

การวัดการกระจายขนาดของอนุภาค nano ทรงกลม โดยวิธีการประมวลผลภาพ

Evaluation of Size Distribution of Spherical Nanoparticles based on Image Processing

นงลักษณ์ พรมทอง (*NonglukPromthong*)¹ เมษา ศิริกุล (*MethaSirigool*)²

พยุง มีสัจ (*PhayungMeesad*)³ และ มาลีรัตน์ โสคานิช (*MaleeratSodanil*)⁴

^{1,2} คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลชั้นนำ

^{3,4} ภาควิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลแห่งประเทศไทย

¹*nongluk@mail.rmutt.ac.th*, ²*metha@mail.rmutt.ac.th*, ³*pym@kmutnb.ac.th*, ⁴*msn@kmutnb.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนองานวัดการกระจายขนาดของอนุภาค nano ทรงกลมด้วยวิธีการประมวลผลภาพ ซึ่งทำงานได้โดยอัตโนมัติและรวดเร็ว มีประโยชน์ในการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค nano ทรงกลมที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่างๆ มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้ นำภาพอนุภาค nano ทรงกลมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องแนบต่อกับกล้องส่องไฟฟ้า ทำการจำจัดสิ่งรบกวนออก จากนั้นแปลงให้เป็นภาพในนาโน หาเส้นขอบของอนุภาค nano ทรงกลมเพื่อใช้สำหรับในการนับจำนวนอนุภาค และหาขนาดของแต่ละอนุภาคจากเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค nano ทรงกลม โดยการหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุดและต่ำสุดของแกน X และแกน Y ของแต่ละอนุภาค และนับจำนวนของอนุภาค nano ทรงกลมแต่ละช่วงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง นำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อแสดงการกระจายขนาดของอนุภาค nano ทรงกลม จากการทดลอง การวัดการกระจายของอนุภาค nano ทรงกลมจำนวน 403 อนุภาค จากข้อมูล 3 กลุ่ม พบว่าการนับจำนวนอนุภาค nano ทรงกลม มีความถูกต้องร้อยละ 98 ส่วนการหาการกระจายของขนาดของอนุภาค nano ทรงกลม มีถูกต้องและมีความเสถียรมากกว่า เมื่อเทียบกับการวัดด้วยเครื่องมือ ImageJ

คำสำคัญ: การกระจายขนาด อนุภาค nano ทรงกลม

การประมวลผลภาพ

Abstract

This paper presents the measurement of the size distribution of spherical nanoparticle by image

processing method. This approach can work automatically and quickly. It is useful in the analysis of the size distribution of spherical nanoparticles synthesized by different methods. The image analyzing processes begin with obtaining the grey image of spherical nanoparticles from the scanning electron microscope. The grey image will be de-noised and converted into binary image. The pre-processed spherical nanoparticles image will be scanned for the particles' individual boundary in order to initiate the calculation. Each spherical particle's diameter can be obtained by the averaging of the maximum and minimum values of X and Y axis of each particle. , Consequently, the number of nanoparticle, classified by range of size of diameter, will be calculated and plotted in order to demonstrate the distribution profile. From the experiment, the distribution of 403 spherical nanoparticles based on the measurement of three spherical nanoparticle images, the number of spherical nanoparticles is accurately calculated with 98% in accuracy. The determination of size distribution of spherical nanoparticles is also more accurate and stable than do the ImageJ.

Keyword: Size distribution, Spherical Nanoparticles, Image processing

1. บทนำ

ปัจจุบันอนุภาคและนาโนได้ถูกนำมาใช้ในงานต่าง ๆ เช่น การทหาร การแพทย์ อิเล็กทรอนิกส์ และ พลังงาน [1-3] เนื่องจากคุณสมบัติของอนุภาคนาโนจะแตกต่างกับคุณสมบัติของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่เกินกว่าขนาดนาโน [4] โดยคำจำกัดความของอนุภาคนาโนคือ อนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่า 100 นาโนเมตร [5]

การวัดขนาดของอนุภาคนาโนทรงกลมที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ ทำได้โดยนำรูปภาพที่ได้จากการกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องร้าด ซึ่งเป็น ภาพโทนสีเทา (gray scale image) นำมาบันทึกโดยโปรแกรม ImageJ [11-12] ซึ่งเป็นโปรแกรมฟรีค่าน้ำหนัก โดยทำการกำหนดขนาดพิกเซลข้างของสถาเก็บบาร์ในรูปที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เพื่อเทียบกับขนาดของอนุภาคนาโนแต่ละตัว โดยการวัดขนาดอนุภาคนาโนทั้งหมดทำโดยใช้เม้าส์ลากตามเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคแต่ละตัว ค่าที่ได้จากการวัดจะถูกเก็บไว้ในตารางของโปรแกรม ImageJ หลังจากนั้นจะคัดลอกค่าในตารางจากโปรแกรม ImageJ วางในโปรแกรมเอกเซล และใช้โปรแกรมเอกเซล ทำการวิเคราะห์ภาพเพื่อถูกการกระจายของขนาดอนุภาคนาโนทรงกลม ซึ่งการวัดด้วยการลากเมาส์ผ่านเส้นผ่าศูนย์กลางของแต่ละอนุภาคนาโนทรงกลม อาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดขนาดอนุภาค ได้เนื่องจากการลากเมาส์เป็นการวัดระยะด้วยสายตาซึ่งมือที่ลากเมาส์ต้องมีความเม่นยำ ผู้ทำต้องมีสมารถผุ่งนิ้นในการทำ และถ้ามีอนุภาคขนาดเล็กและจำนวนมากต้องใช้วลามากด้วย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเครื่องมือเพื่อทำงานบน Matlab ในการนับและวัดขนาดของแต่ละอนุภาคนาโนทรงกลม โดยกระบวนการทั้งหมดสามารถทำได้โดยอัตโนมัติ แทนการวัดขนาดแต่ละอนุภาคด้วยโปรแกรม ImageJ สามารถช่วยลดเวลาในการนับและวัดขนาดอนุภาคนาโนทรงกลมของนักวิจัยที่ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโน และยังสามารถสร้างกราฟเปรียบเทียบการกระจายขนาดของอนุภาคนาโนซึ่งสามารถใช้หาคุณภาพในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนในแต่ละวิธีได้ อีกทั้งยังสามารถลดความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคนาโนทรงกลมด้วยการลากเส้นผ่าศูนย์กลางด้วยมือ

2. วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน

วิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทำได้หลายวิธี เช่น วิธีทางกล วิธีทางเคมี วิธีการอาร์คด้วยกระแสไฟฟ้า และ วิธีทำให้ระเหยโดยใช้เลเซอร์ [6-9] โดยแต่ละวิธีมีข้อดี ข้อเสียต่างกัน และ มีเงื่อนไขหรือตัวแปรในการสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน จึงทำให้การสังเคราะห์ด้วยวิธีต่าง ๆ ให้คุณภาพของอนุภาคนาโนในการสังเคราะห์ที่ต่างกัน โดยคุณภาพของการสังเคราะห์ด้วยวิธีต่าง ๆ สามารถเปรียบเทียบกันได้ โดยการวัดขนาดของอนุภาคนาโนทั้งหมดหลังจากนั้นหาค่าเฉลี่ย และ วิเคราะห์กราฟการกระจายตัวของขนาด (size distribution) อนุภาคนาโนทั้งหมด การสังเคราะห์ที่มีคุณภาพดีจะมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคนาโนน้อย แต่ถ้าการสังเคราะห์ที่มีคุณภาพไม่ดีจะมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคนาโนมาก ปกติการสังเคราะห์ที่ดีควรมีขนาดของอนุภาคนาโนเล็กที่สุด และการกระจายตัวของอนุภาคนาโนที่สุดตัว ซึ่งรูปร่างของอนุภาคนาโนมีหลายรูปร่าง ซึ่งอยู่กับวิธีและเงื่อนไขการสังเคราะห์แต่โดยปกติแล้วรูปร่างของอนุภาคนาโนจะมีลักษณะเป็นทรงกลม [10-12]

2.2 การจำจัดสิ่งรบกวนในภาพ

การนำภาพจากแหล่งต่าง ๆ (source image) มาทำการประมวลผลภาพ (image processing) ซึ่งส่วนใหญ่ได้ภาพจากแหล่งกำเนิด เป็นภาพสี จะต้องทำการแปลงให้เป็นภาพโทนสีเทา (gray scale image) [13], [14-17] เพื่อความเหมาะสมในการประมวลผลภาพ แต่เนื่องจากภาพอนุภาคนาโนทรงกลม ที่ได้จากการกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องร้าด เป็นภาพโทนสีเทา จึงไม่ต้องทำการแปลงภาพอีก แต่ต้องทำการจำจัดสิ่งรบกวน ต่าง ๆ ออกไป (de-noise) เพื่อให้ภาพมีคุณภาพดีขึ้น การจำจัดสิ่งรบกวน ต่าง ๆ ในภาพมีหลายวิธี เช่นวิธีการวงจรกรองค่าเฉลี่ย (average filter) เป็นการจำจัดสัญญาณรบกวนที่มีความเรียบง่าย [18] และวิธีการวงจรกรองมัชยฐาน (median filter) [11-13],[16] ซึ่งเป็นวิธีการกรองที่ง่ายไม่ซับซ้อน สามารถแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนประเภทเกลือและพริกไทยได้

2.3 การประมวลผลภาพใบหน้า

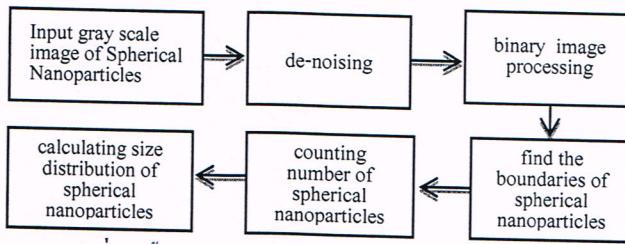
ภาพใบหน้าเป็นภาพที่มีเฉพาะสีขาวและสีดำ ซึ่งแสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างวัตถุกับพื้นหลังของภาพ อาจถือว่า

วัตถุและพื้นหลังแตกต่างกันที่ระดับค่าเทรสโไฮล์ด์ สิ่งสำคัญคือ การเลือกค่าเทรสโไฮล์ดที่ดีที่สุด มีวิธีการหาค่าเทรสโไฮล์ดได้ หลายวิธี แล้ววิธีของ otsu [19-20] เป็นวิธีที่หาค่าเทรสโไฮล์ดที่ดี และเหมาะสมที่สุด และมีความซับซ้อนในการคำนวณน้อย [14] ถ้าระดับความเข้มของสีพิกเซลมีค่ามากกว่าค่าเทรสโไฮล์ด เป็นสีของวัตถุที่ต้องการคือมีสีเป็นสีขาว และถ้าระดับความเข้มของสี มีค่าน้อยกว่าค่าเทรสโไฮล์ดจะเป็นสีของพื้นหลังและมีสีเป็นสีดำ [11]

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 องค์ประกอบของระบบ

องค์ประกอบของระบบทั้งหมดประกอบด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องราก (scanning electron microscope : SEM) และเครื่องคอมพิวเตอร์ กล้องSEM ใช้สำหรับบันทึกภาพอนุภาคนาโนทรงกลมซึ่งเป็นภาพโทนสีเทา และเครื่องคอมพิวเตอร์ใช้สำหรับการประมวลผลภาพและแสดงผลลัพธ์ มีขั้นตอนการทำงาน ตามภาพที่ 1



ภาพที่ 1: ขั้นตอนการวัด 크ะรชาขนาดของอนุภาคนาโนทรงกลม

3.2 การประมวลผลภาพ

นำภาพอนุภาคนาโนทรงกลมมาจากการกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องราก ซึ่งเป็นภาพโทนสีเทา (gray scale image) มีการจัดเก็บข้อมูลแบบเมตริกของข้อมูลภาพซึ่งเป็นค่าระดับความเข้มของสีคือ ภาพมีความเข้มตั้งแต่สีดำ (0) สว่างขึ้นเป็นสีเทา และมีความเข้มสว่างที่สุดคือสีขาว(255) ทำการประมวลผลภาพตามขั้นตอนดังนี้

3.2.1 การกำจัดสิ่งรบกวนในภาพ เนื่องจากในภาพจะมีสิ่งรบกวนต่างๆ (noise) ซึ่งมีผลกระทบต่อคุณภาพของภาพ เช่น สัญญาณรบกวนแก๊ส สัญญาณรบกวนเสปกเกิล และสัญญาณรบกวนเกลือพริกไทย จึงต้องทำการกำจัดสิ่งรบกวนในภาพเหล่านี้ออกไปเพื่อให้ภาพมีคุณภาพดีขึ้น วิธีการกำจัดสิ่งรบกวนในภาพ แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือวิธีการ

กำจัดสิ่งรบกวนในภาพ แบบวิธีโดยเมนเเวลา และแบบโดยเมนความถี่ สำหรับวิธีโดยเมนเเวลาเป็นการทำให้เรียบแบบถ่วงน้ำหนัก (weighed smoothing) การกรองมัธยฐาน (median filtering) และ สัญญาณวิทยาทางคณิตศาสตร์ (mathematic morphology) ส่วนวิธีโดยเมนความถี่ เป็นการทำการกรองดิจิตอลคลาสสิก (classical digital filtering) ໂອโนมอฟิค (homomorphic) และการวิเคราะห์เวฟเลต(wavelet analysis) [20] ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการกำจัดสิ่งรบกวนในภาพ โดยกรองแบบมัธยฐาน ซึ่งเป็นวิธีวิธีการกำจัดสิ่งรบกวนประเภทเกลือพริกไทย ทำให้ภาพของอนุภาคนาโนทรงกลมชัดเจ็น

3.2.2 การทำให้เป็นภาพใบหน้า ภาพอนุภาคนาโนทรงกลมที่ได้กำจัดสิ่งรบกวนแล้วนำมาทำการแปลงภาพโทนสีเทา ให้เป็นภาพใบหน้าซึ่งสีของภาพมี สองค่าคือ สีดำกับสีขาว 0 เป็นสีดำ และ 1 เป็นสีขาว เพื่อแยกให้เห็นสีของอนุภาคนาโนทรงกลมกับสีพื้นอย่างชัดเจน โดยหาค่าเทรสโไฮล์ดใช้วิธีของ otsu และทำการเปรียบเทียบค่าสีพิกเซลของภาพโทนสีเทา กับค่าเทรสโไฮล์ด ภาพโทนสีเทาถูกจัดเก็บในรูปแมトリคซ์ ขนาด $m \times n$ ตำแหน่ง $G[i, j]$ ซึ่งเป็นค่าความเข้มของโทนสีขาวจะถึงสีดำ ถ้าที่ i คอลัมน์ที่ j และหาค่าภาพใบหน้าตำแหน่ง $B[i, j]$ ได้ดังนี้

$$\text{ถ้า } G[i, j] > \text{เทรสโไฮล์ด}$$

$$B[i, j] = 1 \text{ ให้พิกเซลเป็นสีขาว}$$

ถ้าเป็นอย่างอื่น

$$B[i, j] = 0 \text{ ให้พิกเซลเป็นสีดำ}$$

3.2.3 การหาขอบภาพและการนับจำนวนของอนุภาคนาโนทรงกลม เนื่องจากพิกเซลในภาพใบหน้ามีค่าเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น ซึ่งค่า 0 แทนสีพื้นของภาพ และค่า 1 แทนสีภาพของอนุภาคนาโน พิกเซลของขอบอนุภาคนาโนจะต่อเนื่องและเชื่อมต่อกันเป็นกราฟวงกลม เราสามารถหาจำนวนอนุภาคนาโนทรงกลม ได้จากการนับเส้นขอบของแต่ละอนุภาค [18], [11]

3.2.4 การวัดกระยะขนาดของอนุภาคนาโนทรงกลม

ในการคำนวณหาเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคนาโนทรงกลม แต่ละอนุภาค คำนวณจากกราฟวงกลมที่ได้จากการหาขอบภาพของอนุภาคนาโนทรงกลม หากได้จากสมการที่ (1)

$$\alpha = \frac{(X_{\max} - X_{\min}) + (Y_{\max} - Y_{\min})}{2} \quad (1)$$

โดยที่ α คือค่าสีน้ำเงินผ่าสูญญ์กลางของอนุภาคนาโนทรงกลม X_{\max} คือค่าสูงสุดของตำแหน่งขอบอนุภาคบนแกน X X_{\min} คือค่าต่ำสุดของตำแหน่งขอบอนุภาคบนแกน X Y_{\max} คือค่าสูงสุดของตำแหน่งขอบอนุภาคบนแกน Y Y_{\min} คือค่าต่ำสุดของตำแหน่งขอบอนุภาคบนแกน Y นับจำนวนอนุภาคนาโนทรงกลม แต่ละขนาดจากค่าของ เส้นผ่าศูนย์กลางทุก ๆ อนุภาค และวัดกราฟเพื่อวัดการ กระจายของขนาดอนุภาคนาโนทรงกลม

4. ผลการดำเนินงาน

4.1 จากการประมวลผลภาพ ภาพอนุภาคนาโนทรงกลม จากกล้องจ้องกล้องจุลทรรศน์เด็กตรอนแบบต่อจอดู จำนวน 403 อนุภาค จาก 3 ภาพ หลังจากทำการคำนวณสิ่งรบกวนแล้ว ทำการหาค่า เทรสโซอลต์ได้ 29, 49 และ 41 ตามลำดับ ทำการแปลง ให้เป็นภาพไบนาリ ดังภาพที่ 2



(1) เทรสโซอลต์ 29 (2) เทรสโซอลต์ 49 (3) Threshold 41

ภาพที่ 2: ภาพที่เปลี่ยนจากภาพโโนนสีเทาเป็นภาพไบนาリ

4.2 หากอนุภาค และ นับจำนวน โดยหาเส้นผ่าศูนย์กลาง จากค่าเฉลี่ย สูงสุดต่ำสุดของแกน x และแกน y ของแต่ละ อนุภาคแสดงดังตามภาพที่ 3 ซึ่งแสดงเส้นขอบของแต่ละ อนุภาค นับและแสดงจำนวนอนุภาคนาโนทรงกลม



(1) 112 อนุภาค (2) 95 อนุภาค (3) 196 อนุภาค

ภาพที่ 3: แสดงเส้นขอบและจำนวนอนุภาคนาโนทรงกลม

4.3 เปรียบเทียบการจำนวนและการหาขนาดของอนุภาค นาโนทรงกลมจากการทำด้วยมือบน ImageJ กับวิธีการ

ประมวลผลภาพนาโนทรงกลม โดยแบ่งขนาดของอนุภาคนาโนทรงกลมเป็นช่วงๆ ละ 5 นาโนเมตร ได้ผลในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 : เปรียบเทียบ จำนวนและขนาดของอนุภาคนาโน ทรงกลมตามวิธีการประมวลผล

กลุ่ม คัว อ่อน	ใช้วิธีประมวลผลด้วยมือ บน ImageJ					ใช้วิธีการประมวลผลภาพ				
	จำนวน จำนวน หน่วย หน่วย mm	0-5 mm	6-10 mm	11-15 mm	16-20 mm	จำนวน หน่วย mm	0-5 mm	6-10 mm	11-15 mm	16-20 mm
1	115	2	112	1	0	112	9	60	42	1
2	97	2	77	18	0	95	4	9	79	3
3	193	25	168	0	0	194	6	139	49	0

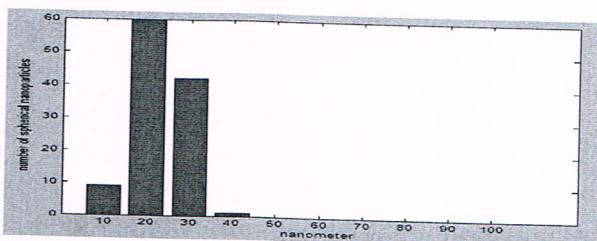
จากตารางที่ 1 พบร่วมกันของอนุภาคนาโนทรงกลม โดยใช้วิธีการประมวลผลด้วยมือบน ImageJ มีขนาด 3 กลุ่ม ตั้งแต่ 0 ถึง 15 นาโนเมตร ส่วนใหญ่มีขนาด 6-10 นาโนเมตร ส่วนวิธีการประมวลผลภาพ มีขนาด 4 กลุ่ม ตั้งแต่ 0 ถึง 20 นาโนเมตร ส่วนใหญ่มีขนาด 6-10 และ 11-15 นาโนเมตร ซึ่งแสดงถึงการหาขนาดของอนุภาคนาโน ได้ดีกว่า สำหรับการหาความผิดพลาดในการนับจำนวนและการหาขนาดอนุภาคนาโนทรงกลม จากการประมวลผลด้วยมือจาก ImageJ และการประมวลผลภาพ ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 : ความแตกต่างของจำนวนและขนาดอนุภาคนาโน ทรงกลมตามวิธีการประมวลผล

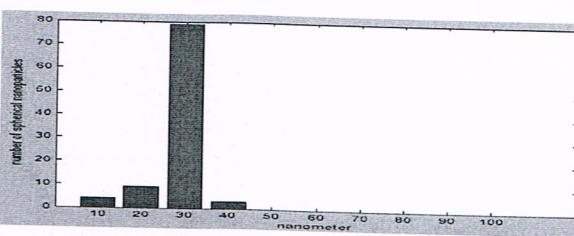
กลุ่ม คัว อ่อน	จำนวน จำนวน หน่วย หน่วย mm	ความแตกต่างของขนาดอนุภาคนาโนทรงกลมตามวิธีการประมวลผล					
		0-5 mm	6-10 mm	11-15 mm	16-20 mm	ร้อยละ	ร้อยละ
1	3	2.6	7	6.09	52	45.2	41
2	2	2.1	2	2.06	68	70.1	61
3	1	0.5	19	9.84	29	15.0	49
						25.4	0
							0.0

จากตารางที่ 2 พบร่วมกันของอนุภาคนาโนทรงกลม ทั้ง 2 วิธีมีความแตกต่างกันน้อยมากประมาณร้อยละ 2 แต่การนับจำนวนอนุภาคนาโนทรงกลมตามขนาดทั้ง 2 วิธีมี ความแตกต่างกันสูงมาก โดยที่ขนาด 6-10 นาโนเมตร ต่างกันสูงสุด ร้อยละ 70 และขนาด 11-15 นาโนเมตร ต่างกัน สูงสุดร้อยละ 63 ซึ่งความผิดพลาดเกิดจากการใช้มือคลิกเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาคนาโนบนแกน x หรือ แกน y เพียงแกนเดียว โดยไม่ผ่านจุดศูนย์กลางทุกอนุภาค ทำให้ได้ขนาดอนุภาค ที่ไม่ถูกต้องทั้งหมด

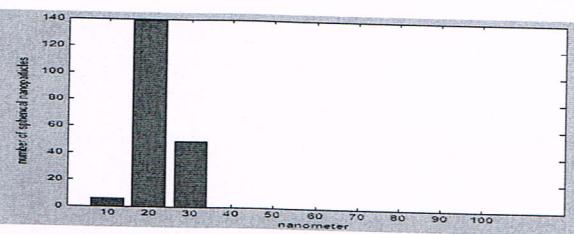
4.4 ข้อมูลจากการประมวลผลภาพ สร้างกราฟแสดงการกระจายของอนุภาคนาโนขนาด 5 ถึง 45 นาโนเมตร โดยสมมุติอัตราส่วน 1 พิกเซลต่อ 10 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4 กราฟแสดงการกระจายของอนุภาคนาโนทรงกลมขนาด ต่างๆ ของแต่ละกลุ่ม



(1) แสดงการกระจายของอนุภาคนาโนทรงกลมกลุ่มที่ 1



(2) แสดงการกระจายของอนุภาคนาโนทรงกลมกลุ่มที่ 2



(3) แสดงการกระจายของอนุภาคนาโนทรงกลมกลุ่มที่ 3

ภาพที่ 4 : กราฟแสดงการกระจายของอนุภาคนาโนทรงกลมขนาดต่างๆ

จากภาพที่ 4 (1) การกระจายขนาดอนุภาคนาโนทรงกลมกลุ่มที่ 1 จำนวน 112 อนุภาค ส่วนใหญ่มีขนาดระหว่าง 15-35 นาโนเมตร ภาพที่ 4 (2) การกระจายขนาดอนุภาคนาโนทรงกลมกลุ่มที่ 2 จำนวน 95 อนุภาค ส่วนใหญ่มีขนาดระหว่าง 25-35 นาโนเมตร ภาพที่ 4 (3) การกระจายขนาดอนุภาคนาโนทรงกลมกลุ่มที่ 3 จำนวน 194 อนุภาค ส่วนใหญ่มีขนาดระหว่าง 15-35 นาโนเมตร พบว่า กราฟในภาพที่ 4 (2) แสดงการวัดการกระจายของขนาดอนุภาคนาโนทรงกลมได้ดีที่สุด เพราะมีการกระจายขนาดของอนุภาคน้อยที่สุด ขนาด 25-35 มีจำนวนมากถึง 79 อนุภาค ส่วนขนาดอื่น ๆ มีน้อยกว่า 10 อนุภาค

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

การวัดการกระจายขนาดของอนุภาคนาโนทรงกลมโดยวิธีการประมวลผลภาพ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความถูกต้องในการนับจำนวนอนุภาคนาโนทรงกลมได้ตามต้องการ ซึ่งสามารถทำงานได้โดยอัตโนมัติ มีความรวดเร็ว มีความถูกต้องร้อยละ 98 และลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยสายตาเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่ทำด้วยมือบน image J และสามารถนำไปใช้แนวทางการหาวิธีที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ

งานวิจัยนี้ใช้ได้กับภาพอนุภาคนาโนทรงกลมที่กระจายไม่ทั่วช้อนกัน ในอนาคตควรพัฒนางานวิจัยที่สามารถนับจำนวน และหารการกระจายขนาดของอนุภาคนาโนทรงกลมจากภาพอนุภาคนาโนทรงกลมที่ทั่วช้อนกันได้และแบ่งชั้นของอนุภาคนาโนทรงกลมที่วางช้อนกันได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. G. Kulkarni, X.-L. Gao, S. E. Horner, J. Q. Zheng, N. V. David, “Ballistic Helmets - Their Design, Materials, and Performance against Traumatic Brain Injury”, *Composite Structures*, 2013.
- [2] David P. Cormode, Peter A. Jarzyna, Willem J. M. Mulder, Zahi A. Fayad, “Modified natural nanoparticles as contrast agents for medical imaging”, *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2010.
- [3] J. H. Kim, E. K. Kim, C. H. Lee, M. S. Song, Y.-H. Kim, J. Kim, “Electrical properties of metal-oxide semiconductor nano-particle device”, *Physicam*, Ed. 26 (2005) 432–435.
- [4] Jennifer E. Gagner , Xi Qian, Maria M. Lopez, Jonathan S. Dordick, RichardW. Siegel, “Effect of gold nanoparticle structure on the conformation and function of adsorbed proteins ”, *Biomaterials*, 2012.
- [5] Sylvia Leydecker, “Nano Materials in Architecture, Interior Architecture and Design,” *Birkhauser Basel Boston Berlin*,2012.
- [6] Caroline B. Reid, Jennifer S. Forrester, Heather J. Goodshaw, Erich H. Kisi, and Gregg J. Suanning, “A study in the mechanical milling of alumina powder”, *Ceramics International*, vol. 34, pp. 1551–1556, 2008.

- [7] F. Mirjalili, M. Hasmaliza, and L. Chuah Abdullah," Size-controlled synthesis of nano α -alumina particles through the sol-gel method", *Ceramics International*, vol. 36, pp. 1253–1257, 2010.
- [9] Kiyoshi Yatsui, Takanori Yukawa, Constantin Grigoriu, Makoto Hirai and Weihua Jiang, "Synthesis of ultrafine - Al₂O₃ powders by pulsed laser ablation", *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 2, pp. 75–83, 2000.
- [10] Karen Dawson, Marine Baudequin, Nicolas Sassi, Aidan J. Quinn, Alan O'Riordan, "Electroanalysis at discrete arrays of gold nanowire electrodes", *Electrochimica Acta*, 2012.
- [11] S. Z. Khan, Z. Liu, and L. Li," Characteristics of γ - Al₂O₃ nanoparticles generated by continuous-wave laser ablation in liquid", *Appl Phys A*, vol. 101, pp. 781–787, 2010.
- [12] I. L. Liu, P. Shen, and S. Y. Chen , "H⁺ and Al³⁺- Codoped Al₂O₃ Nanoparticles with Spinel-Type Related Structures by Pulsed Laser Ablation in Water", *J. Phys. Chem.* vol. 114, pp. 7751–7757, C 2010.
- [13] Hong Men, Yujie Wu, Xiaoying Li, Zhen Koua and Shanrang Yang, "Counting Method of Heterotrophic Bacteria Based on Image Processing", *Cybernetics and Intelligent Systems*, v2008 IEEE Conference.
- [14] Xu Pengyun and Li Jigang, "Computer assistance image processing spores counting," *International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*.
- [15] Zhao Ping and Li Yongkui, "Grain Counting Method Based on Image Processing", *International Conference on Information Engineering and Computer Science (ICIECS)*, 2009.
- [16] Wang Shu-Guang, Zeng Xiang-Yang and Wang Qiang, "Application of SVM in the Food Bacteria Image Recognition and Count", *3rd International Congress on Image and Signal Processing*, 2010.
- [17] Shen Wei-zheng, Wu Ya-chun, Zhao lie and Zheng Hui, "Experimental Study for Automatic Colony Counting System Based on Image Processing", *International Conference Computer Application and System Modeling*, 2010.
- [18] P. Rajashekhar Reddy, V. Amarnadh, Mekala Bhaskar, "Evaluation of Stopping Criterion in Contour Tracing Algorithms", *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, vol. 3, no. 3, 2012.
- [19] Nobuyuki Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms," *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, vol. 6, no. 3, pp. 62-66, 1979.
- [20] Dong Han, Jianfu Teng, Zhaoxuan Yang, Yanwei Pang, Meng Wang, "2D Barcode Image Binarization Based on Wavelet Analysis and Otsu's Method", *International Conference on Computer Application and System Modeling*, 2010.