

ผลของสารสกัดจากขมิ้นต่อคุณสมบัติเชิงแม่เหล็กของอนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์  
Effect of Curcumin Extract on Magnetic Property of Iron Oxide Magnetic Nanoparticles

ศิริวัฒนา อุ่นผาง<sup>1</sup>  
วสุกิจจ์ ธนูรัตน์<sup>2</sup>  
สุภาวดี ดาวดี<sup>3</sup>  
วิยะดา หาญชนะ<sup>4</sup>  
ธีรยุทธ ชาญนวงศ์<sup>4</sup>  
วรรณมา ศิริแสงตระกูล<sup>5</sup>

**บทคัดย่อ**

จากคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปของสนามแม่เหล็กในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงด้วยการตอกหรือประทับลงบนแผ่นโลหะ เมื่อฉีดพ่นด้วยอนุภาคแม่เหล็กลงไปจะมีการดึงดูดทำให้เกิดเป็นเส้นให้เห็นร่องรอยการกู้คืนได้ และจากคุณสมบัติของอนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ (Iron oxide magnetic nanoparticles, IMNs) ที่แสดงคุณสมบัติเชิงแม่เหล็กได้ดีสังเคราะห์ง่าย มีความเป็นพิษต่ำ การศึกษานำร่องในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงแม่เหล็กของอนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ที่เคลือบอนุภาคด้วยสารสกัดจากขมิ้น โดยการสังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอนร่วมร่วมกับอัลตราโซนิคควิเทชัน แล้วเคลือบด้วยสารสกัดขมิ้น โดยมีกรดโอเลอิกเป็นตัวเชื่อม ตรวจสอบวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR), แมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั้น (VSM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ผลการศึกษาพบว่า FTIR ยืนยันการเกิดพันธะระหว่างสารสกัดขมิ้นกับอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์(ความถี่  $1503.35\text{ cm}^{-1}$  และ  $3370.72\text{ cm}^{-1}$ ) เกิดเป็นอนุภาค Curcumin loaded-Iron oxide magnetic nanoparticles (CMNs) ที่สังเคราะห์ได้ และมีความการดูดกลืนแสงที่ 424 nm คุณสมบัติทางแม่เหล็กวิเคราะห์ด้วย VSM พบเป็นอนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ที่ประกอบด้วยแมกนีไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) และแมกฮีไมต์ ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยเมื่อวิเคราะห์ด้วย TEM พบมีขนาดใกล้เคียงกับ Unloaded-Iron oxide magnetic nanoparticles (UMNs) แต่ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวของ CMNs มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ UMNs และ IMNs และแสดงพฤติกรรมแม่เหล็กแบบซูเปอร์พารา (superparamagnetic) ผลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการคัดเลือก

<sup>1</sup> นักศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
<sup>2</sup> พันตำรวจเอก ศูนย์พิสูจน์หลักฐาน 4 จังหวัดขอนแก่น  
<sup>3</sup> รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาเภสัชเคมี คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
<sup>4</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
<sup>5</sup> อาจารย์ประจำ สาขานิติวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

อนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจพิสูจน์การขูดลบร่องรอยเลขหมายรถยนต์  
เพื่อใช้เป็นหลักฐานในกระบวนการยุติธรรมต่อไป

**คำสำคัญ** แม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์, แมกนีไทต์, แมกฮีไมต์

### **Abstract**

The alteration of the magnetic field due to the compression or stamp on the metal plate, when spray with the magnetic particles on to the areas which were changed, the reaction of magnetic nanoparticles with magnetization leads to a visible line of obliterate which have been restoration. Concomitant with good magnetic properties, simple to synthesize and low toxicity of Iron oxide magnetic nanoparticles (IMNs). Thus, this preliminary study aimed to investigate the magnetic property of Curcumin extract loaded-Iron oxide magnetic nanoparticles (CMNs). The magnetic nanoparticles were synthesized using a co-precipitation and, ultrasonic cavitation method and coating with curcumin by oleic acid linker. The synthesized IMNs were characterized using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), Vibrating sample magnetometer (VSM) and Transmission electron microscopy (TEM). The FTIR spectrum of Curcumin loaded-Iron oxide magnetic nanoparticles (CMNs) at  $1503\text{ cm}^{-1}$  and  $3370.72\text{ cm}^{-1}$  were confirmed the bonding of curcumin extract and iron oxide loaded. The UV adsorption at 424 nm was also observed. From the result of VSM measurements the Iron oxide magnetic nanoparticles were a mixture of magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) and maghemite ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) The average size of CMNs was adjacent to Unloaded-Iron oxide magnetic nanoparticles (UMNs) when analyzed with TEM. However, the reduction of the saturated magnetization of CMNs was found when compared to UMNs and IMNs, along with exhibited superparamagnetic properties. The results from this study could be used as a basis for selection of Iron oxide magnetic nanoparticles to apply in restoration of obliterated vehicle identification number and evidence in litigation in further.

**Keyword** Ion oxide magnetic nanoparticles, Magnetite, Maghemite

## บทนำ

การปลอมแปลงเลขหมายประจำรถยนต์และอาวุธปืนเพื่อหลีกเลี่ยงการจับกุม เป็นปัญหาที่พบได้บ่อยในปัจจุบัน การตรวจพิสูจน์การปลอมแปลงเลขหมายจึงมีความสำคัญในกระบวนการสืบสวนสอบสวน ซึ่งทำได้หลายวิธี เช่นอิเล็กทรอนิกส์ การลดความดันโดยทำให้เกิดฟองอากาศ การให้ความร้อน และวิธีการทางเคมี ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันแต่วิธีการต่าง ๆ มีความจำเพาะต่อประเภทโลหะ และมักพบปัญหาการทำลายผิวหน้าของตัวอย่างก่อนทำการตรวจพิสูจน์ จากการขีดและกัดด้วยกรด ก่อให้เกิดการกัดกร่อนของวัตถุพยาน และไม่สามารถตรวจพิสูจน์ซ้ำได้ (Kuppuswamy & Senthikumar, 2004 : 13) ในขณะที่การตอกเลขหรือการประทับเลขนั้น เป็นการทำให้โครงสร้างของโลหะเกิดการผิดรูป เช่น ความไม่เป็นระเบียบของ crystal หรือ grain ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสนามแม่เหล็กในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลง จากความแตกต่างของความแรงของสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดเป็นขั้วแม่เหล็กขนาดเล็กจากรอยร้าวของเส้นแรงแม่เหล็กรอบ ๆ บริเวณตัวอย่าง หากฉีกพ่นอนุภาคแม่เหล็กลงไปบนตัวอย่าง อนุภาคแม่เหล็กจะถูกดึงดูดไปอยู่บริเวณขั้วดังกล่าว เกิดเป็นเส้นให้เห็นร่องรอยการกู้คืนได้ (Azlan Mohd Zaili, Kuppuswamy, & Harun, 2006 : 27-28; Mozayani & Noziglia, 2006 : 51) ในปัจจุบันมีอนุภาคแม่เหล็กหลากหลายชนิดที่ใช้ในงานตรวจสอบ ทั้งในรูปผงแห้งหรือสารแขวนลอยในน้ำหรือน้ำมัน หรืออนุภาคแม่เหล็กที่เคลือบด้วยสารฟลูออเรสเซนต์ที่เรืองแสงภายใต้แสงยูวี เป็นต้น (Treptow, 1978 : 84-85)

อนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ (Iron oxide magnetic nanoparticles) เป็นวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างในระดับนาโน มีความเป็นพิษต่ำ (ฐิติรัตน์ เจริญตา, 2555 : 2-3) แสดงพฤติกรรมแบบซูเปอร์พาราแมกเนติก มีสมบัติแม่เหล็กที่ไม่เสถียร ไม่มีอำนาจแม่เหล็กตกค้าง (Kandpal et al., 2013 : 87) การสังเคราะห์ทำได้หลายวิธี เช่น การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล การสังเคราะห์ด้วยเทคนิคโซลเจล และวิธีการตกตะกอนร่วม (สันติ ภูมิจึง, 2555 : 57) รวมทั้งการเคลือบอนุภาคด้วยสารสกัดจากธรรมชาติที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงได้ดี เช่น สาร curcumin สามารถกระทำ curcumin เป็นสารสกัดจากธรรมชาติในกลุ่ม curcuminoid ที่พบมากในเหง้าขมิ้นชัน (*Curcuma longa* Linn.) มีสีเหลืองส้ม มีกลิ่นเฉพาะตัว (สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม, 2549 : 228) จากการศึกษาของ Kitture et al. (2012 : 064702-1) ที่สังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ ( $Fe_3O_4$ ) ที่ conjugated กับโมเลกุลของสาร curcumin (CU) โดยใช้ citrate (CA) เป็นตัวเชื่อม (Fe-CA-CU) เพื่อนำไปใช้ในการยับยั้งการเกิดโรคมะเร็ง การเชื่อมกันของ curcumin กับอนุภาค  $Fe_3O_4$  พบเกิดบริเวณตรงกลางของ enol-OH group ของหมู่คาร์บอกซิลของโมเลกุลของ citrate ที่เคลือบบนอนุภาค  $Fe_3O_4$  และการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-Vis มีค่าการดูดกลืนแสงของ curcumin ที่ 423 nm มีสมบัติความเป็นแม่เหล็กที่ดีเนื่องจากเกิด hysteresis loop ของ  $Fe_3O_4$  และ Fe-CA-CU จากคุณสมบัติดังกล่าว การศึกษานี้จึงมีแนวคิดที่จะนำอนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์มาประยุกต์ใช้ในการตรวจพิสูจน์การขูดลบร่องรอยเลขหมายรถยนต์ โดยการศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสีย้อมที่เคลือบบนอนุภาคแม่เหล็กที่สังเคราะห์ต่อคุณสมบัติเชิงแม่เหล็กของอนุภาคแม่เหล็กนาโน ด้วยการสังเคราะห์โดยกระบวนการตกตะกอนร่วมร่วมกับกระบวนการ ultrasonic cavitation แล้วเคลือบด้วยสารสกัดจากธรรมชาติที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงยูวี คือ curcumin ที่สกัดได้

จากเหง้าขมิ้นชัน อนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จะนำมาตรวจยืนยันด้วยเทคนิค fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) เทคนิค transmission electron microscopy (TEM), ultraviolet visible spectroscopy (UV-Vis) และเทคนิค vibrating sample magnetometer (VSM) ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการคัดเลือกอนุภาคแม่เหล็กนาโนเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจพิสูจน์การชูดลบร่องรอยเลขหมาย และเพิ่มอีกทางเลือกในการตรวจพิสูจน์เพื่อใช้เป็นหลักฐานในกระบวนการยุติธรรมต่อไป

## วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงแม่เหล็กของอนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ที่เคลือบอนุภาคด้วยสารสกัดเคอร์คิวมิน

## วิธีการดำเนินการวิจัย

### 1. อุปกรณ์และสารเคมี

สาร  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  และ Oleic acid (Qrec, NZ),  $\text{NH}_4\text{OH}$  (PanReac Applichem, USA) Haxane และ Ethanol (BDH-Prolabo Chemicals, UK)

### 2. การเตรียมและการสกัดสารจากขมิ้น

นำเหง้าขมิ้นชัน มาล้างทำความสะอาดสิ่งให้แห้ง นำมาผานให้เป็นแผ่นบาง นำไปอบที่อุณหภูมิ 55 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำขมิ้นชันอบแห้งไปบดให้เป็นผงละเอียด เก็บในภาชนะที่ปิดฝาให้สนิท

ชั่งผงขมิ้นปริมาณ 0.3 g เติม ethanol ปริมาณ 10 ml เขย่าด้วย shaking water bath (memmert WNB7-45) (25, 2 hr) นำสารสกัดมากรองด้วยกระดาษกรอง (Whatman No.1) แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 5000 rpm เป็นเวลา 10 นาทีจะได้สารสกัด curcumin จากขมิ้นชัน (สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม, 2549 : 228)

### 3. การสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ (Unloaded-Iron oxide magnetic nanoparticles, UMNs)

ชั่ง  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ปริมาณ 0.810 g และ  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  ปริมาณ 0.298 g ลงใน volume metric flask ขนาด 50 ml (ความเข้มข้นสุดท้ายเป็น 0.02 และ 0.01 mol/L ตามลำดับ) เติม deionized water (DI) ให้ครบปริมาตร เขย่าให้ละลาย นำสารละลายที่เตรียมได้ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 ml เติมน้ำ DI ปริมาตร 100 ml และ ethanol (50 %) ปริมาตร 50 ml ให้ความร้อนด้วย glycerol oil bath คนต่อเนื่องตลอดเวลาจนสารละลายมีอุณหภูมิคงที่ (90°C) เติมกรดโอเลอิก (0.002 mol/L) ปริมาณ 0.1 ml เพื่อเคลือบอนุภาคและทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อม (additional linkers) แล้วเติม 30%  $\text{NH}_4\text{OH}$  ปรับค่า pH=8 หยุดให้ความร้อนและคนสารละลายต่อเนื่องด้วย magnetic stirrer เพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยาของอนุภาคแม่เหล็กนำตะกอนของอนุภาคแม่เหล็กจากการสังเคราะห์ไปล้างด้วย ultrasonic cavitation ที่ความถี่ 16.78 Hz และค่า UL ที่ 120×10 W (30 min) ทิ้งสารละลายให้ตกตะกอนที่อุณหภูมิห้อง นำตะกอนอนุภาคแม่เหล็กมาล้าง

ด้วยเอทานอลและเฮกเซน ปริมาตร 50 ml ตามลำดับ นำอนุภาคแม่เหล็กที่ได้ไปปั่นเหวี่ยง ที่ 5000 rpm (5 min) นำตะกอนที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 45 °C

#### 4. การเคลือบอนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ด้วยสารสกัดจากขมิ้น (curcumin loaded-Iron oxide magnetic nanoparticles, CMNs)

นำผงอนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ (IMNs) ที่สังเคราะห์ได้ปริมาณ 0.5 g ใส่ลงไปในสารสกัด curcumin ปริมาตร 10 ml คนต่อเนื่องตลอดเวลาด้วย magnetic stirrer (25 °C, 2 hr) ครบเวลานำอนุภาคแม่เหล็กมาล้างด้วยน้ำ DI แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 5000 rpm (10 min) นำผงอนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ที่เคลือบด้วยสารสกัดจากขมิ้น (CMNs) ที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 45 °C

#### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

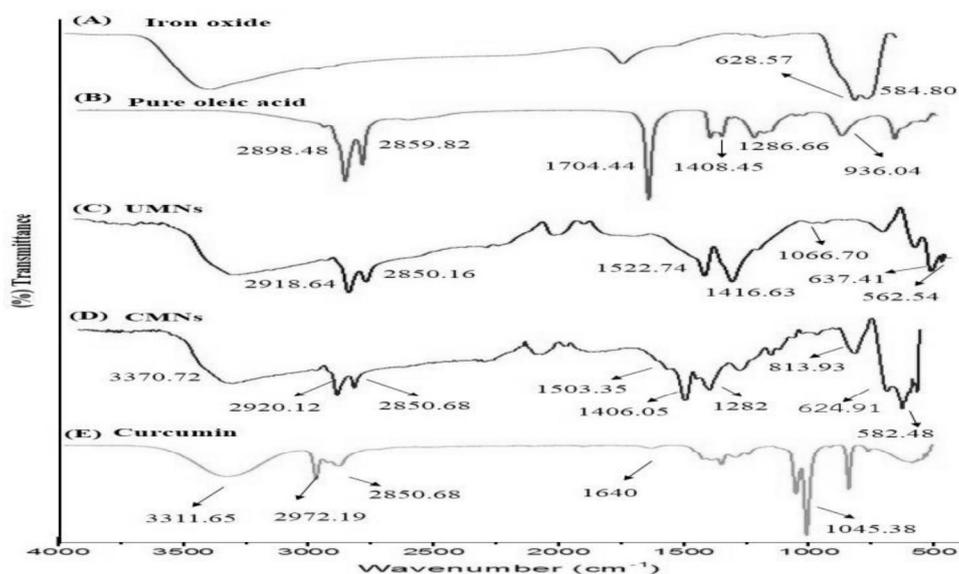
##### การสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ (Iron oxide magnetic nanoparticles, IMNs)

สเปกตรัมของ FTIR พบการสั่นระหว่างพันธะของ Fe และ O ที่ความถี่ 628.57  $\text{cm}^{-1}$  และ 584.80  $\text{cm}^{-1}$  (ภาพที่ 1 A) ส่วนสเปกตรัมของกรดโอเลอิก (ภาพที่ 1 B) พบการสั่นของพันธะ C-H stretching ของหมู่เมทิลลีน ( $\text{CH}_2$ -) แบบไม่สมมาตรและแบบสมมาตร ที่ความถี่ 2898.48  $\text{cm}^{-1}$  และ 2859.82  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ ที่ความถี่ 1704.44  $\text{cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของพันธะ  $\text{COO}^-$  stretching ของหมู่  $\text{COO}^-$  และที่ความถี่ 1286.66  $\text{cm}^{-1}$  พบการสั่นของพันธะ C-O stretching ซึ่งเป็นพันธะเดี่ยว ที่ความถี่ 1408.45  $\text{cm}^{-1}$  และ 936.04  $\text{cm}^{-1}$  พบการสั่นของพันธะ O-H stretching ที่อยู่ในระนาบและอยู่นอกระนาบตามลำดับ

สเปกตรัมของอนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ที่เคลือบด้วยกรดโอเลอิก (UMNs) (ภาพที่ 1 C) พบว่ามีพันธะเคมีของกรดโอเลอิกปรากฏในอนุภาคแม่เหล็กนาโนที่สังเคราะห์ได้ โดยพบการสั่นของพันธะ C-H แบบยืดของหมู่เมทิลลีนแบบไม่สมมาตรและแบบสมมาตรที่ความถี่ 2918.64  $\text{cm}^{-1}$  และ 2850.16  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่ดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาคแม่เหล็กนาโน แสดงลักษณะของพีคที่เลื่อนไปยังบริเวณที่มีความถี่ต่ำกว่า อธิบายได้ว่ามีสายไฮโดรคาร์บอนในโมโนเลเยอร์บริเวณรอบ ๆ อนุภาคแม่เหล็กนาโน (Zhang, He, & Gu, 2006 : 2613) ที่ความถี่ 1704.44  $\text{cm}^{-1}$  ไม่พบพีคของหมู่คาร์บอกซิล ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของกรดโอเลอิก แต่พบพีคของการดูดกลืนแสงที่เกิดขึ้นใหม่ ที่ความถี่ 1522.74  $\text{cm}^{-1}$  และ 1416.63  $\text{cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของพันธะ  $\text{COO}^-$  stretching ที่ไม่สมมาตรและสมมาตร ตามลำดับ บ่งชี้ได้ว่าเป็นพันธะของกรดคาร์บอกซิลเลตที่เกิดขึ้นบนผิวของอนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ (Mahdavi et al., 2013 : 7540; Zhang, He, & Gu, 2006 : 2613) (ภาพที่ 1 C) และพบการสั่นของพันธะ C-O stretching ซึ่งเป็นพันธะเดี่ยวที่ความถี่ 1066.70  $\text{cm}^{-1}$  ยืนยันได้ว่ามีกรดโอเลอิกเคลือบอยู่บนอนุภาคแม่เหล็กนาโน และที่ความถี่ 637.41  $\text{cm}^{-1}$  และ 562.54  $\text{cm}^{-1}$  พบการสั่นระหว่างพันธะของ Fe และ O

สเปกตรัมของ pure curcumin (ภาพที่ 1 E) พบค่าสัญญาณสูงสุดที่ความถี่ 3311.65  $\text{cm}^{-1}$  พบการสั่นของพันธะ OH ของกลุ่มฟีนอลในขมิ้น ที่ความถี่ 2972.19 และ 2850.68  $\text{cm}^{-1}$  พบการสั่นระหว่างพันธะแบบสมมาตรและไม่สมมาตรในโหมดการสั่นของ aliphatic C-H ตามลำดับ ที่ความถี่ 1640  $\text{cm}^{-1}$  พบการ

สั่นระหว่างพันธะ  $\nu(\text{C}=\text{C})$  และ  $\nu(\text{C}=\text{O})$  ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของ pure curcumin (Braick et al., 2016 : 98678-98679) และพบสเปกตรัมที่ความถี่ 1587, 1512, 1276 และ  $1026\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นการสั่นระหว่างพันธะของวงเบนซีน (C=C vibrations) ในโหมดการสั่นของพันธะ keto (C=O) stretching, enol C-O และ C-O-C stretching ตามลำดับ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของ curcumin เมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของ CMNs (ภาพที่ 1 D) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง Iron oxide core และ protective shell of oleic acid พบการสั่นของพันธะที่ความถี่  $1730\text{ cm}^{-1}$  แสดงกรดโอเลอิก และพบพีกใหม่ปรากฏขึ้นที่ความถี่  $1503.35\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของพันธะ  $\text{COO}^-$  stretching แบบสมมาตร แสดงหมู่คาร์บอกซิล (Tran et al., 2010 : 105-107) นอกจากนี้ยังพบสัญญาณสูงสุดที่ความถี่  $3370.72\text{ cm}^{-1}$  เกิดจากการสั่นของพันธะ OH stretching ของ CMNs ซึ่งเกิดจากการยึดเกาะของพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของกรดโอเลอิกและ curcumin และยังพบพีกที่ความถี่ 1406.05, 1282 และ  $813.93\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีกของฟังก์ชัน curcumin และพบการสั่นระหว่างพันธะ Fe และ O ที่ความถี่  $624.91\text{ cm}^{-1}$  และ  $582.48\text{ cm}^{-1}$  ยืนยันว่าเป็นเฟสของอนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ (Mahdavi et al., 2013 : 7540)

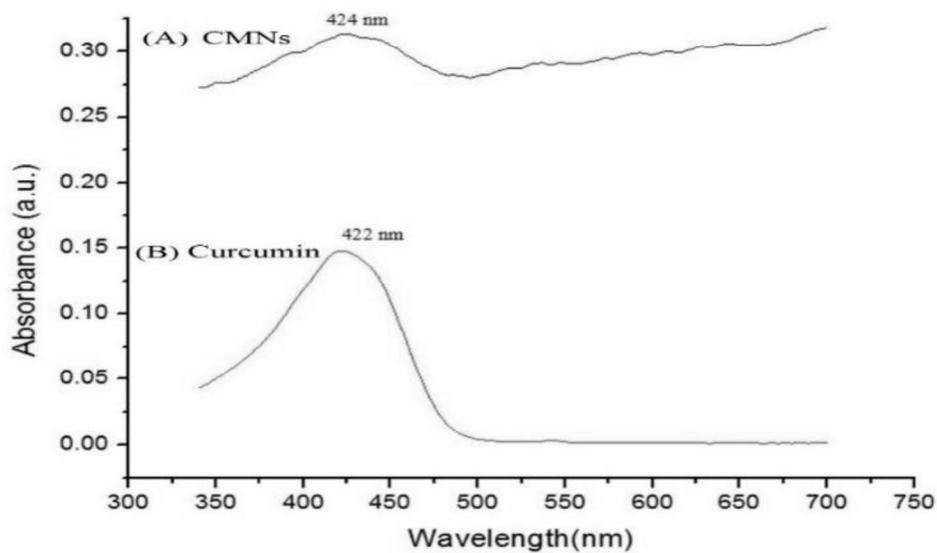


ภาพ 1 FTIR สเปกตรัมของ (A) Iron oxide magnetic nanoparticles, IMNs (B) pure oleic acid (C) Unloaded-Iron oxide magnetic nanoparticles (UMNs) (D) Curcumin loaded-Iron oxide nanoparticles (CMNs) (E) Curcumin

### การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของ curcumin และ Curcumin loaded-Iron oxide nanoparticles (CMNs)

การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV – visible spectrophotometer (200-800 nm) เปรียบเทียบระหว่าง curcumin (ภาพที่ 2 A) และ CMNs (ภาพที่ 2 B) พบว่า curcumin มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดที่ 422 nm ส่วน CMNs มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดที่ 424 nm

การดูดกลืนแสงของ curcumin-Iron oxide conjugated มีการ shift band ไปประมาณ 2 nm เมื่อเปรียบเทียบกับ curcumin ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงาน หรือเกิดการแทนที่ชั้นจาก  $\pi$  ไปยัง  $\pi^*$  พบได้ในสารประกอบที่มีพันธะคู่ พันธะสาม หรืออโรแมติกที่มีอิเล็กตรอนอยู่ใน  $\pi$  ออร์บิทัล เมื่อได้รับพลังงานจากรังสี UV อิเล็กตรอนจะเคลื่อนไปอยู่ใน  $\pi^*$  ออร์บิทัล (Tran et al., 2010 : 107; เย็นหทัย แน่นหนา, 2549 : 55) จากการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงไม่พบสเปกตรัมปลอมปน สรุปได้ว่าไม่เกิดการถ่ายโอนประจุอิเล็กตรอนของลิแกนด์ (curcumin) ไปยังโลหะ ( $Fe^{2+}$ ) (Tran et al., 2010 : 107)



ภาพ 2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ curcumin และ Curcumin loaded-Iron oxide nanoparticles (CMNs)

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาและโครงสร้างเฟสของอนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ โดยเทคนิค transmission electron microscopy (TEM)

จากการสังเคราะห์ในทุกสภาวะ เมื่อนำมาวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาและโครงสร้างเฟสของอนุภาคด้วย TEM โดยพิจารณาจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนจากเทคนิค selected area electron diffraction (SAED) โดยการพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน สามารถวิเคราะห์โครงสร้างทางผลึกด้วยการเปรียบเทียบค่าระยะห่างระหว่งระนาบ กับฐานข้อมูลของแมกนีไทต์ ( $Fe_3O_4$ ) และแมกนีไมต์ ( $\gamma-Fe_2O_3$ ) โดยมีค่าแลตทิทพารามิเตอร์ ( $a_0 = 8.3980 \text{ \AA}$ ) ของ (Tsukimura et al., 1997 : 3609) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ “Camera equation”

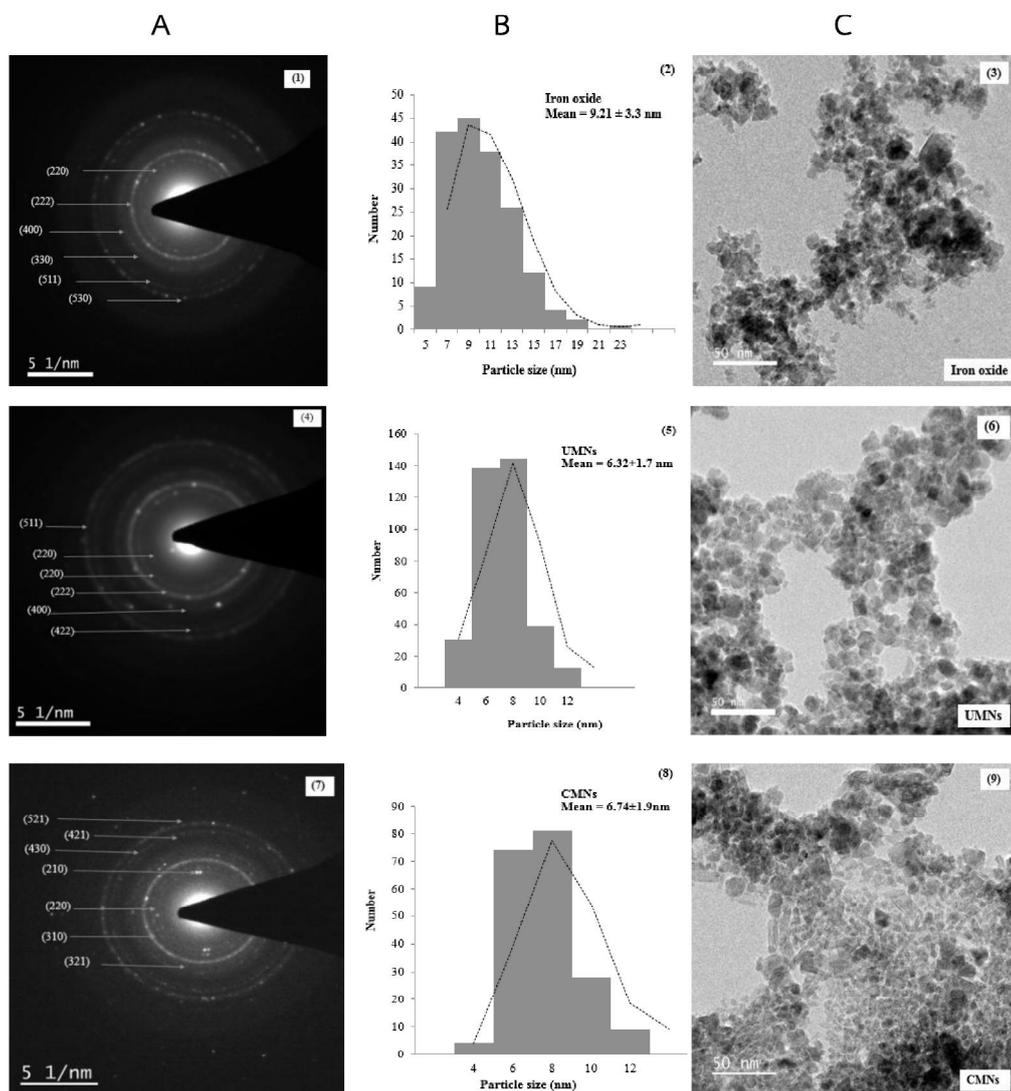
$$Rd = \lambda L$$

เมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนลักษณะเป็นวง (ภาพที่ 3; A-1, A-4 และ A-7) สามารถอธิบายได้ว่าอนุภาคแม่เหล็กนาโนที่สังเคราะห์ได้ มีโครงสร้างภายในเป็นแบบพหุผลึก เนื่องจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนที่มีลักษณะเป็นจุดหลายจุดเรียงต่อกันเป็นวงกลม รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนสามารถวิเคราะห์โดยคำนวณเปรียบเทียบกับค่า  $d$  กับฐานข้อมูลอ้างอิง JCPDS No.01-087-2334 และ JCPDS No.00-039-1346 ค่า  $d$ -spacing ที่วัดได้จากอนุภาคแม่เหล็กที่สังเคราะห์ พบระนาบการเลี้ยวเบนของ Iron oxide, UMNs และ CMNs มีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามแบบของแมกนีไทต์ ( $Fe_3O_4$ ) และแมกนีไมต์ ( $\gamma-Fe_2O_3$ ) อ้างอิงตามฐานข้อมูลที่กล่าวในข้างต้น อนุภาคแม่เหล็กทุกสภาวะการสังเคราะห์ เป็นอนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ที่ประกอบด้วยแมกนีไทต์ ( $Fe_3O_4$ ) และแมกนีไมต์ ( $\gamma-Fe_2O_3$ ) มีโครงสร้างเป็นแบบลูกบาศก์ (Polycrystalline / Fe oxide, FCC) โดยสมบูรณ์และมีเฟสของแมกนีไมต์ ( $\gamma-Fe_2O_3$ ) ปะปนอยู่ในโครงสร้างของอนุภาคแม่เหล็ก มีค่า intensity peak ต่ำ เกิดการลดลงของค่า lattice constant ของอนุภาคแมกนีไทต์ ( $Fe_3O_4$ ) เนื่องมาจากบริเวณพื้นผิวของอนุภาคมีพลังงานมาก ทำให้  $Fe^{2+}$  มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน นำไปสู่การก่อตัวของแมกนีไมต์ ( $\gamma-Fe_2O_3$ ) ซึ่งมีค่า lattice constant คล้ายคลึงกับค่า lattice parameter ของแมกนีไทต์ ( $Fe_3O_4$ ) ที่เตรียมด้วยวิธีตกตะกอนร่วม (Gnanaprakash et al., 2007 : 170)

แมกนีไทต์ ( $Fe_3O_4$ ) เป็นวัสดุที่มีสมบัติแม่เหล็กในกลุ่มเฟอร์ริแมกเนติก มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบสปินเนล (Spinel) และมีคุณสมบัติเป็น mixed valent คือ ประกอบด้วยออกไซด์ของโลหะที่มีประจุ  $2+$  และ  $3+$  ทำให้สามารถแสดงความเป็นแม่เหล็กได้ (Ramimoghdam, Bagheri, & Hamid, 2014 : 207) แมกนีไมต์ ( $\gamma-Fe_2O_3$ ) เป็นออกไซด์ของแร่เหล็ก มีคุณสมบัติแม่เหล็กแบบเฟอร์ริ มีโครงสร้างคล้ายคลึงกับแมกนีไทต์ คือ โครงสร้างผลึกเป็นแบบ spinel โดยมี  $O^{2-}$  จัดเรียงอะตอมเป็นแบบ cubic close packed (CCP) ประกอบด้วยไอออนของ  $Fe^{2+}$  จัดเรียงอะตอมอยู่ใน octahedral site และ ไอออนของ  $Fe^{3+}$  จัดเรียงอะตอมอยู่ครึ่งของ tetrahedral site จากรายงานของ Wu, He, & Jiang. (2008 : 398) พบว่าแมกนีไทต์ ( $Fe_3O_4$ ) มีความคงตัวต่ำ สามารถเกิดออกซิเดชันได้เป็นแมกนีไมต์ ( $\gamma-Fe_2O_3$ ) ได้ในสภาวะที่มีออกซิเจน ดังนั้นการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแมกนีไทต์จึงควรทำในสภาพที่ไร้ออกซิเจน ในขณะที่การสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กนาโนในการวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ในบรรยากาศปกติ ไม่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนในระบบ จึงทำให้พบได้ทั้งแมกนีไทต์ ( $Fe_3O_4$ ) และแมกนีไมต์ ( $\gamma-Fe_2O_3$ ) ในระบบการสังเคราะห์ แต่จากการวัดคุณสมบัติในเชิงแม่เหล็กพบว่ายังคงคุณสมบัติทางแม่เหล็ก

การกระจายตัวของอนุภาคของ INMs พบเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนค่อนข้างหนาแน่น ส่วน UMNs และ CMNs อนุภาคมีการเกาะกลุ่มเป็นก้อนเช่นกัน แต่อนุภาคของ UMNs และ CMNs มีการกระจายตัวได้ดีกว่า INMs โดยขนาดของอนุภาคแม่เหล็กนาโนที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเล็กและใหญ่ปะปนกัน มีลักษณะคล้ายทรงกลม (ภาพที่ 3; C-3, C-6, C-9) โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ IMNs, UMNs และ CMNs ที่  $9.21 \pm 3.3$  ,  $6.32 \pm 1.7$  และ  $6.74 \pm 1.9$  nm ตามลำดับ ทุกสภาวะการสังเคราะห์มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่ำกว่า 10 nm เนื่องจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมร่วมกับกระบวนการ ultrasonic cavitation ที่การสั่น

ของคลื่นทำให้เกิดฟองอากาศมากกว่าที่ผิวของอนุภาค (Dang et al., 2007 : 870) ทำให้อนุภาคเกิดการแตกตัวจนมีขนาดเล็กลง และการเคลือบผิวอนุภาคด้วยกรดโอเลอิกป้องกันการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคช่วยให้อนุภาคมีการกระจายตัวที่ดีขึ้นได้ตะกอนละเอียดขนาดเล็กลง โดยขนาดอนุภาคแม่เหล็กที่แตกต่างกันระหว่าง IMNs และ UMNs อาจเกิดได้จากการเคลือบผิวอนุภาคด้วยกรดโอเลอิก (UMNs) ช่วยลดการดึงดูดกันของอนุภาคแม่เหล็กทำให้กระจายตัวได้ดี (Zhang, He, & Gu, 2006 : 2615) ขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ตรวจวัดได้จึงมีขนาดเล็กกว่า ในขณะที่ขนาดอนุภาคของ UMNs และ CMNs มีความแตกต่างกันของขนาดอนุภาคเพียงเล็กน้อย

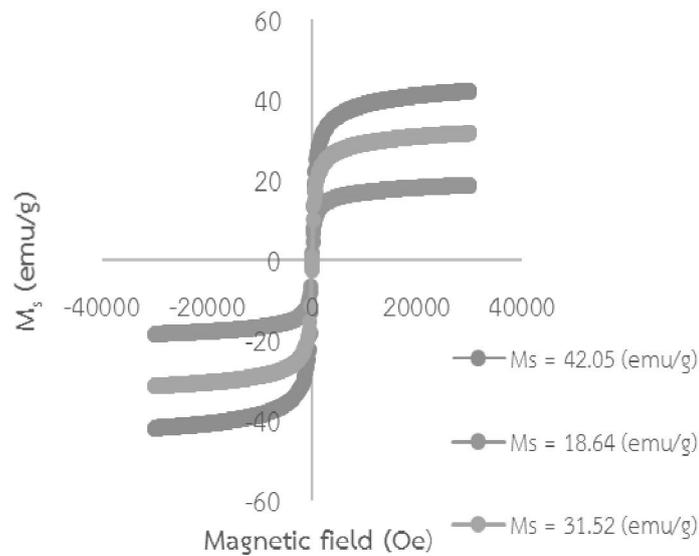


ภาพ 3 (A) รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (B) ขนาดของอนุภาคเฉลี่ย และ (C) ภาพถ่าย TEM ของอนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ (1-3) Iron oxide magnetic nanoparticles (IMNs), (4-6) Unloaded-Iron oxide magnetic nanoparticles (UMNs) และ (7-9) Curcumin loaded-Iron oxide nanoparticles (CMNs)

## ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กของอนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ที่เคลือบผิวอนุภาคด้วยกรดโอเลอิกโดยเทคนิค vibrating sample magnetometer (VSM)

จากการทดสอบคุณสมบัติเชิงแม่เหล็กในเบื้องต้นด้วยแท่งแม่เหล็กถาวร พบว่าอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ทุกสภาวะชุดติดได้โดยแท่งแม่เหล็กถาวร เมื่อนำมาศึกษาสมบัติฮิสเทอรีซิสเชิงแม่เหล็กด้วยเครื่อง VSM โดยให้สนามแม่เหล็กภายนอกในช่วง 30000 – 30000 Oe ที่อุณหภูมิ 300K พบว่า IMNs มีค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวสูงสุด คือ 31.52 emu/g และมีค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก เท่ากับ 1.84 Oe ส่วน UMNs พบว่ามีค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 42.05 emu/g และมีค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก เท่ากับ 0.18 Oe ในขณะที่ CMNs พบว่ามีค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวสูงสุดลดลง คือ 18.64 emu/g และมีค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก เท่ากับ 1.98 Oe ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวสูงสุดและค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กของ UMNs ที่แตกต่างจาก IMNs เกิดได้จาก เมื่อขนาดของอนุภาคของ UMNs มีขนาดเล็กลง ซึ่งในวัสดุแม่เหล็กนั้นคุณสมบัติโดยทั่วไปจะมีค่าคงที่แอนไอโซโทรปีสูง ในขณะที่ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้น (สุปรดี พิณจสุนทร, 2558 : 175)

นอกจากนี้การกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอส่งผลต่อสมบัติทางแม่เหล็กด้วยเช่นกัน โดยเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กจะทำให้โดเมนในอนุภาคประพุดตัวเป็นโดเมนเดี่ยว ส่งผลให้ค่าแมกนีไทเซชันสูงขึ้นทำให้มีสมบัติแม่เหล็กที่ดี(สุปรดี พิณจสุนทร, 2558 : 175) ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กของอนุภาคแม่เหล็กนาโนด้วย VSM พบว่าทุกสภาวะการสังเคราะห์ (IMNs, UMNs และ CMNs) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กภายนอก H และ ค่าแมกนีไทเซชัน M ของอนุภาคแม่เหล็กนาโนที่สังเคราะห์ได้ แสดงสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบซูเปอร์พารา เนื่องจากอนุภาคนาโนแม่เหล็กเหล่านี้ไม่มีฮิสเทอรีซิสลูป เมื่อพิจารณาจากผลการสังเคราะห์ CMNs ที่มีค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ UMNs อาจเกิดได้จาก curcumin loaded จะทำให้ค่า magnetically dead layer บริเวณพื้นผิวของอนุภาคลดลง เนื่องจากบริเวณชั้นของ curcumin ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก ทำให้มวลรวมของอนุภาคแม่เหล็กนาโนลดลง (Pattayil. 2016 : 6) ส่งผลให้ประสิทธิภาพความเป็นแม่เหล็กหรือค่า saturation magnetization ลดลง (ภาพที่ 4) (Tran et al., 2010 : 107)



ภาพ 4 ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวของอนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ Iron oxide (—) Unloaded-Iron oxide magnetic nanoparticles (UMNs) (—) Curcumin loaded-Iron oxide nanoparticles (CMNs) (—)

### สรุปผล

การสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมร่วมกับกระบวนการultrasonic cavitation โดยอัตราส่วนของ  $Fe^{3+}$  และ  $Fe^{2+}$  เป็น 2:1 ในอุณหภูมิคงที่  $90^{\circ}C$  ในงานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ได้ทุกสภาวะการสังเคราะห์ เมื่อตรวจยืนยันด้วย FTIR ค่าการดูดกลืนแสงของ load curcumin บนอนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ (CMNs) มีค่าการดูดกลืนแสงที่ 424 nm พบการ shift band ไปประมาณ 2 nm เมื่อเปรียบเทียบกับ pure curcumin ที่มีค่าการดูดกลืนแสงที่ 422 nm

อนุภาคแม่เหล็กที่สังเคราะห์ได้ เป็นอนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ที่ประกอบด้วย แมกนีไทต์ ( $Fe_3O_4$ ) และแมกนีไมต์ ( $\gamma-Fe_2O_3$ ) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่า 10 nm เมื่อทำการ load curcumin ลงบนอนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ (UMNs) พบว่าอนุภาคแม่เหล็กนาโนเหล็กออกไซด์ที่เคลือบด้วย curcumin (Curcumin loaded-Iron oxide magnetic nanoparticles, CMNs) มีขนาดของอนุภาคเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ UMNs อนุภาคแม่เหล็กที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะรูปร่างคล้ายทรงกลม มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ  $6.74 \pm 1.9$  nm มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคดี แสดงสมบัติแม่เหล็กแบบซูเปอร์พารา แต่มีค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวลดลง ในขณะที่ค่าสภาพล้าทางแม่เหล็ก เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ UMNs

## ข้อเสนอแนะ

การสังเคราะห์ IMNs ควรเป็นระบบปิด และควบคุมสภาวะการสังเคราะห์ภายใต้สภาวะ inert gas เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันในระบบ เพื่อเพิ่มการเกิดแมกนีไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) เฟสให้ผลผลิตสูงสุด

## เอกสารอ้างอิง

- ฐิติรัตน์ เจริญตา. (2555). การเตรียมและการศึกษาลักษณะของอนุภาคนาโนแม่เหล็กสำหรับงานด้านไฮเปอร์เทอร์เมีย วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. เชียงใหม่. (2549). สเปกโทรสโกปี สำหรับเคมีอินทรีย์. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม. (2549). อิทธิพลของอุณหภูมิ เวลา และตัวทำละลายที่มีต่อการสกัดสารเคอร์คูมิน จากขมิ้นชัน. วิศวกรรมสาร มช. 33(3) 225-236.
- สันติ ภูมิยิ่ง. (2555). การสังเคราะห์ลักษณะเฉพาะและสมบัติทางแม่เหล็กของอนุภาคนาโนแม่เหล็กเฟอร์ไรต์เตรียมโดยวิธีการไฮโดรเทอร์มอลร่วมกับสารละลายสกัดจากว่านหางจระเข้. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์และนาโนเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สุปรีย์ พิณจุสุนทร. (2558). วัสดุแม่เหล็ก **Magnetic Materials**. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- Anwar, M., Asfer, M., Prajapati, A.P., Mohapatra, S., Akhter, S., Ali, A., & Ahmad, F.J. (2014). Synthesis and in vitro localization study of curcumin-load SPIONs in a micro capillary for simulating a targeted drug delivery system. **International Journal of Pharmaceutic**. 468 (1-2): 158-164.
- Azlan Mohd. Zaili, M., Kuppuswamy, R., & Harun, H. (2007). Restoration of engraved marks on steel surfaces by etching technique. **Forensic Science International**. 171(1): 27-32.
- Barick, K.C., Ekta, E., Gawali, S.L., Sarkar, A., Kunwar, A., Priyadarsini, K.I., & Hassan, P.A. (2016). Pluronic stabilized  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  magnetic nanoparticles for intracellular delivery of curcumin. **RSC Advances**. 6(101): 98674-98681.
- Dang, F., Kamada, K., Enomoto, N., Hojo, J., & Enpuku, K. (2007). Sonochemical synthesis of magnetite nanoparticle in aqueous solution. **Journal of the Ceramic Society of Japan**. 115 (1348): 867-872.
- Gnanaprakash, G., Mahadevan, S., Jayakumar, T., Kalyanasundaram, P., Philip, J., & Raj, B. (2007). Effect of initial pH and temperature of iron salt solutions on formation of magnetite nanonparticles. **Materials Chemistry and Physic**. 103 (1): 168-175.

- Kandpal, N.D., Sah, N., Loshali, R., & Prasad, J. (2013). Co - precipitation method of synthesis and characterization of iron oxide nanoparticles. **Journal of Scientific & Industrial Research.** (73): 87-90.
- Kitture, R., Ghosh, S., Kulkarni, P., Liu, X.L., Maity, D., Patil, S.I., & Kale, S.N. (2012) Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-citrate-curcumin: Promising conjugates for superoxide scavenging, tumor suppression and cancer hyperthermia. **Journal of Applied Physics.** 111(6): 064702.
- Kuppuswamy, R., & Senthilkumar, M. (2004). Restoration of vehicle identification number. **Journal of Forensic Identification.** 1 (54): 13-21.
- Mahdavi, M., Ahmad, M., Haron, M., Namvar, F., Nadi, B., Rahman, M., & Amin, J. (2013). Synthesis, Surface modification and characterisation of biocompatible magnetic iron oxide nanoparticles for biomedical application. **Molecules.** 18 (7): 7533-7548.
- Medeiros, S.F., Santon, A.M., Fessi, H., & Elaissari, A. (2011). Stimuli-responsive magnetic particles for biomedical application. **International Journal of Pharmaceutice.** 403 (1-2): 139-161.
- Mozayani, A., & Noziglia, C., (Eds) (2011). **The forensic laboratory Handbook:Procedures and practice.** 2 nd ed. New Jersey: Humana Press.
- Pattayil. (2016). Curcumin coated magnetite nanoparticles for biomedical applications. **United States Patent. US9468691 B2:** 6.
- Ramimoghadam, D., Bagheri, S., & Hamid, S.B.A. (2014). Progress in electrochemical synthesis of magnetic iron oxide nanoparticles. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials.** (368): 207–229.
- Tran, L.D., Hoang, N.M.T., Mai, T.T., Tran, H.V., Nguyen, N.T., Tran, T.D., & Nguyen, P.X. (2010). Nanosized magnetofluorescent Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-curcumin conjugate for multimodal monitoring and drug targeting. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.** 371 (1-3): 104–112.
- Treptow, S. (1997). **Handbook of Methods for the Restoration of Obliterated Serial Numbers.** Chicago : Public Domain Nat'l Aer onautice&space Admin.
- Tsukimura, K., Sasaki, S., & Kimizuka, N. (1997). Cation Distributions in Nickel Ferrites. **Japanese Journal of Applied Physics.** 36 (Part 1, No. 6A), 3609–3612.
- Wu, W., He, Q., & Jiang, C. (2008) Magnatic iron oxide nanoparticles: synthesis and surface functionalization strategies. **Nanoscale Research Letter.** (3): 397-415.
- Zhang, L., He, R., & Gu, H.-C. (2006). Oleic acid coating on the monodisperse magnetite nanoparticles. **Applied Surface Science.** 253