

บทที่ 2

ทฤษฎี

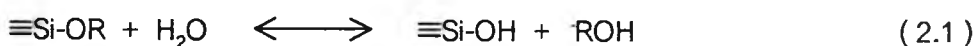
2.1 บทนำ

ในการศึกษาวัสดุซิลิกา-เจลนาโนคอมโพสิตเพื่อเป็นพาหะสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพ มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้หลายทฤษฎี ซึ่งจะแบ่งการศึกษาทฤษฎีออกเป็นสามส่วน คือ ในส่วนแรกจะกล่าวถึงกระบวนการโซล-เจล (sol-gel process) ส่วนที่สองเป็นไมโครอิมัลชัน-เบสค์ออร์แกนเจล (microemulsion-based organogels; MBGs) ส่วนที่สามเป็นซิลิกา-เจลนาโนคอมโพสิต

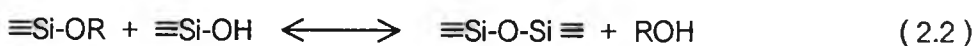
2.2 กระบวนการโซล-เจลของซิลิกอนอัลคอกไซด์

กระบวนการโซล-เจลของซิลิกอนอัลคอกไซด์ คือกระบวนการหนึ่งที่ใช้สังเคราะห์วัสดุเซรามิกส์ และแก้ว โดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสตามด้วยปฏิกิริยาควบแน่นเซชันโพลีเมอไรเซชันของซิลิกอนอัลคอกไซด์ (Si-O-R) ผลิตภัณฑ์ประเภทซิลิเกตเจล (เจลที่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็น SiO_4^{4-}) มักจะถูกสังเคราะห์จากการไฮโดรไลซิสของเตตระอัลคอกซีซิลเลนที่มีอัลคอกไซด์ 4 กลุ่ม (เช่น เตตระเมทอกซีซิลเลน (TMOS), เตตระเอทอกซีซิลเลน (TEOS)) และมีกรดเกลือ (mineral acid เช่น HCl) หรือเบส (เช่น NH_3) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากหมู่ฟังก์ชัน (หมู่อัลคอกไซด์ (OR) และหมู่ไฮดรอกซิล (OH)) จะมี 3 ปฏิกิริยาเกิดขึ้นในกระบวนการโซล-เจล (Brinker และ Scherer, 1990) ร่วมกับปฏิกิริยาย้อนกลับ ดังนี้

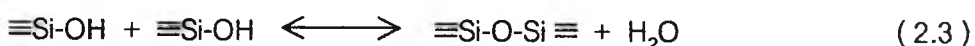
ไฮโดรไลซิส



ควบแน่นเซชันที่ผลิตอัลคอกซิล



ควบแน่นเซชันที่ผลิตน้ำ



เมื่อ R เป็นหมู่อัลคิล, $\text{C}_x\text{H}_{2x+1}$

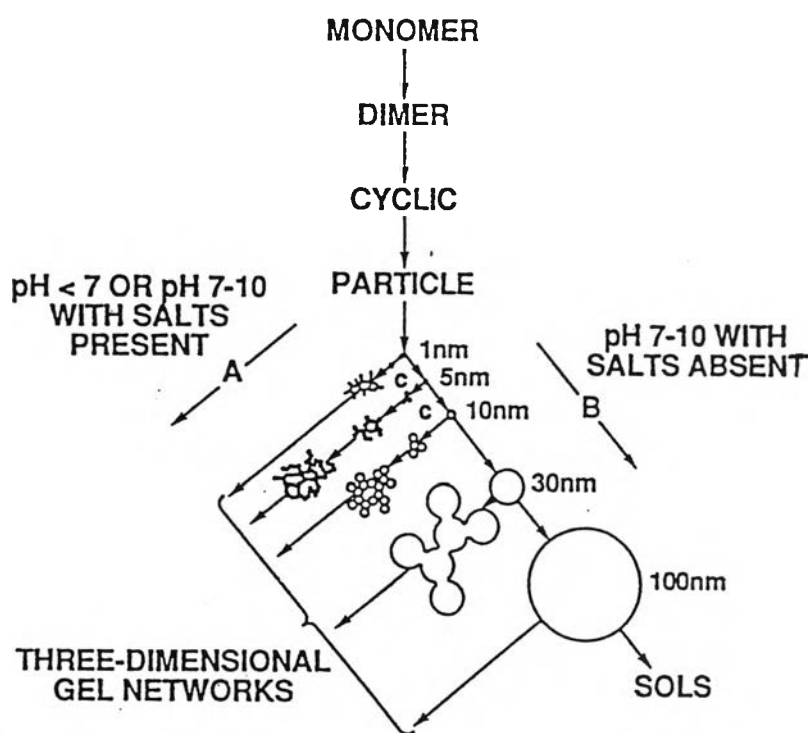
ในกรณีของเตตระเอทอกซีซิลเลน (tetraethoxysilane, TEOS) R เป็น C_2H_5

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (สมการที่ 2.1) เกิดจากการแทนที่หมู่อัลคอกไซด์ (-OR) ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ตามด้วยปฏิกิริยาคอนเดนเซชันซึ่งเกิดจากการรวมหมู่ซิลานอล (-Si-OH) เพื่อสร้างพันธะซิลิเซน (-Si-O-Si-) เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (byproduct) เป็นอัลกอฮอล์ (ROH) (สมการที่ 2.2) หรือน้ำ (สมการที่ 2.3) ซึ่งในภาวะโดยทั่วไป การเริ่มต้นของปฏิกิริยาคอนเดนเซชันจะเกิดขึ้นก่อนที่ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเสร็จสมบูรณ์ เนื่องจากน้ำและซิลิกอนอัลคอกไซด์ไม่ละลายเข้ากันจึงนิยมใช้อัลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายร่วมแต่อย่างไรก็ตามเจลสามารถเตรียมได้จากการผสมของซิลิกอนอัลคอกไซด์และน้ำโดยไม่ต้องอาศัยตัวทำละลายร่วมเพราะอัลกอฮอล์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมีปริมาณเพียงพอที่จะทำให้สารตั้งต้นทั้งสองละลายเข้ากันได้ ลำดับของการเกิดปฏิกิริยาเหล่านี้รวมทั้งการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ในระบบที่มีและไม่มีอัลกอฮอล์จะมีผลต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นซึ่งจะกล่าวต่อไป

ในกระบวนการโซล-เจลผลิตภัณฑ์เบื้องต้นคือโซลเมื่อปล่อยให้แห้งไว้โซลจะค่อยๆ เกิดพันธะเชื่อมต่อกันเป็นเจลซึ่งจะเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย โซลสามารถเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ พาร์ติคิวเลทโซล (particulate sols) โดยทั่ว ๆ ไปเมื่อโซลมีขนาดมากกว่า 5 นาโนเมตร (Brinker และ Scherer, 1990) และโพลิเมอริกโซล (polymeric sols) ในกรณีที่โซลมีขนาดน้อยกว่า 1 นาโนเมตร (Brinker และ Scherer, 1990) ทำให้เจลที่เกิดตามมาแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะเช่นเดียวกันคือ พาร์ติคิวเลทเจล (particulate gels) และโพลิเมอริกเจล (polymeric gels) โดยที่พาร์ติคิวเลทเจล หมายถึงมวลลักษณะยึดหยุ่นได้เกิดจากอนุภาคโซลเชื่อมโยงกันด้วยแรงที่ผิว (surface force เช่น แรงแวนเดอร์-วาลส์) เกิดเป็นโครงข่าย (network) ขึ้น ส่วนโพลิเมอริกเจลหมายถึงมวลลักษณะยึดหยุ่นได้ซึ่งเกิดจากการเชื่อมโยงของโซลด้วยพันธะโควาเลนต์

การเกิดเจลทั้ง 2 ลักษณะสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ ในกรณีของพาร์ติคิวเลทเจลสามารถอธิบายได้โดยอาศัยรูปที่ 2.1 ซึ่ง Engelhardt และคณะ (1977) และ Iler (1979) พบว่าในระบบซึ่งมีน้ำปริมาณมากเกินพอและไม่ใช้อัลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายร่วม ลักษณะของเจลที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายน้ำ กล่าวคือ ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 7 อนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กมาเกาะกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ลักษณะเช่นนี้สามารถเกิดขึ้นในระบบที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้นไป (ค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 7 ถึง 10) ได้เมื่อมีเกลืออยู่ในระบบเนื่องจากเกลือจะทำหน้าที่ลดแรงผลักระหว่างอนุภาค ทำให้อนุภาคมารวมตัวกันเป็นโครงข่ายเจลได้ง่ายขึ้น ส่วนในระบบที่ค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 7 ถึง 10 และไม่มีเกลือ อนุภาคจะโตขึ้นมากเป็นโซลที่เสถียรซึ่งจะไม่สามารถเกาะตัวกันเป็นเจลได้ สำหรับกลไกของการเกิดเจลในกรณีพาร์ติคิวเลทเจล ปฏิกิริยาคอนเดนเซชันเกิดในทิศทางที่จะได้พันธะซิลิเซนมากที่สุดและเหลือกลุ่มไฮดรอกซิล (-OH) น้อยที่สุดอยู่ที่

ปลายของโมเลกุล ดังนั้นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาคอนเดนเซชันจึงเกิดขึ้นอย่างเป็นลำดับ โดยเริ่มจาก ไมโนเมอร์, ไดเมอร์, ไตรเมอร์ที่เป็นเส้นตรง, ไตรเมอร์ที่เป็นวง, เตตระเมอร์ที่เป็นวง จนกระทั่งได้วงของ โพลีเมอร์ที่ใหญ่ขึ้น จนเกิดเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเอง (รูปที่ 2.1 B) จะเห็นได้ว่าการเกิดอนุภาค ในลักษณะนี้จะต้องอาศัยปัจจัย 2 ประการคือ การแตกตัวของวงโพลีเมอร์ (depolymerization ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาย้อนกลับของสมการที่ 2.2 หรือ 2.3) และการเติมไมโนเมอร์เข้าสู่วงโพลีเมอร์เดิม พบว่าการเพิ่มขนาดของอนุภาคจะหยุดเมื่อความแตกต่างระหว่างความสามารถในการละลายของ อนุภาค (การสลายของพันธะไฮโดรเจน) ที่เล็กที่สุดและอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดเพียง 2 ถึง 3 ส่วนในล้าน ส่วน (2-3 ppm) เท่านั้น จากนั้นแต่ละอนุภาคซึ่งมีลักษณะเป็นคอลลอยด์อยู่ในของเหลวเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์เกาะกันเป็นโซ่ของอนุภาคจนกระทั่งเกิดเป็นโครงข่ายซึ่งแผ่ ขยายในตัวกลางที่เป็นของเหลวมีความหนาเพิ่มขึ้นจนมีลักษณะเป็นเจล การเพิ่มขนาดของอนุภาค และการเกาะกลุ่มของอนุภาคสามารถที่จะเกิดขึ้นพร้อมๆ กันได้ขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 2.1 แสดงพฤติกรรมของการเกิดโพลีเมอร์ของอนุภาคซิลิกาในสารละลายน้ำ (A)ในสารละลายกรด หรือมีการเติมเกลือ อนุภาครวมกลุ่มกันเป็นโครงข่าย 3 มิติ และเกิดเป็นเจล, (B)ในสารละลายเบส อนุภาคขนาดใหญ่เกิดขึ้นและจำนวนอนุภาคลดลง (Iler, 1979)

ส่วนในกรณีของโพลีเมอริกเจล จากกระบวนการไฮล-เจลที่สภาพความเป็นกรด-ด่างต่ำ (ค่าความเป็นกรด-ด่างน้อยกว่า 7) โดยเฉพาะในระบบสารละลายอัลกอกซิล-น้ำ อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาคอนเดนเซชัน (สมการที่ 2.2 และ 2.3) จะต่ำกว่าในระบบสารละลายน้ำภายใต้ภาวะเหล่านี้ Iler (1979) เสนอว่า การแตกของวงโพลีเมอร์เกิดน้อยที่สุดปฏิกิริยาคอนเดนเซชันจะเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับไม่ได้และพันธะไฮโดรเจนไม่สามารถถูกไฮโดรไลต์ กระบวนการคอนเดนเซชันจะคล้ายคลึงกับการเกิดปฏิกิริยาคอนเดนเซชันของโมโนเมอร์ของสารอินทรีย์เป็นสายโซ่ ทำให้เจลเกิดขึ้นในลักษณะโครงข่ายโมเลกุลโพลีเมอร์สามมิติ

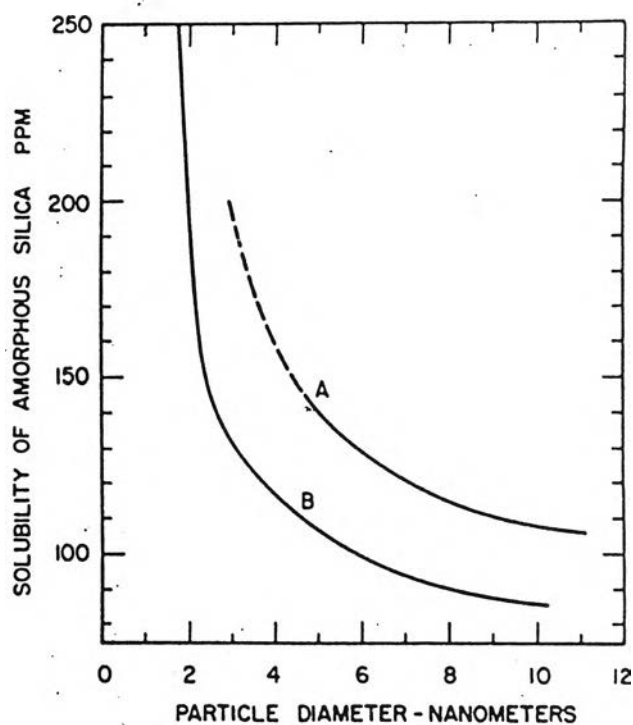
จะเห็นได้ว่าการแตกของวงโพลีเมอร์มีผลต่อลักษณะของเจลที่เกิดขึ้น (พารามิเตอร์ของเจลหรือโพลีเมอริกเจล) ซึ่งการแตกของวงโพลีเมอร์ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการได้แก่ ความสามารถในการละลายของอนุภาค และอัตราส่วนเชิงโมลของน้ำต่อ TEOS (ค่า r)

(1) ความสามารถในการละลายของอนุภาค

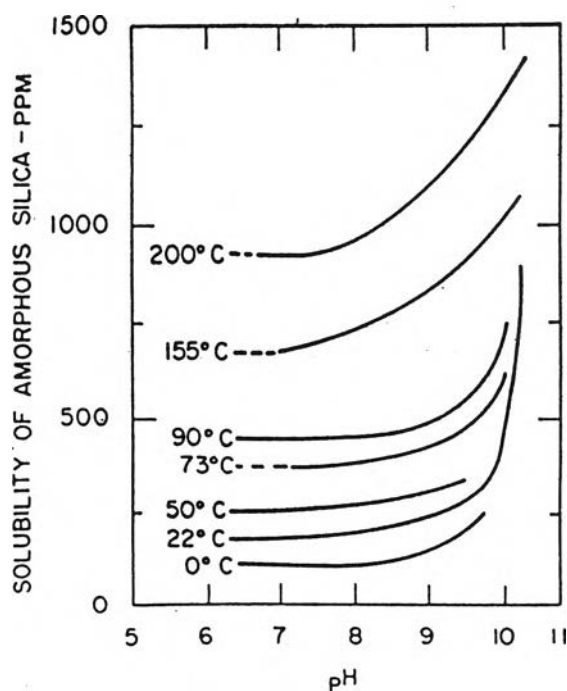
ความสามารถในการละลายของอนุภาคจะสูงเมื่อปฏิกิริยาคอนเดนเซชันเกิดขึ้นในระบบสารละลายน้ำ ส่วนในระบบที่ใช้อัลกอกซิลเป็นตัวทำละลายร่วมความสามารถในการละลายของอนุภาคจะลดลง (ตารางที่ 2.1) และในระบบที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงความสามารถในการละลายของอนุภาคจะสูง (รูปที่ 2.2 A และรูปที่ 2.3) ในระบบที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำลงจะทำให้ความสามารถในการละลายลดลง (รูปที่ 2.2 B และรูปที่ 2.3) นอกจากนี้ในรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นความสามารถในการละลายจะลดลง และในรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่าในระบบที่อุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการละลายจะเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.1 การละลายของซิลิกาที่ 25 องศาเซลเซียส ในสารละลายน้ำ-เมทานอล(Iler, 1979)

เมทานอล (%โดยน้ำหนัก)	การละลาย (มิลลิกรัม / ลิตร)
0	140
25	75
50	40
75	15
90	5



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายของซิลิกาในน้ำที่ 25 องศาเซลเซียสและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (A) ที่อุณหภูมิ 80 - 100 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 (B) ที่อุณหภูมิ 25 - 50 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2.2 (Iler, 1979)



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการละลายของซิลิกาและค่าความเป็นกรด-ด่างที่อุณหภูมิต่างๆ กัน (Iler, 1979)

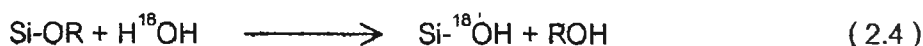
(2) ค่า r

ในระบบที่ค่า r สูง จะทำให้ปริมาณน้ำในระบบสูง ซึ่งน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาคอนเดนเซชันในสมการที่ 2.3 จึงสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของสมการที่ 2.3 ได้มากกว่าในระบบที่ค่า r ต่ำกว่า

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าโครงสร้างและสมบัติของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไฮโดรไลซิสของซิลิกอนอัลคอกไซด์จะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาที่สำคัญหลายๆ ปฏิกิริยาซึ่งคือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส, ปฏิกิริยาคอนเดนเซชัน และปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาทั้งสอง ซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.2.1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดจากการโจมตีของออกซิเจนในโมเลกุลของน้ำต่ออะตอมซิลิกอน แสดงในสมการที่ 2.4 ซึ่งไฮโดรเจนของน้ำจะไม่ปรากฏในอัลคอกไซด์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง ทั้งในภาวะกรดและภาวะเบส (Khaskin, 1952)

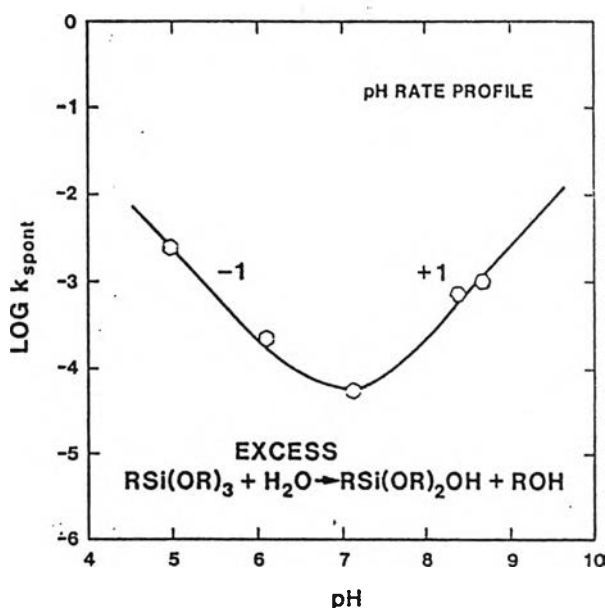


2.2.1.1 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดเร็วและสมบูรณ์ได้เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา (Voronkov และคณะ, 1978) ซึ่งนิยมใช้กรดเกลือ และแอมโมเนียมากที่สุดในการบวนการไฮโดรไลซิส นอกจากนี้ยังมีตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ อีกเช่น กรดอะซีติก ปรอทไฮดรอกไซด์ วาเนเดียมอัลคอกไซด์และออกไซด์

นักวิจัยหลายท่าน (Keefer และคณะ, 1984) พบว่ากรดเกลือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพมากกว่าเบสที่ความเข้มข้นเดียวกัน Aelion และคณะ (1950) สังเกตเห็นว่าในปฏิกิริยาที่ใช้กรดอ่อนเป็นตัวเร่งต้องการเวลานานขึ้นในการแผ่ขยายของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กรดแก่ในจำนวนโมลที่เท่ากันเป็นตัวเร่ง นอกจากนี้ Pohl และ Osterholtz (1985) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (spontaneous first order

rate constants) ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เฉพาะในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ γ -ไกลสิดอกซิโพรพิลไตรอัลคอกซีซิลเลน (γ -glycidoxypropyl-trialkoxysilane, $R Si(OR)_3$) ในรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าการเร่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในภาวะที่เป็นกรดและภาวะที่เป็นเบสเนื่องจากค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่าและสูงกว่า 7 ตามลำดับ ในภาวะที่เป็นกลาง (ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7) ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะต่ำที่สุด แสดงว่าการเร่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างที่เฉพาะ (specific acid and specific base catalyzed)



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าความเป็นกรด-ด่างที่ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ γ -ไกลสิดอกซิโพรพิลไตรอัลคอกซีซิลเลน (Pohl และ Osterholtz, 1985)

Pope และ Mackenzie (1986) ได้สรุปผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยารวมของทั้งไฮโดรไลซิสและคอนเดนเซนชัน สามารถเปรียบเทียบกันโดยดูจากเวลาที่ใช้ในการเกิดเจล (gelation time) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TEOS ที่อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำต่อ TEOS ($[H_2O] / [TEOS]$; r) เป็นสี่ในเอทานอลแสดงในตารางที่ 2.2 จากตารางจะสังเกตเห็นว่ากรดเกลือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพมากกว่าเบสที่ความเข้มข้นเดียวกัน

ตารางที่ 2.2 เวลาในการเกิดเจลและค่าความเป็นกรด-ด่างสำหรับระบบ TEOS ในตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ (Pope และ Mackenzie, 1986)

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ความเข้มข้น (โมลต่อโมล TEOS)	เวลาในการเกิดเจล (ชั่วโมง)
HF	0.05	12
HCl	0.05	92
NH ₄ OH	0.05	107

จากผลงานวิจัยของนักวิจัยหลายๆ ท่านที่กล่าวมาข้างต้นทำให้สามารถสรุปได้ว่าชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา, ความแรง (strong / weak acid, strong / weak basic catalysts) และ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยที่ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นได้ดีในภาวะกรดหรือเบส และยิ่งความแรงและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยามีมากขึ้นยิ่งทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเร็วขึ้น

2.2.1.2 อิทธิพลของอัตราส่วนเชิงโมลของน้ำต่อซิลิกอนอัลคอกไซด์ (r)

ค่า r ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (สมการที่ 2.1) เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากกระบวนการโซล-เจลของซิลิกอนอัลคอกไซด์ เช่น ลักษณะเป็นเส้นใย, เจลก้อน, หรือผงอนุภาค เป็นต้น ซึ่งลักษณะของผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะเกิดขึ้นที่ค่า r ในช่วงหนึ่งๆ ร่วมกับปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ ตัวทำละลายร่วม (อัลกอฮอล์) อุณหภูมิ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้มข้นและชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ตารางที่ 2.3 แสดงตัวอย่างสัดส่วนของสารประกอบที่ใช้ในกระบวนการโซล-เจลซึ่งมีผลต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์ เช่น Sakka และคณะ (1984) พบว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TEOS ที่ใช้ค่า $r = 1$ และกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ มีผลต่อลักษณะของโซลเป็นเส้นใย (spinnable sol) Schaefer และคณะ (1982) แปรค่าภาวะของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและคอนเดนเซชันโดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส 2 ขั้นตอน ($r = 1$ ภายใต้ภาวะกรด 90 นาที จึงตามด้วย $r = 3, 4$ ภายใต้ภาวะกรดหรือเบส) พบว่าโครงสร้างของเจลมีลักษณะการแตกสาขาอย่างอ่อนๆ Stober และคณะ (1968) พบว่าที่ค่า r ตั้งแต่ 20 ถึง 50 และใช้สารละลายแอมโมเนียที่มีความเข้มข้นในช่วง 1 ถึง 7 โมลาร์ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นผงอนุภาคทรงกลมของซิลิกา เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 ผลของค่า r ต่อลักษณะรูปร่างผลิตภัณฑ์โพลีซิลิเกตได้แก่ เจลก้อน เส้นใย แผ่นฟิล์ม และผงอนุภาค (Brinker และคณะ, 199)

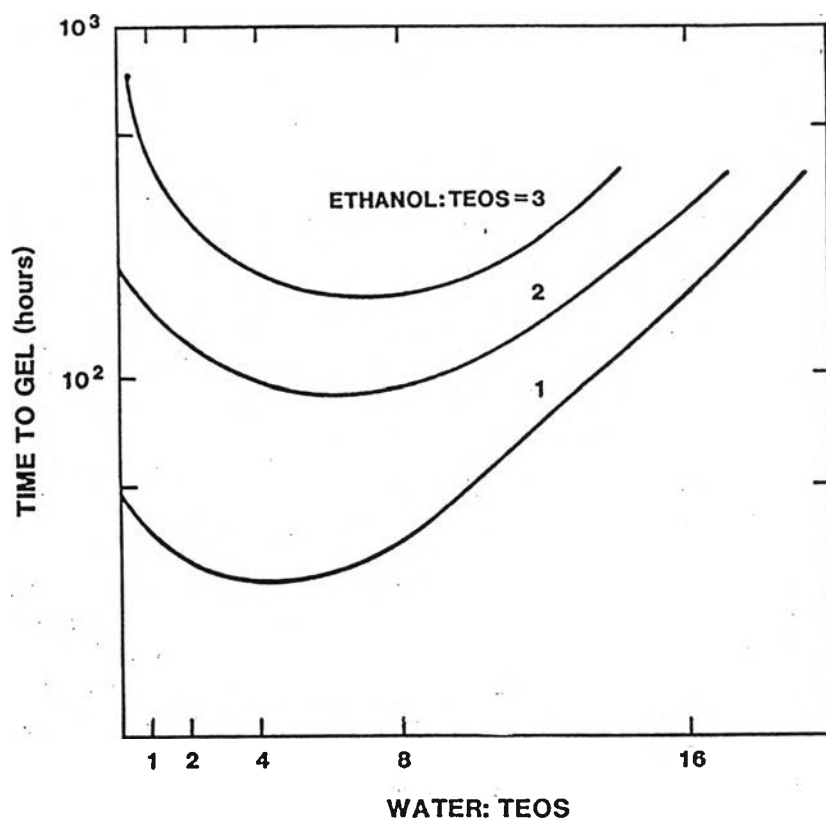
ชนิดของซิลิกา	เปอร์เซ็นต์โดยโมล					
	TEOS	EtOH	H ₂ O	HCl	NH ₃	H ₂ O/Si (r)
เจลก้อน						
1 ขั้นตอน กรด	6.7	25.8	67.3	0.2	-	10
1 ขั้นตอน เบส	6.7	25.8	67.3	-	0.2	10
2 ขั้นตอน กรด-เบส						
ขั้นตอนที่ 1 กรด	19.6	59.4	21.0	0.01	-	1.1
ขั้นตอนที่ 2 เบส	12.9	39.2	47.9	0.01	0.016	3.7
เส้นใย	11.31	77.26	11.31	0.11	-	1.0
แผ่นฟิล์ม	5.32	36.23	58.09	0.35	-	10.9
ผงอนุภาค	0.83	33.9	44.5	-	20.75	53.61

จากแนวโน้มที่ปรากฏ จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดประกอบด้วยค่า r ต่ำ (r น้อยกว่าหรือเท่ากับ 4) โซิลที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นโพลีเมอร์ที่มีสาขาอย่างอ่อนๆ (weakly branched polymeric sols) ส่วนปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ถูกกระตุ้นด้วยเบสประกอบด้วยค่า r สูง (r มากกว่า 20) โซิลที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นอนุภาค (highly condensed particulate sols) ที่ภาวะระหว่างภาวะทั้ง 2 (r อยู่ในช่วง 4 ถึง 20) ผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะเป็นก้อนหรือแผ่นฟิล์ม

จากสมการที่ 2.1 การเพิ่มค่า r น่าจะมีผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเร็วขึ้น ซึ่ง Klein (1985) พบว่าในระบบของ TEOS ที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนเชิงโมลของตัวทำละลายรวม (เอทานอล) ต่อ TEOS คงที่ เมื่อค่า r เพิ่มขึ้น (แสดงว่าปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น) เวลาที่ใช้ในการเกิดเจลจะลดลงจนถึงจุดหนึ่งแล้วจึงเพิ่มนานขึ้น (รูปที่ 2.5) เนื่องจากความเข้มข้นของ TEOS ซึ่งเป็นสารตั้งต้นเจือจางลงมากจึงเป็นการลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและคอนเดนเซชัน ดังนั้นเวลาในการเกิดเจลจึงนานขึ้น นอกจากนี้ที่ค่า r สูงขึ้นและปริมาณน้ำที่มากจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเพื่อสลายพันธะไฮโดรเจน (ปฏิกิริยาย้อนกลับของสมการที่ 2.3 เป็นการละลายของซิลิกา) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นมากที่ค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 3 ถึง 8 ในระบบของสารละลายน้ำ

Pouxviel และคณะ (1987) ใช้ ^{29}Si NMR ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TEOS ที่ภาวะกรดตามระบบคือ ที่ $r = 0.3$ (ปริมาณน้ำน้อย), $r = 4$ (ปริมาณน้ำปานกลาง) และ $r = 10$ (ปริมาณน้ำมาก) ผลแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อ r เพิ่มขึ้น เกิดการเร่งของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (สมการที่ 2.1) เนื่องจากที่ระบบ $r = 4$ ภายในเวลา 4 ชั่วโมง ยังพบว่ามิโนเมอร์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเหลืออยู่ แต่ในกรณีนี้ที่ $r = 10$ มิโนเมอร์ทั้งหมดเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสภายในเวลาเพียง 1 ชั่วโมง แสดงว่าค่า r สูงขึ้นไฮโดรไลซิสของมิโนเมอร์เกิดสมบูรณ์ก่อนที่จะปฏิกิริยาคอนเดนเซชันจะเกิดขึ้น

นอกจากนี้ Assink และ Kay (1988) พบว่าโดยทั่วไปในภาวะที่เป็นกรด ระบบที่มีค่า r น้อยกว่า 2 มากๆ มักจะเกิดกลไกของปฏิกิริยาคอนเดนเซชันที่ผลิตอัลกอฮอล์ (สมการที่ 2.2), แต่ถ้า r มากกว่าหรือเท่ากับ 2 มักจะเกิดปฏิกิริยาคอนเดนเซชันที่ผลิตน้ำ (สมการที่ 2.3)



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเกิดเจลและค่า r ที่อัตราส่วนเชิงโมลของเอทานอลและ TEOS คงที่ (Klien, 1985)

2.2.2 ปฏิกริยารีเอสเทอริฟิเคชัน (reesterification)

แม้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะถูกกระตุ้นทั้งในภาวะที่เป็นกรดและในภาวะที่เป็นเบส แต่อย่างไรก็ตาม ปฏิกริยารีเอสเทอริฟิเคชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอาจจะเกิดขึ้นได้โดยการแทนที่ของอัลกอกซิลที่หมู่ไฮดรอกซิลบนซิลานอลเพื่อสร้างอัลคอกไซด์และน้ำซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (ปฏิกิริยาย้อนกลับของสมการที่ 2.1) ซึ่งนักวิจัยหลายท่าน (Brinker และคณะ, 1982, 1984, Knight และคณะ, 1988) พบว่าปฏิกิริยาย้อนกลับนี้เกิดขึ้นได้ดีในภาวะกรดมากกว่าในภาวะเบส เนื่องจากกลไกของการเกิดปฏิกิริยาในภาวะที่เป็นเบสมีขั้นตอนที่เฉพาะ (inversion of configuration) แต่ในภาวะที่เป็นกรดไม่มี

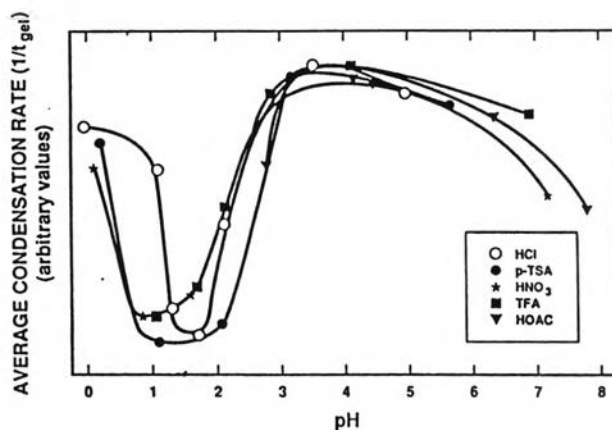
2.2.3 ปฏิกริยากอนเดนเซชัน

โพลิเมอร์เซชันเพื่อสร้างพันธะซิลิโคนเกิดขึ้นได้ทั้งจากปฏิกิริยากอนเดนเซชันของอัลกอกซิล (สมการที่ 2.2) และปฏิกิริยากอนเดนเซชันของน้ำ (สมการที่ 2.3) ผลิตภัณฑ์จากคอนเดนเซชันสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในลักษณะที่เป็นพาร์ทิคิวเลทเจลและโพลิเมอร์เจล นอกจากนี้ยังสามารถเกิดเป็นอนุภาคคอลลอยด์ที่เสถียรที่ไม่สามารถเกิดเป็นเจลได้ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ในการทดลองดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

2.2.3.1 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา

ในกระบวนการซิล-เจล ตัวเร่งปฏิกิริยากอนเดนเซชันที่นิยมใช้กันมากที่สุด ได้แก่ กรดเกลือ, แอมโมเนีย, เบสที่เกิดจากไฮดรอกไซด์ของโลหะหมู่หนึ่ง, และแอนไอออนฟลูออไรด์ ในลักษณะที่คล้ายคลึงกันกับการกระตุ้นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส Assink และ Kay (1988) ศึกษาปฏิกิริยากอนเดนเซชันของ TMOS ในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างต่างๆ ที่ภาวะการกระตุ้นเป็นกรด พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยากอนเดนเซชันแปรผันตรงกับความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+ , specific acid) นอกจากนี้ Coltrain และคณะ (1989) ได้ศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่ออัตราเร็วเฉลี่ยของปฏิกิริยากอนเดนเซชันในกระบวนการซิล-เจลของ TEOS เมื่อใช้สารละลายกรดต่างๆ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่า อัตราเร็วของปฏิกิริยากอนเดนเซชันมีค่าน้อยที่สุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 2 อัตราเร็วของปฏิกิริยากอนเดนเซชันมีค่ามากที่สุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 3.5 เมื่อความเป็นเบสสูงมากขึ้นเกินกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่แสดงในรูปที่ 2.6

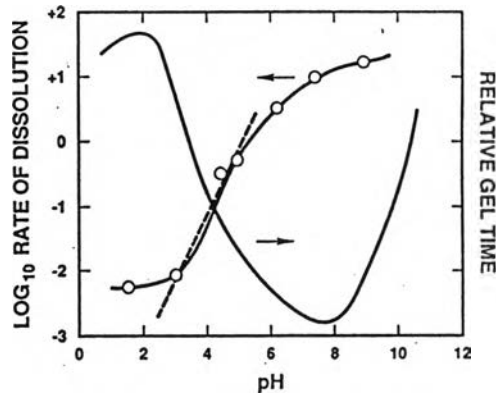
อนุภาคจะก่อตัวขึ้นจนกระทั่งถึงขนาดวิกฤต และไม่สามารถเกิดเป็นเจลได้เนื่องจากอนุภาคเกิดแรงผลักซึ่งกันและกัน (Stober และคณะ, 1968)



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างต่ออัตราเร็วเฉลี่ยของปฏิกิริยาcondensation ของกระบวนการไซล-เจลในสารละลายกรดต่างๆ (Coltrain และคณะ, 1989)

2.2.4 ปฏิกิริยาอัลกอฮอล์ซิสและไฮโดรไลซิสของพันธะไซโลเซน

ปฏิกิริยาอัลกอฮอล์ซิสและไฮโดรไลซิสของพันธะไซโลเซน (ปฏิกิริยาย้อนกลับของสมการที่ 2.2 และ 2.3) ทำให้เกิดการแตกของพันธะไซโลเซนและสามารถสร้างพันธะขึ้นใหม่เป็นวงพอลิเมอร์ที่ใหญ่ขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพันธะไซโลเซน (การละลายของซิลิกา) ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นสำคัญดังแสดงในรูปที่ 2.7 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 3 และ 8 อัตราการละลายเพิ่มขึ้นถึง 3 เท่าในระบบของสารละลายน้ำ อย่างไรก็ตาม Iler (1979) พบว่า เมื่อเพิ่มตัวทำละลายเช่น เมทานอล เข้าไปในระบบของสารละลายน้ำจะทำให้อัตราการละลายลดลงมาก



รูปที่ 2.7 ค่าความเป็นกรด-ด่างที่สัมพันธ์กับอัตราการละลายของซิลิกาและเวลาในการเกิดเจลในระบบสารละลายน้ำ (Iler, 1979)

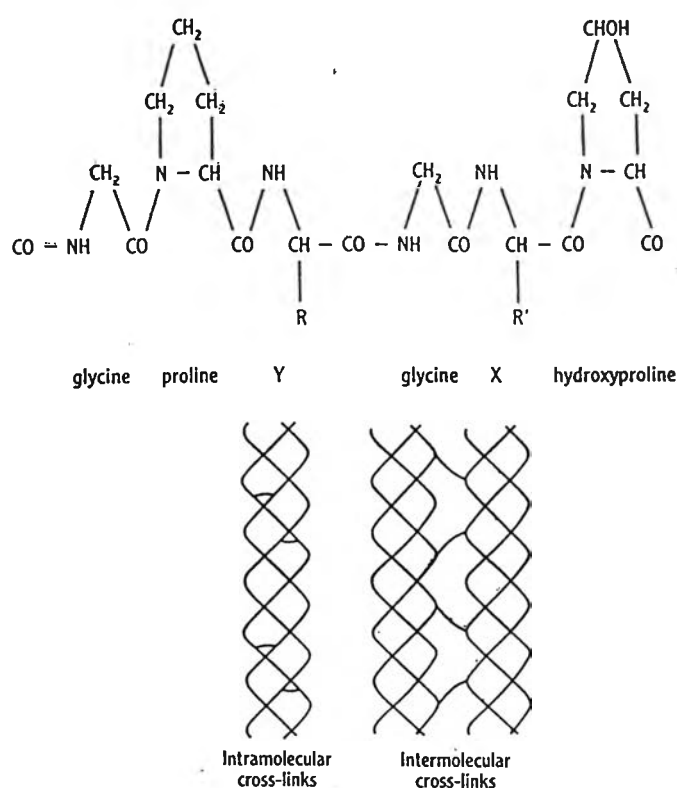
กล่าวโดยสรุป กระบวนการโซล-เจลของซิลิกอนอัลคอกไซด์เป็นกระบวนการที่ใช้สังเคราะห์วัสดุเซรามิกส์และแก้ว โดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสตามด้วยปฏิกิริยาคอนเดนเซชันโพลิเมอไรเซชันของซิลิกอนอัลคอกไซด์ทั้งคอนเดนเซชันที่ผลิตอัลกอกซิลและน้ำโดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิที่สูงนิยมใช้อัลกอกซิลเป็นตัวทำละลายร่วมเพื่อทำให้น้ำและซิลิกอนอัลคอกไซด์ละลายเข้ากัน แต่อย่างไรก็ตามอัลกอกซิลที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก็มีปริมาณเพียงพอแล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้คือกรดเกลือและแอมโมเนียเนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาคอนเดนเซชันจะเกิดขึ้นในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างที่เฉพาะ อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาคอนเดนเซชันก็สามารถเกิดขึ้นได้ ผลิตภัณฑ์เบื้องต้นที่เกิดจากกระบวนการโซล-เจลคือโซล จากนั้นโซลจะค่อย ๆ เปลี่ยนสภาพเป็นเจลในที่สุด ทั้งโซลและเจลแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ พาร์ติคิวเลทและโพลิเมอริก โดยที่พาร์ติคิวเลทโซลจะเปลี่ยนสภาพเป็นพาร์ติคิวเลทเจล และโพลิเมอริกเจลก็สามารถเกิดขึ้นได้ในทำนองเดียวกัน ซึ่งลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะใด (พาร์ติคิวเลทหรือโพลิเมอริก) ขึ้นอยู่กับการแตกตัวของวงโพลิเมอร์ (ขึ้นอยู่กับการปริมาณอัลกอกซิล, ค่าความเป็นกรด-ด่าง, อุณหภูมิ และค่า r) ในกรณีของพาร์ติคิวเลทเจล ในระบบซึ่งมีน้ำปริมาณมากเกินพอและไม่ใช้อัลกอกซิลเป็นตัวทำละลายร่วมลักษณะของเจลจะขึ้นอยู่กับการค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายน้ำ ดังนี้ ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 7 อนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กมาเกาะกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์จนเป็นโครงข่ายเจล ลักษณะเช่นนี้สามารถเกิดขึ้นในระบบที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้นไป (ค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 7 ถึง 10) เมื่อมีเกลืออยู่ในระบบ ส่วนในระบบที่ค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 7 ถึง 10 และไม่มีเกลือ อนุภาคจะโตขึ้นมากเป็นโซลที่เสถียรซึ่งจะไม่สามารถเกาะตัวกันเป็นเจลได้ ส่วนในกรณีของโพลิเมอริกเจล จากกระบวนการโซล-เจลที่สภาพความเป็นกรด-ด่างต่ำ (ค่าความเป็นกรด-

ต่างน้อยกว่า 7) โดยเฉพาะในระบบสารละลายอัลกอฮอล์-น้ำ อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาคอนเดนเซชันจะต่ำกว่าในระบบสารละลายน้ำ การแตกของวงโพลีเมอร์เกิดขึ้นน้อยที่สุด กระบวนการคอนเดนเซชันจะคล้ายคลึงกับการเกิดปฏิกิริยาคอนเดนเซชันของโมโนเมอร์ของสารอินทรีย์เป็นสายโซ่ทำให้เจลาตมีลักษณะเป็นโครงข่ายโมเลกุลโพลีเมอร์สามมิติ

2.3 ไมโครอิมัลชัน-เบสค์ออร์แกโนเจล

2.3.1 เจลาติน (gelatin)

เจลาตินเป็นโปรตีนและองค์ประกอบหนึ่งที่ใช้ในการเตรียมไมโครอิมัลชัน-เบสค์ออร์แกโนเจล และเป็นโปรตีนที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปในการทำเจลโดยการละลายเจลาตินในน้ำ ซึ่งมันจะไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ โครงสร้างโดยทั่วไปของเจลาตินมีลักษณะเป็น [โกลซีน - x - y]_n ซึ่ง x และ y โดยส่วนมากจะเป็นส่วนของโพรลีน (proline) และไฮดรอกซีโพรลีน (hydroxyproline) ตามลำดับ โมเลกุลของเจลาตินมีลักษณะเป็นโซ่ยาวและเป็นเกลียว (รูปที่ 2.8) ซึ่งลักษณะเช่นนี้ทำให้สามารถเกิดพันธะเชื่อมขวางทางกายภาพ (physically cross-linked) ระหว่างโมเลกุลซึ่งมีผลให้เกิดเจลได้ง่าย



รูปที่ 2.8 สูตรโครงสร้างและลักษณะที่เป็นเกลียวของเจลาติน

Quellet และคณะ (1991) กล่าวว่าเมื่อมีการเติมเจลาตินลงไปในการละลายไมโครอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน โซ่ของเจลาตินจะถูกขังอยู่ในไมเซลล์ที่ประกอบด้วยหยดน้ำขนาดเล็กๆ (aqueous nanodroplets) และบางส่วนของโซ่ที่ไม่มีขั้ว (some apolar side chains) จะถูกดูดซับไว้ที่บริเวณระหว่างภูมิภาค Quellet และคณะ (1991) เรียกเจลาตินที่บรรจุอยู่ในไมโครอิมัลชันเล็กๆ นี้ว่า นาโนเจล (nanogel) ที่องค์ประกอบและภาวะเหมาะสม นาโนเจลจะสร้างพันธะกันเป็นโครงข่ายของออร์แกนเจลที่เสถียรเมื่ออยู่ในภาชนะปิด

2.3.2 ลักษณะโครงสร้างของ MBGs

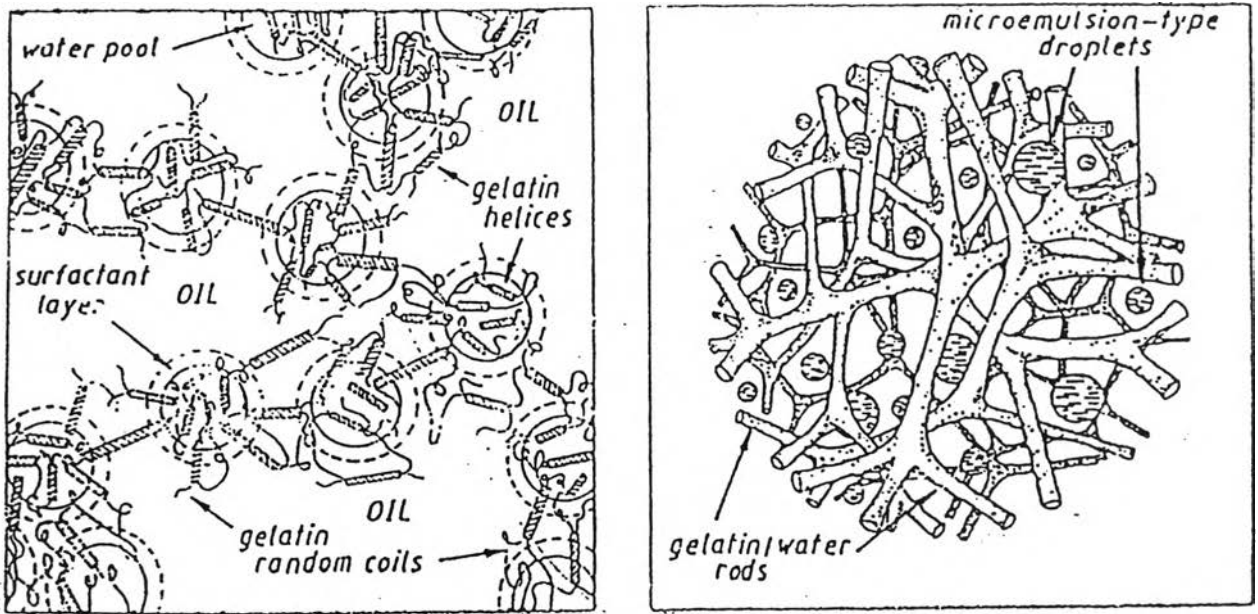
ได้มีผู้เสนอแบบจำลองลักษณะโครงสร้างของ MBGs ขึ้นมา 2 แบบด้วยกัน (Rees และRobinson, 1995) คือ

(1) แบบจำลองซูเปอร์-โพลิเมอร์ (super-polymer model)

เมื่อความเข้มข้นของเจลาตินในไมโครอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันสูงมากกว่า 2-3% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของสารละลาย โครงสร้างที่ยืดหยุ่นจะเกิดขึ้นโดยอยู่ในรูปของการเชื่อมขวางทางกายภาพ ผลลัพธ์ของกระบวนการนี้จะเกิดเป็นซูเปอร์-โพลิเมอร์ ดังรูปที่ 2.9 ก โดยโครงสร้างมีลักษณะคล้ายสร้อยลูกปัดที่พันกัน

(2) แบบจำลองอื่น (alternative model)

แบบจำลองนี้ Atkinson และคณะ (1989) อธิบายโดยอาศัยข้อมูลการกระจายของนิวตรอนและการนำไฟฟ้า (neutron scattering and conductivity data) ใช้กับระบบที่มีปริมาณน้ำสูง (อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำต่อสารลดแรงตึงผิว (W_0) ประมาณ 50) ซึ่งได้เสนอลักษณะโครงสร้างของ MBGs เป็นโครงข่ายของหลอดเจลาตินที่อุดมไปด้วยน้ำในไมโครอิมัลชัน ถูกทำให้เสถียรด้วยชั้นของสารลดแรงตึงผิวของไมโครอิมัลชัน แสดงในรูปที่ 2.9 ข



ก

ข

รูปที่ 2.9 (ก) แบบจำลองซูเปอร์-โพลิเมอร์สำหรับ MBGs (ข) แบบจำลองอื่นสำหรับ MBGs (Rees และ Robinson, 1993)

2.3.3 สมบัติของ MBGs

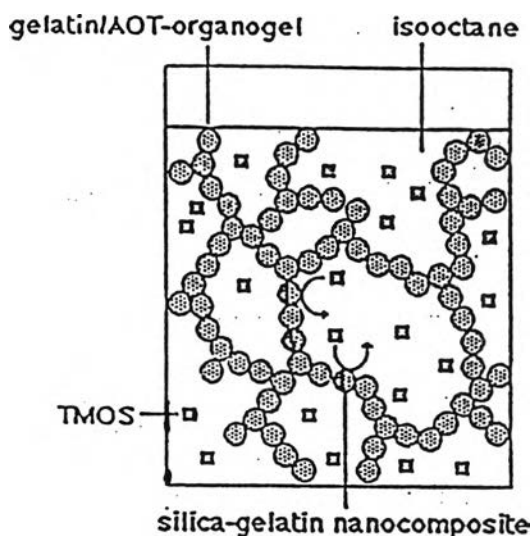
Haering และ Luisi (1986) ซึ่งเป็นหนึ่งในผู้บุกเบิกการวิจัยในระบบ MBGs รายแรกของโลกได้เสนอสมบัติของ MBGs ดังนี้ MBGs เป็นเจลที่มีลักษณะพิเศษเนื่องจากมีส่วนประกอบของตัวทำละลายอินทรีย์ถึงร้อยละ 80 เมื่ออยู่ในภาวะปิดเจลมีความเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส เมื่อเปิดภาชนะน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจะระเหยทำให้เจลแข็งขึ้น ที่อุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส เจลจะถูกหลอมละลายเป็นสารละลายไมโครอิมัลชัน แต่จะสามารถรวมตัวกันเป็นเจลใหม่ได้เมื่อทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงภายใต้การปั่นกววน มิฉะนั้นจะเกิดการแยกวัฏภาคได้ นอกจากนี้เจลที่ได้จากเตรียมในตัวทำละลายอินทรีย์ใดจะไม่ละลายเมื่อนำไปแช่ในตัวทำละลายอินทรีย์นั้นหรือตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีความมีขั้วใกล้เคียงกัน Nascimento และคณะ (1992) เตรียม MBGs จากไซโคลเฮกเซนพบว่ามีความเสถียรเมื่อแช่ในตัวทำละลายดังนี้คือ ออกเทน, ไอโซออกเทน, n-เฮกเซน, ไซโคลเฮกเซน และ n-เฮกเซน เป็นต้น ดังนั้นเมื่อแช่เจลให้อยู่ในระบบที่มีน้ำมากเจลจะบวมแล้วแตกตัวออก (Watzke และ Dieschbourg, 1994)

2.4 วัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิต

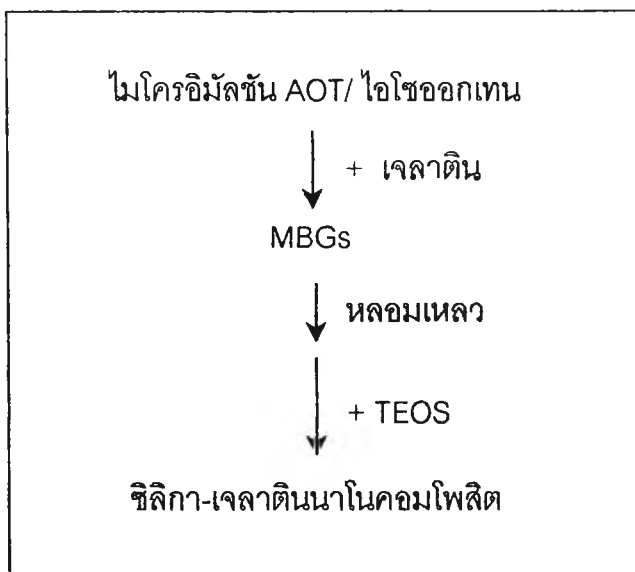
Watzke และ Dieschbourg (1994) นักวิจัยจากประเทศสวิสเซอร์แลนด์ได้เสนอผลงานการสังเคราะห์วัสดุชนิดใหม่เรียกว่า ซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิต ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่มีโครโมลันชนิดน้ำในน้ำมันเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน

2.4.1 การสังเคราะห์และโครงสร้างของวัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิต

วัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิตสามารถสังเคราะห์ได้จากไมโครอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันของระบบ AOT / ไอโซออกเทน ไมโครอิมัลชันจะถูกทำให้เปลี่ยนสภาพเป็นออร์แกโนเจล (organogel) โดยการละลายเจลาติน (gelatin) ในอนุภาคเล็กๆ ของน้ำซึ่งประกอบด้วยพื้นที่การถ่ายเทมวลสารที่สูงและสามารถทำหน้าที่เป็นถึงปฏิกรณ์ขนาดจิ๋ว (nanoreactor) สำหรับปฏิกิริยาเคมีระหว่างเตตระเมทอกซิลเลน (tetramethoxysilane, TMOS) ซึ่งจะเกิดกระบวนการโซล-เจลของเตตระเมทอกซิลเลนสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งภายในอนุภาคเล็กๆ ของน้ำและบริเวณพื้นผิวระหว่างวัฏภาค รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของวัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิตที่ประกอบด้วยโครงข่ายของอนุภาคเล็กๆ ระหว่างเจลาติน-น้ำ (gelatin-water droplet network) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เมื่อ TMOS ทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับอนุภาคของน้ำจะเกิดกรดซิลิกซึ่งจะทำปฏิกิริยาคอนเดนเซชันต่อมากลายเป็นโครงข่ายของวัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิต แผนภาพการสังเคราะห์วัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิตแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของวัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิต (Watzke และ Dieschbourg, 1994)



รูปที่ 2.11 การเตรียมวัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิต

2.4.2 คุณสมบัติของวัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิต

Watzke และ Dieschbourg (1994) ได้เสนอคุณสมบัติของวัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิตดังนี้ ซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิตเป็นเจลที่มีความเสถียรต่อความร้อน สามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 600 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal analysis) พบว่าน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของวัสดุซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิตจะสลายตัวไปเหลือแต่โครงสร้างของซิลิกาที่แน่น (dense silica) เมื่อถูกแช่อยู่ในน้ำสามารถรับน้ำได้เพียง 5 % โดยน้ำหนัก นอกจากนี้แล้วยังมีความเสถียรต่อตัวทำละลายอินทรีย์หลายชนิดเช่น อะซิโตน, เมทานอล, เอทานอล, ไซโคลเฮกเซน, ไอโซออกเทน และไดคลอโรมีเทน แต่เมื่อถูกแช่ในคลอโรฟอร์มจะบวมตัวและมีความโปร่งใสอย่างเห็นได้ชัด ซิลิกา-เจลาตินนาโนคอมโพสิตมีความเสถียรเชิงกลมากกว่าไมโครอิมัลชัน-เบสค์ออร์แกโนเจล และเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูงทำให้มีพื้นผิวจำเพาะสูงจึงสามารถใช้เป็นพาหะได้ นอกจากนี้ยังสามารถหล่อเป็นฟิล์มใสที่มีรูพรุนที่ยอมให้ตัวถูกละลายผ่านจึงสามารถใช้ทำเป็นเยื่อแผ่นสำหรับปฏิกิริยา (reactive membrane)