

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยในครั้งนี้จะทำการเตรียมวัสดุผสมนาโนของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์สำหรับปรับปรุงคุณภาพน้ำที่มีประสิทธิภาพ โดยผู้วิจัยได้แบ่งการนำเสนอ ทฤษฎี หลักการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. วัสดุนาโน (Nanomaterials)
2. ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite)
3. ซิลิกาหรือซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)
4. คุณภาพน้ำและกระบวนการดูดซับ (Adsorption)
5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัสดุนาโน

วัสดุนาโนเป็นวัสดุที่กำลังอยู่ในความสนใจของนักวิทยาศาสตร์ศักยภาพของวัสดุนาโนสามารถปฏิบัติงานทางด้านวัสดุศาสตร์ให้เกิดประโยชน์อย่างมหาศาล คุณสมบัติของวัสดุนาโนมีการเปลี่ยนแปลงไปจากคุณสมบัติเดิมของวัสดุนั้นๆ คุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าว ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมศาสตร์ แพทยศาสตร์ วัสดุศาสตร์ วิทยาศาสตร์พื้นฐานและวิทยาศาสตร์ประยุกต์ อย่างไรก็ตามวัสดุนาโนอาจจะทำให้เกิดผลกระทบในหลายด้าน ซึ่งเราสามารถป้องกันไว้ก่อนได้ โลกในอนาคตจะให้ความสำคัญต่อสาขานาโนยิ่งขึ้น (สุภกร ภูเกิดและคณะ, 2549)

วัสดุนาโน (Nanomaterials) เป็นวัสดุที่กำลังดึงดูดความสนใจของนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลก ในช่วงทศวรรษนี้เป็นอย่างมาก และเป็นไปด้วยความรวดเร็วอย่างที่วัสดุอื่นๆ ไม่เคยได้รับมาก่อน สาเหตุสำคัญอาจจะเนื่องมาจากศักยภาพของวัสดุนาโนที่สามารถทำการปฏิบัติงานด้านวัสดุศาสตร์ให้เกิดขึ้นและนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมหาศาลโดยผ่านโครงสร้างในระดับอะตอมซึ่งเป็นตัวควบคุมสมบัติทางด้านวิศวกรรมศาสตร์สมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีเช่นสภาพแม่เหล็ก ตัวกระตุ้นปฏิกิริยา (Catalysis) หรือพฤติกรรมทางแสง เป็นต้น นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการพัฒนา เทคโนโลยีด้านต่างๆ

เช่น ด้านอิเล็กทรอนิกส์ เซรามิกส์ ตัวเก็บข้อมูลแม่เหล็ก (Magnetic data storage) รวมทั้งพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุก่อรูปพลาสติกยิ่งยวด (Superplastic) ตลอดจนวิทยาศาสตร์และวิทยาการด้านอื่นๆ มากมายการพัฒนาโครงสร้างนาโนของวัสดุก่อให้เกิดคำถามที่เพิ่มขึ้นอย่างมากมาว่า ทำไมคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุจึงเปลี่ยนแปลงไปเมื่อลดสเกลโครงสร้างจากระดับไมโครสเกล (10 - 6 m) ลงสู่ระดับนาโนสเกล (10 - 9 m) เช่น มีค่าความเครียดเชิงกลสูงขึ้น (Mechanical strength) การกระจายแสงเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนจำเพาะสูงขึ้น และสภาพความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไป เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเดิมของตัวเอง วัสดุนาโนสามารถจะจัดแบ่งได้เป็นผลึกนาโน (Nanocrystalline) อนุภาคนาโน (Nanoparticle) โดยที่ก้อนหรือปริมาตรของผลึกนาโนซึ่งประกอบด้วยเม็ดผลึก (Grain sizes) ที่มีขนาดช่วงสเกลการวัดอยู่ในระดับนาโน ถึงประมาณ 100 nm แต่ขณะที่อนุภาคนาโน มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 100 nm ดังนั้นก้อนหรือปริมาตรของวัสดุที่เป็นผลึกนาโนจึงประกอบขึ้นหรือเกิดจากการรวมกลุ่มกันของอนุภาคนาโน (ศุภกร ภูเกิดและคณะ, 2549)

การศึกษาค้นคว้าวิจัยทางด้านวัสดุนาโนต้องใช้ความพยายามสูง มีความเกี่ยวข้องกันในหลายๆ สาขาวิชา รวมทั้งปฏิสัมพันธ์ของนักวิจัยในสาขาต่างๆ เช่น ฟิสิกส์ เคมีวิศวกรรมศาสตร์ และวัสดุศาสตร์ หรือแม้กระทั่งชีววิทยา และการแพทย์งานวิจัยวิทยาศาสตร์พื้นฐานของวัสดุนาโนเป็นสิ่งสำคัญที่นักวิทยาศาสตร์ให้ความสนใจเช่นกัน มีความคิดเห็นหลายประเด็นที่จะกล่าวถึงศักยภาพของวัสดุนาโนที่มีประโยชน์อย่างมากมา เช่น ในทางอุตสาหกรรม การสังเคราะห์วัสดุที่มีความบริสุทธิ์สูง การเพิ่มคุณค่าทางเศรษฐกิจและสภาพแวดล้อมคุณลักษณะเฉพาะของโครงสร้างใหม่และคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุนาโนการเตรียมผลิตภัณฑ์จากอนุภาคนาโนที่มีความหนาแน่นสูงและมีสิ่งเจือปนต่ำ และการเก็บรักษาสภาพรายละเอียดของเม็ดผลึกเพื่อดำรงไว้ซึ่งคุณสมบัติเชิงกลที่มีความสัมพันธ์กับขนาดสเกลในระดับนาโน เทคโนโลยีสำหรับเตรียมอนุภาคนาโนมีหลากหลายแนวทาง (ศุภกร ภูเกิดและคณะ, 2549)

โครงสร้างนาโน (Nanostructure)

คุณลักษณะเฉพาะที่สำคัญมากอย่างหนึ่งของอนุภาคนาโน คือ มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวและปริมาตรค่อนข้างสูงสัดส่วนพื้นที่ผิวของอะตอมที่สูงมากดังกล่าว ทำให้อนุภาคนาโนมีคุณสมบัติที่แตกต่างไปจากก้อนปริมาตรของวัสดุในขนาดใหญ่ การเตรียมอนุภาคนาโนจากสถานะไอระเหยและของเหลวมีกระบวนการที่เกี่ยวข้อง 3 ขั้นตอน คือ การก่อตัว (Nucleation) การเกาะกลุ่ม (Coalescence) และการเติบโต (Growth) อนุภาคนาโนจะเริ่มเกิดจากการการก่อตัวจากแก่นกลางจากนั้นจึงค่อยๆ เกาะกลุ่มและรวมตัวกันเกิดเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ขึ้น ด้วยเหตุนี้อนุภาคนาโนหลายๆ อนุภาคจะถูกสร้างขึ้นอย่างสม่ำเสมอ จากกลุ่มอะตอมเรียงตัวกันเป็นรูปแบบกล่อ่งลูกบาศก์ หรือโครงสร้างรูปหกเหลี่ยมแบบปิดชนิดต่างๆ ซึ่งโครงสร้างหนึ่งๆ อาจเกิดจากการก่อตัวรอบๆ อะตอมแก่นกลางอะตอมหนึ่ง

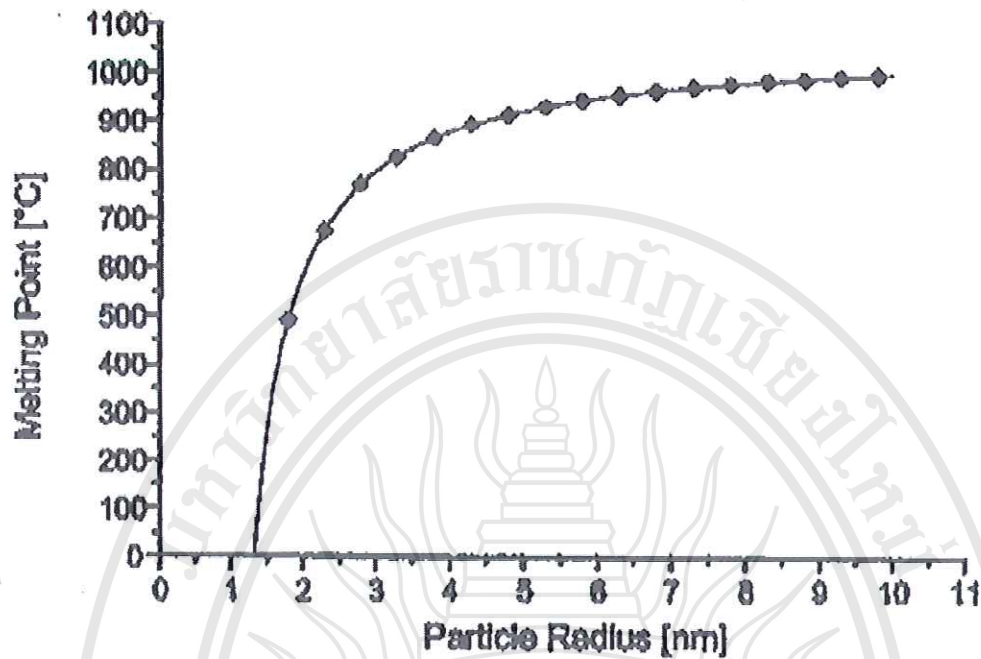
โดยในชั้นแรกมี 12 อะตอม ชั้นที่สองมี 42 อะตอมและชั้นที่ 3 มี 92 อะตอม เป็นต้น จำนวนอะตอมในแต่ละชั้นจะถูกกำหนดโดยตัวเลข $10n^2+2$ สามารถแสดงให้เห็นได้ดังตารางที่ 2.1(สุภกร ภู่เกิดและคณะ, 2549)

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอะตอมทั้งหมดในกลุ่มและเปอร์เซ็นต์พื้นผิวอะตอม

Full shell clusters	Total number of atoms	Surface atoms (%)
One shell 	13	92
Two shells 	55	76
Three shells 	147	63
Four shells 	309	52
Five shells 	561	45
Seven shells 	1415	35

ที่มา : S.C. Tjong, H. Chen, Materials Science and Engineering R45, 200

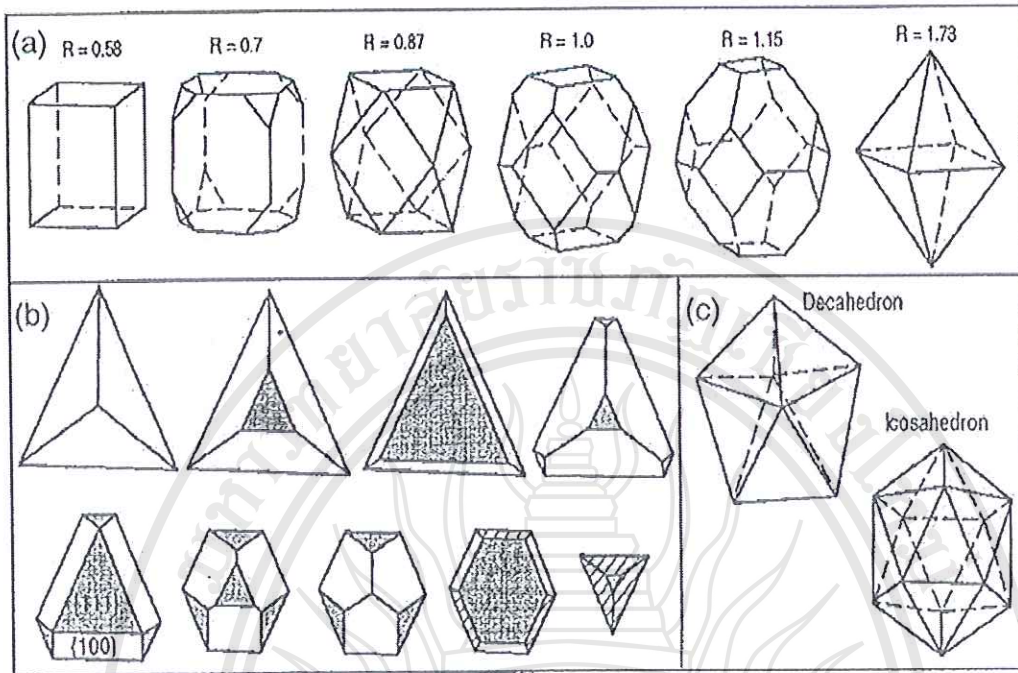
การลดลงของขนาดอนุภาคนาโน จะทำให้เปอร์เซ็นต์พื้นที่ผิวของอะตอมเพิ่มขึ้น ขนาดที่ลดลงของอนุภาคนาโนจะมีผลกระทบกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิกการหลอมเหลวของอนุภาค แสดงตัวอย่างดังกล่าวได้ตามภาพที่ 2.1 (สุภกร ภู่เกิดและคณะ, 2549)



ภาพที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับจุดหลอมเหลวของอนุภาคทอง
ที่มา : S.C. Tjong, H. Chen, Materials Science and Engineering R45, 2004

โดยทั่วไปแล้วรูปทรงเรขาคณิตต่างๆ จะถูกกำหนดโดยองค์ประกอบและคุณสมบัติหลายๆ อย่างของการสังเคราะห์วัสดุ หรือกลไกการก่อรูป การเกาะรวมตัวกันของอนุภาคนาโน สำหรับโลหะบางชนิด เช่นอนุภาคนาโนของโลหะทรานซิชัน โครงสร้างต่างๆ สามารถเกิดขึ้นใหม่โดยแตกต่างกันไป (สุภกร ภูเกิดและคณะ, 2549)

จากลักษณะของโครงสร้างของก้อนผลึกเดิม โครงสร้างเหล่านี้ ได้แก่ Cabooctahedron icosahedron และ decahedron ดังภาพที่ 2.2 โครงสร้าง หรือระนาบของพื้นผิวที่แตกต่างกันไม่เพียงแต่ทำให้ความหนาแน่นเชิงผิวของอะตอมต่างกัน แต่ยังทำให้โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ พันธะและปฏิกิริยาทางเคมีแตกต่างกัน การควบคุมขนาด รูปทรงและโครงสร้างอนุภาคนาโนของโลหะเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญยิ่งเพราะมีความเกี่ยวข้องกันอย่างมากระหว่างตัวแปรเหล่านี้กับคุณสมบัติเชิงแสง เชิงไฟฟ้าหรือตัวกระตุ้นปฏิกิริยา เป็นต้น (สุภกร ภูเกิดและคณะ, 2549)



ภาพที่ 2.2 (a) รูปทรงเรขาคณิตของผลึกนาโน Cuboctahedral ที่อัตราการเติบโตต่างกัน

(b) การพัฒนาการของรูปทรงเมื่อขนาดผลึกมีการเปลี่ยนแปลง

(c) รูปทรงเรขาคณิตของอนุภาคนาโนเชิงซ้อน Decahedral และ Icosahedral

ที่มา : S.C. Tjong, H. Chen, Materials Science and Engineering R45, 2004

วัสดุผลึกนาโน สามารถจัดแบ่งออกเป็นหลายกลุ่มขึ้นอยู่กับทิศทางหรือมิติของผลึกคือ

1. กลุ่มอะตอมมิติศูนย์ (Zero-Dimensional Atom Clusters)
2. โครงสร้างเนื้อเยื่อหลายชั้น 1 มิติ (Onedimensional Modulated Multilayers)
3. โครงสร้างเนื้อเยื่อละเอียดหลายชั้น 2 มิติ (Two-Dimensional Ultrafine-Grained

Overlayers)

4. โครงสร้างผลึกนาโน 3 มิติ (Three-Dimensional Nanocrystalline Structure)

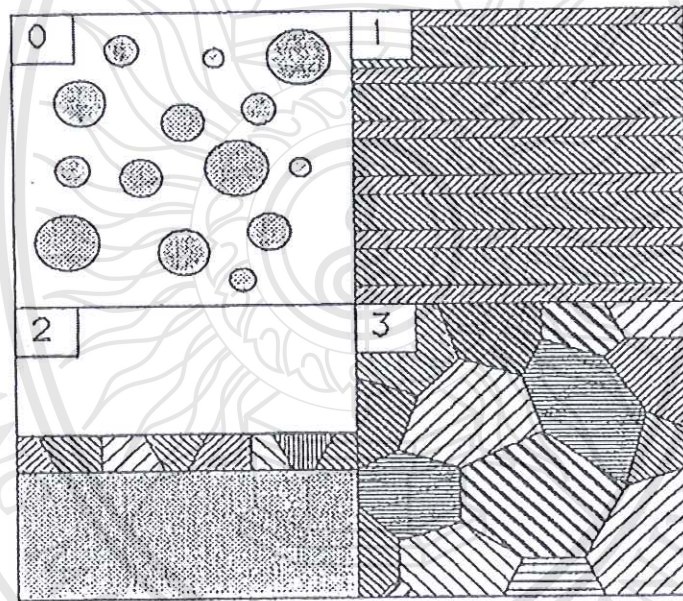
ดังแสดงในภาพที่ 2.3 วัสดุผลึกนาโนอาจประกอบไปด้วยผลึก กึ่งผลึก (Quasi-Crystalline) และสถานะอสัณฐาน (Amorphous phase) หรือแก้วนาโน (Nanoglasses) วัสดุผลึกนาโนอาจจะเป็น โลหะ กึ่งโลหะ (Intermetallics) เซรามิกซ์ หรือวัสดุประกอบ (Composites) วัสดุผลึกนาโนยังสามารถ

แบ่งออกเป็น 12 กลุ่ม ตามรูปร่าง (มิติ) และองค์ประกอบทางเคมีของธาตุที่ประกอบเป็นโครงสร้าง แสดงได้ดังภาพที่ 4 (สุภกร ภูเกิดและคณะ, 2549)

นอกจากนี้รูปของผลึกยังสามารถจัดแบ่งได้เป็นรูปทรงแผ่นหรือผลึกแบบชั้น (Layer-Shaped crystalline) ผลึกรูปทรงแท่ง (Rod-Shaped Crystalline) และผลึกรูปขวานสมมาตร (Equiaxed crystalline) หรืออาจจะจัดได้เป็น 4 กลุ่ม (Families) ตามองค์ประกอบทางเคมี คือ

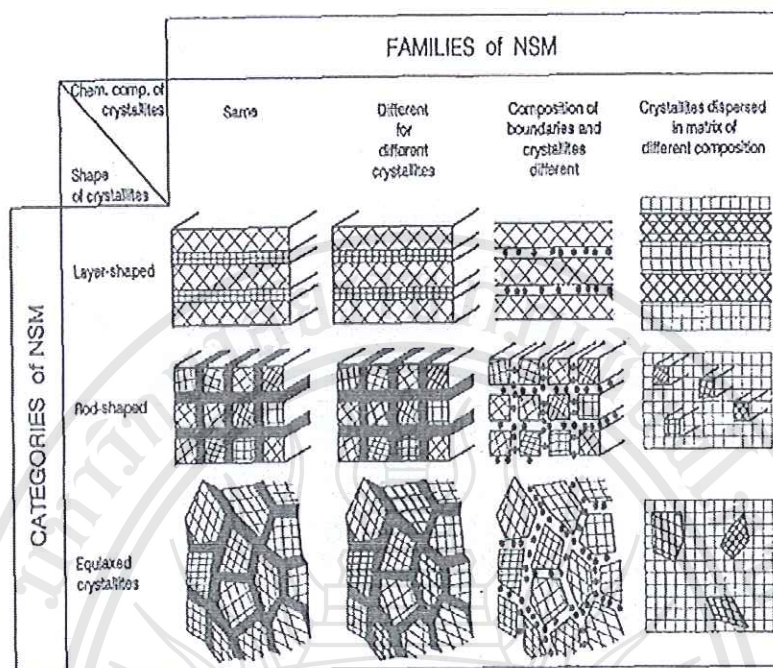
1. กลุ่มที่มีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกัน
2. กลุ่มที่มีองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน
3. กลุ่มที่มีองค์ประกอบทางเคมีระหว่างชั้นผลึกต่างกัน
4. กลุ่มที่มีการกระจายขององค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน เช่น สารประกอบออลลอย

เป็นต้น



ภาพที่ 2.3 แสดงแผนภาพของวัสดุผลึกนาโนทั้ง 4 ชนิด ซึ่งจำแนกตามมิติของผลึก

ที่มา : S.C. Tjong, H. Chen, Materials Science and Engineering R45, 2004

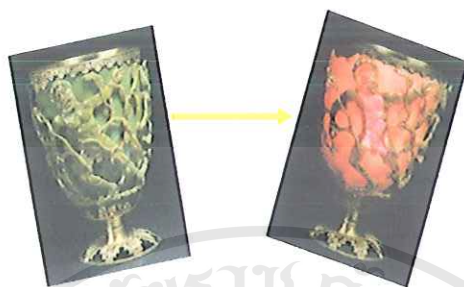


ภาพที่ 2.4 แสดงแผนภาพของการแบ่งวัสดุฟลิโนเป็น 12 กลุ่มตามโครงสร้างทางเคมี
ที่มา : S.C. Tjong, H. Chen, Materials Science and Engineering R45, 2004

คุณสมบัติของวัสดุนาโน

1. คุณสมบัติเชิงแสงที่ต่างไปจากเดิม

โดยทั่วไปทองคำแบบก้อนจะมีสีเหลืองอย่างที่เรารู้จักกัน แต่ถ้าเราย่อหรือตัดให้ขนาดของทองคำเล็กลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งมีขนาดอนุภาคเล็กมากในระดับนาโนจะส่งผลให้อนุภาคของทองคำนั้นมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงที่มากกระทบมาก จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์เชิงแสงที่เรียกว่า เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance) ซึ่งจะส่งผลให้อนุภาคนาโนของทองคำนั้นดูดกลืนสเปกตรัมของแสงในช่วงสีเขียว (ความยาวคลื่นประมาณ 520 nm) ดังนั้นจึงทำให้อนุภาคนาโนของทองคำเห็นเป็นสีแดงทับทิม (แทนที่จะเป็นสีเหลืองเหมือนกับตอนที่เรารู้จักกัน) (ณัฐพันธ์ สุภกา, 2555)



ภาพที่ 2.5 ถ้วยโบราณที่มีผลึกนาโนทองคำเป็นส่วนประกอบและเกิดปรากฏการณ์
เชิงกลแสงที่เปลี่ยนไปจากเดิม

ที่มา : [www.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/page/Unti 1 – 1.html](http://www.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/page/Unti%201%20-%201.html).

ดังนั้นเมื่อวัดมีขนาดเกรนของวัดอยู่ในระดับนาโนแล้ว คุณสมบัติอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้น
ผิดแปลกไปจากเดิม ก็คือช่วงสเปกตรัมที่ถูกดูดกลืนของวัดนาโน โดยช่วงความยาวคลื่นของแถบ
ดูดกลืนของวัดนาโนจะเป็นช่วงความยาวคลื่นที่สั้นลงกว่าเดิม (คือมีแนวโน้มไปสู่ช่วง แถบสเปกตรัม
สีน้ำเงิน) และพบว่าช่วงความยาวคลื่นที่ถูกดูดกลืนนี้แปรผันตรงตามขนาดของวัดนาโน ตัวอย่างเช่น
อนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเซเลไนด์ (CdSe) จะมีช่วงสเปกตรัมที่ถูกดูดกลืนที่สั้นลง
เรื่อยๆ ตามขนาดคริสตัลของอนุภาคนาโน เป็นต้น (ก็คือน่าจะมีขนาดเล็กมากเท่าไรก็ยังมีช่วงความยาว
คลื่นของสเปกตรัมที่ถูกดูดกลืนสั้นลงเท่านั้น) (ณัฐพันธ์ สุภกา, 2555)

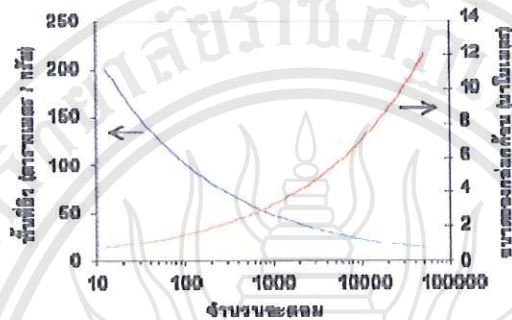


ภาพที่ 2.6 ผลึกนาโนของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเซเลไนด์ (CdSe) ที่มีสีที่ต่างกัน
ออกไปตามขนาดเกรนของผลึก

ที่มา : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit2-5.html>.

2. พื้นที่ผิวหน้าที่แปลกประหลาดและความว่องไวในการปฏิกิริยาเคมี

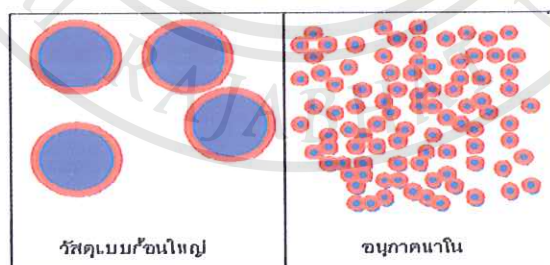
วัสดุที่มีขนาดในระดับนาโน จะมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (Surface-to-volume) สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดเดียวกัน ที่มีขนาดใหญ่กว่า ยกตัวอย่างเช่น อนุภาคทองคำที่มีขนาด 2 nm จะมีพื้นที่ผิวสูงถึง $150 \text{ m}^2/\text{g}$ เลยทีเดียว (ณัฐพันธ์ สุภกา, 2555)



ภาพที่ 2.7 ภาพแสดงการประมาณจำนวนอะตอมและพื้นที่ผิวของอนุภาคทองคำนาโนที่มีขนาดแตกต่างกัน

ที่มา : http://www.nanotec.or.th/nanotec_th

สัดส่วนของอะตอมผิวหน้า จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง ยกตัวอย่างเช่น อนุภาคนาโนที่มีขนาด 3 nm จะมีจำนวนอะตอมอยู่บริเวณผิวหน้า ประมาณร้อยละ 45 แต่เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลงเหลือ 1 nm จะมีจำนวนอะตอมผิวหน้า เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 76 ซึ่งจากการที่วัสดุนาโน มีอะตอมจำนวนมาก อยู่บริเวณผิวหน้า จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวหน้าวัสดุได้ง่าย และยังเป็นการส่งเสริม ให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ อันเนื่องมาจากอิทธิพลของเคมีผิวหน้าประโยชน์ที่ได้จากการเพิ่มปริมาณพื้นที่ผิว ของอนุภาคนาโน ที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือ การนำไปใช้ในการเร่งปฏิกิริยาเคมี และการใช้เป็นตัวกรองแบบพิเศษ (ณัฐพันธ์ สุภกา, 2555)



ภาพที่ 2.8 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนอะตอมผิวหน้า (สีแดง) ของวัสดุแบบก้อนใหญ่ กับอนุภาคที่มีขนาดในระดับนาโน

ที่มา : http://www.nanotec.or.th/nanotec_th

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุ เมื่อวัสดุมีปริมาณอะตอมผิวหน้ามากขึ้น อาจมีสาเหตุมา จากอิทธิพลอิเล็กทรอนิกส์และและอิทธิพลสเตอริก (Electronic and steric effects) โดยที่ อิทธิพลอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic effect) จะเกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ที่บริเวณ ศูนย์กลางปฏิกิริยา (Reaction center) เช่นการเกิดประจุบวกหรือประจุลบขึ้น ส่วนอิทธิพล สเตอริก (Steric effect) จะเกี่ยวข้องกับลักษณะ รูปร่างและความเกะกะภายในโครงสร้าง ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวนี้ มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีต่างๆ มาก โดยเฉพาะการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ฉัฐพันธ์ สุภกา, 2555)

3. สมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนไปจากเดิม

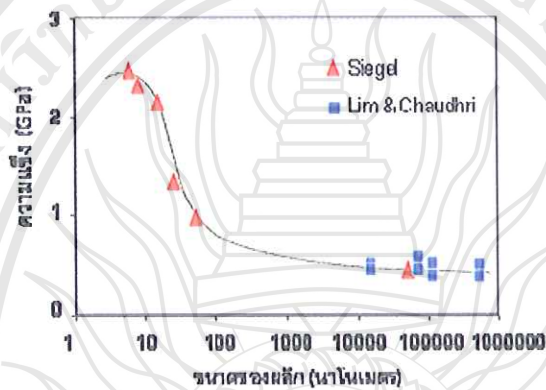
วัสดุประเภทโลหะและเซรามิก ที่มีเกรนในระดับนาโน (Nanoscale grain) จะมีความแข็งแรง (Strength) และความทนทานต่อการแตกหัก (Toughness) สูงมากกว่าวัสดุชนิดเดียวกันที่มีเกรนในระดับ μm โดยโลหะที่มีโครงสร้างผลึกในระดับนาโน (Nanocrystalline metals) จะมีความแข็งแรง และความแข็ง (Hardness) สูงกว่าโลหะที่มีขนาดผลึกใหญ่ และมีสมบัติในการต้านทานการกระแทกไฟ มากขึ้น มีความจุความร้อนเฉพาะมากขึ้น และสามารถขยายตัวได้ดีขึ้น ยกตัวอย่างเช่น โลหะทองแดง ที่มีเกรนในระดับนาโน จะมีความแข็งแรงสูงกว่าทองแดงปกติถึง 5 เท่า หรือในกรณีของโลหะที่มีความเหนียว อย่างอะลูมิเนียม ก็สามารถเพิ่มความแข็งแรง ให้มากขึ้นได้เมื่อลดขนาดเกรน ให้เล็กลง อยู่ในระดับนาโน (ฉัฐพันธ์ สุภกา, 2555)



ภาพที่ 2.9 แสดงลักษณะเกรนของวัสดุแบบก้อนใหญ่เปรียบเทียบกับเกรนของวัสดุนาโน
ที่มา : <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/67/index67.htm>

เซรามิกและสารประกอบออกไซด์ ของโลหะ ที่มีโครงสร้างผลึกในระดับนาโน จะมีความเหนียว (Ductility) มากขึ้น และมีความทนทานต่อการแตกหักดีขึ้น ซึ่งจะทำให้เซรามิกสามารถยืดตัว หรือแปรรูปได้มากขึ้น ก่อนที่จะเกิดการแตกหักหรือขาดออกจากกัน นอกจากนี้

เซรามิกที่มีเกรนระดับนาโน ยังมีความเปราะลดลง มีความสามารถในการสร้างพันธะเคมีกับโลหะ ได้ดีขึ้น และพบว่า เซรามิกที่มีโครงสร้างผลึก ในระดับนาโน จะมีสมบัติที่เรียกว่า “ซูเปอร์พลาสติก (Superplasticity)” ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะทำให้เซรามิก สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่าง อย่างถาวรได้ขึ้น และสามารถผลิตเป็นชิ้นงาน ที่มีความซับซ้อนได้ ณ อุณหภูมิต่ำ ยกตัวอย่างเช่น เซรามิกที่สังเคราะห์ขึ้น จากอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ ไม่เพียงแต่ใช้อุณหภูมิ ในการเผาที่ต่ำกว่าปกติ แต่ยังมี ความแข็งแรง และความทนทาน ต่อการแตกหักสูงกว่าเซรามิกปกติด้วย (ณัฐพันธ์ สุภกา, 2555)

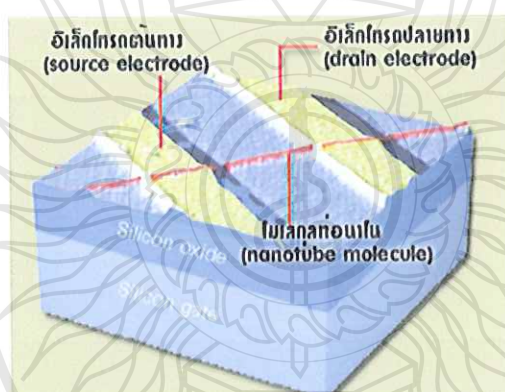


ภาพที่ 2.10 กราฟแสดงความแข็งแรงของทองแดงที่ขึ้นอยู่กับการขนาดเกรนของทองแดง ที่มา : กราฟนี้ดัดแปลงมาจากข้อมูลของ R.W. Siegel และ Lim and Chaudhri)

สำหรับสาเหตุที่ทำให้โลหะและเซรามิก ที่มีเกรนในระดับนาโน มีสมบัติเชิงกลดีขึ้นนั้น อาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ บริเวณขอบเกรน (Grain boundary area) ทั้งนี้ เนื่องจากว่าวัสดุ โดยทั่วไป จะมีสัดส่วนของอะตอม อยู่ที่บริเวณขอบเกรนน้อยมาก แต่วัสดุที่มีขนาดเกรนอยู่ใน ระดับนาโน จะมีสัดส่วนของอะตอมอยู่ที่บริเวณขอบเกรนสูง จึงทำให้วัสดุที่มีขนาดเกรนในระดับ นาโน มีสมบัติเชิงกลแตกต่างไป จากวัสดุที่มีเกรนขนาดใหญ่กว่า เช่น การมีลักษณะการแพร่ ของ มวลสารในบริเวณขอบเกรน ที่แตกต่างไปจากวัสดุที่มีเกรนขนาดใหญ่ หรือในกรณีของโลหะที่มี เกรนในระดับนาโน นั้น จะพบว่าขนาดเกรนของโลหะมีขนาดเล็ก เกินไปกว่าที่จะทำให้เกิดความ บกพร่อง ของโครงสร้างผลึก ที่เรียกว่าการเปลี่ยนรูปแบบดิสโลเคชัน (Dislocation) ซึ่งเป็นข้อบกพร่อง ชนิดหนึ่ง ที่พบในโลหะที่มีเกรนขนาดใหญ่ นอกจากนี้ในงานวิจัยบางชิ้น ยังได้รายงานว่าโลหะที่มี เกรนในระดับนาโน จะเกิดการเปลี่ยนรูป (Deformation) ได้จากการที่เกรน แต่เกรนถูกแรงกระทำ จากภายนอกบีบหรือรีดให้แยกออกจากกัน ในขณะที่ไม่มีการเปลี่ยนภาพที่เกิดขึ้นจากการบิดเบี้ยว (Distortion) ภายในเกรน (ณัฐพันธ์ สุภกา, 2555)

4. คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป

เมื่อโครงสร้างวัตถุถูกทำให้เล็กลงอยู่ในระดับนาโน จะส่งผลให้คุณสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้าของวัตถุนั้นแตกต่างออกไปจากที่เคยเป็นอยู่เดิม ตัวอย่างเช่น เมื่อวัตถุมีโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนแล้ว วงจรไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโครงสร้างนั้นไม่จำเป็นต้องเป็นไปตามกฎของโอห์ม (Ohm's law) ซึ่งกฎของโอห์มเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้า (I) แรงเคลื่อนไฟฟ้าของต้นกำเนิดไฟฟ้า (V) และความต้านทานไฟฟ้า (R) แต่หัวใจสำคัญของกฎของโอห์มมีพื้นฐานมาจากแนวคิดที่ว่า อิเล็กตรอนไหลผ่านไปตามสายไฟฟ้าในลักษณะที่เป็นกระแส แต่ในโครงสร้างระดับนาโนนั้นอิเล็กตรอนไม่ได้เคลื่อนที่โดยไหลเป็นกระแสเช่นเดิม เพราะถ้าหากสายไฟฟ้ามีขนาดความกว้างอยู่ในระดับนาโนแล้วนั้น อิเล็กตรอนจะต้องไหลไปตามสายไฟฟ้าจากอะตอมหนึ่งไปอีกอะตอมหนึ่งในปริมาตรที่ถูกจำกัด ซึ่งจะต้องทำให้เกิดสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างออกไปจากเดิมอย่างแน่นอน (ฉัฐพันธ์ สุกกา, 2555)



ภาพที่ 2.11 ท่อนาโนคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 1 nm ที่แสดงสมบัติทางไฟฟ้า

ที่มา : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit2-6.html>

สมบัติในการเป็นตัวนำ เป็นสารกึ่งตัวนำ หรือเป็นฉนวน ของวัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้างทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอะตอมที่อยู่ภายในวัสดุ และลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมเหล่านั้น โดยที่วัสดุระดับนาโนทุกประเภทจะมีมิติทางกายภาพ อย่างน้อยหนึ่งมิติที่ถูกจำกัดขนาดเอาไว้ จึงทำให้เป็นการบีบบังคับให้อิเล็กตรอน ในวัสดุนาโนสามารถเคลื่อนที่ได้ในปริมาตรที่จำกัดเท่านั้น จึงทำให้ ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เป็นการจำกัดบริเวณของอิเล็กตรอน (Quantum confinement) ปรากฏออกมาให้เห็นอย่างชัดเจน โดยที่ปรากฏการณ์ดังกล่าว ไม่เคยเกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยมากในวัสดุนาโนปกติ (ฉัฐพันธ์ สุกกา, 2555)

นอกจากนี้ขนาดและการจัดเรียงตัวในโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ ยังมีผลต่อสภาพการนำไฟฟ้าของโลหะด้วย โดยโลหะขนาดใหญ่จะมีแถบการนำ (Conduction band) ที่เกิดจากการจัดเรียงระดับชั้นพลังงานที่มาประกอบกันต่อเนื่องกันไป แต่เมื่อโลหะมีขนาดอนุภาคเล็กลงจะทำให้ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนวงนอกสุด เริ่มถูกกักขังอยู่ในบริเวณที่จำกัด ซึ่งจะส่งผลให้ระดับชั้นพลังงานต่างๆ ถูกแยกออกเป็นชั้นเดี่ยวๆ อย่างชัดเจน คล้ายกับระดับชั้นพลังงานของอะตอมเดี่ยว จึงส่งผลให้สมบัติทางไฟฟ้าของโลหะ มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการทำเป็นโลหะกับเป็นฉนวน ซึ่งสมบัติจะเป็นแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค เช่น กลุ่มอะตอมโลหะที่ประกอบตัวกันจำนวน 13 อะตอมนั้นจะไม่มีสมบัติในการเป็นโลหะแต่อย่างใด แต่เมื่อกลุ่มอะตอมโลหะรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้น เช่น มีอะตอมมากกว่า 309 อะตอมขึ้นไป จะทำให้กลุ่มอะตอมโลหะนั้นมีสมบัติเหมือนกับโลหะขนาดใหญ่ปกติ (ถัฐพันธ์ สุภกา, 2555)

5. คุณสมบัติทางแม่เหล็กที่เปลี่ยนไป

โดยทั่วไปสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุนั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวัสดุ และลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมของธาตุที่ประกอบกันขึ้นเป็นวัสดุ สารที่มีสภาพเป็นแม่เหล็กนั้นเป็นผลมาจากการสปินภายนอก (โมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่รอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอน) และสปินภายใน ที่เกิดจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน โดยที่อิเล็กตรอนจะมีการสปินเป็นแบบ “ขึ้น” หรือ “ลง” เท่านั้น จึงทำให้อิเล็กตรอนมีสมบัติเป็นขั้วแม่เหล็กคู่ (Magnetic dipole moment) ขนาดเล็ก โดยสารที่มีสภาพเป็นแม่เหล็กเกิดจากการที่อะตอมของสารมีจำนวนอิเล็กตรอนกลุ่มที่มีสปินขึ้นไม่เท่ากับพวกที่มีสปินลง ทำให้ค่าโมเมนตัมเชิงมุมหรือโมเมนต์แม่เหล็กมีค่าไม่เป็นศูนย์ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้เฉพาะ ในกรณีที่อะตอมมีจำนวนอิเล็กตรอนไม่เต็มชั้นพลังงานย่อยเท่านั้น และเมื่อสารและวัสดุต่างๆ มีขนาดโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนนั้นจะมีสมบัติทางแม่เหล็กแตกต่างออกไปจากวัสดุขนาดใหญ่ อันเป็นผลมาจากคุณสมบัติทางควอนตัมนั่นเอง (ถัฐพันธ์ สุภกา, 2555)

ตัวอย่างของสมบัติทางแม่เหล็กที่เปลี่ยนไปของโครงสร้างที่มีขนาดระดับนาโน ตัวอย่างเช่น เมื่ออะลูมิเนียมมีโครงสร้างขนาดเล็กในระดับนาโน นั้น จากโดยปกติในสภาพของวัสดุนาโนใหญ่ จะไม่มีสมบัติทางแม่เหล็กเลย แต่เมื่ออยู่ในระดับนาโน แล้วพบว่ากลุ่มอะตอมอะลูมิเนียม จำนวน 13 อะตอมที่มีขนาดประมาณ 1 nm นั้นกลับมีการจัดเรียงตัวของอะตอมและการจัดตัวของอิเล็กตรอนภายในอะตอมขึ้นในสภาพเป็นสารแม่เหล็กได้ (ถัฐพันธ์ สุภกา, 2555)

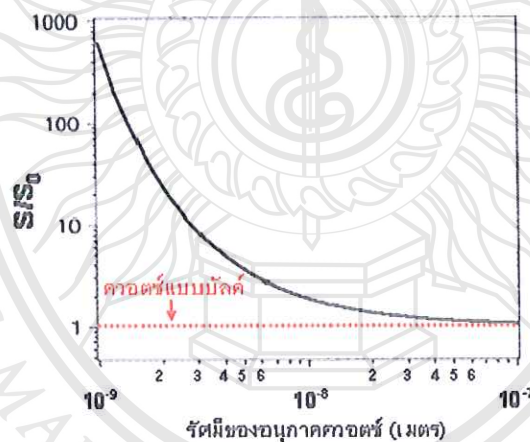
ความสามารถในการละลายดีขึ้น

เป็นที่ทราบกันดีว่า ผลึกที่มีขนาดเล็กในระดับนาโน จะมีความสามารถในการละลายสูงกว่าผลึกที่มีขนาดใหญ่ โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลาย กับขนาดของวัสดุ ได้แสดงไว้ในสมการ ที่คิดแปลงมาจากสมการเคลวิน (Kelvin equation) คือ

$$S/S_0 = \exp [2GV/rRT]$$

โดยที่ค่า S/S_0 คืออัตราส่วน ระหว่างการละลาย ของอนุภาคกับการละลายของวัสดุแบบก้อนใหญ่, G คือแรงตึงผิว, V คือปริมาตรในหน่วยโมลาร์, r คือรัศมีของอนุภาค, R คือค่าคงที่ของก๊าซ และ T คืออุณหภูมิห้อง (K) (ฉัฐพันธ์ สุกกา, 2555)

ตัวอย่างเช่น อนุภาคควอตซ์ที่มีรัศมีประมาณ 100 nm จะมีค่าการละลายใกล้เคียงกับควอตซ์แบบก้อนใหญ่ (Bulk quartz) แต่อนุภาคควอตซ์ที่มีรัศมี 1 nm จะมีค่าการละลายสูงกว่าควอตซ์ปกติเกือบ 1,000 เท่า (Mineral, 1990)



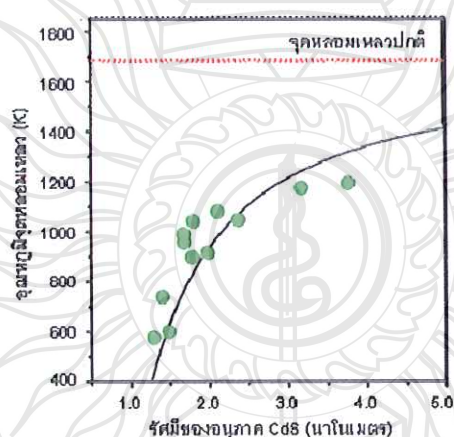
ภาพที่ 2.12 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการละลาย ของควอตซ์ที่มีเกรนในระดับนาโน กับควอตซ์แบบก้อนใหญ่

ที่มา : Mineral, 1990

7. จุดหลอมเหลวที่เปลี่ยนไปจากเดิม

จุดหลอมเหลว (Melting point) ของทองคำแบบก้อนใหญ่คือ 1,064 องศาเซลเซียสแต่อุภาคนาโนทองคำ ที่มีขนาดเท่ากับ 5, 2 และ 1 nm จะมีจุดหลอมเหลวลดลง เหลือแค่ประมาณ 830, 350 และ 200 องศาเซลเซียส ตามลำดับ! หรือแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ที่มีขนาดผลึก ในระดับนาโน จะมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าแคดเมียมซัลไฟด์ แบบก้อนใหญ่ โดยเมื่อขนาดผลึกยิ่งเล็กลง ก็ยิ่งทำให้จุดหลอมเหลวของแคดเมียมซัลไฟด์ต่ำลงไปด้วย (ฉัฐพันธ์ สุกกา, 2555)

ส่วนสาเหตุที่อาจทำให้อุภาคนาโนของโลหะ มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าปกติ เกิดจากอนุภาคนาโนมีปริมาณอะตอมผิวหน้ามาก โดยที่อะตอมผิวหน้า จะมีระดับพลังงานที่ใช้ในการยึดติดกันและกัน น้อยกว่าที่พบในของแข็งปกติ และจากอิทธิพลเคลวิน (Kelvin effect) จะพบว่าอนุภาคนาโนจะมีความดันไอสูงขึ้นซึ่งจะทำให้ระเหยได้ง่ายขึ้น (ฉัฐพันธ์ สุกกา, 2555)



ภาพที่ 2.13 แสดงอุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลวของแคดเมียมซัลไฟด์ที่มีขนาดผลึกแตกต่างกัน

ที่มา : <http://www.rmuphysics.com/charud/oldnews/67/index67.htm>

การสังเคราะห์วัสดุนาโน

การสังเคราะห์วัสดุนาโน หรือ วัสดุซูเปอร์จิว หรืออนุภาคนาโน ได้แก่ การสังเคราะห์ให้ได้เกรนหรืออนุภาคที่มีขนาดเพียง 1 ในพันล้านเมตร ซึ่งในที่นี้ “อนุภาค” หมายถึง การประกอบกันของหลายๆเกรน ซึ่งก็คือ การประกอบรวมกันของอะตอมหลายๆอะตอมนั่นเอง โดยทั่วไปเกรนของวัสดุนาโนมีตั้งแต่ระดับ 100 μm จนถึงระดับมิลลิเมตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นผมของเราที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 100 μm แล้วก็จะตระหนักได้ชัดว่าเกรนของวัสดุนาโนมีขนาดเล็กมาก กล่าวคือมีขนาดเล็กกว่าเส้นผมถึงแสนเท่า และถ้านับจำนวนอะตอมใน 1 อนุภาคจะพบว่าประกอบ

ไปด้วยอะตอมตั้งแต่ระดับร้อยไปจนถึงระดับล้านอะตอมต่อ 1 อนุภาคเลยทีเดียว นับได้ว่าอนุภาคนาโนนั้นมีขนาดเล็กมากๆ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้วัสดุนาโนมีสมบัติพิเศษด้านความแข็งแรงและความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิสูงตลอดจนมีค่าความต้านทานการกัดกร่อน ความต้านทานการสึกกร่อน และความต้านทานการสึกหรอ ตลอดจนมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาเคมีได้สูงกว่า (สุภกร ภู่เกิดและคณะ, 2549)

หลักการของวิธีการสังเคราะห์วัสดุนาโน อาจแบ่งได้เป็น 2 แบบได้แก่ การนำอนุภาคนาโนขนาดเล็กมาเรียงกัน หรือการย่อยอนุภาคนาโนขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงตามความต้องการ ทั้งนี้แต่ละวิธีจะมีข้อเด่นและข้อด้อยแตกต่างกันออกไป แต่ในการพัฒนาเทคโนโลยีนั้นต่างก็มีเป้าหมายเพื่อมุ่งเน้นให้วัสดุหรืออุปกรณ์ที่สังเคราะห์หรือผลิตขึ้นมีความสามารถและมีสมบัติดีเยี่ยม (สุภกร ภู่เกิดและคณะ, 2549)

1. วิธีการพัฒนาเทคโนโลยี

การพัฒนาเทคโนโลยีสามารถกระทำได้ 2 วิธีคือ

1.1 วิธีการเพิ่มขนาด (Up-sizing scale) เป็นการเพิ่ม/ใส่เต็มส่วนประกอบต่างๆ ให้มีสมบัติที่กว้างขวาง ทำให้ระบบซับซ้อนและใช้งานได้ครอบคลุม ซึ่งจะส่งผลให้วัสดุหรืออุปกรณ์เหล่านั้นมีขนาดใหญ่และราคาแพงขึ้น (สุภกร ภู่เกิดและคณะ, 2549)

1.2 วิธีการลดขนาด (Down-sizing scale) เพื่อให้ได้อุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กลงและราคาถูก ซึ่งการพัฒนาเทคโนโลยีโดยการลดขนาดลงนี้ได้รับความสนใจจากนักวิจัยและนักศึกษาเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการทำทนายและเป้าหมายในการลดขนาดวัสดุอุปกรณ์ให้ได้เล็กที่สุด แต่ยังคงคุณสมบัติที่ดีเยี่ยม ดังนั้นการควบคุมวัสดุหรืออุปกรณ์ในระดับโมเลกุลและระดับอะตอม ซึ่งรวมถึงการสังเคราะห์หรือวิศวกรรมคุณสมบัติของวัสดุอุปกรณ์ผ่านทางโครงสร้างของวัสดุ ก็เป็นนาโนเทคโนโลยีประเภทหนึ่งเพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงขนาดของวัสดุนาโนว่าเล็กเพียงใดอาจต้องเปรียบเทียบวิธีการลดขนาดกับสิ่งที่เรารู้เคย เช่น ขนาดของเหรียญห้าบาท หรือ เหรียญบาทที่อยู่ในระดับเซนติเมตร เมื่อลองนึกภาพขยายระดับเซนติเมตรไปพันเท่าก็จะเห็นภาพของขนาดไมโครเมตร ซึ่งก็คือเม็ดเลือดแดงของเรา และเมื่อเราขยายขนาดของเม็ดเลือดแดงไปอีกพันเท่าก็จะได้สิ่งที่มีขนาดนาโนเมตร ซึ่งเทียบได้กับเซลล์ในเนื้อเยื่อของเรา (สุภกร ภู่เกิดและคณะ, 2549)

ถ้าเอาระดายนหนึ่งมานักออกเป็น 2 ส่วนและฉีกกระดายนนั้นออกไปเรื่อยๆ ทีละครั้งๆ จะพบว่า กระดายนนั้นมีขนาดเล็กลง จนกระทั่งเป็นการยากที่จะฉีกย่อยออกไปได้อีก ด้วยลักษณะนี้จึงไม่สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนโดยการทุบแบ่งอนุภาคนาโนใหญ่ให้เป็นขนาดเล็กได้ อนุภาคนาโนควรสังเคราะห์จากจากการนำอะตอมหรือโมเลกุล เหมือนการวางก้อนอิฐเพื่อสร้างกำแพง โดยการนำอะตอมหรือโมเลกุลซึ่งอยู่แยกกันมารวมกลุ่มกันเพื่อสร้างเป็นอนุภาคนาโน

วิธีดังกล่าวนี้จะคล้ายกับการปลูกผลึกจากสารละลายซึ่งทำได้ง่ายกว่าการพยายามแบ่งย่อยอนุภาคนาโนขนาดใหญ่มาทำให้เป็นอนุภาคนาโน อย่างไรก็ตาม วิธีการนำอะตอมมารวมตัวกันนั้นไม่ใช่วิธีที่คิดและบางครั้งการนำอะตอมมาเรียงต่อกันอาจทำให้อนุภาคที่ได้มีขนาดใหญ่เกินไป ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการควบคุมขนาดของอนุภาคให้มีขนาดตามต้องการ (ศุภกร ภูเกิดและคณะ, 2549)

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนอย่างง่าย ๆ ที่ใช้หลักการนำเอาอะตอมมาจัดเรียงกันเป็นกลุ่มก้อน สามารถกระทำได้หลายวิธี เนื่องจากในขั้นต้นแต่ละอะตอมจะอยู่แยกออกจากกันในลักษณะที่เกิดจากการแยกตัวหรือกระจายตัวอยู่ในรูปของก๊าซ สารละลายหรือของแข็ง ดังนั้นวิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนหรือวิธีการนำเอาอะตอมมารวมกันเป็นกลุ่มก้อนอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ การทำปฏิกิริยาจากแก๊ส การทำปฏิกิริยาจากสถานะของเหลว

ซึ่งสามารถใช้ในการผลิตอนุภาคนาโนที่เป็นโลหะหรือเซรามิกส์ได้ที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ (150-600°F) เมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ จึงทำให้สามารถผลิตอนุภาคนาโนได้มากและราคาถูก วิธีการดังกล่าวได้มีการนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมและสามารถสังเคราะห์อนุภาค/วัสดุได้แทบทุกประเภท เช่น สังเคราะห์โลหะอัลลอยและคอมโพสิตเป็นเนื้อเดียวกัน หรือวัสดุที่มีความบริสุทธิ์ถึง 99.9999 % โดยวัสดุที่สังเคราะห์จะมีส่วนประกอบที่แน่นอนตามที่ต้องการและสามารถควบคุมโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุสุดท้ายที่ต้องการผลิต/สังเคราะห์ เพื่อให้ได้สมบัติเชิงกล ทางกายภาพ และทางเคมีที่ต้องการ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นวิธีการที่สังเคราะห์ในระดับอะตอม นอกจากนี้วิธีดังกล่าวยังสามารถใช้ในการเคลือบวัสดุตั้งแต่หนึ่งประเภทขึ้นไปลงในวัสดุอีกหนึ่งประเภทเช่น ใช้เคลือบโลหะหรือเซรามิกส์ เป็นต้น (ศุภกร ภูเกิดและคณะ, 2549)

2. วิธีการสังเคราะห์วัสดุนาโนจากการทำปฏิกิริยาในแก๊ส

การสังเคราะห์วัสดุนาโนด้วยวิธีการนี้เป็นการเปลี่ยนอะตอมหรือโมเลกุลที่จะนำมารวมกันเป็นกลุ่มก้อนหรือเป็นอนุภาคนาโนให้ไปอยู่ในสถานะก๊าซหรือไอ ก่อนที่จะทำให้เกิดการรวมตัวกันและควบแน่นให้ไอของอะตอมดังกล่าวกลายเป็นสถานะของของเหลว ซึ่งการทำให้อะตอมโมเลกุลเปลี่ยนสถานะให้ไปอยู่ในรูปแบบของก๊าซ/ไอ สามารถทำได้โดยการทำให้อุณหภูมิสูงหรือระเหยเปรียบเทียบกับได้กับการทำให้น้ำระเหยกลายเป็นไอน้ำจากการให้ความร้อนและทำให้อากาศควบแน่นบริเวณที่อุณหภูมิต่ำให้เป็นหยดน้ำ วิธีการดังกล่าวเรียกว่า การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแบบการควบแน่นจากสถานะก๊าซ (Gas condensation synthesis) โดยอนุภาคนาโนที่ได้จะมีสัดส่วนเช่นเดียวกับสัดส่วนขององค์ประกอบในสารตั้งต้น ซึ่งอาจเป็นไปได้ทั้งโลหะหรือสารอินทรีย์ที่ถูกทำให้ระเหยกลายเป็นไอโดยการให้ความร้อนจากแหล่งความร้อนต่างๆ อาทิ เตา เครื่องยิงเลเซอร์

หรือลำแสงอิเล็กตรอน โดยการสังเคราะห์จะกระทำภายในหม้ออัดความดันที่ความดันประมาณ 1-50 มิลลิบาร์ ของก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียม หรืออาร์กอน (สุภกร ภูเกิดและคณะ, 2549)

วิธีการนี้เปรียบเทียบกับได้กับการต้มน้ำในหม้อให้เดือดในวันที่มีอากาศเย็น โมเลกุลของน้ำที่ระเหยกลายเป็นไอจากหม้อจะถูกควบแน่นกลายเป็นหมอกที่ระยะใกล้ๆ เหนือบริเวณหม้อ ในทำนองเดียวกันไอของอะตอมของโลหะที่ถูกทำให้เดือดจากการให้ความร้อนจะควบแน่นและเกิดการจับตัวของกลุ่มก้อนอะตอมที่เรียกว่า Cold finger ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีรูปทรงกระบอกและถูกหล่อให้เย็นโดยก๊าซไนโตรเจนเหลว อนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นและจับตัวอยู่บริเวณดังกล่าวจะคล้ายกับหยดน้ำที่ได้รับการควบแน่นและเกาะอยู่ที่หน้าต่าง ขนาดของกลุ่มก้อนอะตอมจะขึ้นอยู่กับเวลาที่อะตอมดังกล่าวรวมตัวกัน และขึ้นอยู่กับความดันและประเภทของก๊าซเฉื่อยในหม้ออัดความดัน ตลอดจนอัตราการระเหยของสารตั้งต้นขนาดของอนุภาคนาโนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันก๊าซ ความดันไอ และมวลของก๊าซเฉื่อยที่ใช้สูงขึ้นและยังสามารถใช้ในการผลิตผงหรืออนุภาคที่มีความบริสุทธิ์สูงและยังสามารถใช้ในการผลิตผงนาโนของเซรามิกส์ เนื่องจากผงนาโนที่ผลิตได้ด้วยวิธีการดังกล่าวจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นจะสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ได้ง่าย (สุภกร ภูเกิดและคณะ, 2549)

ได้มีการจำแนกวิธีการสังเคราะห์อนุภาคหรือผงนาโนตามประเภทของแหล่งพลังงานที่ใช้ในการสลายสารตั้งต้นเช่น

1. วิธีการสังเคราะห์แบบไอทางเคมี (Chemical vapor deposition)
2. วิธีการสังเคราะห์โดยการสั่นดาป (Microwave plasma processing)
3. วิธีการสังเคราะห์โดยคลื่นไมโครเวฟ (Combustion flame synthesis)

เริ่มต้นจากการที่ไอของสารตั้งต้นถูกส่งผ่านไปยังบริเวณหม้ออัดความดันที่มีการหล่อร้อน สารตั้งต้นจะถูกแยกสลายและอนุภาคหรือผงนาโนที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่านโดยลำของไอและเก็บไว้ที่บริเวณ Cold finger ขนาดของอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ทำปฏิกิริยา อุณหภูมิในหม้อความดัน องค์ประกอบและความดันของสารตั้งต้น รายละเอียดวิธีการสังเคราะห์แบบไอทางเคมี ส่วนวิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโดยใช้พลาสมาจะเป็นการใช้พลาสมาที่ได้จากเครื่องไมโครเวฟในการแยกสลายสารตั้งต้น ขนาดของอนุภาคนาโนที่ได้ขึ้นกับส่วนประกอบและความดันของสารตั้งต้นและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ข้อดีของวิธีการนี้ก็เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ได้เป็นการให้พลังงานความร้อน ดังนั้นจึงสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าวิธีการอื่น และส่งผลให้การรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนโตของอะตอมน้อยลง

นอกจากนี้ยังมีวิธีการสังเคราะห์โดยการสั่นดาปซึ่งการแยกสลายสารตั้งต้นสามารถกระทำได้โดยการเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงหรือเปลวไฟ การลดขนาดของการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของ

อนุภาคผงนาโนในเปลวไฟสามารถกระทำได้โดยการลดขนาดของเปลวไฟดังกล่าวให้มีความดันน้อยลง ถ้าสังเกตเปลวไฟจากเทียนไขจะเห็นได้ว่าเปลวไฟจากเทียนไขจะมีสีน้ำเงินบริเวณตรงกลางแล้วล้อมรอบด้วยเปลวไฟสีเหลืองและสีแดง โดยที่อุณหภูมิของเปลวไฟจะแปรผันกับตำแหน่งของเปลวไฟ การแปรผันของอุณหภูมิในเปลวไฟจะทำให้ขนาดของอนุภาคนาโนแตกต่างกันขึ้นอยู่กับว่าอนุภาคนั้นมาจากตำแหน่งใดในเปลวไฟนั้น จึงทำให้สามารถควบคุมขนาดของอนุภาคนาโนได้จากการควบคุมลักษณะของเปลวไฟให้มีอุณหภูมิคงที่ตลอดแนวกว้างของเปลวไฟนั้นๆ ด้วยวิธีการสังเคราะห์ดังกล่าวข้างต้น สารตั้งต้นที่เหมาะสมในสถานะก๊าซจะผสมกับเชื้อเพลิง เช่น อะเซทิลีนหรือมีเทน และ ออกซิเจน ส่วนผสมดังกล่าวจะถูกเผาผ่านหัวเผาซึ่งสารตั้งต้นจะแยกสลายในเปลวไฟและให้อนุภาคนาโน และจะสามารถเก็บรวบรวมอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำจากการเลือกสารตั้งต้นที่เหมาะสมจะสามารถทำให้ผลิตอนุภาคนาโนได้อย่างมากมายหลายประเภทจนเกือบไม่มีขีดจำกัด อย่างไรก็ตาม วิธีการสังเคราะห์แต่ละประเภทก็จะมีข้อได้เปรียบเสียเปรียบแตกต่างกันออกไป เช่น อนุภาคโลหะบริสุทธิ์ส่วนใหญ่ควรจะเตรียมจากวิธีการควบแน่นจากสถานะก๊าซเพื่อป้องกันสิ่งเจือปนต่างๆ ในขณะที่วิธีการสัณดาปจะมีข้อจำกัดคือ จะใช้ในการผลิตอนุภาคนาโนที่เป็นสารประกอบออกไซด์เท่านั้น เนื่องจากอนุภาคนาโนที่เตรียมได้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนนั่นเอง

จะเห็นได้ว่าการสังเคราะห์ทุกวิธีสามารถใช้ในการผลิตอนุภาคนาโนของสารประกอบออกไซด์ ในขณะที่วิธีการควบแน่นจากสถานะก๊าซและการสังเคราะห์แบบไอทางเคมีจะใช้การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของโลหะ โลหะผสมและสารประกอบโลหะ ตลอดจนสารประกอบที่ไม่ใช่ออกไซด์ วิธีการสังเคราะห์จากปฏิกิริยาในสถานะก๊าซมีข้อดี คือ อนุภาคนาโนที่ผลิตได้จะมีสารปนเปื้อนในปริมาณที่ต่ำและสามารถควบคุมของอนุภาคนาโนได้โดยการควบคุมตัวแปรในการสังเคราะห์ เช่น อุณหภูมิ และ ความบริสุทธิ์ของก๊าซ เป็นต้น (สุภกร ภูเกิดและคณะ, 2549)

3. วิธีการสังเคราะห์จากการทำปฏิกิริยาในสถานะของเหลว

อนุภาคนาโนสามารถเตรียมได้จากการตกตะกอนของอะตอมของสารตั้งต้นในของเหลว ซึ่งการสังเคราะห์ดังกล่าวสามารถทำได้ 2 วิธีแรกจะคล้ายกับการตกตะกอนของผลึกเกลือจากสารละลายเกลือแกง ซึ่งอนุภาคนั้นจะสามารถตกตะกอนได้จากสารละลายของสารตั้งต้นแต่โดยทั่วไปอนุภาคนาโนเกิดจากการทำปฏิกิริยาในสถานะก๊าซ จุดสำคัญจะอยู่ที่การควบคุมขนาดของอนุภาคไม่ให้มีขนาดเกินไปและโดยทั่วไปการขยายตัวของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับอัตราการทำให้เย็นตัวของอนุภาคนั้นๆ วิธีการที่เหมาะสมและนิยมใช้กันคือ การควบคุมการขยายตัวของอนุภาคโดยการจำกัดบริเวณของอนุภาคนั้น เช่น การจำกัดขนาดของอนุภาคภายในไมเซลล์ (Micells) รีเวอร์สไมเซลล์ (Reverse micelles) หรือภายในฟิล์มของพอลิเมอร์ เป็นต้น (สุภกร ภูเกิดและคณะ, 2549)

วิธีการสังเคราะห์แบบรีเวอร์สไมเซลล์เป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ รีเวอร์สไมเซลล์หมายถึงหยดน้ำขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายอินทรีย์ เกิดเมื่อผสมน้ำกับน้ำมันและกวนของผสมดังกล่าวโดยเร็ว จากการที่น้ำและน้ำมันไม่สามารถละลายซึ่งกันและกันได้ เมื่อหยุดกวนจะพบว่ามีหยดเล็กๆ ของสารชนิดหนึ่งลอยอยู่บนสารอีกชนิดจำนวนมาก ขนาดของหยดน้ำดังกล่าวจะสามารถทำให้เล็กลงได้มากโดยการใส่สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เช่น ผงซักฟอก หยดน้ำหรือรีเวอร์สไมเซลล์ ดังกล่าวจะทำตัวเหมือนหม้ออัดความดัน และเนื่องจากขนาดของหยดน้ำนั้นเล็กมากจึงทำให้ปริมาณของสารตั้งต้นที่มีอยู่ในแต่ละหยดน้ำนั้นมีจำนวนน้อยมาก เมื่อหยดน้ำดังกล่าวทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นอีกประเภทหนึ่งก็จะเกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบที่มีอนุภาคขนาดเล็กมากตามไปด้วย ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนก็จะเริ่มต้นด้วยสารเคมี 2 ประเภทที่จะทำปฏิกิริยาให้ได้สารประกอบที่ต้องการ ดังนั้นการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของสารประกอบที่เกิดจากการที่สารเคมี 2 ประเภททำปฏิกิริยากัน จะต้องเลือกสารตั้งต้นโดยคำนึงว่าหนึ่งในสารตั้งต้นสองชนิดนั้น จะละลายได้ในน้ำและอีกชนิดหนึ่งจะละลายได้ในสารละลายอินทรีย์ ดังนั้นเมื่อนำสารตั้งต้นมาผสมกันโดยการผสมน้ำจำนวนน้อยกับสารละลายอินทรีย์ที่มีปริมาณมากจะเกิดเป็นอินเวอร์สอิมัลชัน (Inverse emulsion) ของสารตั้งต้นทั้ง 2 ประเภทขึ้น และเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวในปริมาณที่มากขึ้น ขนาดของหยดน้ำจะเล็กลงไปเรื่อยๆ และส่งผลให้อนุภาคของสารประกอบที่เราต้องการสังเคราะห์มีขนาดเล็กลงเมื่อพิจารณาจากแผนภาพที่แสดงว่าได้เติมสารเคมีประเภทหนึ่งเรียกว่าสาร A ซึ่งสามารถละลายได้ในน้ำลงไปในสารละลายอินทรีย์ที่มีสารตั้งต้นอีกประเภทหนึ่งเรียกว่า สาร B ซึ่งละลายได้ในสารละลายอินทรีย์และกวนให้เข้ากัน เนื่องจากน้ำไม่สามารถละลายในสารละลายอินทรีย์จึงทำให้เกิดหยดน้ำขนาดเล็กๆ ลอยอยู่ในสารละลายอินทรีย์ จะพบว่าสาร B แพร่ผ่านผิวหน้าของสารลดแรงตึงผิวและเข้าไปทำปฏิกิริยากับสาร A ในหยดน้ำเกิดเป็นสารประกอบขึ้นในหยดน้ำนั้น เนื่องจากหยดน้ำนั้นมีขนาดเล็กมากจึงมีส่วนประกอบของสาร A ในปริมาณที่น้อยมากดังนั้นอนุภาคของสารประกอบที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดเล็กในระดับนาโน (สุกกร ภูเกิดและคณะ, 2549)

วิธีการรีเวอร์สไมเซลล์ได้นำมาใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของสารประกอบหลายประเภท อาทิ CdS, CdSe, CdTe, PbS, TiO_2 , BaTiO₃ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าสารประกอบที่สามารถสังเคราะห์ได้โดยวิธีการตกตะกอนก็สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีการรีเวอร์สไมเซลล์

นอกจากนี้ยังมีวิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนอีกวิธีหนึ่งที่เริ่มต้นจากปฏิกิริยาในสถานะของเหลว เรียกว่าวิธีการโซล-เจล (Sol-Gel) ซึ่งโดยทั่วไปวิธีการดังกล่าวประกอบด้วย 2 ขั้นตอนสำคัญ ได้แก่ ขั้นตอนรวมกับน้ำ (Hydrolysis) การควบแน่นของสารประกอบโลหะ Alkoxides M (OR)_z โดยสามารถเขียนเป็นปฏิกิริยาดังนี้



การเตรียมอนุภาคนาโนด้วยวิธีนี้จะเป็นการตกตะกอนสารประกอบออกไซด์ระดับนาโนในรูปของเจลไฮดรอกไซด์ (Hydroxide) ซึ่งตะกอนดังกล่าวจะถูกนำไปล้างและทำให้แห้ง และสุดท้ายจะได้อนุภาคนาโนที่ต้องการ จากการที่โลหะ Alkoxides ของสารตั้งต้นที่มีสถานะเป็นของเหลวทำปฏิกิริยากันในระดับอะตอม ก็จะทำให้เกิดเป็นอนุภาคนาโนของสารประกอบที่ต้องการเตรียมได้ที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้วิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนได้ด้วยต้นทุนที่ไม่สูงนักและอนุภาคที่ได้มีสัดส่วนองค์ประกอบที่ถูกต้องตามต้องการ แต่ข้อเสียของการสังเคราะห์วิธีดังกล่าวคือ จะมีการปนเปื้อนของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโน ทำให้การขึ้นรูปและการอบเชื่อมอนุภาคนาโนที่มีความหนาแน่นสูงทำได้ยาก เนื่องจากการรวมเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาค (สุภกร ภูเกิด และคณะ, 2549)

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโดยการบดย่อยอนุภาคขนาดใหญ่

วิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโดยการบดย่อยอนุภาคขนาดใหญ่นี้ดำเนินการโดยการทุบแบ่งอนุภาคขนาดใหญ่ให้ย่อยลงไปถึงระดับนาโน ซึ่งสามารถกระทำได้โดยวิธีการสังเคราะห์จากการทำปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง วิธีการที่เป็นที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคหรือผงนาโนที่รู้จักกันดีคือ วิธีการบดทางกล (Mechanical alloying) ซึ่งจะเริ่มต้นจากสารตั้งต้นที่มีสถานะของแข็ง แล้วถ้าทำการบดย่อยขนาดของสารตั้งต้นลง ซึ่งแตกต่างจากวิธีการสังเคราะห์จากการทำปฏิกิริยาในสถานะก๊าซและของเหลว ซึ่งเป็นการนำอะตอมมาเรียงต่อกันเป็นอนุภาคนาโน วิธีการบดทางกลดังกล่าวจึงเป็นการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร เริ่มต้นโดยการบดให้มีขนาดเล็กลงโดยใช้ลูกบด ซึ่งการบดโดยใช้ลูกบดจะทำให้เกิดการลดขนาดของอนุภาคของสารตั้งต้นจากขนาดมิลลิเมตร ลงไปถึงขนาดไมโครเมตร ภายในหรือที่บริเวณผิวหน้าของอนุภาคไมโครเมตร ก็จะประกอบด้วยอนุภาคนาโน เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบดให้นานมากขึ้นก็จะสามารถผลิตวัสดุหรือผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีส่วนประกอบที่ต้องการได้ ขนาดของอนุภาคนาโนที่วิเคราะห์โดยวิธีนี้จะขึ้นอยู่กับแรงและเวลาที่ใช้บดย่อย ตลอดจนอุณหภูมิที่ให้อยู่ในระหว่างการบด ข้อเสียเปรียบเทียบจากการสังเคราะห์โดยวิธีการดังกล่าวคือ การปนเปื้อนของสารอื่น เช่น จากลูกบด เป็นต้น (สุภกร ภูเกิดและคณะ, 2549)

วัสดุผสมนาโน

วัสดุผสมระดับนาโน (Nanocomposite) เป็นโครงสร้างระดับนาโนที่เป็นวัสดุผสมสังเคราะห์ที่มีเนื้อวัสดุหลายอย่าง ผสมกัน (Multiphase material) โดยที่มีเนื้อวัสดุหนึ่งหรือหลายๆเนื้อวัสดุเป็นโครงสร้างที่มีมิติของขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง 1 - 100 nm ซึ่งส่วนมากแล้ววัสดุผสม



ระดับนาโนจะเป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยเนื้อวัสดุ จำนวน 2 แบบ เป็นอย่างน้อย สามารถที่จะจำแนกวัสดุผสมระดับนาโนได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. วัสดุผสมที่เป็นเนื้อหลายอย่างแยกชั้นกัน (Nanolayers composite) เป็นโครงสร้างที่ประกอบขึ้นมาจากเนื้อของวัสดุต่างๆ โดยแบ่งเป็นชั้นๆ ซึ่งแต่ละชั้นมีขนาดในระดับนาโนเมตร

2. วัสดุผสมที่เป็นเนื้อหลายอย่างแยกเป็นเส้นใย (Nanofilamentary composite) เป็นโครงสร้างที่ประกอบขึ้นมาจากพื้นผิวที่มีการผสมเส้นใยฝังตัวลงไปไว้ภายในโครงสร้าง โดยเป็นเส้นใยที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร

3. วัสดุผสมที่เป็นเนื้อหลายอย่างแยกอนุภาค (Nanoparticulate composite) เป็นโครงสร้างพื้นผิวที่มีการผสมเอาอนุภาคที่มีขนาดระดับนาโน ผังตัวไว้ภายในโครงสร้างนั้น (คล้ายกับประเภทที่ 2 แต่เป็นอนุภาคนาโนแทนที่จะเป็นเส้นใยนาโน) และโดยส่วนใหญ่วัสดุผสมระดับนาโนจะเป็นโครงสร้างแบบพอลิเมอร์ที่ถูกทำให้สร้างพันธะกับชั้นผิวของวัสดุ เส้นใยนาโนหรืออนุภาคนาโน เพื่อปรับปรุงและผลิตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเฉพาะที่ดียิ่งขึ้น

โดยปกติวัสดุแบบมีรูพรุนจะต้องมีความพรุนระหว่าง 20 – 95 % ซึ่งรูพรุนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ รูพรุนเปิดที่เชื่อมต่อกันถึงพื้นผิววัสดุและรูพรุนปิดที่แยกตัวออกจากภายนอก ซึ่งการใช้งานในการคัดแยก การเร่งปฏิกิริยา การกรองจำเป็นต้องใช้รูพรุนเปิด โดยวัสดุแบบมีรูพรุนนาโนเป็นหนึ่งในสมาชิกของวัสดุแบบมีรูพรุนที่มีความพรุนสูง (มากกว่า 40 %) และมีขนาดของรูพรุนอยู่ระหว่าง 1-100 nm วัสดุแบบมีรูพรุนนาโนนี้มีคุณสมบัติพิเศษคือมีพื้นที่ผิวมากและมีความพรุนสูงทำให้มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงมากเหมาะกับการทำเป็นตัวกรองและตัวดูดซับ (Ryan W. and Radford C., 1987.)

5. การประยุกต์ใช้วัสดุนาโนในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม

วัสดุนาโนเป็นเทคโนโลยีที่จะช่วยด้านสิ่งแวดล้อมได้ในเรื่องน้ำ, น้ำเสีย (Water, Wastewater) ของเสียหรือขยะอันตราย การฟื้นตัวของทรัพยากร การป้องกันภาวะมลพิษ

บทบาทสำคัญของวัสดุนาโนด้านสิ่งแวดล้อมมักจะเกี่ยวข้องกับ การพัฒนาเซนเซอร์ที่ใช้ตรวจจับสารพิษต่างๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียและอากาศจากโรงงานอุตสาหกรรม การพัฒนาวัสดุที่มีรูพรุนขนาดนาโน เช่น ซีโอไลต์ (Zeolites) นาโนเซรามิก (Nanoceramic) หรือแผ่นกรองประสิทธิภาพสูงที่สามารถดักจับสารพิษต่างๆ ก่อนถูกปล่อยออกมาในแหล่งน้ำธรรมชาติหรือการใช้สารเร่งปฏิกิริยาขนาดนาโน (Nanolites) ในการลดความเป็นพิษและย่อยสลายสารพิษที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมให้หมดไป (สุกกร ภูเกิดและคณะ, 2549)

1. zeolite (ซีโอไลต์)

คุณสมบัติ การใช้ แหล่งวัตถุดิบที่ดี ของซีโอไลต์ ในการนำไปใช้ทั้งในการเกษตร เพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน เพิ่มผลผลิต ทั้งพืชสวน พืชไร่ ส่วนด้านประมง ช่วยดูดซับแก๊สพิษ แก๊สแอมโมเนีย ในน้ำ (Kanel and others, 2005)

1.1 Zeolite powder : ซีโอไลต์ ชนิดผง นิยมใช้มากในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยเฉพาะการเลี้ยงกุ้งมานานมากกว่า 15-20 ปี ใช้ได้ทั้งการเตรียมบ่อโดยหว่านไปทั่วพื้นบ่อหรือ ขณะเลี้ยง ซึ่งช่วยดูดซับ จับก๊าซพิษ กำพอก๊าซแอมโมเนีย ก๊าซเน่า ที่เกิดจากของเสียจำพวกขี้กุ้ง และอาหารที่เหลือเน่าเสีย ปัจจุบันมีการนำไปประยุกต์ใช้ในการเกษตร พืชไร่ พืชสวน

วิธีการสังเกตคุณภาพที่ดีของ ซีโอไลต์ ผง : เมื่อนำผง เมา เหมือนแป้งมัน ไม่มีความหยาบ หรือเป็นฝุ่นเมื่อทรายสีเขียวอมฟ้า ละลายน้ำได้

1.2 Zeolite grain : ซีโอไลต์ ชนิดเม็ด ส่วนใหญ่ใช้ในการบำบัดน้ำอุตสาหกรรม ใช้ในการกรองน้ำ (อัดอยู่รูปแท่ง) ตลอดจนใช้ในการกรอง บำบัดน้ำในฟาร์มปลา ฟาร์มปลาสวยงาม และใช้ในตู้ปลา โดยใช้รองพื้นในตู้ปลา รวมถึงใช้เป็นตัวรองพื้นกระบะให้แมว (Cat sand) ซึ่งการใช้งานจะแยกตามขนาดของซีโอไลต์

1. ซีโอไลต์ชนิด 01-03 mm.

2. ซีโอไลต์ชนิด 03-05 mm.

3. ซีโอไลต์ชนิด 05-07 mm.

วิธีการสังเกตคุณภาพที่ดีของซีโอไลต์ เม็ด : สีเขียวอมฟ้า ไม่แตกไหล เนื้อผิวไม่มัน

1.3 Zeolite granular : ซีโอไลต์ ชนิดเม็ด ใช้กันมากเหมือนชนิดผงวิธีการสังเกตคุณภาพที่ดีของ ซีโอไลต์ เม็ด : เม็ดกลมสวย ผิวเรียบไม่ขรุขระ สีต้องอมเขียว ปัจจุบันมีการนำซีโอไลต์ (Zeolite) ไปใช้ในการเกษตร โดยนำเสนอเป็น สินแร่, แร่ธาตุรวม, แร่ธาตุบริสุทธิ์ แล้วแต่ใครจะกล่าวอ้างกันเพราะในความเป็นจริง ซีโอไลต์ถือว่าเป็นสินแร่หรือแร่หนึ่งก็ถูกต้อง แต่การกล่าวอ้างสรรพคุณ การดูดซับ จับปุ๋ย การปรับปรุงคุณภาพดิน การช่วยเสริมระบบราก การช่วยเสริมการป้องกันโรค นั้นต่างๆ เป็นข้อดีของซีโอไลต์

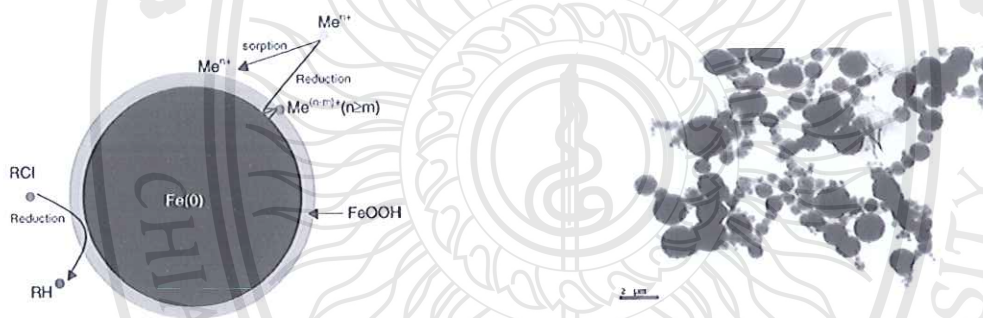
2. ผงนาโนเซรามิก

ผงเซรามิก เป็นวัตถุดิบสำคัญในอุตสาหกรรมเซรามิก นอกจากนั้นผงเซรามิกยังถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้อีกด้วยเช่น อุตสาหกรรมทหาร อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วน เครื่องจักรกลและยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมผลิตวัสดุการแพทย์ นาโนเทคโนโลยีได้เข้ามามีบทบาทต่ออุตสาหกรรมการผลิตผงเซรามิกเช่นกัน เนื่องการผลิตผงนาโน

เซรามิก นั้น ทำให้ต้นทุนการผลิตลดลงและทำให้ชิ้นงานที่ผลิตได้มีคุณสมบัติพิเศษมากขึ้น ดังตัวอย่างการนำมาใช้แก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมดังต่อไปนี้ (Yueqiang Liu, 2006)

ผงเซรามิก ในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม

ผงเซรามิก คือ สารระดับอนุภาคนาโน ที่มีความเป็นตัวรีดิวซ์สูงจึงนิยมนำมาใช้ ในการลดสารจำพวก chlorinated organic compound ในดินและน้ำบาดาล โดยจากขนาดที่เล็กทำให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยากับสารมากขึ้น และความสามารถในการทำงานสามารถทำงานได้มากกว่า 1,000 ครั้ง ทำให้ผงเซรามิก มีความสามารถในการบำบัดน้ำได้สูง ภายในอนุภาคของผงเซรามิก จะเป็นสารจำพวก zero-valent หรือโลหะที่มีประจุเป็นศูนย์ เช่น Fe(II) , Fe(III) เป็นต้น ซึ่งมีขนาดอยู่ระหว่าง 50-300 nm ซึ่งแต่ละอนุภาคมีความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาที่ 10-1000 ครั้ง ผงเซรามิก มีความสามารถที่จะแพร่กระจายเข้าไปในตัวน้ำพาได้หลายชนิด เช่น น้ำ ก๊าซ ไนโตรเจน น้ำมันพืช เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้จะเป็นตัวที่ช่วยนำเอาอนุภาคนาโน ไปยังจุดที่เราต้องการทำการบำบัดได้ (Yueqiang Liu, 2006)



ภาพที่ 2.14 แสดงลักษณะของอนุภาคนาโน

ที่มา : Yueqiang Liu, 2006



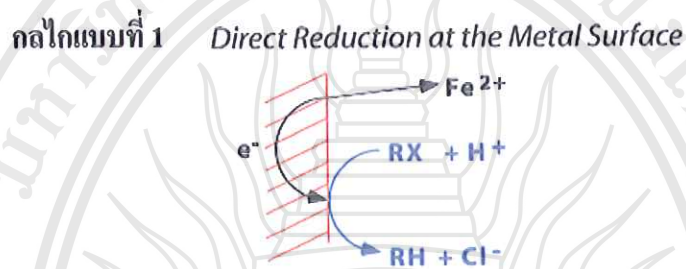
ภาพที่ 2.15 แสดงหยดน้ำมันพืชที่มีอนุภาคนาโนผสมอยู่

ที่มา : Yueqiang Liu, 2006

กลไกการเข้าทำปฏิกิริยาของ NZVI (Yueqiang Liu, 2006)

ในขบวนการกำจัดสารอินทรีย์พวก Herbicide, Pesticide จัดเป็นสารพิษ สารพวกนี้จะมี Cl เป็นองค์ประกอบกลไกการเกิดปฏิกิริยาจะแสดงได้ดังนี้ (Yueqiang Liu, 2006)

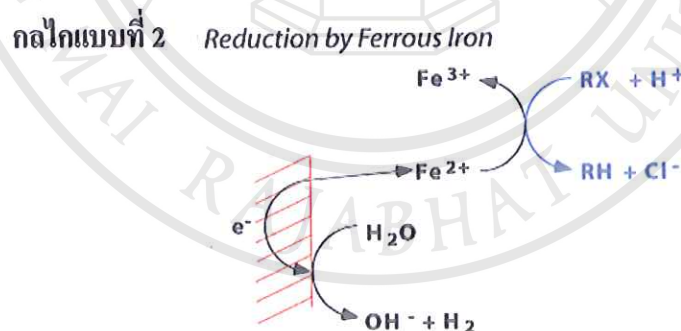
กลไกแบบที่ 1 เป็นการเกิดปฏิกิริยา reduction โดยการส่งผ่าน electron ที่ผิวของ Fe (0) เกิดการดูดซับธาตุฮาโลเจน RX ที่อยู่บริเวณผิวของน้ำ ผลที่เกิดขึ้นคือ เกิดการ Dechlorination ปลดปล่อย Cl⁻ ออกมาและได้ผลิตภัณฑ์เป็น Fe (II) ดังกลไกแบบที่ 1



ภาพที่ 2.16 แสดงการเกิดปฏิกิริยา Reduction โดยการส่งผ่าน Electron ที่ผิวของ Fe (0)

ที่มา : Yueqiang Liu, 2006

กลไกแบบที่ 2 แสดงผลของ Fe (II) ที่เกิดจากการสลายตัวของ Fe (0) เกิดปฏิกิริยาการกำจัดธาตุฮาโลเจน RX ด้วยขบวนการ Dechlorination ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น Fe (III) ในขบวนการนี้จะมี H₂O เกิดการแตกตัวที่ผิวของ Fe (II) ด้วย



ภาพที่ 2.17 แสดงผลของ Fe(II) ที่เกิดจากการสลายตัวของ Fe(0) เกิดปฏิกิริยาการกำจัด

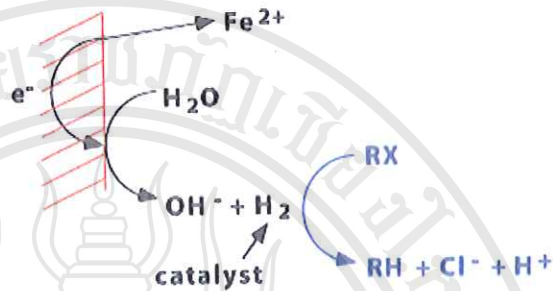
ธาตุฮาโลเจน RX ด้วยขบวนการ Dechlorination

ที่มา : Yueqiang Liu, 2006

กลไก แบบที่ 3 แสดงให้เห็นว่า H_2 ที่เกิดจากการสลายตัวในสภาวะไม่มีออกซิเจนของ $Fe(II)$ จะทำปฏิกิริยากับ RX เกิดเป็นปฏิกิริยาระดับการสลาย RX ด้วย H_2

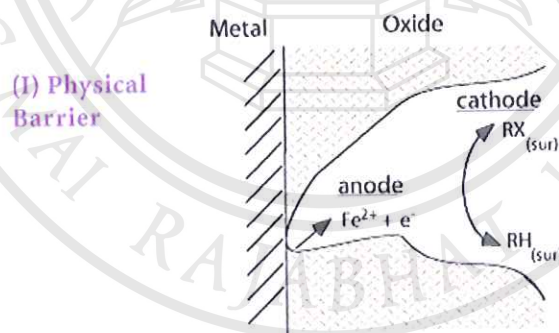
กลไก แบบที่ 3

Reduction by Hydrogen with Catalysis



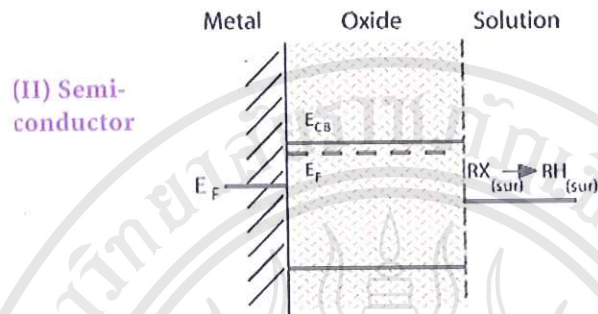
ภาพที่ 2.18 แสดงให้เห็นว่า H_2 ที่เกิดจากการสลายตัวในสภาวะไม่มีออกซิเจนของ $Fe(II)$ ที่มา : Yueqiang Liu, 2006

กลไกของ $Fe(0)$ ในการกำจัดสารพิษจาก Oxide ของโลหะ สารประกอบ Carbonate หรือ Sulfides ด้วยการทำให้เกิดการตกตะกอน ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมโดยจะทำหน้าที่เป็นสารตัวกลางพื้นผิว ในการส่งผ่าน Electron ที่ใช้ในการดูดซับสาร แสดงดังภาพที่ 2.19 การเกิดปฏิกิริยาด้านล่าง แสดงทิศทางที่สำคัญในการส่งผ่าน Electron จาก $Fe(0)$ ไปสลายสาร RX ซึ่งจะคล้ายกับทิศทางของการเกิด Oxide film ดังภาพ



ภาพที่ 2.19 แสดงทิศทางที่สำคัญในการส่งผ่าน Electron จาก $Fe(0)$ ไปสลายสาร RX ที่มา : Yueqiang Liu, 2006

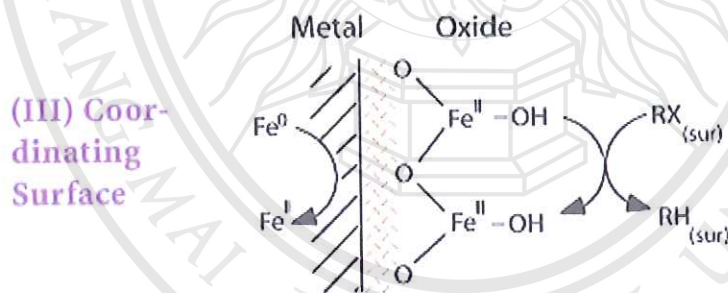
ภาพที่ 2.20 แสดงกลไกของ Oxide film ซึ่งเป็นสารตัวกลางในการส่งผ่าน Electron ไปสลาย RX โดยแสดงคุณสมบัติเหมือน Semiconductor ดังรูป



ภาพที่ 2.20 แสดงกลไกของ Oxide film ซึ่งเป็นสารตัวกลางในการส่งผ่าน electron ไปสลาย RX

ที่มา : Yueqiang Liu, 2006

ภาพที่ 2.21 แสดงกลไกของ Oxide film เป็นตัวเชื่อมในการเกิดปฏิกิริยา Coordinating บริเวณพื้นผิวของ Fe(II) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในการกำจัด RX ดังรูป



ภาพที่ 2.21 แสดงกลไกของ Oxide film เป็นตัวเชื่อมในการเกิดปฏิกิริยา Coordinating

ที่มา : Yueqiang Liu, 2006

การสังเคราะห์อนุภาคนาโน NZVI

การสังเคราะห์อนุภาคนาโน NZVI นั้นสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกันดังตาราง

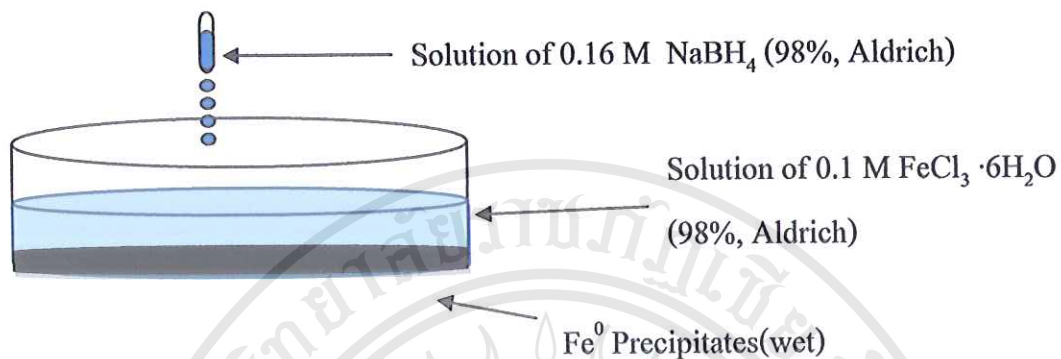
ตารางที่ 2.22 วิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโน NZVI

Iron and Iron Oxides Studied						
Name	Source	Method	Particle Size (dia.)	BET Surface Area	Major Phase	Minor Phase
Fe ^{H1}	Toda Americas, Inc.	High temp. reduction of oxides with H ₂	70 nm	29 m ² /g	α-Fe ⁰	Magnetite
Fe ^{BH}	W.-X. Zhang, Lehigh Univ.	Precip. w/ NaBH ₄	10-100 nm	33.5 m ² /g	Fe ⁰	Goethite, Wustite
Fe ^{EL}	Fisher Scientific	Electrolytic	150 μm	0.1-1 m ² /g	99% Fe ⁰	
Fe ₃ O ₄	PNNL	Precip from FeSO ₄ w/ KOH	30-100 nm	4-24 m ² /g	Fe ₃ O ₄	
Fe ₂ O ₃	Nanotek, Corp.	Physical Vapor Synthesis (PVS)	23 nm	50 m ² /g	γ-Fe ₂ O ₃	

ที่มา : Yueqiang Liu, 2006

วิธีการตกตะกอนด้วย NaBH₄

เราสามารถเตรียมอนุภาคนาโน NZVI ได้โดยการเติม สารละลาย NaBH₄ ความเข้มข้น 0.16 M ลงในสารละลาย FeCl₃ · 6H₂O ความเข้มข้น 0.1 M ในสภาวะบรรยากาศ (อุณหภูมิห้อง) จากนั้น ตั้งทิ้งโดยใช้ Magnetic stirrer จนเกิดการตกตะกอนเป็นตะกอนสีดำของ Fe⁰ ซึ่ง Fe³⁺ ถูก Reduce ไปเป็น Fe⁰ ซึ่งตะกอนสีดำนี้ เราสามารถนำไปทำปฏิกิริยาต่างๆ ต่อไปได้



ภาพที่ 2.22 แสดงวิธีการตกตะกอนด้วย NaBH_4

ที่มา : Yueqiang Liu, 2006)

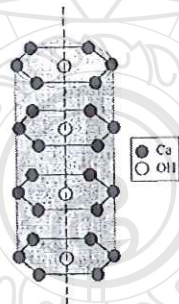
ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite)

โครงสร้างและสมบัติทางเคมีของไฮดรอกซีอะพาไทต์

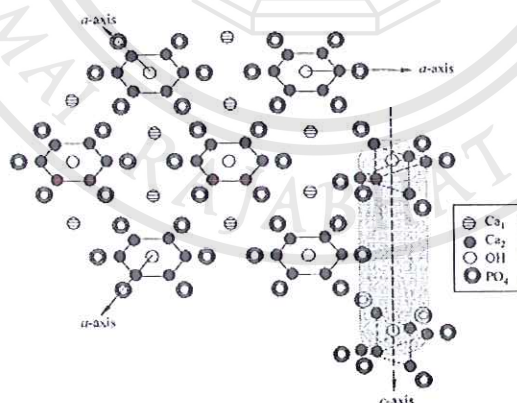
ไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นเซรามิกชนิดหนึ่งซึ่งมีการตอบสนองแบบว่องไวทางชีวภาพ และมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับกระดูกมนุษย์และเนื้อเยื่อแข็งชนิดอื่นของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ยกตัวอย่างเช่น ไฮดรอกซีอะพาไทต์ประกอบด้วยไอออนที่คล้ายคลึงกันกับในโครงสร้างของกระดูกและฟัน ไฮดรอกซีอะพาไทต์แสดงถึงความเข้ากันได้ทางชีวภาพที่ดีเยี่ยม ไม่เฉพาะแต่ในเนื้อเยื่อแข็งเท่านั้น แต่ยังเข้ากันได้กับเนื้อเยื่ออ่อนนุ่ม เช่น ผิวหนังและกล้ามเนื้อ นอกจากนี้ยังเป็นสื่อทำให้เกิดการขยายตัวของเซลล์กระดูก เมื่อนำไปปลูกฝังภายในเนื้อกระดูก ยกตัวอย่างเช่นในเนื้อฟัน แบ่งเป็นเนื้อเยื่อแข็ง 3 ชนิด คือ 1. ชั้นนอกของฟัน(Enamel) 2. เนื้อฟัน (Dentine) 3. รากฟัน (Cementum) ชั้นนอกของฟันเป็นส่วนที่มีความแข็งแรงมากที่สุดในร่างกาย และมีผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ถึง 97wt% และเป็นสารอินทรีย์และน้ำ 3 wt% ในเนื้อฟันเป็นส่วนที่คล้ายกับกระดูกมากที่สุดในส่วนของรากฟันประกอบด้วย 45 wt% เป็นผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ และ 55 wt% และเป็นสารอินทรีย์และน้ำในร่างกายของมนุษย์ พบว่า ไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นเซรามิกชีวภาพที่มีองค์ประกอบพื้นฐานเป็นแคลเซียมฟอสเฟต (Weiner, and Wagner, 1998) (Deany, 1996)

ไฮดรอกซีอะพาไทต์ บริสุทธิ์เป็นปริมาณสารสัมพันธ์และมีสูตรโมเลกุลเป็น $(\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2, \text{HA})$ ประกอบไปด้วย Ca^{2+} , PO_4^{3-} และ OH^- มีสัดส่วนต่อโมลของ Ca : P เป็น 1.67 โครงสร้างแลตทิซของผลึกอะพาไทต์ (ดูในภาพที่ 2.23) โดยมี บรรจุอยู่ภายในผลึกรูปแท่งและมี ล้อมรอบอยู่ด้านข้าง โครงร่างของไฮดรอกซีอะพาไทต์อยู่ในระบบของผลึกหกเหลี่ยมด้วย Space group P63/m

ลักษณะเฉพาะของการจัดเรียงตัวตามระนาบแกน c ในแนวตั้งถึงระนาบแกน a เสมอเป็นแนวเดียวกันทั้ง 3 ระนาบ ทำมุมกัน 120° เท่ากัน และมีขนาดของหน่วยเซลล์ ($a = 9.441 \text{ \AA}$ และ $c = 6.882 \text{ \AA}$) ในแต่ละระนาบของหน่วยเซลล์ ที่มีขนาดเล็กที่สุด มารวมตัวกันได้เป็นผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (ดูในภาพที่ 2.24) ตามตำแหน่งของหน่วยเซลล์ แคลเซียมอะตอมทั้งหมด 10 อะตอม สามารถแยกเป็น 2 ประเภท คือ Ca_1 และ Ca_2 แคลเซียมอะตอม 4 อะตอม อยู่ที่ตำแหน่ง Ca_1 ซึ่งวางอยู่ตรงตำแหน่งของออกเตดรีดัล [51, 53, 54] แคลเซียมอะตอม 6 อะตอม อยู่ที่ตำแหน่ง Ca_2 ซึ่งวางอยู่ตรงมุมของผลึกเฮกซะโกนอลและมี OH^- ล้อมรอบไว้ แต่แคลเซียมอะตอมทั้ง 6 อะตอม ไม่ได้เรียงตัวอยู่ในระนาบเดียวกันในแต่ละการจัดเรียงตำแหน่งรูป 3 เหลี่ยมที่ $z = 0.25$ และที่ $z = 0.75$ OH^- วางอยู่ตรงแนวศูนย์กลางทางแนวตั้งของผลึกเฮกซะโกนอล และ แคลเซียม Ca_2 ทั้ง 6 อะตอมกับอะตอมของฟอสเฟตทั้ง 6 อะตอม มีการจัดเรียงแบบขดเกลียวจากระดับ $z = 0.25$ และที่ $z = 0.75$ และเรียงตัวเป็นรูป 3 เหลี่ยม 2 ตัว กลุ่มของหมู่ฟอสเฟตทำให้เกิดเป็นโครงสร้างร่างแหของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีความเสถียร [(Weiner, and Wagner, 1998), (Schultz et al., 2000) Hamadouche and Sedel, 2000)]



ภาพที่ 2.23 แสดงโครงสร้างแลตทิซของผลึกอะพาไทต์อย่างง่าย
ที่มา : Weiner, and Wagner , 1998



ภาพที่ 2.24 แสดงการจัดเรียงอะตอมของ Calcium HA, $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$
ที่มา : Weiner, and Wagner ,1998

การถูกแทนที่ของหมู่อะพาไทต์ [(Gibson and Bonfield, 1999) (Serre et al., 1998)]

สมบัติทางชีววิทยาของของไฮดรอกซีอะพาไทต์ในร่างกายของสิ่งมีชีวิตที่แตกต่างจากของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่บริสุทธิ์ ประกอบด้วยความเป็นปริมาณสารสัมพันธ์ องค์ประกอบ สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล เนื่องจากมีไอออน ทำให้เมื่อนำไฮดรอกซีอะพาไทต์ มาใช้งานในร่างกายสิ่งมีชีวิต จึงเกิดไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีแคลเซียมไม่เพียงพอในองค์ประกอบทางเคมีของไฮดรอกซีอะพาไทต์ ดูจากสัดส่วนโมลที่ต่ำกว่า 1.67 ของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่บริสุทธิ์และปกติคาร์บอนไฮดรอกซีอะพาไทต์ จะเป็นไอออนที่เข้าไปแทนที่ในโครงสร้างของไฮดรอกซีอะพาไทต์

ในการแทนที่ของไอออน เช่น Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Sr^{2+} หรือ Ba^{2+} สามารถเข้าไปแทนที่ Ca^{2+} ; CO_3^{2-} , $H_2PO_4^{2-}$, HPO_4^{2-} และ SO_4^{2-} สามารถแทนที่ PO_4^{3-} ; F^- , Cl^- และ CO_3^{2-} สามารถแทนที่ OH^- ดังนั้นสูตรโมเลกุลที่เหมาะสมของไฮดรอกซีอะพาไทต์ทางชีววิทยา คือ

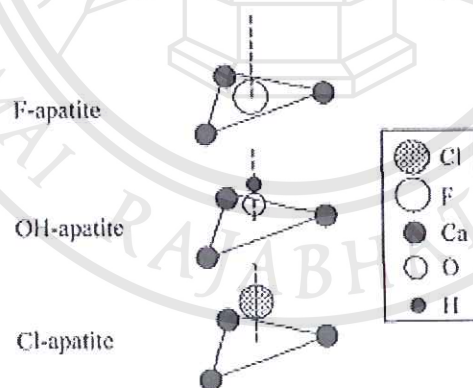


M แทนไอออนบวกเช่น Ca^{2+} , Sr^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Ba^{2+} , Zn^{2+} , Mg^{2+} , เป็นต้น

Y แทนไอออนลบ เช่น CO_3^{2-} , $H_2PO_4^{2-}$, HPO_4^{2-} , SO_4^{2-} , เป็นต้น

X แทนไอออนลบ เช่น F^- , Cl^- , CO_3^{2-} , เป็นต้น

ตัวอย่างเช่น เมื่อ F^- แทนที่หมู่ OH^- ในโครงสร้างอะพาไทต์ ทำให้เกิดเป็น $Ca_{10}(PO_4)_6F_2$ และก็คล้ายกันเมื่อ Cl^- แทนที่หมู่ OH^- ในโครงสร้างอะพาไทต์ ทำให้เกิดเป็น $Ca_{10}(PO_4)_6Cl_2$ แต่ตำแหน่งของ OH , Cl หรือ F ในไฮดรอกซีอะพาไทต์ก็มีความแตกต่างกันตามภาพที่ 2.18 แม้ว่าอะตอม ของ OH , Cl , และ F จะวางไปตามแนวแกนอน c ที่ศูนย์กลางของ 3 เหลี่ยมของอะตอมแคลเซียม



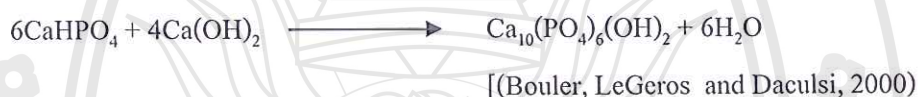
ภาพที่ 2.25 แสดงตำแหน่งของ OH , Cl , และ F ที่ศูนย์กลางระหว่างอะตอมของแคลเซียม

ที่มา : Gibson and Bonfield, 1999

การสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ [(Bouler, LeGeros and Daculsi, 2000), (El Briak et al., 2003), (Bourges et al., 2002), (Ambrosio et al., 2001), (Kumar, Manjubala and Gunasekaran, 2000)]

ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์สามารถสังเคราะห์ได้หลายกระบวนการ จากหลายปฏิกิริยาดังกัน ภายใต้กระบวนการที่แตกต่างกัน ทำให้ลักษณะเฉพาะของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่ได้สัณฐานวิทยา ปริมาณสารสัมพันธ์ และระดับชั้นของการเกิดผลึกเปลี่ยนแปลงไปตามกระบวนการผลิต กระบวนการสังเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ กระบวนการสังเคราะห์แบบแห้ง (Dry Chemical Method) และ กระบวนการสังเคราะห์แบบเปียก (Wet Chemical Method)

3.1 กระบวนการสังเคราะห์แบบแห้ง เป็นปฏิกิริยาสถานะของแข็งระหว่างแคลเซียมกับฟอสฟอรัส ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากกระบวนการแบบแห้ง มีข้อดีคือ ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้มีความเป็นปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry) ดังสมการ



หรือ

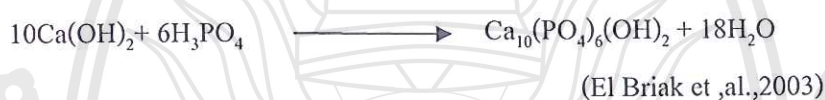


สารประกอบในกลุ่มของแคลเซียมทุกตัว ถูกบดผสมเข้าด้วยกันอย่างเหมาะสม ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดและเผาอุณหภูมิสูงประมาณ 950 °C จากนั้นจึงได้ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีความเป็นปริมาณสารสัมพันธ์ และความเป็นผลึกสูง กระบวนการนี้มีปัจจัยที่สำคัญ คือ ปฏิกิริยาเกิดได้ที่อุณหภูมิสูงและใช้เวลานาน ความสามารถในการเกิดซินเตอร์มีต่ำ ดังนั้นการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการนี้จึงขึ้นอยู่กับปริมาณส่วนประกอบของแคลเซียมที่เหมาะสมต่อการถูกแทนที่ของกลุ่มอะพาไทต์

3.2 กระบวนการสังเคราะห์แบบเปียก เป็นกระบวนการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้ผงที่มีพื้นที่ผิวสูงและได้ผงที่มีความละเอียดสูง ดันทุนต่ำ ง่ายต่อการทำเป็นสารละลายอิมัลชัน แต่กระบวนการนี้ทำให้ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้ไม่เป็นปริมาณสารสัมพันธ์ เนื่องจาก การปนเปื้อนของไอออนกลุ่มต่างๆ เช่น คาร์บอเนตไอออน ไฮโดรเจนฟอสเฟต โพแทสเซียมไอออน โซเดียมไอออน ไนเตรตไอออน และคลอไรด์ไอออน ปฏิกิริยานี้ไม่สามารถควบคุมได้เนื่องจากลักษณะเฉพาะตัวของผลึกแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

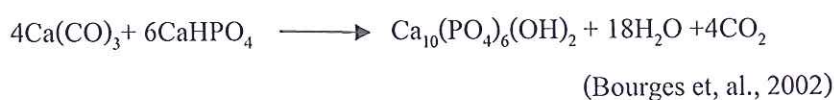
โดยทั่วไปการไม่เป็นปริมาณสารสัมพันธ์ของไฮดรอกซีอะพาไทต์ จากการสังเคราะห์แบบเปียก มีสาเหตุมาจากกลุ่มอะพาไทต์มีการดึงดูดให้อิออนต่างๆเข้ามาหาตัวเองให้มาก ความเสถียรตามธรรมชาติของแคลเซียมฟอสเฟต และปัจจัยทางด้านจุลศาสตร์ทางความร้อน ปัจจัยทั้งหมดจะแสดงผลออกมาตามสภาวะของการทดลอง เช่น เมื่อสังเคราะห์ผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ จากสารละลายยิ่งยวด ผลึกที่พบได้ในระหว่างกระบวนการ เช่น ไตรแคลเซียมฟอสเฟต และออกตะแคลเซียมฟอสเฟต แม้ว่าปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นเวลานาน ปริมาณเฟสเล็กน้อยที่เกิดขึ้นยังคงพบอยู่ในผลผลิตสุดท้าย

กระบวนการสังเคราะห์แบบเปียกสามารถผลิตผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์และผงแคลเซียมฟอสเฟตที่ไม่อยู่ในรูปผลึกได้ทั้ง 2 ชนิด ปฏิกิริยาแบบหนึ่งคือการปรับให้สารละลายเป็นกลางด้วยกรดและด่าง ซึ่งเป็นการพัฒนากระบวนการสังเคราะห์ ไฮดรอกซีอะพาไทต์ ในช่วงแรก ดังสมการ

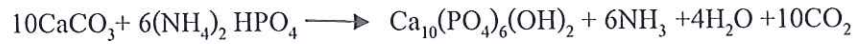


3.2.1 ปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล เป็นปฏิกิริยาระหว่างสาร 2 ชนิด ที่มีลักษณะเฉพาะทางกายภาพแตกต่างกัน เช่น ในรูปสารละลายหรือแร่ธาตุ ทำปฏิกิริยากันภายใต้แรงดันและสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้เกิดสารละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันและสร้างผลึกขึ้นใหม่ ซึ่งเกี่ยวข้องกับลักษณะโครงสร้างและพฤติกรรมของสารแต่ละชนิด กระบวนการนี้ทำให้ระดับขึ้นของการเกิดผลึกสูงและสัดส่วนระหว่าง Ca : P มีความเป็นปริมาณสารสัมพันธ์มากขึ้น เพราะเฟสที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ เช่น เบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต ไตรแคลเซียมฟอสเฟต เดคาแคลเซียมฟอสเฟต สามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้ภายใต้สภาวะของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

ปฏิกิริยาข้างต้นเป็นปฏิกิริยาสถานะของแข็งและปฏิกิริยานี้สามารถเปลี่ยนไปเป็นปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลได้ที่อุณหภูมิ 275 °C ภายใต้แรงดัน 12,000 psi (1 psi = 0.070 kg/cm²) ผลของปฏิกิริยาทำให้ได้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีกลุ่มของคาร์บอเนตไอออน ทำได้โดยการผสมแคลเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตหรือแอมโมเนียไฮโดรเจนฟอสเฟต ซึ่งสามารถเติมลงในส่วนผสมของแคลเซียมคาร์บอเนต ตามสมการ ดังนี้



หรือ



(Bourges et, al., 2002)

3.2.2 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส เป็นปฏิกิริยาที่สามารถผลิตผงเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์จากการย่อยสลายกลุ่มแคลเซียมฟอสเฟตอื่นๆด้วยไอน้ำ ความร้อน ความดัน เช่น ไดแคลเซียมฟอสเฟต ไตรแคลเซียมฟอสเฟต แคลเซียมฟอสเฟตอสถฐาน ออกตระแคลเซียมฟอสเฟต แคลเซียมคาร์บอเนต โปแทสเซียมฟอสเฟตคาร์บอเนต และอื่นๆทั้งหมดสามารถสลายตัวเกิดเป็นผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีปริมาณแคลเซียมไม่พอ

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ ปกติจะต่ำกว่า 100°C และสามารถละลายในสารละลายได้มากกว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่บริสุทธิ์ ดังนั้นอาจนำไปใช้ร่วมกับกระดูกได้ง่าย ตัวอย่างของสมการเป็นดังนี้



(Ambrosio et, al., 2001)

อย่างไรก็ตาม ผลจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่ได้มีรูปร่างเป็นเข็มหรือใบมีด มีขนาดของผลึกในระดับไมโครเมตร นอกจากนี้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทั่วไปทำที่อุณหภูมิต่ำ ใช้เวลานาน ดังนั้นจึงมีนักวิทยาศาสตร์บางคนใช้วิธีการสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค หรือไมโครเวฟเพื่อเร่งปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น

3.2.3 ปฏิกริยาการตกตะกอน เป็นปฏิกิริยาที่ใช้กันทั่วไปเพื่อการผลิตทางการค้า ด้วยการปรับแต่งปฏิกิริยาดังกรดและต่างเช่นกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) โดยนำมาทำปฏิกิริยากันให้เกิดการตกตะกอน ตามสมการดังนี้



(Kumar, Manjubala and Gunasekaran ,2000)]

กระบวนการนี้สามารถปรับแต่งได้โดยการเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{NH}_4(\text{OH})$) เพื่อรักษาค่าความเป็นกรด่างไว้ในปฏิกิริยาและมีผลต่อการเกิดไฮดรอกซีอะพาไทต์หลังจากซินเตอร์ เช่น ปฏิกริยาระหว่างแคลเซียมไนเตรด ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) กับแอมโมเนียมฟอสเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) และเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{NH}_4(\text{OH})$) ในปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ตามสมการดังนี้



(Kumar, Manjubala and Gunasekaran ,2000)]

แคลเซียมอะซิเตท ($\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) เป็นสารประกอบอีกตัวหนึ่งซึ่งใช้แทนแคลเซียมคลอไรด์หรือแคลเซียมไนเตรด ในปฏิกิริยาการตกตะกอน อะซิเตตไอออนจะไม่เข้าไปแทนที่กลุ่มอะพาไทต์แต่จะถูกแทนที่โดยไนเตรดไอออนหรือคลอไรด์ไอออนแทน

ข้อดีของกระบวนการตกตะกอนคือปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ตั้งแต่อุณหภูมิห้องประมาณ 24°C ถึงอุณหภูมิน้ำเดือดประมาณ 95°C ถึง 100°C ทำให้เกิดผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ ขนาดนาโนเมตร รูปร่างคล้ายใบมีด รูปเข็ม รูปแท่ง หรือรูปร่างค่อนข้างกลม และมักพบว่าเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีปริมาณแคลเซียมไม่เพียงพอ และพบว่าความเข้มข้นของแคลเซียมสามารถปรับได้โดยการควบคุมการแทนที่จากอะตอมอื่นๆในอะตอมของแคลเซียมเช่นอะตอมของสตรอนเทียม แมกนีเซียม แมงกานีส และอะตอมอื่นๆอีกมากมาย ส่วนอะตอมของฟอสเฟตสามารถถูกแทนที่ด้วยอะตอมของคาร์บอนเนต วานาเดต โบเรต แมงกานเนต และอะตอมอื่น ส่วนฟลูออโรอะพาไทต์และคลอโรอะพาไทต์ได้จากการเติมฟลูออไรด์ไอออนและคลอไรด์ไอออนในปฏิกิริยาตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม สมบัติของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ เช่นสมบัติความเป็นผลึกและอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตเป็นอย่างมากและกระบวนการผลิตขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของสารตั้งต้นและความเป็นกรดเป็นด่างของปฏิกิริยา ปัจจัยเหล่านี้ทำให้เกิดช่องว่าง (Vacancy) ภายในแลตติสของไอออนหรือของอะตอมระหว่างกระบวนการ ทำให้ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ไม่เป็นปริมาณสารสัมพันธ์และมีความเป็นผลึกน้อย

สรุป คือ ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์บริสุทธิ์สามารถผลิตขึ้นได้จากปฏิกิริยามากมายทั้งปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลหรือปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง และปฏิกิริยาของเหลวทั้งปฏิกิริยาตกตะกอน และไฮโดรไลซิส ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เตรียมได้ส่วนมากจะมีปริมาณแคลเซียมไม่เพียงพอในโครงสร้างแต่มีไฮโดรเจนฟอสเฟตสูง สารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเช่น แคลเซียมคาร์บอนเนต แคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือแคลเซียมออกไซด์ สามารถเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้แคลเซียมไม่เพียงพอได้ ปฏิกิริยาการตกตะกอนก็เป็นปฏิกิริยาหนึ่งที่ทำให้สารละลายที่เกิดขึ้นมีความเป็นด่างมากขึ้น อีกทั้งยังทำให้คาร์บอนเนตไอออนเหลือมาก มีผลทำให้สัดส่วนโมลของแคลเซียมฟอสฟอรัสมากกว่า 1.67 กระบวนการอื่นๆที่ใช้ในการผลิตผง ไฮดรอกซีอะพาไทต์ นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้ว เช่น Electrocrystallization , Emulsion , Flux method , Freeze drying , Mechanochemical , Microwave irradiation , Plasma technique , Sol-gel และ Spray – pyrolysis and ect.

พฤติกรรมเชิงความร้อนของไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นพฤติกรรมหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเพราะกระบวนการผลิตเซรามิกส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง ที่น่าสนใจคือ ไฮดรอกซิลไอออนยังคงเสถียรอยู่ในโครงสร้างของไฮดรอกซีอะพาไทต์แม้ที่อุณหภูมิสูง ($\sim 1350^\circ\text{C}$)

ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากวัสดุธรรมชาติ (Nasser et al., 2009)

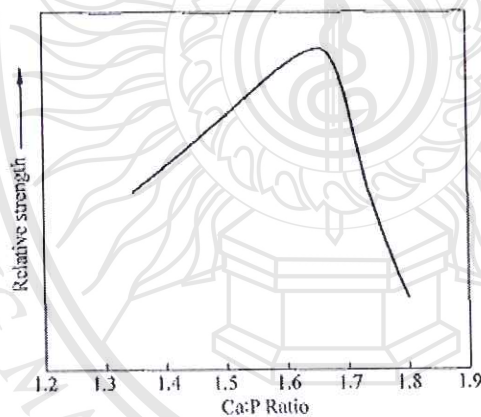
นักวิจัยสามารถเตรียมไฮดรอกซีอะพาไทต์จากวัสดุธรรมชาติ โดยการให้ความร้อนแก่กระดูกสัตว์ที่เหลือทิ้งจากระบวนการผลิตอื่น เช่น กระดูกวัว ฟัน และกระดูกหมู หรือจากปะการัง เป็นต้น การเตรียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ จากวัสดุธรรมชาติเป็นการประหยัดต้นทุนและไม่มีปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม การเตรียมไฮดรอกซีอะพาไทต์จากธรรมชาติมีหลายวิธี เช่น การเตรียมด้วยกระบวนการทางความร้อน (Thermal decomposition) การเตรียมด้วยกระบวนการสกัดโดยใช้ น้ำที่สภาวะกึ่งวิกฤติ (Subcritical water) และการเตรียมด้วยกระบวนการทางเบส (Alkaline hydrothermal hydrolysis) เป็นต้น กระบวนการเตรียมทั้งหมดนี้เป็นการสกัดเอาสารอินทรีย์ออกจากเนื้อสัตว์

ปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยโปรตีนด้วยค่า เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ในหม้อนิ่งแรงดันสูง (Autoclave) และอบด้วยเตาไมโครเวฟ การสกัดโดยใช้น้ำที่สภาวะกึ่งวิกฤติหรือเป็นการสกัดโปรตีนด้วยเทคนิคแรงดันต่ำ เป็นเทคนิคการให้ความร้อนภายใต้แรงดัน อุณหภูมิที่ใช้งานต่ำกว่าอุณหภูมิค่าวิกฤติของน้ำ แต่สูงกว่าช่วงของตัวทำละลาย เปลี่ยนแรงตึงผิว และเปลี่ยนความหนืดค่าคงที่ทางไฟฟ้าของน้ำลดลงด้วยการเพิ่มอุณหภูมิ ทำให้โมเลกุลน้ำไม่มีขั้วมากขึ้น การสกัดโดยใช้น้ำที่สภาวะกึ่งวิกฤติ โดยมากมักใช้ เพื่อสกัดด้วยกระบวนการนี้ที่อุณหภูมิ 275°C มีประโยชน์ในการสกัดคอลลาเจนและสารอินทรีย์อื่นๆให้หมดไปจากกระดูก เพื่อให้ได้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่บริสุทธิ์ ทั้ง 3 กระบวนการนี้เป็นกระบวนการแบบดั้งเดิมที่มีจุดประสงค์เดียวกัน คือ การขจัดของเหลือใช้ทางชีวภาพ การให้ความร้อนโดยตรงกับกระดูกวัว เป็นการสลายคอลลาเจนและสารอินทรีย์อื่นๆ ซึ่งสามารถขจัดโดยการให้ความร้อน (Calcination) และบดจนละเอียด และเมื่อนำไปวิเคราะห์ห่มอนูพันธุ์ด้วยรังสีอินฟราเรด วิเคราะห์เฟส ของไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคการกระจายตัวของรังสีเอกซ์ ผลการวิจัยบ่งบอกได้ว่ากระบวนการเตรียมด้วยความร้อน มีข้อดีคือ สามารถผลิตไฮดรอกซีอะพาไทต์ รูปแท่งขนาดนาโนเมตรได้ และค่อนข้างจะพบได้มากกว่ากระบวนการ โดยการใช้ น้ำและกระบวนการโดยใช้ด่างอย่างไรก็ตามการเตรียมด้วยกระบวนการใช้น้ำกับการใช้ด่างก็สามารถผลิตผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ ขนาดนาโนเมตร ได้เช่นเดียวกัน โดยทั้ง 3 กระบวนการผลิตนำไปวิเคราะห์หาสัดส่วนต่อโมล พบว่า กระบวนการทางความร้อนได้ $\text{Ca} : \text{P} = 1.65$ โดยการใช้ น้ำกึ่งวิกฤติได้ $\text{Ca} : \text{P} = 1.56$ และโดยการใช้ด่าง $\text{Ca} : \text{P} = 1.86$ ซึ่งค่าสัดส่วนโมลที่ได้เป็นค่ายอมรับได้ในการเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์กระบวนการทั้ง 3 มีข้อดี คือ สามารถผลิตไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยกระบวนการที่ง่าย และราคาถูกซึ่งผลิตด้วยกระบวนการที่ไม่ยุ่งยากและสามารถผลิตได้ในปริมาณที่มาก

สมบัติเชิงกลของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Yasuda et, al., 2000)

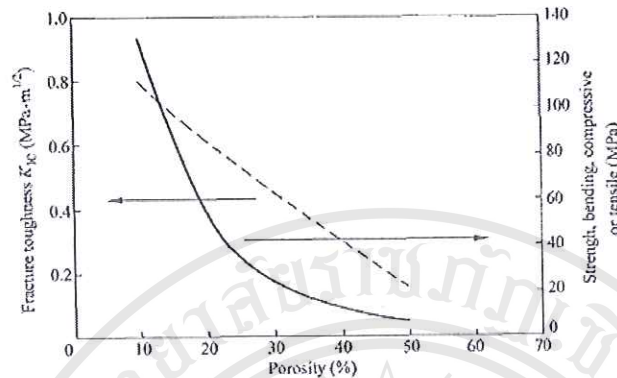
ค่าสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้นกับเทคนิคการวัดค่าความพรุน ขนาดเกรน และสิ่งปนเปื้อนในไฮดรอกซีอะพาไทต์ ปัจจัยเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความเกี่ยวข้องกับสมบัติเชิงกลโดยตรง ยกตัวอย่างเช่น ข้อมูลยังมอดูลัสของไฮดรอกซีอะพาไทต์แบบเนื้อแน่นมีค่าช่วง 35 – 120 Gpa การทนต่อแรงบิดงอมีค่าในช่วง 44 – 115 GPa การทนต่อการกดมีค่าในช่วง 120 – 900 MPa และทนต่อแรงดึงมีค่าช่วง 38 – 300 MPa ตามลำดับ ขณะที่ยังมอดูลัส ของกระดูกจริงมีค่า อยู่ในช่วง 10-20GPa ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงที่เปรียบเทียบกันได้ แต่เนื่องจากการใช้งานจริงต้องคำนึงถึงการออกแบบให้เกิดความปลอดภัย ยิ่งกว่านั้นไฮดรอกซีอะพาไทต์มีค่าทนทานต่อการแตกหัก (K_{IC}) และ Weibull modulus ประมาณ 5-18 ซึ่งหมายความว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นเซรามิกที่มีความเปราะ มีการขยายตัวตามรอยแตกสูงและไม่คงทนภายใต้การรับน้ำหนักเป็นเวลานาน เช่นพื้นเทียมจากไฮดรอกซีอะพาไทต์จะแตกหักภายในเวลาประมาณ 1 ปี

สำหรับ ไฮดรอกซีอะพาไทต์ เนื้อแน่นสัดส่วน โมลแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเข้าใกล้ค่าสูงสุดของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ 1.67 และความแข็งแรงลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อสัดส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสมากกว่า 1.67 ดังภาพที่ 2.26



ภาพที่ 2.26 ผลของอัตราส่วน โดย โมลระหว่างแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสกับสมบัติเชิงกล
ที่มา : Yasuda et, al., 2000

ความพรุนของชิ้นงานตัวอย่างมีผลสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติเชิงกลของไฮดรอกซีอะพาไทต์ เช่น ความแข็งแรงของชิ้นงานตัวอย่างลดลงเป็นลักษณะเส้นโค้งกับความพรุน ค่าความทนทานต่อการแตกหักของไฮดรอกซีอะพาไทต์แบบเนื้อแน่นอยู่ในช่วง $0.8 - 1.2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ และลดลงอย่างเป็นเส้นตรงด้วยการเพิ่มความพรุน ดังภาพที่ 2.27



ภาพที่ 2.27 กราฟแสดงค่า K_{IC} สมบัติเชิงกล และปริมาณความพรุนของไฮดรอกซีอะพาไทต์
ที่มา : Yasuda et, al., 2000

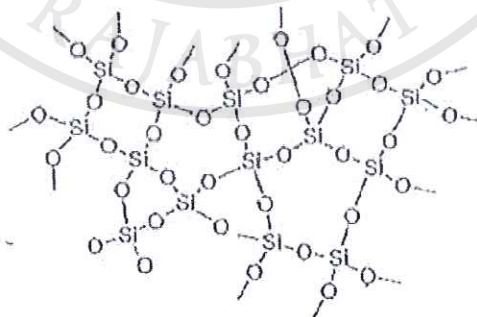
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)

ซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ดังแสดงในภาพที่ 23 เป็นธาตุที่มีอยู่มากถึง 60% ของเปลือกโลก โดยทั่วไปซิลิกาที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมีอยู่ 2 ประเภท (นิตยา ทวดอาจ, 2550)

ประเภทแรกที่เราพบเห็นจะมีสภาพ ออสถฐาน (Amorphous) และผลึก (Crystalline) ประเภทที่สองคือ ซิลิกาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตเช่น ซิลิกาที่อยู่ใน โครงสร้างของตัวไดอะตอม และซิลิกาที่มีอยู่ใน โครงสร้างของพืช

ถึงแม้ว่าซิลิกาทั้ง 2 ประเภทนี้จะมีสูตรทางเคมีเหมือนกันดังแสดงในภาพที่ 2.28 แต่ก็มีสมบัติหลายประการที่แตกต่างกันออกไป เพราะว่ามี โครงสร้างและพื้นที่ผิวจำเพาะแตกต่างกัน ทำให้มีสมบัติต่างๆ เช่น ความหนาแน่น ความแข็ง และความว่องไวต่อปฏิกิริยาไม่เหมือนกัน เนื่องจากซิลิกาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตมีขนาดเล็กกว่าซิลิกาในรูปผลึก (นิตยา ทวดอาจ, 2550)



ภาพที่ 2.28 แสดงลักษณะโครงสร้างซิลิกา

ที่มา : นิตยา ทวดอาจ, 2550

อสัณฐานซิลิกาโดยทั่วไปนั้นยังแบ่งออกได้เป็นชนิดใหญ่ๆ 2 ชนิด คือ

1. ชนิดซึ่งสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงในรูปของก๊าซ เช่น Pyrogenic หรือ Fumed เช่น การเผาสารประกอบซิลิคอนไดออกไซด์ ในเตาแบบขดลวดให้ความร้อนให้เป็นไอและควบแน่นในก๊าซเฉื่อยที่แห้ง การออกซิไดซ์สาร ซิลิคอนมอนอกไซด์ และควบแน่น การออกซิไดส์สารประกอบซิลิคอน เช่น SiH_4 , SiCl_4 หรือ H_2SiCl_2 ด้วยก๊าซออกซิเจนแห้ง

2. ชนิดซึ่งสังเคราะห์จากสารละลายประกอบด้วยโมโนเมอร์ $\text{Si}(\text{OH})_4$ กลายเป็นซิลิกา Surface hydroxylated amorphous ทั้งนี้จะเกิดปฏิกิริยาได้ SiO_2 ในรูปต่างๆ (Sols gels sinv precipitated) ขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลาย อุณหภูมิ และ pH

ซิลิกาที่เป็นอสัณฐานตามธรรมชาติมีมากมายที่รู้จักเช่น

2.1 ซิลิกาที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (Hydrated silica) ซึ่งคือพลอย (Opal)

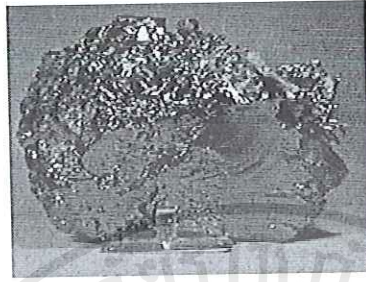
2.2 ซิลิกาที่ไม่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (Unhydrated) คือ หิน เหล็กไฟ (Flint)

2.3 กึ่งมีค่า (Semiprecious) คือหินจำพวก โมรา (Onyx) และหิน โมรา (Agate)

ผลึกของซิลิกามีหลายลักษณะทั้งที่มีสี และไม่มีสี สามารถแบ่งเป็นเฟสต่างๆกว่า 20 ชนิด โดยลักษณะเฟสแตกต่างกันไป ซิลิกาที่อยู่ในรูปผลึกส่วนใหญ่ได้แก่ ควอตซ์ (Quartz) ผลึกไม่มีสีซึ่งรู้จักกันในชื่อ rhinostones และ Glen falls diamonds เขี้ยวหनुมาน (Amethyst) มีสีม่วงหรือวาเลนเดอร์ โรสควอตซ์ (Rose quartz) สีชมพู และซิทริน (Citrine) สีเหลือง ซึ่งสีที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากองค์ประกอบของโลหะที่มีปริมาณต่างๆกัน ของเหลวที่ผลิตแก้วซิลิกา (Silica glass) ซึ่งถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วคือ แก้วควอตซ์ (Quartz glass) มีคุณสมบัติการปรับตัวให้มีลักษณะคล้ายแก้ว การขยายตัวต่ำมากและเป็น Isotopic silica glass ถูกพบใช้มากเพราะทน Thermal shock และมีความต้านทานไฟฟ้า (Electrical conductivity) ต่ำ ซึ่งมักถูกใช้ที่อุณหภูมิช่วงต่ำกว่า $1,000^\circ\text{C}$ และที่ $1,250^\circ\text{C}$ จะเป็นผลึกอย่างรวดเร็ว ซิลิกาที่พบเห็นในธรรมชาติและถูกใช้ประโยชน์ทั่วไปคือ Siliceous หรือที่เรียกว่าทราย (นิตยา ทวคอาจ, 2550)

ความสนใจในการผลิตซิลิกา

ซิลิคอน (Si) มีน้ำหนักโมเลกุล 28.08 และจุดเดือด $2,355^\circ\text{C}$ จุดหลอมเหลว $1,410^\circ\text{C}$ ซิลิกาถูกค้นพบครั้งแรกในปี 1800 โดย Davy ซึ่งพบอยู่ในรูปสารประกอบไม่ใช่ธาตุอิสระ ต่อมาในปี 1811 Gay Lussac และ Thenard สามารถเตรียมอสัณฐานซิลิคอนโดยการให้ความร้อนโพแทสเซียมกับซิลิคอนเตตระฟลูออไรด์ ปี 1824 Berzelius เตรียมอสัณฐานซิลิคอนสำเร็จโดยวิธีเดียวกันแต่ถูกทำให้บริสุทธิ์โดยล้างซึ่งได้ฟลูออซิลิเกต ปี 1824 Devill เตรียมผลึกซิลิคอนได้เป็นครั้งแรก (นิตยา ทวคอาจ, 2550)



ภาพที่ 2.29 ผลึกซิลิกอน

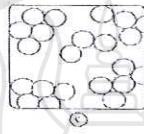
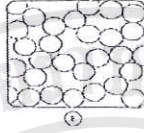
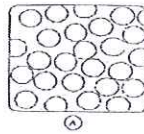
ที่มา : <http://www.isan.clubs.chula.ac.th>

กระบวนการ Czochralski ใช้เตรียมผลึกซิลิกอนในสถานะของแข็งหรือสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า Heperpure silicon สามารถถูกเตรียมโดยการแยกองค์ประกอบด้วยความร้อนของ Ultra -pure trichlorosilane ในบรรยากาศไฮโดรเจนและโดยกระบวนการ Vacuum float zone ผลิตภัณฑ์นี้สามารถถูกกระตุ้นด้วยโบรอนแกเลียม (Gallium) และเครื่องกลับไฟฟ้า (Rectifiers) ซึ่งถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับอิเล็กทรอนิกส์ และ Space - Age Hydrogenated amorphous silicon ถูกใช้ในการผลิตเซลล์เพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ซิลิกอนเป็นธาตุค่อนข้างเฉื่อยแต่มีถูกดัดแปลงโดยฮาโลเจน เบสเจือจาง และกรดส่วนใหญ่ ยกเว้นไฮโดรฟลูอริกไม่มีผลต่อซิลิกอน (นิตยา ทวดอาจ, 2550)

ธาตุซิลิกอนยอมให้ความยาวคลื่นอินฟราเรดผ่านมากกว่า 95% ซิลิกอนเป็นธาตุหนึ่งที่ถูกนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงและสำหรับงานอุณหภูมิสูง (นิตยา ทวดอาจ, 2550)

นอกจากนี้ยังมีสารประกอบซิลิกาในรูปแบบต่างๆดังนี้

1. Anhydrous crystalline (SiO_2)
2. Hydrated crystalline ($\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
3. Hydrated amorphous ซิลิกาที่มีรูพรุนละเอียดและเล็กมากในรูปแบบ Microporous anisotropic
4. Anhydrous และ hydrous amorphous ซิลิกาในรูปแบบ microporous isotropic เช่น Sols gels และผงละเอียด ดังภาพที่ 2.30
5. Massive dense amorphous glass



ภาพที่ 2.30 ลักษณะอนุภาคของซอลิกานิตเกล และชนิดที่บีบ (precipitate)
(A) sol (B) gel (C) การรวมกลุ่มและตกตะกอน

ที่มา : นิตยา ทวคอาจ, 2550

คุณภาพน้ำและกระบวนการดูดซับ

คุณภาพน้ำ หมายถึง ความเหมาะสมของน้ำเพื่อใช้ในการกิจกรรมเฉพาะของมนุษย์คุณภาพของน้ำตามแหล่งน้ำธรรมชาติ จะเปลี่ยนแปลงไป มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยของสภาพแวดล้อมเป็นสำคัญ ได้แก่ สภาพภูมิประเทศ ภูมิอากาศ ลักษณะของธรณีวิทยา พืชพรรณธรรมชาติ รวมถึงกิจกรรมของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ (กรมควบคุมมลพิษ, 2553)

คุณภาพน้ำ น้ำจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสารต่างๆ ที่ละลายปะปนอยู่ในน้ำ การที่มีสารต่าง ๆ ละลายปะปนอยู่ในน้ำ คุณสมบัติของน้ำมีรายละเอียดดังนี้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2553)

คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำ คือ ลักษณะทางภายนอกที่แตกต่างกัน เช่นความใส ความขุ่น กลิ่น สี เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2553)

อุณหภูมิ (temperature) อุณหภูมิของน้ำมีผลในด้านการเร่งปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งจะส่งผลต่อการลดปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ

สี (color) สีของน้ำเกิดจากการสะท้อนแสงของสารแขวนลอยในน้ำ เช่น น้ำตามธรรมชาติจะมีสีเหลืองซึ่งเกิดจากกรดอินทรีย์ น้ำในแหล่งน้ำที่มีใบไม้ทับถมจะมีสีน้ำตาล หรือถ้ามีตะไคร่น้ำก็จะมีสีเขียว

กลิ่นและรส กลิ่นและรสของน้ำจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ เช่น ชากพืช ชากสัตว์ที่เน่าเปื่อยหรือสารในกลุ่มของฟีนอล กลีโอสไคเดียม คลอไรด์ซึ่งจะทำให้ น้ำมีรสกร่อยหรือเค็ม

ความขุ่น (turbidity) เกิดจากสารแขวนลอยในน้ำ เช่น ดิน ชากพืช ชากสัตว์

การนำไฟฟ้า (electrical conductivity) บอถึงความสามารถของน้ำที่กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่าน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนโดยรวมในน้ำ และอุณหภูมิขณะทำการวัดค่าการนำไฟฟ้า

แข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด (Total dissolved solid ; TDS) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำเป็นเครื่องชี้ถึงความอุดมสมบูรณ์ของน้ำของแข็งที่ละลายน้ำคือส่วนที่เหลืออยู่หลังการระเหยน้ำที่ได้ผ่านการกรองโดยMillipore filter ปริมาณ TDS ยังขึ้นกับค่าความนำไฟฟ้า ค่านี้จะบอถึงความสามารถที่น้ำตัวอย่างจะนำไฟฟ้าได้มากหรือน้อยขึ้นกับความเข้มข้นของสารที่แตกตัวเป็นประจุไฟฟ้า(Ionized)ในน้ำ พวกอนินทรีย์สารที่ละลายอยู่ในน้ำมักจะแตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุไฟฟ้าทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้น การวัดการนำไฟฟ้าถือว่าเป็นวิธีการประมาณค่าสารต่างๆที่ละลายอยู่ในน้ำได้ใกล้เคียงความจริงมาก

ของแข็งทั้งหมดในน้ำ (Total Solids) ของแข็งทั้งหมดในน้ำ หมายถึง ของแข็งที่เป็นสารแขวนลอย Suspended solids ตะกอนและสารที่ละลายน้ำได้ส่วนใหญ่ เป็นเกลืออนินทรีย์ มีอินทรีย์สารและกากน้อย สารที่เหลืออยู่เป็นตะกอนภายหลังจากที่ผ่านการระเหย แหล่งน้ำตามธรรมชาติจะมีค่าของแข็งทั้งหมดในน้ำระหว่าง 0-500 มิลลิกรัมต่อลิตร มาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลกว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำระดับสูงสุดที่ควรมีได้ 500 มิลลิกรัมต่อลิตรระดับสูงสุดที่ยอมมีได้ 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร

สมบัติทางด้านเคมีของน้ำ คือ ลักษณะทางเคมีของน้ำ เช่น ความเป็นกรด - เบส ความกระด้างปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2553)

1. pH แสดงความเป็นกรดหรือเบสของน้ำ (น้ำดื่มควรมีค่า pH ระหว่าง 6.8-7.3) โดยทั่วไปน้ำที่ปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมมักจะมีค่า pH ที่ต่ำ ($\text{PH} < 7$) ซึ่งหมายถึงมีความเป็นกรดสูงมีฤทธิ์กัดกร่อน การวัดค่า pH ทำได้ง่าย โดยการใช้กระดาษลิตมัสในการวัดค่าความเป็นกรด - เบส ซึ่งให้สีตามความเข้มข้นของ $[\text{H}^+]$ หรือการวัดโดยใช้ pH meter เมื่อต้องการให้มีความละเอียดมากขึ้น สภาพเบส (alkalinity) คือสภาพที่น้ำมีสภาพความเป็นเบสสูงจะประกอบด้วยไอออนของ OH^- , CO_3^{2-} , H_2CO_3 ของธาตุแคลเซียม โซเดียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม หรือแอมโมเนีย ซึ่งสภาพเบสนี้จะช่วยทำหน้าที่คล้ายบัฟเฟอร์ด้านการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำทั้ง

สภาพกรด (acidity) โดยทั่วไปน้ำที่มาจากแหล่งชุมชนจะมีบัฟเฟอร์ในสภาพเบสจึงไม่ทำให้น้ำมีค่า pH ที่ต่ำเกินไป แต่น้ำที่จากโรงงานอุตสาหกรรมมักจะมีค่า pH ต่ำกว่า 4.5 ซึ่งมาจาก CO_2 ที่ละลายน้ำ

2. ความกระด้าง (hardness) เป็นการไม่เกิดฟองกับสบู่และเมื่อต้มน้ำ กระด้างนี้จะเกิดตะกอน น้ำกระด้างชั่วคราว เกิดจากสารไบคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) รวมตัวกับ ไอออนของโลหะเช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} ซึ่งสามารถแก้ได้โดยการต้ม นอกจากนี้แล้วยังมีความกระด้างถาวรซึ่งเกิดจากไอออนของโลหะและสารที่ไม่ใช่พวกคาร์บอเนต เช่น SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- รวมตัวกับ Ca^{2+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} เป็นต้น ความกระด้างจึงเป็นข้อเสียในด้านการสิ้นเปลืองทรัพยากรก็ต้องใช้ปริมาณสบู่หรือผงซักฟอกในการซักผ้าในปริมาณมากซึ่งก็จะเกิดตะกอนมากเช่นกัน

3. ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (dissolved oxygen, DO) แบคทีเรีย ที่เป็นสารอินทรีย์ในน้ำต้องการออกซิเจน (aerobic bacteria) ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ความต้องการออกซิเจนของแบคทีเรียนี้จะทำให้จะทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลงดังนั้นในน้ำที่สะอาดจะมีค่า DO สูง และน้ำเสียจะมีค่า DO ต่ำ มาตรฐานของน้ำที่มีคุณภาพดีโดยทั่วไปจะมีค่า DO ประมาณ 5-8 ppm หรือปริมาณ O_2 ละลายอยู่ประมาณ 5-8 มิลลิกรัม / ลิตร หรือ 5-8 ppm น้ำเสียจะมีค่า DO ต่ำกว่า 3 ppm ค่า DO มีความสำคัญในการบ่งบอกว่าแหล่งน้ำนั้นมีปริมาณออกซิเจนเพียงพอต่อความต้องการของสิ่งมีชีวิตหรือไม่

4. บีโอดี (biological oxygen demand) เป็นปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ น้ำที่มีคุณภาพดี ควรมีค่าบีโอดี ไม่เกิน 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้าค่าบีโอดีสูงมากแสดงว่าน้ำนั้นเน่ามาก แหล่งน้ำที่มีค่าบีโอดีสูงกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตรจะจัดเป็นน้ำเน่าหรือน้ำเสีย พระราชบัญญัติน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดไว้ว่า น้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ต้องมีค่าบีโอดีไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร การหาค่า บีโอดี หาได้โดยใช้แบคทีเรียย่อยสลายอินทรีย์สารซึ่งจะเป็นไปช้า ๆ ดังนั้นจึงต้องใช้เวลาหลายสัปดาห์ ตามหลักสากลใช้เวลา 5 วัน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสโดยนำตัวอย่างน้ำที่ต้องการหาบีโอดีมา 2 ขวด ขวดหนึ่งนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าออกซิเจนทันที สมมุติว่ามีออกซิเจนอยู่ 6.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนน้ำอีกขวดหนึ่งปิดจุกให้แน่น เพื่อไม่ให้อากาศเข้า นำไปเก็บไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิ 20 °C นาน 5 วัน แล้วนำมาวิเคราะห์หาปริมาณออกซิเจน สมมุติได้ 0.47 mg / l ดังนั้นจะได้ค่าซึ่งเป็นปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ไป หรือ ค่าบีโอดี = $6.5 - 0.47 = 5.03 \text{ mg / l}$

5. COD (Chemical Oxygen Demand) คือ ปริมาณ O_2 ที่ใช้ในการออกซิไดซ์ในการสลายสารอินทรีย์ด้วยสารเคมีโดยใช้สารละลาย เช่น โพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) ในปริมาณมากเกินพอ ในสารละลายกรดซัลฟิวริกซึ่งสารอินทรีย์ในน้ำทั้งหมดทั้งที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้และย่อยสลายไม่ได้ก็จะถูกออกซิไดซ์ภายใต้ภาวะที่เป็นกรดและการให้ความร้อน โดยทั่วไปค่า COD

จะมีค่ามากกว่า BOD เสมอ ดังนั้นค่า COD จึงเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งที่แสดงถึงความสกปรกของน้ำเสีย

6. ทีโอซี (Total Organic Carbon: TOC) คือ ปริมาณคาร์บอนในน้ำ

7. ไนโตรเจน เป็นธาตุสำคัญสำหรับพืช ซึ่งจะอยู่ในรูปของ แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนไตรท์ ไนเตรต ยิ่งถ้าในน้ำมีปริมาณไนโตรเจนสูง จะทำให้พืชน้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว

8. ฟอสฟอรัส ในน้ำจะอยู่ในรูปของสารประกอบพวก ออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate) เช่นสาร PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- และ H_3PO_4 นอกจากนี้ยังมีสารพวกโพลีฟอสเฟต

9. ซัลเฟอร์ มีอยู่ในธรรมชาติและเป็นองค์ประกอบภายในของสิ่งมีชีวิตสารประกอบซัลเฟอร์ใน น้ำจะอยู่ในรูปของ organic sulfur เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ สารซัลเฟต เป็นต้น ซึ่งสารพวกนี้ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นเน่า เช่น ที่เรียกว่าก๊าซไข่เน่า และนอกจากนี้ยังมีฤทธิ์กัดกร่อนในสิ่งแวดล้อมได้

10. โลหะหนัก มีทั้งที่เป็นพิษและไม่เป็นพิษ แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับ ถ้ามากเกินไปจะเป็นพิษ ได้แก่ โครเมียม ทองแดง เหล็ก แมงกานีสและสังกะสี บางชนิดไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ได้แก่ แคดเมียม ตะกั่วปรอทและนิกเกิล

มาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำ

ตามมาตรา 32 แห่งพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 บัญญัติให้คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ กำหนดมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อมเพื่อเป็นเป้าหมายในการรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ซึ่งมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม นี้จะต้องอาศัยหลักวิชาการและหลักการทางวิทยาศาสตร์เป็นพื้นฐานโดยจะต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ในเชิง เศรษฐกิจ สังคม และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง มาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำเป็นมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อมชนิดหนึ่ง มีวัตถุประสงค์ เพื่อควบคุมและรักษาคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำให้เหมาะสมกับการใช้ประโยชน์ และมีความปลอดภัยต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนและเพื่ออนุรักษ์ทรัพยากร และสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติ (กรมควบคุมมลพิษ, 2553)

หลักการสำคัญในการกำหนดมาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำ ได้แก่ การกำหนดค่ามาตรฐานเพื่อรักษาคุณภาพน้ำให้เหมาะสมกับการใช้ประโยชน์การจัด แบ่งลักษณะการใช้ประโยชน์ของแหล่งน้ำ และการกำหนดหลักเกณฑ์และวิธีการตรวจสอบคุณภาพน้ำ หลักเกณฑ์ในการพิจารณา กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำ

ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำที่ได้จัดทำขึ้น มีหลักเกณฑ์ที่สำคัญดังนี้

1.1 ความเหมาะสมต่อการนำมาใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่อประเภทในกรณี
ที่แหล่งน้ำนั้นมีการใช้ประโยชน์หลายด้าน (Multi Purposes) โดยคำนึงถึงการใช้ประโยชน์หลัก
เป็นสำคัญ ทั้งนี้ ระดับมาตรฐานจะไม่ขัดแย้งต่อการใช้ประโยชน์หลายด้านพร้อมกัน

1.2 สถานการณ์คุณภาพน้ำในแหล่งน้ำหลักของประเทศและแนวโน้มของคุณภาพ
น้ำที่อาจมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการพัฒนาด้านต่าง ๆ ในอนาคต

1.3 คำนึงถึงสุขภาพและความปลอดภัยของชีวิตมนุษย์และสัตว์น้ำส่วนใหญ่

1.4 ความรู้สึกพึงพอใจในการยอมรับระดับคุณภาพน้ำในเขตต่าง ๆ ของประชาชน
ในพื้นที่ลุ่มน้ำหลักและของประชาชนส่วนใหญ่

ตารางที่ 2.3 แสดงดัชนีคุณภาพน้ำที่ใช้ในการศึกษาคุณภาพน้ำผิวดิน

ด้านกายภาพ	ด้านเคมี	ด้านชีวภาพ
1. อุณหภูมิ (Temperature)	1. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	1. แพลงก์ตอนพืช (Phytoplankton)
2. สี (Color)	2. ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)	2. แพลงก์ตอนสัตว์ (Zooplankton)
3. ความขุ่นของน้ำ (Turbidity)	3. ความเค็ม (Salinity)	3. สัตว์หน้าดิน (Benthos)
4. ความโปร่งแสงของน้ำ (Transparency)	4. ออกซิเจนที่ละลายน้ำ (Dissolved Oxygen, DO)	4. โคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Coliform bacteria)
5. ของแข็งทั้งหมด (Total Solids)	5. ค่าความสกปรกของน้ำ (Biochemical oxygen demand, BOD)	5. ฟีคัล โคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Fecal Coliform bacteria)
6. ของแข็งแขวนลอย (Total Suspended Solid)	6. ความเป็นด่างของน้ำ (Alkalinity)	6. คลอโรฟิลล์ เอ (Chlorophyll a)
7. ของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolved Solids)	7. ความกระด้าง (Hardness);	
	8. แมงกานีส (Manganese)	
	9. เหล็ก (Iron)	
	10. แอมโมเนีย (Ammonia, NH ₃)	
	11. ฟอสเฟต (Phosphate, PO ₄ ³⁻)	

ที่มา : <http://tsunami.deqp.go.th/WaterQ.asp> (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม)

มหาวิทยาลัยมหิดล

ตารางที่ 2.4 แสดงมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน

พารามิเตอร์	มาตรฐาน
1.ความเป็นกรดและด่าง (pH)	5.5 -9.0
2. บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) *	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ของแข็งแขวนลอย(Suspended Solids) **	ไม่เกิน 30 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
5. ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus)	ไม่เกิน 2 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร
6. ไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen)	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

ที่มา : ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน ลงวันที่ 7 เมษายน 2553 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่มที่ 127 ตอนพิเศษ 69ง วันที่ 2 มิถุนายน 2553

การปรับปรุงคุณภาพด้วยการดูดซับ (Adsorption)

การปรับปรุงคุณภาพของน้ำ เพื่อให้มีน้ำมีคุณภาพเหมาะสมแก่การดื่มและใช้ เพราะน้ำบางแหล่งมีคุณสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ และแบคทีเรียเกินกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้เหมาะต่อการใช้ดื่มบริโภค จึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุง (Treatment) ซึ่งกรรมวิธีในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้มีหลายวิธี แต่ละวิธีก็มีความเหมาะสม และจำเป็นของแต่ละแหล่งน้ำไป (Faust and Aly, 1987) เช่น กระบวนการต่อไปนี้

กระบวนการดูดซับ หรือกระบวนการดูดติดที่ผิว หมายถึง กระบวนการแยกมวลสาร ซึ่งอาจอยู่ในรูปของโมเลกุลหรือคอลลอยด์ (ทั้งในสถานะของของเหลว และก๊าซ) ที่มีอยู่ในสารละลายหรือก๊าซ ให้เกาะอยู่บนผิวของของแข็ง ซึ่งจัดอยู่ในกระบวนการบำบัดทางกายภาพ-เคมี เพื่อให้สารละลายหรือก๊าซดังกล่าวมีความสะอาดมากขึ้นด้วยกลไกของกระบวนการดังกล่าว กลไกการดูดซับ (Faust and Aly, 1987)

1. กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1.1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายละลายเข้าสู่สารดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มอยู่ โดยโมเลกุลแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าสู่ผิวหน้าสารดูดซับ

1.2 การแพร่ภายใน (Internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างของสารดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ

1.3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกดูดซับที่ผิวของสารดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่เร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่

2. ลักษณะการดูดซับ (Eckenfelder, 1981)

ลักษณะการดูดซับ แบ่งออกได้ 2 แบบ คือ

2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ การจัดเรียงตัวของโมเลกุล (Orientation) การกระจายตัว (Dispersion) และการเหนี่ยวนำ (Induction) สำหรับโมเลกุลที่มีขั้วนั้นแรงดึงดูดจะเกิดจากการเรียงตัวของโมเลกุลซึ่งเป็นแรงดึงดูดที่เกิดจากโมเลกุลที่มีขั้ว 2 โมเลกุล คือ ขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งดึงดูดขั้วบวกของอีกโมเลกุลหนึ่ง ส่วนโมเลกุลที่ไม่มีขั้วการดูดซับจะเกิดขึ้นแบบกระจายตัวทำให้พลังงานของระบบลดลงระบบจึงมีความเสถียรขึ้นทำให้โมเลกุลเข้ามาเกาะติดได้

2.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างสารดูดซับและสารดูดซับเกิดเป็นสารประกอบทางเคมี ซึ่งแตกต่างจากการดูดซับแบบกายภาพกระบวนการนี้จะมีการถ่ายเทมวลสารส่งผลให้เกิดการดูดซับด้วยพันธะทางเคมีกับส่วน Active ของตัวดูดซับ ปกติแล้วการดูดซับทางเคมีนี้จะมีพลังมากกว่าแรงดึงดูดของการดูดซับทางกายภาพ

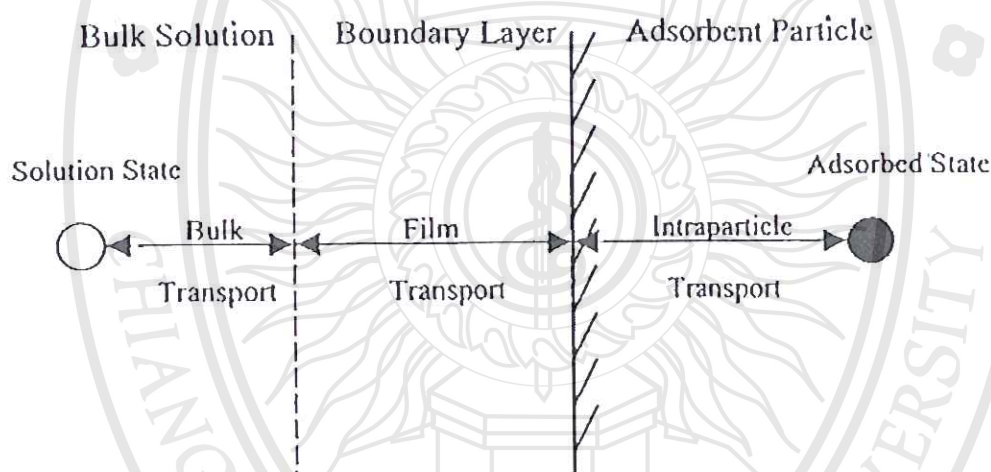
2.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecular Transfer) (Eckenfelder, 1981) อัตราการดูดซับมีความสำคัญ เนื่องจากอัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น โดยทั่วไปอัตราการดูดซับถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล กลไกการดูดซับมี 3 ขั้นตอน คือ

2.3.1 การเคลื่อนที่ของโมเลกุล (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุดโมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับ

2.2.2 การเคลื่อนที่ในชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แพรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

2.2.3 การเคลื่อนที่ภายในอนุภาค (Intraparticle transport) เป็นการแพร่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับภายใน จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

การเคลื่อนที่ของชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ แต่ถ้าหากระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดซับมายังสารดูดซับ แสดงดังภาพที่ 2.24



ภาพที่ 2.31 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์
ที่มา : Eckenfelder, 1981

3. ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ (มันสิน, 2538)

3.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ ความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ คือ สารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะดูดซับโมเลกุลได้มากกว่า สารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย ส่วนอัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ ถ้าสารดูดซับขนาดเล็กจะมีอัตราการดูดซับมากกว่าสารดูดซับขนาดใหญ่

3.2 ลักษณะของสารถูกดูดซับ เมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายลดลง จะเกิดการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย

แล้วไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยจะถูกดูดซับได้ดี นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของสารถูกดูดซับยังมีผลต่ออัตราการดูดซับอีกด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดซับ ขนาดของโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะแปร ผกผันกับอัตราการดูดซับ ดังนั้นการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อมีสารมีขนาดเล็กกว่าโพรงเล็กน้อยหรือเข้ากับโพรงได้พอดี โดยโมเลกุลขนาดเล็กจะเข้าไปในโพรงก่อนโมเลกุลขนาดใหญ่

3.3 ความดันป่วน อัตราเร็วในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion) และการแพร่เข้าสู่รูพรุน (Pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความดันป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความดันป่วนต่ำจะทำให้มีน้ำซึมฟิล์มหนามากขึ้น โมเลกุลจะเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้ช้า ดังนั้นการแพร่ผ่านฟิล์มจึงเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับของปฏิกิริยา ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความดันป่วนสูงจะทำให้มีน้ำมีฟิล์มบางลง โมเลกุลของสารถูกดูดซับเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าสู่สารดูดซับได้เร็วกว่าการแพร่เข้าสู่รูพรุน ดังนั้นอัตราเร็วการดูดซับของสารดูดซับจึงขึ้นอยู่กับการแพร่เข้าสู่รูพรุน

3.4 ค่าพีเอช ทำให้เกิดการแตกตัวของไอออนและการละลายน้ำของสาร ค่าพีเอชจึงมีอิทธิพลต่อการดูดซับ ซึ่งไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดซับได้ดี และค่าพีเอชของสารละลายยังมีผลกระทบต่ออัตราการดูดซับของไอออนอื่นๆ ด้วย

3.5 เวลาสัมผัส เป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับและอายุการใช้งานของถังดูดซับ ในการบำบัดน้ำเสียระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดีที่สุด ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับและสารถูกดูดซับด้วย

3.6 อุณหภูมิการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน โดยอุณหภูมิมีผลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราเร็วการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการละลายสูงขึ้นด้วย การดูดซับจึงน้อยลง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Corami และคณะ(2007)กล่าวว่า (Hydroxyapatite, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ชนิดหนึ่งที่สามารถกำจัดโลหะหนัก+2 ได้อย่างมีประสิทธิภาพและไฮดรอกซีอะพาไทต์สังเคราะห์ถูกนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก เช่น Pb, Zn, Cu, Cd, Sd จากน้ำ

Takeuchi Boisson และคณะ, 1999 ; Caol และ คณะ, 2003 กล่าวว่าสารที่ใช้ในการปรับปรุงเสถียรภาพทางเคมีเพื่อตรึงโลหะที่นิยมประยุกต์ใช้กันคือ แร่อะพาไทต์ [Apatite mineral, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$] เกิดอยู่ในหินหลายชนิด แต่ในลักษณะเป็นแร่ประกอบเท่านั้นและมีปริมาณน้อย

มากที่สำคัญ โดยที่เป็นแหล่งที่มาของธาตุฟอสฟอรัสปกติแล้วดิน มักจะขาดแร่ประเภทนี้ แร่อะพาไทต์ธรรมชาติจะมีสีเขียวแก่และมีความแข็งแรงมาตรฐานเท่ากับ 5 เมื่อเกิดเป็นแหล่งแร่จะเป็นซากหินฟอสเฟต (phosphate rock) ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับใช้ทำปุ๋ย (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544)

Caol และคณะ, 2003 ได้สรุปว่ากลไกการตรึงโลหะโดยใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ มีดังต่อไปนี้ คือ การแลกเปลี่ยนไอออนที่ผิวของไฮดรอกซีอะพาไทต์ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิว (Surface complexation) การตกตะกอนโลหะฟอสเฟต (Precipitation of some amorphous to poorly crystalline, Mixed – metal phosphate) การแทนที่ แคลเซียมในไฮดรอกซีอะพาไทต์ ด้วยโลหะหนักอื่นๆ ระหว่างการตกผลึกใหม่ ในการตกตะกอนร่วม (Substitution for Calcium hydroxyapatite by other metals during recrystallization (Co-precipitation)

เกศินี สกุดวงศ์ (2550) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของไฮดรอกซีอะพาไทต์ในการตรึงโลหะหนัก (ทองแดง สังกะสี และนิกเกิล) ในดินที่ปรับปรุงด้วยกากตะกอนน้ำเสียชุมชนสำหรับใช้ประโยชน์ทางเกษตรผลจากการวิจัยพบว่า ลักษณะเนื้อดินมีผลในการตรึงทองแดง สังกะสี และนิกเกิลในดินที่ปรับปรุงด้วยกากตะกอนโดยดินร่วนเหนียวปนทรายแข็ง ให้ผลดีกว่าดินร่วนปนทรายและเมื่อเติมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ 15 % และ 30% ของกากตะกอนลงในดินร่วนเหนียวปนทรายแข็งผสมกากตะกอนจะให้ประสิทธิภาพในการตรึงทองแดง 43.90 และ 48.75 % สังกะสี 57.78 และ 62.22% และนิกเกิล 38.82 และ 52.94 % ตามลำดับและเมื่อเติมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ 15% , 30% ของกากตะกอนในดินร่วนปนทรายผสมกากตะกอนจะให้ประสิทธิภาพในการตรึงทองแดง 31.31 และ 67.77% สังกะสี 23.08 และ 62.64% และนิกเกิล 59.60 และ 84.18 % ตามลำดับเมื่อใช้น้ำที่ pH 7 และใช้น้ำที่ pH 4.5 ให้ผลไม่แตกต่างจากการใช้น้ำ pH 7 มากนัก

Zupancic และคณะ (2006) ได้นำกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนมาทำการทดลองเพื่อที่จะสามารถนำกากตะกอนน้ำเสียชุมชนมาใช้ประโยชน์ได้ทางการเกษตร โดยได้นำการศึกษาในดินแต่ละชนิด ได้แก่ ดินเหนียว ดินทราย และดินพีท และในกากตะกอนน้ำเสียชุมชนมีโลหะหนัก ได้แก่ Zn และ Ni จึงได้ศึกษาประสิทธิภาพการตรึงโลหะหนักด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์ในดินที่ปรับปรุงด้วยกากตะกอนน้ำเสียชุมชน พบว่าประสิทธิภาพของการตรึงโลหะหนักนั้นแตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของดินแต่ละชนิด

Ruksudjarit และคณะ (2008) ได้ทำการสังเคราะห์ผงนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยการบดแบบล้น พบว่าเมื่อใช้เวลาในการบด 2-8 ชั่วโมงจะได้ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีอนุภาคเป็นผลึก รูปเข็มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 100 nm

Jang และคณะ (2008) ทำการสังเคราะห์ไฮโดรเจลที่เป็นวัสดุผสมระหว่าง HA กับโพลีอะไคลาไมด์ด้วยสัดส่วนการเติม HA ในปริมาณต่างๆ กัน เพื่อนำไปกำจัด Pb^{2+} ออกจาก

สารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย โดยควบคุมความเข้มข้นเริ่มต้นของ Pb^{2+} และค่า pH 2-5 พบว่าความสามารถในการกำจัด Pb^{2+} เพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของ HA แต่มีอัตราเร็วในการกำจัดลดลง เพราะเมื่อ HA เพิ่มขึ้นแล้วจะทำให้การบวมตัวลดลง

Zhu และคณะ (2008) ทำการศึกษาการกำจัดไอออนของแคดเมียมออกจากสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย โดยใช้ HA สังเคราะห์ที่มีสัณฐานวิทยาต่างๆ กัน พบว่าตัวแปรต่างๆ เช่น เวลา ความเข้มข้นของไอออนโลหะเริ่มต้น ปริมาณของ HA ค่า pH ของสารละลายและพื้นที่ผิวของ HA มีผลอย่างมากต่อการดูดซับ

Simon และคณะ (2008) ทำการทดลองที่แสดงให้เห็นว่า HA สามารถกำจัดยูเรเนียมออกจากน้ำได้คืบได้

Raksujarit และคณะ (2009) ได้ทำการประดิษฐ์เซรามิกไฮดรอกซีอะพาไทต์แบบมี รูพรุนนาโน โดยการใช้ผง PVA เป็นสารที่ทำให้เกิดรูพรุน แล้วทำให้เป็นผงผสมนาโนโดยการบดแบบสั่นอัดขึ้นรูป เพาซินเตอร์ ที่อุณหภูมิ $1,200^{\circ}C$ ขึ้นงานตัวอย่างที่ได้มีความพรุน 64% และรูพรุนมีความต่อเนื่องในสามมิติด้วยขนาดของรูพรุนเฉลี่ยเล็กกว่า 100 nm