- [35] Rodríguez-Machín, L., Arteaga-Pérez, L.E., Pérez-Bermúdez, R.A., Casas-Ledón, Y., Prins, W. and Ronsse, F., 2018, Effect of citric acid leaching on the demineralization and thermal degradation behavior of sugarcane trash and bagasse, Biomass Bioenergy 108: 371-380.
- [36] Das, P., Ganesh, A. and Wangikar, P., 2004, Influence of pretreatment for deashing of sugarcane bagasse on pyrolysis products, Biomass Bioenergy 27: 445-457.
- [37] Ali, K., Amin, N.U. and Shah, M.T., 2009, Physicochemical study of bagasse and bagasse ash from the sugar industries of NWFP, Pakistan and its recycling in cement manufacturing, J. Chem. Soc. Pak. 3: 375-378.
- [38] Amin, N.U., Khattak, S., Noor, S. and Ferroze, I., 2016, Synthesis and characterization of silica from bottom ash of sugar industry, J. Cleaner Prod. 117: 207-211.

- [39] อรอนงค์ จุลพันธ์, ธงไทย วิฑูรย์ และเมตตา เจริญพานิช, 2554, การผลิตวัสดุดูดซับชนิดซิลิกาเมโซพอร์จากกากของเสียจากธรรมชาติ, วิศวกรรมสาร มก. 75: 103-120.
- [40] Affandi, S., Setyawan, H., Winardi, S., Purwanto, A. and Balgis, R., 2009, A facile method for production of high-purity silica xerogels from bagasse ash, Advanced Powder Technol. 20: 468-472.
- [41] Filipović, R., Lazić, D., Perušić, M. and Stijepović, I., 2010, Oil absorption in mesoporous silica particles, Proc. Appl. Ceram. 4: 265-269.