

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของสารละลายผสม

และการประมาณค่าตัวเลขเวเบอร์

ในการฉีดพ่นสารละลายผสมระหว่างอนุภาคพาราฟินแว็กซ์และคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตด้วยเทคนิค RESS ไปยังน้ำและสารละลายผสมระหว่างน้ำและสารลดแรงตึงผิวเพื่อเตรียมอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ทรงกลมขนาดเล็ก พฤติกรรมการไหลของสารละลายผสมเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการกำหนดสถานะและลักษณะสัญญาณวิทยาของอนุภาคที่เตรียมได้ งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของสารละลายผสมและการประมาณค่า We เพื่อประกอบการอธิบายกระบวนการลดขนาดด้วยเทคนิค RESS โดยตั้งสมมุติฐานว่าสารละลายผสมที่ฉีดพ่นออกมาจากท่อหรือหัวฉีดขนาดเล็กประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่เนื่องจากการละลายพาราฟินแว็กซ์ละลายในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีปริมาณน้อยมาก การไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นการไหลแบบอัดตัวได้และเป็นการไหลแบบไม่สูญเสียความร้อน สมบัติของของไหลที่ผ่านตัวกลางต่างๆ จะขึ้นกับความสามารในการแพร่กระจายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในตัวกลางนั้นๆ มีสมการที่ใช้ในการคำนวณดังต่อไปนี้ [25, 29]

1. การคำนวณความดันที่ปลายหัวฉีดแสดงดังสมการที่ ก-1

$$\frac{P_0}{P_e} = \left[1 + \left(\frac{k-1}{2} \right) Ma_e^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (ก-1)$$

โดย P_e คือ ความดันของไหลที่ปลายหัวฉีด (bar)

P_0 คือ ความดันของไหลเริ่มต้นในภาชนะทนความดันสูง

หรือ ความดันก่อนการขยายตัว (bar)

k คือ อัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (-)

Ma_e คือ Mach Number ที่ปลายหัวฉีด (-)

เนื่องจากการไหลผ่านท่อขนาดเล็กด้วยความดันสูง สามารถกำหนด **Mach Number** ที่ปลายหัวฉีดมีค่าเท่ากับ 1

จากความสัมพันธ์แก๊สอุดมคติอัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (k) แสดงดังสมการ ก-2

$$k = \frac{C_p}{C_v} \quad (\text{ก-2})$$

โดย C_p คือ ค่าความจุความร้อนที่ความดันคงที่ (kJ/kg.K)
 C_v คือ ค่าความจุความร้อนที่ปริมาตรคงที่ (kJ/kg.K)

2. การคำนวณอุณหภูมิที่ปลายหัวฉีดแสดงดังสมการที่ ก-3

$$\frac{T_0}{T_e} = \left[1 + \left(\frac{k-1}{2} \right) Ma_e^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (\text{ก-3})$$

โดย T_0 คือ อุณหภูมิของไหลเริ่มต้นในภาชนะทนความดันสูงหรืออุณหภูมิก่อนการขยายตัว (K)
 T_e คือ อุณหภูมิของไหลที่ปลายหัวฉีด (K)
 k คือ อัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (-)
 Ma_e คือ **Mach Number** ที่ปลายหัวฉีด (-)

3. การคำนวณความเร็วที่ปลายหัวฉีดแสดงดังสมการที่ ก-4

$$u_e^2 = \frac{2kP_0}{(k-1)\rho_0} \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_0} \right)^{1-(1/k)} \right] \quad (\text{ก-4})$$

- โดย u_e คือ ความเร็วของไหลที่ปลายหัวฉีด (m/s)
 P_e คือ ความดันของไหลที่ปลายหัวฉีด (bar)
 P_0 คือ ความดันของไหลเริ่มต้นในภาชนะทนความดันสูง
 หรือความดันก่อนการขยายตัว (bar)
 k คือ อัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (-)
 ρ_0 คือ ค่าความหนาแน่นของไหลเริ่มต้นในภาชนะทนความดันสูง (kg/m³)

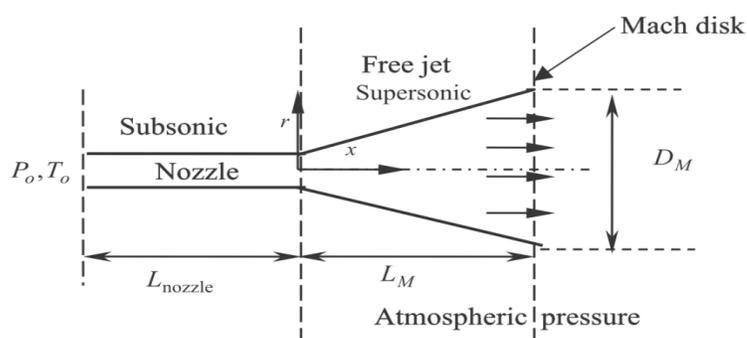
4. การคำนวณความเร็วเสียงแสดงดังสมการที่ ก-5

$$c = \sqrt{\frac{kP}{\rho}} \quad (\text{ก-5})$$

- โดย c คือ ความเร็วเสียง (m/s)
 P คือ ความดันของไหล (bar)
 ρ คือ ค่าความหนาแน่นของไหล (kg/m³)

5. การคำนวณความเร็วตกกระทบ

จากระยะการพ่นและเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของอนุภาคอย่างอิสระแสดงดังสมการที่ ก-6 และ ก-7 [25]



รูปที่ ก.1 แบบจำลองกระบวนการเคลือบผิวโดยเทคนิค RESS [25]

$$L_M = 0.67D_{\text{Nozzle}} \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{post-ex}}}} \quad (\text{ก-6})$$

$$D_M = 0.5265L_M \quad (\text{ก-7})$$

โดย	L_M	คือ ระยะพ่นระหว่างปลายหัวฉีดและแผ่นทดสอบ (cm)
	D_{Nozzle}	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางหัวฉีด (cm)
	D_M	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางการกระจายตัวอย่างอิสระ
	P_0	คือ ความดันของไหลเริ่มต้นในภาชนะทนความดันสูง หรือความดันก่อนการขยายตัว
	$P_{\text{post-ex}}$	คือ ความดันในบริเวณพื้นที่ของการพ่นหรือบริเวณเกิดการขยายตัวอย่างอิสระ (bar)

การเปลี่ยนแปลงของ **Mach Number** ของแก๊สที่พื้นผิวตกกระทบสามารถหาได้จากอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของหัวฉีดเทียบกับพื้นที่ตกกระทบของของไหลเหนือวิกฤตแสดงดังสมการที่ ก-8

$$Ma_i = \left[k_1 \frac{A_i}{A_e} + (1 - k_1) \right]^{k_2} \quad (\text{ก-8})$$

โดย	A_e	คือ พื้นที่หน้าตัดที่ปลายหัวฉีด (mm)
	A_i	คือ พื้นที่หน้าตัดการกระจายตัวของอนุภาคที่พื้นผิวตกกระทบ (mm)
	k_1 และ k_2	คือ ฟังก์ชันของอัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊ส (-)

$$k_1 = 218.0629 - 243.576k + 71.7925k^2$$

$$k_2 = -0.122450 + 0.281300k$$

$$A_e = \frac{4\pi D^2}{4} \quad \text{และ} \quad A_i = \frac{4\pi D_M^2}{4}$$

ความเร็วของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ออกจากหัวฉีดจะมีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วเสียงดังสมการที่ ก-9

$$V_i = Ma_i \times c \quad (\text{ก-9})$$

โดย Ma_i คือ Mach Number บนพื้นผิวตกกระทบ (-)
 c คือ ความเร็วเสียง (m/s)
 V_i คือ ความเร็วของไหลที่พื้นผิวตกกระทบ (m/s)

6. การคำนวณ Weber Number แสดงดังสมการที่ ก-10

$$We = \frac{\rho v^2 d}{\sigma} \quad (\text{ก-10})$$

โดย We คือ Weber Number (-)
 ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลางที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน (kg/m^3)
 v คือ ความเร็วของของไหล (m/s)
 d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของละออง (m)
 σ คือ แรงตึงผิวระหว่างอนุภาคและตัวกลางหรือละอองและตัวกลาง (N/m)

ตัวอย่างการคำนวณ

ข้อมูลเบื้องต้น

- เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด (D) = 0.00158 m
 - ที่สภาวะอุณหภูมิ 80°C และความดัน 120 bar (เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำ)
- $C_p = 2.51065 \text{ kJ/kg.K}$ และ $C_v = 0.90490 \text{ kJ/kg.K}$
 $\rho = 317 \text{ kg/m}^3$

แทนค่า C_p และ C_v ในสมการอัตราส่วนความจุความร้อนของแก๊ส

$$k = \frac{2.51065}{0.90490} = 2.7750$$

แทนค่า k , P_0 และ Ma_e ในสมการที่ ก-1 และ ก-3 ตามลำดับ

$$\frac{120\text{bar}}{P_e} = \left[1 + \left(\frac{2.7750 - 1}{2} \right) Ma_e^2 \right]^{\frac{2.7750}{2.7750 - 1}}$$

$$P_e = 44.45\text{bar}$$

$$\frac{80^\circ\text{C}}{T_e} = \left[1 + \left(\frac{2.7750 - 1}{2} \right) Ma_e^2 \right]$$

$$T_e = 42.39^\circ\text{C}$$

แทนค่าความดันของไหลที่ปลายหัวฉีดในสมการที่ ก-4

$$u_e^2 = \frac{2.7750(120\text{bar})}{(2.7750 - 1)317 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \left[1 - \left(\frac{44.45}{120\text{bar}} \right) \right]^{1 - (1/2.7750)}$$

$$u_e = 235.91\text{m/s}$$

สมบัติต่างๆ ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่กระแทกบนผิวน้ำ สมมุติให้สมบัติต่างๆ ของของไหลเป็นสมบัติของตัวกลางหรือน้ำ เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์แพร่กระจายลงในน้ำได้น้อย

- ที่สภาวะอุณหภูมิ $T_e = 42.39^\circ\text{C}$ และความดัน $P_e = 44.45\text{ bar}$ มีค่าดังนี้
 - $C_p = 4.180\text{ kJ/kg.K}$ และ $C_v = 4.110\text{ kJ/kg.K}$
 - $\rho_e = 100.00\text{ kg/m}^3$
 - $\mu_e = 16.83 \times 10^{-6}\text{ Pa.s}$
 - $\sigma = 0.05\text{ N/m}$

แทนค่า C_p และ C_v ในสมการที่ ก-2

$$k = \frac{4.180}{4.110} = 1.017$$

แทนค่า k ในสมการที่ ก-5

$$c = \sqrt{\frac{1.017(44.45\text{bar})}{100.00 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}$$

$$c = 212.63\text{m/s}$$

แทนค่าความดันของไหลที่ปลายหัวฉีด ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองมีค่าเท่ากับ **52 bar** ในสมการที่ ก-6 และ ก-7 ตามลำดับ

$$L_M = 0.67(0.00158\text{m})\sqrt{\frac{52\text{bar}}{1\text{bar}}} = 0.0076\text{m}$$

แทนค่าระยะการพ่นในสมการที่ ก-7

$$D_M = 0.5625(0.007632) = 0.0043\text{m}$$

แทนค่าเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดและเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของอนุภาคอย่างอิสระเพื่อหาพื้นที่หน้าตัดที่หัวฉีดและพื้นที่หน้าตัดการกระจายตัวของอนุภาคที่พื้นผิวตกกระทบ

$$A_e = \frac{4(3.14)(0.00158)^2}{4} = 7.84 \times 10^{-6} \text{m}^2$$

$$A_i = \frac{4(3.14)(0.0043)^2}{4} = 5.80 \times 10^{-5} \text{m}^2$$

แทนค่า k ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะมาตรฐานซึ่งมีค่าเท่ากับ **1.3 kJ/kg.K** เพื่อหาค่า k_1 และ k_2 ดังนี้

$$k_1 = 218.0629 - 243.576(1.3) + 71.7925(1.3)^2 = 22.7429$$

$$k_2 = -0.122450 + 0.28130(1.3) = 0.2432$$

แทนค่าในสมการที่ ก-8

$$Ma_i = \left[(22.74291) \left(\frac{5.80 \times 10^{-5}}{7.84 \times 10^{-6}} \right) + (1 - (22.74291)) \right]^{0.24324} = 2.8$$

แทนค่า Ma_i และ c ในสมการที่ ก-9

$$V_i = 2.8 \times 212.63$$

$$V_i = 595.36 \text{ m/s}$$

แทนค่าความเร็วของไหลที่พื้นผิวตกกระทบ (V_i) และ คุณสมบัติต่างๆ ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลายหัวฉีดในสมการที่ ก-10 ความสัมพันธ์ของ Weber Number โดยกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของพาราฟินแว็กซ์มีค่าเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของการทดลอง (d) เท่ากับ $2.0 \mu\text{m}$

$$We = \frac{(995 \text{ kg/m}^3)(595.36 \text{ m/s})^2 (2.0 \times 10^{-6} \text{ m})}{(0.05 \text{ N/m})}$$

$$We = 14.107$$

ภาคผนวก ข

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพาราฟินแว็กซ์

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพาราฟินแว็กซ์โดยใช้เครื่อง SEM ร่วมกับเครื่องเคลือบทอง เพื่อเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์ SEM ดังรูปที่ ข-1 และ ข-2 ตามลำดับ

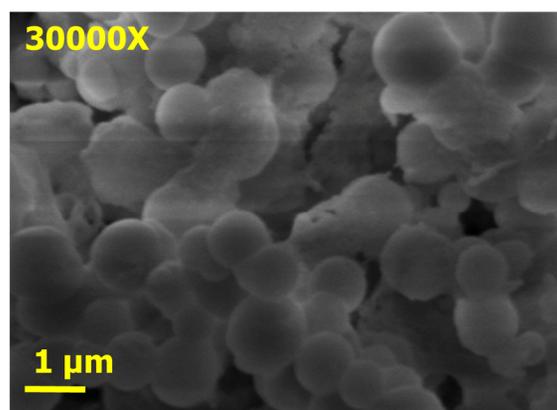
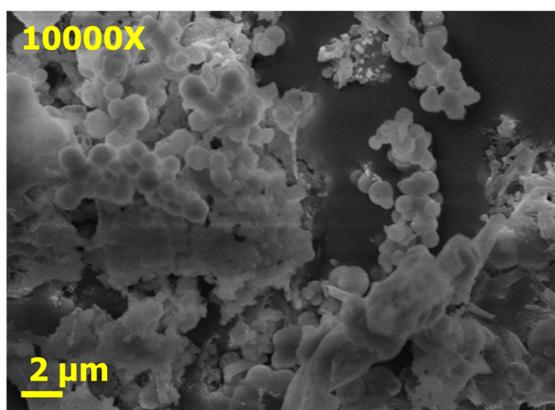


รูปที่ ข.1 เครื่องเคลือบทองเพื่อเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์ SEM
(CRESSINGTON Sputter Coater 108 auto)



รูปที่ ข.2 เครื่อง SEM CAI ZEIS รุ่น EVO MA 10

ตัวอย่างภาพถ่ายกำลังขยายสูงอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ SEM หลังกระบวนการลดขนาดด้วยเทคนิค RESS โดยฉีดพ่นไอน้ำ (30°C) อุณหภูมิก่อนการขยายตัว 80°C ความดันก่อนการขยายตัว 120 bar



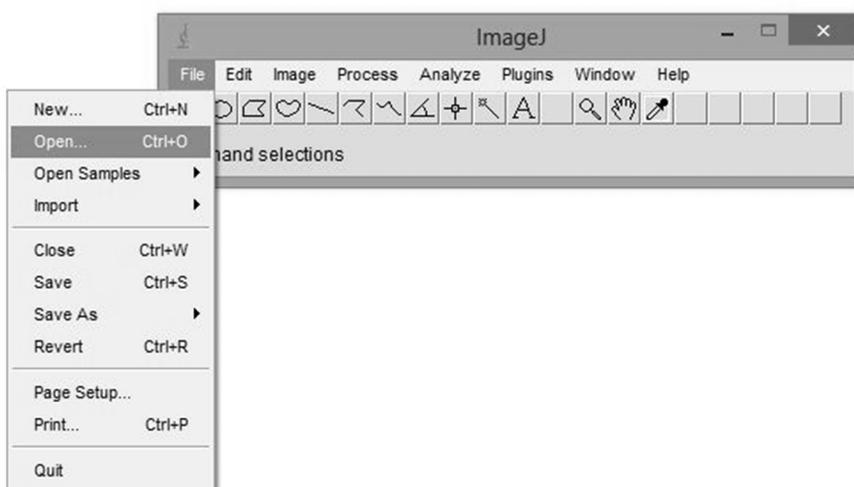
รูปที่ ข.3 ภาพถ่ายกำลังขยายสูง SEM ของพาราฟินแว็กซ์หลังการลดขนาดด้วยเทคนิค RESS โดยการฉีดพ่นไอน้ำที่กำลังขยาย 10,000 เท่า และ 30,000 เท่า

ภาคผนวก ค

การวัดขนาดอนุภาคพาราฟินแว็กซ์

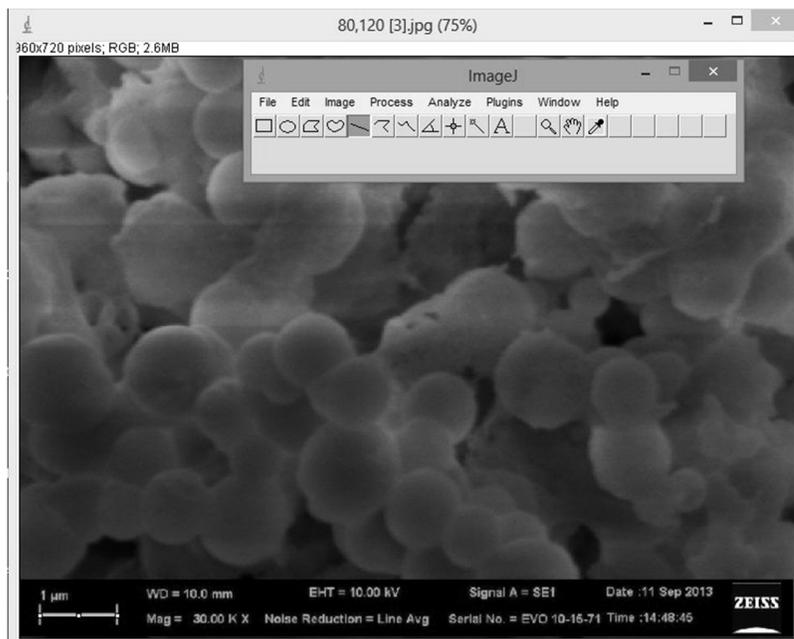
การวัดขนาดอนุภาคของพาราฟินแว็กซ์ใช้ Image-J Software Program ในการวัดขนาดของอนุภาคพาราฟินแว็กซ์ ขั้นตอนการวัดอนุภาคมีดังนี้

1. เปิดโปรแกรม Image-J จากนั้นเลือกภาพ SEM ที่ต้องการวัดขนาด โดยเข้าไปที่ File >> Open ดังรูปที่ ค.1



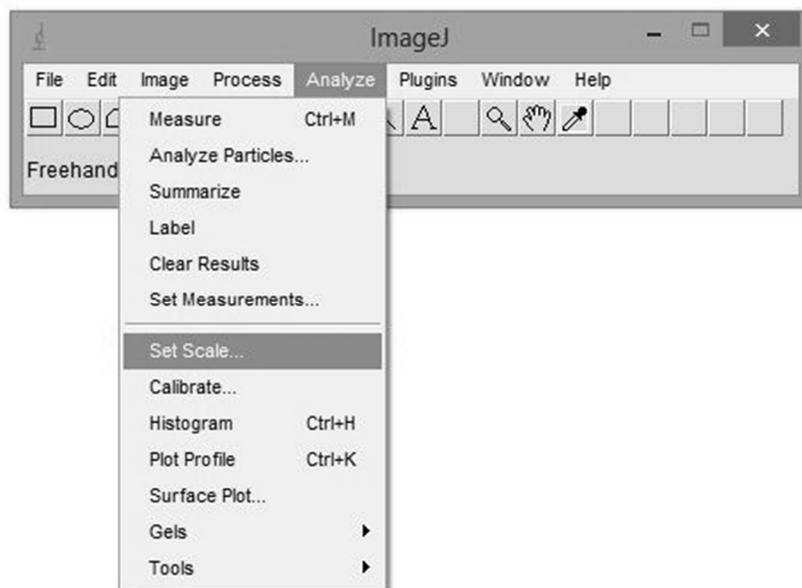
รูปที่ ค.1 การเปิดภาพด้วยโปรแกรม Image-J

2. เลือกเครื่องมือเส้นตรงบนแถบเครื่องมือด้านบนดังรูปที่ ค.2 จากนั้นลากเส้นตรงบริเวณแถบสเกลบนรูปที่เปิดขึ้นมาตามข้อ 1 โดยแถบสเกลนี้จะอยู่บริเวณมุมล่างซ้าย ในการลากนั้นต้องลากให้เป็นเส้นตรงคือมีค่า $\text{angle} = 0.00$ (สังเกตบริเวณแถบเครื่องมือ)



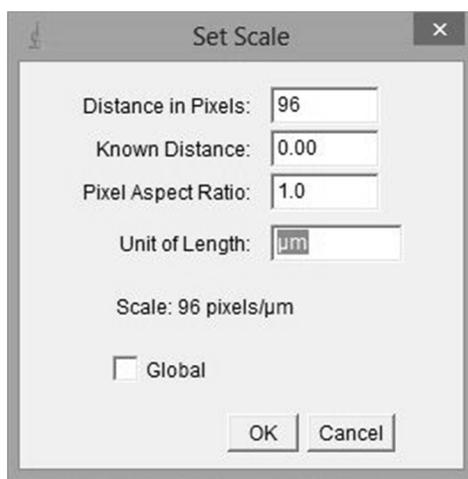
รูปที่ ค.2 การลากเส้นตรงเพื่อตั้งค่าความยาวมาตรฐาน

3. ไปที่แถบเครื่องมือและคลิกที่ **Analyze >> Set scale** ดังรูปที่ ค.3



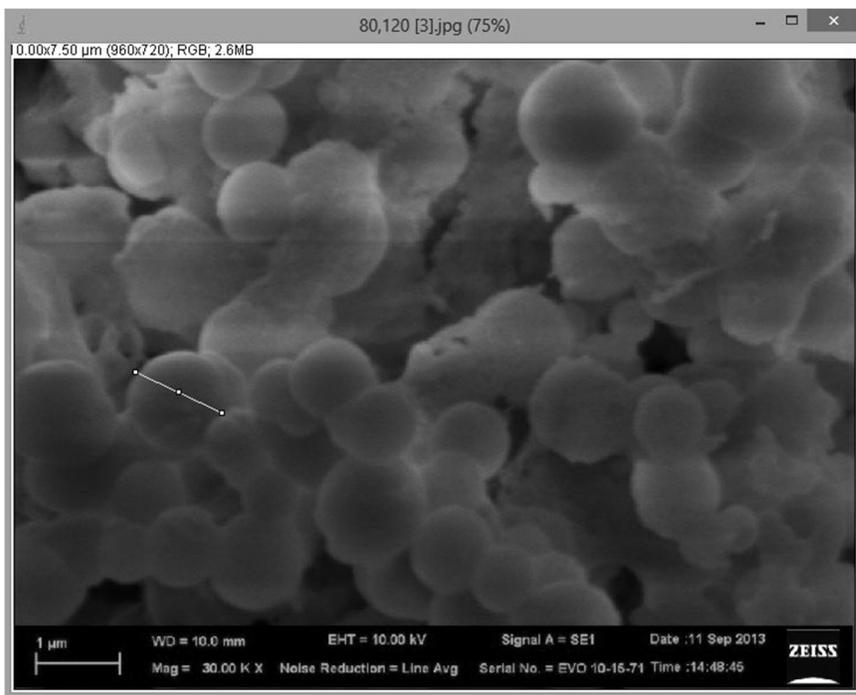
รูปที่ ค.3 การเลือกแถบเครื่องมือเพื่อตั้งค่าความยาวมาตรฐาน

4. จากนั้นจะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ ค.4 เพื่อตั้งค่าความยาวมาตรฐาน โดยจะสังเกตเห็นว่าเส้นตรงที่ลากในข้อ 2 มีความยาว 96.00 หมายถึงค่าความยาวที่โปรแกรมอ่านได้ 96 pixels เท่ากับความยาวในรูป 1 μm ดังนั้นจะกรอกค่าที่ช่อง Know Distance เป็น 1 และช่อง Unit of Length เป็น μm และกด OK



รูปที่ ค.4 การตั้งค่าความยาวมาตรฐาน

5. เลือกแถบเครื่องมือเส้นตรงอีกครั้งและลากเส้นให้มีความยาวเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ต้องการวัดดังรูปที่ ค.5



รูปที่ ค.5 การลากเส้นหาความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

6. ถัดจากนั้นทำการเก็บค่าข้อมูลที่วัดได้โดยไปที่แถบเครื่องมือและคลิก **Analyze >> Measure** หรือกดปุ่มลัด **Ctrl+M** จะปรากฏหน้าต่างดังรูป ค.6

Results	
File	Edit
	Length
1	1.137

รูปที่ ค.6 การบันทึกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทำการวัดได้

7. ทำซ้ำข้อ 5 และข้อ 6 จนครบอนุภาคในรูปนั้นและนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างกราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคต่อไป