

สารบัญ

	หน้า
<b>วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต</b>	
<b>สาขาวิชาเคมี</b>	
การพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์ด้วยกราฟีนนาโนเฟลตเลตและคอปเปอร์ (I) ออกไซด์ สำหรับตรวจวัดปริมาณคาร์บาริลในผลผลิตทางการเกษตร	1
ผู้วิจัย: จตุพร ด้วงทอง	
การพัฒนาวัสดุจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เพื่อการประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรม	5
ผู้วิจัย: จักรารุช คงอ่อน	
การเลียนแบบกิจกรรมเสมือนเปอร์ออกซิเดสของไนโตรเจนที่เจือบนคาร์บอนดอทร่วมกับอุปกรณ์ ตรวจวิเคราะห์ของไหลจุลภาคฐานกระดาษแบบลามิเนตสำหรับการตรวจวัดคอเลสเทอรอลรวม ในเลือดครบส่วน	9
ผู้วิจัย: ณิชฐษา กิจเขวงกุล	
การเพิ่มสภาพไวและความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัดปริมาณไกลโคเซตด้วยวิธีตรวจวัด ทางสีแบบใหม่โดยใช้แมงกานีส-ซิงค์ซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ที่มีรอยพิมพ์ประทับ โมเลกุล	13
ผู้วิจัย: พรชนก เสวตวงษ์	
การพัฒนาจีโอพอลิเมอร์สำหรับการกำจัดสีย้อมในอุตสาหกรรมและโลหะหนัก	17
ผู้วิจัย: วรางคณา กิตติวงศ์วิศาล	
การออกแบบ สังเคราะห์ และทดสอบฤทธิ์ทางชีวภาพของสารยับยั้งเอนไซม์ InhA ชนิดใหม่ เพื่อใช้เป็นสารต้านวัณโรค	21
ผู้วิจัย: อิศราภรณ์ เสียงล้ำ	
<b>สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ</b>	
ระบบประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือดในผู้ป่วยโรคเบาหวาน ด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซพตรอนหลายชั้น	25
ผู้วิจัย: ธนสิทธิ์ สนั่นเมือง	

สารบัญ

	หน้า
<b>สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา</b>	
การส่งเสริมความคิดสร้างสรรค์ของนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 4 เรื่อง สมบัติของวัสดุ ด้วยกิจกรรมสะเต็มศึกษา เรื่อง วิศวกรุ่นเยาว์	28
ผู้วิจัย: จิระยา แสโนโคตร	
การพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 เรื่องการหายใจระดับเซลล์ ด้วยกิจกรรมการลงมือปฏิบัติบนฐานการสืบเสาะหาความรู้ 5 ขั้น	30
ผู้วิจัย: ธณัฐภรณ์ ริทศน์โส	
การพัฒนาโมเดลของนักเรียนมัธยมศึกษาปีที่ 2 ด้วยชุดการทดลองอย่างง่ายเรื่องโมเมนต์ของแรง	32
ผู้วิจัย: นภาพร เทียมทะนง	
ผลของการจัดการเรียนรู้ตามแนวคิดสะเต็มศึกษาที่มีต่อความคิดสร้างสรรค์ของนักเรียน ชั้นประถมศึกษาปีที่ 6	34
ผู้วิจัย: พัฒนสิน สิริไชยสิทธิ์	
การศึกษาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน เรื่องโครงสร้างและหน้าที่ของพืชดอก สำหรับนักเรียน ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 ด้วยการจัดกิจกรรมการเรียนรู้แบบสืบเสาะหาความรู้ 5E	36
ผู้วิจัย: มณฑาทิพย์ บุ่งทอง	
การพัฒนากิจกรรมสะเต็มศึกษาเรื่องเซฟชนมไทยรุ่นจิ๋ว เพื่อเสริมทักษะกระบวนการ ทางวิทยาศาสตร์ของนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 6 เรื่อง การแยกสารผสม	38
ผู้วิจัย: ยิ่งลักษณ์ ผลาผล	
การพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 เรื่องระบบอวัยวะ ในร่างกายของเรา ด้วยกิจกรรมเกมบนฐานการสืบเสาะหาวิทยาศาสตร์	40
ผู้วิจัย: วนิตา กำแมด	
การพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 เรื่องระบบอวัยวะ ในร่างกายของเรา ด้วยกิจกรรมสืบเสาะหาวิทยาศาสตร์	42
ผู้วิจัย: วาทิต แสงจันทร์	
การยกระดับความสามารถในการแก้ปัญหาของนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 5 ด้วยกิจกรรมสะเต็มศึกษา เรื่องเทียนทำมือ	44
ผู้วิจัย: สิริรุช ชัมภรัตน์	

สารบัญ

	หน้า
วิธีการสืบเสาะเพื่อพัฒนาความเข้าใจเกี่ยวกับธรรมชาติของแสงและแสงเชิงเรขาคณิต	46
ผู้วิจัย: อนุรักษ์ สงัด	
การพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน เรื่อง ไฟฟ้าและแม่เหล็กสำหรับนักเรียนชั้นประถมศึกษา	48
ผู้วิจัย: อรวรรณ กุมารสิทธิ์	
การพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนวิชาฟิสิกส์ เรื่อง กฎการเคลื่อนที่ของนิวตันสำหรับนักเรียน ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 โดยการจัดการเรียนรู้แบบเชิงรุก	50
ผู้วิจัย: อัญชุลี วรุยาน	
<b>ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต</b>	
<b>สาขาวิชาเคมี</b>	
การสังเคราะห์ ปรับปรุงคุณสมบัติ และการประยุกต์ใช้งานของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ เพื่อใช้เป็นเปอร์ออกซิเดสมีมิก และตัวดูดซับสีย้อม	52
ผู้วิจัย: กฤตยานันท์ พลเขตต์	
การศึกษาเชิงทฤษฎีและเชิงกลไกสำหรับปฏิกิริยาการกำจัดแก๊สพิษบนตัวเร่งปฏิกิริยา ในระดับนาโน	57
ผู้วิจัย: ธนบดี มัชฌิโม	
การพัฒนาวัสดุคาร์บอนนาโนโคนสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านพลังงานไฮโดรเจน ที่มีประสิทธิภาพสูงโดยอาศัยข้อมูลจากการศึกษาทางทฤษฎี	61
ผู้วิจัย: นัฐพล ยอดศิลป์	
การพัฒนาเซนเซอร์และไบโอเซนเซอร์โดยใช้วัสดุผสมคาร์บอนขนาดนาโนสำหรับประยุกต์ใช้ ทางด้านอาหาร สิ่งแวดล้อม และคลินิก	65
ผู้วิจัย: ปริญานุช บุตรมี	
การศึกษาทางทฤษฎีของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดใหม่เพื่อประยุกต์ใช้งานด้านพลังงานและ สิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน	70
ผู้วิจัย: ปรียาพร พลตร	
การศึกษาเชิงทฤษฎีของวัสดุระดับนาโนสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านพลังงาน	74
ผู้วิจัย: ยุทธนา วงษ์หนองหว้า	

## สารบัญ

	หน้า
<b>สาขาวิชาฟิสิกส์</b>	
การพัฒนาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลัง ผู้วิจัย: ณรงค์ศักดิ์ โคตธาริน	78
การศึกษาสมบัติทางรังสีและสมบัติทางโครงสร้างของแก้วระบบบิสมัท-แบเรียม-โบโรซิลิเกต เพื่อออกแบบเป็นวัสดุกำบังรังสีแกมมา ผู้วิจัย: ณัฐสุพล ชูดิธนภานนท์	80
การศึกษาความเป็นไปได้ของแก้วชีวภาพแบบใหม่ที่เตรียมจากขานอ้อยและเหง้ามันสำปะหลัง สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อกระดูก ผู้วิจัย: ปุณณภพ โสภาพันธ์	84
ผลของ $WO_3$ ที่มีต่อแก้วกำบังรังสีแกมมาในระบบ $30BaO-(50-x)B_2O_3-10BG-10CR-xWO_3$ ผู้วิจัย: ภัทรนิภา กันทะคุณ	88
<b>สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา</b>	
การประยุกต์ใช้ Arduino สำหรับปฏิบัติการราคาถูกเพื่อพัฒนาแนวคิดนักเรียนเรื่องความดัน และแรงลอยตัว ผู้วิจัย: โชคชัย แจวจิราณ	92
การพัฒนาเกมบัตรและแผนภาพการเคลื่อนที่บนกระดานแม่เหล็กเพื่อส่งเสริมการคิดและ การแก้โจทย์ปัญหาเรื่องการเคลื่อนที่ทางฟิสิกส์ ผู้วิจัย: ฐิตติมา ธีญญานิติ	94
การพัฒนาความเข้าใจแนวคิดและการวิเคราะห์พฤติกรรมการเรียนรู้ด้วยการสอนแบบ ILDS เรื่อง การเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์และกฎการอนุรักษ์พลังงานกล ผู้วิจัย: ศักดิ์ชัย ราชนิยม	98
การพัฒนาทักษะการให้รหัส ICD-10 ของเจ้าหน้าที่บันทึกข้อมูลเวชระเบียน อิเล็กทรอนิกส์ ด้วยโปรแกรมตรวจสอบข้อมูลเวชระเบียนผู้ป่วยนอก ผู้วิจัย: สาครินทร์ หาบุญ	100
การพัฒนาทักษะกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรมและแนวคิด เรื่อง แรงและการเคลื่อนที่ ด้วยชุดกิจกรรมสะเต็มศึกษา เรื่อง หุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติ ผู้วิจัย: เอกพงศ์ บัวชุม	102

## บทคัดย่อ

เรื่อง	: การพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์ด้วยกราฟีนนาโนเพลตเลตและคอปเปอร์ (I) ออกไซด์ สำหรับตรวจวัดปริมาณคาร์บาริลในผลผลิตทางการเกษตร
ผู้วิจัย	: จตุพร ด้วงทอง
ชื่อปริญญา	: วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	: เคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	: รองศาสตราจารย์ ดร.อัญชลี สำเภา
คำสำคัญ	: อิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์, คาร์บาริล, กราฟีนนาโนเพลตเลต, คอปเปอร์ (I) ออกไซด์

งานวิจัยนี้พัฒนาอิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์โดยปรับปรุงผิวหน้าขั้วไฟฟ้าจากกลาสซีคาร์บอนด้วยกราฟีนนาโนเพลตเลต และคอปเปอร์ (I) ออกไซด์ เพื่อเพิ่มสภาพไวในการตรวจวัดปริมาณคาร์บาริล เนื่องจากกราฟีนนาโนเพลตเลตเป็นวัสดุนำไฟฟ้าที่ยืดหยุ่น และคอปเปอร์(I) ออกไซด์ช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บาริลได้ ทำการศึกษาโดยพิสูจน์เอกลักษณ์ทางกายภาพของสารปรับปรุงบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เทคนิคเอ็นเนอร์จี้ดิสเพอร์ซีฟ เอ็กซ์เรย์สเปกโทรสโคปี เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เทคนิคฟูเรียร์อินฟราเรด สเปกโทรสโคปี และเทคนิคเอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโคปี นอกจากนี้ศึกษาการพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงด้วยเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี และเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นถูกนำมาตรวจวัดปริมาณคาร์บาริลด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงต่อการตรวจวัดปริมาณคาร์บาริล พบว่าปริมาณกราฟีนนาโนเพลตเลตต่อพื้นที่ตรวจวัด เท่ากับ 2.10 ไมโครกรัมต่อตารางมิลลิเมตร ปริมาณคอปเปอร์ (I) ออกไซด์ต่อพื้นที่ตรวจวัด เท่ากับ 0.21 ไมโครกรัมต่อตารางมิลลิเมตร ตรวจวัดในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4.0 ยิ่งไปกว่านั้นทำการประเมินผลการตรวจวัดของอิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นให้ช่วงความเป็นเส้นตรงในการตรวจวัดปริมาณคาร์บาริลที่ 0.50 – 100.0 ไมโครโมลาร์ ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r^2$ ) เท่ากับ 0.999 ให้สภาพไวในการตรวจวัดที่ 0.0919 ไมโครแอมแปร์ต่อไมโครโมลาร์ - ตารางมิลลิเมตร ชีตความสามารถต่ำสุดในการตรวจพบ (3SD/slope) และชีตความสามารถต่ำสุดในการตรวจวัดปริมาณ (10SD/slope) เท่ากับ 0.05 และ 0.16 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ ความเที่ยงในการวิเคราะห์ (วัด 10 ครั้ง) และความเที่ยงของการเตรียมขั้วไฟฟ้า (จำนวน 5 ขั้ว) ให้ค่าร้อยละของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพันธ์เท่ากับร้อยละ 0.65

และ 0.79 ตามลำดับ ความเสถียรของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นทำการศึกษาภายใน 1 วัน (Intra - day) ให้ค่าร้อยละของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 0.42 และศึกษาระหว่างวัน (Inter - day) มีความเสถียรได้นาน 24 วันโดยค่าความหนาแน่นของสัญญาณกระแสคงเหลือร้อยละ 80 ของค่าความหนาแน่นของสัญญาณกระแสเริ่มต้น นอกจากนี้ศึกษาค่าผลของตัวรบกวนการวิเคราะห์พบว่า สารประกอบทางอินทรีย์ ไอออนบวกและไอออนลบที่มีแนวโน้มพบในผลผลิตทางการเกษตร พบว่าไม่มีผลรบกวนการตรวจวัดคาร์บาริล แต่สารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มคาร์บาเมตมีผลรบกวนการตรวจวัดคาร์บาริลเนื่องด้วยโครงสร้างทางเคมีที่ใกล้เคียงกับคาร์บาริล

นอกจากนี้ อิเล็กโตรเคมีคัลเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ตรวจวัดคาร์บาริลในตัวอย่างผลผลิตทางการเกษตรได้แก่ข้าว ผักกาดขาว และมะเขือ ตรวจพบคาร์บาริลความเข้มข้น  $0.398 \pm 0.007$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในตัวอย่าง ยิ่งไปกว่านั้นตัวอย่างผลผลิตทางการเกษตรที่เติมสารมาตรฐานคาร์บาริลที่ระดับความเข้มข้น 1.0 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่าให้ค่าร้อยละการได้กลับคืนอยู่ในช่วงร้อยละ 97.4 - 101.4 นอกจากนี้ เปรียบเทียบผลการตรวจวัดที่ได้กับเทคนิคมาตรฐานโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงด้วยสถิติค่า t พบว่าเทคนิคทั้งสองไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ค่า t จากการคำนวณ = 0.88 - 3.14 และ ค่า t จากตาราง = 4.30 ที่ระดับความอิสระเสรี = 2) จากผลการเปรียบเทียบข้างต้นสรุปได้ว่าอิเล็กโตรเคมีคัลเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นให้ผลการตรวจวัดที่น่าเชื่อถือและยอมรับได้ในการตรวจวัดปริมาณคาร์บาริลในตัวอย่างจริง

## ABSTRACT

TITLE : DEVELOPMENT OF AN ELECTROCHEMICAL SENSOR BASED ON GRAPHENE NANOPATELETS AND COPPER (I) OXIDE FOR THE DETERMINATION OF CARBARYL IN AGRICULTURAL PRODUCTS

AUTHOR : JATUPORN DUANGTONG

DEGREE : MASTER OF SCIENCE

MAJOR : CHEMISTRY

ADVISOR : ASSOC. PROF. ANCHALEE SAMPHAO, Ph.D.

KEYWORDS : ELECTROCHEMICAL SENSOR, CARBARYL, GRAPHENE NANOPATELETS, COPPER (I) OXIDE

This research developed an electrochemical sensor based on graphene nanoplatelets and copper (I) oxide modified on the surface of a glassy carbon electrode to detect carbaryl. Graphene nanoplatelets were selected for development of the electrochemical sensor due to their excellent electrical conductivity. Copper (I) oxide was used as a redox mediator for the catalytic reaction of carbaryl. A physical characterization of the modified materials was conducted by using scanning electron microscopy (SEM), energy - dispersive X - ray spectroscopy (EDX), X - ray diffraction spectroscopy (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FT - IR) and X - ray photoelectron spectroscopy (XPS). An electrochemical characterization of the modified electrodes was conducted by using electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and cyclic voltammetry (CV). Carbaryl quantitative analysis was studied through differential pulse voltammetry. The optimum conditions of the modified electrode were studied for the determination of carbaryl. The optimal amounts of graphene nanoplatelets and copper (I) oxide were found at 2.10 and 0.21  $\mu\text{g}\cdot\text{mm}^{-2}$ , respectively. In addition, the optimum pH buffer solution was at pH 4. The electrochemical sensor was experimentally evaluated with respect to a linear response range from 0.50 - 100  $\mu\text{M}$  carbaryl ( $r^2 = 0.999$ ) with a sensitivity of 0.0919  $\mu\text{A}\cdot\mu\text{M}^{-1}\cdot\text{mm}^{-2}$ , a limit of detection (3SD/slope) and a limit of quantification (10SD/slope) at 0.05 and 0.16  $\mu\text{M}$ , respectively. The repeatability (10 measurements) and reproducibility (5 sensors) were at 0.65 and

0.79 % RSD, respectively. In addition, the stability of the proposed electrochemical sensor was studied in intra - day and inter - day reported in terms of the relative standard deviation (% RSD) and the retaining percentage, respectively. The percent RSD for the intra - day study was at 0.42 %. The stability of the proposed electrochemical sensor was retained 80.0 % of its initial value after 24 days. Moreover, interference was investigated through organic compounds, cation and anion. Results demonstrated that among all types of interference, none showed any interference for carbaryl determination. However, carbamate insecticides had an effect on carbaryl determination because of its analogous structure.

Moreover, the proposed sensor was applied to detect carbaryl residue in agricultural samples. Samples (Rice, Chinese cabbage and Thai eggplant) and spiked samples ( $0.398 \pm 0.007 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) were selected and studied. The results showed that the recovery percentages resulted in the range of 97.40 - 101.40 %. Moreover, the results were compared to HPLC standard technique in which the paired *t*-test statistics were verified. There was no significant difference between the proposed method and the standard technique ( $t_{\text{calculation}} = 0.88 - 3.14$ ,  $t_{\text{critical}} = 4.30$  with 2 degree of freedom). In conclusion, all results indicate that the proposed electrochemical sensor is a reliable and acceptable application for the determination of carbaryl in real samples.



## บทคัดย่อ

เรื่อง : การพัฒนาวัสดุจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เพื่อการประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรม

ผู้วิจัย : จักรารุช คงอ่อน

ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา : เคมี

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายสมร ลำลอง

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : รองศาสตราจารย์ ดร.พรพรรณ พิงโพธิ์

คำสำคัญ : แกลบข้าว, ซีโอไลต์เอ, สีย้อม, การดูดซับ, การเร่งปฏิกิริยา, เอทิลีน

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของซีโอไลต์เอ สำหรับใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดสารละลายสีย้อมและการเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาเอทานอลดีไฮเดรชันเป็นเอทิลีน ซิลิกาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรต่างๆ เช่น ใบข้าวโพด แขนข้าวโพด เปลือกข้าวโพด หล้าคา หล้าแฝก ฟางข้าว และแกลบข้าว วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรนำมาล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำสะอาดและอบให้แห้ง ต่อมานำมาเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ ผลของเถ้าชีวมวลจาก ใบข้าวโพด แขนข้าวโพด เปลือกข้าวโพด หล้าคา หล้าแฝก ฟางข้าว แกลบข้าวเจ้า และแกลบข้าวเหนียว เท่ากับร้อยละ 6.6, 1.1, 1.0, 2.6, 3.0, 5.0, 14.5 และ 14.2 ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันนั้นเถ้าชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรทั้งหมด ให้ปริมาณซิลิกาสูงมากกว่าร้อยละ 99 ดังนั้น เราจึงเลือกใช้เถ้าชีวมวลจากแกลบข้าวเป็นแหล่งของซิลิกาในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ เนื่องจากแกลบข้าวให้ผลของเถ้าสูงที่สุด เพราะฉะนั้นจึงสังเคราะห์ ซีโอไลต์เอที่เตรียมจากซิลิกาทางการค้า (LTA-CML) และซีโอไลต์เอที่เตรียมจากซิลิกาแกลบข้าว (LTA-RH) โครงสร้างของซีโอไลต์เอทั้งสองได้รับการยืนยันโดย X-ray diffraction (XRD) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ LTA-CML และ LTA-RH แสดงผลของอนุภาคผลึกรูปทรงลูกบาศก์ที่มีขนาด 1-2 ไมครอน สัดส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเท่ากับ 1 ซึ่งอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมยืนยันว่าเป็นซีโอไลต์เอ ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน ของ LTA-CML และ LTA-RH ศึกษาปริมาณและเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม ศึกษาไอโซเทอร์ม, จลนศาสตร์ และอุณหพลศาสตร์ ในการดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 100 ppm LTA-CML และ LTA-RH น้ำหนักที่เหมาะสมคือ 20 g/L เวลาที่เหมาะสมคือ 60 นาที มีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน 98 เปอร์เซ็นต์ ตัวดูดซับ LTA-CML และ LTA-RH ให้ผลไอโซเทอร์มในการดูดซับที่สอดคล้องกันคือแลงเมียร์ไอโซเทอร์มเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว จลนศาสตร์สอดคล้อง

กับปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน และเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี ( $\Delta S^\circ$ ) เป็นบวกแสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับมีผลทำให้โมเลกุลของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่บริเวณรอยต่อของพื้นที่ผิวตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับมีความไม่เป็นระเบียบเพิ่มสูงขึ้น เอนทาลปี ( $\Delta H^\circ$ ) เป็นบวกแสดงว่ากระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน และพลังงานกิบส์ ( $\Delta G^\circ$ ) ของการดูดซับมีค่าเป็นลบแสดงว่ากระบวนการดูดซับเกิดขึ้นได้เอง

นอกจากนี้ได้นำ LTA-CML และ LTA-RH มาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาเอทานอลดีไฮเดรชันเป็นเอทิลีน ภายใต้ภูมิภาคแก๊สความดันบรรยากาศและอุณหภูมิช่วง 200 ถึง 400 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา LTA-CML ให้ค่าการแปลงผันของเอทานอลสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส การแปลงผันของเอทานอลสูงถึงร้อยละ 40 การเลือกเกิดของเอทิลีนเท่ากับร้อยละ 87 การให้ผลของเอทิลีนเท่ากับร้อยละ 35 สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา LTA-RH ให้ค่าการแปลงผันของเอทานอลสูงถึงร้อยละ 36 การเลือกเกิดของเอทิลีนเท่ากับร้อยละ 86 การให้ผลของเอทิลีนเท่ากับร้อยละ 31 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาเอทานอลดีไฮเดรชันเป็นเอทิลีนของซีโอไลต์ทั้งสองมีความคล้ายคลึงกัน แต่ผลของการแปลงผันของเอทานอลค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงปรับปรุงให้มีทั้งสแตนโดยใช้วิธีการเคลือบฝัง (LTA-CML-W และ LTA-RH-W) พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยา มีรูปร่างปกติและขนาดใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยามีจุดเล็ก ๆ ของทั้งสแตนบนพื้นผิวของซีโอไลต์เอ การปรับปรุงซีโอไลต์เอด้วยทั้งสแตนมีผลเพียงเล็กน้อยหรือแทบจะไม่มีเลยต่อสัณฐานวิทยา พบว่าการปรับปรุงด้วยทั้งสแตนส่งผลต่อค่าศักย์ซีต้า การปรับปรุงนี้ส่งผลให้พื้นที่ผิวของ LTA-CML-W และ LTA-RH-W มีประจุลบเพิ่มขึ้นอีกด้วย LTA-CML-W ให้ค่าการแปลงผันของเอทานอลสูงถึงร้อยละ 52 การเลือกเกิดของเอทิลีนเท่ากับร้อยละ 96 การให้ผลของเอทิลีนเท่ากับร้อยละ 50 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา LTA-RH-W พบว่าให้ค่าการแปลงผันของเอทานอลสูงถึงร้อยละ 53 การเลือกเกิดของเอทิลีนเท่ากับร้อยละ 96 การให้ผลของเอทิลีนเท่ากับร้อยละ 51 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับปรุงด้วยทั้งสแตนให้ผลที่ดีกว่าก่อนปรับปรุง เนื่องจากการปรับปรุงด้วยทั้งสแตนแบบวิธีการเคลือบฝังนั้น ส่งผลต่อจุดว่างไวที่เหมาะสมต่อการเกิดเอทิลีนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นซีโอไลต์เอที่ใช้ซิลิกาจากแกลบข้าวสามารถเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพเพื่อประยุกต์ใช้บำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรม และตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาเอทานอลดีไฮเดรชันเป็นเอทิลีน

## ABSTRACT

TITLE : DEVELOPMENT OF AGRO-WASTE DERIVED MATERIALS FOR INDUSTRIAL APPLICATION

AUTHOR : JAKKRAWUT KONGON

DEGREE : MASTER OF SCIENCE

MAJOR : CHEMISTRY

ADVISOR : ASST. PROF. SAISAMORN LUMLONG, Ph.D.

CO- ADVISOR : ASSOC. PROF. PORNPAN PUNGPO, Ph.D.

KEYWORDS : RICE HUSK, ZEOLITE A, DYE, ADSORPTION, CATALYSIS, ETHYLENE

This research investigates the feasibility of zeolite A. for use as an adsorbent for dye removal from aqueous solutions and as a catalyst for ethanol dehydration to ethylene. Materials studied were silica from different agricultural waste such as corn leaves, cornstalks, corn husks, vetiver grass, rice straw, and rice husks. Agricultural waste materials were washed with a solution of HCl then were rinsed with clean water and were oven-dried. Afterward, it was incinerated at 700°C for 3 hours to remove organic substances. The percentage yield of biomass ash from corn leaves, corn stalks, corn husks, vetiver grass, rice straw, rice husks, and sticky rice husks equaled 6.6, 1.1, 1.0, 2.6, 3.0, 5.0, 14.5, and 14.2 percent, respectively. At the same time, biomass ash from agricultural waste from varying sources provided high SiO<sub>2</sub> content (more than 99 wt%). Accordingly, we chose rice husk biomass ash as a source of silica for zeolite A, since rice husk yields the highest percentage of ash. Similarly, zeolite A was synthesized by using commercial silica (LTA-CML), and rice husk silica (LTA-RH). Both zeolite A structures were confirmed by X-ray diffraction (XRD). The morphology of LTA-CML and LTA-RH revealed cubic crystalline particles 1-2 microns in size. The proportion of silicon to an aluminum percentage by weight is 1, the Si/Al ratio was confirmed as zeolite A. The efficacy of brilliant green (BG) dye adsorption of LTA-CML and LTA-RH was studied. The optimum parameters for adsorption time and dosage were investigated. Adsorption isotherms, kinetics, and thermodynamics were examined with an initial concentration of dye of 100 ppm. LTA-CML and LTA-RH optimal dosage was found to be 20 g/L. The

optimal contact time was found to be 60 minutes, with an adsorption efficiency of 98%. The adsorbents LTA-CML and LTA-RH yield isothermic effects corresponding to the Langmuir isotherm as monolayer adsorption. Kinetic studies demonstrated that the adsorption followed a pseudo-second-order model. The positive entropy ( $\Delta S^\circ$ ) changed, indicating that the adsorption process resulted in the increased disorganization of the sorbent molecules and the adsorbent at the junction of the sorbent surface area and the adsorbent. Positive enthalpy ( $\Delta H^\circ$ ) indicates that the adsorption process is an endothermic reaction. And the Gibbs energy ( $\Delta G^\circ$ ) of adsorption was negative, indicating that the adsorption process occurred spontaneously.

In addition, LTA-CML and LTA-RH were used as dehydration catalysts from ethanol to ethylene under atmospheric pressure with a temperature range of 200 to 400 ° C. The results showed that the LTA-CML catalyst exhibited the highest ethanol conversion value at 400 ° C. Ethanol was up to 40%, ethylene selectivity was 87%, resulting in an ethylene yield of 35%. The LTA-RH catalyst was also studied, showing the ethanol conversion factor was up to 36%, the ethylene selection was 86%, and the ethylene yield was 31% at 400°C. However, the dehydration of ethanol to ethylene was similar in both types of zeolite A. The effect on ethanol conversion was relatively low. Thus, it was modified with tungsten (W) by an incipient wetness impregnation method (LTA-CML-W and LTA-RH-W). Morphological characteristics were found to have a normal shape and similar size. However, they have small dots of tungsten on the surface of zeolite A. The improvement of zeolite A with tungsten had little or no effect on morphology. It was found that the tungsten modification had an effect on the negative value zeta potential observed on the surface of the catalysts. These modifications resulted in increasing the negative charges on the surface of LTA-CML-W and LTA-RH-W. It appears that the LTA-CML-W catalyst exhibits the highest catalytic activity, at 52% ethanol conversion, with an ethylene selectivity of 96%, resulting in an ethylene yield of 50% at 400°C.

## บทคัดย่อ

- เรื่อง : การเลียนแบบกิจกรรมเสมือนเปอร็อกซิเดสของไนโตรเจนที่เจือบนคาร์บอน  
 ดอทร่วมกับอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ของไหลจุลภาคฐานกระดาษแบบลามิเนต  
 สำหรับการตรวจวัดคอเลสเทอรอลรวมในเลือดครบส่วน
- ผู้วิจัย : ณิชฐา กิจเขวงกุล
- ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
- สาขาวิชา : เคมี
- อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐิม จารุจำรัส
- คำสำคัญ : คาร์บอนดอทที่เจือด้วยไนโตรเจน (N-CDs), วิถีไฮโดรเทอร์มอล, เอมไซม์จำลอง,  
 เซนเซอร์ทางสีบนคอเลสเทอรอลรวม, อุปกรณ์ตรวจวัดทางสีที่ประดิษฐ์มาจาก  
 กระดาษ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาใช้นุภาคคาร์บอนนาโนที่เจือด้วยไนโตรเจน (N-CDs) มีการสังเคราะห์ที่ง่ายผ่านกระบวนการสังเคราะห์วิถีไฮโดรเทอร์มอลร่วมกับการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์มาจากกระดาษ ( $\mu$ PAD) สำหรับการตรวจวัดทางสีเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณคอเลสเทอรอลรวมในตัวอย่างเลือดครบส่วน การเจือไนโตรเจนบนอนุภาคคาร์บอนดอทได้ถูกพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) เอกซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (XPS) การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และ คุณสมบัติทางแสงและอิเล็กตรอนิกส์โดยอาศัยทฤษฎีฟังก์ชันความหนาแน่นขึ้นอยู่กัเวลา (TD-DFT) ในการเร่งปฏิกิริยา N-CDs มีความเสถียรที่ดี (good stability) มีสัมพรรคภาพสูงระหว่าง N-CDs กับเอบีทีเอส (2,2'-azino-bis (3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonic acid ; ABTS) (high affinity) เมื่อเปรียบเทียบกับเอนไซม์ HRP โดยสังเกตจากค่า  $K_M$  (ระหว่าง N-CDs และ ABTS ที่ถูกใช้เป็นสารที่ให้สี) ที่มีค่าเท่ากับ 0.018 มิลลิโมลาร์ การประยุกต์ใช้ N-CDs ที่มีคุณสมบัติสามารถเลียนแบบกิจกรรมการเร่งปฏิกิริยาคลายกับเอนไซม์ HRP ในตรวจวัดคอเลสเทอรอลรวมซึ่งมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์คอเลสเทอรอลออกซิเดส  $H_2O_2$  ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาถูกดูดซับบนตำแหน่งกราฟิติกไนโตรเจนของ N-CDs โดยอธิบายผ่านทฤษฎี TD-DFT นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้สร้างชุดอุปกรณ์ตรวจวัดของไหลจุลภาคที่ประดิษฐ์มาจากกระดาษ โดยการสร้างช่องทางการไหลเป็นลักษณะวงกลมขนาด 6 มิลลิเมตรด้วยเทคนิคการพิมพ์สกรีนด้วยไขจำนวนสามชั้น ร่วมกับการใช้พลาสติกเคลือบบัตรเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับตัวอุปกรณ์ (The laminated 3D- $\mu$ PAD) อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดได้โดยสังเกตสีที่เกิดขึ้นด้วยตาเปล่าร่วมกับแถบสีมาตรฐานที่งานวิจัยนี้ได้สร้างขึ้น ซึ่งมีระดับ

ความเข้มข้นที่แตกต่างกันซึ่งบ่งบอกถึงระดับความเข้มข้นของคลอเรสเตรอรอลรวมในตัวอย่างเลือดครบส่วนได้ถึงสามระดับคือ 1) ระดับที่ยอมรับ (desirable level) 96-201 มิลลิกรัมต่อเดซิลิตร (2.5-5.2 มิลลิโมลาร์) 2) ระดับก้ำกึ่ง (borderline level) 201-274 มิลลิกรัมต่อเดซิลิตร (5.2-7.5 มิลลิโมลาร์) 3) ระดับสูง (high risk) มากกว่า 274 มิลลิกรัมต่อเดซิลิตร (มากกว่า 7.5 มิลลิโมลาร์) ) มากไปกว่านั้น งานวิจัยนี้พัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดทางสีที่มีขนาดเล็ก ต้นทุนต่ำ มีความง่ายต่อผู้ใช้งานที่ไม่ต้องเป็นผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทางในการวิเคราะห์ และไม่จำเป็นต้องทำในห้องปฏิบัติการ อีกทั้งให้ผลการทดสอบที่รวดเร็วภายใน 10 นาที โดยที่ยังให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องแม่นยำเทียบเท่าเทคนิคมาตรฐาน

## ABSTRACT

TITLE : MIMICKING PEROXIDASE-LIKE ACTIVITY OF NITROGEN-DOPED CARBON DOTS COUPLED WITH LAMINATED THREE-DIMENSION MICROFLUIDIC PAPER-BASED ANALYTICAL DEVICE FOR DETERMINATION OF TOTAL CHOLESTEROL IN WHOLE BLOOD

AUTHOR : NATTASA KITCHAWENGGKUL

DEGREE : MASTER OF SCIENCE

MAJOR : CHEMISTRY

ADVISOR : ASSOC. PROF. PURIM JARUJAMRUS, Ph.D.

KEYWORDS : NITROGEN DOPED CARBON DOTS (N-CDs), HYDROTHERMAL SYNTHESIS, PEROXIDASE-LIKE ACTIVITY, COLORIMETRIC DETECTION, TOTAL CHOLESTEROL, LAMINATED 3D- $\mu$ PAD

This thesis presents a simple hydrothermal synthesis of nitrogen-doped carbon dots (N-CDs), in combination with microfluidic paper-based analytical devices ( $\mu$ PAD), and their application for colorimetric determination of total cholesterol (TC) in human blood. The N-CDs were characterized by various techniques including transmission electron microscopy (TEM), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), and X-ray powder diffraction (XRD), and the optical and electronic properties of computational models by using time-dependent density functional theory (TD-DFT). The characterization results confirmed the successful doping of nitrogen onto the carbon dot surface. The N-CDs exhibited high affinity with 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)-diammonium salt (ABTS) with the Michaelis–Menten constant ( $K_M$ ) of 0.018 mM in a test for their peroxidase-like activity. In particular, since hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ) is the oxidative product of cholesterol in the presence of cholesterol oxidase, a sensitive and selective method of cholesterol detection was developed. Overall, the obtained results from TD-DFT confirm the strong adsorption of  $H_2O_2$  on the graphitic N positions of the N-CDs. The laminated 3D- $\mu$ PAD featuring a 6-mm circular detection zone was fabricated using a simple wax screen printing technique. Classification of TC according to the clinically relevant criteria (Healthy 96-201 mg dL<sup>-1</sup>(2.5 - 5.2 mM), Borderline 201-274 mg

$\text{dL}^{-1}$  (5.2- 6.2 mM) and High risk  $>274 \text{ mg dL}^{-1}$  ( $>7.5 \text{ mM}$ ) could be determined by the naked eye within 10 minutes through simple comparisons employing a color chart. Overall, the proposed colorimetric device serves as a low-cost, rapid, simple, sensitive, and selective alternative for TC detection in whole blood samples that is easy for unskilled end-users to use.



## บทคัดย่อ

- เรื่อง : การเพิ่มสภาพไวและความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัดปริมาณไกลโฟเฟต ด้วยวิธีตรวจวัดทางสีแบบใหม่โดยใช้แมงกานีส-ซิงค์ซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ที่มีรอยพิมพ์ประทับโมเลกุล
- ผู้วิจัย : พรชนก เสวตวงษ์
- ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
- สาขาวิชา : เคมี
- อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.มะลิวรรณ อมตธงไชย
- คำสำคัญ : แมงกานีส-ซิงค์ซัลไฟด์ควอนตัมดอท พอลิเมอร์ที่มีรอยพิมพ์ประทับโมเลกุล ไกลโฟเฟต ระบบของไหลจุลภาคที่ประดิษฐ์มาจากกระดาษ การวัดทางสี

วิทยานิพนธ์นี้พัฒนาการตรวจวัดทางสีที่มีสภาพไวและความจำเพาะสูงสำหรับตรวจวัดปริมาณสารกำจัดวัชพืชไกลโฟเฟตในตัวอย่างเมล็ดธัญพืช โดยใช้แมงกานีส-ซิงค์ซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่เคลือบพอลิเมอร์ที่มีรอยพิมพ์ประทับโมเลกุล (Mn-ZnS QD-MIP) การตรวจวัดจะอาศัยการเป็นตัวเร่งของ Mn-ZnS QD-MIP ในปฏิกิริยาออกซิเดชันของ ABTS ด้วย ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ พอลิเมอร์ที่มีรอยพิมพ์ประทับโมเลกุลของไกลโฟเฟตถูกสังเคราะห์เคลือบบนแมงกานีส-ซิงค์ซัลไฟด์ควอนตัมดอทโดยใช้ เอ็น-ไอโซพโรพิลอะคริลาไมด์ (N-isopropylacrylamide, NIPAM) เอ็นเอ็น-เมทิลลีนบิสอะคริลาไมด์ (N,N'-methylenebisacrylamide, MBA) เป็นมอนอเมอร์ 2,2-เอโซบิส-2-โพรไพโอไนไตรล์ (2,2-azobis(2-methyl-propionitrile, AIBN) เป็นตัวริเริ่มและไกลโฟเฟตทำหน้าที่เป็นโมเลกุลแม่แบบโพรงบนพื้นผิวของ Mn-ZnS QD-MIP ที่สังเคราะห์ขึ้นมีความจำเพาะต่อโมเลกุลไกลโฟเฟต การเร่งปฏิกิริยาของ Mn-ZnS QD-MIP ขึ้นอยู่กับการจับหรือไม่จับของโมเลกุลไกลโฟเฟตบนโพรง Mn-ZnS QD-MIP กรณีที่มีโมเลกุลของไกลโฟเฟตเข้ามาจับโพรงดังกล่าวจะมีผลทำให้เกิดการยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันของ ABTS ด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์และเกิดการเปลี่ยนสีจากสีเขียวเข้มเป็นสีเขียวอ่อน โดยสีเขียวที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไกลโฟเฟต การพัฒนาการตรวจวัดทางสีสำหรับไกลโฟเฟตแบ่งได้เป็นสองแนวทางคือ (ก) ในระบบสารละลายตรวจวัดด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (ข) ระบบของไหลจุลภาคที่ประดิษฐ์มาจากกระดาษแบบสามมิติตรวจวัดด้วยการถ่ายภาพร่วมกับโปรแกรมอิมเมจเจ (ImageJ)

การตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนแสงระหว่างการทำปฏิกิริยาด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ไกลโฟเฟตจะยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันของ ABTS โดยการจับบนโพรง Mn-ZnS QD-MIP การยับยั้งการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลจากไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันของ

ABTS ที่ทำหน้าที่เป็นโพรบสีได้น้อยลง การเปลี่ยนแปลงสีของ ABTS จากสีเขียวเข้มเป็นสีเขียวอ่อนจะถูกตรวจวัดที่ความยาวคลื่นสูงสุดคือ 420 นาโนเมตร ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมโดยใช้ Mn-ZnS QD-MIP ที่ความเข้มข้น 50 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ABTS ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิโมลาร์ ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 90 มิลลิโมลาร์ สารละลายอะซิเตทบัฟเฟอร์ 0.2 โมลาร์ที่พีเอช 2.0 และเวลาในการทำปฏิกิริยาคือ 20 นาที ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส การตรวจวัดทางสีที่พัฒนาขึ้นมีการตอบสนองแบบเป็นเส้นตรงของไกลโฟเซตในช่วง 0.01 ถึง 30 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r^2$ ) เท่ากับ 0.9920

อุปกรณ์ของไหลจุลภาคที่ประดิษฐ์มาจากกระดาษแบบสามมิติ (3D- $\mu$ PAD) ถูกสร้างขึ้นด้วยเทคนิคการสกรีนโดยใช้สีเพนคาร์ดซึ่งเป็นวัสดุชนิดใหม่ในการสร้างขอบเขตที่ไม่ชอบน้ำ อุปกรณ์ประกอบด้วยสามส่วน (ส่วนบน/ส่วนกลาง/ส่วนล่าง) คือ ส่วนบนคือ โชนของการตรวจวัด ส่วนกลางคือ ส่วนที่ตรึง Mn-ZnS QD-MIP และส่วนล่างคือ ส่วนสำหรับหยดตัวอย่าง โดย 3D- $\mu$ PAD สามารถตรวจวัดไกลโฟเซตได้โดยโปรแกรมอิมเมจเจ โดยให้ช่วงความเป็นเส้นตรงตั้งแต่ 0.005 ถึง 50 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร มีขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดเท่ากับ 0.002 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร อุปกรณ์ 3D- $\mu$ PAD จะให้ร้อยละการได้กลับคืนมาที่ยอมรับได้ในช่วง 80.6 เปอร์เซ็นต์ ถึง 119.9 เปอร์เซ็นต์ และให้ค่าความแม่นยำที่ดี โดยค่าร้อยละเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ในช่วง 0.1 ถึง 1.6 นอกจากนี้ 3D- $\mu$ PAD ยังแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องในการตรวจวัดที่ดีเมื่อเทียบกับเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างสัมพัทธ์จากวัสดุอ้างอิงรับรอง (certified reference material, CRM) เช่น 0.4 เปอร์เซ็นต์สำหรับการวิเคราะห์ภายในวันเดียวกัน และ 0.7 เปอร์เซ็นต์สำหรับการวิเคราะห์ต่างวันกัน นอกจากนี้ ยังให้การทำซ้ำที่ดี (%RSD เท่ากับ 1.7 ต่อการวัดต่อเนื่อง 10 ครั้ง) ที่ความเข้มข้นของไกลโฟเซตที่ 0.05 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร 3D- $\mu$ PAD ที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ตรวจวัดความเข้มข้นของไกลโฟเซตในตัวอย่างเมล็ดธัญพืชได้และเป็นเทคนิควิเคราะห์ที่ให้ความจำเพาะ สภาพไวสูงในวิธีการทางสีและเหมาะสมสำหรับการใช้งานในการควบคุมคุณภาพอาหารและทางด้านสิ่งแวดล้อม โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือที่ย่างยากซับซ้อน

## ABSTRACT

TITLE : ENHANCEMENT OF SELECTIVITY AND SENSITIVITY FOR A NOVEL  
 COLORIMETRIC DETERMINATION OF GLYPHOSATE USING MN-ZNS  
 QUANTUM DOTS EMBEDDED MOLECULARLY IMPRINTED POLYMERS

AUTHOR : PORNCHANOK SAWETWONG

DEGREE : MASTER OF SCIENCE

MAJOR : CHEMISTRY

ADVISOR : ASSOC. PROF. MALIWAN AMATATONGCHAI, Ph.D.

KEYWORDS : Mn-ZnS QUANTUM DOT, MOLECULARLY IMPRINTED POLYMERS,  
 GLYPHOSATE, COLORIMETRY

This thesis presents the development of a highly sensitive and selective colorimetric assay for glyphosate herbicide in whole grain samples. The colorimetric detection is based on the catalytic activity of Mn-ZnS quantum dot embedded MIP nanoparticles (Mn-ZnS QD-MIP) on the reaction of ABTS oxidized by an  $H_2O_2$ . Glyphosate imprinted polymer successfully synthesized on an Mn-ZnS QD surface using a poly (N-isopropyl acrylamide) (NIPAM) and N, N'-methylene bisacrylamide (MBA) as the functional monomers, 2,2'-azobis (2-methyl propionitrile) or AIBN as an initiator, and glyphosate as a template molecule. Its catalytic activity depends on the binding or non-binding of glyphosate molecules on the synthetic recognition sites of the Mn-ZnS QDs-MIP. Glyphosate analysis demonstrates its binding on the cavities embedded in the Mn-ZnS QD surface, and subsequent turn-off or inhibition of ABTS oxidation and with a clear color change to light green. The change of reaction color from dark to light green depends on the concentration of glyphosate. Development of a colorimetric assay for glyphosate determination was carried out based on two approaches: (i) UV-Visible spectrophotometry for glyphosate detection in the solution, and (ii) a three-dimensional microfluidic paper-based analytical device (3D- $\mu$ PAD) detected by images captured via digital camera and sent to the ImageJ program.

UV-visible spectrophotometry was used to monitor changes in absorbance during the reaction. Glyphosate inhibits the oxidation of ABTS by binding to the recognition

sites of Mn-ZnS QD-MIP. This inhibition suppresses the generation of  $\cdot\text{OH}$  from  $\text{H}_2\text{O}_2$ , thereby blocking the oxidation of the ABTS colorimetric probe. The distinctive color change of ABTS, from dark to light green, and the appearance of a maximum absorption wavelength at 420 nm was observed. Optimal conditions were as follows: using an Mn-ZnS QD-MIP concentration of  $50 \mu\text{g mL}^{-1}$ , an ABTS concentration of 30 mM, an  $\text{H}_2\text{O}_2$  concentration of 90 mM, along with an acetate buffer solution (0.2 M, pH 2.0), for a 20 minute incubation period at  $35^\circ\text{C}$ . The developed colorimetric in the solution assay exhibits a linear calibration over the range of  $0.01\text{-}30 \mu\text{g mL}^{-1}$ , with a linear correlation coefficient ( $r^2$ ) of 0.9920.

The three-dimensional microfluidic paper-based analytical device (3D- $\mu\text{PAD}$ ) is a portable, disposable, and cost-efficient alternative technology. The 3D- $\mu\text{PAD}$  was fabricated by screen-printing using the relatively new material of penguard enamel color to create a hydrophobic barrier. The foldable 3D- $\mu\text{PAD}$  is comprised of three layers (top/middle/bottom) designed as detection zones, an immobilized Mn-ZnS QD-MIP disc and sample loading. The assay on 3D- $\mu\text{PAD}$  can determine glyphosate by ImageJ detection, over a working range of  $0.005$  to  $50 \mu\text{g mL}^{-1}$ , with a detection limit of  $0.002 \mu\text{g mL}^{-1}$ . The 3D- $\mu\text{PAD}$  that was developed gives acceptable recoveries ranging from 80.6% to 119.9% and a high level of precision with %RSD values from 0.1% to 6.3%. Our 3D- $\mu\text{PAD}$  is highly accurate with a small percent of relative difference from a certified value of CRM, e.g. 0.4% for intraday and 0.7% for inter-day. Finally, the fabricated 3D- $\mu\text{PAD}$  provides solid reproducibility (1.7 % RSD for 10 devices of  $0.05 \mu\text{g mL}^{-1}$  glyphosate determination). The developed 3D- $\mu\text{PAD}$  was successfully applied to determine glyphosate concentrations in whole grain samples. The final development can be applied as an alternative technique due to its highly selective and sensitive colorimetric method, well-suited to food-quality control and on-site environmental-monitoring applications, without requiring sophisticated instrumentation.

## บทคัดย่อ

เรื่อง : การพัฒนาจีโอพอลิเมอร์สำหรับการกำจัดสีย้อมในอุตสาหกรรมและโลหะหนัก  
 ผู้วิจัย : วรางคณา กิตติวงศ์วิศาล  
 ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
 สาขาวิชา : เคมี  
 อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายสมร ลำลอง  
 คำสำคัญ : การดูดซับ, จีโอพอลิเมอร์, สีย้อม, แกลบข้าว, แถ่ลอย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการกำจัดสารละลายสีย้อมและโลหะหนัก โดยใช้จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากดินขาว ซิลิกาทางการค้า สกัดจากแกลบและแถ่ลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะเพื่อเตรียมเป็นโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) สำหรับใช้แทน และแถ่ลอยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวเป็นตัวดูดซับ ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวดูดซับด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF) Scanning Electron Microscope (SEM), Brunauer-Emmett-Teller or (BET) และ Fourier Transform infrared spectroscopy (FT-IR) จากการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับพบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจาก  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ทางการค้า (GEO8M5D) มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีน บลู และบริลเลียน กรีนสูงมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ศึกษาปริมาณและเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม ศึกษาไอโซเทอร์ม, จลนศาสตร์, อุณหพลศาสตร์ และการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ ในการดูดซับสีย้อมเมทิลีน บลู ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 300 ppm น้ำหนักที่เหมาะสม 20 g/L เวลาที่เหมาะสมคือ 60 นาที มีประสิทธิภาพการดูดซับสีเมทิลีนบลู 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำกลับมาดูดซับใหม่โดยวิธีการเผา สามารถนำกลับมาดูดซับได้ 9 ครั้ง (ความจุการดูดซับสะสม 296.92 มิลลิกรัมต่อกรัม) สำหรับจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  โดยซิลิกาที่สกัดจากแกลบ (GSIRH) และแถ่ลอย (GFA) มากำจัดสีย้อมเมทิลีน บลู ดังนั้นจึงเลือก GSIRH มาศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีน บลู ที่เหมาะสม โดยน้ำหนักที่เหมาะสมคือ 40 g/L เวลาที่เหมาะสมคือ 60 นาที มีประสิทธิภาพการดูดซับสีเมทิลีน บลู 91 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำกลับมาดูดซับใหม่โดยวิธีการเผา สามารถนำกลับมาดูดซับได้ 4 ครั้ง (ความสามารถในการดูดซับสะสม 71.92 มิลลิกรัมต่อกรัม) สำหรับการนำแถ่ลอยดูดซับสีย้อมบริลเลียน กรีน พบว่า น้ำหนักที่เหมาะสมคือ 4 g/L เวลาที่เหมาะสมคือ 30 นาที มีประสิทธิภาพการดูดซับ 93 เปอร์เซ็นต์การนำกลับมาดูดซับใหม่ได้ 3 ครั้ง (ความจุในการดูดซับสะสม 227.10 มิลลิกรัมต่อกรัม)

ตัวดูดซับ GEO8M5D, GSIRH และ fly ash ให้ผลไอโซเทอร์มในการดูดซับที่สอดคล้องกันคือแลงเมียร์ไอโซเทอร์มเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว จลนศาสตร์สอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน และ

เปลี่ยนแปลงเอนโทรปี ( $\Delta S^\circ$ ) เป็นบวกแสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับมีผลทำให้โมเลกุลของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่บริเวณรอยต่อของพื้นผิวตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับมีความไม่เป็นระเบียบเพิ่มสูงขึ้นเอนทาลปี ( $\Delta H^\circ$ ) เป็นบวกแสดงว่ากระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน และ พลังงานอิสระกิบส์ ( $\Delta G^\circ$ ) ของการดูดซับมีค่าเป็นลบแสดงว่ากระบวนการดูดซับเกิดขึ้นได้เอง

นอกจากนี้ได้นำ GEO8M5D มากำจัดโลหะหนักจากสารละลาย คือ Cr(III), Zn(II) และ Cd(II) มีประสิทธิภาพการดูดซับที่ 90.68, 92.86 และ 93.48 เปอร์เซ็นต์ สามารถลดปริมาณโลหะหนักจากสารละลายได้ ดังนั้นผลจากการศึกษาแสดงว่าจีโอพอลิเมอร์และถ้ำลอยสามารถเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพเพื่อประยุกต์ใช้บำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรม

## ABSTRACT

TITLE : DEVELOPMENT OF GEOPOLYMER FOR DYE INDUSTRIAL AND HEAVY METAL REMOVAL

AUTHOR : WARANGKANA KITTIWONGWISAN

DEGREE : MASTER OF SCIENCE

MAJOR : CHEMISTRY

ADVISOR : ASST. PROF. SAISAMORN LAMLONG, Ph.D.

KEYWORDS : ADSORPTION, GEOPOLYMER, DYE RICE HUSK, FLY ASH

The aim of this work is to study removal of dyes and heavy metal ions from aqueous solutions by using geopolymers synthesized from metakaolin and commercial silica-extracted from rice husks and fly ash from the Mae Moh power plant for preparing sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). Non-treated fly ash was used as an absorbent. The adsorbent materials were characterized by X-ray Diffraction (XRD), X-ray Fluorescence (XRF) Scanning Electron Microscope (SEM), Brunauer-emmett-teller or (BET) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR). Based on the adsorption efficiency of the geopolymers from commercial  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (GEO8M5D) for methylene blue and brilliant green dyes, it was found that the adsorption efficiency for both dyes are higher than 90%. The optimum parameters for adsorption including adsorbent dosage and adsorption time, adsorption isotherm, kinetic, thermodynamic and regeneration test parameters were studied at the initial dye concentration of 300 ppm. The optimum dosage is 20 g/L. The contact time is 60 minutes. The adsorption efficiency is 95%. The regeneration of GEO8M5D can be obtained for 9 cycles ( $q_e = 296.92 \text{ mg/g}$ ). The geopolymer prepared from rice husks (RH) and fly ash (GSiRH and GFA) for MB removal were also investigated. The results showed that the adsorption efficiency of GSiRH is higher than GFA. Therefore, GSiRH was selected for the optimal conditions for the study. The results showed that the optimum dosage is 40 g/L, the contact time is 60 minutes and the adsorption efficiency is 91%. The regeneration of GSiRH can be obtained for 4 cycles ( $q_e = 71.92 \text{ mg/g}$ ). Fly ash's adsorption efficiency for removing brilliant green was investigated. It was found that the optimum dosage is 4 g/L, the contact time is 30

minutes and the adsorption efficiency is 93%. The regeneration of fly ash can be obtained for 3 cycles ( $q_e = 227.10$  mg/g).

The adsorption isotherm onto GEO8M5D, GSiRH and fly ash corresponded well to the Langmuir isotherm which described the monolayer adsorption. Kinetic study showed that the adsorption was followed the pseudo-second-order model. The thermodynamic properties of the adsorption and the positive value of  $\Delta S_o$  indicated the increment of instability and randomness at the dye interaction interface which resulted from the excess endothermic heat. Negative  $\Delta H_o$  and  $\Delta G_o$  indicated that the dye adsorptions are an endothermic and spontaneous physisorption, respectively.

In addition, application of GEO8M5D was used for heavy metal removal from a solution. The adsorption efficiency of Cr(III), Zn(II) and Cd(II) onto GEO8M5D are 90.68, 92.86 and 93.48%, respectively. The result indicated that GEO8M5D can be used to reduce heavy metals from the solution. Therefore, these results indicated that the synthetic geopolymer and the fly ash can be used as potential adsorbents for dye and heavy metal removal from industrial wastewater.



บทคัดย่อ

เรื่อง : การออกแบบ สังเคราะห์ และทดสอบฤทธิ์ทางชีวภาพของสารยับยั้งเอนไซม์ InhA ชนิดใหม่เพื่อใช้เป็นสารต้านวัณโรค

ผู้วิจัย : อิศราภรณ์ เสี่ยงล้ำ

ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา : เคมี

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.พรพรรณ พิงโพธิ์

คำสำคัญ : เอนไซม์ ไอเอ็นเอชเอ, สารอนุพันธ์เบนซิมิดาโซล, สารอนุพันธ์ไพโรลิดีนเบนซาไฮดราซิด, โมเลกุลาร์ด็อกกิ้ง, การจำลองพลวัตเชิงโมเลกุล

ในงานวิจัยนี้ได้นำเอาวิธีการจำลองแบบและการออกแบบโมเลกุลด้วยคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาและออกแบบสารยับยั้งชนิดใหม่เพื่อใช้เป็นสารต้านวัณโรค เอนไซม์อินฮิบิเตอร์หรือเอนไซม์ไอเอ็นเอชเอของเชื้อไมโคแบคทีเรียม ทูเบอร์คิวโลสิส เป็นหนึ่งในเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์กรดไขมันไมโคลิก ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในผนังเซลล์ของเชื้อไมโคแบคทีเรียม ทูเบอร์คิวโลสิส นอกจากนี้ยังเป็นเป้าหมายที่สำคัญในการออกฤทธิ์ยับยั้งโรควัณโรคของยากลุ่มแรกที่ใช้ในการรักษาคือยาไอโซไนอาซิด อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของยาไอโซไนอาซิดจะลดลงเนื่องมาจากการกลายพันธุ์ของเอนไซม์แคทจีซึ่งทำหน้าที่กระตุ้นไอโซไนอาซิดให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถออกฤทธิ์ยับยั้งได้ ดังนั้นสารยับยั้งเอนไซม์ไอเอ็นเอชเอชนิดใหม่ที่มีกลไกการออกฤทธิ์ที่ไม่เหมือนกับไอโซไนอาซิดซึ่งสามารถยับยั้งเอนไซม์ไอเอ็นเอชเอได้โดยตรง จึงเป็นคำตอบที่สำคัญในการพัฒนาต้านวัณโรคที่ต่อต่อยาไอโซไนอาซิด สารยับยั้งเอนไซม์ไอเอ็นเอชเอได้โดยตรงเป้าหมายแรกคือสารอนุพันธ์เบนซิมิดาโซล สารอนุพันธ์เบนซิมิดาโซล ถูกนำมาออกแบบโดยอาศัยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างในตำแหน่ง 2,3-ไดไฮโดร-1-ไฮโดรเจน-อินเดน และอะตอมออกซิเจนถูกเปลี่ยนเป็นอะตอมไนโตรเจนโดยใช้หลักการไบโอไอโซสเตียร์ เลือกรูปร่างของสารซึ่งเป็นวงอะโรมาติกส์เนื่องจากต้องการ เพิ่มการเกิดอันตรกิริยาแบบพันธะไฮโดรเจน, ไพ-ไพ, ไพ-แคทไอออน และไพ-ซิกมา ของสารยับยั้งในโครงการจับเอนไซม์ไอเอ็นเอชเอ สารประกอบถูกเลือกตามกฎของ ลิพินสกี (Lipinski's rules) ประเมินคุณสมบัติทางเภสัชจลนศาสตร์และความเป็นพิษ เพื่อเลือกโมเลกุลไปศึกษาด้วยระเบียบวิธีการคำนวณโมเลกุลาร์ด็อกกิ้ง การจำลองพลวัตเชิงโมเลกุล และการคำนวณค่าพลังงานในการจับมาใช้ในการประเมินโครงสร้าง และเลือกสารประกอบที่มีศักยภาพเพื่อนำมาสังเคราะห์โดยพิจารณาจากค่าพลังงานการจับที่ดีและแสดงอันตรกิริยาที่สำคัญ สารจำนวน 5 โครงสร้าง (AN19, AN25, AN30, AN55 และ AN63) ถูกเลือกมาสังเคราะห์และพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคโปรตอนเอ็นเอ็มอาร์, คาร์บอนเอ็นเอ็มอาร์, เดปท์-135

และ แมสสเปกโตรเมตรี การยับยั้งไอเอ็น เอชเอของสารประกอบถูกนำมาศึกษาที่ความเข้มข้น 1 ไมโครโมลาร์ ผลการศึกษาพบว่าสารประกอบ AN19, AN25 และ AN63 ออกฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์ไอเอ็น เอชเอ 21.25, 18.83 และ 18.53% ตามลำดับ ไตรโครซานซึ่งเป็นสารที่ใช้อ้างอิงในสารยับยั้งไอเอ็น เอชเอและสารหมายเลข 7 ซึ่งเป็นสารที่ใช้อ้างอิงในของสารอนุพันธ์เบนซิมิดาโซลมีการออกฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์ไอเอ็นเอชเอ 28.36 และ 44.34% ตามลำดับ สารจำนวน 3 โครงสร้างที่ออกแบบใหม่มีความแตกต่างของการออกฤทธิ์ยับยั้งไอเอ็น เอชเออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับทั้ง 2 สารที่นำมาใช้อ้างอิง การออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อไมโคแบคทีเรียม ทูเบอร์คูโลสิส ส่วนที่กระจายตัวในซีเซียมและปริมาณของยาสูงสุดที่สามารถทนได้ (MRTD) ของสารจำนวน 5 โครงสร้าง และสารหมายเลข 7 ถูกนำมาศึกษาโดยใช้การทำนายโมโคซีเอสเอ็ม ผลการศึกษานี้ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับสารหมายเลข 7 และสาร AN19 แสดงค่าของ MRTD ต่ำที่สุด นอกจากนี้พิจารณาความเป็นพิษในระดับด้วยการทำนายพีเคซีเอสเอ็ม สาร AN19, AN55 และ 7 แสดงให้เห็นว่าไม่มีความเป็นพิษต่อดับ ดังนั้นการออกแบบโมเลกุลด้วยคอมพิวเตอร์ที่มีศักยภาพซึ่งใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสารตัวใหม่และมีประสิทธิภาพสูงขึ้นในการยับยั้งเชื้อไมโคแบคทีเรียม ทูเบอร์คูโลสิสโดยใช้สารอนุพันธ์เบนซิมิดาโซล สารอนุพันธ์เป้าหมายที่สองที่ใช้ในการศึกษาคือสารอนุพันธ์ไพโรลลิว เบนซาไฮดราซิด ผลจากศึกษาระเบียบวิธีการคำนวณโมเลกุลาร์ต็อกกิ้ง การจำลองพลวัตเชิงโมเลกุล และการคำนวณค่าพลังงานในการจับ ทำให้ทราบการวางตัวของโครงสร้างในโพรงการจับเอนไซม์ไอเอ็นเอชเอพบอันตรกิริยาที่สำคัญ ได้แก่ พันธะไฮโดรเจน และอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก การจำลองพลวัตเชิงโมเลกุลถูกใช้ในการศึกษาข้อมูล ที่สำคัญทางโครงสร้าง ผลการศึกษาบ่งชี้ให้เห็นถึงอันตรกิริยาที่สำคัญคืออันตรกิริยาแบบพันธะไฮโดรเจนกับไกลซีน 96 และอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิกของกรดอะมิโนในโพรงการจับไอเอ็นเอชเอ และ NAD<sup>+</sup> โคแฟกเตอร์ จากผลการศึกษาสารยับยั้งทั้ง 2 สารอนุพันธ์คือเบนซิมิดาโซลและไพโรลลิวเบนซาไฮดราซิด ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับการออกแบบสารยับยั้งเอนไซม์ไอเอ็นเอชเอตัวใหม่ให้มีศักยภาพสูงขึ้นและช่วยแก้ปัญหาการดื้อยาของไอโซไนอาซิด

## ABSTRACT

TITLE : DESIGN, SYNTHESIS AND BIOLOGICAL EVALUATIONS OF NOVEL  
INHA INHIBITORS AS ANTI-TUBERCULOSIS AGENTS

AUTHOR : ISSARAPORN SAENGLAM

DEGREE : MASTER OF SCIENCE

MAJOR : CHEMISTRY

ADVISOR : ASSOC. PROF. PORNPAN PUNGPO, Ph.D.

KEYWORDS : INHA ENZYME, BENZIMIDAZOLE DERIVATIVE, PYRROLYL  
BENZOHYDRAZIDE DERIVATIVE, MOLECULAR DOCKING  
CALCULATIONS, MOLECULAR DYNAMIC SIMULATIONS

In this research, molecular modeling and computer-aided molecular design approaches were applied to study and design novel inhibitors as anti-tuberculosis agents. Enoyl-ACP reductase (InhA) enzyme of *Mycobacterium tuberculosis* is one of the enzymes responsible for the synthesis of mycolic acid which is the main component in *Mycobacterium tuberculosis* cell walls. Moreover, it is also an attractive target of isoniazid, the first line drug for tuberculosis treatment. However, the efficiency of isoniazid has decreased due to KatG enzyme mutation, which is responsible for activating isoniazid. Therefore, inhibitors with different isoniazid mechanisms that can directly inhibit InhA (direct InhA inhibitors) are a key to developing anti-tuberculosis drugs opposed to isoniazid drug resistance. Benzimidazole derivatives are the first target of direct InhA inhibitors. Benzimidazole derivatives were designed based on a structural modification of 2, 3-dihydro-1*H*-indane group and converted oxygen atoms to nitrogen atoms using the bio-isostere principle. This screens for aromatic ring substitutions to increase hydrogen bonding,  $\pi$ - $\pi$ ,  $\pi$ -cation and  $\pi$ -sigma interactions between inhibitors with the binding pocket of InhA. Then, selected compounds were collected based on Lipinski's rules of five, pharmacokinetic properties and toxicity. Molecular docking calculations, molecular dynamic simulations and binding energy calculations were studied and used to selected potential compounds for further synthesis based on the good binding affinity and crucial interactions. Five compounds (AN19, AN25, AN30, AN55

and AN63) were selected for synthesis and characterization by  $^1\text{H-NMR}$ ,  $^{13}\text{C-NMR}$  and DEPT-135 and mass spectrometry. The InhA inhibitory of compounds were evaluated in concentrations of 1  $\mu\text{M}$  of the synthesis compounds. The results showed that compounds, AN19, AN25 and AN63 displayed inhibitory activity with 21.25, 18.83 and 18.53%, respectively. Whereas, triclosan, a reference InhA inhibitor and compound 7, a reference benzimidazole, showed inhibitory activity at 28.36% and 44.34%, respectively. Three novel compounds showed statistically significant differences as compared to both reference compounds. The anti-*Mycobacterium tuberculosis*, caseum fraction unbound and maximum recommended tolerated doses (MRTD) using a mycoCSM prediction of five compounds and compound 7 were predicted. These values are not statistically significant different as compared to compound 7 and compound AN19 showing the lowest MRTD. Moreover, hepatotoxicity was predicted using a pkCSM prediction. Compounds AN19, AN55 and 7 revealed no hepatotoxicity. Therefore, potential computer-aided molecular designs provided the outlines for a rational design of novel and more potent treatments of *Mycobacterium tuberculosis* based on benzimidazole derivatives. The second target in this study were pyrrolyl benzohydrazide derivatives. The results were derived from molecular docking calculations, molecular dynamic simulations and binding energy calculations aided to understand the binding mode and binding interactions in the binding pockets of InhA including hydrogen bonds and hydrophobic interactions. In addition, molecular dynamic simulations were used to investigate the key structural information. The obtained key interactions are hydrogen bond interactions with Gly96 as well as hydrophobic amino acid and  $\text{NAD}^+$  cofactor residues in the binding InhA pocket. Based on the results from this study both benzimidazole and pyrrolyl benzohydrazide derivatives can provide fruitful information for further design of novel inhibitors as highly potent approaches to solving the problem of resistance to isoniazid.

## บทคัดย่อ

เรื่อง	: ระบบประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือดในผู้ป่วยโรคเบาหวานด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซพตรอนหลายชั้น
ผู้วิจัย	: ธนสิทธิ์ สนั่นเมือง
ชื่อปริญญา	: วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	: เทคโนโลยีสารสนเทศ
อาจารย์ที่ปรึกษา	: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วงศ ศรีอุไร
คำสำคัญ	: โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซพตรอนหลายชั้น, หัวใจและหลอดเลือด, การคัดเลือกคุณลักษณะ, จำแนกความเสี่ยง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ 1) เพื่อพัฒนาแบบจำลองจำแนกความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือดในผู้ป่วยโรคเบาหวานด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซพตรอนหลายชั้น 2) เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือดในผู้ป่วยโรคเบาหวานในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชัน และ 3) เพื่อศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือดในผู้ป่วยโรคเบาหวาน โดยข้อมูลที่น่ามาศึกษารวบรวมจากระบบสารสนเทศโรงพยาบาลสรรพสิทธิประสงค์ ประกอบด้วย ข้อมูลผู้ป่วยโรคเบาหวานจำนวน 2,036 เรคคอร์ด ระหว่างปี พ.ศ. 2550 - 2562 ซึ่งข้อมูลประกอบด้วยข้อมูลทั่วไปของผู้ป่วย ได้แก่ เพศ อายุ การสูบบุหรี่ และข้อมูลผลตรวจเลือดจากห้องปฏิบัติการข้อมูลเหล่านี้ถูกนำมาปรับความสมดุลด้วยวิธี Synthetic Minority Over-sampling technique (SMOTE) โดยได้เพิ่มจำนวนข้อมูลตั้งแต่ 100% ถึง 400% จากนั้นประยุกต์ใช้การคัดเลือกคุณลักษณะข้อมูลด้วยวิธี Information Gain (IG) เปรียบเทียบกับวิธี Chi-Square ร่วมกับการจำแนกข้อมูลด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซพตรอนหลายชั้น ผลการประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองด้วยวิธี 10-fold cross validation พบว่าการจำแนกความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือดในผู้ป่วยโรคเบาหวานโดยการคัดเลือกคุณลักษณะข้อมูลด้วยวิธี Information Gain (IG) ร่วมกับวิธีโครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซพตรอนหลายชั้นมีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยมีค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของการจำแนกเท่ากับ 98.03% ผลการประเมินความพึงพอใจจากผู้ใช้งานจำนวน 2 กลุ่ม ได้แก่ ผู้เชี่ยวชาญ 6 คน และผู้ใช้งานทั่วไปจำนวน 14 คนโดยใช้แบบสอบถาม พบว่าผู้เชี่ยวชาญมีค่าเฉลี่ยความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ( $\bar{x} = 3.85$ ,  $SD = 0.57$ ) และผู้ใช้ทั่วไปมีค่าเฉลี่ยความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ( $\bar{x} = 3.88$ ,  $SD = 0.56$ ) จากผลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่า ระบบประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือดในผู้ป่วยโรคเบาหวานที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปใช้ได้จริงและสนับสนุนการทำงานของแพทย์ได้

## ABSTRACT

TITLE : RISK ASSESSMENT SYSTEM FOR CARDIOVASCULAR DISEASE AMONG DIABETES BY USING MULTILAYER PERCEPTRON NEURAL NETWORK

AUTHOR : THANASITH SANANMUANG

DEGREE : MASTER OF SCIENCE

MAJOR : INFORMATION TECHNOLOGY

ADVISOR : ASST. PROF. WONGKOT SRIURAI, Ph.D.

KEYWORDS : MULTI LAYER PERCEPTRON NEURAL NETWORK, CRADIOVASCULAR DISEASE, FEATURE SELECTION, RISK CLASSIFICATION

The objectives of this research were 1) to develop a classification model for identifying the risk of cardiovascular disease in patients with diabetes using a multi-layer perceptron neural network, 2) to develop a model of a risk assessment system for cardiovascular disease in diabetic patients in a web application format and 3) to study the satisfaction of users of the cardiovascular risk assessment system for diabetics. The data was collected from the information system of Sanphasitthiprasong Hospital consisting of 2,036 records of diabetics between 2007 - 2019, including the general information of patients including gender, age, smoking and laboratory blood tests. This data were rebalanced by using the SMOTE method, increasing the amount of data from 100% to 400%. After that, we applied a feature selection through the Information Gain (IG) method compared to the Chi-Square method with a multi-layer perceptron neural network. The results of the 10-fold cross validation model evaluation found that the risk classification of cardiovascular disease in diabetics was selected by the Information Gain (IG) method along with the multilayer perceptron neural network method. Multilayer perceptron neural networks are the most effective. The accuracy of the classification was 98.03%. The results were assessed by two groups of users, first involved six experts and second involved fourteen users using questionnaires. The results showed that the average expert satisfaction level was high ( $\bar{x} = 3.85$ , SD = 0.57), and the average of general user satisfaction level was also high ( $\bar{x} = 3.88$ , SD = 0.56).

The risk assessment system for cardiovascular disease in diabetic patients can be practical and support the work of doctors.

### บทคัดย่อ

เรื่อง : การส่งเสริมความคิดสร้างสรรค์ของนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 4  
เรื่อง สมบัติของวัสดุด้วยกิจกรรมสะเต็มศึกษา เรื่อง วิศวกรุ่นเยาว์

ผู้วิจัย : จีระยา แสนโคตร

ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา : วิทยาศาสตร์ศึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ตะวัน วุฒิสเลลา

คำสำคัญ : การเรียนรู้แบบสะเต็มศึกษา, วัสดุและสมบัติของวัสดุ, กระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรม, ความคิดสร้างสรรค์

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความคิดสร้างสรรค์ของนักเรียนทั้งก่อนและหลังเรียน และศึกษาความเข้าใจในแต่ละขั้นของกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรม ด้วยการจัดการเรียนรู้แบบสะเต็มศึกษาของนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 4 จำนวน 24 คน ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2563 แบบแผนการวิจัย คือ แบบกลุ่มเดียวทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนและแบบกลุ่มวัดผลครั้งเดียว เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ แผนการจัดการเรียนรู้แบบสะเต็มศึกษา เกณฑ์การให้คะแนนแบบรูบริก และแบบทดสอบแบบอัตนัย จำนวน 4 ข้อ ผลการวิจัย พบว่า นักเรียนที่เรียนด้วยการจัดการเรียนรู้แบบสะเต็มศึกษามีคะแนนความคิดสร้างสรรค์หลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .05 ค่าความก้าวหน้าทางการเรียนเฉลี่ยทั้งชั้นเรียนเท่ากับ 0.60 ซึ่งอยู่ในระดับปานกลาง ความก้าวหน้าทางการเรียนรู้ที่สูงที่สุดคือ ความคิดละเอียดลออ เพราะกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรมในกิจกรรมสะเต็มศึกษาสอนให้นักเรียนออกแบบและวางแผนก่อนลงมือแก้ปัญหาเพื่อหาวิธีการที่ดีที่สุด ผลของกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรมในการสร้างบ้านไฟฟ้าลอยน้ำติดไฟแอลอีดี มีคะแนนเฉลี่ย 84.72% รายการประเมินที่มากที่สุดคือ การนำเสนอ มีคะแนนเฉลี่ย 95.83% ทั้งนี้เนื่องจากการดำเนินการแก้ปัญหาตามกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรมนั้น นักเรียนต้องออกแบบและวางแผนการแก้ปัญหาอย่างเป็นระบบไม่ใช่การลองผิดลองถูก จึงทำให้นักเรียนแก้ปัญหาด้วยความเข้าใจซึ่งส่งผลให้สามารถนำเสนอสิ่งที่เรียนรู้ได้ถูกต้องครบทุกประเด็น



## ABSTRACT

TITLE : FOSTERING GRADE 4 STUDENTS' CREATIVE THINKING ON MATERIAL PROPERTIES THROUGH STEM EDUCATION ACTIVITIES ENTITLED "A YOUNG ENGINEER"

AUTHOR : JEERAYA SANKOT

DEGREE : MASTER OF DEGREE

MAJOR : SCIENCE EDUCATION

ADVISOR : ASST. PROF. KARNTARAT WUTTISELA, Ph.D.

KEYWORDS : STEM EDUCATION, MATERIALS AND PROPERTIES OF MATERIAL, ENGINEERING DESIGN, CREATIVITY

This research aimed to compare students' creativity before and after learning and to study students' comprehension of each stage of the engineering design process (EDP) in a STEM learning management of 24 students at grade four in the second semester during the academic year 2020. The research plan involved a one shot case study, pre-test and post-test, and the One-Group Pretest-Posttest Design. Research instruments involved the STEM learning management plan, rubric scoring, and a 4-question subjective test. The results found that students who studied with STEM Education had a higher score for creativity than the score they had before learning with the new method, with a significant difference of .05. The average normalized gain score on creativity was 0.60 which was at a medium level. The highest score was that for involved elaboration, for STEM education reinforces designing and planning prior to undertaking problem-solving to find the best solutions. The results of students' EDP on floating houses with LED was 84.72%. The highest mean score was that for presentation (mean = 95.83%). This was because problem-solving in the EDP required systematic designing and planning rather than just the trial-and-error method. Students then solved problems with new insights resulting in their eloquent, accurate presentations of what they had learned.

## บทคัดย่อ

- เรื่อง : การพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 เรื่องการหายใจระดับเซลล์ด้วยกิจกรรมการลงมือปฏิบัติบนฐาน การสืบเสาะหาความรู้ 5 ขั้น
- ผู้วิจัย : ธณัฐภรณ์ ริทศน์โส
- ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
- สาขาวิชา : วิทยาศาสตร์ศึกษา
- อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาพร พรไตร
- คำสำคัญ : ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน, การหายใจระดับเซลล์, กิจกรรมการลงมือปฏิบัติ บนฐานการสืบเสาะหาความรู้ 5 ขั้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ตรวจสอบประสิทธิภาพ ( $E_1/E_2$ ) และดัชนีประสิทธิผล (E.I.) ของแผนการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ด้วยกิจกรรมการลงมือปฏิบัติบนฐานการสืบเสาะหาความรู้ 5 ขั้น เรื่องการหายใจระดับเซลล์ 2) เปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนและหลังเรียน และ 3) ศึกษาความก้าวหน้าทางการเรียนของนักเรียน ระเบียบวิธีวิจัยประกอบด้วย การพัฒนากิจกรรมการเรียนรู้ และแบบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน และนำไปใช้กับกลุ่มที่ศึกษาคือนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 จำนวน 33 คน ซึ่งได้มาโดยการเลือกแบบเจาะจง เก็บข้อมูลจากแบบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนและหลังเรียน ซึ่งเป็นข้อสอบชนิดเลือกตอบ 4 ตัวเลือก จำนวน 36 ข้อ และกิจกรรมการลงมือปฏิบัติบนฐานการสืบเสาะหาความรู้ใช้เวลา 9 ชั่วโมง และประกอบด้วย 5 ขั้น ขั้นที่ 1 ขั้นสร้างความสนใจ ขั้นที่ 2 ขั้นสำรวจและค้นหา ขั้นที่ 3 ขั้นอธิบายและลงข้อสรุป ขั้นที่ 4 ขั้นขยายความรู้ และขั้นที่ 5 ขั้นประเมินผล ผลการวิจัยพบว่า 1) กิจกรรมนี้มีค่าประสิทธิภาพ เท่ากับ 86.88/85.15 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่ตั้งไว้ (80/80) ค่าดัชนีประสิทธิผลเท่ากับ 0.7978 2) ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียนของนักเรียน (86.68) สูงกว่าผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียน (33.33) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และ 3) นักเรียนมีความก้าวหน้าทางการเรียนคิดเป็นร้อยละ 79.78 ( $t_g = 0.7978$ ) จัดเป็นความก้าวหน้าในระดับสูง

**ABSTRACT**

TITLE : THE DEVELOPMENT OF GRADE 10 STUDENT’S LEARNING  
ACHIEVEMENT IN THE TOPIC OF CELLULAR RESPIRATION USING 5E  
INQUIRY-BASED HANDS-ON ACTIVITY

AUTHOR : THANADPORN RITADSO

DEGREE : MASTER OF SCIENCE

MAJOR : SCIENCE EDUCATION

ADVISOR : ASST. PROF. SUPAPORN PORNTRI, Ph.D.

KEYWORDS : LEARNING ACHIEVEMENT, CELLULAR RESPIRATION, 5E INQUIRY-  
BASED HANDS-ON ACTIVITY

This research aimed to 1) investigate the efficiency (E1/E2) and effectiveness (E.I.) of the 5E inquiry-based hands-on activity on the topic of cellular respiration, 2) compare the pre-test and post-learning achievement, and 3) investigate students’ learning progression. Research methodology comprised of a developed learning activity, an achievement test and the implementation to the samples consisting of 33 grade-10 students selected by cluster random sampling. Data were collected from the pre- and post- achievement test which consisted of 4 items of 4 multiple choices test and worksheets. This activity was 9 hours long and comprised of 5 steps: engagement, exploration, explanation, elaboration and evaluation. The results showed that 1) the efficiency and the effectiveness of this activity were 86.88/85.15 and 0.7978, respectively which were higher than the standard 80/80 and 0.5, respectively, 2) the students’ post-achievement (86.68) was significantly higher than the students’ pre-achievement, ( $p < 0.5$ ), and 3) students’ learning progression was 79.78%, categorized at the high gain level.

### บทคัดย่อ

เรื่อง	: การพัฒนามโนมติของนักเรียนมัธยมศึกษาปีที่ 2 ด้วยชุดการทดลองอย่างง่าย เรื่องโมเมนต์ของแรง
ผู้วิจัย	: นภาพร เทียมทะนง
ชื่อปริญญา	: วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	: วิทยาศาสตร์ศึกษา
อาจารย์ที่ปรึกษา	: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุระ วุฒิพรหม
คำสำคัญ	: ชุดการทดลองโมเมนต์ของแรง, มโนมติ, สมดุลของโมเมนต์

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างชุดการทดลองอย่างง่ายและพัฒนามโนมติทางวิทยาศาสตร์ เรื่องโมเมนต์ของแรง ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 จำนวน 1 ห้อง 24 คน โรงเรียนวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ราชวิทยาลัยบุรีรัมย์ อำเภอสตึก จังหวัดบุรีรัมย์ ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2562 โดยการวิจัยเป็นแบบ one-group pretest-posttest design เครื่องมือวิจัยที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ชุดการทดลองอย่างง่าย เรื่อง โมเมนต์ของแรง แผนการจัดการเรียนรู้ และแบบวัดมโนมติ วิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบค่าที่แบบกลุ่มตัวอย่างไม่อิสระ (t-test for dependent sample) วิเคราะห์ความก้าวหน้าทางการเรียนด้วยวิธีของ Hake (normalized gain,  $\langle g \rangle$ ) และวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน ผลการวิจัยพบว่า ชุดการทดลองอย่างง่ายที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีน้อยกว่าร้อยละ 5 และคุณภาพชุดการทดลองจากการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญทางด้านฟิสิกส์มีค่าเฉลี่ย 3.80 จาก 4.00 ซึ่งอยู่ในระดับดีมาก และจากการนำชุดการทดลองที่สร้างขึ้นไปใช้ในการจัดการเรียนรู้ พบว่านักเรียนมีมโนมติหลังเรียนที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 มีความก้าวหน้าทางการเรียน ( $\langle g \rangle = 0.8$ ) จัดเป็นความก้าวหน้าในระดับสูง และความสัมพันธ์ของคะแนนคำถามท้ายการทดลองกับคะแนนหลังเรียนของนักเรียนทั้งหมด พบว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson correlation coefficient)  $r_{XY}$  เท่ากับ 0.755 แสดงว่าการจัดการเรียนรู้โดยใช้ชุดการทดลองอย่างง่าย เรื่อง โมเมนต์ของแรง ที่สร้างขึ้นสามารถพัฒนามโนมติวิทยาศาสตร์ของนักเรียนได้

## ABSTRACT

TITLE : THE DEVELOPMENT OF CONCEPT IN GRADE 8 STUDENTS WITH THE SIMPLE MOMENT EXPERIMENT

AUTHOR : NAPAPORN THAIMTHANONG

DEGREE : MASTER OF DEGREE

MAJOR : SCIENCE EDUCATION

ADVISOR : ASST. PROF. SURA WUTTIPROM, Ph.D.

KEYWORDS : EXPERIMENTAL SET MOMENT OF FORCE, CONCEPT, EQUILIBRIUM OF MOMENT

This study sought to develop an experiment set and develop students' scientific concepts about moments. The participants involved 24 grade 8 students at the Princess Chulabhorn Science High School, Buriram, during the second semester of the 2019 academic year. The research method involved a one-group pretest-posttest design. The research tools included a simple moment experiment, lesson plan, and a scientific concept assessment with a t-test for dependent samples, Hake's normalized gain  $\langle g \rangle$ , and Pearson's product moment correlation. The results revealed that the simple moment experiment was effective for student's learning having an error percentage set at 5%, and the quality of the simple moment experiment was also assessed by physical experts and found to be at a high level mean of 3.80 out of 4.00. Similarly, the scientific concept posttest scores were higher than pretest scores at a confidence level of .05 significance and it was found that the students had a learning progression that averaged a normalized gain in a high gain ( $\langle g \rangle = 0.8$ ) to demonstrate the high progression. In this case, the relation of the post-experiment question scores and the posttest scores were statistically significant at a 0.5 level, with the Pearson's product moment correlation coefficient  $r_{XY}$  at 0.755. The results suggested that the simple moment experiment could be used to develop students' scientific concepts concerning the equilibrium of moment.

### บทคัดย่อ

- เรื่อง : ผลของการจัดการเรียนรู้ตามแนวคิดสะเต็มศึกษาที่มีต่อความคิดสร้างสรรค์ของนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 6
- ผู้วิจัย : พัฒนสิน สิริไชยสิทธิ์
- ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
- สาขาวิชา : วิทยาศาสตร์ศึกษา
- อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ตะวัน วุฒิเสลา
- คำสำคัญ : สะเต็มศึกษา, ความคิดสร้างสรรค์, ความพึงพอใจ

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อเปรียบเทียบความคิดสร้างสรรค์เรื่องหินและซากดึกดำบรรพ์ระหว่างก่อนและหลังการจัดการเรียนรู้ตามแนวคิดสะเต็มศึกษา และเพื่อศึกษาความพึงพอใจต่อการจัดการเรียนรู้ตามแนวคิดสะเต็มศึกษา กลุ่มตัวอย่างคือนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 6 ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2563 โรงเรียนเทศบาล 5 (วัดหาดใหญ่) จังหวัดสงขลา โดยการสุ่มแบบกลุ่ม จำนวน 33 คน เครื่องมือที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูล ได้แก่ แผนการจัดการเรียนรู้ตามแนวคิดสะเต็มศึกษาเรื่อง หินและซากดึกดำบรรพ์ แบบทดสอบความสามารถด้านความคิดสร้างสรรค์และแบบสอบถามความพึงพอใจต่อการจัดการเรียนรู้ สถิติพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าร้อยละ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและการทดสอบค่าทีสำหรับกลุ่มตัวอย่างที่ไม่เป็นอิสระต่อกัน ผลการวิจัยพบว่า ความคิดสร้างสรรค์หลังการจัดการเรียนรู้สูงกว่าก่อนการจัดการเรียนรู้คะแนนเท่ากับ 30.33 และ 35.15 ตามลำดับ และความพึงพอใจต่อการจัดการเรียนรู้เรื่องหินและซากดึกดำบรรพ์ของนักเรียนต่อการจัดการเรียนรู้ตามแนวคิดสะเต็มศึกษาเรื่องหินและซากดึกดำบรรพ์ ในภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด

## ABSTRACT

TITLE : EFFECTS OF LEARNING MANAGEMENT OF STEM EDUCATION ON  
CREATIVITY FOR GRADE 6 STUDENTS

AUTHOR : PHATTANASIN SIRACHAISIT

DEGREE : MASTER DEGREE OF SCIENCE

MAJOR : SCIENCE EDUCATION

ADVISOR : ASST. PROF. KARNTARAT WUTTISELA, Ph.D.

KEYWORDS : STEM EDUCATION, CREATIVITY, SATISFACTION

The goal of this research were to compare students' creativity with stones and fossils before and after learning through STEM Education learning management and to study student satisfaction with this method. The sample group consisted of 33 Grade 6 students, selected by cluster sampling, in the second semester of the academic year 2020 at Municipal School 5 (Hat Yai Temple) in Songkhla Province. The tools used for data collection were comprised of lesson plans based on STEM Education, namely stones and fossils, a creativity test, and a questionnaire. Statistical parameters used in this study consisted of mean, percentage, standard deviation, and a t-test for dependent samples. The results of this study demonstrated that the students' pretest and posttest scores viz. creative ability were 30.33 and 35.15, respectively, and students' attitude towards STEM Education was at the highest level.

**บทคัดย่อ**

- เรื่อง : การศึกษาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน เรื่องโครงสร้างและหน้าที่ของพืชดอก สำหรับนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 ด้วยการจัดกิจกรรมการเรียนรู้แบบสืบเสาะหาความรู้ 5E
- ผู้วิจัย : มณฑาทิพย์ บุ่งทอง
- ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
- สาขาวิชา : วิทยาศาสตร์ศึกษา
- อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ เกษรบัว
- คำสำคัญ : การจัดกิจกรรมการเรียนรู้แบบสืบเสาะหาความรู้ 5E, ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน, ความคงทนในการเรียนรู้

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนและหลังเรียน ความคงทนในการเรียนรู้ และความพึงพอใจของผู้เรียน เรื่องโครงสร้างและหน้าที่ของพืชดอก ด้วยการ จัดกิจกรรมการเรียนรู้แบบสืบเสาะหาความรู้ 5E เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ แผนการจัดการ เรียนรู้แบบสืบเสาะหาความรู้ 5E จำนวน 4 แผน แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน และแบบวัด ความพึงพอใจต่อการจัดการเรียนรู้ กลุ่มตัวอย่างเป็นนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5/1 จำนวน 48 คน โรงเรียนดอนมดแดงวิทยาคม อำเภอดอนมดแดง จังหวัดอุบลราชธานี ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2562 ผลการวิจัยพบว่า (1) นักเรียนมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (2) ความคงทนในการเรียนรู้หลังเรียนทันทีเทียบกับหลังเรียนผ่านไป แล้ว 20 วัน แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และ (3) นักเรียนมีความพึงพอใจต่อการ จัดการเรียนรู้อยู่ในระดับมากที่สุด มีค่าเฉลี่ย 4.88



## ABSTRACT

TITLE : A STUDY OF LEARNING ACHIEVEMENT ON THE TOPIC OF  
STRUCTURE AND FUNCTION OF FLOWERING PLANTS FOR GRADE  
11 STUDENTS USING INQUIRY LEARNING 5E

AUTHOR : MONTATIP BUNGTHONG

DEGREE : MASTER DEGREE OF SCIENCE

MAJOR : SCIENCE EDUCATION

ADVISOR : ASST. PROF. WIROT KESONBUA, Ph.D.

KEYWORDS : INQUIRY LEARNING 5E, ACHIEVEMENT, RETENTION IN LEARNING

The purpose of this research was to compare 5E competency before and after learning, learning retention, and student satisfaction on the topic of the structure and function of flowering plants employing inquiry-based learning. The instruments consisted of four 5E inquiry-based learning plans, achievement tests, and satisfaction questionnaires. The target group involved forty-eight students of grade 11/1 in Donmoddaeng Wittayakhom School, Donmoddaeng district, Ubon Ratchathani Province, during the first semester of academic year 2019. The results showed that (1) the post-achievement test was significantly higher than the pre-achievement test at the 0.05 level of statistical significance (2) the retention of learning after 20-days was different from the post-test at the 0.05 level of statistical significance and (3) the students satisfaction was the highest level, with a mean score of 4.88.

### บทคัดย่อ

- เรื่อง : การพัฒนากิจกรรมสะเต็มศึกษาเรื่องเซฟขนมไทยรุ่นจิ๋ว เพื่อเสริมทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ของนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 6  
เรื่อง การแยกสารผสม
- ผู้วิจัย : ยิ่งลักษณ์ ผลาผล
- ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
- สาขาวิชา : วิทยาศาสตร์ศึกษา
- อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ตะวัน วุฒิเสลา
- คำสำคัญ : การเรียนรู้แบบสะเต็มศึกษา, การแยกสารผสม, ทักษะกระบวนการวิทยาศาสตร์, ชั้นบูรณาการ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ชั้นบูรณาการของนักเรียน และผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนและหลังเรียนในหัวข้อการแยกสารผสม โดยใช้กระบวนการจัดการเรียนรู้แบบสะเต็มศึกษา เรื่องเซฟขนมไทยรุ่นจิ๋ว กลุ่มตัวอย่างสำหรับงานวิจัยนี้เป็นนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 6 ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2563 โรงเรียนบ้านโนนเสียงกรุงเจริญ อำเภอบุณฑริก จังหวัดอุบลราชธานี จำนวน 16 คน ใช้วิธีการคัดเลือกแบบเจาะจง เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ แผนการจัดการเรียนรู้แบบสะเต็มศึกษา แบบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนและหลังเรียน และแบบทดสอบวัดทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ชั้นบูรณาการก่อนเรียนและหลังเรียน ผลการวิจัยพบว่า นักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้ด้วยกิจกรรมสะเต็มศึกษา คะแนนแบบทดสอบวัดทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ชั้นบูรณาการหลังเรียน คะแนนเฉลี่ย 10.31 สูงกว่าก่อนเรียน คะแนนเฉลี่ย 4.06 และคะแนนผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียน คะแนนเฉลี่ย 22.75 สูงกว่าก่อนเรียน คะแนนเฉลี่ย 6.50

## ABSTRACT

TITLE : DEVELOPMENT OF STEM EDUCATION ACTIVITIES ENTITLED  
 “A LITTLE THAI DESSERT CHEF” TO ENHANCE GRADE 6 STUDENTS’  
 SCIENCE PROCESS SKILLS ON MIXTURE SEPARATION

AUTHOR : YINGLUK PALAPON

DEGREE : MASTER OF DEGREE

MAJOR : SCIENCE EDUCATION

ADVISOR : ASST. PROF. KARNTARAT WUTTISELA, Ph.D.

KEYWORDS : STEM EDUCATION, MIXTURE SEPARATION, SCIENCE PROCESS  
 SKILLS

This research compares integrated science process skills and students’ learning acquisition before and after learning concepts concerning mixture separation by way of a STEM education management system on the topic of, “A Little Thai Dessert Chef.” Participants were 16 grade 6 students selected by means of purposive sampling during the second semester of the 2020 Academic Year at Nonlaingkrungjarern School, Buntharik district, Ubon Ratchathani province. Research instruments involved lesson plans for STEM education, learning achievement tests, and integrated science process skill tests. Results indicated that students who were taught through a STEM education activity had post-test mean of integrated science process skill at 10.31 which was higher than the pre-test mean of 4.06. Moreover, the post-test mean of learning achievement at 22.75 was also higher than the pre-test mean at 6.50.

### บทคัดย่อ

- เรื่อง : การพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 เรื่องระบบอวัยวะในร่างกายของเรา ด้วยกิจกรรมเกมบนฐานการสืบเสาะวิทยาศาสตร์
- ผู้วิจัย : วนิตา กำแมต
- ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
- สาขาวิชา : วิทยาศาสตร์ศึกษา
- อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาพร พรไตร
- คำสำคัญ : ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน, ระบบอวัยวะในร่างกายของเรา, กิจกรรมเกมบนฐานการสืบเสาะวิทยาศาสตร์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพ ( $E_1/E_2$ ) และดัชนีประสิทธิผล (E.I.) ด้วยกิจกรรมเกมบนฐานการสืบเสาะทางวิทยาศาสตร์ เรื่อง ระบบอวัยวะในร่างกายของเรา ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 ที่มีประสิทธิภาพตามเกณฑ์ 75/75 2) เพื่อเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนและหลังเรียนของนักเรียนกลุ่มตัวอย่าง และ 3) เพื่อศึกษาความก้าวหน้าทางการเรียนของนักเรียนกลุ่มตัวอย่าง ประกอบด้วยการพัฒนากิจกรรมการเรียนรู้และแบบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนและการนำไปใช้กับกลุ่มตัวอย่างคือนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 จำนวน 1 ห้องเรียน ได้มาโดยการสุ่มแบบกลุ่ม เก็บข้อมูลจากแบบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนและหลังเรียน ซึ่งเป็นข้อสอบชนิดเลือกตอบ 4 ตัวเลือก จำนวน 42 ข้อ และใบงาน กิจกรรมใช้เวลา 14 ชั่วโมง และประกอบด้วย 5 ชั้น ได้แก่ นักเรียนจดจ่อกับคำถามที่จะนำไปสู่การสืบเสาะ นักเรียนเก็บข้อมูลเพื่อสร้างเป็นหลักฐานที่เกี่ยวข้องกับคำถาม นักเรียนสร้างคำอธิบายทางวิทยาศาสตร์จากประจักษ์พยานที่ค้นพบ นักเรียนเชื่อมโยงคำอธิบายไปยังองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ และนักเรียนสื่อสารและโต้แย้งแสดงผลสนับสนุนผลการค้นพบของตนเอง ผลการวิจัยพบว่า กิจกรรมนี้มีประสิทธิภาพเท่ากับ 79.42/81.46 และดัชนีประสิทธิผลมีค่าเท่ากับ 0.7385 นักเรียนสามารถยกระดับผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนจากระดับไม่ผ่านเกณฑ์ขั้นต่ำ 24.89 ไปสู่ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียนระดับดีมาก 81.46 ( $t = 24.28, p = .00$ ) และความก้าวหน้าทางการเรียนของนักเรียนเท่ากับร้อยละ 73.85 จัดเป็นความก้าวหน้าในระดับสูง

## ABSTRACT

TITLE : DEVELOPING GRADE 8 STUDENTS' LEARNING ACHIEVEMENT IN  
 TOPIC ORGAN SYSTEM IN OUR BODY USING GAME SCIENCE  
 INQUIRY-BASED ACTIVITY

AUTHOR : WANIDA KAMMAD

DEGREE : MASTER OF SCIENCE

MAJOR : SCIENCE EDUCATION

ADVISOR : ASST. PROF. SUPAPORN PORNTRI, Ph.D.

KEYWORDS : LEARNING ACHIEVEMENT, BODY ORGAN SYSTEM, INQUIRY-BASED  
 GAME ACTIVITY

This research aims to 1) investigate the efficiency ( $E_1/E_2$ ) and effectiveness (E.I.) of inquiry-based science games on the topic of the organ systems in our body, 2) compare pre- and post-learning achievement and 3) investigate the progression of student learning. The research methodology is comprised of developing learning activities and achievement tests and implementing them to samples consisting of one class of grade-8 students selected by a random cluster sampling. The data was collected from a pre- and post-achievement test which consisted of 42 items of 4-multiple choice tests and worksheets. This activity was 14 hours long and comprised of 5 steps: learner engaged in scientifically oriented questions, learner gave priority to evidence in responding to question, learner formulated explanations from evidence, learner connected explanations to scientific knowledge, and learner communicated and justified explanation. The results showed that the efficiencies of this activity were 79.42/81.46 and the effectiveness was 0.7385. The students were able to improve their pre-learning achievement from a low level (24.89%) to a very good level for the post-learning achievement (81.46%), ( $t= 24.28, p= .00$ ). In addition, students' learning progression was 73.85, categorized at the high gain level.

**บทคัดย่อ**

เรื่อง : การพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 เรื่องระบบอวัยวะในร่างกายของเรา ด้วยกิจกรรมสืบเสาะยูวแพทย์

ผู้วิจัย : วาทิต แสงจันทร์

ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา : วิทยาศาสตร์ศึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาพร พรไตร

คำสำคัญ : ระบบอวัยวะในร่างกายของเรา, การสืบเสาะทางวิทยาศาสตร์, ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน, กิจกรรมสืบเสาะยูวแพทย์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ตรวจสอบประสิทธิภาพ ( $E_1/E_2$ ) และดัชนีประสิทธิผลของกิจกรรมสืบเสาะยูวแพทย์ เรื่องระบบอวัยวะในร่างกายของเรา 2) เปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนและหลังเรียน และ 3) ศึกษาความก้าวหน้าทางการเรียนของนักเรียน ระเบียบวิธีวิจัยประกอบด้วย 1) แผนการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ และ 2) แบบทดสอบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน และนำไปใช้กับกลุ่มตัวอย่างนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2/17 โรงเรียนโยธินวิทยาคม อำเภอเมืองยโสธร จังหวัดยโสธร ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2562 จำนวน 30 คน ซึ่งได้มาโดยการเลือกแบบเจาะจง เก็บข้อมูลจากแบบทดสอบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนและหลังเรียน ซึ่งเป็นข้อสอบชนิดเลือกตอบ 4 ตัวเลือก จำนวน 35 ข้อ และกิจกรรมสืบเสาะยูวแพทย์นี้ใช้เวลา 12 คาบ และประกอบด้วย 5 ชั้น ชั้นที่ 1 นักเรียนจดจ่อกับคำถามที่จะนำไปสู่การสืบเสาะ ชั้นที่ 2 นักเรียนเก็บข้อมูลเพื่อสร้างเป็นหลักฐานที่เกี่ยวข้องกับคำถามโดยใช้กิจกรรมการลงมือปฏิบัติ ชั้นที่ 3 นักเรียนสร้างคำอธิบายทางวิทยาศาสตร์จากประจักษ์พยาน ชั้นที่ 4 นักเรียนเชื่อมโยงคำอธิบายไปยังองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ ชั้นที่ 5 นักเรียนสื่อสารและโต้แย้งแสดงเหตุผลสนับสนุนผลการค้นพบของตนเอง ผลการวิจัยพบว่า 1) กิจกรรมนี้มีค่าประสิทธิภาพ เท่ากับ 83.83/86.76 ค่าดัชนีประสิทธิผล เท่ากับ 0.7941 2) ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียนของนักเรียน สูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และ 3) นักเรียนมีความก้าวหน้าทางการเรียนคิดเป็นร้อยละ 79.41 ( $<g> = 0.7941$ ) จัดเป็นความก้าวหน้าในระดับสูง

## ABSTRACT

TITLE : DEVELOPING GRADE 8 STUDENTS' LEARNING ACHIEVEMENT ON THE TOPIC OF THE ORGAN SYSTEM IN OUR BODIES USING YOUNG DOCTOR INQUIRY

AUTHOR : WATHIT SAENGCHAN

DEGREE : MASTER OF SCIENCE

MAJOR : SCIENCE EDUCATION

ADVISOR : ASST. PROF. SUPAPOR PORNTRAI, Ph.D.

KEYWORDS : ORGAN SYSTEM IN OUR BODY, SCIENCE INQUIRY, ACADEMIC ACHIEVEMENT, YOUNG DOCTOR INQUIRY ACTIVITY

This research aimed to 1) investigate the efficiency ( $E_1/E_2$ ) and effectiveness (E.I.) of the young doctor Inquiry activity on the topic of the organ system in our bodies, 2) compare the pre-test and post-learning achievement, and 3) investigate students' learning progression. Research methodology comprised of learning activity plans and achievement test and the implementation to the samples consisting of 30 grade-8 students of class 2/17 from Yasothonpittayakom School, Mueang Yasothon District, Yasothon Province who were studying in the first semester of the 2019 academic year and selected by cluster random sampling. Data were collected from the pre- and post-achievement test which consisted of 35 items of 4 multiple choices test and worksheets. This activity was 12 periods long and comprised of 5 steps: step 1) student engages in scientifically oriented questions, step 2) student gives priority to evidence in responding to question using the hands-on activity, step 3) student formulates explanations from evidence, step 4) student connects explanations to scientific knowledge and step 5) student communicates and justifies explanations. The results showed that 1) the efficiency and the effectiveness of this activity were 83.83/86.76 and 0.7941, 2) the students' post-achievement was significantly higher than the students' pre-achievement, ( $p < 0.5$ ), and 3) students' learning progression was 79.41%, categorized at the high gain level.

### บทคัดย่อ

เรื่อง	: การยกระดับความสามารถในการแก้ปัญหาของนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 5 ด้วยกิจกรรมสะเต็มศึกษา เรื่องเทียนทำมือ
ผู้วิจัย	: สิริनुช ชัมภรัตน์
ชื่อปริญญา	: วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	: วิทยาศาสตร์ศึกษา
อาจารย์ที่ปรึกษา	: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ตะวัน วุฒิเสลา
คำสำคัญ	: ทักษะการแก้ปัญหา, การจัดการเรียนรู้สะเต็มศึกษา, เทียนทำมือ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) เปรียบเทียบความสามารถในการแก้ปัญหาของนักเรียนก่อนและหลังการเรียนรู้ผ่านกิจกรรมสะเต็มศึกษา เรื่องเทียนทำมือ 2) ศึกษาความพึงพอใจต่อการจัดการเรียนรู้ตามแนวทางสะเต็มศึกษา กลุ่มตัวอย่างคือนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 5 จำนวน 40 คน ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2563 โรงเรียนมูลนิธิวัดศรีอุบลรัตนาราม อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี โดยใช้วิธีคัดเลือกแบบเจาะจง แบบแผนการวิจัยของความสามารถในการแก้ปัญหาเป็นแบบกลุ่มทดลองหนึ่งกลุ่มวัดผลก่อนและหลังการทดลอง ในขณะที่แบบแผนการวิจัยของความพึงพอใจเป็นแบบกลุ่มตัวอย่างเดียววัดหลังการทดลอง เครื่องมือที่ใช้สำหรับการวิจัย ประกอบด้วย แผนการจัดการเรียนรู้ด้วยกิจกรรมสะเต็มศึกษา เรื่องเทียนทำมือ ใบงาน แบบวัดความสามารถในการแก้ปัญหาและแบบสอบถามความพึงพอใจ ผลการวิจัยพบว่า ความสามารถในการแก้ปัญหาของนักเรียนที่ได้รับการจัดการเรียนรู้ด้วยกิจกรรมสะเต็มศึกษาเรื่องเทียนทำมือ หลังเรียนคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 9.93 สูงกว่าก่อนเรียนคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 4.25 และนักเรียนมีความพึงพอใจต่อการจัดการเรียนรู้ตามแนวทางสะเต็มศึกษามีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.59



## ABSTRACT

TITLE : ENHANCING GRADE 5 STUDENTS' PROBLEM SOLVING BY  
STEM EDUCATION ACTIVITIES ENTITLED HANDMADE CANDLES

AUTHOR : SIRINUCH KHUMPARAT

DEGREE : MASTER OF DEGREE

MAJOR : SCIENCE EDUCATION

ADVISOR : ASST. PROF. KARNTARAT WUTTISELA, Ph.D.

KEYWORDS : PROBLEM SOLVING SKILL, STEM EDUCATION, HANDMADE CANDLES

This research aimed to 1) compare problem-solving abilities before and after learning by using a STEM education management system on the topic of “Handmade Candles” and 2) study student satisfaction with the STEM Education design. The participants were 40 grade 5 students selected by purposive sampling in the second semester of the 2020 academic year at the Moolanit Watsriubonrattanaram

School, in the Mueang District, Ubon Ratchathani. These experiments concerning problem-solving abilities were conducted by using a single group through a pretest-posttest approach while the research into student satisfaction was through a “one shot” case study. The research instruments consisted of a STEM education lesson plan on the topic of “Handmade Candles”, worksheets, problem-solving ability tests, and evaluation forms. The results indicated that students’ problem-solving abilities when taught by means of STEM education had a post-test mean of 9.93 which was higher than the pre-test mean of 4.25. Students’ satisfaction towards the STEM education design was at a high level mean of 4.59.

### บทคัดย่อ

เรื่อง	: วิธีการสืบเสาะเพื่อพัฒนาความเข้าใจเกี่ยวกับธรรมชาติของแสงและแสงเชิงเรขาคณิต
ผู้วิจัย	: อนุรักษ์ สงัด
ชื่อปริญญา	: วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	: วิทยาศาสตร์ศึกษา
อาจารย์ที่ปรึกษา	: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดม ทิพรราช
คำสำคัญ	: ความเข้าใจ, วิธีการสืบเสาะ, ความรู้คงทนแสง, และทัศนศาสตร์

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาความเข้าใจของนักเรียนเกี่ยวกับธรรมชาติของแสงและแสงเชิงเรขาคณิตโดยใช้วิธีการสืบเสาะ และเพื่อศึกษาความรู้คงทนของความเข้าใจที่ได้จากการจัดกิจกรรมการเรียนรู้เกี่ยวกับธรรมชาติของแสงและแสงเชิงเรขาคณิต กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นนักเรียนมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 5 โรงเรียนยโสธรพิทยาคม จังหวัดยโสธร โดยสุ่มตัวอย่างแบบ Cluster random sampling จำนวน 37 คน เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ แผนการจัดการเรียนรู้แบบสืบเสาะแบบวัดความเข้าใจเรื่องธรรมชาติของแสงและแสงเชิงเรขาคณิต มีค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ .89 วิเคราะห์ข้อมูลใช้คะแนนเฉลี่ย สถิติการทดสอบ t-test สำหรับตัวอย่างที่ไม่อิสระต่อกัน

ผลการวิจัยพบว่า คะแนนเฉลี่ยของผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนเกี่ยวกับความเข้าใจเรื่องธรรมชาติของแสงและแสงเชิงเรขาคณิตของนักเรียนหลังการจัดการเรียนรู้แบบสืบเสาะ สูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ .05 ความรู้คงทนของนักเรียนเรื่องธรรมชาติของแสงและแสงเชิงเรขาคณิต อยู่ในระดับดีมาก และคะแนนหลังการจัดการเรียนรู้แบบสืบเสาะครั้งที่ 2 เมื่อเว้นระยะการสอบสองสัปดาห์ไม่แตกต่างจากคะแนนสอบทันทีหลังเรียนจบบทเรียน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

## ABSTRACT

TITLE : INQUIRY-BASED APPROACH TO DEVELOP UNDERSTANDING ON  
NATURE OF LIGHT AND GEOMETRIC OPTICS

AUTHOR : ANURAK SANGUD

DEGREE : MASTER OF SCIENCE

MAJOR : SCIENCE EDUCATION

ADVISOR : ASST. PROF. UDOM TIPPARACH, Ph.D.

KEYWORDS : LEARNING ACHIEVEMENT, INQUIRY METHOD, RETENTION, LIGHT  
AND OPTICS

The objective of this research were to develop students' concepts about the nature of light and geometric optics using the inquiry method (5E) and to study the student's retention rate of concepts gained from the learning activities about the nature of light and geometric optics. The random cluster samples were taken from 37 students in Mathayonmsuksa 5, Yasothon Phitthayakhom School, Yasothon. The research instruments involved a study plan based on the inquiry method and a pre-test and post-test on the nature of light and geometric optics with a reliability of 0.89, analyzed by an average score and t-test for dependent samples. The results show that the average post-test score of students' learning achievement on the nature of light and geometric optics increased, when compared with that of the pre-test, with a statistical significance of a .05 level. The student's retention rate was at a very high level and the average post-test score of the students' learning achievement after the two-week was not different with a statistical significance of .05 level when compared with that of the immediate test after completing the lessons.

### บทคัดย่อ

เรื่อง	: การพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน เรื่อง ไฟฟ้าและแม่เหล็กสำหรับนักเรียน ชั้นประถมศึกษา
ผู้วิจัย	: อรวรรณ กุมารสิทธิ์
ชื่อปริญญา	: วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	: วิทยาศาสตร์ศึกษา
อาจารย์ที่ปรึกษา	: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดม ทิพรราช
คำสำคัญ	: ไฟฟ้าและแม่เหล็ก, กิจกรรมการทดลอง, ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน, การเรียนรู้ แบบสืบเสาะหาความรู้, ความคงทนในการเรียนรู้วิทยาศาสตร์

กิจกรรมการเรียนรู้ทดลองวิทยาศาสตร์ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มความเข้าใจทางการเรียนวิทยาศาสตร์ เรื่อง ไฟฟ้าและแม่เหล็ก สำหรับนักเรียนระดับประถมศึกษา งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาชุดกิจกรรมการทดลอง เรื่อง ไฟฟ้าและแม่เหล็ก เพื่อการเรียนรู้วิชาวิทยาศาสตร์สำหรับนักเรียนชั้นประถมศึกษา 2) เพิ่มผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียน และ 3) ศึกษาความรู้คงทนของนักเรียน เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย ชุดทดลอง แผนการจัดการเรียนรู้แบบสืบเสาะหาความรู้ และแบบทดสอบก่อนและหลังเรียน กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยคือ นักเรียนระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 6 ปีการศึกษา 2562 จำนวน 17 คน ซึ่งได้มาจากการเลือกแบบเจาะจง รูปแบบการวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยแบบทดลองโดยศึกษากลุ่มทดลองกลุ่มเดียว วัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนและหลังเรียน สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลคือ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน การทดสอบค่าที แบบตัวอย่างไม่อิสระต่อกัน และการทดสอบความรู้คงทน ผลการศึกษาวิจัยพบว่า 1) ชุดกิจกรรมการทดลองที่สร้างและพัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพ  $E_1/E_2$  เท่ากับ 88.77/77.94 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ 75/75 2) คะแนนเฉลี่ยของผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และ 3) ความรู้คงทนของนักเรียนที่ได้จากการจัดการเรียนรู้โดยใช้รูปแบบสืบเสาะหาความรู้ เมื่อเวลาผ่านไปหลังจากทดสอบหลังเรียน 2 สัปดาห์ อยู่ในระดับสูง

## ABSTRACT

TITLE : DEVELOPMENT OF LEARNING ACHIEVEMENTS REGARDING  
ELECTRICITY AND MAGNETISM FOR PRIMARY SCHOOL STUDENTS

AUTHOR : ORAWAN KUMARNSIT

DEGREE : MASTER OF SCIENCE

MAJOR : SCIENCE EDUCATION

ADVISOR : ASST. PROF. UDOM TIPPARACH, Ph.D.

KEYWORDS : ELECTRICITY AND MAGNETISM, EXPERIMENTAL ACTIVITIES,  
LEARNING ACHIEVEMENT, INQUIRY LEARNING CYCLE, RETENTION IN  
LEARNING SCIENCE

Science-related experimental learning activities were developed to enhance the understanding of the concepts of electricity and magnetism for primary school students. The research aims to 1) develop a set of experimental activities about electricity and magnetism as one approach to learning about science for primary school students, 2) enhance students' learning achievement using an inquiry-based method and 3) study the learning retention rate of the students. The research tools consist of an experimental activity set, inquiry-based learning management plans, and a pre- and post-test. The study involved 17 grade-6 students who were studying in the 2019 academic year and were chosen by a purposive selection. The research design was one group pre- and post-test. Statistics used in this work were percentage, mean, standard deviation, t-test for dependent samples and a learning retention test. The findings showed that 1) the  $E_1/E_2$  effectiveness of the experimental set was 88.77/77.94 which complied with the 75/75 standardized criteria, 2) the average of students' post-test achievement scores was higher than that of the pre-test at the statistical significance of .05, and 3) the retention rate after two weeks was at a high level for those students learning science by using this inquiry-based method.

**บทคัดย่อ**

เรื่อง : การพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนวิชาฟิสิกส์ เรื่อง กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน สำหรับนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 โดยการจัดการเรียนรู้แบบเชิงรุก

ผู้วิจัย : อัญชุลี วรุยาน

ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา : วิทยาศาสตร์ศึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดม ทิพรราช

คำสำคัญ : การจัดการเรียนรู้เชิงรุก, กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) เพื่อเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน (2) เพื่อศึกษาความก้าวหน้าทางการเรียน และความคงทนของความรู้ เรื่อง กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน (3) และเพื่อศึกษาเจตคติต่อการจัดการเรียนรู้แบบเชิงรุก ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ นักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 โรงเรียนเหล่าประชาอุทิศ อำเภอคำชะอี จังหวัดมุกดาหาร จำนวน 1 ห้องเรียน จำนวน 14 คน โดยวิธีการเลือกแบบเจาะจง เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ แบบวัดผลสัมฤทธิ์ และแบบวัดเจตคติ วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และสถิติทดสอบสมมติฐาน ที่แบบตัวอย่างไม่อิสระต่อกัน

ผลการวิจัยพบว่า (1) นักเรียนที่ได้รับการเรียนการสอน เรื่อง กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน มีคะแนนหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระดับ .05 (2) นักเรียนมีความก้าวหน้าทางการเรียนอยู่ในระดับ “Medium gain” และความคงทนของความรู้ เรื่องกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน เฉลี่ยอยู่ในระดับ ดี (3) นักเรียนที่ได้รับการเรียนการสอน เรื่อง กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน มีเจตคติต่อการจัดการเรียนรู้แบบเชิงรุก อยู่ในระดับดีมาก

## ABSTRACT

TITLE : DEVELOPMENT OF PHYSICS ACHIEVEMENT ON THE NEWTON'S LAWS OF MOTION BY ACTIVE LEARNING FOR GRADE-10 STUDENTS

AUTHOR : ANCHULEE WALUYAN

DEGREE : MASTER OF SCIENCE

MAJOR : SCIENCE EDUCATION

ADVISOR : ASST. PROF. UDOM TIPPARACH, Ph.D.

KEYWORDS : ACTIVE LEARNING, NEWTON'S LAWS OF MOTION

The purpose of this research was to 1) compare learning achievements, 2) study students' learning development and retention of concepts concerning Newton's laws of motion and 3) study students' attitudes towards active learning procedures for grade 10 students. The sample group used in the research involved one classroom consisting of 14 grade 10 students from Laoprasaht School, Khamcha-i District, Mukdahan Province, selected by means of a specific method. The tools used involved an achievement test, an evaluation form, and data was analyzed by using percentages, mean scores, standard deviations and T-tests for dependent samples.

The results demonstrated that (1) after learning Newton's laws of motion structured through an active learning process, the students' average achievement score was significantly higher than before, with a significance level of .05., (2) learning progress was at a "medium gain" level and knowledge retention of Newton's law of motion was at an optimal level, and (3) the students taught Newton's laws of motion in this manner had a very positive attitude towards active learning.

## บทคัดย่อ

- เรื่อง : การสังเคราะห์ ปรับปรุงคุณสมบัติ และการประยุกต์ใช้งานของเลเยอร์  
 ดับเบิลไฮดรอกไซด์ เพื่อใช้เป็นเปอร์ออกซิเดสมีมิก และตัวดูดซับสีย้อม
- ผู้วิจัย : กฤตยานันท์ พลเขตต์
- ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตร์ดุสิตบัณฑิต
- สาขาวิชา : เคมี
- อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร.สุภาพ ตาเมือง
- คำสำคัญ : เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์, กราฟีนออกไซด์, อนุภาคนาโนของแมกนีไทต์, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, เปอร์ออกซิเดสมีมิก, เซนต์เซอร์ตรวจวัดทางสี, เอบีทีเอส, ทีเอ็มบี, เมทิลออเรนจ์, บริลเลียนท์กรีน, การดูดซับ

เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (LDHs) หรือที่เรียกกันว่า สารประกอบแบบไฮโดรทัลไซต์ (HTLcs) ซึ่งเป็นวัสดุประเภทดินเหนียวที่มีประจุลบ คุณสมบัติที่โดดเด่นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์สำหรับการนำไปใช้งาน คือ มีความยืดหยุ่นในส่วนขององค์ประกอบของธาตุที่นำมาสังเคราะห์ ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนของโลหะประจุ 2+ และ 3+ รวมไปถึงความหลากหลายไอออนประจุลบที่อยู่ระหว่างชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ สามารถใช้ได้ทั้งสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ ยิ่งไปกว่านั้น LDHs ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้ง่ายในห้องปฏิบัติการ มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพที่ดี มีความเป็นพิษต่ำ มีพื้นที่ผิวปริมาณมาก มีความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี มีความเสถียรทางเคมี มีความสามารถในการดูดซับที่ดีและการแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบ งานวิทยานิพนธ์นี้สนใจที่จะสังเคราะห์ ปรับปรุงคุณสมบัติ และใช้งานวัสดุ LDHs ในการเป็นเปอร์ออกซิเดสมีมิก และการเป็นตัวดูดซับสีย้อม

สำหรับการใช้ LDHs เป็นเปอร์ออกซิเดสมีมิก ได้พัฒนาวิธีใหม่ที่มีความรวดเร็วและสะดวกในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทางสี โดยใช้ เฟอร์รัส เฟอร์ริก เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์นาโนซีท ( $\text{Fe}^{\text{II}}/\text{Fe}^{\text{III}}$  LDHNS) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา วัสดุดังกล่าวถูกสังเคราะห์ขึ้นจากการผสมระหว่าง เฟอร์รัส ( $\text{Fe}^{2+}$ ) และ เฟอร์ริก ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมในสภาวะเบส จากการทดลองพบว่า เฟอร์รัส เฟอร์ริก เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์นาโนซีท มีคุณสมบัติและสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้คล้ายกับเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสที่ได้จากธรรมชาติ ดังนั้นวัสดุดังกล่าวจึงถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของเปอร์ออกซิเดสซึบสเตรทสองชนิด ได้แก่ ทีเอ็มบี (TMB) และ เอบีทีเอส (ABTS) ในสภาวะที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะทำให้สารละลายเปลี่ยนสีไปเป็นสีฟ้าและสีเขียวตามลำดับ ซึ่งการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธีการดังกล่าวดำเนินการโดยปมให้เกิดปฏิกิริยาที่



อุณหภูมิห้อง และสำหรับสภาวะที่ใช้ เอปี้ทีเอส เป็นเปอร์ออกซิเดสซัพสเตรทสามารถตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ในสภาวะน้ำดีไอที่ค่าพีเอชประมาณ 5.6 ทำให้สามารถตรวจวัดได้ง่ายและสะดวก การพัฒนาวิธีการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทางสีโดยใช้ ทีเอ็มบี และ เอปี้ทีเอส เป็นเปอร์ออกซิเดสซัพสเตรท การตอบสนองแบบเป็นเส้นตรงในช่วง 0.1-50 ไมโครโมลาร์ และ 0.2-20 ไมโครโมลาร์ และสอดคล้องกับขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดเท่ากับ 0.05 ไมโครโมลาร์ และ 0.2 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ วิธีการที่พัฒนาขึ้นนี้มีความจำเพาะเจาะจงและความแม่นยำในการตรวจวัดสูงสามารถนำไปใช้ในการตรวจวัดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในตัวอย่างนมและน้ำยาล้างแผลได้จริงและคาดว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้จะมีศักยภาพในการตรวจหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในงานทางเทคโนโลยีชีวภาพ อุตสาหกรรมอาหาร กระบวนการวินิจฉัยโรคและอุตสาหกรรมอื่น ๆ

นอกจากนี้ยังทำการศึกษากาการใช้งาน LDHs ในการเป็นตัวดูดซับสีย้อม โดยได้ทำการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตที่ประกอบด้วย อนุภาคนาโนของแมกนีไทต์ ( $Fe_3O_4$  NPs) รีดิซกราฟีนออกไซด์ (rGO) และซิงค์อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (ZnAl-LDHs) เขียนแทนเป็น  $Fe_3O_4/rGO/ZnAl-LDHs$  โดยกราฟีนออกไซด์ (GO) ถูกใช้เป็นตัวออกซิไดซ์ ในการออกซิไดซ์เฟอร์รัสให้เกิดเป็นอนุภาคนาโนของแมกนีไทต์ที่เกาะบนพื้นผิวของกราฟีนออกไซด์ ( $Fe_3O_4/rGO$ ) ส่วนซิงค์อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ถูกสังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมระหว่างซิงค์ ( $Zn^{2+}$ ) และ อะลูมิเนียม ( $Al^{3+}$ ) ในอัตราส่วนโมลเท่ากับ 3:1 ซึ่งเกิดการเกาะติดกับแผ่น  $Fe_3O_4/rGO$  ด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและพันธะไฮโดรเจน และได้ผลิตภัณฑ์เป็น  $Fe_3O_4/rGO/ZnAl-LDHs$  ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นตัวดูดซับและมีความสมบัติเป็นแม่เหล็ก ทำให้ ตัวดูดซับดังกล่าวสามารถแยกออกจากสารละลายได้โดยง่ายด้วยการใช้แม่เหล็กดูดออก ตัวดูดซับ  $Fe_3O_4/rGO/ZnAl-LDHs$  ที่สังเคราะห์ขึ้นนี้ถูกนำไปใช้ในการดูดซับเพื่อกำจัดสีย้อมชนิดประจุลบ คือ เมทิลออร์เรนจ์ (MO) และสีย้อมชนิดประจุบวก คือ บิลิเลียนท์กรีน (BG) ในสารละลาย จากผลการทดลองพบว่า การดูดซับสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดใช้เวลาที่เหมาะสมที่เวลา 60 นาที และดำเนินการดูดซับที่พีเอชระหว่าง 4-10 และสำหรับการดูดซับสีย้อมบิลิเลียนท์กรีนใช้เวลาในการดูดซับ 360 นาที ที่พีเอชระหว่าง 6-7 จลนพลศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับของสีย้อมทั้งสองชนิด สอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo-second-order) และ แบบจำลองแลงเมียร์ (Langmuir model) ตามลำดับ ตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ และ บิลิเลียนท์กรีนได้สูงสุดเท่ากับ 1,111 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเท่ากับ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการวิเคราะห์ตัวดูดซับหลังจากการดูดซับสีย้อมด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นของโลหะไฮดรอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นหลักฐานที่แสดงให้เห็นว่า มีโมเลกุลของสีย้อมทั้งสองชนิดบางส่วนเกิดการแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นของโลหะไฮดรอกไซด์ของวัสดุซิงค์อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และเกิดการดูดซับแบบเคมี

(chemisorption) เกิดขึ้น งานวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอวิธีการสังเคราะห์วัสดุดูดซับด้วยวิธีที่ง่าย จึงสามารถนำไปปรับเปลี่ยนชนิดของโลหะที่ในการสังเคราะห์ได้อย่างหลากหลาย เพื่อให้ได้วัสดุชนิดใหม่ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง

## ABSTRACT

TITLE : SYNTHESIS, MODIFICATION AND APPLICATIONS OF LAYERED  
DOUBLE HYDROXIDES AS PEROXIDASE MIMIC AND DYE ADSORBENT

AUTHOR : KITAYANAN PONLAKHET

DEGREE : DOCTOR OF PHILOSOPHY OF SCIENCE

MAJOR : CHEMISTRY

ADVISOR : SUPARB TAMUANG, Ph.D.

KEYWORDS : LAYERED DOUBLE HYDROXIDE, GRAPHENE OXIDE, MAGNETITE  
NANOPARTICLES, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, PEROXIDASE MIMICS, COLORIMETRIC  
SENSORS, ABTS, TMB, METHYL ORANGE, BRILLIANT GREEN,  
ADSORPTION

Layered double hydroxides (LDHs), also known as hydrotalcite-like compounds (HTLcs), are anionic clay materials. LDHs have attracted enormous interest as they are readily synthesized in laboratories and at low cost. They also contain a good biocompatibility, non-toxicity, large surface area, high catalytic activity, chemical stability, good adsorption ability and anion exchange. This work is focused on the application of LDHs as peroxidase enzyme mimic and dye adsorbent.

For the application of LDHs as peroxidase enzyme mimics, a new, rapid, sensitive and convenient approach for colorimetric detection of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> using Fe<sup>II</sup>Fe<sup>III</sup> layered double hydroxide nanosheets (Fe<sup>II</sup>Fe<sup>III</sup> LDHNS) was reported. The Fe<sup>II</sup>Fe<sup>III</sup> LDHNS were constructed from a mixture of divalent and trivalent Fe ions using a co-precipitation method. Fe<sup>II</sup>Fe<sup>III</sup> LDHNS were found to possess a superior intrinsic peroxidase-like activity. They were used for catalyzing the oxidation of a peroxidase substrate 3,3',5,5'-tetramethylbenzidine (TMB) and 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzo-thiazoline-6-sulfonic acid)-diammonium salt (ABTS) in the presence of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> to produce a blue and green solution product, respectively, which provided a colorimetric detection of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. The colorimetric detection of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> experiments was carried out by incubating at room temperature at the convenient operation. Moreover, for the ABTS substrate, the experiment was successfully carried out in deionized water at pH around 5.6 which can

be easy to manipulate. The colorimetric assays displayed linearity for  $\text{H}_2\text{O}_2$  determination by using TMB and ABTS systems in the range of 0.1-50  $\mu\text{M}$  and 0.5-20  $\mu\text{M}$ , and the corresponding limits of detection were found to be 0.05  $\mu\text{M}$  and 0.2  $\mu\text{M}$ , respectively. This selective approach could be applied for  $\text{H}_2\text{O}_2$  detection in real milk and disinfectant samples. The proposed method is expected to have more potential for a precise detection of  $\text{H}_2\text{O}_2$  in biotechnology, food industry, clinical diagnosis life process and other industries.

In addition, LDHs was also used as a dye adsorbent. Composite materials consisting of magnetite nanoparticles ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$  NPs), reduced graphene oxide (rGO), and ZnAl layered double hydroxides (ZnAl-LDHs) denoted as  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{rGO}/\text{ZnAl-LDHs}$  have been successfully prepared. GO was used as an oxidizing agent to oxidize  $\text{Fe}^{2+}$  into  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Then,  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{rGO}$  was formed *via* the spontaneous *in-situ* deposition of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles onto the self-reduced GO surface. ZnAl-LDHs were formed by a co-precipitation method with molar ratio of  $\text{Zn}^{2+}:\text{Al}^{3+} = 3:1$  and attached with  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{rGO}$  sheets *via* electrostatic attraction and hydrogen bonding resulting in  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{rGO}/\text{ZnAl-LDHs}$  as a magnetic adsorbent. This magnetic adsorbent can be easily separated from aqueous solutions by using an external magnet.  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{rGO}/\text{ZnAl-LDHs}$  were applied as an adsorbent to remove anionic methyl orange (MO) and cationic brilliant green (BG) from the aqueous solution. The results showed that MO removal reached equilibrium at 60 minutes and the effective pH range was found to be 4.0-10.0. The removal of BG was obtained within 360 minutes at an effective pH range of 6-7. The adsorption kinetics and isotherm of both organic dyes followed the pseudo-second-order and Langmuir model, respectively. The maximum adsorption capacities were 1111 and 2000  $\text{mg g}^{-1}$  ( $C_0 = 500 \text{ mg L}^{-1}$ ) for MO and BG, respectively. The XRD pattern of materials after adsorption revealed expanse of the interlayer distance. It indicated the entering of some MO and BG molecules intercalated into the interlayer of ZnAl LDHs by chemisorption. This thesis suggests a simple synthesis strategy which can be applied for other types of LDHs. Consequently, a variety of applications can be targeted.

## บทคัดย่อ

เรื่อง : การศึกษาเชิงทฤษฎีและเชิงกลไกสำหรับปฏิกิริยาการกำจัดแก๊สพิษบนตัวเร่งปฏิกิริยาในระดับนาโน

ผู้วิจัย : ธนบดี มัชฌิม

ชื่อปริญญา : ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา : เคมี

อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร จิงสุทธีวงษ์

คำสำคัญ : ทฤษฎีเด่นซิตต์ฟังก์ชันแนล, ซีโอไลต์-12 ที่เจือด้วยโลหะทรานซิชัน, โบรอนไนไตรด์ นาโนซีทที่เจือด้วยคาร์บอนอะตอม, การกำจัดแก๊สพิษ

ในปัจจุบันการปลดปล่อยแก๊สพิษจากกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ทั้งในเครื่องยนต์และในโรงงานอุตสาหกรรม จัดว่าเป็นปัญหาหลักของมลพิษทางสิ่งแวดล้อม ที่ต้องได้รับการแก้ไขโดยเร่งด่วน ซึ่งในงานวิจัยนี้ การคำนวณด้วยระเบียบวิธีทฤษฎีเด่นซิตต์ฟังก์ชันแนล จะถูกนำมาใช้ในการศึกษาหาตัวเร่งปฏิกิริยาในระดับนาโนสำหรับปฏิกิริยาการกำจัดแก๊สพิษดังกล่าว ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ดังนี้ 1) การกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดซีโอไลต์-12 ที่เจือด้วยโลหะทรานซิชัน (TM-ZSM-12) 2) การกำจัดแก๊สไนตริกออกไซด์ ( $NO$ ) และ 3) การกำจัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโบรอนไนไตรด์นาโนซีทที่เจือด้วยคาร์บอนอะตอม ( $C_xBNs$ )

แก๊ส  $H_2S$  คือแก๊สพิษที่มีความสามารถในการกัดกร่อนและมีความเป็นพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยาหลากหลายชนิด แต่ในขณะเดียวกันแก๊ส  $H_2S$  ก็ยังเป็นแหล่งผลิตแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ทางพลังงานที่มีค่าและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในงานวิจัยแรก เราจึงสนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแก๊สพิษ เช่น  $H_2S$  และ  $CO$  ไปเป็นแก๊สคาร์บอนิลซัลไฟด์ ( $COS$ ) และแก๊ส  $H_2$  ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ตามสมการ  $H_2S(g) + CO(g) \rightarrow COS(g) + H_2(g)$  จากผลการศึกษาพบว่า ซีโอไลต์-12 ที่เจือด้วยโลหะทองแดง (Cu-ZSM-12) คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อเทียบกับซีโอไลต์-12 ที่เจือด้วยโลหะชนิดอื่น ๆ สำหรับกำจัดแก๊ส  $H_2S$  โดยมีขึ้นกำหนดอัตราคือขั้นตอนของการปลดปล่อยแก๊ส  $COS$  โดยใช้ค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) เท่ากับ  $+1.18$  eV สำหรับแก๊ส  $NO$  และ  $CO$  มันคือแก๊สพิษที่พบเจอได้ง่ายในชีวิตประจำวัน โดยมีแหล่งกำเนิดมาจากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งสามารถก่อให้เกิดมลพิษและความเสียหายต่อทั้งชั้นบรรยากาศสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตได้ ในงานวิจัยที่สอง คือการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างคาร์บอนที่เจือบนตำแหน่งโบรอน ( $C_{1B}BNs$ ) และคาร์บอนที่เจือบนตำแหน่งไนโตรเจน ( $C_{1N}BNs$ ) ของโบรอน

ไนโตรดีนาโนซีท สำหรับการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อกำจัดแก๊ส NO จากการศึกษาพบว่า  $C_{1N}BNs$  คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการกำจัดแก๊ส NO ผ่านกลไก  $trans-(NO)_2$  ได้ดีที่สุด อีกทั้งยังต้องการค่าพลังงานการกระตุ้นที่ต่ำที่สุด เท่ากับ  $+0.62$  eV ซึ่งมันสามารถเปลี่ยนแก๊ส NO ที่มีความเป็นพิษ ไปเป็นแก๊สที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และในงานวิจัยที่สาม เป็นการศึกษาการกำจัดแก๊ส CO โดยเปลี่ยนให้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) บนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโบรอนไนโตรดีนาโนซีทที่เจือด้วยคาร์บอนอะตอม (ตั้งแต่ 1 จนถึง 3 อะตอม) จากการศึกษาพบว่า โบรอนไนโตรดีนาโนซีทที่เจือด้วยคาร์บอน 3 อะตอม บนตำแหน่งช่องว่างโบรอน ( $C_{3B}BNs$ ) คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการเปลี่ยนแก๊ส CO ไปเป็นแก๊ส  $CO_2$  โดยใช้ค่าพลังงานกระตุ้นที่ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ๆ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $+0.28$  eV อีกทั้งจากการศึกษาทางจุลศาสตร์พบว่า  $C_{3B}BNs$  ก็ยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถเกิดปฏิกิริยาสำหรับการเปลี่ยนแก๊ส CO ไปเป็นแก๊ส  $CO_2$  ได้เร็วที่สุด

และจาก 3 ผลงานวิจัยทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นนี้ ข้าพเจ้าคาดหวังว่าข้อมูลที่ได้นี้ อาจจะเป็นตัวช่วยที่ใช้ในการทดลองจริง สำหรับการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาในระดับนาโนที่มีประสิทธิภาพสูง ต่อการกำจัดแก๊สพิษในอนาคต

## ABSTRACT

TITLE : THEORETICAL AND MECHANISTIC STUDIES OF TOXIC GAS  
REMOVALS OVER THE NANOMATERIAL CATALYSTS

AUTHOR : TANABAT MUDCHIMO

DEGREE : DOCTOR OF PHILOSOPHY

MAJOR : CHEMISTRY

ADVISOR : PROF. SIRIPORN JUNGSUTTIWONG, Ph.D.

KEYWORD : DFT, TM-ZSM-12, CBNs, TOXIC GAS REMOVAL

Among the major environmental issues most urgently requiring attention today are the emissions of toxic gases from the combustion of fuel from vehicles and other industrial processes. For this research, density functional theory (DFT) calculations were used to investigate catalytic nanomaterials for the removal of toxic gases. This research consisted of three approaches: (i) Removal of H<sub>2</sub>S to produce hydrogen in the presence of CO on a transition metal-doped ZSM-12 catalyst (TM-ZSM-12) catalysts, (ii) the NO removal and (iii) the CO removal by carbon-doped boron nitride (C<sub>x</sub>BNs) catalysts.

Hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) leads to the corrosion and corruption of many catalysts. However, H<sub>2</sub>S is an inexhaustible potential source of the valuable chemical reagent hydrogen, which is also a very environmentally friendly energy product. In this first approach, we intensively focused on removal of H<sub>2</sub>S and producing hydrogen gas (H<sub>2</sub>) using catalysts, following equation:  $\text{H}_2\text{S (g)} + \text{CO (g)} \rightarrow \text{COS (g)} + \text{H}_2 \text{ (g)}$ . Result calculations show that among other TM-ZSM-12 clusters, the Cu-ZSM-12 cluster has a potential application as a highly active catalyst for H<sub>2</sub>S removal together with hydrogen production. We found that COS desorption is the rate-determining step of this H<sub>2</sub>S removal process with a desorption energy of +1.18 eV. Moreover, incomplete combustion products such as nitrogen oxide (NO) and carbon monoxide (CO) are gases toxic to the environment and human health, due to their many devastating effects on the atmosphere and human health. In the second study, an NO reduction mechanism using carbon-doped boron nitride nanosheets (C<sub>x</sub>BNs) as a metal-free catalyst was applied. The results showed that the *trans*-(NO)<sub>2</sub> structure of C<sub>N</sub>BNs is a potentially

crucial intermediate and thermodynamically and kinetically favorable. The most energetically favorable pathway was +0.62 eV determined by calculating determined rates. Results suggest that  $C_N$ BNs can be highly active metal-free materials for NO removal, which will transform NO into environmentally friendly gases. Additionally, in the third study, conversion of CO to carbon dioxide ( $CO_2$ ) using carbon-doped boron nitride nanosheets ( $C_X$ BNs where  $X = 1-3$ ) as a metal-free catalyst were studied. The  $C_{3B}$ BNs shows the highest efficiency for CO oxidation reaction with the lowest energy barrier at the determining a rate step of +0.28 eV. Additionally, the kinetic predictions on the reaction rate constant suggest that  $C_{3B}$ BNs is the most effective for catalyzing CO into  $CO_2$  molecules with the fastest rate compared to other  $C_X$ BNs surfaces.

Our intended outcome is that these results might enable to the aid future experiments to improve methods for creating the novel promising catalytic nanomaterials for toxic gas removal with desirable high efficiency in the near future.



## บทคัดย่อ

เรื่อง : การพัฒนาวัสดุคาร์บอนนาโนโคนสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านพลังงานไฮโดรเจนที่มีประสิทธิภาพสูงโดยอาศัยข้อมูลจากการศึกษาทางทฤษฎี

ผู้วิจัย : นัฐพล ยอดศิลป์

ชื่อปริญญา : ปรัชญาดุษฐ์บัณฑิต

สาขาวิชา : เคมี

อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร จิงสุทธิวงษ์

คำสำคัญ : พลังงานไฮโดรเจน, การกักเก็บไฮโดรเจน, คาร์บอนนาโนโคน, แพลตินัม, แพลลาเดียม, ทฤษฎีฟังก์ชันความหนาแน่น

ในงานวิจัยนี้รายงานการออกแบบและศึกษาวัสดุชนิดใหม่เพื่อพัฒนาด้านการกักเก็บพลังงานไฮโดรเจน โดยวัสดุชนิดคาร์บอนนาโนโคนทำหน้าที่เป็นตัวสนับสนุนโลหะแพลตินัมในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุสำหรับการดูดซับและการแพร่ของไฮโดรเจนด้วยระเบียบวิธีทฤษฎีฟังก์ชันความหนาแน่น จากการศึกษาพบว่าความโค้งที่อยู่บนปลายโคนส่งผลต่อความเสถียรของแพลตินัมและปฏิกิริยา กลไกการ spillover ของไฮโดรเจนอะตอมบนแพลตินัมที่ตกแต่งอยู่บนช่องว่างคาร์บอนนาโนโคน (Pt/dCNC) สามารถเกิดผ่านสองขั้นตอนคือ (i) การย้ายตำแหน่งของไฮโดรเจนจากอะตอมแพลตินัมไปยังอะตอมคาร์บอน (ii) การแพร่ของไฮโดรเจนอะตอมผ่านวิถี C-C ของพื้นผิวคาร์บอนนาโนโคน จากการศึกษาพบว่าการมีอะตอมไฮโดรเจนบนแพลตินัมสามารถเหนี่ยวนำกระบวนการแพร่ของไฮโดรเจนอะตอมผ่านวิถี C-C ของพื้นผิวคาร์บอนนาโนโคนได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งพันธะ Pt-H ส่งผลให้เกิดการย้ายตำแหน่งของไฮโดรเจนจากอะตอมแพลตินัมไปยังอะตอมคาร์บอนข้างเคียงโดยใช้พลังงานน้อยกว่า 0.5 eV ภายใต้สภาวะมาตรฐาน นอกจากนี้ในปัจจุบันผลของนิวเคลียร์ควอนตัมของนิวเคลียสขนาดเบาเช่น โปรตอน และ ดิวเทอรอน ได้รับความสนใจในปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายของไฮโดรเจนและการดูดซับไฮโดรเจน ดังนั้นเราจึงศึกษาการกลไกการ spillover ของไฮโดรเจนอะตอมบน Pt/dCNC ด้วยวิธี multicomponent B3LYP (MC\_B3LYP) ซึ่งเป็นการเพิ่มผลของนิวเคลียร์ควอนตัมของนิวเคลียสขนาดเบาเข้าไปศึกษาด้วย จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มผลของนิวเคลียร์ควอนตัมเข้าไปแล้วพลังงานก่อกัมมันต์ในขั้นตอนการแตกตัวโมเลกุลไฮโดรเจนหายไป ซึ่งแสดงว่าการแตกตัวโมเลกุลไฮโดรเจนสามารถเกิดขึ้นได้เองบน Pt/dCNC นอกจากนี้ยังพบว่าโลหะที่ตกแต่งบนคาร์บอนนาโนโคนมีผลทางเทอร์โมไดนามิกส์ต่อกระบวนการแตกตัวโมเลกุลไฮโดรเจนซึ่งจากการศึกษาพบว่าการเกิดปฏิกิริยาบน Pt/dCNC เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนในขณะที่บน Pd/dCNC เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน อีกทั้งยังพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแพลตินัมที่ตกแต่งบนช่องว่างกรา

พิน (Pt/dG) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้เองในทางเทอร์โมไดนามิกส์อธิบายด้วยผลของความโค้งของพื้นผิวของตัวเร่ง จากผลการศึกษาทางทฤษฎีสามารถพัฒนาความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการ spillover ของไฮโดรเจนอะตอมและการเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญในการพัฒนาวัสดุที่กักเก็บไฮโดรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ปัจจุบันนี้การกักเก็บไฮโดรเจนแบบผันกลับได้ที่ใช้ได้จริงจำเป็นต้องได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ในวิทยานิพนธ์นี้เราจึงปรับปรุงคาร์บอนนาโนเป็นตัวสนับสนุนตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการกักเก็บไฮโดรเจนโดยการใช้กรดฟอร์มิก (Formic acid; FA) เป็นวัสดุในการกักเก็บ ซึ่งจะมี 2 ปฏิกิริยาหลักคือ CO<sub>2</sub> hydrogenation และ FA dehydrogenation สำหรับปฏิกิริยา CO<sub>2</sub> hydrogenation เราได้ทำการศึกษาบทบาทของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/dCNC จากการศึกษาพบว่ากลไก H<sub>2</sub> dissociation ตามด้วย H spillover เป็นกลไกที่สามารถเกิดขึ้นได้ในทางเทอร์โมไดนามิกส์ นอกจากนี้เราพบว่าอัตราการผลิตกรดฟอร์มิกขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไฮโดรเจน และจากผลการศึกษาทางทฤษฎีพบว่ากลไกการ spillover ของไฮโดรเจนมีบทบาทสำคัญสำหรับปฏิกิริยา CO<sub>2</sub> hydrogenation ผ่านสารมัธยันต์ฟอร์มเมต สำหรับปฏิกิริยา FA dehydrogenation พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแพลลาเดียมได้รับความสนใจเป็นอย่างมากสำหรับปฏิกิริยาการสลายตัวของกรดฟอร์มิก ในงานนี้เราจึงสนใจแพลลาเดียมอะตอมที่ตกแต่งบนช่องว่างของคาร์บอนนาโนที่มีความโค้งสูง (Pd/dCNC) มาใช้เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยา FA dehydrogenation ซึ่งได้ทำการศึกษาทั้ง *trans*-FA และ *cis*-FA จากการศึกษาพบว่า Pd/dCNC สามารถดูดซับกรดฟอร์มิกได้อย่างแข็งแรงโดยมีค่าพลังงานการดูดซับที่สูงเปรียบเทียบกับแพลลาเดียมที่ตกแต่งบนช่องว่างกราฟีน (Pd/dG) นอกจากนี้ยังพบว่ากลไกการเกิดปฏิกิริยา FA dehydrogenation เกิดผ่านสารมัธยันต์ฟอร์มเมตและมีพลังงานในขั้นกำหนดอัตราเท่ากับ 0.50 eV (*trans*-FA) และ 0.54 eV (*cis*-FA) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าหนึ่งในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ว่องไวมากที่สุดคือ Pd (111) จากการศึกษาพบว่าอัตราการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของกรดฟอร์มิก อีกทั้งยังพบว่าคาร์บอนอะตอมที่อยู่ข้างเคียงมีบทบาทสำคัญสำหรับการเกิดปฏิกิริยา FA dehydrogenation ที่ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาข้างเคียงซึ่งเป็นการผลิตคาร์บอนมอนอกไซด์และน้ำผ่านสารมัธยันต์ทั้งฟอร์มิลและคาร์บอกซิล พบว่าปฏิกิริยาข้างเคียงไม่สามารถเกิดขึ้นได้บนตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/dCNC เนื่องจากมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ที่สูง ดังนั้น Pd/dCNC จึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความจำเพาะต่อปฏิกิริยา FA dehydrogenation ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และหวังว่าการศึกษาทางทฤษฎีในงานวิจัยนี้จะช่วยแนะแนวทางในการออกแบบวัสดุใหม่ ๆ สำหรับการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการกักเก็บไฮโดรเจนในอนาคตได้

## ABSTRACT

TITLE : THE DEVELOPMENT OF CARBON NANOCONE MATERIAL FOR  
HIGHLY EFFICIENT HYDROGEN ENERGY APPLICATION USING  
THEORETICAL STUDY

AUTHOR : NUTTAPON YODSIN

DEGREE : DOCTOR OF PHILOSOPHY

MAJOR : CHEMISTRY

ADVISOR : PROF. SIRIPORN JUNGSUTTIWONG, Ph.D.

KEYWORDS : HYDROGEN ENERGY, HYDROGEN STORAGE, CARBON NANOCONES,  
PLATINUM, PALLADIUM, DENSITY FUNCTIONAL THEORY

In this thesis, I address the design and theory of novel carbon nanocones (CNCs) to develop hydrogen storage applications. The platinum-embellished carbon nanocones (Pt-CNCs) were applied to investigate hydrogen adsorption and diffusion by means of density functional theory (DFT). Results of the study indicate that the curvature structure of conical sections of CNC materials affects Pt binding stability and reactions. The spillover mechanism of dissociated hydrogen atoms in defective Pt-v4CNC is explored via two reaction steps: (i) H-migration from Pt to carbon atoms and (ii) H-diffusion via the C–C route throughout the CNC surface. The results show that the presence of the hydrogen atom on the Pt catalyst can efficiently induce an H-diffusion process through the C–C surface, and the Pt–H bond significantly facilitates the H-migration from C–H bonds near the active Pt catalyst to the adjacent carbon atom with an energy barrier <0.5 eV under ambient conditions. Moreover, the nuclear quantum effects (NQE) of a light nucleus, such as a proton and deuteron, has recently been recognized in hydrogen transfer and adsorption reactions. I then investigated H-spillover mechanisms on Pt/dCNC using the multicomponent B3LYP (MC\_B3LYP) method, which can take account of the NQE of light nuclei. Interestingly, MC\_B3LYP calculations reveal that the activation energy for H<sub>2</sub> dissociation completely vanishes, indicating that H<sub>2</sub> molecules dissociate readily on Pt/dCNC. The central finding was that the different metals (Pt and Pd) on dCNC surfaces affect thermodynamics favorable to the hydrogen

dissociation process: Pt/dCNC is facile and highly exothermic, while on Pd/dCNC is dramatically endothermic. Furthermore, Pt embellished on graphene (Pt/dG) catalysts was examined to explain how the curvature effect is more thermodynamically favorable than a metal-graphene surface. The results improved our theoretical understanding of the hydrogen spillover mechanism and catalytic reactions which are very important for the development of highly efficient hydrogen storage materials.

Currently, practical and reversible H<sub>2</sub> storage needs to be addressed. I then modified CNCs as catalytic support for recent advances in heterogeneously catalyzed hydrogen storage using formic acid (FA). There are two main reactions, namely, CO<sub>2</sub> hydrogenation and FA dehydrogenation. For CO<sub>2</sub> hydrogenation, I investigated the catalytic role of Pt/dCNC in the hydrogenation of CO<sub>2</sub> to FA. I proposed our new mechanism of CO<sub>2</sub> hydrogenation over Pt/dCNC catalysts involving H<sub>2</sub> dissociation and energetically favorable H spillover sequences. Furthermore, our findings show that the rate of FA production is dependent on H<sub>2</sub> concentrations. Altogether, the results support the theoretical concepts concerning the spillover mechanism as playing a key role in promoting CO<sub>2</sub> hydrogenation via a formate intermediate. For the FA dehydrogenation, I found that palladium (Pd)-based catalysts have received considerable attention for FA decomposition reactions. The candidate catalyst is a single Pd atom embedded in a high curvature defective carbon nanocone (Pd/dCNC). I used Pd/dCNC as the catalyst for either *trans*-FA or *cis*-FA decomposition. FA is stably adsorbed on Pd/dCNC with very high adsorption energy compared to the Pd/dG surface. For the reaction mechanisms, the preferable FA dehydrogenation mechanisms proceed via the formate pathway, with a rate-determining step of only 0.50 eV (*trans*-FA) and 0.54 eV (*cis*-FA), which is less than one of the most active catalysts, i.e., Pd (111). The findings show that the rate of hydrogen (H<sub>2</sub>) production is dependent on FA concentration. The active neighboring C atom plays a significant role for easy FA dehydrogenation into H<sub>2</sub>. The side reaction producing carbon monoxide (CO) and H<sub>2</sub>O via the formyl or carboxyl pathway cannot occur on Pd/dCNC due to a high energy-barrier. Thus, our proposed catalysts effectively provide excellent selectivity for FA dehydrogenation into H<sub>2</sub>. I hope this work provides theoretical guidance for the future research of hydrogen storage applications.

## บทคัดย่อ

- เรื่อง : การพัฒนาเซนเซอร์และไบโอเซนเซอร์โดยใช้วัสดุผสมคาร์บอนขนาดนาโน สำหรับประยุกต์ใช้ทางด้านอาหาร สิ่งแวดล้อม และคลินิก
- ผู้วิจัย : ปรียานุช บุตรมี
- ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตร์ดุขฎฐิบัณทิต
- สาขาวิชา : เคมี
- อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.อัญชลี สำเภา
- คำสำคัญ : เซนเซอร์, ไบโอเซนเซอร์, วัสดุขนาดนาโน, เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า, เทคนิคพื้นผิวขยายสัญญาณรามาน

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาเซนเซอร์สองชนิดและไบโอเซนเซอร์สองชนิด สำหรับประยุกต์ใช้ทางด้านอาหาร สิ่งแวดล้อม และคลินิก โดยอาศัยคุณสมบัติของวัสดุผสมคาร์บอนขนาดนาโน ตรวจสอบด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าและเทคนิคพื้นผิวขยายสัญญาณรามาน

ในงานส่วนแรก เซนเซอร์ตรวจสอบด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นสำหรับประยุกต์ใช้ทางด้านอาหาร โดยปรับปรุงขั้วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอนเคลือบด้วยกราฟีนนาโนเพลตเลตที่ถูกทำฟังก์ชันกับของเหลวไอออนิก ประยุกต์ใช้สำหรับตรวจสอบสารบิสฟีนอลเอ ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลโวลแทมเมทรี ผลการศึกษาพบว่า เซนเซอร์ให้ช่วงความเป็นเส้นตรงในการตรวจสอบสารบิสฟีนอลเอที่ 0.02-5.0 ไมโครโมลาร์ ขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจสอบเท่ากับ 6.4 นาโนโมลาร์ ประยุกต์ใช้ตรวจสอบปริมาณสารบิสฟีนอลเอในตัวอย่างน้ำดื่มและขวดน้ำพลาสติกที่ใช้บรรจุดื่ม ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องสูงและให้ผลสอดคล้องกับเทคนิคมาตรฐานโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง

ในส่วนที่สอง ไบโอเซนเซอร์ตรวจสอบด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าถูกพัฒนาขึ้นสำหรับประยุกต์ใช้ทางด้านคลินิก โดยใช้แอนติบอดีเป็นชั้นจذبสำหรับตรวจสอบ ซึ่งถูกตรึงเข้ากับอนุภาคคอร์เชลล์  $Fe_3O_4@Au$  ขนาดนาโน บนผิวหน้าขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยแมงกานีสไดออกไซด์ เกาะติดแผ่นกราฟีนนาโนเพลตเลต ประยุกต์ใช้สำหรับตรวจสอบสารบ่งชี้มะเร็ง ด้วยเทคนิคลิเนียร์สวิตช์โวลแทมเมทรี และเทคนิคอิเล็กโทรเคมีคัล อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ในสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต เข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ โดยสัญญาณการตรวจสอบที่เปลี่ยนแปลงไปในสถานะที่มีและไม่มีสารบ่งชี้มะเร็งจะสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของสารบ่งชี้มะเร็ง ผลการศึกษาพบว่า ไบโอเซนเซอร์ให้ช่วงความเป็นเส้นตรงที่ 0.001-100 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร ขีดจำกัดในการตรวจสอบเท่ากับ 0.1 และ 0.3 พิโคกรัมต่อมิลลิลิตร สำหรับเทคนิคลิเนียร์สวิตช์โวลแทมเมทรี และเทคนิคอิเล็กโทรเคมีคัล อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ตามลำดับ ประยุกต์ใช้สำหรับตรวจสอบปริมาณ

สารบ่งชี้มะเร็งในเซรัมมนุษย์ พบว่าผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับเทคนิคการวัดการเรืองแสงโดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าและแอนติบอดี

ส่วนที่สามเกี่ยวข้องข้องกับการพัฒนาไบโอเซนเซอร์ตรวจวัดด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า สำหรับประยุกต์ใช้ทางด้านสิ่งแวดล้อม โดยใช้ขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และอนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโน ประยุกต์ใช้สำหรับตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืชชนิดไกลโฟเสต โดยอาศัยหลักการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์อะเซติลฟอสฟาเทส ด้วยเทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรี เมื่อมีสารไกลโฟเสต สัญญาณการวิเคราะห์ที่ลดลงเนื่องจากไกลโฟเสตยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ดังนั้นสัญญาณที่ลดลงจึงสอดคล้องกับความเข้มข้นของสารไกลโฟเสต จากการศึกษาพบว่าไบโอเซนเซอร์ให้ช่วงความเป็นเส้นตรงสองช่วง ได้แก่ 0.05-0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.5-22.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 16 ไมโครกรัมต่อลิตร ประยุกต์ใช้สำหรับตรวจหาปริมาณของไกลโฟเสตในตัวอย่างน้ำและดิน พบว่าผลการวิเคราะห์ให้ความถูกต้องสูงและสอดคล้องกับเทคนิคมาตรฐานโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง

ในส่วนสุดท้าย วิธีวิเคราะห์สารไกลโฟเสตยังถูกออกแบบโดยใช้เทคนิคพื้นผิวขยายสัญญาณรามาน สำหรับประยุกต์ใช้ทางด้านสิ่งแวดล้อม โดยใช้ไททาเนียมออกไซด์นาโนทิวป์ที่เกาะติดด้วยอนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโนและเคลือบด้วยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ สร้างเป็นเซนเซอร์ตรวจวัด จากการศึกษาพบว่าเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นมีความไวในการตรวจวัดสัญญาณรามานที่สูง โดยให้ประสิทธิภาพในการขยายสัญญาณมากถึง  $7.1 \times 10^8$  สามารถประยุกต์ใช้เซนเซอร์สำหรับตรวจวัดสารไกลโฟเสตได้ในช่วง 0.1-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการตรวจวิเคราะห์สารไกลโฟเสตในตัวอย่างน้ำและดินจากธรรมชาติที่ได้จากเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้น สอดคล้องกับเทคนิคมาตรฐานโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง

การพัฒนางานวิจัยทางด้านเซนเซอร์และไบโอเซนเซอร์นี้ประสบผลสำเร็จ เซนเซอร์และไบโอเซนเซอร์ที่พัฒนาสามารถตรวจวัดสารได้จริง มีราคาถูก ตรวจวัดสารได้ง่ายขึ้น การตรวจวิเคราะห์ได้รวดเร็ว นอกจากนี้องค์ความรู้ที่เกิดขึ้นสามารถนำไปต่อยอดไม่เพียงแต่ในด้านการวิจัย ยังรวมไปถึงการต่อยอดในเชิงพาณิชย์ในอนาคตข้างหน้าได้

## ABSTRACT

TITLE : DEVELOPMENT OF CARBON COMPOSITE NANOMATERIALS-BASED SENSORS AND BIOSENSORS FOR FOOD, ENVIRONMENTAL, AND CLINICAL APPLICATIONS

AUTHOR : PREEYANUT BUTEE

DEGREE : DOCTOR OF SCIENCE

MAJOR : CHEMISTRY

ADVISOR : ASSOC. PROF. ANCHALEE SAMPHAO, Ph.D.

KEYWORDS : SENSOR, BIOSENSOR, NANOMATERIALS, ELECTROCHEMICAL METHOD, SURFACE ENHANCED RAMAN SPECTROSCOPY

For this thesis, two sensors and two biosensors were designed based on carbon composite nanomaterials using electrochemical methods and surface enhanced Raman spectroscopy as detection methods for food, environmental, and clinical applications.

In the first section, an electrochemical sensor for food applications was fabricated based on a glassy carbon paste electrode (GCPE) modified with graphene nanoplatelets (GNP) functionalized with ionic liquid (IL). The sensor was applied for the detection of bisphenol A (BPA) and performed by differential pulse voltammetry (DPV). Under optimum conditions, the proposed sensor exhibited a linear range for BPA determination from 0.02-5.0  $\mu\text{M}$  with a detection limit (LOD) of 6.4 nM. The GCPE/GNP-IL sensor was successfully applied to the determination of BPA in drinking water and plastic drinking water bottles. The results demonstrated a high degree of accuracy and are in agreement with high-performance liquid chromatography (HPLC).

In the second section, an electrochemical biosensor for clinical applications was designed based on CEA antibody (anti-CEA) anchored with core shell  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Au}$  nanoparticles which were immobilized on a screen-printed carbon electrode (SPCE) modified with manganese dioxide laid out on graphene nanoplatelets (GNP-MnO<sub>2</sub>). A biosensor was applied for label-free detection of carcinoembryonic antigens (CEA), which was monitored by linear sweep voltammetry (LSV) and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The difference in signal response owing to redox

reactions of Fe (CN)<sub>6</sub><sup>3-/4-</sup> before and after a direct binding of CEA to a fixed amount of anti-CEA on the electrode surface was regarded as the biosensor response corresponding directly to the CEA concentration. Under optimized conditions, the biosensor exhibited a linear range of 0.001-100 ng/mL with the LOD of 0.10 pg/mL (LSV) and 0.30 pg/mL (EIS). The applicability of the biosensor was verified by determination of CEA in human serums compared to electrochemiluminescence immunoassay.

In the third section, an electrochemical biosensor for environmental applications was constructed based on SPCE modified with reduced graphene oxide (rGO) and silver nanoparticles (AgNPs). The biosensor was applied for indirect detection of glyphosate herbicide, which relied on the inhibition of acid phosphatase enzymes (ACP) immobilized on the SPCE/rGO-AgNPs surface. In the presence of glyphosate, the current signal was decreased, owing to the enzymatic reaction of ACP to its substrate. The signal was measured by chronoamperometry and quantitative measurements proportional to the glyphosate concentration. The biosensor exhibited two linear ranges from 0.05 to 0.5 mg/L and 0.5 to 22.0 mg/L, and the LOD of 16 µg/L were obtained. The proposed biosensor was successfully applied for the determination of glyphosate in water and soil samples, and the results were in full accordance with the HPLC method.

In the last section, the analytical method for detection of glyphosate in environmental samples was also designed based on surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS). A vertical heterostructure composed of titanium dioxide nanotube arrays (TiO<sub>2</sub> NTs), AgNPs and rGO was constructed and served as a SERS-based sensor. Under optimum conditions, the TiO<sub>2</sub> NTs/AgNPs-rGO surface exhibited high SERS activity, which provided analytical enhancement factors (AEF) as high as 7.1×10<sup>8</sup>. The modified SERS sensor was successfully applied to glyphosate detection ranging from 0.1 to 100 mg/L and the LOD as 0.05 mg/L. The practical applications of glyphosate determination in environmental waters and soils were investigated and the results are in great accord with those obtained by the HPLC method.

The research is successful in developing sensors and biosensors. The sensors and biosensors developed are analytical devices employed as low-cost platforms for simple



use and rapid detection. In addition, the new knowledge obtained will increase not only in the research field but also for commercial use in the future.

## บทคัดย่อ

เรื่อง : การศึกษาทางทฤษฎีของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดใหม่เพื่อประยุกต์ใช้งานด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

ผู้วิจัย : ปรียาพร พลตร

ชื่อปริญญา : ปรัชญาดุษฐ์บัณฑิต

สาขาวิชา : เคมี

อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร จิงสุทธิวงษ์

คำสำคัญ : ทฤษฎีฟังก์ชันความหนาแน่น, ปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชัน, ปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรจีเนชัน, ปฏิกิริยาการสลายตัวของกรดฟอร์มิก

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูงเพื่อใช้ในปฏิกิริยาการเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีพิษน้อยลงโดยอาศัยระเบียบวิธีการคำนวณทางเคมีคอมพิวเตอร์ ปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยออกซิเจนบนกลุ่มอะตอม  $Ag_7Au_6$  จะเกิดผ่าน 2 กลไกคือ กลไกการดูดซับแบบที่ละขั้นตอนและกลไกการดูดซับร่วมกัน จากผลการศึกษาพบว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์จะเกิดผ่านกลไกแบบการดูดซับร่วมกัน โดยมีขั้นตอนการสร้างพันธะระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์และอะตอมออกซิเจนเป็นขั้นกำหนดอัตราซึ่งใช้พลังงานกระตุ้นเพียงแค่ 0.21 eV นอกจากนั้นแล้วผลการคำนวณทางจลนศาสตร์สามารถยืนยันได้ว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์จะเกิดผ่านกลไกแบบการดูดซับร่วมกันพิจารณาได้จากอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่มากกว่า รวมไปถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่ากลไกการดูดซับแบบที่ละขั้นตอน จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $Ag_7Au_6$  มีความว่องไวต่อการปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นกลุ่มอะตอม  $Ag_7Au_6$  สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเป็นพิษน้อยลง

นอกจากนั้นแล้วในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้ได้สารผลิตภัณฑ์เป็นกรดฟอร์มิกบนตัวเร่งปฏิกิริยา  $Fe-N_3Gr$  และ  $Ni-N_3Gr$  ด้วยระเบียบวิธีการทางเคมีคำนวณ ผลการศึกษาพบว่าปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกลไกแบบการดูดซับร่วมกันจะเกิดผ่าน 2 ขั้นตอน คือการเกิดไฮโดรจีเนชันของคาร์บอนไดออกไซด์ครั้งที่ 1 ได้สารมัธยันต์ชนิดฟอร์มเมทเกิดขึ้น และจากนั้นไฮโดรเจนอะตอมที่เหลือจะเข้าทำปฏิกิริยาต่อได้สารผลิตภัณฑ์ที่เป็นกรดฟอร์มิกที่เป็นไปได้ทั้งหมด 2 โครงสร้างคือ *cis*-HCOOH และ *trans*-HCOOH

ผลการคำนวณพบว่าปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-N3Gr และ Ni-N3Gr จะเกิดผลิตภัณฑ์แบบ *trans*-HCOOH ได้ง่ายกว่า *cis*-HCOOH เนื่องจากใช้พลังงานกระตุ้นที่ต่ำกว่านั่นเอง ในทางตรงกันข้ามปฏิกิริยาการแข่งขันที่ก่อให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็น CO และ H<sub>2</sub>O นั้นแทบจะเป็นไปไม่ได้หรือเกิดขึ้นได้ยากมากภายใต้สภาวะปกติเนื่องต้องการพลังงานกระตุ้นสูงซึ่งสามารถยืนยันผลการคำนวณเหล่านี้ด้วยการศึกษาทางด้านจลนศาสตร์ ดังนั้นงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-N3Gr และ Ni-N3Gr มีทั้งความว่องไวและความจำเพาะต่อปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของคาร์บอนไดออกไซด์เป็น *trans*-HCOOH

## ABSTRACT

TITLE : THEORETICAL INVESTIGATION OF NOVEL CATALYSTS FOR SUSTAINABLE ENERGY AND ENVIRONMENTAL APPLICATIONS

AUTHOR : PREEYAPORN POLDORN

DEGREE : DOCTOR OF PHILOSOPHY

MAJOR : CHEMISTRY

ADVISOR : PROF. SIRIPORN JUNGSUTTIWONG, Ph.D.

KEYWORDS : DENSITY FUNCTIONAL THEORY, CO OXIDATION, CO<sub>2</sub> HYDROGENATION, FORMIC ACID DECOMPOSITION

In this research, we employed density functional theory (DFT) to design a highly active catalyst for the conversion of CO into less harmful products. The reaction pathway for CO oxidation by O<sub>2</sub> on the Ag<sub>7</sub>Au<sub>6</sub> atomic cluster has two possible procedures: stepwise adsorption and coadsorption. The results suggest that the CO oxidation takes place via a coadsorption procedure rather than through a stepwise adsorption procedure. The coadsorption rate exhibits a bonding process of CO–O with a significantly small barrier of 0.21 eV. Furthermore, microkinetic simulation results suggest that both CO oxidation rates and optimal temperatures exhibit greater performance for the coadsorption pathway, compared to a stepwise adsorption procedure. Our proposed procedures suggest that the Ag<sub>7</sub>Au<sub>6</sub> catalyst is highly susceptible to CO oxidation at room temperature. Therefore, it has potential applications as highly active catalysts for the conversion of carbon monoxide into less toxic CO<sub>2</sub>.

Furthermore, periodic density functional theory (DFT) calculations were performed to investigate possible reaction mechanisms for the hydrogenation of CO<sub>2</sub> to formic acid (*cis*- or *trans*-HCOOH) products over a single Fe or Ni atom incorporated into nitrogen-infused graphene (FeN<sub>3</sub>Gr or NiN<sub>3</sub>Gr) sheets. Our calculations found that the CO<sub>2</sub> hydrogenation proceeds via a coadsorption to produce *cis*- or *trans*-HCOOH over FeN<sub>3</sub>Gr and NiN<sub>3</sub>Gr surfaces, classified into 2 stages: (1) the CO<sub>2</sub> hydrogenation to form a formate (HCOO\*) intermediate and (2) hydrogen abstraction to produce *cis*- or *trans*-

HCOOH. The formation of *trans*-HCOOH over both Fe-N3Gr and Ni-N3Gr surfaces exhibits clear superiority due to the lower activation energy through the entire channel. On the other hand, our findings demonstrate that any competing reaction that produces CO and H<sub>2</sub>O is almost impossible or extremely difficult to proceed under ambient conditions due to the high level  $E_a$  for the formation of these byproducts. Moreover, the microkinetic modeling of CO<sub>2</sub> hydrogenation on both surfaces was investigated to confirm these results. Thus, the Fe-N3Gr and Ni-N3Gr catalysts reveal excellent catalytic activity and are highly selective for CO<sub>2</sub> hydrogenation to *trans*-HCOOH.

## บทคัดย่อ

เรื่อง : การศึกษาเชิงทฤษฎีของวัสดุระดับนาโนสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านพลังงาน  
 ผู้วิจัย : ยุทธนา วงษ์หนองหว้า  
 ชื่อปริญญา : ปรัชญาดุษฎฐิบัณฑิต  
 สาขาวิชา : เคมี  
 อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร จิ่งสุทธิวงษ์  
 คำสำคัญ : ปฏิกริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชัน, ปฏิกริยาอะโรมาไทเซชัน, ทฤษฎีเค้นซิติ ฟังก์ชันแนล

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาปฏิกริยาต็อกซิเจนเนชันของกรดบิวทริกบนตัวเร่งปฏิกริยา Ni<sub>2</sub>P โดยใช้ระเบียบวิธีเค้นซิติฟังก์ชันแนล (DFT) เพื่อเข้าใจกลไกการเกิดปฏิกริยาต็อกซิเจนเนชันของน้ำมันปาล์ม มันแสดงให้เห็นว่าปฏิกริยาต็อกซิเจนเนชันของกรดบิวทริกชอบเกิดผ่านกลไกแบบดีคาร์บอนิลเลชันมากกว่ากลไกแบบไฮโดรต็อกซิเจนเนชัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ากลไกแบบคาร์บอกซิเลชันไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าขั้นกำหนดปฏิกริยาของกลไกแบบไฮโดรต็อกซิเจนเนชันอยู่ในขั้นตอนการเปลี่ยนบิวทานอลไปเป็นบิวเทนซึ่งใช้พลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) เท่ากับ 1.99 eV ในขณะที่ขั้นกำหนดปฏิกริยาของกลไกแบบดีคาร์บอนิลเลชันถูกพบในขั้นตอนการเปลี่ยนบิวทานอลไปเป็นโพรเพนซึ่งใช้  $E_a$  เท่ากับ 1.52 eV อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับสภาวะไฮโดรต็อกซิที่ความดัน H<sub>2</sub> เท่ากับ 50 bars และอุณหภูมิเท่ากับ 653 เคลวิน (K) แสดงให้เห็นว่าขั้นกำหนดปฏิกริยาที่แท้จริงคือขั้นตอนการเกิดปฏิกริยาไฮโดรจีเนชันของกรดบิวทริก นอกจากนี้การวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกริยาอาจจะเพิ่มการเลือกผ่านกลไกแบบไฮโดรต็อกซิเจนเนชัน การศึกษากลไกในงานวิจัยนี้อาจจะมีประโยชน์สำหรับการเพิ่มกระบวนการเกิดปฏิกริยาต็อกซิเจนเนชันในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ

นอกจากนี้ ได้ทำการศึกษาปฏิกริยาอะโรมาไทเซชันของเพนเทนบนตัวเร่งปฏิกริยาซีโอไลต์ชนิด Ga/ZSM-5 โดยใช้ระเบียบวิธี DFT เพื่อเข้าใจหน้าที่ของซีโอไลต์แบบ Ga/ZSM-5 ในการสังเคราะห์อะโรมาติก การเปลี่ยนเพนเทนไปเป็นเบนซินหรือโทลูอินประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้ (1) ปฏิกริยาการแตกตัว (2) ปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชันของซีโอไลต์ชนิด GaH<sub>2</sub>-ZSM-5 (3) ปฏิกริยาไซโคลเซชัน (4) ปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชัน ผลการศึกษาพบว่าสารมัธยันตร์ที่สำคัญในปฏิกริยาอะโรมาไทเซชันของเพนเทนบนตัวเร่งปฏิกริยาซีโอไลต์ชนิด Ga/ZSM-5 คือโครงสร้างวงห้าเหลี่ยม Ga-C4 วงห้าเหลี่ยมนี้สามารถขยายวงไปเป็นโครงสร้างวงเจ็ดเหลี่ยม Ga-C6 นอกจากนี้ ได้ทำการศึกษากการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์และจลนศาสตร์สำหรับเส้นทางปฏิกริยาในการสร้างโมเลกุลเบนซินและโทลูอิน

ผลการศึกษาทางเทอร์โมไดนามิกส์แสดงให้เห็นว่าพลังงานอิสระที่ใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยา ( $\Delta G^\ddagger$ ) สำหรับเส้นทางปฏิกิริยาในการสร้างโมเลกุลโทลูอินมีค่าต่ำกว่า  $\Delta G^\ddagger$  สำหรับเส้นทางปฏิกิริยาในการสร้างโมเลกุลเบนซีนในช่วงอุณหภูมิ 773 ถึง 823 K ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นทางปฏิกิริยาในการสร้างโมเลกุลโทลูอินจะเกิดได้ดีกว่าเส้นทางปฏิกิริยาในการสร้างโมเลกุลเบนซีนในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา ผลการศึกษาทางจลนศาสตร์แสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ปฏิกิริยาไปข้างหน้า ( $k_f$ ) มีค่าสูงกว่าค่าคงที่ปฏิกิริยาย้อนกลับ ( $k_r$ ) ที่อุณหภูมิเท่ากับ 723 773 823 และ 873 K ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาไปข้างหน้าเร็วกว่าปฏิกิริยาย้อนกลับในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา เส้นทางปฏิกิริยาในการสร้างโมเลกุลเบนซีนและโทลูอินเกิดได้ดีในทิศทางไปข้างหน้า ผลการคำนวณเหล่านี้ให้การค้นพบใหม่สำหรับหน้าที่ของซีโอไลต์ชนิด Ga/ZSM-5 ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชันของเพนเทน

## ABSTRACT

TITLE : THEORETICAL STUDY OF NANOSTRUCTURE MATERIALS FOR ENERGY APPLICATIONS  
 AUTHOR : YUTTHANA WONGNONGWA  
 DEGREE : DOCTOR OF PHILOSOPHY  
 MAJOR : CHEMISTRY  
 ADVISOR : PROF. SIRIPORN JUNGSUTTIWONG, Ph.D.  
 KEYWORDS : HYDRODEOXYGENATION, AROMATIZATION, DFT

In this work, the deoxygenation (DX) reaction of butyric acid on an Ni<sub>2</sub>P catalyst was investigated using density-functional theory (DFT) calculations to understand the DX mechanism of palm oils. It revealed that the DX of butyric acid prefers the decarbonylation (DCO) pathway over the hydro-deoxygenation (HDO) pathway. The results suggest that the decarboxylation (DCO<sub>2</sub>) pathway is an unlikely option. The computation results indicated that the rate-limiting step of the HDO pathway is in the butanol to butane conversion (activation energy  $E_a = 1.99$  eV), whereas that of the DCO pathway is found during the butanal to propane conversion ( $E_a = 1.52$  eV). However, additional thermodynamic analysis accounting for hydro-treating reaction conditions (H<sub>2</sub> = 50 bars at 653 K) suggested that the rate-determining step for the DCO pathway is actually the hydrogenation of butyric acid. In addition, the thermodynamics analysis also suggests that increasing reaction temperature may increase selectivity of the HDO pathway. The mechanistic insights gained from this study will be beneficial for the enhancement of the DX process for bio-fuel production.

Moreover, the aromatization mechanisms of *n*-pentane on Ga embedded H-ZSM-5 zeolite (Ga/ZSM-5) were elucidated using DFT calculations to understand the role of Ga/ZSM-5 zeolite in aromatics synthesis. Conversion of *n*-pentane to benzene or toluene comprises four steps, (1) cracking, (2) GaH<sub>2</sub> activation, (3) cyclization, and (4) dehydrogenation. The results show that the key intermediate in *n*-pentane aromatization on Ga/ZSM-5 zeolite to be a five-membered Ga-C4 ring structure. This five-membered ring undergoes expansion to form a seven-membered Ga-C6 ring.



Moreover, the thermodynamics and kinetic results for the benzene and toluene formation pathways were investigated. The thermodynamics results show that activation-free energy ( $\Delta G^\ddagger$ ) for the toluene formation pathway is less than it is for benzene between 773 and 823 K, indicating that toluene formation is more likely than the benzene formation pathway over this temperature range. The kinetic results show that forward rate constant ( $k_f$ ) is greater than the reverse rate constant ( $k_r$ ) at 723, 773, 823, and 873 K, indicating that the forward reaction is faster than the reverse reaction throughout the temperature range under study. The benzene and toluene formation pathways are favored and facile in the forward direction. These computational results provide new findings for the role of Ga/ZSM-5 zeolites in *n*-pentane aromatization processes.

### บทคัดย่อ

- เรื่อง : การพัฒนาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลัง
- ผู้วิจัย : ณรงค์ศักดิ์ โคตธาริน
- ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตร์ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
- สาขาวิชา : ฟิสิกส์
- อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดม ทิพราช
- คำสำคัญ : การผลิตไบโอไฮโดรเจน, การหมักแบบไร้แสง, มูลหมู, มูลควาย, มันสำปะหลัง

ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีผลผลิตพลังงานสูงมากกว่าเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน ในงานนี้ขอนำเสนอการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยการหมักมีดซึ่งเป็นกระบวนการทางชีวภาพ สารตั้งต้นคือแป้งมันสำปะหลัง แหล่งที่มาของแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจน *Clostridium* ได้แก่ มูลสุกรและมูลควาย หัวเชื้อได้รับการบำบัดด้วยความร้อนล่วงหน้าในอุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก๊าซไฮโดรเจนที่ผ่านการหมักสามารถผลิตได้ที่อุณหภูมิห้อง ที่ความเข้มข้นของแป้งมันสำปะหลังเท่ากับ 100 กรัม / ลิตร ได้ผลผลิตไฮโดรเจนสูงสุดของก๊าซไฮโดรเจน ความบริสุทธิ์สูงสุดของไฮโดรเจนคือ 37% เมื่อปริมาณการหมัก 120 มล. ที่ 144 ชั่วโมง

## ABSTRACT

TITLE : DEVELOPING BIOLOGICAL HYDROGEN PRODUCTION FROM CASSAVA STARCH

AUTHOR : NARONGSAK KODTHARIN

DEGREE : DOCTOR OF PHILOSOPHY

MAJOR : PHYSICS

ADVISOR : ASST. PROF. UDOM TIPPARACH, Ph.D.

KEYWORDS : BIOHYDROGEN PRODUCTION, DARK FERMENTATION, SWINE MANURE, BUFFALO DUNG, CASSAVA STARCH

Hydrogen is an environmentally friendly and renewable source of energy. Hydrogen has a relatively higher yield of energy content than hydrocarbon fuels. In this research, hydrogen production through biological processes was carried out by means of a lab scale and an extended lab scale. Anaerobic dark fermentation was used in this work. The substrate was cassava starch of varying concentrations. The sources of the hydrogen-producing bacteria, clostridium, were swine manure and buffalo dung. The inoculum sludge was subjected to a pre-heated treatment at 100 °C for 2 hours. The fermented hydrogen gas was produced at room temperature. The cassava starch concentration of 100 g/l yielded maximal hydrogen. The highest purity of Hydrogen in the biogas was 37% when the fermentation of 120 m/starch was carried out for 144 hours.

### บทคัดย่อ

- เรื่อง : การศึกษาสมบัติทางรังสีและสมบัติทางโครงสร้างของแก้วระบบบิสมัท-  
แบบเรียม-โบโรซิลิเกต เพื่อออกแบบเป็นวัสดุกำบังรังสีแกมมา
- ผู้วิจัย : ณ์ภูริ์สุพล ชุตินภานนท์
- ชื่อปริญญา : ปรัชญาดุขฎิบัณฑิต
- สาขาวิชา : ฟิสิกส์
- อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.เชิดศักดิ์ บุตรจอมชัย
- คำสำคัญ : แก้วโบโรซิลิเกต, แบบเรียมออกไซด์, วัสดุกำบังรังสี, เทคนิคอัลตราโซนิก

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำหลอดแก้วโซเดียมความดันสูง (high pressure sodium lamp glass) มารีไซเคิลและใช้แทนแก้วระบบโบโรซิลิเกต จากนั้นเตรียมให้อยู่ในระบบ (75-x) HPSg – (20) Na<sub>2</sub>O – 5 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – (x) BaO โดยการเติมแบบเรียมออกไซด์ เมื่อ x คือความเข้มข้นที่ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 mol% ด้วยเทคนิคการหลอมที่อุณหภูมิสูง หลังจากนั้นตัดและขัดชิ้นงานให้มีขนาด 1 x 1 นิ้ว จากนั้นการศึกษาโครงสร้างของตัวอย่างแก้วจะถูกศึกษาด้วยหลายวิธีเช่น เทคนิคการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ยูวีวิสซิเปิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis spectroscopy) และฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR spectroscopy) สำหรับการศึกษาความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เราใช้ความเร็วคลื่นเสียงตามยาว (longitudinal velocity) และความเร็วคลื่นเสียงเฉือน (shear velocity) ซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้เทคนิคพัลส์เอคโคหรือวิธีการสะท้อนคลื่นเสียงกลับ (Pulse echo technique) โดยใช้หัววัดที่ความถี่ 4 MHz และวัดที่อุณหภูมิห้อง ผลจากการศึกษาพบว่าความเร็วคลื่นเสียงตามยาวและตามขวางลดลงเมื่อความเข้มข้นของแบบเรียมออกไซด์เพิ่มขึ้น แสดงว่าแบบเรียมไอออนอาจจะทำลายโครงสร้างของตัวอย่างแก้วจึงทำให้ความเร็วคลื่นเสียงลดลง หลังจากนั้นได้ศึกษาการดูดกลืนแสงขาวและอัลตราไวโอเล็ตด้วยยูวีวิสซิเปิลสเปกโทรสโกปีที่ความยาวคลื่น 200 – 1100 nm พบว่าตัวอย่างแก้วมีการดูดกลืนแสงขาวน้อยในช่วง 400 nm นี้ทำให้ตัวอย่างแก้วโปร่งใส และจากผลการศึกษาสามารถนำไปคำนวณหาค่าแถบช่องว่างพลังงานได้ ซึ่งช่องว่างพลังงานจะอยู่ในช่วง 2.6-2.7 eV จากผลของแถบช่องว่างพลังงานสามารถนำไปคำนวณสมบัติทางแสงต่างๆได้ และพบว่าแบบเรียมไอออนทำให้ตัวอย่างแก้วมีการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและมีความเป็นโลหะมากขึ้น การศึกษาโครงสร้างด้วยฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจะวัดที่เลขคลื่น 400 - 2000 cm<sup>-1</sup> จากการศึกษาพบว่าการสั่นของ BO<sub>3</sub> และ BO<sub>4</sub> ซึ่งขนาดของการสั่นจะสัมพันธ์กับโครงสร้างตัวอย่างแก้วอีกทั้งยังเป็นการยืนยันผลจากการใช้เทคนิคความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก สำหรับสมบัติทางรังสีเราสามารถวัดสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านลำรังสีแคบ (narrow beam

transmission method) ที่พลังงาน 662 keV, 1174 keV และ 1332 keV ของธาตุกัมมันตรังสี หลังจากนั้นสามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล  $\mu_{fp}$  และ HVL จากผลการทดลองพบว่า ตัวอย่างแก้วนั้นมีค่า HVL ที่พลังงาน 662 keV, 1174 keV และ 1332 keV ดีกว่าคอนกรีตทั่วไป เช่น คอนกรีตแบบแบไรต์ คอนกรีตแบบเซอร์เพนไทต์และคอนกรีตแบบโครไมท์ และเมื่อคำนวณสมบัติทางรังสีด้วยโปรแกรม Fluka และ WinXCom พบว่าผลจากทั้ง 2 โปรแกรมนี้กับผลจากการทดลองมีความใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นการยืนยันผลจากการทดลอง

## ABSTRACT

TITLE : INVESTIGATION OF RADIATION AND STRUCTURAL PROPERTIES OF BISMUTH-BARIUM-BOROSILICATE GLASS SYSTEM FOR DESIGN AS A GAMMA-RAY SHIELDING MATERIALS

AUTHOR : NATSUPON CHUTITHANAPANON

DEGREE : DOCTOR OF PHILOSOPHY

MAJOR : PHYSICS

ADVISOR : ASSOC. PROF. CHERDSAK BOOTJOMCHAI, Ph.D.

KEYWORDS : BOROSILICATE GLASS, BARIUM OXIDE, SHIELDING MATERIAL, ULTRASONIC TECHNIQUES

In this research, high-pressure sodium lamp glass (HPSg) was recycled and employed instead of borosilicate glass systems. The glass samples were prepared in  $(75-x)$  HPSg –  $(20)$  Na<sub>2</sub>O –  $5$  Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> –  $(x)$  BaO by adding barium oxide (where  $x$  is 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, and 35 mol%) through the melt-quenching method. After that, the glass samples were cut in 1×1 square inch and polished by different grades of silicon carbide. Next, the structural properties of the glass samples were studied by way of several methods such as ultrasonic techniques, UV-Vis spectroscopy, and FTIR spectroscopy. For ultrasonic techniques, we use ultrasonic velocities such as longitudinal velocity and shear velocity which were measured by using the pulse-echo technique at 4 MHz frequency and at room temperature. The results found that longitudinal and shear velocity decreased when adding barium oxide to the glass system. These results indicate that barium ions may destroy the glass structure leading to a decrease in longitudinal and shear velocity. Then, the absorption of visible and ultraviolet light was studied by UV-Vis spectroscopy and recorded in a wavelength range of 200 –1100 nm. We found that the glass samples absorbed less visible light and ultraviolet in the range of 400 nm. This result shows that the glass samples are transparent. In addition, we calculated optical properties from the energy band gap and found that the energy band gap is 2.6-2.7 eV. Adding barium ions in the glass system leads to increases in electric conduction and metallization. FTIR spectroscopy was measured in wave

numbers range 400 - 2000  $\text{cm}^{-1}$ . The results found that the glass network is absorbing and vibrating in the various modes of the functional group of  $\text{BO}_3$  and  $\text{BO}_4$  for which the quantity of absorption is related to the structure of glass and confirms the results from ultrasonic techniques. For radiation properties, the linear attenuation coefficient was measured by using a narrow beam transmission method at the energy of isotope source of 622 keV, 1174 keV, and 1332 keV. Then, we calculated the mass attenuation coefficient, mfp, and HVL. The results found that the glass samples have a value of HVL at 622 keV, 1174 keV, and 1332 keV better than ordinary concrete, barite, serpentine, and chromite concrete. As we determined radiation properties from the Fluka and WinXCom program, we found that the theoretical value and experimental data are in solid agreement and confirm the experiment's results.

## บทคัดย่อ

- เรื่อง : การศึกษาความเป็นไปได้ของแก้วชีวภาพแบบใหม่ที่เตรียมจากชานอ้อยและ  
 เหม้จันสำปะหลังสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ  
 กระดูก
- ผู้วิจัย : ปุณณภพ โสภานันท์
- ชื่อปริญญา : ปรัชญาดุษฐ์บัณฑิต
- สาขาวิชา : ฟิสิกส์
- อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์เรวัตน์ เหล่าไพบุลย์
- อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : รองศาสตราจารย์จินตนา เหล่าไพบุลย์
- คำสำคัญ : แก้วชีวภาพ, เทคนิคคลื่นเสียงอัลตราโซนิคแบบควบคุมแรงกด,  
 สมบัติเชิงกล, พฤติกรรมการออกฤทธิ์ทางชีวภาพ, วิศวกรรมเนื้อเยื่อกระดูก

แก้วชีวภาพที่เตรียมจากชานอ้อยและเหม้จันสำปะหลังแสดงคุณสมบัติที่น่าสนใจนอกเหนือจาก  
 ต้นทุนต่ำและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แก้วสองชุดที่อยู่บนพื้นฐานของระบบ  $B_2O_3-P_2O_5-Na_2O-$   
 $CaO-BG$  และ  $B_2O_3-P_2O_5-Na_2O-CaO-CR$  โดยที่ BG คือชานอ้อย และ CR คือเหม้จันสำปะหลัง  
 ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เทคนิคการหลอมละลายแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว การศึกษาความเป็นไปได้ใน  
 การใช้ชานอ้อยและเหม้จันสำปะหลังเพื่อสร้างแก้วชีวภาพแบบใหม่ได้รับการประเมินผ่านสมบัติทาง  
 กายภาพ สมบัติเชิงกล โครงสร้าง ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และความทนทานต่อสารละลาย ความ  
 ทนทานของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการวัดตามหลักการของอาร์คิมิดีสและคำนวณตามกฎการรวมกัน  
 ขององค์ประกอบได้รับการศึกษาและเปรียบเทียบ การวัดความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิคของตัวอย่างแก้ว  
 ที่มีสัดส่วนของชานอ้อยและเหม้จันสำปะหลังแตกต่างกัน ทำได้โดยใช้เทคนิคอัลตราโซนิคแบบ  
 ควบคุมแรงกดด้วยหัววัดแบบตรงและแบบมุม ที่ความถี่ 4 เมกะเฮิร์ต โมดูลัสยืดหยุ่น อัตราส่วน  
 ของปัวส์ซอง และความแข็งระดับไมโคร คำนวณได้จากข้อมูลความเร็วคลื่นเสียงและความหนาแน่น  
 ของตัวอย่างแก้ว นอกจากนี้ความแข็งระดับไมโครของตัวอย่างแก้วยังวัดได้โดยใช้เครื่องทดสอบความ  
 แข็งแบบวิกเกอร์โดยใช้โหลดที่มีค่าเท่ากับ 0.98 นิวตัน แก้วชีวภาพแบบใหม่ที่ใช้สำหรับงานทางด้าน  
 วิศวกรรมเนื้อเยื่อกระดูกได้รับการทดสอบความว่องไวทางชีวภาพแบบหลอดทดลองทั้งก่อนและหลัง  
 การแช่ในสารละลายแบบจำลองของเหลวในร่างกาย (SBF) ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1,  
 7 และ 14 วัน การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและลักษณะทางสัณฐานวิทยา รวมถึงความสามารถใน  
 การยึดเกาะของกระดูกถูกประเมินโดยการวัด XRD FTIR และ SEM ในงานวิจัยนี้ พฤติกรรมการ  
 สลายตัวของตัวอย่างแก้วและค่า pH ของสารละลาย SBF ยังได้รับการพิจารณาด้วย ผลการศึกษา



พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณขานอ้อยและเหง้ามันสำปะหลังในแก้วนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่น ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก โมดูลัสยืดหยุ่น และความแข็งระดับไมโคร ค่าความแข็งระดับไมโครที่ได้จากทั้งสองเทคนิคถูกนำมาเปรียบเทียบกันและพบว่าทั้งสองค่ามีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกัน ผลการทดลองการสูญเสียน้ำหนักและค่า pH ของสารละลาย เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการแช่ การเพิ่มปริมาณขานอ้อยและเหง้ามันสำปะหลังในแก้วช่วยให้อัตราการละลายของแก้วลดลง III ข้อมูล XRD ก่อนแช่ตัวอย่างแก้วในสารละลาย SBF ยืนยันลักษณะความเป็นอสัณฐานของแก้ว ในขณะเดียวกันสเปกตรัม FTIR ก็สนับสนุนหน่วยโครงสร้างภายในของแก้วที่สอดคล้องกับกลุ่มบอเรตเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาบนพื้นผิวแก้วก่อนแช่ แสดงลักษณะพื้นผิวที่เรียบพร้อมกับร่องรอยที่เกิดจากการขัด หลังการแช่ตัวอย่างแก้วในสารละลาย SBF รูปแบบของ XRD เผยให้เห็นถึงพิกัดบางตำแหน่งที่สอดคล้องกับลักษณะเฉพาะของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟสที่อยู่ในรูปของโบรไซต์และไฮดรอกซีอะพาไทต์ ในทำนองเดียวกันสเปกตรัม FTIR ที่ประมาณ 550–610  $\text{cm}^{-1}$  และ 980–1060  $\text{cm}^{-1}$  ระบุว่าเป็นพันธะของ P–O ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดขึ้นของแคลเซียมฟอสเฟส นอกจากนี้ภาพถ่าย SEM ยังแสดงให้เห็นการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคกลมขนาดเล็กจำนวนมากบนพื้นผิวแก้วซึ่งบ่งชี้ถึงการก่อตัวของแคลเซียมฟอสเฟส ผลการทดลองที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD FTIR และ SEM ยืนยันการก่อตัวของไฮดรอกซีอะพาไทต์ หรือความสามารถในการยึดเกาะของกระดูกบนพื้นผิวแก้วหลังจากแช่ในสารละลาย SBF IV

## ABSTRACT

TITLE : FEASIBILITY STUDY OF NOVEL BIOACTIVE GLASS PREPARED FROM BAGASSE AND CASSAVA RHIZOME FOR BONE TISSUE ENGINEERING APPLICATIONS

AUTHOR : POONNAPHOB SOPAPAN

DEGREE : DOCTOR OF PHILOSOPHY

MAJOR : PHYSICS

ADVISOR : ASSOC. PROF. RAEWAT LAOPAIBOON

CO- ADVISOR : ASSOC. PROF. JINTANA LAOPAIBOON

KEYWORDS : BIOACTIVE GLASS, PRESSURE-CONTROLLED ULTRASONIC TECHNIQUE, MECHANICAL PROPERTY, BIOACTIVE BEHAVIOR, BONE TISSUE ENGINEERING

Bioactive glass prepared from bagasse and cassava rhizome exhibits interesting properties in addition to low cost and being environmentally friendly. Two glass series based on  $B_2O_3-P_2O_5-Na_2O-CaO-BG$  and  $B_2O_3-P_2O_5-Na_2O-CaO-CR$ , where BG is bagasse and CR is cassava rhizome, were fabricated by a melt quenching technique. A feasibility study was undertaken using bagasse and cassava rhizome as novel bioactive glass and results were evaluated physically, mechanically, structurally, morphologically and in terms of degradation properties. The densities of the prepared glasses were measured and calculated based on, respectively, Archimedes' principle and additive rule, and results were studied and compared. The ultrasonic velocities of the glass samples with different mix proportions of bagasse and cassava rhizome were measured based on a pressure-controlled ultrasonic technique at the frequency of 4 MHz through normal and angle probes. The elastic moduli, Poisson's ratio and microhardness were calculated from an acoustic velocity and a density data of the glass samples. Vickers hardness tester was also applied to determine the microhardness of the glass using the applied load of 0.98 N. A set of the novel glasses for bone tissue engineering was tested *in vitro* bioactivity before and after immersion in the simulated body fluid (SBF) solution during exposure at 37 °C for 1, 7 and 14 days. The structural and morphological changes

including bone bonding ability were assessed by performing XRD, FTIR and SEM measurements. The V degradation behavior of the glass samples and pH change of SBF solution were also considered in this work. The results found that the addition of bagasse and cassava rhizome leads to an increase of the densities, ultrasonic wave velocities, elastic moduli and microhardness values in all prepared glasses. The values of microhardness obtained from both techniques were compared and a good correlation was observed. The results of the weight loss and pH value of the solution increased with longer time periods. The addition of bagasse and cassava rhizome into the glasses leads to a decrease of the dissolution rate. Before soaking in the SBF solution, XRD data was observed to confirm the amorphous nature of the glasses while FTIR spectra supported the internal structural units of the prepared glass, corresponding to main borate groups. Additionally, the surface morphology before immersion showed a flat surface with deep grooves. After immersion, the XRD patterns illustrated some peaks corresponding to calcium phosphate phases in the form of brushite and hydroxyapatite. Likewise, the FTIR spectra about 550–610  $\text{cm}^{-1}$  and 980–1060  $\text{cm}^{-1}$  indicated the P–O bonds related to the calcium phosphate layer formation. Moreover, the SEM images showed the agglomeration of many small rounded particles on the glass surface, indicating the formation of calcium phosphate layers. These XRD, FTIR and SEM results confirmed the formation of hydroxyapatite or bone bonding ability on glass surface after immersion in the SBF solution.

## บทคัดย่อ

เรื่อง : ผลของ  $WO_3$  ที่มีต่อแก้วกำบังรังสีแกมมาในระบบ  $30BaO-(50-x)B_2O_3-10BG-10CR-xWO_3$

ผู้วิจัย : ภัทรนิภา กั้นหะคุณ

ชื่อปริญญา : ปรัชญาดุขภักดิ์บัณฑิต

สาขาวิชา : ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ เรวัตน์ เหล่าไพบูลย์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : รองศาสตราจารย์ จินตนา เหล่าไพบูลย์

คำสำคัญ : แก้ว, เทคนิคอัลตราโซนิคแบบสัมผัส, สมบัติยืดหยุ่น, สมบัติทางรังสี

ระบบแก้วเบเรียม-บอเรต-ซานอ้อย-เหง้ามันสำปะหลัง-ทังสเตนออกไซด์ ได้รับการพัฒนาเพื่อใช้เป็นวัสดุกำบังรังสีแกมมา ระบบแก้วนี้ถูกเตรียมด้วยเทคนิคการหลอมแบบดั้งเดิมโดยหลอมที่อุณหภูมิสูงและปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วทั้งหมดถูกศึกษาโดยใช้หลักการของอาร์คิมิดีส ข้อมูลความหนาแน่นนี้ถูกนำไปใช้คำนวณหาปริมาตรโดยโมล ตัวอย่างแก้วทั้งหมดถูกนำมาตรวจสอบความเป็นเนื้อเดียวกันและลักษณะออสซิลูชันด้วยเทคนิคการทำ X-ray mapping และเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังวัดความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิคโดยใช้เทคนิคอัลตราโซนิคแบบสัมผัส จากนั้นทำการคำนวณโมดูลัสยืดหยุ่นของทุกตัวอย่างแก้ว ผลลัพธ์ที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีซึ่งคำนวณจากแบบจำลองของ Makishima-Mackenzie และแนวทางของ Abd El-Moneim-Alfifi ทำการบันทึกสเปกตรัมฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดเพื่อสนับสนุนผลลัพธ์ของความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิค ความแข็งระดับไมโครของระบบแก้วนี้ได้รับการทดสอบและถูกนำไปเปรียบเทียบกับแก้วตะกั่วกำบังรังสีมาตรฐาน สำหรับสมบัติทางรังสีของระบบแก้วนี้ได้ทำการศึกษาสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลด้วยเทคนิคการส่งผ่านแบบไม่บังคับลำรังสีที่พลังงานโฟตอน 60, 122 และ 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาใช้คำนวณความหนาแน่นจริงค่าและระยะปลอดการชนโดยเฉลี่ย ผลที่ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม WinXCom ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางโครงสร้าง สมบัติยืดหยุ่น และสมบัติทางรังสีมีความสัมพันธ์กับการปรับเปลี่ยนในโครงสร้างแก้ว ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของจำนวนของออกซิเจนที่ไม่ได้เชื่อมต่อกันในเครือข่ายแก้วเนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของทังสเตนออกไซด์ และสมบัติทางรังสียังขึ้นอยู่กับพลังงานโฟตอนด้วย สำหรับการคำนวณสมบัติยืดหยุ่นด้วยแบบจำลองของ Makishima-Mackenzie มีโมดูลัสยืดหยุ่นบางค่าที่ใกล้เคียงกับ

ค่าที่ได้จากการทดลอง แต่แนวทางของ Abd El-Moneim-Alfifi ให้ความสัมพันธ์ที่ไม่สอดคล้องกับ  
ค่าที่ได้จากการทดลอง

## ABSTRACT

TITLE : INFLUENCE OF  $WO_3$  ON GAMMA RAY SHIELDING GLASS IN  $30BaO-(50-x)B_2O_3-10BG-10CR-xWO_3$  SYSTEM

AUTHOR : PATTARANIPA GUNHAKOON

DEGREE : DOCTOR OF PHILOSOPHY

MAJOR : PHYSICS

ADVISOR : ASSOC. PROF. RAEWAT LAOPAIBOON, M.Eng.

CO-ADVISOR : ASSOC. PROF. JINTANA LAOPAIBOON, M.Eng.

KEYWORDS : GLASS, ULTRASONIC CONTACT TECHNIQUE, ELASTIC PROPERTIES, RADIATION PROPERTIES

Glasses of system barium-borate-bagasse-cassava rhizome- $WO_3$  are developed for gamma ray shielding materials. This glass system was prepared by conventional melt-quenching technique. The density of all glass samples was studied using the principle of Archimedes, then their molar volume was calculating. The homogeneity and amorphous nature of this glass system were examined using X-ray mapping and X-ray diffraction techniques, respectively. In addition, the ultrasonic velocities were measured using the ultrasonic contact technique and then their elastic moduli were calculated. The obtained results were compared with theoretical values, from the Makishima-Mackenzie model and Abd El-Moneim-Alfifi approaches. FTIR spectra were also recorded to support the result of ultrasonic velocities. Microhardness of this glass system were tested and compared with standard radiation shielding lead glass. The mass attenuation coefficient was studied using Broad beam transmission technique at 60, 122 and 662 keV photon energies. The obtained data were used to calculate the half value layers and mean free paths and these results were compared with the computed values by WinXCom program. The results of physical, structural, elastic and radiation shielding properties are related to modifications in the glass structure, there are significant changes in number of non-bridging oxygen in glass network due to an addition of  $WO_3$ . The radiation shielding properties also depend on the photon energies. The elastic property calculation using Makishima-Mackenzie model gave some elastic

moduli similar to that obtained from the experiment, but for the Abd El-Moneim-Alfifi approaches gave inconsistent.

## บทคัดย่อ

เรื่อง : การประยุกต์ใช้ Arduino สำหรับปฏิบัติการราคาถูกเพื่อพัฒนาแนวคิด  
นักเรียนเรื่องความดันและแรงลอยตัว

ผู้วิจัย : โชคชัย แจวจิารณ์

ชื่อปริญญา : ปรัชญาดุขฎิบัณฑิต

สาขาวิชา : วิทยาศาสตร์ศึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุระ วุฒิพรหม

คำสำคัญ : ความดันและแรงลอยตัว, Arduino, มาโนมิเตอร์, การสอนแบบสืบเสาะหา  
ความรู้

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) สร้างมาโนมิเตอร์แบบดิจิทัลด้วย Arduino บอร์ด ที่สามารถวัดค่าความดันได้ถูกต้อง แม่นยำและมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ร้อยละ 5 (2) ออกแบบกิจกรรมการสอนแบบการสืบเสาะทางวิทยาศาสตร์เรื่องความดันและแรงลอยตัว (3) ศึกษาความเข้าใจในแนวคิดวิทยาศาสตร์เรื่องความดันและแรงลอยตัวและความก้าวหน้าทางการเรียนของนักเรียนเมื่อใช้กิจกรรมการสอนแบบการสืบเสาะทางวิทยาศาสตร์เรื่องความดันและแรงลอยตัว (4) เพื่อศึกษาพฤติกรรมภายในชั้นเรียนเมื่อใช้กิจกรรมการสอนแบบการสืบเสาะทางวิทยาศาสตร์เรื่องความดันและแรงลอยตัว กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้คือนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2562 จำนวน 30 คน ซึ่งได้มาโดยวิธีการเลือกแบบเจาะจง การวิจัยในครั้งนี้ใช้วิธีการวิจัยแบบผสมผสาน (Mixed Method Research) เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย (1) มาโนมิเตอร์แบบดิจิทัลด้วย Arduino บอร์ด (2) กิจกรรมการสอนแบบการสืบเสาะทางวิทยาศาสตร์เรื่องความดันและแรงลอยตัว (3) แบบวัดแนวคิดวิทยาศาสตร์เรื่องความดันและแรงลอยตัว (4) แบบสังเกตพฤติกรรมในชั้นเรียน (COPUS) (5) แผนการจัดการเรียนรู้ ผลการวิจัยพบว่า (1) มาโนมิเตอร์แบบดิจิทัลด้วย Arduino บอร์ด ที่พัฒนาขึ้นมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 2.21 (2) กิจกรรมการสอนที่สร้างขึ้นได้ส่งเสริมให้นักเรียนมีการสืบเสาะทางวิทยาศาสตร์สร้างองค์ความรู้ด้วยตนเอง (3) นักเรียนมีความเข้าใจในแนวคิดวิทยาศาสตร์เรื่องความดันและแรงลอยตัวเมื่อใช้กิจกรรมการสอนหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ.05 และนักเรียนมีความก้าวหน้าทางการเรียนเฉลี่ยรายชั้นเรียน normalized gain <math>\langle g \rangle</math> เท่ากับ 0.71 ซึ่งอยู่ในระดับสูง) High gain( (4) พฤติกรรมในชั้นเรียนของนักเรียนและครูผู้สอนตลอดการจัดการเรียนรู้อุ้มีลักษณะแบบเชิงรุก



## ABSTRACT

TITLE : ADAPTING ARDUINO FOR LOW-COST LABORATORY FOR DEVELOPING STUDENTS' CONCEPTION ON PRESSURE AND BUOYANT FORCE

AUTHOR : CHOKCHAI JAEWIJARN

DEGREE : DOCTOR OF PHILOSOPHY

MAJOR : SCIENCE EDUCATION

ADVISOR : ASST. PROF. SURA WUTTIPROM, Ph.D

KEYWORDS : PRESSURE, BUOYANCY, ARDUINO, MANOMETER, INQUIRY

The objective of this research is to (1) create a digital manometer with Arduino boards that can measure pressure values accurately with an error rate of less than 5 percent, (2) design scientific inquiry activities, (3) study students' understanding of science concepts after applying scientific inquiry teaching activities and (4) observe and study student behavior within the classroom when employing scientific inquiry activities on pressure and buoyancy. The sample group consisted 30 grade 11 students. This research employed a mixed methods research. The research tools consisted of (1) an Arduino manometer, (2) scientific inquiry activities, (3) a science conceptual test of pressure and buoyancy, (4) the Classroom Observation Protocol for Undergraduate STEM (COPUS) and (5) a lesson plan. The results showed that: 1) the developed digital manometers with Arduino boards had an error rate of 2.21%, 2) the designed teaching activities encouraged students to enhance their own knowledge, 3) the students had a statistically higher understanding of scientific concepts when using science-based teaching activities at the level of .05 and the average progress of the students by classrooms measured by the normalized gain  $\langle g \rangle$  was 0.71, categorized at a high level (high gain) and (4) the behavior of the students and teachers demonstrated active learning behavior.

## บทคัดย่อ

เรื่อง	: การพัฒนาเกมบัตรและแผนภาพการเคลื่อนที่บนกระดานแม่เหล็กเพื่อส่งเสริม การคิดและการแก้โจทย์ปัญหาเรื่องการเคลื่อนที่ทางฟิสิกส์
ผู้วิจัย	: รุติติมา ธัญญานิติ
ชื่อปริญญา	: ปรัชญาดุษฐ์บัณฑิต
สาขาวิชา	: วิทยาศาสตร์ศึกษา
อาจารย์ที่ปรึกษา	: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุระ วุฒิพรหม
คำสำคัญ	: การสอนโดยใช้เกมเป็นฐาน, การคิดของผู้เรียน, แผนภาพการเคลื่อนที่, การแก้โจทย์ปัญหาฟิสิกส์

การคิดวิเคราะห์และแก้ปัญหาจัดเป็นทักษะที่จำเป็นสำหรับผู้เรียนในศตวรรษที่ 21 ซึ่ง การสอนโดยใช้เกมเป็นฐานเป็นเทคนิคที่จะช่วยให้พัฒนาทักษะเหล่านี้ นอกจากนี้ผู้เรียนจะเกิดองค์ความรู้แล้วยังทำให้มีความกระตือรือร้นและมีความสุขสนุกสนานในการเรียน งานวิจัยนี้ได้สร้างเกมบัตรที่ชื่อ “Motion Blitz” ขึ้น เพื่อสอนเรื่องการเคลื่อนที่ในหนึ่งและสองมิติ ซึ่งเกมบัตรนี้ประกอบด้วยชุดแผ่นภาพปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ในชีวิตประจำวัน เรียกว่า “Motion Cards” และชุดสัญลักษณ์แทนการเคลื่อนที่เรียกว่า “Motion Symbols” โดยแทนการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง โพรเจกไทล์ วงกลมหมุน กลิ้ง และฮาร์มอนิกอย่างง่าย เมื่อเล่นเกมเสร็จแล้วผู้สอนจะกระตุ้นการคิดของผู้เรียนและให้ผู้เรียนสร้างองค์ความรู้ด้วยตนเองด้วยคำถามจำนวน 30 ข้อ สุดท้ายผู้สอนจะประเมินผู้เรียนด้วยคำถาม 6 ระดับ จากการคิดระดับต่ำไประดับสูงตามทฤษฎีการเรียนรู้ของบลูม (ความรู้ ความเข้าใจ การนำความรู้ไปประยุกต์ การวิเคราะห์ การสังเคราะห์ และการประเมินค่า) ด้วยคำถามจำนวน 12 ข้อ ผลวิจัยพบว่าผู้เรียนเกินร้อยละ 90 อยู่ในเกณฑ์ผ่านสำหรับคำถามในระดับต่ำ (ความรู้ ความเข้าใจ) และประมาณร้อยละ 59 อยู่ในเกณฑ์ผ่านสำหรับคำถามในระดับสูง (การนำความรู้ไปประยุกต์ การวิเคราะห์ การสังเคราะห์ และการประเมินค่า) และนอกจากนี้ผลประเมินชี้ให้เห็นว่าระดับการคิดของผู้เรียนจะลดลงจากการคิดระดับต่ำไประดับสูง

การแก้โจทย์ปัญหาฟิสิกส์ คือ การใช้สมการที่แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปร ผู้เรียนที่ไม่ชอบฟิสิกส์ส่วนหนึ่งมาจากไม่ชอบคณิตศาสตร์ แต่อย่างไรก็ตามการแก้โจทย์ปัญหาฟิสิกส์ไม่จำเป็นต้องใช้สมการเสมอไป เช่น การวาดแผนภาพการเคลื่อนที่ที่ใช้จุดแทนตำแหน่งของวัตถุและลูกศรแสดงการกระจัด ความเร็ว และความเร่งของวัตถุนั้นสามารถแก้โจทย์ปัญหาเรื่องการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงที่ความเร่งคงที่เหมือนกับการใช้สมการ แต่การใช้แผนภาพการเคลื่อนที่เป็นเพียงการวาดลงในกระดาษ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้สร้างแผนภาพการเคลื่อนที่บนกระดานแม่เหล็ก (Motion Diagrams on Magnetic

Board) ซึ่งการใช้แผนภาพการเคลื่อนที่บนกระดานแม่เหล็กทำให้ผู้เรียนเห็นความสัมพันธ์ของตำแหน่ง เวลาการกระจัด ความเร็ว และความเร่งได้ดีขึ้นและส่งเสริมการจัดการเรียนรู้แบบลงมือทำให้กับผู้เรียนอีกด้วย และจากผลการนำชุดแผนภาพการเคลื่อนที่บนกระดานแม่เหล็กไปใช้แก้ปัญหาโจทย์ฟิสิกส์เรื่องการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงพบว่านักเรียนทั้งสองโรงเรียนเกินร้อยละ 80 สามารถนำไปใช้หาคำตอบได้ถูกต้องทุกข้อ แสดงให้เห็นว่าชุดแผนภาพการเคลื่อนที่บนกระดานแม่เหล็กสามารถนำไปใช้แก้โจทย์ปัญหาเรื่องการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงทดแทนการใช้สูตรคำนวณได้เป็นอย่างดี และนักเรียนที่มีผลการเรียนฟิสิกส์อยู่ในเกณฑ์ปานกลางและอ่อนส่วนใหญ่จะเลือกใช้อุปกรณ์ชุดนี้

## ABSTRACT

TITLE : DEVELOPMENT OF CARD GAME AND MOTION DIAGRAMS ON  
MAGNETIC BOARD FOR ENHANCING THINKING AND PROBLEM -  
SOLVING ON PHYSICS MOTIONS

AUTHOR : THITTIMA THUNYANITI

DEGREE : DOCTOR OF PHILOSOPHY

MAJOR : SCIENCE EDUCATION

ADVISOR : ASST. PROF. SURA WUTTIPIROM, Ph.D.

KEYWORDS : GAME – BASED LEARNING, STUDENT THINKING, MOTION DIAGRAM,  
PROBLEM – SOLVING

Critical thinking and problem-solving skills are crucial for the 21st century learner. Game-based learning (GBL) is a powerful teaching strategy for fostering these skills amongst students. GBL can reinforce knowledge and bridge the gap between what is learned by creating dynamic, fun, and exciting learning environments. This research resulted in a card game called "Motion Blitz" for teaching the physics concept of motion in one and two dimensions. Motion Blitz is a quick matching card game that consists of a deck of "Motion Cards" which picture motions in daily life and a selection of "Motion Symbols" displaying a path of motions: linear, projectile, circular, rotational, rolling, and simple harmonic motions. After playing, the teacher used 30 questions to stimulate student thinking and help students construct scientific knowledge. Finally, the students were evaluated through 6 question levels. 12 questions (following Bloom's taxonomy) were administered to students. These questions were classified according to different cognitive levels ranging from low-level thinking (knowledge, comprehension) to high-level thinking (application, analysis, synthesis, and evaluation). Data analysis showed that Motion Blitz's ability to elevate students' thinking level, with over 90% of students well at a low level and 59% at a high level approximately. In addition, data indicated that students' thinking scores became lower at a higher level of thinking. Problem-solving in physics is the use of equations to find unknown variables, as a consequence, some students dislike physics due to disliking mathematics. However, solving physics

problems does not always require equations; motion diagrams which represent a dot as an object and an arrow for displacement, velocity and acceleration. The method can solve problems in a one dimensional motion through acceleration without employing equations and yields the same results as using equations even though the motion diagram is only a drawing. Researchers thus decided to make Motion Diagrams on a Magnetic Board. The board aided student visualization of the relationship between position, time, velocity and acceleration and engaged the students through “learning by doing”. Also, findings demonstrated that Motion Diagrams on a Magnetic Board was employed by over 80% of the students in two-schools who solved all the questions in the set of linear-motion types of physics problems successfully. According to the results, Motion Diagrams on a Magnetic Board can be used in problem-solving viz., linear motion instead of using formulas and the students who were at moderate to low levels in physics preferred to use this tool.

### บทคัดย่อ

- เรื่อง : การพัฒนาความเข้าใจแนวคิดและการวิเคราะห์พฤติกรรมการเรียนรู้  
ด้วยการสอนแบบ ILDs เรื่อง การเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์และกฎการอนุรักษ์  
พลังงานกล
- ผู้วิจัย : ศักดิ์ชัย ราชนิยม
- ชื่อปริญญา : ปรัชญาดุษฐ์บัณฑิต
- สาขาวิชา : วิทยาศาสตร์ศึกษา
- อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุระ วุฒิพรหม
- คำสำคัญ : การจัดการเรียนรู้แบบบรรยายสาธิตเชิงปฏิสัมพันธ์, ฟิสิกส์, โพรเจกไทล์,  
กฎอนุรักษ์พลังงาน, ความรู้คงทน

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) สร้างและหาประสิทธิภาพชุดการทดลองเอนกประสงค์สำหรับการบูรณาการสอน เรื่อง การเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์และกฎการอนุรักษ์พลังงานกล (2) ออกแบบและพัฒนาการจัดการเรียนรู้ด้วยวิธีการสอนแบบ ILDs และ (3) พัฒนาความเข้าใจในแนวคิดเรื่อง การเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์และกฎการอนุรักษ์พลังงานกล กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้คือนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2562 จำนวน 40 คน ซึ่งได้มาโดยวิธีการเลือกแบบเจาะจง เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบไปด้วย ชุดการทดลองเอนกประสงค์ แผนการจัดการเรียนรู้ แบบทดสอบวัดความเข้าใจ แบบสังเกตพฤติกรรม ผลการวิจัยพบว่า ชุดการทดลองเอนกประสงค์ที่ผู้วิจัยสร้างและพัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพทางวิทยาศาสตร์เท่ากับ 96.33 เปอร์เซ็นต์ นักเรียนมีความเข้าใจในแนวคิดฟิสิกส์ เรื่อง การเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์และกฎการอนุรักษ์พลังงานกล สูงขึ้นที่ระดับนัยสำคัญ .05 มีความก้าวหน้าทางการเรียนเฉลี่ยทั้งชั้นอยู่ในระดับปานกลาง  $<g>$  เท่ากับ 0.64) และมีความรู้ที่คงทน พฤติกรรมโดยรวมของนักเรียนและครูผู้สอนตลอดการจัดการเรียนรู้มีลักษณะแบบเชิงรุก

## ABSTRACT

TITLE : THE CONCEPTUAL UNDERSTANDING DEVELOPMENT AND BEHAVIORAL LEARNING ANALYSIS BASED ON ILDS TEACHING IN PROJECTILE MOTION AND LAW OF CONSERVATION OF MECHANICAL ENERGY

AUTHOR : SAKCHAI RACHNIYOM

DEGREE : DOCTOR OF PHILOSOPHY

MAJOR : SCIENCE EDUCATION

ADVISOR : ASST. PROF. SURA WUTTIPROM, Ph.D.

KEYWORDS : INTERACTIVE LECTURE DEMONSTRATIONS (ILDS), PHYSICS, PROJECTILE, LAW OF CONSERVATION OF ENERGY / RETENTION

The objective of this research is to (1) design and assess the efficiency of simple experimental sets for integrated teaching on projectile motion and the law of the conservation of mechanical energy, (2) design and develop learning activities through the Interactive Lecture Demonstrations (ILDs) method, and (3) develop students' understanding of projectile motion and the law of the conservation of energy. The study involved 40 students who were purposively selected from grade 11 students during the second semester of the 2019 academic year. The research tools consisted of learning lesson plans, a multiple choice learning achievement test and classroom observation protocol. The results showed that the experimental set worked perfectly and served as suitable learning activities for these topics. The efficiency of the simple experimental set was 96.33 percent. The average students' achievement score was significantly increased with a statistical level of .05 and the average students' normalized gain was 0.64, categorized at the medium gain level. The students' retention rate was 0.64, categorized at the medium level. The behavior of the students and the teacher demonstrated active learning behavior.

## บทคัดย่อ

- เรื่อง : การพัฒนาทักษะการให้รหัส ICD-10 ของเจ้าหน้าที่บันทึกข้อมูลเวชระเบียน อิเล็กทรอนิกส์ด้วยโปรแกรมตรวจสอบข้อมูลเวชระเบียนผู้ป่วยนอก
- ผู้วิจัย : ศาครินทร์ หาบุศย์
- ชื่อปริญญา : ปรัชญาดุขฎิบัณฑิต
- สาขาวิชา : วิทยาศาสตร์ศึกษา
- อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐ ติษเจริญ
- คำสำคัญ : เวชระเบียน, ICD-10, การฝึกปฏิบัติการ, การทำเหมืองข้อมูล, โปรแกรมตรวจสอบ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาผลของการใช้โปรแกรมตรวจสอบข้อมูลเวชระเบียนผู้ป่วยนอก ร่วมกับการฝึกปฏิบัติการ เพื่อพัฒนาทักษะในการให้รหัส ICD-10 แก่เจ้าหน้าที่บันทึกข้อมูลเวชระเบียน ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการทำเหมืองข้อมูลในการวิเคราะห์ความผิดพลาดการให้รหัส ICD-10 ในระบบฐานข้อมูล 43 แห่ง แล้วนำผลการวิเคราะห์มาพัฒนาโปรแกรม HISAudit ที่ใช้ตรวจสอบข้อมูลเวชระเบียนผู้ป่วยนอกที่มารับบริการในหน่วยบริการ โปรแกรม HISAudit พัฒนาโดยเทคโนโลยี Microsoft Visual FoxPro ร่วมกับ Microsoft Excel และฐานข้อมูล MySQL กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย คือ เจ้าหน้าที่บันทึกข้อมูลเวชระเบียน พยาบาล และนักวิชาการสาธารณสุขประจำโรงพยาบาลและสถานอนามัยภายในจังหวัดแห่งหนึ่งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เครื่องมือวิจัยประกอบด้วย โปรแกรม HISAudit แบบวัดความรู้และทักษะ และแบบสอบถาม สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน IOC และ t-test ผลการวิจัย พบว่า ความแม่นยำในการวิเคราะห์ข้อมูลมีประสิทธิภาพดีมาก โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถวิเคราะห์ข้อมูลความผิดพลาดได้ดี และความรู้และทักษะในการให้รหัส ICD-10 ของเจ้าหน้าที่บันทึกข้อมูลเวชระเบียนหลังได้รับการฝึกปฏิบัติการพร้อมใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น มีพัฒนาพัฒนาสูงขึ้น เข้าใจหลักเกณฑ์การบันทึกข้อมูลมากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละความผิดพลาดของข้อมูลลดลง



## ABSTRACT

TITLE : ENHANCING ELECTRONIC HEALTH RECORD STAFF'S SKILLS OF ICD-10 CODING USING THE OUTPATIENT MEDICAL HEALTH RECORD MONITORING PROGRAM

AUTHOR : SAKARIN HABUSAYA

DEGREE : DOCTOR OF PHILOSOPHY

MAJOR : SCIENCE EDUCATION

ADVISOR : ASST. PROF. NADH DITCHAROEN, Ph.D.

KEYWORDS : MEDICAL RECORD, ICD-10, PROFESSION TRAINING, DATA MINING, MONITORING PROGRAM

The main objective of this research was to study the effects of an outpatient medical record monitoring program in conjunction with professional training to develop electronic health records through increasing staff skills for ICD-10 coding. The data mining techniques were applied to analyze coding errors in 43 file database systems. The results of the analysis were then used to develop the HISAudit program to examine outpatient medical records for the service unit. The HISAudit program was developed using technologies of Microsoft Visual FoxPro, Microsoft Excel, and MySQL databases. The samples used in this research involved medical records staff, nurses and public health scholars at hospitals and public health centers located in a province in the Northeast. The research tools included the HISAudit program, learning and skill assessment forms, and questionnaires. The statistics used for data analysis were mean, standard deviation, IOC, and t-test. The research results showed that the accuracy of the data analysis was very effective and at the highest level. The program developed was able to analyze coding errors proficiently and ICD-10 coding skills of staff after the training with the program were also markedly more proficient. This has the capability of aiding the electronic health records staff better understand coding criteria. Further, the percentage of coding errors decreased.

**บทคัดย่อ**

เรื่อง : การพัฒนาทักษะกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรมและแนวคิด เรื่อง แรงและการเคลื่อนที่ ด้วยชุดกิจกรรมสะเต็มศึกษา เรื่อง หุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติ

ผู้วิจัย : เอกพงศ์ บัวชุม

ชื่อปริญญา : ปรัชญาคุณภักดิ์บัณฑิต

สาขาวิชา : วิทยาศาสตร์ศึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุระ วุฒิพรหม

คำสำคัญ : กระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรม, หุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติ, แรง, การเคลื่อนที่, สะเต็มศึกษา

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) สร้างและหาประสิทธิภาพของหุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติ (2) ออกแบบและพัฒนาชุดกิจกรรมสะเต็มศึกษา เรื่อง หุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติ (3) พัฒนาทักษะกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรมและแนวคิด เรื่อง แรงและการเคลื่อนที่ กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้คือ นักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2563 จำนวน 27 คน เครื่องมือในการวิจัยประกอบไปด้วย หุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติ แผนการจัดการเรียนรู้ แบบทดสอบวัดความเข้าใจ แบบประเมินทักษะกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรม การจัดการเรียนรู้ใช้กระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรม 6 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นที่ 1 นักเรียนร่วมกันวิเคราะห์ปัญหาจากสถานการณ์ที่กำหนด จากนั้นกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ ขั้นที่ 2 นักเรียนรวบรวมข้อมูลและแนวคิดที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาจากหุ่นยนต์ต้นแบบ จากนั้นออกแบบวงจรเซนเซอร์อินฟราเรดและวงจรควบคุมมอเตอร์ ขั้นที่ 3 นักเรียนนำความรู้จากการรวบรวมข้อมูลมาใช้ออกแบบวงจรไฟฟ้าของหุ่นยนต์และโครงสร้างของหุ่นยนต์ ขั้นที่ 4 นักเรียนสร้างหุ่นยนต์ตามทีออกแบบไว้ ขั้นที่ 5 นักเรียนทดสอบหุ่นยนต์โดยใช้แอปพลิเคชัน Phyphox วัดความเร่งของหุ่นยนต์ และขั้นที่ 6 นักเรียนนำเสนอผลงานโดยการแข่งขันหุ่นยนต์ ผลการวิจัยพบว่า หุ่นยนต์เดินตามเส้นอัตโนมัติที่ผู้วิจัยสร้างและพัฒนาขึ้น มีประสิทธิภาพร้อยละ 98.51 จากการประเมินความก้าวหน้าทางการเรียนด้วยวิธีของ Hake นักเรียนมีความก้าวหน้าในทักษะกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรม อยู่ในระดับ ปานกลาง เท่ากับ 0.67 และมีความก้าวหน้าในความเข้าใจในแนวคิดฟิสิกส์ เรื่อง แรงและการเคลื่อนที่ อยู่ในระดับปานกลาง เท่ากับ 0.60

## ABSTRACT

TITLE : DEVELOPMENT OF SKILLS IN ENGINEERING DESIGN PROCESSES AND CONCEPTS OF FORCE AND MOTION WITH A LINE-FOLLOWER ROBOT STEM EDUCATION ACTIVITIES

AUTHOR : EKAPONG BUACHOOM

DEGREE : DOCTOR OF PHILOSOPHY

MAJOR : SCIENCE EDUCATION

ADVISOR : ASST. PROF. SURA WUTTIPROM, Ph.D.

KEYWORDS : ENGINEERING DESIGN PROCESSES, A LINE-FOLLOWER ROBOT, FORCE, MOTION, STEM EDUCATION

The objectives of this research were to (1) design and assess the efficiency of a line-follower robot (2) design and develop a STEM activity around a line-follower robot, and (3) develop engineering design process skills and concepts related to the topics of force and motion. The study involved 27 tenth-grade students in the second semester of the 2020 academic year. The research tools consisted of lesson plans, an FMCE test and an engineering design process skill evaluation. The learning activities followed a 6-step engineering design process. Stage 1: students analyze the problem from a given situation, and then set the conditions for designing and building the robot. Step 2: students gather information and ideas related to problem-solving with regard to the prototype robot, and then design an infrared sensor circuit and a motor control circuit. Step 3: students apply their knowledge from data collection to design robotic circuits and robot structures. Step 4: students build a robot according to the design. Step 5: students test the robot using the Phyphox application to measure the robot's acceleration. Step 6: students present their work through robotics competition. The results showed that the efficiency of a line-follower robot was 98.51 percent. Based on the Hake learning gain method, the students had a moderate level of gain in engineering design process skills <g> at 0.67 and moderate gain understanding force and motion concepts <g> at 0.60.