

## บทที่ 2 ทฤษฎี

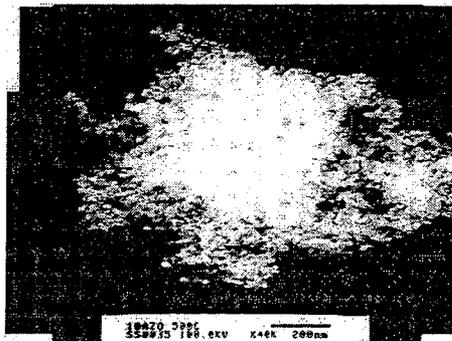
### 2.1 การจำแนกวัสดุนาโน

วัสดุและโครงสร้างนาโนจัดเป็นวัสดุและโครงสร้างที่มีระบบมิติต่ำ (low-dimensional system) เนื่องจากมิติทางกายภาพของวัสดุและโครงสร้างนาโนดังกล่าวมีมิติอย่างน้อยหนึ่งมิติที่ถูกจำกัดขนาดระหว่าง 1-100 นาโนเมตรเท่านั้น การจำกัดขนาดของวัสดุดังกล่าวส่งผลให้อิเล็กตรอนมีพฤติกรรมเคลื่อนที่ภายในวัสดุและโครงสร้างนาโนแตกต่างไปจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในวัสดุชนิดเดียวกันแต่มีขนาดใหญ่

วัสดุและโครงสร้างนาโนสามารถจำแนกได้ 3 ระบบ ตามมิติทางกายภาพ ได้แก่

#### 2.1.1 ระบบศูนย์มิติ (zero-dimensional (0D) system)

วัสดุและโครงสร้างนาโนที่ถูกจำแนกในระบบนี้ต้องมีมิติทางกายภาพทั้ง 3 มิติ ระหว่าง 1-100 นาโนเมตร ตัวอย่างเช่น อนุภาคของสังกะสีออกไซด์และไททานเนียมไดออกไซด์ที่มีรูปร่างอนุภาคเป็นทรงกลม เป็นต้น

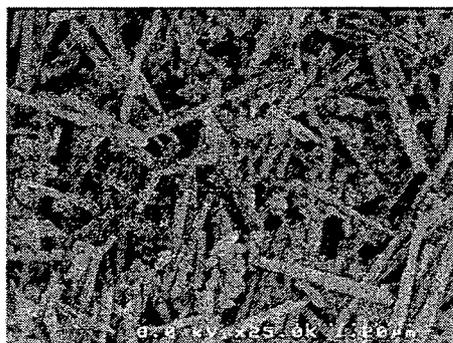


รูปที่ 2.1 สัณฐานของอนุภาคสังกะสีออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมชนิด 0 มิติ

#### 2.1.2 ระบบหนึ่งมิติ (one-dimensional (1D) system)

วัสดุและโครงสร้างที่ถูกจำแนกในระบบหนึ่งมิติเป็นวัสดุหรือโครงสร้างที่มีมิติทางกายภาพสองมิติที่มีขนาดระหว่าง 1-100 นาโนเมตร ส่วนอีกหนึ่งมิติมีขนาดใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร โดยมิติที่มีขนาดใหญ่อาจจะมีขนาดในระดับไมโครเมตรหรือมิลลิเมตร ตัวอย่างโครงสร้างที่มีสัณฐานแบบหนึ่งมิติ เช่น แท่งนาโน (nanorod) ลวดนาโน (nanowire) และท่อนาโน (nanotube) เป็นต้น โดยลวดนาโนและท่อนาโนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 1-100 นาโนเมตรและมีความยาวของลวดหรือท่อมากกว่า 100 นาโนเมตร วัสดุและโครงสร้างในระบบหนึ่งมิติมี

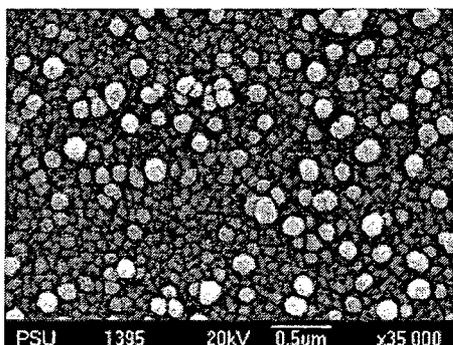
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (aspect ratio) อย่างชัดเจน การเกิดรูปร่างแบบใดนั้นสามารถทำนายได้อย่างคร่าว ๆ จากอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ถ้าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมาก วัสดุหรือ โครงสร้างที่เกิดขึ้นมีรูปร่างอนุภาคเป็นลวดนาโนหรือท่อนาโนมากกว่าที่จะเป็นแท่งนาโน



รูปที่ 2.2 แท่งนาโนของอนุภาคสังกะสีออกไซด์ ที่เจือด้วยอลูมิเนียม

### 2.1.3 ระบบสองมิติ (two-dimensional (2D) system)

วัสดุและ โครงสร้างที่ถูกจำแนกในระบบสองมิติเป็น โครงสร้างที่มีมิติทางกายภาพเพียงหนึ่งมิติเท่านั้นที่ถูกจำกัดขนาดระหว่าง 1-100 นาโนเมตร ส่วนอีกสองมิติที่เหลือมีขนาดใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร ตัวอย่างวัสดุที่ถูกจำแนกให้ระบบสองมิติ เช่น ฟิล์มบางนาโน เป็นต้น



รูปที่ 2.3 ฟิล์มบางนาโนสังกะสีออกไซด์ ที่เจือด้วยอลูมิเนียม

## 2.2 เทคโนโลยีการผลิตระดับนาโน

กระบวนการเตรียมหรือสังเคราะห์วัสดุนาโนหรืออนุภาคนาโนถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเตรียมอนุภาคหรือวัสดุต่าง ๆ ให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ การเตรียมวัสดุนาโนหรืออนุภาคนาโนสามารถจำแนกได้ 2 แนวทางหลักๆ ได้แก่ กระบวนการจากบนลงล่าง (top-down approach) และ กระบวนการจากล่างขึ้นบน (bottom-up approach)

### 2.2.1 กระบวนการจากบนลงล่าง

การเตรียมวัสดุนาโนหรืออนุภาคนาโนด้วยกระบวนการจากบนลงล่างเป็นกระบวนการทำให้วัสดุที่มีขนาดใหญ่แตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ หรือกลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร สำหรับวิธีการเตรียมอนุภาคนาโนที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ การบดธรรมดา (conventional ball mill) และการบดด้วยพลังงานสูง (high energy ball mill) เป็นต้น

### 2.2.2 กระบวนการจากล่างขึ้นบน

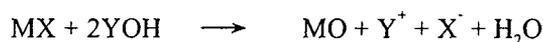
การเตรียมวัสดุนาโนหรืออนุภาคนาโนด้วยกระบวนการจากล่างขึ้นบนเป็นการทำให้วัสดุที่มีขนาดเล็กๆ ในระดับอะตอมหรือโมเลกุลรวมตัวกันกลายเป็นวัสดุหรืออนุภาคขนาดใหญ่ วิธีที่นิยมใช้เตรียมอนุภาคนาโน เช่น กระบวนการโซล-เจล (sol-gel) กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล (hydrothermal) และการตกตะกอน (precipitation) เป็นต้น

การเตรียมวัสดุหรืออนุภาคนาโนด้วยกระบวนการจากบนลงล่างและกระบวนการจากล่างขึ้นบนนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงในระดับนาโนเมตรและมีคุณภาพสูง โดยทั่วไปลักษณะของอนุภาคที่ต้องการมีลักษณะต่างๆ ดังนี้

- 1) อนุภาคต้องมีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร
- 2) อนุภาคต้องมีขนาดเท่ากันทั้งหมด (monosize) และมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ (monodisperse)
- 3) อนุภาคต้องมีรูปร่างและรูปทรงทางเรขาคณิตเหมือนกัน
- 4) อนุภาคมีองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างผลึกเหมือนกัน
- 5) อนุภาคต้องไม่รวมตัวกัน

### 2.3 กระบวนการตกตะกอน

การตกตะกอนเป็นวิธีทางเคมีสารละลายที่นิยมใช้สำหรับเตรียมตัวอย่างออกไซด์ของโลหะ เนื่องจากวิธีการตกตะกอนสามารถทำได้ง่าย กระบวนการไม่ซับซ้อน อุปกรณ์ที่ใช้ราคาไม่แพง และสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้ปริมาณมาก การเตรียมออกไซด์ของโลหะด้วยวิธีตกตะกอนอาศัยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเกลือของโลหะที่ต้องการกับไอออนไฮดรอกไซด์ดังนี้



เมื่อ M คือ โลหะที่ต้องการเตรียมเป็นออกไซด์ เช่น สังกะสี ไททานเนียม และ ดีบุก เป็นต้น X คือ ไอออนร่วม เช่น คลอไรด์ (Cl<sup>-</sup>), อะซิเตด (CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup>) และ ไนเตรด (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) เป็นต้น และ Y คือ โซเดียม (Na<sup>+</sup>), โพแทสเซียม (K<sup>+</sup>), แอมโมเนียม (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) และ ลิเทียม (Li<sup>+</sup>) เป็นต้น

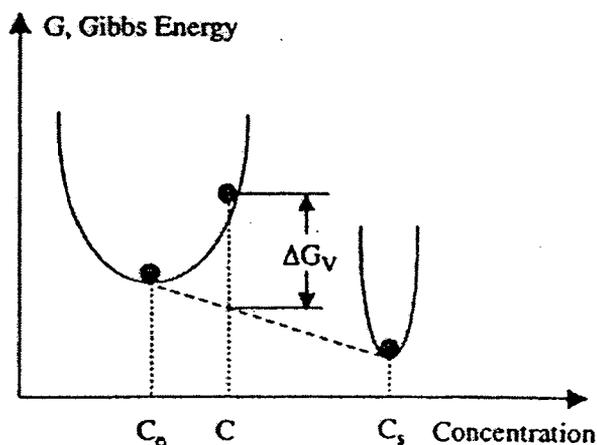
การตกตะกอนประกอบด้วยขั้นตอนหลักที่สำคัญ 2 ขั้นตอน ได้แก่ การเกิดนิวเคลียสและการโตของนิวเคลียส

### 2.3.1 การเกิดนิวเคลียส (nucleation)

#### 1) การเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ (homogeneous nucleation)

นิวเคลียสของสารตัวอย่างเกิดขึ้นหลังจากระบบหรือสารละลายเกิดสภาวะอิ่มตัววดยิ่งหรือสารละลายมีปริมาณตัวถูกละลายมากเกินไปจนเกิดการละลายที่อุณหภูมิและความดันปกติซึ่งสภาวะดังกล่าวทำให้พลังงานทั้งหมดของระบบสูงขึ้น การทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะอิ่มตัววดยิ่งสามารถทำได้โดยการเติมสารเคมีบางชนิดหรือตัวตกตะกอน

นิวเคลียสแบบเอกพันธ์เกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายในตัวทำละลายใดๆ มีค่าเกินความสามารถในการละลายที่สภาวะสมดุลหรือเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส (phase transformation) ซึ่งทำให้เฟสใหม่แยกตัวออกมาเพื่อลดพลังงานทั้งหมดของระบบให้ต่ำลง โดยการกลับเข้าสู่สภาวะสมดุลใหม่อีกครั้งดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การลดพลังงานอิสระของกิบส์ทั้งหมดของสารละลายอิ่มตัววดยิ่งโดยการเกิดเฟสของแข็งและรักษาความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลาย

การลดลงของพลังงานอิสระของกิบส์เป็นแรงผลักดัน (driving force) สำหรับการเกิดนิวเคลียสและการโตของนิวเคลียส ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของเฟสของแข็ง ( $\Delta G_v$ ) ขึ้นกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายในระบบดังนี้

$$\Delta G_v = -\frac{kT}{\Omega} \ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -\frac{kT}{\Omega} \ln(1 + \sigma) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $C$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย  $C_0$  คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล  $k$  คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann constant)  $T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์  $\Omega$  คือ ปริมาตรเชิงอะตอม (atomic volume)  $\sigma$  คือ ความอึดด้วยวดยิ่งซึ่งมีค่าเท่ากับ  $(C - C_0)/C_0$

ถ้าระบบไม่เกิดการอึดด้วยวดยิ่ง ( $\sigma = 0$ ) การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรหรือ  $\Delta G_v = 0$  ดังนั้นนิวเคลียสจะไม่เกิดขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายมีค่ามากกว่าความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลหรือ  $C > C_0$  แล้ว  $\Delta G_v < 0$  นิวเคลียสจะเกิดขึ้นได้เอง (spontaneous nucleation)

พิจารณาระบบซึ่งประกอบด้วยนิวเคลียสทรงกลมรัศมี  $r$  การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์หรือพลังงานอิสระเชิงปริมาตร (volume free energy,  $\Delta\mu_v$ ) จะเท่ากับ

$$\Delta\mu_v = -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v \quad (2.2)$$

อย่างไรก็ตามเมื่อมีเฟสใหม่เกิดขึ้นในระบบจะทำให้พลังงานที่ผิว (surface energy,  $\Delta\mu_s$ ) เพิ่มขึ้นด้วยและพลังงานที่ผิวที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ

$$\Delta\mu_s = 4\pi r^2 \gamma \quad (2.3)$$

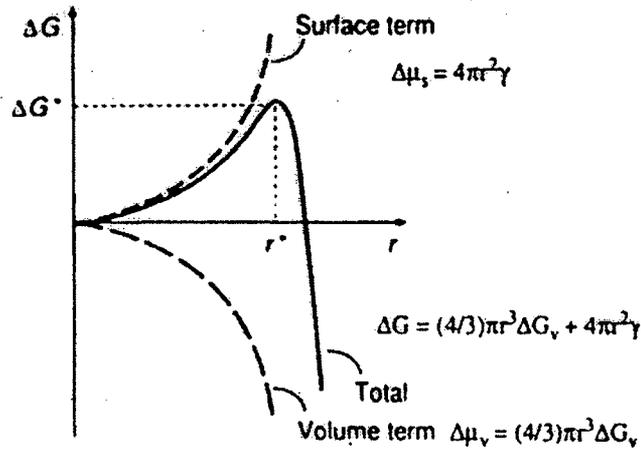
เมื่อ  $\gamma$  คือ พลังงานที่ผิวดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงศักย์เคมีทั้งหมด (chemical potential) หรือพลังงานทั้งหมดของระบบ ( $\Delta G$ ) เมื่อมีนิวเคลียสใหม่เกิดขึ้นจึงมีค่าเท่ากับ

$$\Delta G = \Delta\mu_v + \Delta\mu_s$$

หรือ

$$\Delta G = -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma \quad (2.4)$$

การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระเชิงปริมาตร ( $\Delta\mu_v$ ) พลังงานอิสระที่ผิว ( $\Delta\mu_s$ ) และพลังงานอิสระทั้งหมด ( $\Delta G$ ) ขึ้นกับขนาดของนิวเคลียสดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระเชิงปริมาตร ( $\Delta\mu_v$ ) พลังงานที่ผิว ( $\Delta\mu_s$ ) และพลังงานอิสระทั้งหมด ( $\Delta G$ ) ที่เป็นฟังก์ชันกับรัศมีของนิวเคลียส

นิวเคลียสใหม่ที่เกิดขึ้นจะเสถียรก็ต่อเมื่อนิวเคลียสที่เกิดขึ้นมีรัศมี ( $r$ ) โดกว่ารัศมีวิกฤต ( $r^*$ ) แต่ถ้านิวเคลียสที่เกิดขึ้นใหม่มีรัศมีเล็กกว่ารัศมีวิกฤตแล้วนิวเคลียสที่เกิดขึ้นใหม่จะไม่เสถียรและจะละลายกลับสู่สารละลายเพื่อลดพลังงานของระบบ ถ้านิวเคลียสที่เกิดขึ้นใหม่มีขนาด โดกว่ารัศมีวิกฤต นิวเคลียสจะเสถียรและจะ โตในขั้นตอนต่อไปเพื่อลดพลังงานของระบบเช่นกัน

สถานะที่นิวเคลียสมีขนาดเท่ากับขนาดวิกฤต ( $r = r^*$ ) นั้น จะได้

$$\frac{d\Delta G}{dr} = 0 \quad (2.5)$$

ดังนั้นขนาดของรัศมีวิกฤต ( $r^*$ ) และพลังงานวิกฤตของระบบ ( $\Delta G^*$ ) จะมีค่าเท่ากับ

$$r^* = -\frac{2\gamma}{\Delta G_v} \quad (2.6)$$

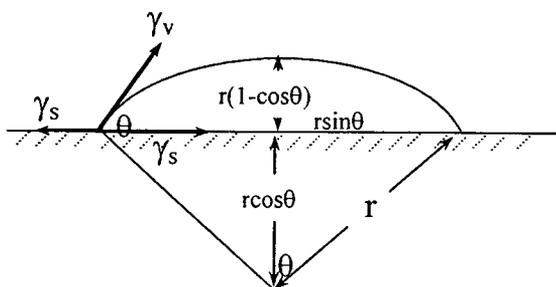
และ

$$\Delta G^* = \frac{16\pi\gamma}{(3\Delta G_v)^2} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $\Delta G^*$  คือ กำแพงพลังงาน (energy barrier) ที่นิวเคลียสต้องเอาชนะเพื่อเกิดเป็น นิวเคลียสใหม่และ  $r^*$  คือ ขนาดนิวเคลียสทรงกลมที่เล็กที่สุดที่ยังคงเสถียรในระบบ

## 2) การเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous nucleation)

การเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์เป็นการเกิดเฟสใหม่บนผิวของวัสดุชนิดอื่น ๆ ถ้าพิจารณาการเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์บนผิวของแข็งที่เรียบและสมมติว่าอนุภาคที่โตซึ่งอยู่ในเฟสของไอเกิดการฝังตัวบนผิวรองรับและอนุภาคที่โตเหล่านี้เกิดการแพร่และรวมตัวเป็นนิวเคลียสรูปหมวก ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์

การเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์ทำให้พลังงานอิสระของกิบส์ลดลงและพลังงานที่ผิวหรือพลังงานที่ผิวรอยต่อเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ แต่การเปลี่ยนแปลงของพลังงานทั้งหมด ( $\Delta G$ ) ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์จะเท่ากับ

$$\Delta G = a_3 r^3 \Delta \mu_v + a_1 r^2 \gamma_{vf} + a_2 r^2 \gamma_{fs} - a_2 r^2 \gamma_{sv} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $r$  คือ ขนาดนิวเคลียสเฉลี่ย  $\Delta \mu_v$  คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร  $\gamma_{vf}$  คือ พลังงานที่ผิวหรือพลังงานที่ผิวรอยต่อระหว่างเฟสของไอกับนิวเคลียส  $\gamma_{fs}$  คือ พลังงานที่ผิวหรือพลังงานที่ผิวรอยต่อระหว่างนิวเคลียสกับผิวรองรับ  $\gamma_{sv}$  คือ พลังงานที่ผิวหรือพลังงานที่ผิวรอยต่อระหว่างผิวรองรับกับเฟสของไอ และ  $a$  คือ ค่าคงที่ทางเรขาคณิต โดย

$$a_1 = 2\pi(1 - \cos \theta) \quad (2.9)$$

$$a_2 = \pi \sin^2 \theta \quad (2.10)$$

$$a_3 = 3\pi(2 - 3 \cos \theta + \cos^2 \theta) \quad (2.11)$$

เมื่อ  $\theta$  คือ มุมสัมผัส (contact angle) ซึ่งขึ้นกับสมบัติที่ผิวของผิวรองรับและนิยามได้ด้วยความสัมพันธ์ของยังส์ (Young's equation) ดังนี้

$$\gamma_{sv} = \gamma_{fs} + \gamma_{vf} \cos \theta \quad (2.12)$$

การเกิดนิวเคลียสหรือเฟสใหม่ส่งผลให้พลังงานอิสระของกิบส์ลดลง แต่พลังงานที่ผิวทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นและนิวเคลียสที่เกิดขึ้นจะเสถียรเมื่อนิวเคลียสที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่กว่าขนาดวิกฤต ( $r^*$ )

$$r^* = \frac{-(a_1 \gamma_{vf} + a_2 \gamma_{fs} - a_2 \gamma_{sv})}{3a_3 \Delta G_v} \quad (2.13)$$

และพลังงานขวางกั้นวิกฤต ( $\Delta G^*$ ) เท่ากับ

$$\Delta G^* = \frac{4(a_1 \gamma_{vf} + a_2 \gamma_{fs} - a_2 \gamma_{sv})^3}{27a_3^2 \Delta G_v} \quad (2.14)$$

เมื่อแทนค่าคงที่ทางเรขาคณิตทั้งหมดในสมการที่ (2.13) และ (2.14) จะได้ความสัมพันธ์ใหม่ดังนี้

$$r^* = \frac{2\pi\gamma_{vf}}{\Delta G_v} \left\{ \frac{\sin^2 \theta \cdot \cos \theta + 2 \cos \theta - 2}{2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta} \right\} \quad (2.15)$$

$$\Delta G^* = \left\{ \frac{16\pi\gamma_{sv}}{3(\Delta G_v)^2} \right\} \left\{ \frac{2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta}{4} \right\} \quad (2.16)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.16) กับสมการที่ (2.7) พบว่าเทอมแรกคือค่ากำแพงพลังงานวิกฤตของการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ และเทอมที่สองคือแฟคเตอร์การเปียกผิว (wetting factor)

ถ้ามุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 180 องศาหรือเฟสใหม่ที่เกิดขึ้นไม่เปียกผิวรองรับ แฟคเตอร์การเปียกผิวจะเท่ากับ 1 หรือกำแพงพลังงานวิกฤตของการเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์จะเท่ากับกำแพงพลังงานวิกฤตของการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ แต่ถ้ามุมสัมผัสมีค่าน้อยกว่า 180 องศา กำแพงพลังงานวิกฤตของการเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์จะน้อยกว่ากำแพงพลังงานวิกฤตของการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ ซึ่งกรณีนี้การเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์จะเกิดได้ง่ายกว่าการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ และถ้ามุมสัมผัสเป็น 0 องศา แฟคเตอร์การเปียกผิวจะเท่ากับศูนย์ด้วย นั่นคือ

นิวเคลียสเกิดขึ้น โดยไม่มีกำแพงพลังงานขวางกั้นเลย ตัวอย่างเช่น การเคลือบผิววัสดุบนผิวรองรับที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกัน

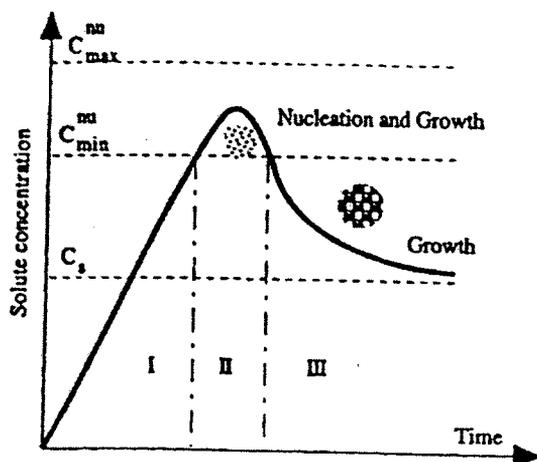
การสังเคราะห์อนุภาคนาโนหรือหมุดควอนตัม (quantum dot) บนผิวรองรับใด ๆ โดยทั่วไป  $\theta > 0$  และสมการของยังส์สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ (2.17)

$$\gamma_{sv} < \gamma_{fs} + \gamma_{vf} \quad (2.17)$$

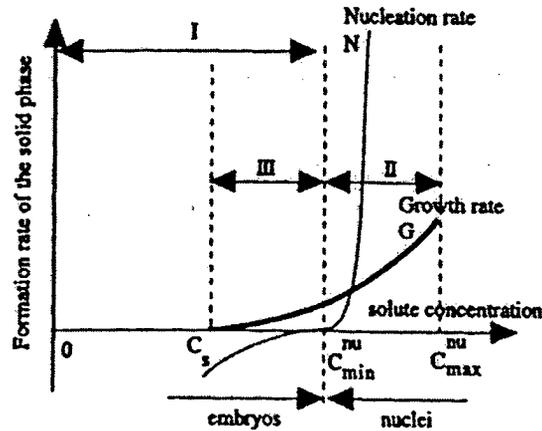
### 2.3.2 การโตของนิวเคลียส (subsequent growth of nuclei)

การโตของนิวเคลียสเกิดขึ้นหลังจากนิวเคลียสมีความเข้มข้นถึงระดับที่เหมาะสม โดยทั่วไปตัวถูกละลายจะละลายได้มากขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นแต่นิวเคลียสไม่เกิดขึ้นทันทีแม้ว่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายมีค่าสูงกว่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สภาวะสมดุล (equilibrium solubility) นิวเคลียสจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อความอิ่มตัวของสารละลายมีค่าที่เหมาะสมและมีพลังงานที่สอดคล้องกับกำแพงพลังงานดังแสดงด้วยสมการที่ (2.7) หลังจากนิวเคลียสเริ่มต้น (initial nucleation) เกิดขึ้นแล้ว ความเข้มข้นของตัวถูกละลายหรือความอิ่มตัวของสปีซีที่โตจะลดลงและการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์จะลดลงด้วย

เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายลดลงถึงจุดที่ต่ำกว่าความเข้มข้นเฉพาะหรือความเข้มข้นที่เริ่มเกิดนิวเคลียส การโตของนิวเคลียสจึงเริ่มเกิดขึ้นและการโตจะดำเนินต่อไปจนความเข้มข้นของตัวถูกละลายลดลงถึงความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลหรือขีดความสามารถในการละลายของตัวถูกละลาย การโตของนิวเคลียสจึงหยุดลงดังแสดงในรูปที่ 2.7 และ 2.8 โดยการโตของนิวเคลียสจะเกิดผ่านกลไกใดกลไกหนึ่ง ดังนี้



รูปที่ 2.7 การเกิดนิวเคลียสและการโตของอนุภาค



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดนิวเคลียสและอัตราการโตของอนุภาคกับความเข้มข้นของอนุภาคที่ละลาย

(1) การโตที่ควบคุมด้วยกระบวนการแพร่ (growth controlled by diffusion)

เมื่อความเข้มข้นของสปีซีที่โตลดลงต่ำกว่าความเข้มข้นต่ำสุดของการเกิดนิวเคลียส การเกิดนิวเคลียสจึงถูกยับยั้ง ในขณะที่การโตของนิวเคลียสจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ถ้าการโตของนิวเคลียสถูกควบคุมด้วยกระบวนการแพร่ของสปีซีที่โตจากสารละลายไปยังผิวของอนุภาค

(2) การโตที่ควบคุมด้วยกระบวนการที่ผิว

(growth controlled by surface process)

เมื่อการแพร่ของอนุภาคที่โตจากสารละลายไปยังผิวของอนุภาคที่โต (growth surface) มีความเร็วเพียงพอหรือเมื่อความเข้มข้นบนผิวอนุภาคมีค่าเท่ากับความเข้มข้นในสารละลายแล้วอัตราการโตจะถูกควบคุมด้วยกระบวนการที่ผิว