ดร.พัชรินทร์ วรธนกุล
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
e-mail : patcharinw@kmutnb.ac.th

กระบวนการโซลเจล (sol-gel technology) เป็นกระบวนการหนึ่งที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์วัสดุนาโน โดยการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า "Sol" ส่วนมากอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมครอน เป็นของแข็งที่เรียกว่า "Gel" โดยการนำสารละลายต่าง ๆ มาทำปฏิกิริยา

# Sol-Gel
## เทคโนโลยี สังเคราะห์ซิลิกาจากชานอ้อย

### ชานอ้อย (bagasse)

พลังงานจากชีวมวล เป็นพลังงานที่ได้จากพืช สัตว์ หรือองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิต สารอินทรีย์ต่าง ๆ รวมทั้งผลผลิตจากการเกษตรและป่าไม้ เช่น ชานอ้อย แกลบ ไม้ฟืน หรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอื่น ๆ รวมไปถึงการนำมูลสัตว์ ของเสียจากโรงงานแปรรูปทางเกษตร นำไปผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี โดยอาศัยจุลินทรีย์เป็นตัวช่วยย่อยสลาย อ้อย เป็นพืชชนิดหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานชีวภาพได้ในอัตราสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับพืชชนิดอื่น พลังงานที่ผลิตได้จากชีวมวลของอ้อยจำนวน 1 ตัน มีปริมาณเทียบเท่ากับพลังงานที่ได้จากน้ำมันดิบ 1 บาร์เรล

ในกระบวนการผลิตน้ำตาล ด้วยอ้อยจำนวน 1 ตัน เมื่อผ่านกระบวนการแปรรูปต่าง ๆ จะใช้พลังงานทั้งสิ้น 25-30 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ใช้ไอน้ำ 0.4 ตัน เพื่อให้ได้น้ำตาล ที่เหลือจะเป็นกากหรือชานอ้อย เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตประมาณ 290 กิโลกรัม ที่มีค่าเทียบเท่ากับพลังงานไฟฟ้าถึง 100 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ทำให้มีการนำชานอ้อยมาใช้เป็นเชื้อเพลิง เพื่อผลิตพลังงาน**ความร้อน** **สำหรับต้มน้ำให้เดือดจนกลายเป็นไอ** และสามารถนำพลังงานจากไอน้ำดังกล่าว หมุนเวียนกลับมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าได้**ใหม่อีกครั้ง**

พัชรินทร์ วรธนกุล. "Sol-Gel เทคโนโลยีสังเคราะห์ซิลิกาจากชานอ้อย" *ส่งเสริมเทคโนโลยี* 36, 209 (ก.พ.-มี.ค. 2553) 39-43

ปัจจุบันความต้องการพลังงานมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ สวนทางกับแหล่งพลังงานหลักกำลังลดจำนวนลง ส่งผลให้พลังงานมีมูลค่าสูงขึ้น แม้ว่าชานอ้อยจะให้พลังงานไม่เท่ากับน้ำมันหรือถ่านหิน แต่การใช้ชานอ้อยเป็นแหล่งพลังงาน นับว่าเป็นผลพลอยได้ที่โรงงานน้ำตาลไม่ต้องลงทุนซื้อหาแหล่งพลังงานความร้อน แต่เกิดปัญหาในการกำจัดขี้เถ้าชานอ้อยยากที่จะทำลายให้หมดไปจากบริเวณโรงงาน

แม้นักวิจัยจะคิดค้นวิธีการนำชานอ้อยไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ นำไปอัดเป็นแผ่นคล้ายไม้อัด ใช้ทำเยื่อกระดาษตลอดจนผลิตภัณฑ์พลาสติก และสาร Furfural เป็นต้น ถึงแม้ว่าชานอ้อยจะสามารถนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ แต่มีมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ไม่สูงนัก เมื่อเทียบกับมูลค่าของธาตุซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในขี้เถ้าชานอ้อย

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าชานอ้อยพบว่า ขี้เถ้าชานอ้อยมีปริมาณซิลิกาสูงมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ เหมาะแก่การนำมาใช้เป็นแหล่งซิลิกาในการสังเคราะห์วัสดุที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ เช่น ซิลิกาเจล ซีโอไลต์ ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้แตกต่างกันไปตามแต่คุณสมบัติ

## คุณสมบัติของซิลิกา

ซิลิกา เป็นผลึกของแข็งสีขาวที่ไม่ละลายน้ำ เกิดจากสารประกอบทางเคมี ระหว่างธาตุซิลิกอนกับธาตุออกซิเจนมีสูตรทางเคมี คือ $SiO_2$ เกิดขึ้นในหลายลักษณะ เช่น ในลักษณะของหินเหล็กไฟ และ ควอตซ์ (quartz) ซิลิกามีคุณสมบัติเป็นกรด และทำปฏิกิริยากับด่างเข้มข้น นอกจากนี้ยังมีซิลิกาอีกรูปแบบหนึ่ง คือ ซิลิกาในรูปคอลลอยด์ (colloidal silica) แร่ซิลิกากับซิลิกาในรูปคอลลอยด์นั้น มีความเหมือนกันตรงสูตรเคมีเท่านั้น ส่วนลักษณะทางโครงสร้างของวัสดุทั้งสองจะแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง

ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของซิลิกามีการจัดเรียงตัวแบบเตตระฮีดรา ยึดเกาะกันด้วยพันธะโควาเลนต์กับออกซิเจนด้านข้าง 4 อะตอม อย่างแข็งแรง ทำให้ซิลิกาบริสุทธิ์มีจุดหลอมเหลวสูงประมาณ 1,500-1,700 องศาเซลเซียส ซิลิกามีทั้งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และจากการสังเคราะห์ นอกจากนี้ยังสามารถปรากฏอยู่ใน 2 รูปแบบ แบบแรก เป็นรูปผลึกมีขนาดแตกต่างกันไปตั้งแต่ หินเขี้ยวหนุมานไปจนถึงขนาดเล็ก เช่น ทราย ส่วนอีกแบบหนึ่งคือ ซิลิกาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต ซึ่งเป็นซิลิกา อสัณฐาน เช่น ซิลิกาที่มีในสาหร่ายเปลือกแข็ง หรือไดอะตอม แม้ว่าซิลิกาผลึก และซิลิกาอสัณฐานจะมีสูตรเคมีเหมือนกัน แต่ก็มีคุณสมบัติหลายประการที่แตกต่างกันไป เช่น ความหนาแน่น ความแข็ง ความพรุน และความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี ความแตกต่างดังกล่าวมีสาเหตุเนื่องจากซิลิกาทั้งสองรูปแบบมีลักษณะโครงสร้างและพื้นที่ผิวจำเพาะที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ซิลิกาอสัณฐานที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า ซิลิกาในรูปผลึกมาก และมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าถูกใช้เป็นสารดูดความชื้น สารดูดซับ สารเพิ่มความแข็งแรง สารเติมแต่ง และองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

## การประยุกต์ใช้ซิลิกา

ปัจจุบันซิลิกามีบทบาทสำคัญทั้งในอุตสาหกรรม และการศึกษาวิจัยเป็นอย่างมาก โดยมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายแขนง ตัวอย่างเช่น

**อุตสาหกรรมยาง** ซิลิกาสามารถใช้เป็นสารเสริมแรงที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมยาง เพราะการเติมสารตัวเติมลงไปในยางจะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของยางให้ดีขึ้น โดยเฉพาะค่าความแข็ง (hardness) โมดูลัส (modulus) ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) และความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) เป็นต้น โดยซิลิกาที่นิยมใช้มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 10-40 นาโนเมตร (nm) ซิลิกาจะไม่อยู่โดดเดี่ยว ในรูปของอนุภาคปฐมภูมิ แต่จะจับกลุ่มรวมกันเป็นก้อนที่เรียกว่า **แอกกรีเกต** (aggregate) เกิดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิ (primary structure) ซึ่งโครงสร้างนี้ไม่สามารถถูกทำลายได้ในระหว่างการกวนผสม

ปัจจุบันซิลิกาที่นิยมใช้เป็นสารตัวเติมในยางคือ ซิลิกาในรูปคอลลอยด์ (colloidal silica) หรือ พรีซิพิเตตซิลิกา (precipitate silica) สามารถแบ่งได้หลายเกรด ซิลิกาแต่ละเกรดจะแตกต่างกันตามขนาดของอนุภาคปฐมภูมิ (primary particle size) หรือพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) โดยทั่วไป ซิลิกาอนุภาคปฐมภูมิเล็ก หรือพื้นที่ผิวจำเพาะสูงจะช่วยเสริมแรงได้ดีกว่าอนุภาคใหญ่

***อุตสาหกรรมซีเมนต์*** การใช้ประโยชน์จากซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร เพื่อใช้เป็นส่วนผสมเพิ่มเติม (additive) เพื่อทำให้คอนกรีตคุณภาพสูง หรือคอนกรีตไหลเข้าแบบได้ด้วยตนเอง ซึ่งการใช้ซิลิกาขนาดนาโนทำให้คอนกรีตที่ยังไม่แข็งตัวมีความสามารถในการไหลเทดีขึ้น และยังเพิ่มกำลังอัดประลัยให้กับคอนกรีตอีกด้วย กำลังอัดและกำลังดึงของมอร์ต้าร์ ที่ผสมอนุภาคระดับนาโนข้างต้นมีค่าเพิ่มขึ้น หรือการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตน้อยลง เนื่องจากอนุภาคระดับนาโนมีการกระจายตัวดีขึ้นในส่วนผสมเพิ่มความหนืดของของเหลวในมอร์ต้าร์ เนื่องจากอนุภาคนาโนมีขนาดเล็กมาก จึงทำให้เม็ดปูนซีเมนต์ และมวลรวมสามารถลอยอยู่ในของเหลวในระหว่างที่เป็นมอร์ต้าร์สดได้

***อุตสาหกรรมยา*** ซิลิกาสามารถใช้เป็นสารช่วยเพิ่มแรงตึงผิว และช่วยในการกระจายตัวของยาชนิดที่เป็นของเหลวได้

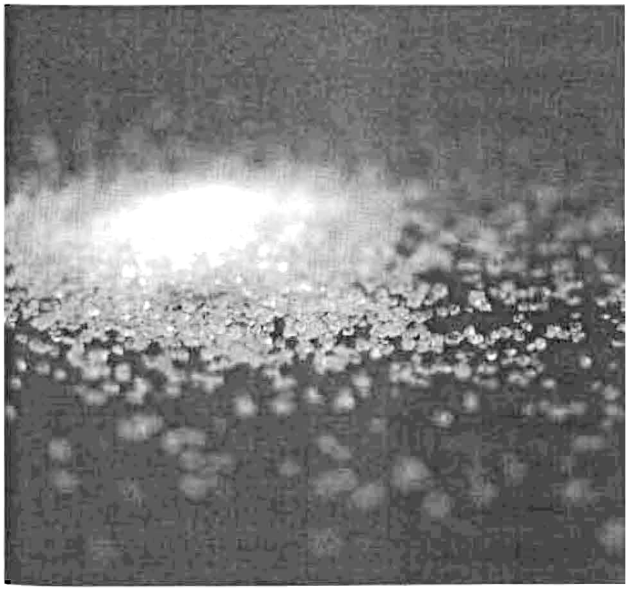
***อุตสาหกรรมอาหาร*** ซิลิกาสามารถใช้เป็นตัวดูดจับความชื้น ช่วยยืดอายุการถนอมอาหาร ใช้กรองน้ำดื่ม

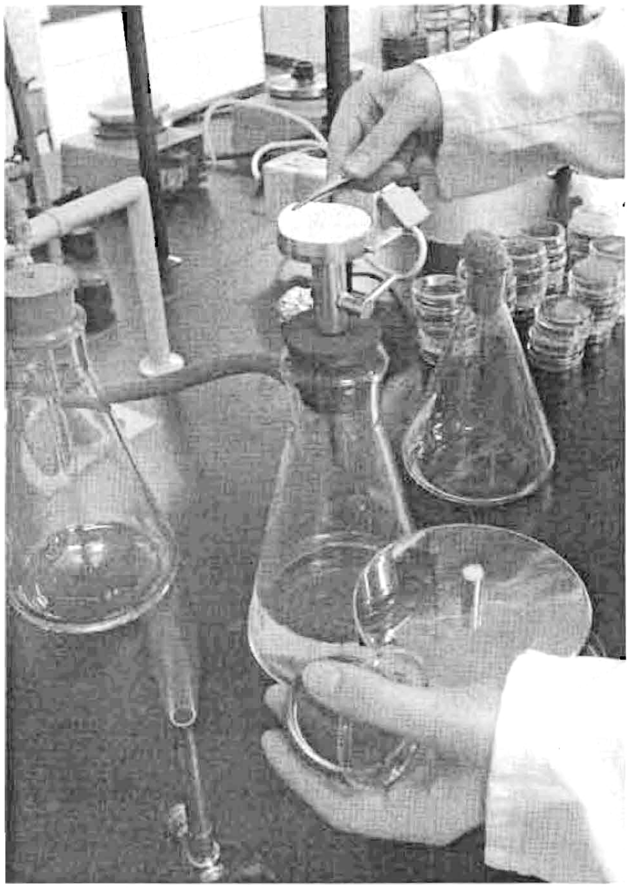
***อุตสาหกรรมสี*** สามารถใช้เป็นตัวควบคุมการไหลของสี

***อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง*** สามารถใช้เป็นตัวช่วยดูดซับน้ำได้

นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น ในอุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมแก้ว และสามารถนำไปประยุกต์ในเชิงสิ่งแวดล้อมได้ โดยนำไปใช้เป็นตัวดูดซับสารเคมีอันตราย เช่น สารโลหะหนัก กำจัดน้ำเสีย เป็นต้น

โดยส่วนใหญ่แล้ว ซิลิกาจะถูกนำเข้าจากต่างประเทศเป็นปริมาณมากในแต่ละปี เพื่อนำไปใช้ในงานต่าง ๆ กัน นอกจากนี้ยังใช้ซิลิกาเป็นสารเคมีตั้งต้นในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนหรือสารประกอบที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ เช่น สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตในกลุ่มซีโอไลต์ เป็นต้น ดังนั้นการสังเคราะห์สารต่าง ๆ รวมถึงการควบคุมโครงสร้างให้มีรูปแบบที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งาน จึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุขนาดต่ำกว่าระดับไมครอน และวัสดุนาโนด้วย

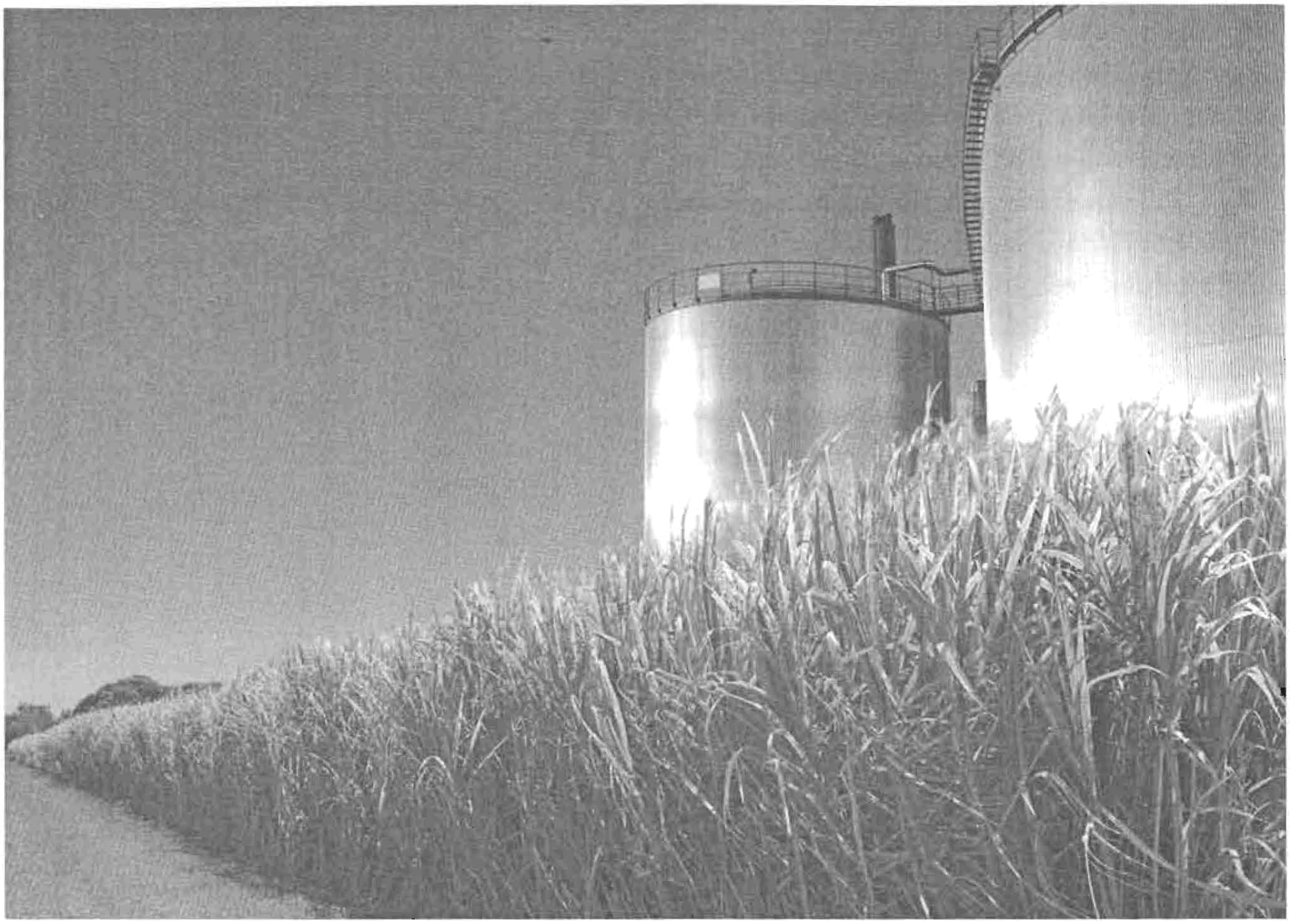




กระบวนการทางเคมี สามารถสังเคราะห์ได้จากหลายกระบวนการ เช่น กระบวนการโซลเจล กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล กระบวนการเฟลมสเปรย์ไพโรไลซิส และกระบวนการตกตะกอน โดยกระบวนการโซลเจล เป็นกระบวนการที่สามารถควบคุมอนุภาคและกลไกการเกิดปฏิกิริยาได้ โดยสามารถสรุปย่อได้ดังนี้

**กระบวนการโซลเจล** (sol-gel technology) เป็นกระบวนการหนึ่งที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์วัสดุนาโน โดยการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า *"Sol"* ส่วนมากอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมครอน เป็นของแข็งที่เรียกว่า ***"Gel"*** โดยการนำสารละลายต่าง ๆ มาทำปฏิกิริยา สารประกอบที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะของโซล เมื่อโซลเกาะตัวกันเป็นร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบจะทำให้เกิดเป็นเจล ในกระบวนการผลิตทั้งจากสภาวะที่เป็น Sol และ Gel เมื่อเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้งหรือเผาที่อุณหภูมิต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น เส้นใย (fiber) แอโรเจล (aerogel) ซีโรเจล (xerogel) อนุภาคผง (powder) และการเคลือบฟิล์ม (coating film) สำหรับใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมอื่น ๆ ต่อไป

ปฏิกิริยาที่สำคัญในการกระบวนการโซล - เจล มี 3 ปฏิกิริยา คือ **ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส** (hydrolysis) **การควบแน่นด้วยน้ำ** (water condensation) และ**การควบแน่นด้วยแอลกอฮอล์** (alcohol condensation) โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ pH ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนของน้ำและโลหะและอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ในสภาวะที่ต่างกัน

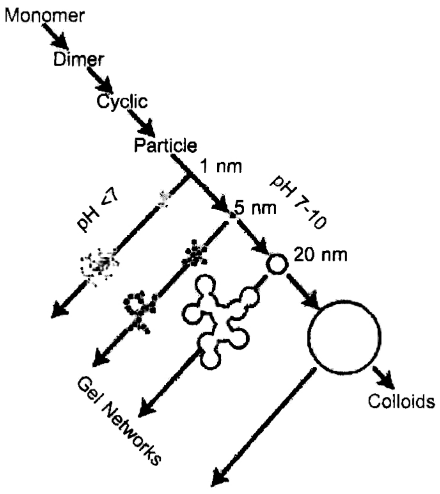


จึงทำให้เกิดเป็นโซลและเจลที่ได้มีสมบัติและโครงสร้างต่างกัน

สำหรับคุณสมบัติทางเคมีของสารละลายซิลิกาที่สำคัญ คือ ปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับน้ำ ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้เกิดการตกตะกอนเป็นซิลิกาในชานอ้อย แกลบ และพืชชนิดต่าง ๆ กระบวนการดังกล่าวมี 4 ขั้นตอน ได้แก่ **การละลาย** (solubility) **การตกตะกอน** (precipitation) **การรวมตัว** (agglomerate) และ**การเกิดพอลิเมอร์** (polymerization)

ความแตกต่างระหว่างการเกิดพอลิเมอร์กับการรวมตัว คือ การรวมตัวเป็นแค่การเกาะรวมกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals forces) ของชั้นผิวของ Si-OH และน้ำที่ถูกดูดซับทางเคมี แต่การเกิดพอลิเมอร์เป็นการสร้างพันธะใหม่ของสายโซ่ Si-O-Si โดยสามารถเกิดในแต่ละลักษณะตามสภาวะ (รูปที่ 1) ดังนี้

- **สภาวะพีเอชต่ำ** สภาพการละลายของซิลิกาจะต่ำ ทำให้เกิดการรีไพนิ่งของอนุภาคขนาดต่ำกว่า 1 ไมโครเมตรเท่านั้น ดังนั้นการเกิดพอลิเมอร์จึงเกิดได้มากกว่า
- **สภาวะพีเอชปานกลางแต่ต่ำกว่า** 10 อนุภาคซิลิกาที่มีขนาดเล็กจะรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคซิลิกาที่มีขนาดใหญ่
- **สภาวะพีเอชมากกว่า** 10 สภาพการละลายจะสูงพอที่จะเกิดรีไพนิ่ง และเกิดเป็นคอลลอยด์ขนาดใหญ่ขึ้น




▲ รูปที่ 1 โครงสร้างของซิลิกาแบบต่าง ๆ ที่สภาวะพีเอชต่ำและพีเอชสูง
*ที่มา: http://www.hybridsilica.com/Hybrid_Materials_from_Sol-Gel_Chemistry.html (Retrieved 20 April 2009).The Sol-Gel Process in Silica.*

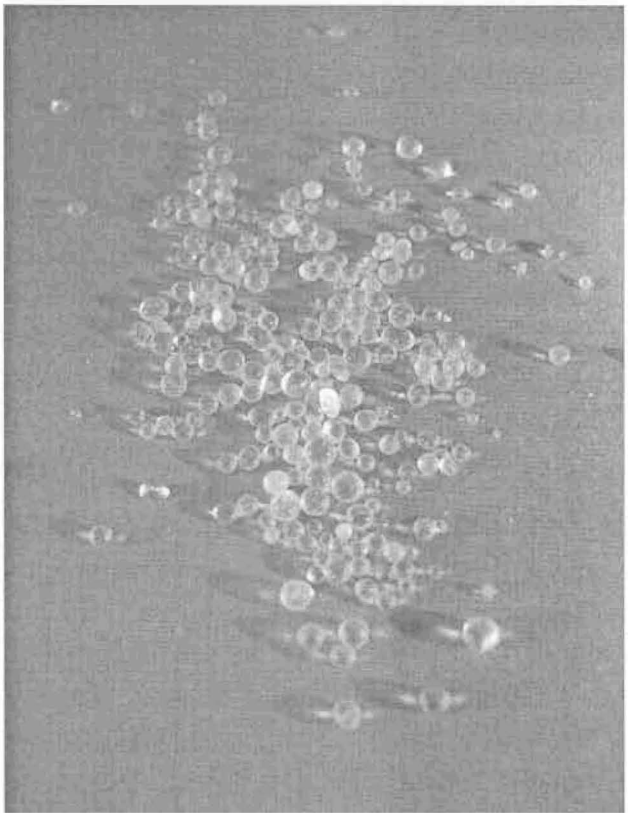
ดังนั้นชานอ้อยสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งซิลิกา เพื่อใช้ในการเตรียมสารเคมีตั้งต้น เช่น สารละลายโซเดียมซิลิเกตมีสูตรทั่วไปทางเคมีคือ $nSiO_2$· Na2O ค่า n แสดงถึงอัตราส่วนโดยโมล (mole ratio) ระหว่างซิลิกาต่อโซเดียมออกไซด์ โครงสร้างพื้นฐานของโซเดียมซิลิเกต ประกอบด้วย แอนไอออนของซิลิเกต ($SiO_4^{2-}$) ซึ่งเรียงตัวแบบเตตระฮีดรายึดเกาะกันเป็นโครงร่างตาข่าย เมื่อมีอะตอมของโซเดียมแทรกเข้าไปจะทำให้

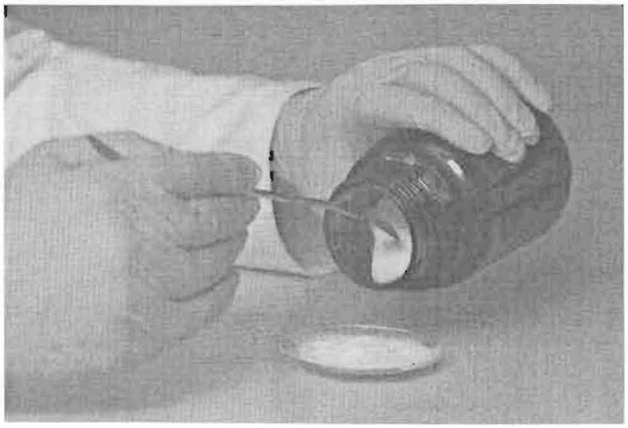
โครงร่างตาข่ายเกิดการแตกออก โดยอะตอมของโซเดียมจะเข้าไปเกิดพันธะกับออกซิเจนแทนอะตอมของซิลิกอนทำให้โครงสร้างยึดกันแบบหลวม ๆ

นอกจากนี้ซิลิกายังสามารถใช้เป็นแหล่งในการสังเคราะห์เป็นสารประกอบชนิดต่าง ๆ โดยอาศัยคุณสมบัติทางเคมีของการละลายของซิลิกา และการเกิดในรูปแบบต่าง ๆ ตามสภาวะที่พีเอชสูงและต่ำ เป็นปัจจัยหนึ่งในการกำหนดโครงสร้างของสารสังเคราะห์ได้ เช่น การสังเคราะห์สารเชิงประกอบนาโน (nanocomposite) หรือซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งซีโอไลต์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicates compounds) ที่มีโครงสร้างสามมิติของหน่วยย่อยแบบทรงเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedral) ประกอบด้วย อะตอมของซิลิกอน หรืออะลูมิเนียมหนึ่งอะตอมอยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ($SiO_4$ หรือ $AlO_4$) เป็นต้น

## สรุป

ชานอ้อยหรือกากอ้อย สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งซิลิกาในการสังเคราะห์วัสดุที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบได้ ช่วยในการเพิ่มมูลค่าจากชีวมวลที่ได้จากการเกษตร และสามารถใช้ให้เกิดประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมได้






***เอกสารอ้างอิง***

1. เขมกร นิรุตติเมธี และญาณันธร ทองชัย. **การสังเคราะห์และศึกษาคุณสมบัติซิลิกาจากขี้เถ้าชานอ้อยและการประยุกต์ใช้เชิงสิ่งแวดล้อม.** ปริญญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2552.

2. จุฑารัตน์ อาชวรัตน์ถาวร. "**กระบวนการโซลเจล** (Sol-Gel Technology)" (ออนไลน์) 2546 (สืบค้นเมื่อ 13 มิถุนายน 2552). จาก http://www.dpim.go.th/ppr/title.php?tid=000001106028718

3. นิตยา ทวดอาจ. "**การเตรียมผงนาโนซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าว**". วิทยานิพนธ์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2550

4. วิศรุต พยับนพ และ อรรคพล ม่วงเพชร. **การสังเคราะห์และทดสอบปฏิกิริยาของซีโอไลต์ LSX ที่สกัดได้จากชานอ้อย.** ปริญญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2552.

5. Prasetyko, D., Ramli, Z., Endud, S., Hamdan, H., and Sulikowski, B. "**Conversion of rice husk ash to zeolite beta**" Waste Management, 26(2006): 1173-1179.

6. Vital, A., Klotz, U., Marek, S., and Jerzy, W. "**Synthesis silica**" Journal of Materials Processing Technology 199(2008): 10-26.

7. Worathanakul, P., Payubnop, W and Muangpet, A. "**Characterization for Post-treatment Effect of Bagasse Ash for Silica Extraction**", Proceeding in the International Conference on Energy and Environment, Word Academy of Science, Engineering and Technology 56(2009): 389-392, Singapore.