



การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะโดยการระเหยด้วยเลเซอร์ในน้ำ  
Synthesis of Metal Nanoparticles by Laser Ablation in Water

นางสาวสุปราณี เนาวกุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อปริญญาโท  
ชื่อ นามสกุล  
ชื่อปริญญา  
สาขาวิชา  
คณะ  
อาจารย์ที่ปรึกษา

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะโดยการระเหยด้วยเลเซอร์ในน้ำ  
นางสาวสุปราณี เนาวกุล  
ปริญญาตรี  
วัสดุอุตสาหกรรม  
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
1. จิระศักดิ์ ธาระจักร์  
2. ภูมิรัตน์ นวรัตน์

คณะกรรมการสอบได้ให้ความเห็นชอบปริญญาโทฉบับนี้แล้ว

ปิยะพงษ์ ปานแก้ว

ประธานกรรมการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปิยะพงษ์ ปานแก้ว

Dr. Omit.

กรรมการ

อาจารย์ดวงฤทัย นิคมรัฐ

จ.ส.ก.

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์จิระศักดิ์ ธาระจักร์

ภูมิรัตน์ นวรัตน์

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

อาจารย์ภูมิรัตน์ นวรัตน์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
อนุมัติให้นับปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

ชื่อปริญญาบัตร	การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะโดยการระเหยด้วยเลเซอร์ในน้ำ
ชื่อนักศึกษา	นางสาวสุปราณี เนาวกุล
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์วัสดุอุตสาหกรรม
คณะ	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ที่ปรึกษาปริญญาบัตร	อาจารย์จรัสศักดิ์ ธาระจักร์ และ อาจารย์ภูมิรัตน์ นวรัตน์
ปีการศึกษา	2562

### บทคัดย่อ

วัสดุนาโนเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งทางด้านการแพทย์ ด้านความงาม ด้านอุตสาหกรรม และด้านอื่นๆอีกมากมาย เมื่ออนุภาคมีขนาดลดลงจำนวนอะตอมที่อยู่บริเวณผิวหน้าและสัดส่วนของผิวสัมผัสต่อปริมาตรของวัสดุจึงเพิ่มขึ้นทำให้สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติทางแสงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย การสังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนมีหลายวิธี เช่น การบด (Grinding) ปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reaction) ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Method) และ การระเหิดด้วยเลเซอร์ (Laser ablation) เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะโดยวิธีการการระเหิดด้วยเลเซอร์ เพราะการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้ไม่ทำให้เกิดของเสียที่เป็นอันตราย พร้อมทั้งสะดวกและรวดเร็ว จากผลการวิจัยพบว่าการใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ 6V ในการสังเคราะห์อนุภาคโลหะนาโนได้ขนาดอนุภาคโลหะนาโนเล็กที่สุด และการสังเคราะห์อนุภาคโลหะนาโนด้วยศักย์ไฟฟ้า 8V และ 10V ได้อนุภาคโลหะนาโนที่ใหญ่ขึ้นตามลำดับ

จึงสรุปได้ว่าศักย์ไฟฟ้ามีผลต่อขนาดของอนุภาคโลหะนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยการระเหิดด้วยเลเซอร์

**คำสำคัญ :** การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของโลหะ, การระเหยด้วยเลเซอร์

<b>Project title</b>	Synthesis metal nanoparticles in water by laser ablation
<b>Author</b>	Supranee Naowakul
<b>Major program</b>	Industrial Materials Science
<b>Faculty</b>	Science and Technology
<b>Project Advisors</b>	Mr. Jirasak Tharajak and Mr. Poomirat Nawarat
<b>Academic Year</b>	2019

## ABSTRACT

Nanomaterials are widely used in many applications such as medicine, cosmetic, industry, and other. When the size of the particle is reduced, the number of atoms on the surface and the ratio between surface area to volume of the material increase result in the enhancement of the material's physical, magnetic and optical properties. There are many methods to synthesize the nanoparticle, such as grinding, chemical reaction, electrochemical method, and laser ablation. In this research, laser ablation was chosen to synthesize the metal nanoparticles because this method is quick and convenient and does not produce hazardous waste. The results show that the laser with 6V electric potential could synthesize the metal nanoparticles with the smallest size. The metal nanoparticles with larger size were obtained when higher electrical potential of 8V and 10V were used.

In conclusion, the electric potential of the laser affects the size of the metal nanoparticle obtained from laser ablation.

**Keywords:** synthesis of metal nanoparticles, laser ablation

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการครั้งนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณ อาจารย์จิระศักดิ์ ธาระจักร์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการและอาจารย์ภูมิรัตน์ นวรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วมที่ช่วยให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือ ชี้แนะแนวทางแก้ไขปัญหาดังกล่าวตลอดระยะเวลาที่จัดทำโครงการนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณอาจารย์สาขาวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครทุกท่านที่ได้ให้ความรู้และคำปรึกษาชี้แนะ และมีส่วนช่วยเหลือในโครงการของข้าพเจ้า

ขอขอบคุณแหล่งทุนวิจัยโครงการส่งเสริมสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมเพื่อคนรุ่นใหม่ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ขอขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวที่ให้คำปรึกษาและกำลังใจที่ดีในการทำโครงการฉบับนี้มาโดยตลอดจนโครงการนี้สำเร็จ สุดท้ายขอขอบคุณเพื่อนๆและน้องๆทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆคอยให้กำลังใจคอยเป็นห่วงตลอดจนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นางสาวสุปราณี เนาวกุล



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 ระยะเวลาการดำเนินงาน	3
2. แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 เลเซอร์	4
2.2.1 เลเซอร์ (laser)	4
2.2.2 ความเป็นมาของเลเซอร์	5
2.2.3 คุณสมบัติของเลเซอร์	6
2.2.4 การประยุกต์ใช้งานเลเซอร์	7
2.3 Laser ablation	9
2.3.1 Laser ablation	9
2.3.2 การประยุกต์ใช้งาน	9
2.3.3 ข้อดี	10
2.3.4 ข้อเสีย	10
2.4 คุณสมบัติทางเคมีของ ทอง (Au) เงิน (Ag) และทองแดง (Cu)	10

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 ทองคำ (gold)	10
2.4.2 เงิน (silver)	12
2.4.3 ทองแดง (copper)	13
2.5 Particle Size Analyzer	14
2.5.1 Particle Size Analyzer	14
2.5.2 คุณลักษณะเฉพาะ	14
2.6 Ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis)	14
2.6.1 Ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis)	14
2.6.2 คุณลักษณะ	15
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
3. วิธีดำเนินการ	22
3.1 บทนำ	22
3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	22
3.3 การเตรียมชิ้นงาน	22
3.3.1 การเตรียมชิ้นงานทอง (Au)	22
3.3.2 การเตรียมชิ้นงานเงิน (Ag)	23
3.3.3 การเตรียมชิ้นงานทองแดง (Cu)	23
3.4 กระบวนการเลเซอร์แอบเบลชัน (Laser ablation)	24
3.4.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคโลหะนาโนด้วยเลเซอร์แอบเบลชัน	24
3.5 การตรวจสอบ	25
3.5.1 Particle Size Analyzer	25
3.5.2 Ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis)	26
4. ผลการทดลอง และอภิปรายผล	28
4.1 บทนำ	28
4.2 การสังเกตด้วยตาเปล่า	28
4.3 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนในสารสังเคราะห์	30

## สารบัญ (ต่อ)

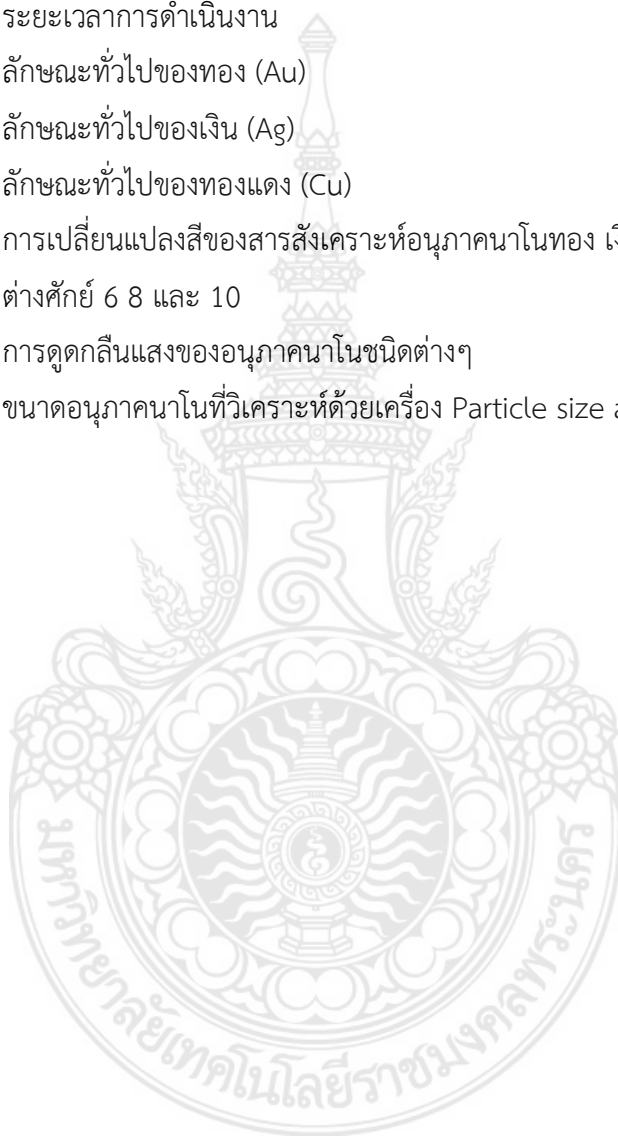
	หน้า
4.4 ขนาดของอนุภาคนาโนสังเคราะห์	33
4.5 แบบจำลองกลไกการเกิดอนุภาคนาโนที่มีการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์	35
5. สรุปผล และข้อเสนอแนะ	36
5.1 สรุปผลที่ได้รับจากโครงการ	36
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	36
5.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	36
5.4 ข้อเสนอแนะ	37
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	
ประวัติการศึกษา	





## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ขอบเขตการศึกษา	2
1.2	ระยะเวลาการดำเนินงาน	3
2.1	ลักษณะทั่วไปของทอง (Au)	11
2.2	ลักษณะทั่วไปของเงิน (Ag)	12
2.3	ลักษณะทั่วไปของทองแดง (Cu)	13
4.1	การเปลี่ยนแปลงสีของสารสังเคราะห์อนุภาคนาโนทอง เงิน และทองแดง ที่ความต่างศักย์ 6 8 และ 10	28
4.2	การดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนชนิดต่างๆ	30
4.3	ขนาดอนุภาคนาโนที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Particle size analyzer	33



## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ซี.เอช. ทาวน์ส (C.H. Townes)	5
2.2	โอดอร์ เอช ไมแมน (Theodore H.Maiman)	6
2.3	ส่วนประกอบของกระบวนการ laser ablation in water	9
2.4	กราฟการกระจายขนาดของอนุภาคนาโน	17
2.5	กราฟการกระจายขนาดของอนุภาคนาโน	18
2.6	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทางน้ำอย่างธรรมชาติ	19
2.7	ฮิสโทแกรมของขนาดอนุภาค	20
2.8	UV-Spectrum ของทองแดง	21
3.1	ทอง (Au)	22
3.2	เงิน (Ag)	23
3.3	ทองแดง (Cu)	23
3.4	เครื่องวิเคราะห์อนุภาค (Particle Size Analyzer) ยี่ห้อ Horiba รุ่น SZ-100	25
3.5	Ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UV-1700	26
4.1	การดูดกลืนแสงของสารอนุภาคนาโนชนิดต่างๆ	32
4.2	ขนาดอนุภาคนาโนสังเคราะห์ที่สภาวะในการสังเคราะห์ต่างๆ	34
4.3	กลไกการเกิดอนุภาคนาโนจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วย laser ablation	35

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันโครงสร้างระดับนาโนได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการจัดการ การสร้าง หรือการสังเคราะห์วัสดุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร (1-100 นาโนเมตร) เนื่องจากวัสดุมีอนุภาคขนาดเล็กจึงส่งผลให้จำนวนอะตอมที่อยู่บริเวณผิวหน้าและสัดส่วนของผิวสัมผัสต่อปริมาตรของวัสดุเพิ่มขึ้นทำให้สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติทางแสงเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย แตกต่างจากวัสดุที่มีขนาดใหญ่จึงทำให้นาโนเทคโนโลยีมีบทบาทต่อการดำเนินชีวิตด้านต่างๆในปัจจุบันมากขึ้น เช่น เทคโนโลยีสารสนเทศ การแพทย์และสาธารณสุข วัสดุและการผลิตพลังงานและสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

กระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่องเพื่อความต้องการที่จะได้ขนาดของอนุภาคตามที่ต้องการ การสังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนมีหลายวิธี เช่น การบด (Grinding) ปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reaction) ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Method) โฟโตเคมีสตรี้ (Photochemistry) โซโนเคมีสตรี้ (Sonochemistry) และ การระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser ablation) เป็นต้น ในการวิจัยครั้งนี้การสังเคราะห์อนุภาคนาโนใช้เทคนิคการระเหยด้วยเลเซอร์ เพราะการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้ไม่ทำให้เกิดของเสีย พร้อมทั้งสะดวกและรวดเร็ว วัสดุที่นำมาสังเคราะห์อนุภาคนาโนคือทองแดง เงิน และทอง

อนุภาคนาโนทองแดงเป็นอนุภาคโลหะในระดับนาโนที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้งานในด้านต่างๆ เช่น สารต้านจุลชีพ [1] สารเร่งปฏิกิริยา [2] หมึกพิมพ์ [3] และหมึกนำไฟฟ้า [4] เป็นต้น อนุภาคนาโนเงิน ด้วยขนาดที่เล็กลงมากทำให้ไปเพิ่มพื้นผิวในการสัมผัสกับเชื้อโรคทำให้คุณสมบัติในการขจัดเชื้อโรคเพิ่มประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าเดิมหลายร้อยเท่า เมื่ออนุภาคนาโนเงินสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรีย จะไปเกาะที่ผนังเซลล์และแทรกเข้าไปภายในไปเกาะกับหมู่ -SH (Sulphydryl) ของเอนไซม์ ส่งผลให้เกิดการยับยั้งการเพิ่มจำนวนและการเจริญเติบโตของเชื้อโรคทำให้เชื้อโรคตายในที่สุด และสุดท้ายคือ อนุภาคนาโนทอง มีการใช้ประโยชน์เป็นสารแต่งสีของเนื้อแก้วในงานศิลปะในทวีปยุโรป

มาหลายร้อยปีแล้วโดยบังเอิญ คือศิลปินเองก็ไม่เคยรู้ว่าสิ่งที่ตนใช้เป็นสีนั้นประกอบด้วยอนุภาคทองคำนาโน เนื้อแก้วที่ผสมด้วยอนุภาคทองคำนาโนที่มีขนาดพอเหมาะ เมื่อนำมาขวางทางเดินของแสงอาทิตย์จะเห็นเป็นสีแดงทับทิม (ruby) แก้วชนิดนี้ทางฟิสิกส์เรียกว่าเป็นแก้วไดโครอิก (dichroic glass) ชนิดหนึ่งซึ่งสีของมันเมื่อให้แสงผ่านเป็นคลื่นสีกับเมื่อมันสะท้อนแสง

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการสังเคราะห์อนุภาคโลหะนาโนโดยวิธี Laser ablation

1.2.2 เพื่อศึกษาขนาดของอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์โดยวิธี Laser ablation

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบการสังเคราะห์อนุภาคโลหะนาโนระหว่างแบบปกติและแบบที่ใช้เครื่อง Sonication เข้ามาช่วย

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ตารางที่ 1.1 ขอบเขตการศึกษา

วัสดุ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ทอง (Au)</li> <li>● เงิน (Ag)</li> <li>● ทองแดง (Cu)</li> </ul>
พารามิเตอร์	<ul style="list-style-type: none"> <li>● สารละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์</li> <li>● เวลาในการสังเคราะห์ (30 วินาที)</li> <li>● ศักย์ไฟฟ้า (6V, 8V, 10V)</li> </ul>
การทดสอบ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ทดสอบด้วยตาเปล่า</li> <li>● ทดสอบความสามารถในการดูดกลืนแสง</li> <li>● ขนาดของอนุภาคที่สังเคราะห์</li> </ul>
เครื่องมือ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Ultraviolet–visible spectroscopy (UV-Vis)</li> <li>● Particle Size Analyzer</li> <li>● Sonication</li> <li>● Laser</li> </ul>

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ขนาดของอนุภาคนาโนตามที่ต้องการ (1-100 นาโนเมตร)

1.4.2 ได้วัสดุที่สามารถนำไปใช้งานทางต่างๆ อาทิ ด้านการแพทย์ ด้านความงาม

## 1.5 ระยะเวลาการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.2 ระยะเวลาการดำเนินงาน

กิจกรรม	เดือน			
	พ.ย. 62	ธ.ค. 62	ม.ค. 63	ก.พ. 63
<b>1. การเขียนโครงการวิจัย ประกอบด้วย</b> 1.1 การกำหนดโจทย์/ ปัญหาวิจัย/คำถามวิจัย 1.2 การกำหนดชื่อเรื่อง 1.3 การกำหนดวัตถุประสงค์การวิจัย 1.4 การศึกษารายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้อง	←→			
<b>2. การเสนอเค้าโครงวิจัยเพื่อขออนุมัติดำเนินการ/ขอรับทุนสนับสนุนการวิจัย</b>		←→		
<b>3. การดำเนินงานวิจัยวิจัย</b> 3.1 เก็บข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูล 3.2 วิเคราะห์ข้อมูล 3.3 ปรับปรุงแก้ไขข้อผิดพลาด		←→		
<b>4. การสรุปผลการวิเคราะห์และเขียนรายงานการวิจัย</b> 4.1 จัดทำปฏิญญานិพนธ์			←→	
<b>5. การสรุปรายงานการดำเนินงานวิจัย</b> 5.1 นำเสนอโครงการงาน			←→	

## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ในที่นี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่ใช้ โดยจะอธิบายความสำคัญที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในครั้งนี้ด้วย ทฤษฎีเกี่ยวกับเลเซอร์ (Laser) เลเซอร์เอปเบลชัน (Laser ablation) คุณสมบัติทางเคมีของทอง (Au) เงิน (Ag) และทองแดง (Cu) เครื่องวิเคราะห์อนุภาค (Particle Size Analyser) และ Ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis)

#### 2.2 เลเซอร์

##### 2.2.1 เลเซอร์ (laser)

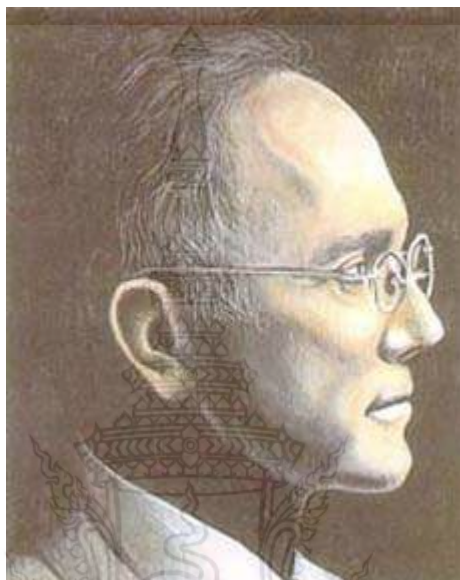
เลเซอร์ (laser) ย่อมาจากคำว่า light amplification by stimulated emission of radiation เป็นอุปกรณ์ที่ให้กำเนิดลำแสงที่มีลักษณะเฉพาะซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่รวมกันระหว่างกลศาสตร์ควอนตัมกับอุณหพลศาสตร์ ซึ่งพลังงานแสงเลเซอร์ สามารถมีคุณสมบัติได้หลากหลายขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการออกแบบ เลเซอร์ส่วนมากจะเป็นลำแสงที่มีขนาดเล็กมีการเบี่ยงเบนน้อย (low-divergence beam) และสามารถระบุมุมความยาวคลื่นได้ง่าย โดยดูจากสีของเลเซอร์ถ้าอยู่ในสเปกตรัมที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (visible spectrum)

ความหมายของ เลเซอร์ รวมไปถึงการให้พลังงานผ่านทางสื่อส่งแสง ซึ่งสื่อส่งแสงอาจเป็นได้ทั้งของแข็ง ของเหลว ก๊าซ หรืออิล็กตรอนอิสระที่มีคุณสมบัติสามารถนำแสงได้ ในรูปแบบที่ง่ายที่สุด ออปติคัล คาวิตี (Optical cavity) จะประกอบไปด้วยกระจก 2 อัน ที่จะจัดเรียงแสงเข้าด้วยกันครั้งแล้วครั้งเล่า โดยที่แต่ละครั้งจะผ่านสื่อส่งแสง โดอนหนึ่งในกระจกนั้น คือ Output coupler จะส่งลำแสงออกมา

ลำแสงเลเซอร์ ที่ผ่านทางสื่อส่งแสงจะมีความยาวคลื่นเฉพาะ และมีพลังงานเพิ่ม ซึ่งกระจกนี้ จะพยายามทำให้แสงส่วนมาก สามารถผ่านทางสื่อส่งแสงให้ได้ และออกมาเป็นลำแสงเลเซอร์ กระบวนการเหนี่ยวนำลำแสงเพื่อเพิ่มพลังงานนี้ จะใช้พลังงานไฟฟ้าหรือแสงในหลายความยาวคลื่น ซึ่งในการทดลองแต่ละครั้ง ความยาวคลื่นของแสงในแต่ละความยาวคลื่น จะส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติ รูปร่าง และความยาวคลื่นของลำแสงเลเซอร์ที่สร้างออกมา

## 2.2.2 ความเป็นมาของเลเซอร์ [12]

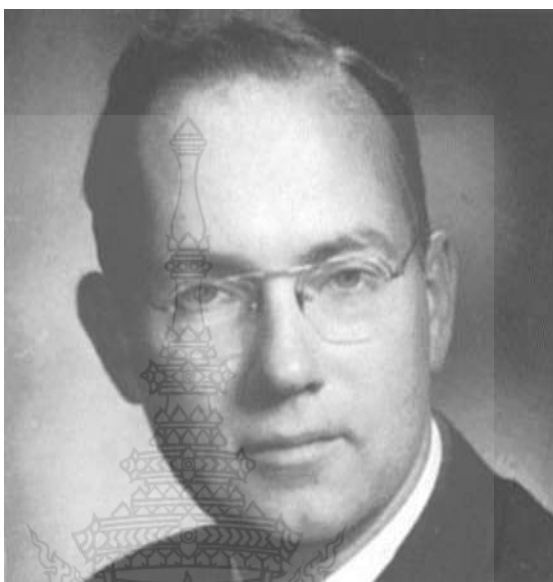
ซี.เอช. ทาวน์ส (C.H. Townes) เป็นผู้คิดค้นเลเซอร์ โดยในปี ค.ศ. 1954 เขาได้เสนอทฤษฎีเลเซอร์ และจากทฤษฎีดังกล่าวทำให้เขาได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในสิบปีต่อมาคือปี ค.ศ. 1964



รูปที่ 2.1 ซี.เอช. ทาวน์ส (C.H. Townes) [12]

นักฟิสิกส์ชาวอเมริกัน ทีโอดอร์ เอช ไมแมน (Theodore H.Maiman) เป็นผู้ประดิษฐ์แสงเลเซอร์ได้เป็นคนแรกของโลก มากกว่านั้นเขายังได้ทำการศึกษา ค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับแสงเลเซอร์ที่สถาบันวิจัย ฮิวจ์ (Hughes Research Laboratories) จนประสบความสำเร็จในการพิสูจน์ทฤษฎีเลเซอร์ของ C.H. Townes อีกด้วย โดยในปี ค.ศ.1960 เขาได้สร้างอุปกรณ์ที่ทำให้กำเนิดแสงเลเซอร์คือเลเซอร์ทับทิม (Ruby Laser) มีหลักการคือ การพันขดรอบผลึกทับทิมซึ่งเป็นวัสดุแข็งที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากส่วนผสมของโครเมียมออกไซด์กับอลูมิเนียม ด้วยท่อแสงอิเล็กทรอนิกส์ อะตอมโครเมียมในแท่งทับทิมนั้นจะได้รับการกระตุ้นให้ปล่อยลำแสงเลเซอร์ออกมาตามท่อซึ่งใช้เวลาเพียง 1 ใน 2,000-3,000 ของวินาที ในการถูกเร่งให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากสถานะพลังงานต่ำไปยังสถานะพลังงานสูง หลังจากนั้นจึงจะกลับเข้าสู่สถานะพื้นหรือสถานะปกติ โดยในขณะที่อะตอมโครเมียมกลับเข้าสู่สถานะพื้นนั้น พลังงาน “โฟตอน” จะถูกปล่อยออกมาพร้อมๆกัน เมื่อพลังงานโฟตอนดังกล่าวที่ถูกปล่อยออกมาวิ่งเข้าชนกับอะตอมโครเมียม จะส่งผลให้อะตอมโครเมียมปล่อยพลังงานโฟตอนออกมาอีกเรื่อยๆ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันของโฟตอน จนเกิดเป็นลำแสงสะท้อนขึ้น

ระหว่างปลายแต่ละข้างของกระจกในแท่งทึบทึม ซึ่งหากกระจกที่ฉาบปรอทไว้ครึ่งหนึ่งถูกลำแสงส่องผ่านจะทำให้เกิดลำแสงสีแดงพุ่งออกมาจากปลายข้างหนึ่ง



รูปที่ 2.2 ทีโอดอร์ เอช ไมแมน (Theodore H.Maiman) [12]

จาแวน (Javan) เป็นผู้ประดิษฐ์คิดค้นการสร้างเลเซอร์จากก๊าซฮีเลียมและนีออน ซึ่งถือได้ว่าเป็นการประสบความสำเร็จอย่างยิ่งในการพัฒนาเลเซอร์ หลังจากนั้นเขาได้ทำการคิดค้นและผลิตเลเซอร์จากสารชนิดต่างๆ มากมาย ได้แก่ เลเซอร์ที่สร้างขึ้นจากของแข็ง ของเหลว รวมทั้งก๊าซอื่นๆ และจากสารกึ่งตัวนำจำพวกไดโอด ทำให้เทคโนโลยีเลเซอร์มีความก้าวหน้าและพัฒนาไปอย่างต่อเนื่อง

### 2.2.3 คุณสมบัติของเลเซอร์ [12]

1. มีทิศทางเดียวที่แน่นอน (Directionality) ลำแสงเลเซอร์จะขนานกันไปตลอดระยะทางไกลๆ ไม่มีการบานปลายออก ดังนั้นความเข้มของแสงเลเซอร์จะลดลงน้อยมากในระยะทางไกลๆ
2. เป็นแสงเอกรงค์ (Monochromaticity) แสงเลเซอร์มีความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว แหล่งกำเนิดแสงที่เราพบเห็นในชีวิตประจำวัน เช่น หลอดไฟฟ้าและดวงอาทิตย์จะเป็นแสงสีขาว ถ้าให้แสงสีขาวนี้ผ่านปริซึมจะเห็นแถบสีต่างๆ เรียงกันอย่างต่อเนื่องจากสีม่วงถึงสีแดงเรียกว่า แถบสเปกตรัม ในขณะที่แสงเลเซอร์ เช่น เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน เมื่อให้แสงสีแดงของเลเซอร์ฮีเลียมนีออนผ่านปริซึมจะไม่มีแยกเป็นหลายเส้นแต่ยังคงมีเพียง 1 เส้นที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร



3. มีความเจิดจ้า (Brightness) แสงเลเซอร์มีลักษณะโดดเด่นไม่ซ้ำแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่น ในเชิงความเข้มสูงและเมื่อลำแสงตกกระทบวัตถุก็เกิดความระยิบระยับของลำแสงขึ้น (Laser Speckle) โดยเฉพาะเมื่อวัตถุนั้นมีความหยาบหรือแม้แต่ในบรรยากาศที่มีฝุ่นละอองหรือควันซึ่งเป็นอนุภาคแขวนลอยอยู่อย่างมีทิศทางไม่แน่นอน ทั้งนี้เนื่องจากแสงเลเซอร์เกิดการสะท้อนแบบไม่มีทิศทางกับอนุภาค หรือผิวของวัตถุ และเกิดการแทรกสอดของลำแสง ทำให้เกิดความระยิบระยับขึ้น จึงเป็นมิติของการมองเห็นโดยใช้ Laser displays แสงเลเซอร์กำลังต่ำๆ เช่น เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ขนาด 1 mW ก็มีความเข้มสูงกว่าแสงพระอาทิตย์ ฉะนั้นถ้าฉายเข้าตามนุษย์โดยตรงแล้ว จะเป็นอันตรายต่อนัยน์ตาถึงตาบอดได้

4. มีความเป็นอาพันธ์ (coherence) หลอดไฟฟ้าที่เปล่งแสงประกอบด้วยอะตอมที่เล็กจำนวนมาก โดยแต่ละอะตอมจะทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดแสง ดังนั้นแต่ละอะตอมก็เปล่งแสงออกมาอย่างอิสระซึ่งกันและกัน แสงที่ถูกปล่อยออกมาจากหลอดไฟจึงมีเฟสและความยาวคลื่นต่างกัน ยิ่งกว่านั้นแต่ละคลื่นที่ถูกปล่อยออกมามีทิศทางไม่แน่นอน หรือเป็น random แสงจากแหล่งต้นกำเนิดแสงธรรมดาโดยทั่วไปจะเรียกว่า แสงอินโคฮีเรนต์ (incoherence light) ต้นกำเนิดของแสงเลเซอร์นอกจากจะให้แสงสีเดียวทุกๆ คลื่นของแสงเลเซอร์จะมีเฟสเดียวกันหมด ดังนั้นแสงเลเซอร์จึงเรียกว่า แสงโคฮีเรนต์ (coherence light)

คุณสมบัติหลักของเลเซอร์ทั้ง 4 นี้ เรียกว่า คุณสมบัติโคฮีเรนต์ (Coherent) ที่ทำให้เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบโคฮีเรนต์ (Coherent Light Source) จุดเด่นดังกล่าวทั้ง 4 ข้อนี้มี ทำให้แสงเลเซอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย

#### 2.2.4 การประยุกต์ใช้งานเลเซอร์ [12]

เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีคุณสมบัติเด่น คือ เป็นคลื่นแสงที่มีระเบียบ มีลักษณะเป็นลำแสง ความเข้มแสงสูง จึงมีศักยภาพในการประยุกต์มากมาย ได้แก่ การใช้เลเซอร์เพื่อเจาะ ตัด เชื่อม เลเซอร์เป็นแสงที่มีความเข้มสูง และเป็นลำแสง เมื่อโฟกัสจะมีขนาดเล็กสามารถ เจาะ ตัด เชื่อมวัสดุต่างๆได้ รูปที่เจาะ รอยเชื่อม จะมีขนาดเล็กและคมชัดมาก ทำให้สามารถทำงานที่มีความละเอียดสูงได้ เลเซอร์ที่ใช้งานต้องมีกำลังสูงเช่น เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์

##### 1. การใช้เลเซอร์ด้านการแพทย์

เลเซอร์ถูกนำมาใช้ในการผ่าตัดและรักษาทางด้านการแพทย์และจักษุแพทย์ เช่น การผ่าตัดที่มีขนาดเล็ก (Microsurgery) การผ่าตัดต้อ เป็นต้น เลเซอร์ที่ใช้ได้แก่ เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ เลเซอร์อาร์กอน การเลือกใช้เลเซอร์แบบต่างๆขึ้นอยู่กับว่า อวัยวะที่ต้องการผ่าตัดมีความสามารถใน

การดูดกลืนแสงสีอะไร และขนาดกำลังของเลเซอร์ เช่น เส้นเลือดแดงจะดูดกลืนสีแดงได้น้อย จึงใช้เลเซอร์แสงสีเขียวที่ได้จากเลเซอร์ก๊าซอาร์กอน

ในการใช้งานจริงๆ อาจใช้ลำแสงที่มีกระจกเลนส์อยู่ภายใน และหักงอได้เป็นตัวนำแสงเลเซอร์ ไปยังบริเวณรอยโรคที่จะผ่าตัด หรือใช้ลำแสงเลเซอร์ผ่านกล้องจุลทรรศน์ผ่าตัด ในการรักษาโรคมะเร็ง เลเซอร์ที่ใช้จะต้องมีความหนาแน่นพลังงาน 300-500 ลูกบาศก์เซนติเมตร แสงเลเซอร์จะทำลายเซลล์เนื้องอก โดยไม่ทำลายเนื้อเยื่อปกติโดยรอบ บาดแผลภายหลังการผ่าตัดจะฟื้นตัวเร็ว ในงานจุลศัลยกรรมของเส้นเลือด เลเซอร์สามารถห้ามเลือดให้หยุดไหลโดยการเชื่อมเส้นเลือดเล็กๆ ภายในบริเวณจำกัดให้ติดกัน วิธีการอาจใช้ท่อนำแสงเข้าช่วยด้วย เพื่อนำแสงเลเซอร์ไปตามช่องอวัยวะที่เข้าถึงยาก

## 2. การใช้เลเซอร์ด้านสื่อสารโทรคมนาคม

การสื่อสารในปัจจุบันส่วนใหญ่ใช้คลื่นไมโครเวฟ หรือใช้โทรศัพท์ อย่างไรก็ตามหลังจากที่มีการพัฒนาเลเซอร์ไดโอด (semiconductor diode laser) และเส้นใยแก้วนำแสง (optical fiber) แล้วการสื่อสารด้วยแสง (optical communication) หรือการส่งข้อมูลข่าวสารจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งหรือระหว่างเมืองต่างๆ ก็เป็นไปได้อย่างรวดเร็ว ในอนาคตการสื่อสารด้วยเลเซอร์จะเข้ามาแทนที่ระบบโทรศัพท์ที่ใช้ลวดตัวนำที่ใช้กันอยู่ทั่วไป แสงเลเซอร์นี้มีจุดเด่นที่จะไม่มีสัญญาณรบกวนเพราะเป็นคลื่นแสง มีความจุข้อมูลสูงมากเพราะมีความถี่สูงกว่าคลื่นวิทยุ ทำให้เส้นใยแก้วนำแสงเส้นหนึ่งสามารถจุคู่สายโทรศัพท์ได้เป็นพันๆ คู่

## 3. การใช้เลเซอร์ด้านการสร้างภาพสามมิติ

ปัจจุบันได้ใช้เลเซอร์ในการสร้างภาพ 3 มิติหรือภาพ โฮโลกราฟี หมายถึง กระบวนการสร้างภาพฮอโลแกรม ซึ่งเป็นภาพ 3 มิติ แตกต่างจากการสร้างภาพเชิง 3 มิติ โดยฮอโลแกรมนั้นเป็นภาพที่บันทึกลงบนฟิล์ม หรือ แผ่นเคลือบด้วยสารสำหรับบันทึกแสง ซึ่งผ่านเทคนิคการบันทึกด้วยการใช้แสงที่มีหน้าคลื่นสอดคล้องกัน (coherence) เช่น แสงเลเซอร์ และเมื่อถูกส่องสว่างอย่างเหมาะสมจะแสดงให้เห็นภาพที่มีลักษณะ 3 มิติ

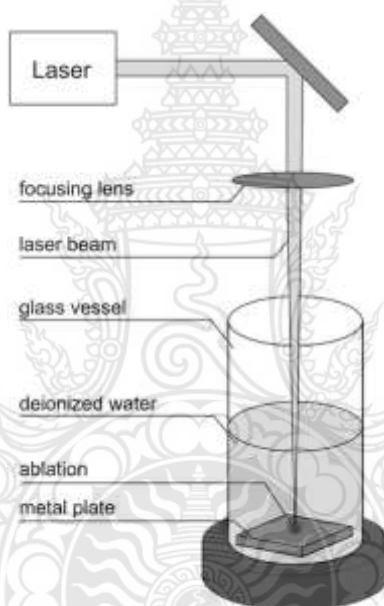
## 4. การใช้เลเซอร์ในการวัด

การใช้เลเซอร์ในการวัด นับ ทดสอบ ตรวจสอบการควบคุม ทั้งในกระบวนการผลิตและในงานวิทยาศาสตร์ เช่น การตรวจสอบยางล้อเครื่องบินโดยไม่ทำลาย โดยวิธีโฮโลกราฟี (holography) การวัดปริมาณมลภาวะเพื่อหาปริมาณของสารต่างๆ ในบรรยากาศ เนื่องจากเลเซอร์มีความยาวคลื่นคงที่และเป็นลำแสงขนานจึงถูกนำมาใช้เป็นมาตรฐานการวัดที่ละเอียดแม่นยำ เช่น การวัดขนาดของสิ่งของ การวัดระยะทางทั้งใกล้และไกล โดยอาศัยหลักการของการแทรกสอด

## 2.3 Laser ablation

### 2.3.1 Laser ablation [18]

Laser ablation หรือ Photoablation เป็นกระบวนการกำจัดวัสดุออกจากพื้นผิวของแข็ง (หรือบางครั้งในของเหลว) โดยการฉายรังสีด้วยลำแสงเลเซอร์ ที่ฟลักซ์เลเซอร์ต่ำวัสดุจะได้รับความร้อนจากพลังงานเลเซอร์ที่ถูกดูดซับและระเหิดออกที่ฟลักซ์เลเซอร์สูงวัสดุโดยทั่วไปจะถูกแปลงเป็นพลาสมา โดยปกติการระเหิดด้วยเลเซอร์หมายถึงการเอาวัสดุออกด้วย pulsed laser (เลเซอร์แบบคลื่นไม่ต่อเนื่อง) แต่ก็เป็นไปได้ที่จะทำให้วัสดุระเหยหรือระเหิดด้วย continuous laser wave (เลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่อง) หากความเข้มของเลเซอร์สูงพอ [6] [7]



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของกระบวนการ laser ablation in water

### 2.3.2 การประยุกต์ใช้งาน

แอปพลิเคชันที่ง่ายที่สุดของการระเหิดด้วยเลเซอร์คือการกำจัดวัสดุออกจากพื้นผิวที่แข็งในแบบที่ควบคุม ตัวอย่างการตัดและการเจาะด้วยเลเซอร์ โดยเฉพาะเลเซอร์พัลส์ซึ่งสามารถเจาะรูขนาดเล็กมากและลึกลงไปใวัสดุที่แข็งมาก พัลส์เลเซอร์ที่สั้นมากจะนำวัสดุออกอย่างรวดเร็วจนวัสดุโดยรอบดูดซับความร้อนได้น้อยดังนั้นการเจาะด้วยเลเซอร์สามารถทำได้บนวัสดุที่ละเอียดอ่อนหรือไวต่อความร้อนรวมถึง การเคลือบพื้น (ทันตกรรมเลเซอร์) หลายคนใช้การระเหิดด้วยเลเซอร์และการควบแน่นของก๊าซเพื่อผลิตอนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์ของโลหะและโลหะคาร์ไบด์ [5]

นอกจากนี้พลังงานเลเซอร์ยังสามารถถูกดูดซับโดยการเคลือบโดยเฉพาะอย่างยิ่งบนโลหะ ดังนั้น CO<sub>2</sub> หรือ Nd:YAG พัลส์เลเซอร์สามารถใช้ทำความสะอาดพื้นผิว ลบสี และเคลือบ หรือเตรียมพื้นผิวสำหรับการทาสีโดยไม่ทำลายพื้นผิวดั้งเดิม เลเซอร์พลังงานสูงทำความสะอาดจุดใหญ่ด้วยจังหวะเดียว เลเซอร์พลังงานต่ำใช้พัลส์ขนาดเล็กจำนวนมากซึ่งอาจถูกสแกนทั่วพื้นที่

### 2.3.3 ข้อดี

ไม่มีการใช้ตัวทำละลายจึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและผู้ใช้งานไม่ได้สัมผัสกับสารเคมี ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำกว่าการทำลายด้วยน้ำแข็งแห้งแม้ว่าต้นทุนการลงทุนจะสูงกว่ามาก กระบวนการนี้อ่อนโยนกว่าเทคนิคการขัดเช่น เส้นใยคาร์บอนภายในวัสดุคอมโพสิตไม่เสียหาย เพราะใช้ความร้อนน้อยมาก

### 2.3.4 ข้อเสีย

ค่าใช้จ่ายในการจัดซื้ออุปกรณ์ค่อนข้างสูง

## 2.4 คุณสมบัติทางเคมีของ ทองคำ (Au) เงิน (Ag) และทองแดง (Cu)

### 2.4.1 ทองคำ (gold) [19]

ทองคำ (gold) คือ ธาตุเคมีที่มีหมายเลขอะตอม 79 และสัญลักษณ์คือ Au (มาจากภาษาละตินว่า aurum) จัดอยู่ในกลุ่มธาตุโลหะมีสกุลชนิดหนึ่ง ทองคำเป็นธาตุโลหะทรานซิชันสีเหลืองทองมันวาวเนื้ออ่อนนุ่ม สามารถยืดและตีเป็นแผ่นได้ ทองคำไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีส่วนใหญ่ ทองคำใช้เป็นทุนสำรองทางการเงินของหลายประเทศ ใช้ประโยชน์เป็นเครื่องประดับ งานทันตกรรม และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ทองคำมีความแวววาวอยู่เสมอและไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ดังนั้น เมื่อสัมผัสสู่อากาศสีของทองจะไม่หมองและไม่เกิดสนิม มีความอ่อนตัว ทองคำเป็นโลหะที่มีความอ่อนตัวมากที่สุด ด้วยทองเพียงประมาณ 2 บาท เราสามารถยืดออกเป็นเส้นลวดได้ยาวถึง 8 กิโลเมตร หรืออาจตีเป็นแผ่นบางได้ถึง 100 ตารางฟุต ทองคำเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี สะท้อนความร้อนได้ดี ทองคำสามารถสะท้อนความร้อนได้ดี ได้มีการนำทองคำไปฉาบไว้ที่หน้ากากหมวกของนักบินอวกาศเพื่อป้องกันรังสีอินฟราเรด

ตารางที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของทองคำ (Au) [19]

ทั่วไป	
ชื่อ สัญลักษณ์ เลขอะตอม	ทองคำ, Au, 79
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน
หมู่ คาบ บล็อก	11, 6, d
มวลอะตอม	196.96655 (2) g/mol
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	[Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>1</sup>
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 18, 32, 18, 1
คุณสมบัติทางกายภาพ	
สถานะ	ของแข็ง
ความหนาแน่น (ใกล้ r.t.)	19.3 g/cm <sup>3</sup>
ความหนาแน่นของของเหลวที่ m.p.	17.31 g/cm <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว	1337.33 K (1064.18 °C)
จุดเดือด	3129 K (2856 °C)
ความร้อนของการหลอมเหลว	12.55 KJ/mol
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	324 กิโลจูล/โมล
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 25.418 J/(mol·K)

### 2.4.2 เงิน (silver) [20]

เงิน (silver) คือธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 47 และสัญลักษณ์คือ Ag (มาจากภาษาละตินว่า Argentum) เงินเป็นโลหะทรานซิชันสีขาวเงิน มีสมบัติการนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีมาก ในธรรมชาติอาจรวมอยู่ในแร่อื่นๆ หรืออยู่อิสระ เงินใช้ประโยชน์ในการทำเหรียญ เครื่องประดับ ภาชนะบนโต๊ะอาหาร และอุตสาหกรรมการถ่ายภาพ มีผู้ค้นพบคือ โรเบิร์ต แบนฟอร์ด

ตารางที่ 2.2 ลักษณะทั่วไปของเงิน (Ag) [20]

ทั่วไป	
ชื่อ สัญลักษณ์ เลขอะตอม	เงิน, Ag, 47
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน
หมู่ คาบ บล็อก	11, 5, d
มวลอะตอม	107.8682 (2) g/mol
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	[Kr] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup>
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 18, 18, 1
คุณสมบัติทางกายภาพ	
สถานะ	ของแข็ง
ความหนาแน่น (ใกล้ r.t.)	10.49 g/cm <sup>3</sup>
ความหนาแน่นของของเหลวที่ m.p.	9.320 g/cm <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว	1234.93 K (961.78 °C)
จุดเดือด	2435 K(2162 °C)
ความร้อนของการหลอมเหลว	11.28 KJ/mol
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	258 KJ/mol
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 25.350 J/(mol·K)

### 2.4.3 ทองแดง (copper) [21]

ทองแดง (Copper) คือธาตุที่มีเลขอะตอม 29 และสัญลักษณ์คือ Cu ทองแดงอยู่ในตารางธาตุหมู่ 11 เป็นที่ทราบกันว่ามนุษย์ใช้ประโยชน์จากทองแดงมาไม่น้อยกว่า 10,000 ปี พบหลักฐานว่ามนุษย์สามารถหลอมสกัดทองแดงให้บริสุทธิ์ได้เมื่อประมาณ 5000 ปีก่อนคริสตกาล ซึ่งเป็นช่วงก่อนที่มนุษย์จะรู้จักกับทองคำ โดยมนุษย์รู้จักทองคำ เมื่อประมาณ 4000 ปีก่อนคริสตกาล

### ตารางที่ 2.3 ลักษณะทั่วไปของทองแดง (Cu) [21]

ทั่วไป	
ชื่อ สัญลักษณ์ เลขอะตอม	ทองแดง, Cu, 29
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน
หมู่ คาบ บล็อก	11, 4, d
มวลอะตอม	63.546(3) g/mol
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	[Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup>
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 18, 1
คุณสมบัติทางกายภาพ	
สถานะ	ของแข็ง
ความหนาแน่น (ใกล้ r.t.)	8.96 g/cm <sup>3</sup>
ความหนาแน่นของของเหลวที่ m.p.	8.02 g/cm <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว	1357.77 K (1084.62 °C)
จุดเดือด	2835 K(2562 °C)
ความร้อนของการหลอมเหลว	13.26 KJ/mol
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	300.4 KJ/mol
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 24.440 J/(mol·K)

## 2.5 Particle Size Analyzer

### 2.5.1 Particle Size Analyzer

เป็นเครื่องวัดขนาดอนุภาคในสารตัวอย่างแบบอัตโนมัติ ควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ สามารถวัดขนาดอนุภาค, ความต่างศักย์ไฟฟ้าบนผิวอนุภาค, น้ำหนักโมเลกุล สำหรับตัวอย่างที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ ช่วงนาโนเมตรจนถึงไมโครเมตร

### 2.5.2 คุณลักษณะเฉพาะ [23]

1. สามารถวัดขนาดอนุภาคในของเหลวที่มีช่วงขนาดตั้งแต่ 0.3 นาโนเมตร ถึง 8 ไมโครเมตร หรือ ช่วงกว้างกว่า
2. สามารถวัดขนาดอนุภาคโดยใช้หลักการใดหลักการหนึ่ง ได้แก่ Light Scattering, หรือ Photon Correlation Spectroscopy (PCS) , หรือ Light Scattering ร่วมกับ Photon Correlation Spectroscopy
3. สามารถวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าบนผิวอนุภาค (zeta potential) ได้ในช่วง -200 มิลลิโวลต์ ถึง +200 มิลลิโวลต์ หรือช่วงกว้างกว่า สำหรับขนาดตั้งแต่ 4.0 นาโนเมตร ถึง 100 ไมโครเมตร หรือช่วงกว้างกว่า
4. สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีความเข้มข้นสูงสุดได้มากกว่าหรือเท่ากับ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก
5. มีตัวตรวจจับสัญญาณ (detector) เป็นแบบ Avalanche Photodiode (APD) หรือ แบบ Photomultiplier Tube (PMT)

## 2.6 Ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis)

### 2.6.1 Ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis)

เป็นเครื่องวิเคราะห์สารเคมีชนิดละลายแสงคู่ โดยใช้หลักการดูดกลืนแสงของสารประกอบ ที่สามารถตรวจวัดได้ ในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ต (UV) และในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (Visible) ซึ่งควบคุมและประมวลผลด้วยตัวเครื่องเอง (Standalone) หรือควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์

### 2.6.2 คุณลักษณะเฉพาะ [22]

1. Comprehensive Function for Quantitative and Qualitative analysis  
สามารถใช้งานได้กว้างในช่วงความยาวคลื่น 190-1100 นาโนเมตร มี Mode สำหรับใช้งานมากถึง 7 Mode แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยจอภาพแบบ LCD ขนาดใหญ่ที่สามารถพับเก็บได้ ปรับ



ความเข้ม-สว่างของจอภาพได้ มีความละเอียดสูงสามารถแสดง Spectrum, Calibration curve หรือ ตารางผลการวิเคราะห์ได้อย่างชัดเจน

## 2. Performance Hardware Validation

มี Maintenance function สำหรับตรวจเช็คสภาพเครื่อง และตรวจเช็คระยะเวลาการใช้งานของ Lamp และมี Validation function จำนวน 10 หัวข้อ สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของ ตัวเครื่องเพื่อรองรับมาตรฐาน GLP/GMP สามารถตั้งเวลาในการปิด D2 Lamp อัตโนมัติได้เมื่อไม่ได้ใช้งาน ในช่วงคลื่น UV

## 3. Word-Leading 1 nm Resolution

The Best in its class ความกว้างของช่องแสง (Bandwidth) ของ UV-1700 ได้ปรับให้ น้อยกว่า 1 นาโนเมตร ซึ่งทำให้ได้ resolution และ sensitivity สูงขึ้นมากกว่า 40% และเป็นไปตาม มาตรฐาน Pharmacopoeia

## 4. Variety Optional Program Pack

สามารถเพิ่มความสามารถของเครื่องโดยมีโปรแกรม ต่างๆ เช่น Protein Analysis, DNA/Protein Quantitation ฯลฯ สามารถเก็บ Parameters ได้ถึง 16 files และเก็บ Data ได้ 6 files และสามารถขยายเพิ่มเติมได้ด้วย Data Pack ที่เก็บ Parameters 97 file และ Data 29 files

## 5. Totally Easy Report

มี port สำหรับขยายความสามารถของเครื่อง เช่น parallel port สำหรับต่อ Printer ที่ สามารถพิมพ์ผลการวิเคราะห์หรือออกทาง printer ทั่วไปได้อย่างสะดวก และ มี port RS-232C สำหรับ ต่อ PC โดยใช้ UV Probe Software ควบคุมการทำงาน

## 6. Support IQ/OQ

เพื่อให้เครื่องมีประสิทธิภาพและได้มาตรฐาน ในการติดตั้งและตรวจสอบความถูกต้อง ทาง บริษัทฯ ได้มีจัดทำ Installation Qualification (IQ) และ Operation Qualification (OQ) โดย บุคลากรที่ได้รับรองและมีประกาศนียบัตรจาก Shimadzu และหลังเสร็จสิ้นการติดตั้ง ทางบริษัท ฯ จัดทำรายงาน พร้อมหลักฐานสนับสนุนที่ได้ตามมาตรฐาน GLP/GMP

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วรรณวิภา นามสุวรรณ และ ฤทธิ มีสัจย์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น (2561) [8] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคทองขนาดนาโนเมตรเพื่อวัดระดับครีอะตินิน โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีและการฉายรังสี เพื่อการประยุกต์ใช้เป็นสารสำหรับการตรวจวัดระดับครีอะตินินและศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคทองขนาดนาโนที่มีความเสถียร การทราบค่าสารนี้ในเลือดหรือในปัสสาวะจึงใช้เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพการทำงานของไตได้

### วิธีการวิจัย

- การสังเคราะห์อนุภาคทองขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีทางเคมี

การสังเคราะห์อนุภาคทองนาโนจากสารละลายออริกคลอไรด์ (auric chloride) ความเข้มข้น 0.25 มิลลิโมลาร์ ไอออนของทองจะรีดิวซ์ด้วย 1.12 มิลลิโมลาร์ ไตรโซเดียมซิเตรท (Kimling et al., 2006) ภายใต้การปั่นเหวี่ยงอย่างแรงที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ด้วยวิธีการรีฟลักซ์ (Reflux) ใช้เวลาประมาณ 20 นาที เมื่อสารละลายมีอุณหภูมิประมาณ 25 องศาเซลเซียส เติม 0.03 ไมโครโมลาร์ กลูต้าไธโอน เพื่อเคลือบอนุภาคทอง ด้วยวิธีการปั่นเหวี่ยงเวลา 15 นาที ศึกษาเปรียบเทียบกับสารละลายทองนาโนที่ปราศจากการเติมกลูต้าไธโอน โดยเก็บสารละลายไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส หลังจากการวิเคราะห์

- การสังเคราะห์อนุภาคทองขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีทางรังสี

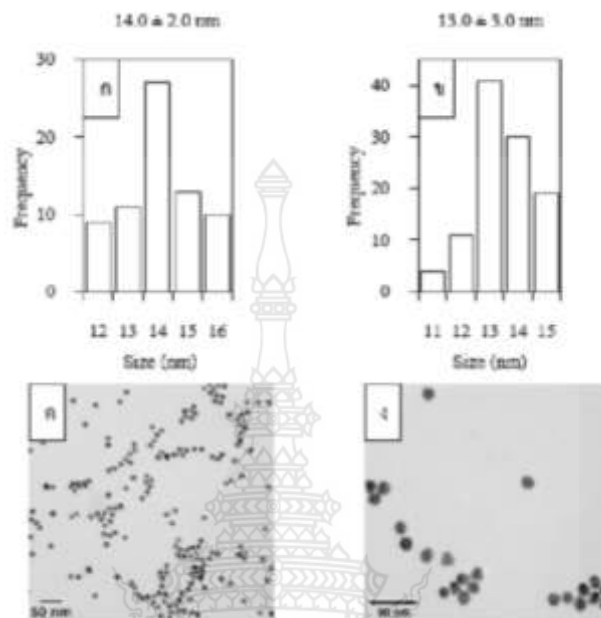
การสังเคราะห์อนุภาคทองนาโนจากสารละลาย 0.25 มิลลิโมลาร์ ออริกคลอไรด์ (auric chloride) 1.12 มิลลิโมลาร์ ไตรโซเดียมซิเตรท และ 0.2 โมลาร์ ไฮโซโพรพานอล สารละลายนี้ถูกทำให้ร้อนด้วยไนโตรเจนเพื่อกำจัดออกซิเจน (Arnim, Dan, 1998) นำสารละลายไปฉายรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดโคบอลต์-60 (Gamma chamber 5000) ที่ปริมาณรังสี 3.2 กิโลเกรย์ต่อชั่วโมง อัตรารังสีนี้วัดโดยวิธี Fricke dosimetry สารละลายทองเมื่อฉายรังสีแล้วเติม 0.03 ไมโครโมลาร์ กลูต้าไธโอน โดยศึกษาเปรียบเทียบกับสารละลายที่มีกลูต้าไธโอนกับไม่มีกลูต้าไธโอนหลังจากสังเคราะห์ทำการเก็บสารละลายไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

### ผลการวิจัย

- การสังเคราะห์อนุภาคทองนาโนด้วยวิธีทางเคมี

สารละลายอนุภาคทองนาโนดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร (Harihar et al., 2014) ส่วนการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคทองนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี โดยใช้เทคนิค TEM พบว่าอนุภาคทองนาโนที่มีและไม่มีกลูต้าไธโอนเคลือบมีรูปร่าง

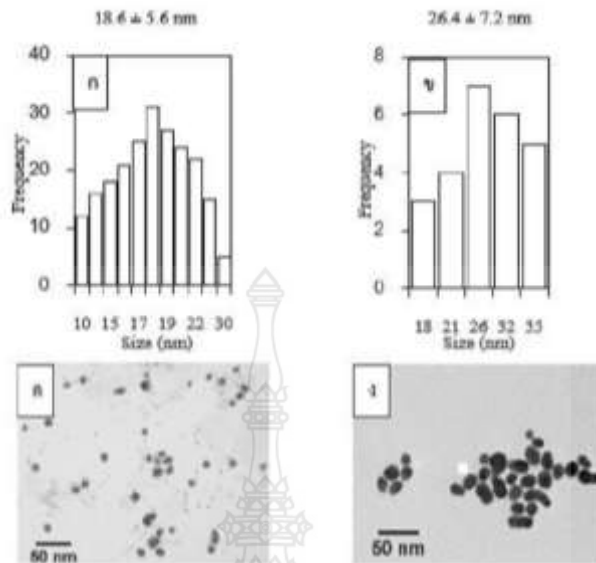
เป็นทรงกลมและมีขนาดใกล้เคียงกัน ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเท่ากับ  $14.0 \pm 2.0$  และ  $13.0 \pm 3.0$  นาโนเมตร



**รูปที่ 2.4** กราฟการกระจายขนาดของอนุภาคนาโน และภาพถ่าย TEM แสดงรูปร่างของอนุภาคทองนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี โดย (ก, ค) อนุภาคทองนาโนที่ไม่ได้เคลือบกลุ่มตัวไฮดรอกซิล และ (ข, ง) อนุภาคนาโนที่เคลือบด้วย 0.03 ไมโครโมลาร์ กลุ่มตัวไฮดรอกซิล

- การสังเคราะห์อนุภาคทองนาโนโดยวิธีฉายรังสี

สารละลายอนุภาคทองขนาดนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการฉายรังสีพบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดในช่วงความยาวคลื่น 520 ถึง 530 นาโนเมตร เมื่อวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคทองนาโนด้วยเทคนิค TEM พบว่าอนุภาคทองนาโนที่เคลือบและไม่ได้เคลือบด้วยกลุ่มตัวไฮดรอกซิลมีรูปร่างทรงกลม เมื่อเปรียบเทียบกับ การสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ  $18.6 \pm 5.6$  และ  $26.4 \pm 7.2$  นาโนเมตร



รูปที่ 2.5 กราฟการกระจายขนาดของอนุภาคนาโน และภาพถ่าย TEM แสดงรูปร่างของอนุภาคทองคำนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการฉายรังสี โดย (ก, ค) อนุภาคทองคำนาโนที่ไม่ได้เคลือบกลูต้าไธโอน และ (ข, ง) อนุภาคนาโนที่เคลือบด้วย 0.03 ไมโครโมลาร์ กลูต้าไธโอน

### สรุปผลการวิจัย

อนุภาคทองคำนาโนสามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีทางเคมีและวิธีการฉายรังสี อนุภาคทองคำนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการทางเคมีโดยใช้สารไตรโซเดียมซิเตรตเป็นสารรีดิวซ์มีขนาดอนุภาคนาโนที่มีขนาดใกล้เคียงกันมากกว่าวิธีการสังเคราะห์ด้วยวิธีการฉายรังสี

ณัฐพล โพธิ์ไพฑูรย์ และ ณัฐพล ภูตระกูลโชติ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (2561) [9] ได้ทำการการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในน้ำยางธรรมชาติสำหรับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดย้อมไวแสง (Dye-sensitized Solar Cell; DSSC) โดยอาศัยหลักการเกิดพลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิวของอนุภาคเงินระดับนาโนเพื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในเซลล์ให้สูงขึ้น

การประยุกต์เทคนิคในระดับนาโนเมตรในการปรับปรุงพื้นผิว หรือรูปร่างของชั้นไทเทเนียมด้วยอนุภาคระดับนาโนเมตรของโลหะมีตระกูล เช่น เงิน หรือทองคำ ซึ่งมีสมบัติพิเศษเชิงแสง นั่นคือพลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิว (Surface Plasmon Resonance; SPR) หรือปรากฏการณ์เชิงแสงซึ่งเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบลงบนโลหะ ทำให้เกิดการสั่นรวม (Collective Oscillation) ส่งผลให้เกิดการกระเจิง (Scattering) ของแสงที่ตกกระทบบนเซลล์สุริยะ

ไปทุกทิศทาง เร่งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนพลังงานสูง และเพิ่มกระแสไฟฟ้าในระบบให้สูงขึ้น ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานจึงสูงขึ้น

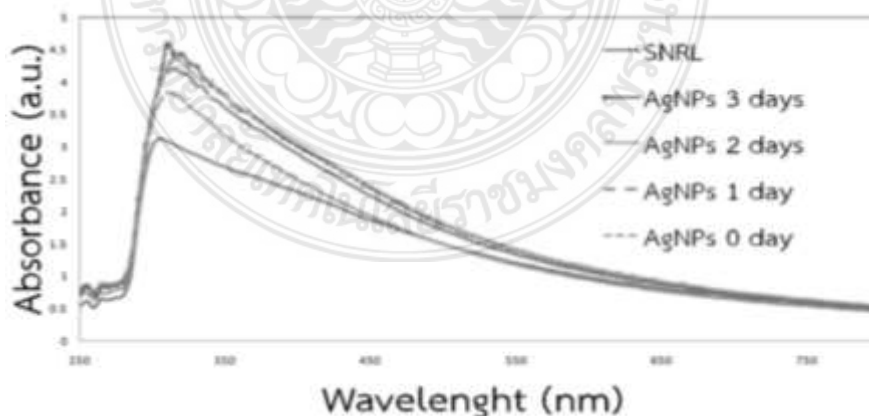
### วิธีการวิจัย

- การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในทางน้ำยางธรรมชาติ

ผสมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต 8mmol/L กับทางน้ำยางธรรมชาติ จากองค์การสวนยาง จังหวัดนครศรีธรรมราช ให้สารผสมมีปริมาณเนื้อยาง 0.05% DRC และความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรต 1.2 mmol/L เจือจางโดยใช้น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water) กวนผสมที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 45 นาที จนสีเปลี่ยนจากขาวขุ่นเป็นสีน้ำตาล นำสารที่ได้ 1.5 ml ไปปั่นเหวี่ยงความเร็วรอบ 14000 rpm เพื่อแยกอนุภาคเงินออกจากองค์ประกอบอื่น ยืนยันการเกิดอนุภาคเงินโดยเทคนิค XRD และ FE-SEM-EDS ศึกษาผลการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงโดยเทคนิค UV-VIS Spectroscopy วิเคราะห์ขนาดของอนุภาคเงินด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer และศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคเงินในไทเทเนียมไดออกไซด์โดย FE-SEM-EDS แบบ Mapping

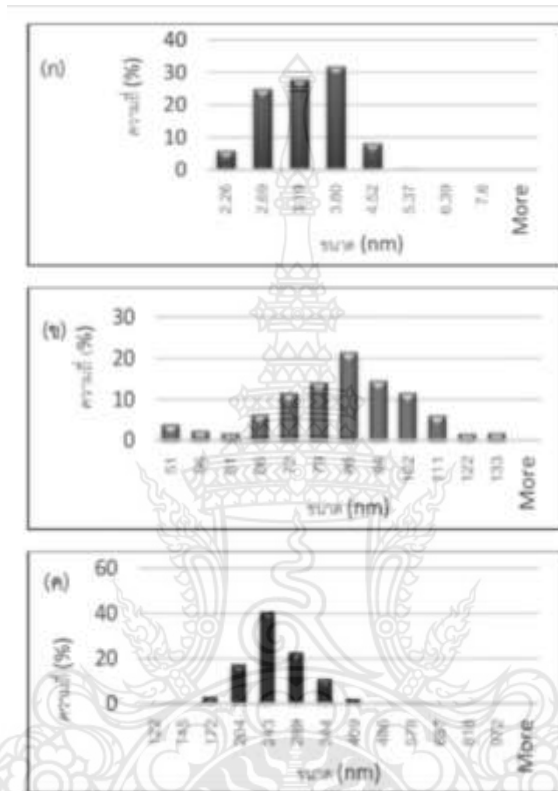
### ผลการวิจัย

การทดสอบการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ในทางน้ำยางธรรมชาติ ผลการทดลองพบว่าค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นในทางน้ำยางที่มีอนุภาคเงินผสมอยู่ และความยาวคลื่นที่สารดูดกลืนแสงได้สูงที่สุด (Lambda-max) มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปทางสีแดง (Red-shifted) นอกจากนี้การดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินในน้ำยางที่สังเคราะห์ขึ้นทันทีเปรียบเทียบกับทิ้งไว้ข้ามคืนก่อนนำมาวิเคราะห์เป็นเวลา 1, 2 และ 3 พบว่าค่าความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาจนถึงวันที่ 2 หลังจากนั้นค่าจะเริ่มคงที่หรือลดลงซึ่งเป็นผลจากอนุภาคเงินมีเวลาในการรวมตัวมากขึ้น



รูปที่ 2.6 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทางน้ำยางธรรมชาติ (SNRL) และอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ 0 วัน 1 วัน 2 วัน และ 3 วัน ตามลำดับ

ขนาดอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ในวันที่ 0, 1 และ 3 มีการกระจายตัวอยู่ในช่วง 2-5 nm, 50-120nm และ 170-410 nm ตามลำดับ จะเห็นว่าขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.7 ฮิสโทแกรมของขนาดอนุภาค ณ (ก) วันที่ 0 (ข) วันที่ 1 และ (ค) วันที่ 3 ตามลำดับ

### สรุปผลการวิจัย

อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ขึ้นในทางน้ำยางธรรมชาติ สามารถนำมาประยุกต์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ปริมาณในการเจือจางที่เหมาะสมคือเจืออนุภาคเงินระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 ชั้น ให้ประสิทธิภาพมากที่สุดโดยประสิทธิภาพของเซลล์ทดสอบ DSSC ที่เจือด้วยอนุภาคเงินระหว่างชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นคิดเป็น 58.9% เปรียบเทียบกับเซลล์มาตรฐานที่ไม่ผ่านการเจืออนุภาคเงิน

นินนาท์ จันท์ ศุภกร กตาทิการกุล และสุเจนต์ พรหมเหมือน มหาวิทยาลัยทักษิณ (2561) [10] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดงด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี เพื่อใช้เป็นสื่อการเรียนรู้ทองแดงนาโนสังเคราะห์ด้วย Plating & Nano-synthesis Kit โดยใช้กรด L- แอสคอร์บิก และเคอร์คูมินเป็นตัวรีดิวซ์และสเตบิไลเซอร์ตามลำดับ ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ เช่น ศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และปริมาณเคอร์คูมิน

- การสังเคราะห์ผงทองแดงนาโนโดยใช้ Plating & Nano-Synthesis Kit

สังเคราะห์ทองแดงนาโนด้วยเครื่อง Plating & Nano-Synthesis เป็นแหล่งให้ไฟฟ้า กระแสตรงและคนสารละลายและใช้ฐานจับ/ยึดขั้วไฟฟ้าและฐานวางบีกเกอร์ นำสารละลายไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง UV-1800 Spectrophotometer สารดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร สเปกตรัมที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Jayandran และคณะ ที่สังเคราะห์ทองแดงนาโนโดยใช้น้ำมะนาวเป็นตัวรีดิวซ์และขมิ้นเป็นสารสเตบิไลเซอร์ ทองแดงนาโนที่สังเคราะห์ได้มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 585 นาโนเมตร และรูปร่างของอนุภาคทองแดงนาโนเป็นทรงกลมมีขนาด 60-100 นาโนเมตร



รูปที่ 2.8 UV-Spectrum ของทองแดง

### สรุปผลการวิจัย

การวิเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดงด้วย Plating & Nano-Synthesis Kit เพื่อใช้เป็นสื่อการเรียนรู้วิชาเคมี เรื่องไฟฟ้าเคมี ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-1800 Spectrophotometer ที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด 595 นาโนเมตร และวิเคราะห์ผงทองแดงนาโนด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าอนุภาคทองแดงนาโนมีลักษณะเป็นทรงกลมขนาด 250-300 นาโนเมตร

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการ

#### 3.1 บทนำ

การสังเคราะห์โลหะนาโนโดยกระบวนการ Laser Ablation ในน้ำ มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคโลหะนาโนโดยวิธีการระเหยด้วยเลเซอร์ ศึกษาขนาดของอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้ และเพื่อเปรียบเทียบการสังเคราะห์ระหว่างแบบปกติและแบบที่ใช้เครื่อง sonication

#### 3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1. ทองคำ (Au)
2. เงิน (Ag)
3. ทองแดง (Cu)

#### 3.3 การเตรียมชิ้นงาน

##### 3.3.1 การเตรียมชิ้นงานทอง (Au)

นำชิ้นงานมาทำความสะอาดด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจาง (32.78% โดยปริมาตร) 30 วินาที จากนั้นนำไปทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่าแล้วเป่าให้แห้งโดยเครื่องเป่าลมร้อน ดังรูป

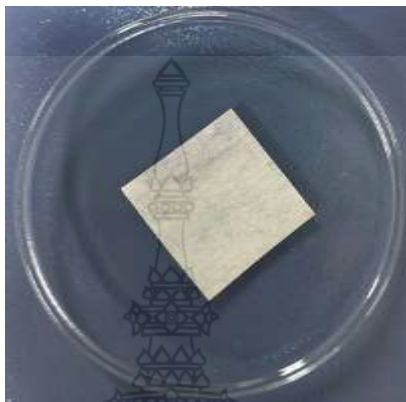


รูปที่ 3.1 ทองคำ (Au)



### 3.3.2 การเตรียมชิ้นงานเงิน (Ag)

นำชิ้นงานมาทำความสะอาดด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจาง (32.78% โดยปริมาตร) 30 วินาที จากนั้นนำไปทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่าแล้วเป่าให้แห้งโดยเครื่องเป่าลมร้อน ดังรูป



รูปที่ 3.2 เงิน (Ag)

### 3.3.3 การเตรียมชิ้นงานทองแดง (Cu)

นำทองแดงมาขัดด้วยกระดาษทรายให้สะอาด (กระดาษทรายเบอร์ 1000) จากนั้นนำไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่าและอะซิโตน แล้วนำไปเป่าให้แห้งโดยเครื่องเป่าลมร้อน ดังรูป



รูปที่ 3.3 ทองแดง (Cu)

### 3.4 กระบวนการ Laser ablation

Laser ablation หรือ Photoablation เป็นกระบวนการกำจัดวัสดุออกจากพื้นผิวของแข็ง โดยการฉายรังสีด้วยลำแสงเลเซอร์ ที่ฟลักซ์เลเซอร์ต่ำวัสดุจะได้รับความร้อนจากพลังงานเลเซอร์ที่ถูกดูดซับและระเหิด หรือ ที่ฟลักซ์เลเซอร์สูงวัสดุโดยทั่วไปจะถูกแปลงเป็นพลาสมาแล้วระเหิด โดยปกติการระเหิดด้วยเลเซอร์หมายถึงการเอาวัสดุออกด้วย pulsed laser (เลเซอร์แบบคลื่นไม่ต่อเนื่อง) แต่ก็เป็นไปได้ที่จะทำให้วัสดุระเหยหรือระเหิดด้วย continuous laser wave (เลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่อง) หากความเข้มของเลเซอร์สูงพอ

#### 3.4.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคโลหะนาโนด้วยเลเซอร์เอปเบลชันในน้ำ

การสังเคราะห์อนุภาคโลหะนาโนด้วยกระบวนการเลเซอร์เอปเบลชัน (Laser ablation) เป็นการสังเคราะห์ที่ไม่มีการใช้ตัวทำละลายจึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและผู้ใช้งานไม่ได้สัมผัสกับสารเคมี ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำกว่าการทำลายด้วยน้ำแข็งแห้งแม้ว่าต้นทุนการลงทุนจะสูงกว่ามาก โดยขั้นตอนการปฏิบัติมีดังต่อไปนี้

1. นำชิ้นงานโลหะตั้งต้นที่ใช้สังเคราะห์ไปทำความสะอาด เพื่อขจัดคราบสกปรกและทำให้พื้นผิวของชิ้นงานเรียบ
2. ใส่ DI water 10 ml ในบีกเกอร์ขนาด 40 ml
3. นำชิ้นงานโลหะแต่ละชิ้นใส่ลงไปใน DI water
4. นำอนุภาคทอง เงิน ทองแดงที่สังเคราะห์ได้ใส่ในหลอดทดลองโดยแยกศักย์ไฟฟ้าเป็น 6V, 8V, 10V แบบสังเคราะห์ปกติ และ 6V, 8V, 10V แบบใช้เทคนิค sonication เข้ามาช่วย
5. การสังเคราะห์แต่ละครั้งใช้เวลาในการสังเคราะห์ 30 วินาที
6. สูดท้ายนำพาราฟิล์มมาปิดไว้ เพื่อกันฝุ่นหรือสิ่งสกปรกต่างๆหล่นลงไป

### 3.5 การตรวจสอบ

การตรวจสอบอนุภาคนาโนนั้นมีด้วยกันหลายวิธี เพื่อตรวจสอบว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ได้นั้น มีขนาดตรงกับวัตถุประสงค์ของการสังเคราะห์อนุภาคนาโน โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

#### 3.5.1 Particle Size Analyzer

เป็นเครื่องวัดขนาดอนุภาคในสารตัวอย่างแบบอัตโนมัติ ควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ สามารถวัดขนาดอนุภาค, ความต่างศักย์ไฟฟ้าบนผิวอนุภาค สำหรับตัวอย่างที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ ช่วงนาโนเมตรจนถึงไมโครเมตร



รูปที่ 3.4 Particle Size Analyzer ยี่ห้อ Horiba รุ่น SZ-100 [17]

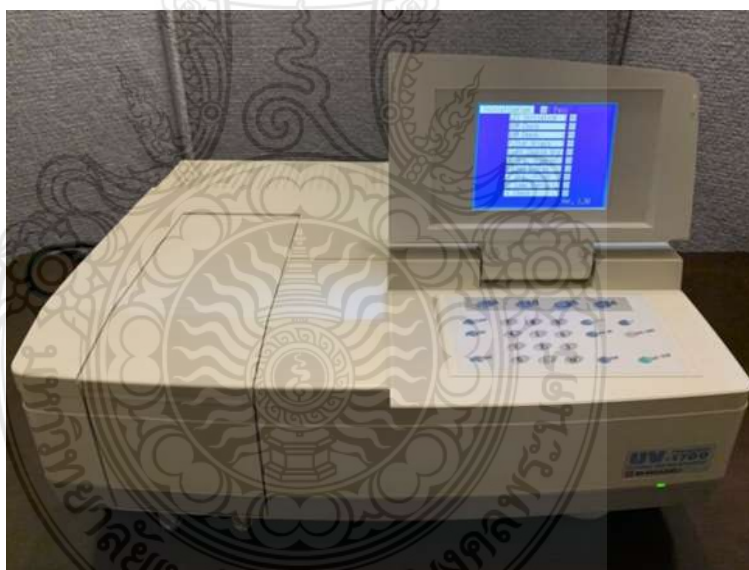
หลักการทำงาน: เมื่อแสงเดินทางผ่านอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เป็นของไหลจะทำให้เกิดปรากฏการณ์เชิงแสงที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ การเลี้ยวเบนแสง แสงที่เลี้ยวเบนจากอนุภาคจะมีรูปแบบของความเข้มที่เป็นรูปแบบเฉพาะ โดยความเข้มของแสงขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค และความถี่ของคลื่นแสง นอกจากนี้ลำแสงที่ส่องผ่านไปยังอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในของเหลวจะถูกกระเจิงโดยอนุภาค ทำให้เกิดภาพปรากฏเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนแบบฟาร์ฟิลด์ (Far field diffraction pattern) ที่อุปกรณ์วัดแสง (Photocell detector) ซึ่งวางตั้งฉากกับเส้นเดินของแสงมีลักษณะเป็นวงมืดและสว่างที่มีความเข้มสัมพันธ์กับขนาดอนุภาค [16]

การประยุกต์ใช้งาน: สามารถใช้วัดขนาดอนุภาคได้ตั้งแต่ 0.6 นาโนเมตร ถึง 7 ไมโครเมตร โดยใช้หลักการ Photon Correlation Spectroscopy (PCS) สำหรับเครื่องนาโน และสามารถวัดค่า Zeta Potential ได้ตั้งแต่ +200 mV ถึง -200 mV สำหรับตัวอย่างที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.6 นาโนเมตร ถึง 30 ไมครอน และสามารถวัดค่า Zeta Potential บนพื้นผิวแผ่นวัสดุตัวอย่าง (Solid Flat Surface) ได้ [16]

ลักษณะตัวอย่างที่ทำการทดสอบ: ชิ้นงานที่มีสารละลาย

### 3.5.2 Ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis)

เป็นเครื่องวิเคราะห์สารเคมีชนิดลำแสงคู่ โดยใช้หลักการดูดกลืนแสงของสารประกอบที่สามารถตรวจวัดได้ ในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ต (UV) และในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (Visible) ซึ่งควบคุมและประมวลผลด้วยตัวเครื่องเอง (Standalone) หรือควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.5 Ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UV-1700 [3]

หลักการการทำงาน: เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า intensity ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ คุณสมบัติ

ในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในโมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดความเข้มของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆ ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง [14] [15]

การประยุกต์ใช้งาน: การวัดการดูดกลืนและการทะลุผ่านของคลื่นแสงผ่านชิ้นงานตัวอย่าง เช่น ชิ้นตัวอย่างกระจก ตัวอย่างทางด้านชีวภาพ และการหาค่าการสะท้อนของแสงในชิ้นตัวอย่างฟิล์มและการเคลือบบนพื้นผิว ผ้า ผงโลหะ ผงออกไซด์ของโลหะ ผงสี พลาสติก และเซรามิก เป็นต้น [11]



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และอภิปรายผล

#### 4.1 บทนำ





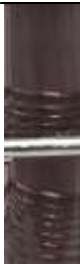





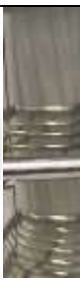
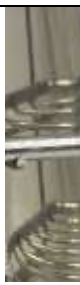

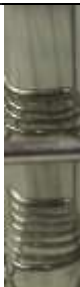

จากการดำเนินการตามวัตถุประสงค์ของโครงการ ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบอนุภาคโลหะนาโนที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการ Laser ablation ในน้ำ เพื่อหาขนาดอนุภาคโลหะนาโนเมื่อใช้ศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันในการสังเคราะห์

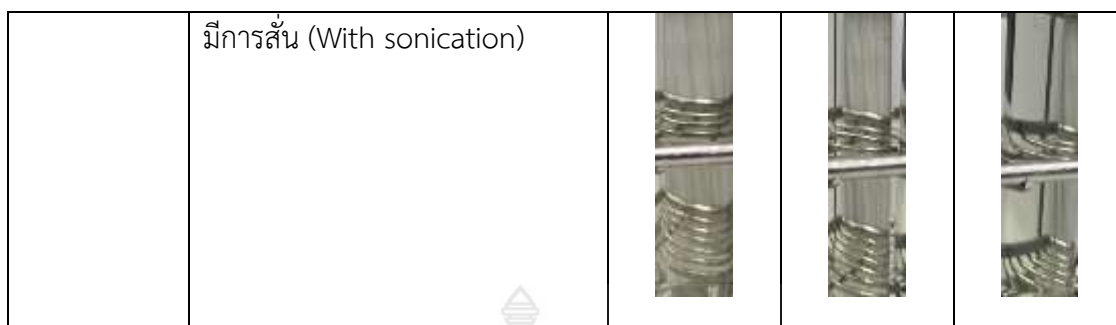
#### 4.2 การสังเคราะห์

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทอง เงิน และทองแดง จะได้สารสังเคราะห์อยู่ในรูปของเหลว และมีสีแตกต่างกันตามสภาวะการสังเคราะห์ แสดงได้ดัง ตารางที่ 4.1 โดยพบว่าสีของสารสังเคราะห์อนุภาคโลหะนาโนทั้ง 3 ชนิดในสภาวะที่มีและไม่มีกัลลีเนียม มีความเข้มสูงขึ้นเมื่อใช้ศักย์ไฟฟ้าในกระบวนการสังเคราะห์สูงขึ้น จาก 6 8 และ 10V ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสภาวะการทดสอบที่ไม่มีกัลลีเนียมจะมีสีที่เข้มกว่ามีกัลลีเนียม โดยสารสังเคราะห์อนุภาคนาโนจะแสดงผลการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจน ซึ่งความเข้มของสีที่เกิดขึ้นแสดงถึงขนาดและความเข้มข้นของอนุภาคโลหะที่เพิ่มขึ้น [24] (เช่นเดียวกับงานของฟาราเดย์ ทำได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโดยพบว่าสีของอนุภาคขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคนาโน)

ตารางที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงสีของสารสังเคราะห์อนุภาคนาโนทอง เงิน และทองแดง ที่ความต่างศักย์ 6 8 และ 10 V

วัสดุ	สภาวะในการสังเคราะห์	ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์ (V)		
		6	8	10

ทอง (Au)	ไม่มีการสั่น (Without sonication)			
	มีการสั่น (With sonication)			
เงิน (Ag)	ไม่มีการสั่น (Without sonication)			
	มีการสั่น (With sonication)			
ทองแดง (Cu)	ไม่มีการสั่น (Without sonication)			



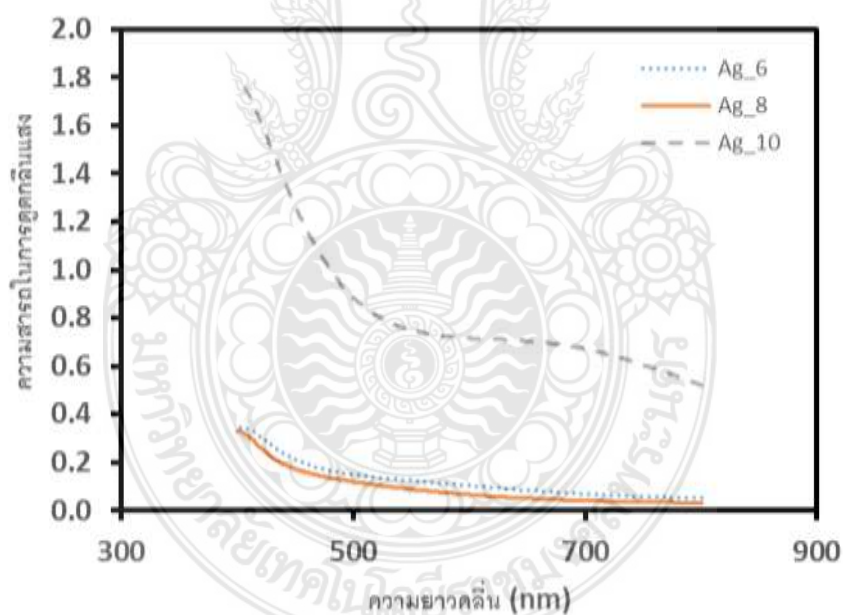
### 4.3 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนในสารสังเคราะห์

สารสังเคราะห์อนุภาคนาโนทอง เงิน และทองแดงถูกนำมาทดสอบหาความเข้มข้นของอนุภาคในสารสังเคราะห์ ด้วยเครื่อง Ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis) โดยทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงที่อนุภาคนาโนสามารถดูดกลืนได้ ซึ่งอนุภาคนาโนแต่ละชนิดจะมีช่วงของการดูดกลืนแสงที่ต่างกัน โดยทอง เงิน และ ทองแดง จะมีช่วงการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 400 และ 600 nm ตามลำดับ [8] ความเข้มที่เกิดขึ้นแสดงถึงความเข้มข้นของอนุภาคที่อยู่ในสารสังเคราะห์นั้น จากการทดสอบแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.1 ก ข และ 8 และสามารถสรุปผลดังตารางที่ 4.2 โดยในการทดสอบนี้ได้ดำเนินการทดสอบตัวอย่างที่สังเคราะห์ในสถานะที่ไม่มีมีการสั่นเท่านั้น เนื่องจากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนในสถานะที่มีการสั่น 50 Hz ส่งผลให้อนุภาคเกิดจากรวมตัวและตกตะกอนอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงไม่สามารถนำมาทดสอบหาความเข้มข้นด้วยวิธีการดูดกลืนแสงได้ จากผลการทดสอบดังตารางที่ 4.2 พบว่า เมื่อใช้ศักย์ไฟฟ้าในการสังเคราะห์เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณการดูดกลืนแสงของสารสังเคราะห์อนุภาคนาโนเพิ่มสูงขึ้นจาก 6 8 และ 10V ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโน ทำให้แสงเลเซอร์ที่ตกกระทบผิววัสดุมีความเข้มสูงขึ้น ดังนั้นจึงทำให้อนุภาคที่หลุดออกจากผิวชิ้นงานโลหะมีอัตราเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามผลของอนุภาคทองที่ศักย์ไฟฟ้า 10 V มีค่าต่ำกว่าที่ 8 V เนื่องจากเกิดการตกตะกอนของอนุภาคนาโนในสารสังเคราะห์นั้น และช่วงของการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน โดยช่วงความยาวคลื่นของทอง เงิน และ ทองแดง อยู่ในช่วง 500 – 550 nm 400 – 450 nm และ 580 – 600 nm ตามลำดับ

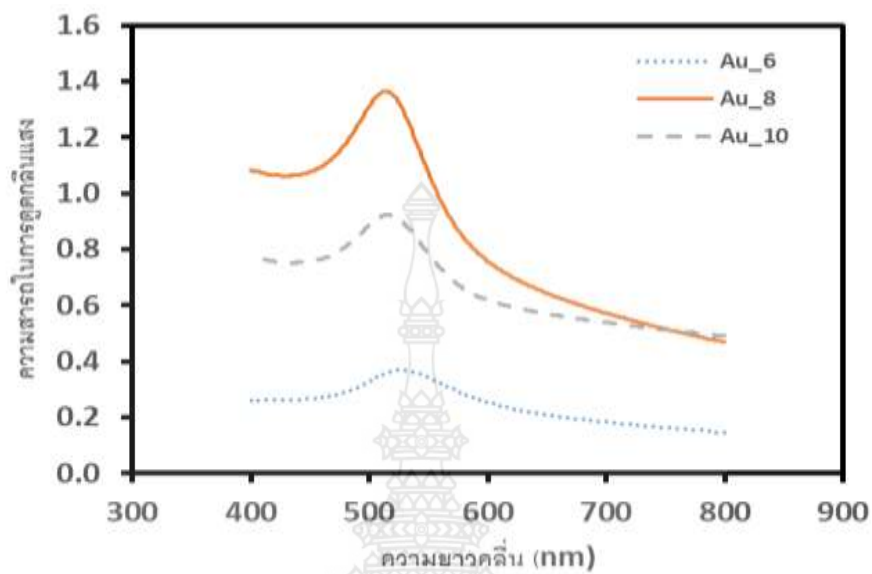


ตารางที่ 4.2 การดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนสังเคราะห์ชนิดต่างๆ

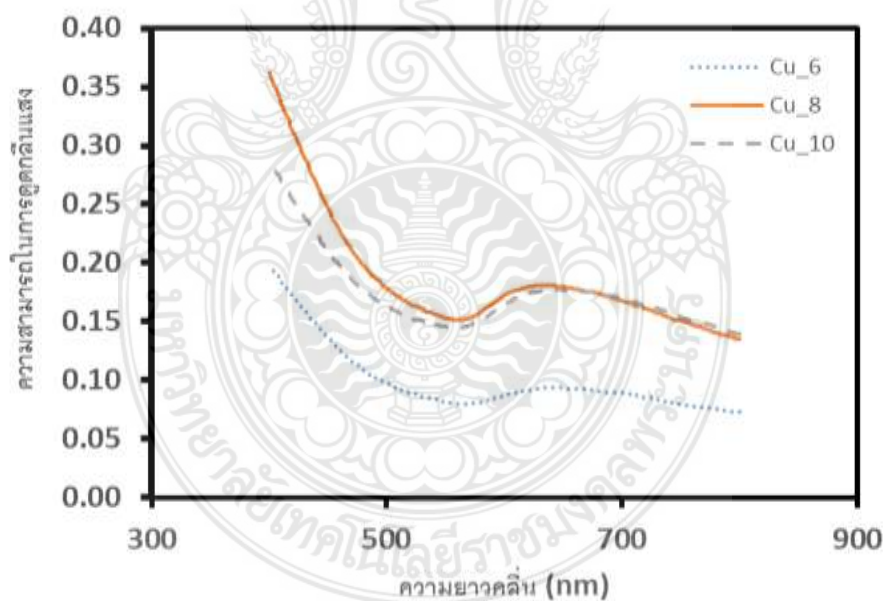
วัสดุ	ช่วงความยาวคลื่น การดูดกลืนแสง (nm)	การดูดกลืนแสง (A.u.)		
		ความต่างศักย์ 6 V	ความต่างศักย์ 8 V	ความต่างศักย์ 10 V
ทอง (Au)	500 – 550	0.40	1.40	0.95
เงิน (Ag)	400 - 450	0.30	0.30	1.80
ทองแดง (Cu)	580 - 650	0.10	0.18	0.18



ก. การดูดกลืนแสงของสารอนุภาคนาโนทองสังเคราะห์



ข. การดูดกลืนแสงของสารอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์



ค. การดูดกลืนแสงของสารอนุภาคนาโนทองแดงสังเคราะห์

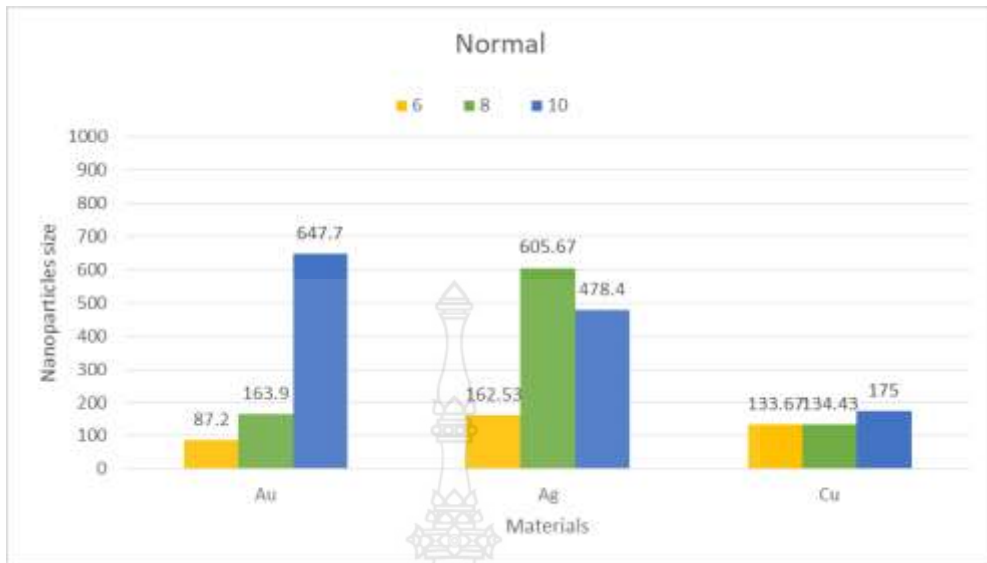
รูปที่ 4.1 การดูดกลืนแสงของสารอนุภาคนาโนชนิดต่างๆ

#### 4.4 ขนาดของอนุภาคนาโนสังเคราะห์

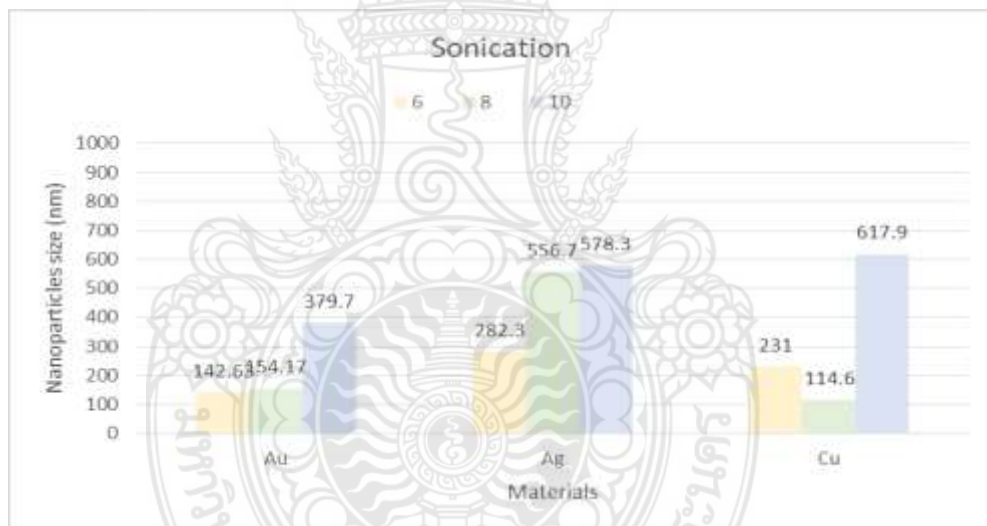
ขนาดของอนุภาคนาโนสังเคราะห์ถูกวัดด้วยเครื่อง Particle size analyzer แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าการสังเคราะห์อนุภาคนาโนในสภาวะไม่มีการสั่นขนาดของอนุภาคนาโนมีขนาดเล็กกว่าการสังเคราะห์อนุภาคนาโนในสภาวะที่มีการสั่น เนื่องจากการสั่นส่งผลให้อนุภาคนาโนที่สังเคราะห์เกิดการรวมตัวกันจนเป็นอนุภาคขนาดใหญ่และตกตะกอนได้ง่าย [25] ซึ่งแสดงผลเช่นเดียวกันของวัสดุทั้ง 3 ชนิด เมื่อพิจารณาผลของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ขนาดของอนุภาคนาโนสังเคราะห์เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน เนื่องจากการเพิ่มความเข้มของแสงเลเซอร์ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณการเกิดอนุภาคนาโนมีอัตราเพิ่มสูงขึ้น โอกาสในการจับตัวกันของอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นจึงมีสูงขึ้น ซึ่งพบในวัสดุทั้ง 3 ชนิด เมื่อพิจารณาชนิดของวัสดุพบว่าที่ความต่างศักย์เดียวกัน วัสดุทอง ทองแดง และเงินมีขนาดแตกต่างกัน โดยที่ความต่างศักย์ 6V ส่งผลให้มีขนาดเล็กที่สุด โดยทอง ทองแดง และเงิน มีขนาดอยู่ที่ 87.20 162.53 และ 133.67 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ขนาดอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ด้วยเครื่อง Particle size analyzer

Materials	Au		Ag		Cu	
	Normal	Sonication	Normal	Sonication	Normal	Sonication
6	87.2	142.63	162.53	282.3	133.67	231
8	163.9	154.17	605.67	556.7	134.43	114.6
10	647.7	379.7	478.4	578.3	175	617.9



ก. สภาวะที่ไม่มีการสั่น

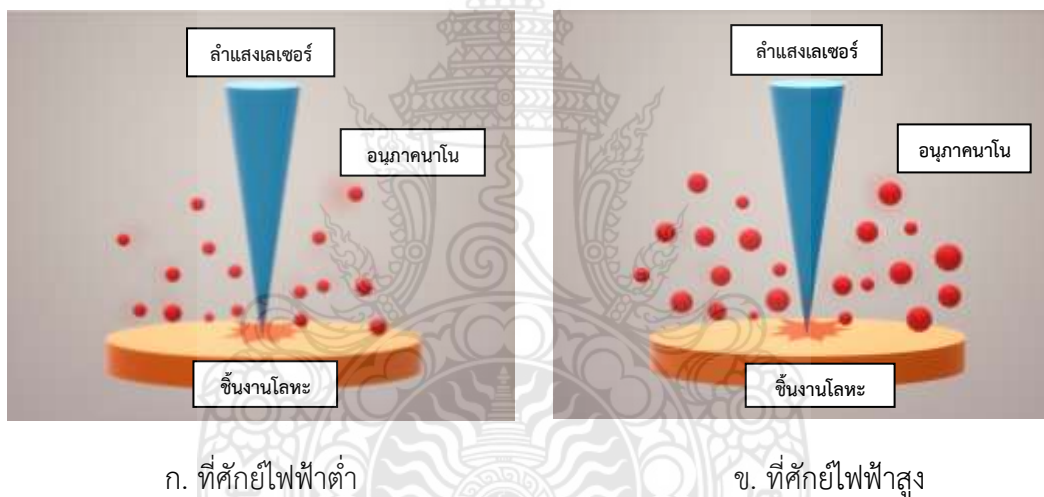


ข. สภาวะที่มีการสั่น

รูปที่ 4.2 ขนาดอนุภาคนาโนสังเคราะห์ที่สภาวะในการสังเคราะห์ต่างๆ

#### 4.5 แบบจำลองกลไกการเกิดอนุภาคนาโนที่มีการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์

กลไกการระเหยด้วยเลเซอร์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของโลหะและตัวกลางในสภาพแวดล้อม ดังนั้นการระเหยของโลหะจึงเป็นเรื่องซับซ้อน [26] [27] [28] การระเหยของโลหะเริ่มต้นด้วยการดูดซับพลังงานของลำแสงเลเซอร์ เมื่อลำแสงเลเซอร์ทำปฏิกิริยากับชิ้นงานโลหะ ความร้อนและโฟตอนอิเล็กตรอนจึงสามารถเกิดขึ้นได้ หลังจากนั้นอนุภาคนาโนโลหะจะถูกปล่อยออกมาจากแผ่นโลหะ เนื่องจากเฟสที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานที่ดูดซับและพลาสมาก็เกิดการขยายตัว [26] ดังนั้นความเข้มข้นและการกระจายตัวของอนุภาคนาโนโลหะจึงขึ้นอยู่กับความเข้มของลำแสงเลเซอร์ [29] [30] ดังรูป ก และ ข



รูปที่ 4.3 กลไกการเกิดอนุภาคนาโนจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วย laser abrasion

## บทที่ 5

### สรุปผล วิเคราะห์ และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลที่ได้รับจากโครงการ

จากการดำเนินการตามวัตถุประสงค์ของโครงการ ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคโลหะนาโน (ทองคำ (Au), เงิน (Ag), และทองแดง (Cu)) ด้วยกระบวนการ laser ablation ในน้ำ จากผลการทดสอบขนาดของอนุภาคโลหะนาโนที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการ laser ablation ในน้ำ พบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์สัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคโลหะนาโนที่ได้ คือการใช้ศักย์ไฟฟ้า 6V ในการสังเคราะห์จะทำให้ได้ขนาดของอนุภาคโลหะนาโนขนาดเล็กและการใช้ศักย์ไฟฟ้า 8V, 10V ก็จะได้ขนาดของอนุภาคโลหะนาโนใหญ่ตามไปด้วย เนื่องจากพลังงานของเลเซอร์มากขึ้น จึงทำให้โฟตอนต่อเวลามากขึ้น โอกาสการหลอมจึงมากขึ้นตามไปด้วย

ในการสังเคราะห์อนุภาคโลหะนาโนด้วยกระบวนการ laser ablation แบบปกติและแบบใช้เครื่อง sonication ขนาดของอนุภาคโลหะนาโนที่สังเคราะห์ได้นั้นมีความแตกต่างแบบไม่มีนัยสำคัญ

#### 5.2 ปัญหาและอุปสรรค

5.2.1 อนุภาคโลหะนาโนบางตัวอย่างเกิดการตกตะกอน ทำให้การวัดขนาดอนุภาคโลหะนาโนเกิดความคลาดเคลื่อน

5.2.2 อุปกรณ์ไม่เพียงพอ

#### 5.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

5.3.1 เข้าใจหลักการการสังเคราะห์อนุภาคนาโนด้วยกระบวนการเลเซอร์เอปเบลชัน

5.3.2 เผยแพร่ผลงานทางการวิจัยด้านการสังเคราะห์อนุภาคนาโนด้วยกระบวนการเลเซอร์เอปเบลชันในน้ำ

5.3.3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโน เพื่อนำไปใช้งานทางด้านต่างๆ

5.3.4 เข้าใจเกี่ยวกับอนุภาคนาโนมากขึ้น

## 5.4 ข้อเสนอแนะ

การวิจัยครั้งนี้พบว่ามีปัญหาในการทำวิจัย 2 ประการ ซึ่งหากมีการวิจัยในครั้งต่อไปจะได้มีการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ เพื่อให้งานวิจัยสมบูรณ์ยิ่งขึ้นได้แก่

5.4.1 ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลทำให้อุณหภูมิของอนุภาคโลหะนาโนที่สังเคราะห์ได้เกิดการตกตะกอนคือ สารลดแรงตึงผิว หรืออาจจะมีปัจจัยอื่นๆอีกหลายปัจจัยที่ผู้วิจัยยังไม่ได้ทำการศึกษา ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาปัจจัยอื่นๆเพิ่มเติมเพื่อให้ครอบคลุมและนำไปสู่งานวิจัยที่ดีขึ้นต่อไป

5.4.2 เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ละเอียดมากขึ้นควรศึกษางานวิจัยของนักวิจัยท่านอื่นๆที่ทำงานวิจัยหรือสอบถามอาจารย์ผู้ที่มีความรู้เกี่ยวกับงานวิจัยนี้



## เอกสารอ้างอิง

- [1] Nourbakhsh, S., Habibi, S. and Rahimzadeh, M. (2017). “Copper Nano-Particles for Antibacterial Properties of Wrinkle Resistant Cotton Fabric”, *Materials Today: Proceedings*. 4, 7032-7037.
- [2] Ojha, N. K., Zyryanov, G.V., Majee, A., Charushin, V. N., Chupakhin, O.N. and Santra, S. (2017). “Copper Nanoparticles as Inexpensive and Efficient Catalyst: A Valuable Contribution in Organic Synthesis”, *Coordination Chemistry Reviews*. 353, 1-57.
- [3] Son, Y., Jang, J., Kang, M. K., Ahn, S. and Lee, C.S. (2018). “Application of Flash-Light Sintering Method to Flexible Inkjet Printing using Anti-Oxidant Copper Nanoparticles”, *Thin Solid Films*. 656, 61-67.
- [4] Tang, X., Yang, Z., Wang and W. (2010). “A Simple Way of Preparing High-Concentration and High-Purity Nano Copper Colloid for Conductive Ink in Inkjet Printing Technology”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 360, 99-104.
- [5] Gould, R. Gordon (1959). “The LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”. in Franken, P.A. and Sands, R.H. (Eds.). *The Ann Arbor Conference on Optical Pumping*, the University of Michigan, 15 June through 18 June 1959. pp. 128. OCLC 02460155.
- [6] Dulbecco, R.; et al. (1954). “Plaque formation and isolation of pure lines with poliomyelitis viruses”. *J. Exp. Med.* 99 (2): 167–182.
- [7] McColm, I. J., “*Dictionary of Ceramic Science and Engineering*”, 2nd, New York : Plenum Press, 1994.
- [8] วรณวิภา นามสุวรรณ และ ฤทธิ มีสัจย์, “การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเมตรเพื่อตรวจวัดระดับคอรีอะตินีน”, การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 19, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, หน้า 608-617, 2561



- [9] ณัฐพล โพธิ์ไพฑูรย์ และ ณัฐพล ภูตระกูลโชติ, “การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในน้ำยางธรรมชาติสำหรับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง”, งานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26, มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, หน้า 183-190, 2561
- [10] นินนาท จันท์ ศุภกร กตาทิการกุล และ สุเจนต์ พรหมเหมือน, “การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดงด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี”, งานประชุมระดับชาติมหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 28, มหาวิทยาลัยทักษิณ, หน้า 107-114, 2561
- [11] อัจฉราพร ศรีอ่อน, “Materials Characterization”, ห้องปฏิบัติการวัสดุทางการแพทย์ หน่วยวิจัยวิศวกรรมชีวการแพทย์, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, หน้า 77-80, 2559  
[https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/299\\_77.pdf](https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/299_77.pdf)
- [12] บริษัท ไชยเจริญเทคโนโลยี จำกัด. ม.ป.ป. ประวัติเลเซอร์. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <https://www.chi.co.th/article/article-1010/>. (วันที่สืบค้นข้อมูล : 10 กุมภาพันธ์ 2563).
- [13] นพพร รัตนช่วง. ม.ป.ป. คู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์ยุคใหม่ (01420222). คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม. (อัสสำเนา).
- [14] NANOTEC. (2561). หลักการ UV/VIS Spectrophotometer. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก [https://www.nanotec.or.th/th/?page\\_id=575](https://www.nanotec.or.th/th/?page_id=575). (วันที่สืบค้นข้อมูล: 12 กุมภาพันธ์ 2563)
- [15] NANOTEC. (2561). วิธีใช้งาน UV/VIS Spectrophotometer. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก [https://www.nanotec.or.th/th/?page\\_id=576](https://www.nanotec.or.th/th/?page_id=576). (วันที่สืบค้นข้อมูล: 12 กุมภาพันธ์ 2563)
- [16] MTEC. (2559). หลักการการทำงานของเครื่องวัดขนาดอนุภาค (particle size analyzer). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก [https://old.mtec.or.th/mcu/phcl/files/presentation/Technique\\_for\\_PC.pdf](https://old.mtec.or.th/mcu/phcl/files/presentation/Technique_for_PC.pdf). (วันที่สืบค้นข้อมูล: 20 กุมภาพันธ์ 2563)
- [17] THAILAND SCIENTIFIC EQUIPMENT CENTER NETWORK (TSEN). (2560). Particle Size Analyzer. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://tsen.in.th/particle-size-analyser/>. (วันที่สืบค้นข้อมูล: 16 กุมภาพันธ์ 2563)
- [18] WIKIMEDIA COMMONS. (2018). Laser ablation. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schematic\\_Representation\\_of\\_Laser\\_Ablation\\_Electrospray\\_Ionization\\_\(LAESI\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schematic_Representation_of_Laser_Ablation_Electrospray_Ionization_(LAESI).png). (วันที่สืบค้นข้อมูล: 16 กุมภาพันธ์ 2563)

- [19] วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. (2563). คุณสมบัติทั่วไปของทองคำ (Au). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%97%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%84%E0%B8%B3>. (วันสืบค้นข้อมูล: 17 กุมภาพันธ์ 2563)
- [20] วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. (2560). คุณสมบัติทั่วไปของเงิน (Ag). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก [https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%80%E0%B8%87%E0%B8%B4%E0%B8%99\\_\(%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%AB%E0%B8%B0\)](https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%80%E0%B8%87%E0%B8%B4%E0%B8%99_(%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%AB%E0%B8%B0)). (วันสืบค้นข้อมูล: 17 กุมภาพันธ์ 2563)
- [21] วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. (2560). คุณสมบัติทั่วไปของทองแดง (Cu). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%97%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%81%E0%B8%94%E0%B8%87>. (วันสืบค้นข้อมูล: 17 กุมภาพันธ์ 2563)
- [22] Indiamart. (2019). UV-Visible-Spectrophotometer. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <https://www.indiamart.com/proddetail/refurbished-uv-visible-spectrophotometer-11841006391.html>. (วันสืบค้นข้อมูล: 29 กุมภาพันธ์ 2563)
- [23] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. (2558). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <https://sites.google.com/site/csicscitu/instrument/kheruxngwikheraahkhnadxnuphakhparticlesizeanalyzer>. (วันสืบค้นข้อมูล: 29 กุมภาพันธ์ 2563)
- [24] ศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา. (2557). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก [http://science.skru.ac.th/knlMain.php?k\\_id=9](http://science.skru.ac.th/knlMain.php?k_id=9). (วันสืบค้นข้อมูล: 19 พฤษภาคม 2563)
- [25] ปาลิตา พงศานนท์, “การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำโดยใช้ทางน้ำยางและการใช้สารตั้งต้นที่เหลือ”, วทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2561
- [26] Yang GW. Laser ablation in liquids: Applications in the synthesis of nanocrystals. *Progress in Materials Science*. 2007;52:648-698
- [27] Fabbro R, Fournier J, Ballard P, Devaux D, Virmont J. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry. *Journal of Applied Physics*. 1990;68:775-784

- [28] Sakka T, Iwanaga S, Ogata YH, Matsunawa A, Takemoto T. Laser ablation at solid-liquid interfaces: An approach from optical emission spectra. *The Journal of Chemical Physics*. 2000;112:8645-8653
- [29] Sylvestre JP, Kabashin AV, Sacher E, Meunier M. Femtosecond laser ablation of gold in water: Influence of the laser-produced plasma on the nanoparticle size distribution. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. 2005;80:753-758
- [30] Nichols WT, Sasaki T, Koshizaki N. Laser ablation of a platinum target in water. I. Ablation Mechanisms. *Journal of Applied Physics*. 2006;100:114911-114917





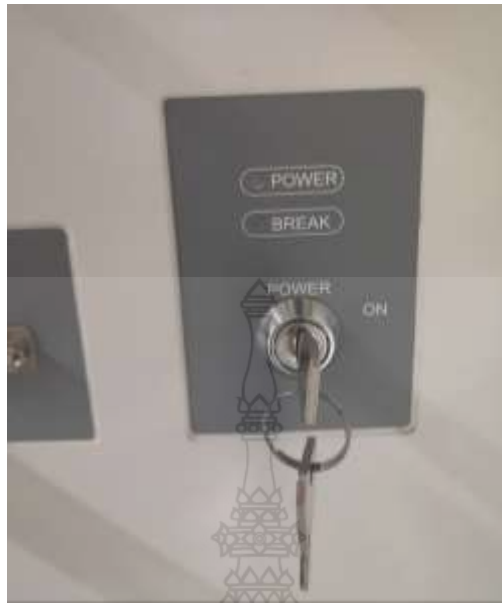
ภาคผนวก



รูปที่ 1 เครื่องเลเซอร์



รูปที่ 2 ถังควบคุมและหล่อเย็น



รูปที่ 3 บริเวณเปิดเครื่องเลเซอร์



รูปที่ 4 กำหนดศักย์ไฟฟ้า



รูปที่ 5 ที่ตั้งเพื่อเปิดเลเซอร์



รูปที่ 6 เลนส์สะท้อน



รูปที่ 7 รีโมทคอนโทรล





## ประวัติการศึกษา



ชื่อ นามสกุล	นางสาวสุปราณี เนาวกุล	
วัน เดือน ปีเกิด	2 มกราคม 2540	
ภูมิลำเนา	จังหวัดชัยภูมิ	
ประวัติการศึกษา		
วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ระดับประถมศึกษา	โรงเรียนบ้านโคกล่าม	2552
ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนมารีย์อุปถัมภ์ชัยภูมิ	2555
ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย	โรงเรียนชัยภูมิภักดีชุมพล	2559
ระดับอุดมศึกษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2563

### ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้

ที่อยู่ 127 ม.8 บ้านโคกล่าม ตำบลนาหนองทุ่ม อำเภอแก้งคร้อ จังหวัดชัยภูมิ 36150

อีเมลล์ s.peemai85@gmail.com

เบอร์โทร 094-841-7834