การวิเคราะห์ฟังก์ชันความสัมพันธ์ในเวลาของความเข้มแสงกระเจิง และการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาคคอลลอยด์

The Analysis of Time Correlation Function of Light Scattering Intensity and Evaluate the Diffusion Coefficient of Colloid Particle

รัฐธนินท์ วัฒนะศิริโกศล หัสยา จุ้ยสกุล และ คเชนทร์ แดงอุดม*

Ruttanin Wattanasirikoson, Hassaya Juisakul and Kachain Dangudom*

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University

Received : 12 June 2017

Accepted : 1 September 2017

Published online : 7 September 2017

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจัดตั้งระบบเพื่อศึกษาการแพร่ของอนุภาคคอลลอยด์จากการวิเคราะห์ฟังก์ชันความสัมพันธ์ในเวลาของความเข้มแสงกระเจิง โดยอาศัยหลักการกระเจิงแสงแบบไดนามิกส์จากสารคอลลอยด์ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ความยาวคลื่นเดียว ที่มีความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ผู้วิจัยวัดความเข้มแสงกระเจิงโดยใช้หัววัดแสงโฟโตไดโอด ที่มุมกระเจิง 90 องศากับระนาบของลำแสงที่มาจากแหล่งกำเนิดแสง ใช้เครื่องดิจิตอลออสซิลโลสโคปในการบันทึกและเก็บข้อมูล ทำการวิเคราะห์ฟังก์ชันความสัมพันธ์ในเวลา และหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของอนุภาคคอลลอยด์ ผลการศึกษาสารคอลลอยด์ตัวอย่างซึ่งเป็น น้ำ:น้ำนม อัตราส่วน 200:0.3 และ คอลลอย์ของ TiO_2 ในน้ำ ที่อัตราส่วน 2.5 ppm 5.0 ppm และ 25 ppm ได้สัมประสิทธิ์การแพร่ดังนี้ 8.69, 71.89, 70.52 และ 59.61 $\mu m^2/s$ ตามลำดับ ดังนั้นระบบที่จัดตั้งขึ้นสามารถทำการศึกษาการแพร่ของอนุภาคคอลลอยด์ได้

คำสำคัญ: การกระเจิงแสงแบบไดนามิกส์ สัมประสิทธิ์การแพร่ ฟังก์ชันความสัมพันธ์ในเวลา

Abstract

In this research has been established on the system of dynamics light scattering and time correlation function analysis in order to study the diffusion of particles. The light source is usage laser diode with wavelength of 650 nm. We measured the scattered light from the sample by using a photodiode detector and a digital oscilloscope to record the signal. The colloidal samples are milk colloid in water with ratio 200:0.3 and TiO_2 in water with proportion 2.5 ppm, 5.0 ppm and 25 ppm. We analyze time correlation function and the diffusion coefficient of the particles. Base on experimental results, we obtain that the diffusion coefficient of colloidal samples were 8.69, 71.89, 70.52 and 59.61 $\mu m^2/s$, respectively. There for the light scattering system can be used for analyze time correlation function of scattered light and diffusion coefficient of colloidal samples.

Keywords: dynamic light scattering / correlation function / diffusion coefficient

***Corresponding author. E-mail:** kachaind@nu.ac.th

บทนำ

การกระเจิงแสงแบบไดนามิกส์ (dynamic light scattering; DLS) (Brown, 1993) เป็นหนึ่งในเทคนิคที่นิยมมากที่สุดในการวิเคราะห์ ลักษณะของระบบสารคอลลอยด์ สารแขวนลอย ซึ่ง DLS วัดความผันผวนของแสงกระเจิงพร้อมกับช่วงเวลาที่เกิดขึ้นจากแสงที่ผ่านดัชนีหักเหของสารประกอบเชิงซ้อนที่นำมาวิเคราะห์ และหัววัดความเข้มแสงกระเจิงที่ได้จะขึ้นกับส่วนกลับของเวกเตอร์แสงกระเจิง ในกรณีของอนุภาคคอลลอยด์ความเข้มความผันผวนของแสงกระเจิงจะเกิดขึ้นอย่างเด่นชัดเนื่องจากการเคลื่อนที่แพร่กระจายตัวของอนุภาคคอลลอยด์ หรือขนาดของอนุภาคนั้นขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ในเวลา (time correlation function) ระหว่างสัมประสิทธิ์การกระจายตัวและขนาดของอนุภาค DLS เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความสะดวกสบายและเป็นวิธีที่ไม่ทำลายหรือเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาค ซึ่งเทคนิคนี้มีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะของอนุภาคคอลลอยด์ที่ครอบคุมขนาดในช่วงกว้างจากขนาดไม่กี่นาโนเมตรไปจนถึงขนาดหลายไมโครเมตร ยิ่งไปกว่านั้น DLS ถูกใช้บ่อยครั้ง สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาของความเข้มข้น ความเป็นคอลลอยด์ หรือความเป็นแขวนลอยที่เปลี่ยนแปลงของสารตัวอย่าง และยังสามารถใช้สังเกตการรวมตัวหรือการกลายเป็นเจลได้ อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้กับระบบอื่นได้อีกมากในทางด้านอุตสาหกรรมที่มีความสัมพันธ์และมีความซับซ้อนมากขึ้นเนื่องจากความเข้มแสงกระเจิงในสารละลายที่ไม่เจือปนการวิเคราะห์

เทคนิคหนึ่งที่สำคัญสำหรับการหาการกระจายตัวของอนุภาคในของเหลวคือ การกระเจิงแสงแบบไดนามิกส์ ซึ่งเป็นเทคนิคที่วัดได้อย่างรวดเร็ว ใช้สารตัวอย่างในปริมาณที่น้อย และค่าความคาดเคลื่อนมีค่าต่ำในการทดลองซ้ำหลายครั้ง เทคนิคนี้จะใช้ในการวัดการกระเจิงแสงของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 5 ไมคอนที่มีการเคลื่อนที่อย่างอิสระ (randomly diffuse) ไปทั่วทั้งตัวกลาง ในขณะเดียวกันอนุภาคเหล่านี้ก็จะทำให้เกิดการกระเจิงแสงซึ่งอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าจะเคลื่อนที่ช้ากว่าจะสามารถกระเจิงแสงออกมาได้นานกว่าอนุภาคขนาดเล็กซึ่งจะเคลื่อนที่เร็วกว่าแสงที่กระเจิงออกมาจะมีความรวดเร็วกว่า ทั้งนี้อนุภาคทั้ง 2 นี้ต้องอยู่ในสภาวะเดียวกันจึงจะเปรียบเทียบกันได้

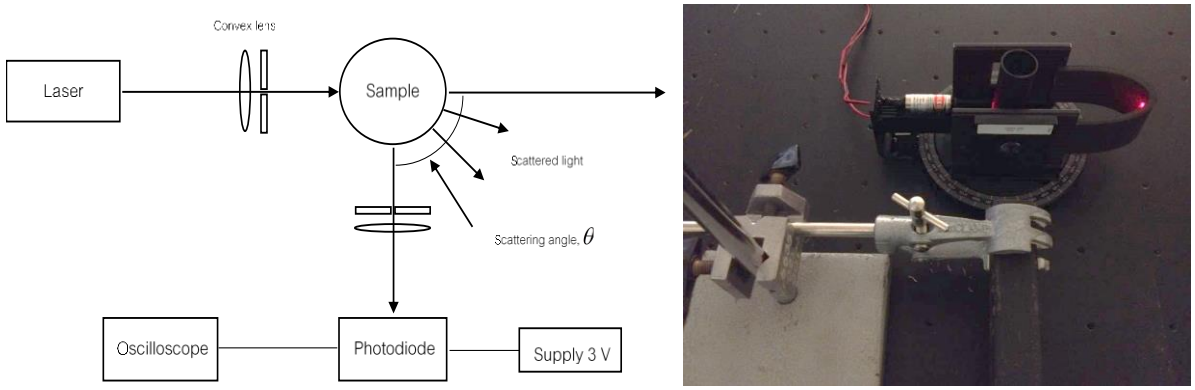
ตัวอย่างการศึกษาวิจัยของ (Zimbone *et al*., 2012) โดยใช้เทคนิคการกระเจิงแสงแบบไดนามิกส์นี้ มีศึกษาทั้งการแพร่ของอนุภาคในสารประกอบต่างๆ รวมไปถึงเทคนิคนี้ยังสามารถหาขนาดอนุภาคของสารประกอบนั้นๆ ซึ่งได้มีศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคนาโนของทอง และหาขนาดของอนุภาคนาโนของทองออกมาได้ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ความยาวคลื่นเดียวที่มีความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร และใช้เครื่อง correlator ในการคำนวณหาฟังก์ชันความสัมพันธ์ในเวลา (Yecang Tang *et al*., 2012) ได้ทำการศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง soybean peroxidase and poly (N-isopropylacrylamide-co-sodium styrene sulfonate) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติและใช้เทคนิคการวัดการกระเจิงแสงของเลเซอร์ He-Ne ความยาวคลื่น 632 นาโนมตร ที่เป็นผลเนื่องมากจากอุณหภูมิ ค่า pH และความแข็งแรงของพันธะไอออนิก ต่อมา (Li *et al*., 2014) ได้มีการศึกษาลักษณะของการแพร่และหาขนาดของอนุภาคซึ่งพัฒนาระบบโดยการใช้เครื่องนับโฟตอน (photon counter) มาแทนเครื่อง correlator ที่มีราคาสูง ซึ่งช่วยลดต้นทุนการจัดตั้งระบบวัดขนาดอนุภาคลงได้ และได้ใช้ระบบหัววัดเป็น photo multiplier tube (PMT) แต่อย่างไรก็ตามหัววัด PMT และเครื่องนับโฟตอนนี้ก็ยังมีราคาที่สูงอยู่ (Chengze Xu *et al*., 2014) ศึกษาและจัดตั้งระบบเพื่อวิเคราะขนาดของอนุภาค (27, 80, และ 352 นาโนเมตร) โดยใช้เลเซอร์เป็นต้นกำเนิดแสง แต่ใช้กล้องดิจิตอลและคอมพิวเตอร์บันทึกภาพและวิเคราะห์ผลแทนหัววัดเป็น photo multiplier tube (PMT)

งานวิจัยนี้จึงได้นำเทคนิคการกระเจิงแสงแบบไดนามิกส์มาใช้ในการศึกษาการแพร่ของอนุภาค (Dalgleish และ Hallett, 1995) โดยใช้ระบบหัววัดเป็นโฟโตไดโอด (photo diode) และเครื่องออสซิลโลสโคปในการวัดและบันทึกความ

เข้มแสงกระเจิงจากสารตัวอย่าง ซึ่งนำมาวิเคราะห์หาฟังก์ชันความสัมพันธ์ในเวลา (Bhattarai และ Wilczura-Wachnik, 2015) ของความเข้มแสงกระเจิงเพื่อนำไปสู่การหาสัมประสิทธิ์การแพร่และการหาขนาดของอนุภาคได้ซึ่งเครื่องมือสำเร็จรูปในการวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การแพร่และขนาดของอนุภาคนั้นมีราคาที่ค่อนข้างสูงและสามารถใช้งานได้เพียงด้านเดียวแต่สำหรับงานวิจัยนี้เก็บจากข้อมูลการกระเจิงแสงโดยตรงจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายด้านเช่น สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งทางด้านการวิเคราะห์สภาพน้ำ อุตสาหกรรมสี หรือแม้กระทั่งการวิเคราะห์เกี่ยวกับยาและเครื่องสำอาง รวมไปถึงช่วยลดต้นทุนในการจัดซื้อเครื่องมือสำเร็จรูปได้

วิธีดำเนินการวิจัย

ระบบตรวจวัดแสงกระเจิงแบบไดนามิกส์ของการแพร่ของอนุภาคคอลลอยด์ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ขนาดกำลังไฟฟ้า 5 มิลลิวัตต์ ซึ่งจัดตั้งให้อยู่ในระนาบเดียวกันกับเลนส์ตัวที่ 1 เพื่อรวมลำแสงเลเซอร์ไปยังกึ่งกลางของหลอดบรรจุสารตัวอย่างที่วางห่างเป็นระยะ 37.75 มิลลิเมตร และใช้หัววัดแสงเป็นโฟโตไดโอดที่สามารถต่อเข้ากับอุปกรณ์จ่ายไฟขนาด 2.7 ถึง 36 โวลต์ วางทำมุม 90 องศากับแนวลำแสงซึ่งเป็นมุมของแสงกระเจิง โดยมีเลนส์ตัวที่ 2 วางอยู่หน้าหัววัดโฟโตไดโอด เพื่อรวมแสงกระเจิงจากสารตัวอย่างมายังหัววัดซึ่งวางห่างจากกึ่งกลางของหลอดบรรจุสารตัวอย่างเป็นระยะ 75.5 มิลลิเมตร และใช้เครื่องดิจิตอลออสซิลโลสโคป ในการบันทึกและเก็บข้อมูลความเข้มของแสงที่กระเจิงออกมา การจัดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดแสดงดังภาพ 1(a) และอุปกรณ์ที่จัดตั้งทั้งหมดเหล่านี้ยกเว้นเครื่องดิจิตอลออสซิลโลสโคป อยู่ภายในกล่องทึบแสงเพื่อลดแสงรบกวนจากภายนอก แสดงดังภาพ 1(b)



(a) (b)

ภาพที่ 1 การจัดตั้งระบบตรวจวัดแสงกระเจิง (a)ไดอะแกรม (b) ภาพจริง

การเตรียมคอลลอยด์ของน้ำนม ในอัตราส่วน 200:0.3 ซึ่งใช้น้ำสะอาด 200 มิลลิลิตร และนม 0.3 มิลลิลิตร และโดยเก็บข้อมูลเป็นค่าความเข้มแสงกระเจิง สำหรับการเตรียมคอลลอยด์ของTiO_2 โดยเริ่มจากการบดให้เป็นผงละเอียดและนำมาเตรียมที่อัตราส่วน 2.5 ppm 5.0 ppm และ 25 ppm (ใช้ผงTiO_2 0.1 กรัมละลายในน้ำ 4000 มิลลิลิตร และนำสารคอลลอยด์ที่ได้มา 10 มิลลิลิตรเจือจางกับน้ำ 100 มิลลิลิตร) โดยสารคอลลอยด์ทั้งหมดใช้กำหนดค่าเวลาที่เก็บ 500,000 ข้อมูลต่อ 1.25 มิลลิวินาที ซึ่งแต่ละจุดข้อมูลความเข้มแสงกระเจิงที่บันทึกได้จากเครื่องมีความต่างของเวลาที่ 2.5 นาโนวินาที

นำข้อมูลที่ได้จากเครื่องดิจิตอลออสซิลโลสโคปไปหาฟังก์ชันความสัมพันธ์ในเวลาโดยใช้ชุดคำสั่งของโปรแกรมแมทแลปเป็นตัวช่วยวิเคราะห์ และทำการหาสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของอนุภาค

สร้างฟังก์ชันความสัมพันธ์ในเวลา $G^{(2)}(\tau)$ โดยการนำข้อมูลจาการทดลองมาผ่านการวิเคราะห์โดยการใช้กระบวนการทางสถิติ ซึ่งค่า $G^{(2)}(\tau)$ แสดงดังสมการ (1)

$$G^{(2)}(\tau) = < I(t)I(t+\tau) > \tag{1}$$

โดยที่ $I(t)$ คือ ความเข้มแสงกระเจิงที่วัดได้ ณ เวลา t

$I(t+\tau)$ คือ ความเข้มแสงแสงกระเจิง ณ เวลา $t+\tau$

ฟังก์ชันความเข้มแสงกระเจิงสัมพัทธ์สัมพันธ์กับฟังก์ชันสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ $g^{(1)}(\tau)$ แสดงดังสมการ (2)

$$G^{(2)}(\tau) = A\left[1 + \beta\left|g^{(1)}(\tau)\right|^2\right] \tag{2}$$

โดยที่ A คือ ค่าตัวประกอบในการทำให้เป็นมาตรฐาน

β คือ ค่าตัวประกอบเครื่องมือ

สำหรับตัวอย่างที่มีการกระจายตัวฟังก์ชัน $g^{(1)}(\tau)$ สัมพันธ์กับอัตราการเสื่อมสลาย Γ แสดงดังสมการ (3)

$$\left|g^{(1)}(\tau)\right|^2 = e^{-2\Gamma\tau} \tag{3}$$

อัตราการเสื่อมสลาย Γ สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาคทรงกลมแสดงดังสมการ (4)

$$\Gamma = D\left|\vec{k}\right|^2 \tag{4}$$

โดยที่ $\vec{k}$ คือ เวคเตอร์การกระเจิง (Scattering Vector)

ดังนั้นฟังก์ชันความสัมพันธ์ในเวลาของความเข้มแสงกระเจิงสามารถเขียนแสดงได้ดังสมการ (5)

$$\begin{aligned} G^{(2)}(\tau) &= A + Be^{-2\Gamma\tau} \\ &= A + Be^{-2D\left|\vec{k}\right|^2\tau} \end{aligned} \tag{5}$$

โดยที่ A และ B คือ ค่าตัวประกอบในการทำให้เป็นมาตรฐานของระบบ

เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคทรงกลม คำนวณได้จากการเปลี่ยนรูปสมการสโตกสและไอน์สไตน์แสดงดังสมการ (6) โดยตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าสารตัวอย่างประกอบด้วยอนุภาคทรงกลมที่ไม่ทำปฏิกิริยาต่อกัน

$$d = \frac{K_B T}{3\pi\eta D} \tag{6}$$

โดยที่ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่

η คือ ความหนืดของตัวกลาง

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคทรงกลม

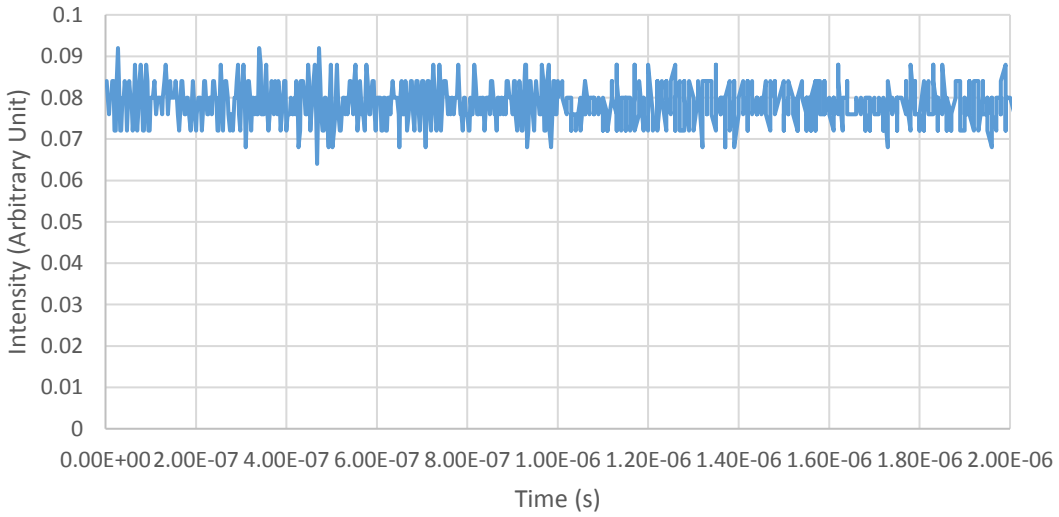
K_B คือ ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann constant)

T คือ อุณหภูมิ (องศาเคลวิน)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ตัวอย่างข้อมูลความเข้มแสงกระเจิงที่ได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป

ข้อมูลความเข้มแสงกระเจิงที่ได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป เมื่อให้แสงเลเซอร์ผ่านสารตัวอย่างซึ่งเป็นสารคอลลอยด์คือน้ำ:นม ที่มีอัตราส่วน 200:0.3 โดยเก็บข้อมูลเป็นค่าความเข้มแสงกระเจิง โดยกำหนดค่าเวลาที่เก็บ 500,000 ข้อมูลต่อ 1.25 มิลลิวินาที ผลการทดลองแสดงดังภาพ 2 ซึ่งแต่ละจุดข้อมูลความเข้มแสงกระเจิงที่บันทึกได้จากเครื่องมีความต่างของเวลาที่ 2.5 นาโนวินาที



ภาพที่ 2 แสดงค่าความเข้มแสงที่เก็บได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป

2. การหาฟังก์ชันความสัมพันธ์ในเวลาด้วยโปรแกรมแมทแลป

นำชุดข้อมูลที่บันทึกได้จากเครื่องดิจิตอลออสซิลโลสโคปวิเคราะห์หาฟังก์ชันความสัมพันธ์ในเวลา โดยใช้ชุดคำสั่งของโปรแกรมแมทแลปในการช่วยคำนวณ เพื่อนำไปสู่การหาสัมประสิทธิ์การแพร่ต่อไป

ใช้โปรแกรมแมทแลปในการเขียนคำสั่งเฉลี่ยความเข้มแสงกระเจิงในช่วงจุดข้อมูลที่กำหนดจากข้อมูลทั้งหมด ซึ่งสามารถเขียนได้ดังตัวอย่างคำสั่งที่แสดงดังต่อไปนี้

```
for     I = 1:10000;
            YY = Y(I+((I-1)*49):I*50);
            WB(I,ii) = mean(YY)*max(XB);
End
```

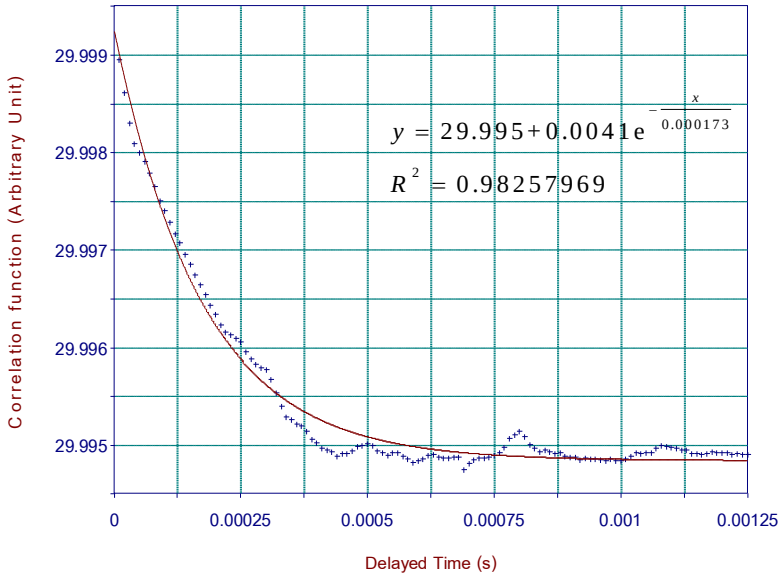
จากคำสั่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ให้โปรแกรมแมทแลปเฉลี่ยความเข้มแสงกระเจิงครั้งละ 50 จุด จากข้อมูลทั้งหมด 500,000 จุด เป็นจำนวน 10,000 ครั้ง จากนั้นได้ชุดข้อมูลที่มีขนาด 10000 จุด ในเวลาเท่าเดิมที่ 1.25 มิลลิวินาที และวิเคราะห์หาความเหมาะสมในการเฉลี่ย โดยกำหนดการหาค่าเฉลี่ยต่อจำนวนข้อมูลที่ 25, 50, 75, 80 และ 100 จุด

คำสั่งวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ในเวลาของความเข้มแสงกระเจิงที่วัดและบันทึกได้จากดิจิตอลออสซิลโลสโคป ซึ่งสามารถเขียนได้ดังตัวอย่างคำสั่งที่แสดงดังต่อไปนี้

```
for     i = 1:2000;
            X = WBB(1:498000);
            W = WBB(i:i+497999);
            V(i,iii) = (X*W.');
End
```

3.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของอนุภาค

หลังจากได้ข้อมูลที่ผ่านการวิเคราะห์ฟังก์ชันความสัมพันธ์ในเวลา นำข้อมูลที่ได้ มาพล๊อตกราฟเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ในเวลาด้วยโปรแกรม Tablecurve ดังแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ฟังก์ชันความสัมพันธ์ในเวลาจากการกระเจิงแสงของคอลลอยด์น้ำนม 200:0.3

สมการที่ได้จากการวิเคราะห์ฟังก์ชันความสัมพันธ์ในเวลาสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 7 ซึ่งนำไปเทียบกับสมการที่ 5 สำหรับหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาค โดยที่ $G^{(2)}(\tau)$ คือ ฟังก์ชันความสัมพันธ์ในเวลา

$$y = A + Be^{-\frac{x}{c}} \tag{7}$$

$$G^{(2)}(\tau) = A + Be^{-2DK^2\tau}$$

$$K = \left(\frac{4\pi n}{\lambda}\right)\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

โดยที่ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาค

n คือ ดัชนีหักเหของสารตัวอย่าง คือ น้ำมีค่า 1.33

λ คือ ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง มีค่า 650 นาโนเมตร

θ คือ มุมของแสงกระเจิง มีค่า 90 องศา

เมื่อทำการคำนวณจากการเทียบสมการที่ 5 และสมการที่ 7 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาคสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 8 เมื่อกำหนดให้ $x = \tau$

$$D = \frac{1}{2K^2c} \tag{8}$$

จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาคโดยใช้สารตัวอย่างเป็นสารคอลลอยด์มีค่าเท่ากับ 8.69 $\mu m^2/s$

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ในเวลาของความเข้มแสงกระเจิงจากการพล็อตกราฟ โดยกำหนดการหาค่าเฉลี่ยต่อจำนวนข้อมูลที่ 25, 50, 75, 80 และ 100 จุดได้สัมประสิทธ์ของสมการและค่า R^2 ดังตารางต่อไปนี้

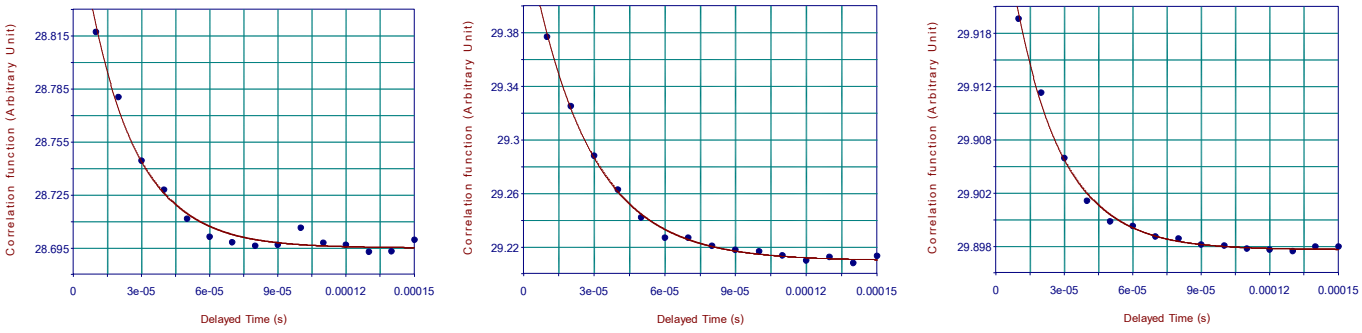
ตารางที่ 1 แสดงสัมประสิทธ์และค่า R-Squared ของสมการ

จำนวนจุดข้อมูลที่นำมาเฉลี่ย	25	50	75	80	100
R-Squared (R^2)	0.96	0.97	0.98	0.96	0.96
A	29.99	29.99	29.99	29.99	29.99
B	0.0041	0.0042	0.0042	0.0043	0.0043
c	0.00016	0.00016	0.00017	0.00019	0.00016

จากตารางแสดงสัมประสิทธ์และค่า R-Squared ของสมการ แสดงให้เห็นว่าการกำหนดการหาค่าเฉลี่ยต่อจำนวนข้อมูลที่ 75 จุด และนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในเวลาของความเข้มแสงกระเจิงให้ค่า R-Squared สูงที่สุด ซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวของข้อมูลรอบค่าเฉลี่ยตามหลักกำลังสองน้อยสุดได้ใกล้เคียงมากที่สุด ดังนั้นการกำหนดการหาค่าเฉลี่ยต่อจำนวนข้อมูลที่ 75 จุด จึงมีความเหมาะสมที่สุด

4. การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของอนุภาคคอลลอยด์ TiO_2

ในสารตัวอย่างที่อัตราส่วน 2.5 ppm 5.0 ppm และ 25 ppm จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในเวลาของความเข้มแสงกระเจิง จากการกำหนดการหาค่าเฉลี่ยต่อจำนวนข้อมูลที่ 75 จุด และข้อมูลที่บันทึกได้จากเครื่องดิจิตอลออสซิลโลสโคป ซึ่งสามารถพล็อตกราฟด้วยโปรแกรม Tablecurve แสดงดังภาพที่ 4(a) 4(b) และ 4(c) ตามลำดับ และได้ความสัมพันธ์เป็นไปดังสมการที่ 7



(a) (b) (c)

ภาพที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ในเวลาของความเข้มแสงกระเจิงจาก TiO_2 ที่อัตราส่วนต่างๆ (a) 2.5 ppm (b) 5.0 ppm และ (c) 25 ppm

จากฟังชันก์ความสัมพันธ์ในเวลาซึ่งสามารถเขียนแสดงค่าคงที่ของสมการ ซึ่ง A และ B คือ ค่าตัวประกอบในการทำให้เป็นมาตรฐานของระบบ ค่า R-Squared ของสมการ และสัมประสิทธ์ c ซึ่งนำไปสู่การหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาค D ได้ ดังแสดงในตารางที่ 2 และจากผลการทดลองพบว่าเมื่ออัตราส่วนของคอลลอยด์เพิ่มมากขึ้นทำให้

อนุภาคมีอัตราการแพร่กระจายที่ช้าลง ซึ่งเมื่อเทียบกับการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาคนาโนทองคำ (Chengze Xu *et al,*, 2014) อยู่ในระดับ $10^{-8} cm^2/s$ เช่นเดียวกับค่าที่ผู้วิจัยคำนวณได้

ตารางที่ 2 แสดงค่าคงที่ในฟังก์ชันก์ความสัมพันธ์ในเวลาและสัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาค D

อัตราส่วน (ppm)	A	B	C $(\times 10^5)$	R-Squared (R^2)	D $(\mu m^2/s)$
2.5	28.69	0.201	2.13	0.98	71.89
5.0	29.20	0.250	2.52	0.99	70.52
25.0	29.89	0.035	2.09	0.99	59.61

สรุปผลการวิจัย

จากการจัดตั้งระบบการศึกษาการแพร่ของอนุภาคคอลลอยด์จากการวิเคราะห์ฟังก์ชันความสัมพันธ์ในเวลาของความเข้มแสงกระเจิง โดยอาศัยหลักการกระเจิงแสงแบบไดนามิกส์จากสารคอลลอยด์ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ความยาวคลื่นเดียวที่มีความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ใช้หัววัดแสงโฟโตไดโอดวัดแสงกระเจิงที่มุม 90 องศา ใช้เครื่องดิจิตอลออสซิลโลสโคปในการบันทึกและเก็บข้อมูลความเข้มของแสงที่กระเจิง นำมาวิเคราะห์หาฟังชันความสัมพันธ์ในเวลาด้วยชุดคำสั่งในโปรแกรมแมทแลป และพล็อตกราฟจากโปรแกรม Tablecurve โดยใช้คอลลอยด์น้ำนม 200:0.3 วิเคราะห์ความเหมาะสมในการกำหนดการหาค่าเฉลี่ยต่อจำนวนข้อมูลได้ดีที่สุดที่ 75 จุด และหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาคน้ำนมได้ 8.69 $\mu m^2/s$ และ หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของอนุภาคคอลลอยด์ TiO_2 ในสารตัวอย่างที่อัตราส่วน 2.5 ppm 5.0 ppm และ 25 ppm ได้เท่ากับ 71.89, 70.52, และ 59.61 $\mu m^2/s$ ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเมื่ออัตราส่วนของคอลลอยด์เพิ่มมากขึ้นทำให้อนุภาคมีอัตราการแพร่กระจายที่ช้าลง ดังนั้นระบบที่จัดตั้งขึ้นสามารถทำการศึกษาการแพร่ของอนุภาคคอลลอยด์ได้และในอนาคตอาจสามารถนำไปใช้เป็นระบบเพื่อหาขนาดของอนุภาคได้ ซึ่งเครื่องมือสำเร็จรูปในการวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การแพร่และขนาดของอนุภาคนั้นมีราคาที่ค่อนข้างสูงและสามารถใช้งานได้เพียงด้านเดียวแต่สำหรับงานวิจัยนี้เก็บจากข้อมูลการกระเจิงแสงโดยตรงจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายด้าน เช่น สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งทางด้านการวิเคราะห์สภาพน้ำ อุตสาหกรรมสี หรือแม้กระทั่งการวิเคราะห์เกี่ยวกับยาและเครื่องสำอางรวมไปถึงช่วยลดต้นทุนในการจัดซื้อเครื่องมือสำเร็จรูปได้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวรที่ให้การสนับสนุนการวิจัย อีกทั้งสนับสนุนทางด้านวัสดุอุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย รวมถึงคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์จากบุคลากรของภาควิชาทุกท่านและขอขอบคุณโครงการพัฒนากำลังคนด้านวิทยาศาสตร์ (ทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย) ของนายรัฐธนินท์ วัฒนะศิริโกศล ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Bhattarai, A., & Wilczura-Wachnik, H. (2015). Size and diffusion phenomena of AOT/alcohol/water system in the presence of morin by dynamic light scattering. International Journal of Pharmaceutics, *478*(2), 610-616.

Brown, W. (1993).,Edit., Dynamic Light Scattering, Oxford Science Publications.

Chengze Xu, Xiaoshu Cai, Jie Zhang, Lili Liu. (2014). Fast nanoparticle sizing by image dynamic light scattering. Particuology*, 19,* 82-85.

Dalgleish, D. G., & Hallett, F. R. (1995). Dynamic light scattering: applications to food systems. Food Research International, *28*(3), 181-193.

Li, Z., Wang, Y., Shen, J., Liu, W., & Sun, X. (2014). The measurement system of nanoparticle size distribution from dynamic light scattering data. Optics and Lasers in Engineering, *56*(1), 94-98.

Yecang Tang, Jixiong Duan, Jianhua Wu. (2012). A laser light scattering study of complex formation between soybean peroxidase and poly (N-isopropylacrylamide-co-sodium styrene sulfonate). Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, *395*, 82-87.

Zimbone, M., Calcagno, L., Baeri, P., Messina, G. C., & Compagnini, G. (2012). Dynamic light scattering in gold colloids prepared by laser ablation in water. Applied Surface Science, *258*(23), 9246-9249.