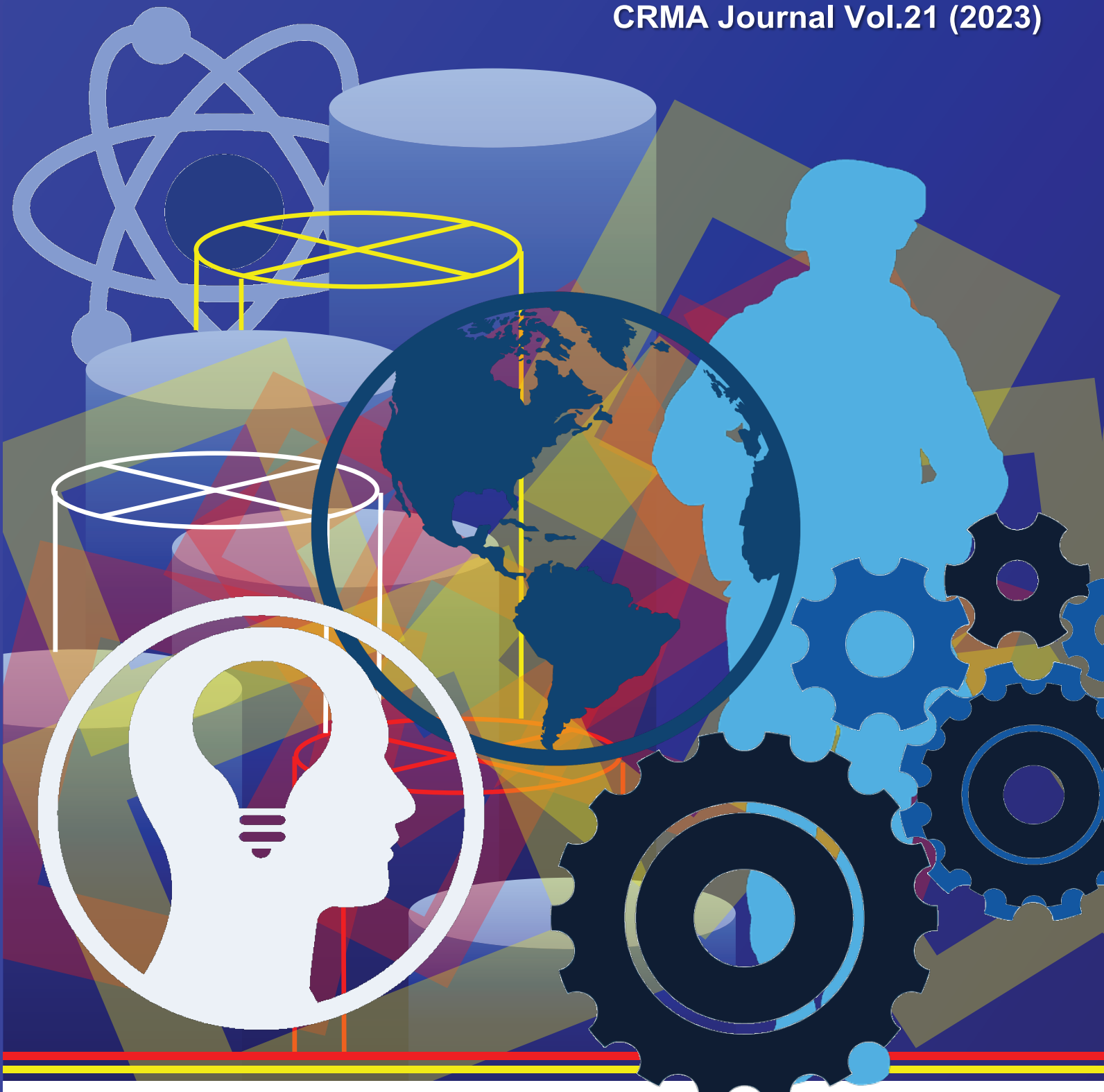




วารสารวิชาการ
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
ปีที่ 21 (2566)

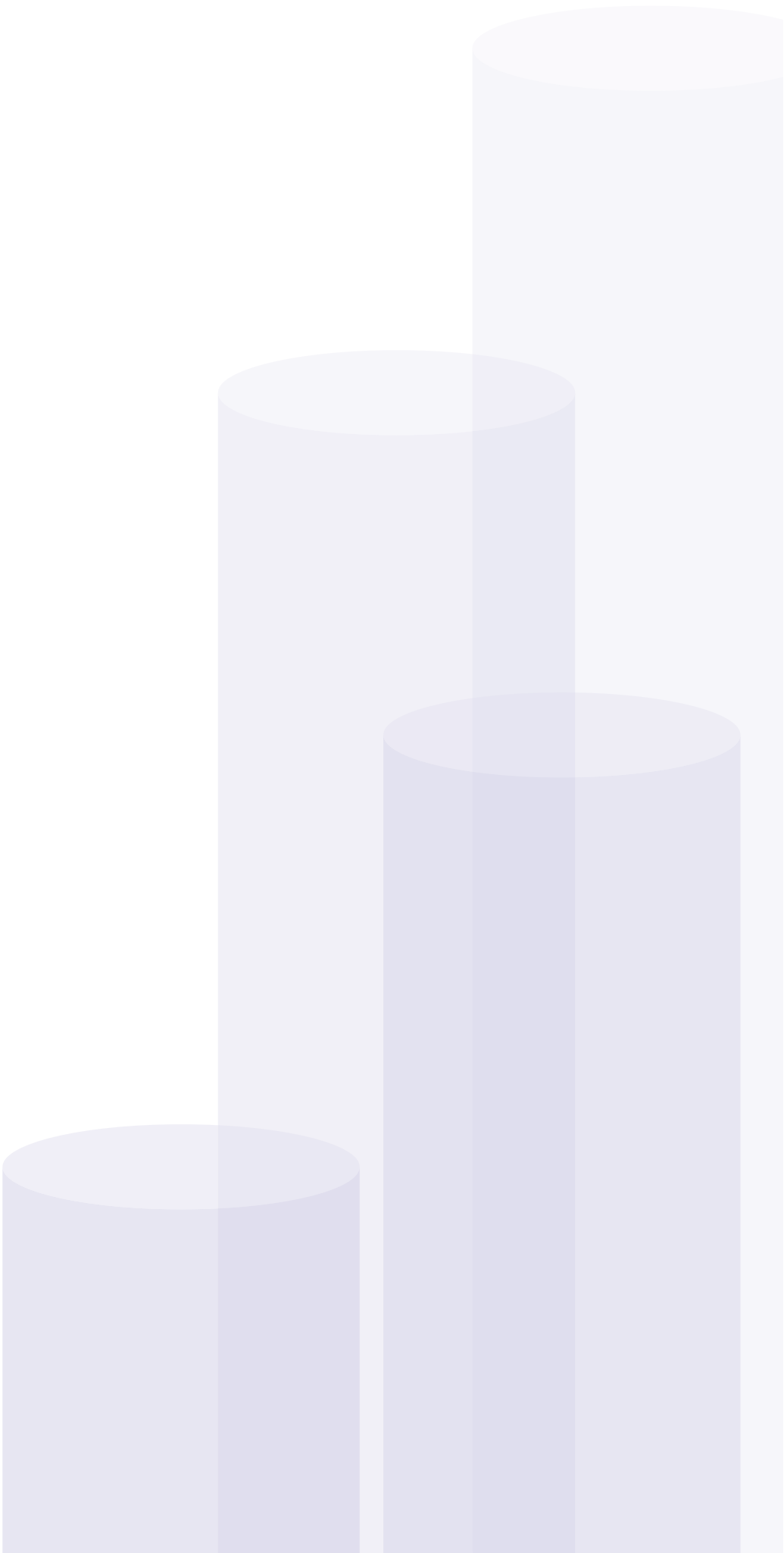
CRMA Journal Vol.21 (2023)



Chulachomklao
Royal Military Academy

CRMA Journal 2023

รวมพลังสร้างสรรค์การเรียนรู้ เคียงคู่คุณธรรมและจริยธรรม มุ่งสู่การเป็นผู้นำที่สมสมัย



**จัดทำโดย**

สภาคณาจารย์ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
ที่ปรึกษากิตติมศักดิ์

พลเอกหญิง ศ.เกียรติคุณ ดร.สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า
กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี
ที่ปรึกษา

พลโท ไกรภพ	ไชยพันธุ์
พลตรี อุดม	แก้วมหา
พลตรี รศ.ดร. พิรพล	สงน้อย
พลตรี ผศ. มนัส	ธนวนนท์
พันเอก ธนาวัฒน์	แสงสุวรรณ
พันเอก ทองคำ	ชุมพล
พันเอก ผศ.ดร. อโณทัย	สุขแสงพนมรุ่ง
พันเอก ปเสษฐา	สารลักษณ์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่มีคุณค่าของบุคลากรภายในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า กองทัพบก กองทัพไทย และบุคคลทั่วไป
2. เพื่อสร้างความตระหนัก และตื่นตัวในด้านการวิจัยและพัฒนาทางวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และการทหาร

ขอบเขต

1. การวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. การวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับการทหาร การรักษาความปลอดภัย และความมั่นคงทางทหาร

กำหนดการออกวารสาร

ปีละ 1 ฉบับ ในเดือนธันวาคม

บรรณาธิการ

พันเอก รศ.ดร. ผดุง หนึ่งสือ

กองบรรณาธิการ

พลอากาศโท ศ.ดร. นพพล หาญกล้า

พลตรีหญิง ศ. กุศยา สุวรรณวิทย์

พลตรี ผศ.ดร. ชวน จันทวาลย์

นาวาอากาศเอก ศ.ดร. ประสาทพร วงษ์คำช้าง โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

ศ.ดร. จงรักษ์ ผลประเสริฐ

ศ.ดร. ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

ศ.ดร. สมชาย วงศ์วิเศษ

ศ.ดร. กุลเชษฐ์ เพียรทอง

ศ.ดร. เฉลิมชนม์ สติระพจน์

รศ.ดร. อุดมเกียรติ นนทแก้ว

รศ.ดร. เวทิน ปิยรัตน์

รศ.ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์

รศ.ดร. ยุทธพงศ์ เพียรโรจน์

รศ.ดร. อธิพนธ์ เวศพันธุ์

ผศ.ดร. สราวุธ เวชกิจ

พันเอก ผศ.ดร. อโณทัย สุขแสงพนมรุ่ง

พันเอก รศ.ดร. ปรีชา อภิวัฒน์ตระกูล

พันเอก รศ.ดร. นราเทพ พุกขศิริ

ข้าราชการบำนาญ

(โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช)

ข้าราชการบำนาญ

(โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช)

ข้าราชการบำนาญ

(โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า)

โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

มหาวิทยาลัยมหิดล

โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

ผู้กลั่นกรองและประเมินบทความ (ภายนอก)

พลอากาศโท ศ.ดร. นพพล หาญกล้า

พันเอก ผศ.ดร. ประเวทย์ มงคลศิริ

นาวาอากาศเอก ศ.ดร. ประสาทพร วงษ์คำช้าง

รศ.ดร. เวทิน ปิยรัตน์

ข้าราชการบำนาญ

(โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช)

ข้าราชการบำนาญ

(โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า)

โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รศ.ดร. นิตต์อลิน พันธุ์ภัย
รศ.ดร. อัครรัตน์ พูลกระจำ
รศ.ดร. พัฒตรา อีร์พิบูลย์เดช
รศ.ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์
รศ.ดร. ศศมล ผาสุก

รศ.ดร. พิมพ์พรรณ ปรี่องาม
รศ.ดร. ยุทธพงศ์ เพียรโรจน์
ผศ.ดร. สายสุนีย์ จำรัส
ผศ.ดร. สุรวุฒิ ยะนิล
ผศ.ดร. ตระการ ประภัสพงษา
ผศ.ดร. พรทิพย์ แก่งอินทร์
ผศ.ดร. กำพล วรดิษฐ์
ผศ.ดร. ศุภศิลป์ ทวีศักดิ์
ผศ.ดร. วราภรณ์ กลิ่นบุญ
ดร. เสกสรรค์ สุทธิสงค์
ดร. ภัทริน โมรา
ดร. ศาตนาฏ กิจศิริานวัตร

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรม
ราชูปถัมภ์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยบูรพา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

ผู้กลั่นกรองและประเมินบทความ (ภายใน)

พันเอก รศ.ดร. ผเดิม หนังสือ
พันเอก ผศ.ดร. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง
พันเอกหญิง รศ.ดร. สุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา
พันโทหญิง ดร. ปวีณา วัธบัว

โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

คณะทำงานประจำกองบรรณาธิการ

พันเอก รศ.ดร. ผเดิม หนังสือ
พันเอกหญิง พัดชา เพิ่มพิพัฒน์
พันเอกหญิง ผศ. ณัฐมณีนธ์ สมราชสีจันดา
พันตรี ผศ.ดร. ปริญญา เกียรติภัชชัย
ร้อยโทหญิง ธัญญลักษณ์ เอื้อสกุล

พันเอกหญิง รศ.ดร. สุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา
พันเอก ผศ.ดร. ฐานัส มานวงศ์
พันโทหญิง ดร. ปวีณา วัธบัว
ร้อยเอกหญิง กังสดาล อินทกุล

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่มีคุณค่าของบุคลากรภายในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า กองทัพบก กองทัพไทย และบุคคลทั่วไป โดยมีขอบเขตการตีพิมพ์ในด้านการวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และการวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับการทหาร การรักษาความปลอดภัย และความมั่นคง วารสารฯ มีกำหนดออกในเดือนธันวาคมของแต่ละปี โดยในฉบับปัจจุบัน (ปี 2566) เป็นปีที่ 21

วารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ได้รับการคัดเลือกเข้าสู่ฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai-Journal Citation Index Centre-TCI) ในการประเมินคุณภาพรอบที่ 4 โดยได้รับการจัดอันดับให้อยู่ในกลุ่มที่ 2 และได้รับการรับรองคุณภาพจนถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2567

สำหรับ “วารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ปีที่ 21 พ.ศ. 2566” ฉบับนี้มีบทความทางวิชาการรวม 8 บทความ เนื้อหาการวิจัยของบทความในปีนี้แสดงถึงความก้าวหน้าในการสร้างองค์ความรู้ใหม่ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เช่น การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศในการวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินด้วยข้อมูลดาวเทียม อัลกอริทึมแห่งความสัมพันธ์ระหว่างการไร้วัวตนกับอาชญากรรมไซเบอร์ และการศึกษาเปรียบเทียบค่ากำลังของวัฏธนะเปิดแรงสูงจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายและค่าจากการทดลอง เป็นต้น

ผู้สนใจวารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า สามารถอ่านบทความทั้งในอดีตและปัจจุบันได้จาก <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/crma-journal> สำหรับผู้ที่สนใจส่งบทความทางวิชาการเพื่อขอให้วารสารฯ ทำการเผยแพร่ สามารถใช้ URL นี้ได้เช่นเดียวกัน

พันเอก รศ.ดร.

(ผเดิม หนังสือ)

บรรณาธิการ

บทความหรือข้อคิดเห็นใดๆ ที่ปรากฏในวารสารเป็นวรรณกรรมของผู้เขียน
บรรณาธิการหรือโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าไม่จำเป็นต้องเห็นด้วย

The ideas and opinions expressed in the journal are those of the authors and not necessarily those of the editor or
Chulachomklao Royal Military Academy.

ติดต่อ บรรณาธิการ วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

99 ถ.สุวรรณศร ต.พรหมณี อ.เมือง จ.นครนายก 26001

โทร. 0-3739-3010-4 ต่อ 62749 โทรสาร 037-393-0240

สารบัญ

☆	การศึกษาพัฒนาหยกเนไฟรต์เพื่อลดก๊าซพิษไอเสียในท่อรถจักรยานยนต์ วรารณ อักโขวงศ์	1
☆	การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศในการวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลง การใช้ที่ดินด้วยข้อมูลดาวเทียม สาโรช แสงเมือง รองศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ พันเอกหญิง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤตยาภรณ์ เจริญผล	12
☆	อัลกอริทึมแห่งความสัมพันธ์ระหว่างการไร้วัวตนกับอาชญากรรมไซเบอร์ ดร. ประเมศวร์ กุมารบุญ	28
☆	การพัฒนาระบบการทำกลีเซอรินบริสุทธิ์จากผลพลอยได้ของ การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว พันเอกหญิง พัดชา เพิ่มพิพัฒน์	45
☆	The Study of the Optimal Route for Waste Collection by Using Vehicle Routing Problem in Chulachomklao Royal Military Academy Lieutenant Witchapon Pontuethanagoon	59
☆	การศึกษาเปรียบเทียบค่ากำลังของวัตถุระเบิดแรงสูงจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่าย และค่าจากการทดลอง พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืองศักดิ์ อยู่ชา พันธุ์ ดร. จิตติพงษ์ กาวิชัย	76
☆	ผลของโครงสร้างการทอเส้นใยเสริมพอลิเบนซอกซาซีนเรซินต่อคุณสมบัติทางกล ร้อยเอกหญิง กังสดาล อินทกุล	94
☆	การพัฒนาระบบการผลิต “ข้าวหอมมะลิกิ่งสำเร็จรูป” เพื่อใช้เป็นเสบียงประจำบุคคล พันธุ์ ดร. ปัญญา จันทน์นอมสุข พันเอก มารุต วัชรคุปต์ พันเอกหญิง รองศาสตราจารย์ ดร. จินตนา แสนวงศ์	110

การศึกษาพัฒนาหยกเนไฟรต์เพื่อลดก๊าซพิษไอเสียในท่อรถจักรยานยนต์

Study of Development of Jade Nephrite to Reduce Toxic Exhaust Gases in Motorcycle Pipes

วราภรณ์ อักโขวงศ์
Waraporn Akkhowong

สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม
นครพนม 48000 ประเทศไทย

Faculty of Industrial Technology, Nakhon Phanom University,
Nakhon Phanom 48000, Thailand

*Corresponding Author. E-mail : Mouynpu@gmail.com

(Received: June 7, 2022, Revised: September 12, 2022, Accepted: September 28, 2022)

บทคัดย่อ : งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ดังนี้ 1. เพื่อออกแบบและสร้างแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ ที่ใช้หยกเนไฟรต์เป็นส่วนประกอบ 2. เพื่อหาค่าสมรรถนะของแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ ที่ใช้หยกเนไฟรต์ โดยการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้หยกเป็นส่วนผสมในการสร้างแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ นำหยกเนไฟรต์ที่ทำการบดละเอียดมาผสมกับดินคอมพาวด์ ในอัตราส่วน 70:30 ในการสร้างแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์หยกเนไฟรต์ การอัดขึ้นรูปเนื้อดินจะถูกนำไปกรองเพื่อให้มีขนาดของเม็ดดินที่ใกล้เคียงกัน เมื่อทำการขึ้นรูปตามขนาด และเผาด้วยอุณหภูมิห้อง ถึง 925 องศาเซลเซียส รวมระยะเวลา 5 ชั่วโมง พักเตา 5 ชั่วโมง จากนั้นเผาที่อุณหภูมิ 925 องศาเซลเซียส ถึง 1,200 องศาเซลเซียส ต่ออีก 5 ชั่วโมง นำไปติดตั้งในคอท่อไอเสียรถจักรยานยนต์ยี่ห้อ YAMAHA รุ่น GRAND FILANO เครื่องยนต์ 125 ซีซี เพื่อทำการวัดค่าด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย Gas Analyzer ทำการทดสอบที่รอบเครื่องยนต์ 1,500, 4,500, และ 6,500 รอบต่อนาที ชุดแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ หยกเนไฟรต์ ที่ออกแบบและสร้างมีสมรรถนะในการกรองค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ดีขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีไม่ติดตั้ง สามารถลดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ลงไปได้จากค่าเฉลี่ย 0.178% เป็น 0.012% และสามารถลดค่าก๊าซไฮโดรคาร์บอน ลงไปได้จากค่าเฉลี่ย 51.6 ppm เหลือเพียงค่าเฉลี่ย 19.8 ppm หรือลดลงได้ 38.7% และ ในรอบเครื่องยนต์ 4,500 รอบต่อนาที ค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ลดลงไปได้จากค่าเฉลี่ย 0.45% เป็น 0.038% และสามารถลดก๊าซไฮโดรคาร์บอน (HC) ลงไปได้จากค่าเฉลี่ย 61.2 ppm เหลือเพียงค่าเฉลี่ย 38.4 ppm หรือลดลงได้ 62.7% ลดมลพิษที่ปล่อยจากท่อไอเสียรถจักรยานยนต์ได้ เครื่องยนต์ 4,500 รอบต่อนาทีที่ค่า 0.381% และค่าเฉลี่ยที่มีค่าคาร์บอนมอนอกไซด์เฉลี่ยต่ำสุดอยู่ที่ รอบเครื่องยนต์ 6,500 รอบต่อนาที อยู่ที่ค่า 0.005% ซึ่งสามารถลดค่าไปได้ถึง 0.376% ส่วนค่าที่รอบเครื่องยนต์ 4,500 รอบต่อนาที นั้นอยู่ที่ 0.012% เป็นค่ากลางของรอบเครื่องยนต์ทั้ง 3 ค่า ทั้งนี้มีการทดสอบเพิ่มที่รอบเครื่องยนต์ 2,000 ได้ค่าเฉลี่ยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ กรณีไม่ติดตั้งและติดตั้ง จากค่า 0.19% เหลือ 0.013% สามารถลดค่าได้ 0.17% ค่าไฮโดรคาร์บอน (HC) จากค่า 53 ppm. เหลือ 21 ppm. สามารถลดค่าได้ 32 ppm. และการทดสอบที่รอบเครื่องยนต์ 2,500 รอบต่อนาที ค่าเฉลี่ยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ กรณีไม่ติดตั้งและติดตั้ง จากค่า 0.21% เหลือ 0.015% สามารถลดค่าได้ 0.19% ค่าไฮโดรคาร์บอน จากค่า 56 ppm.

เหลือ 23 ppm. สามารถลดค่าได้ 33 ppm. ในรอบเครื่องยนต์ต่ำแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ ที่ใช้หยกเนไฟรต์ สามารถลดปริมาณแก๊สไอเสียได้

คำสำคัญ: แคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์หยกเนไฟรต์ การอัดขึ้นรูป ดินคอมพาวด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน

This research has the following objectives: 1. To design and build a catalytic converter using nephrite jade constituents 2. To determine the performance of the catalytic converter using nephrite jade by studying the feasibility of using jade as an ingredient in the construction of catalytic converters. The finely crushed nephrite jade is mixed with clay compound at a ratio of 70:30 to form a catalytic. nephrite jade converter. Freire Soil extrusion is filtered so that the grain size is similar. when forming to size and burned at room temperature to 925 degrees Celsius, totaling time 5 hours, resting in the oven 5 hours, then burning with temperature 925 degrees Celsius to 1,200 degrees Celsius for another 5 hours, installed in the Yamaha motorcycle exhaust pipe. GRAND FILANO model, 125 cc engine to measure with an exhaust gas analyzer, Gas Analyzer, test engine rpm 1,500 rpm, catalytic set nephrite jade converter It is designed and built to have better carbon monoxide (CO) filtration performance compared to not installed. Carbon monoxide (CO) can be reduced from an average of 0.178% to 0.012%. And the hydrocarbon (HC) gas value was reduced from an average of 51.6 ppm to an average of 19.8 ppm, or a 38.7% reduction. 0.45% to 0.038% and can reduce hydrocarbon (HC) gases from an average 61.2 ppm to an average of 38.4 ppm, a 62.7% reduction in emissions from motorcycle exhaust pipes. The engine is 4,500 rpm at 0.381% and the average with the lowest average carbon monoxide is Engine rpm 6,500 rpm is at 0.005%, which can reduce the value by 0.376%, while the value at engine rpm 4,500 rpm is 0.012%, which is the middle of all 3 Engine rpm. There is an additional test at 2,000 engine rpm, the average carbon monoxide (CO) is not installed and installed from 0.19% to 0.013%, can reduce the value by 0.17%, hydrocarbon (HC) value from 53 ppm. to 21 ppm. Can reduce the value by 32 ppm. And testing at 2,500 rpm engine rpm, average carbon monoxide (CO) in case of not installing and installing from 0.21% to 0.015%, can reduce the value by 0.19% Hydrocarbon (HC) value from 56 ppm. to 23 ppm. . Can reduce the value by 33 ppm. in low catalytic engine cycles converter using nephrite jade can reduce the amount of exhaust gas

Keyword: Extruded Nephrite Jade Catalytic Converter, Soil Compound, Carbon Monoxide, Hydrocarbons

1. บทนำ

ปัญหามลพิษก๊าซเรือนกระจกฝุ่น PM 2.5 หมอกควันพิษที่กระจายอยู่ในทุกพื้นที่ ทั้งในเมืองและเขตชนบท ปัญหาส่วนใหญ่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของรถยนต์และรถจักรยานยนต์ที่ผ่านกระบวนการการใช้งานมาอย่างเป็นระยะเวลาโดยปกติเครื่องยนต์และรถจักรยานยนต์ถ้ามีอายุการใช้งานนานเกินกว่า 5 ปี ขึ้นไปเครื่องยนต์จะมีการสึกหรอที่สูง และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์จะลดลง ทำให้การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศตามมา การเผาไหม้ของเครื่องยนต์สันดาปภายในของรถยนต์และรถจักรยานยนต์ที่ใช้สัณฐานกันทั่วไปพบว่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide: CO) คือหนึ่งในก๊าซพิษที่ถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการสันดาปภายในของเครื่องยนต์ [1] ซึ่งก๊าซนี้เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส แต่มีความเป็นอันตรายและเป็นพิษอย่างร้ายแรงต่อร่างกายของมนุษย์

การออกแบบเครื่องยนต์รุ่นใหม่ๆนั้นได้มีการนำแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ (Catalytic Converter) [2] มาติดตั้งใช้เพื่อจำกัดการปล่อยก๊าซไอเสียออกจากเครื่องยนต์ แคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์นี้มีลักษณะเป็นรูคล้ายรังผึ้งมีหน้าที่กรองสารพิษ โดยสารพิษจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับไส้กรองของแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ ทำให้ไอเสียที่ออกมามีความเป็นพิษที่ลดลง สำหรับรถจักรยานยนต์ที่มีจำนวนปริมาณกระบอกสูบไม่เกิน 150 ซีซี จะไม่มีการติดตั้งแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ เนื่องจากราคาที่แพงและพลังกำลังของเครื่องยนต์ที่สูงสูญเสียในประเทศไทยรถจักรยานยนต์ที่มีปริมาตรลูกสูบไม่เกิน 150 ซีซีนั้นมีปริมาณการใช้งานที่มาก เพราะความสะดวกสบายและราคาที่ไม่แพง อีกทั้งค่าการบำรุงรักษาที่ต่ำกว่า จึงทำให้ประชากรส่วนใหญ่นิยมใช้รถจักรยานยนต์เป็นยานพาหนะในชีวิตประจำวัน สิ่งที่ส่งผลตามมาคือปัญหามลพิษทางอากาศที่มีอัตราการเติบโตแปรผันตรงกับจำนวนรถจักรยานยนต์ที่มีการใช้งาน

สำหรับไส้กรองของแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์นั้นจะมีทองคำขาวที่ใช้ในการทำประกอบเป็นไส้กรองของตัวแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งทองคำขาวนี้มีราคาที่สูงมาก ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะศึกษา ออกแบบและสร้างแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ ที่มีหยกเนไฟรต์ (Nephrite) เป็นส่วนประกอบทดแทนทองคำขาวขึ้นมาเพื่อทดสอบหาสมรรถนะการลดก๊าซพิษที่ออกมาจากเครื่องยนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากท่อไอเสียรถจักรยานยนต์ โดยจะทำการเปรียบเทียบค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และค่าไฮโดรคาร์บอน (HC) ทั้งก่อนและหลังการติดตั้ง

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อออกแบบและสร้างแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้หยกเนไฟรต์เป็นส่วนประกอบ

2.2 เพื่อหาค่าสมรรถนะของแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้หยกเนไฟรต์

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้หยกเป็นส่วนผสมในการสร้างแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ หยกเจไดต์ (Jadeite) และหยกเนไฟรต์ (Nephrite) [3] จึงถูกนำมาศึกษาเปรียบเทียบ โดยรายละเอียดของหยกทั้งสองเป็นดังนี้

3.1 หยกเจไดต์ (Jadeite) มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นโซเดียมอะลูมิเนียมซิลลิเกต (Sodium Aluminium Silicate) มีสูตรทางเคมีเป็น $\text{NaAl}(\text{SiO}_3)_2$, โดยปกติมักจะมียูเรียมเข้มข้นกว่าหยกเนไฟรต์ จัดเป็นหยกชนิดคุณภาพดี อยู่ในระบบผลึกแบบหนึ่งแกนเอียง โดยธรรมชาติมักพบเป็นก้อนเนื้อแน่นประกอบด้วยผลึกขนาดเล็กอยู่รวมกัน มีความยาวตั้งแต่แบบแก้วจนถึงแบบน้ำมัน หยกเจไดต์มีความแข็ง 6.5–7 มีสีในเนื้อพลอยเฉพาะตัว และมักไม่สม่ำเสมอ มีสีเข้มและจางของแต่ละผลึกรวมกันอยู่

3.2 หยกเนไฟรต์ (Nephrite) มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นแคลเซียมแมกนีเซียมซิลิเกต (Calcium Magnesium Silicate) มีสูตรทางเคมีเป็น $\text{Ca}_2(\text{Mg, Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ อยู่ในระบบผลึกหนึ่งแกนเอียง โดยธรรมชาติมักพบเกิดเป็นผลึกกลุ่มที่มีขนาดเล็กกรุบเส้นใยเดียวกัน หยกเนไฟรต์มีความแข็ง 6–6.5 มีความวาวแบบแก้วถึงน้ำมัน สีสีมีความเฉพาะตัวเหมือนหยกเจไดต์

จากนั้น นำหยกทั้ง 2 ชนิด มาบดให้มีขนาดเล็กเป็นผง กรองด้วยกระชอนตาถี่ เพื่อให้ได้เนื้อผงหยกที่ละเอียด และไม่มีเศษผงวัสดุอื่นเจือปน นำดินคอมพาวด์ที่ผ่านกระบวนการบดและกรองด้วยกระชอนเพื่อให้ได้เนื้อดินคอมพาวด์ที่มีขนาดละเอียดและเนื้อเหมือนกับหยกที่จะนำมาทำการทดสอบ หลังจากกระบวนการเตรียมผงหยกเจไดต์ (Jadeite) หยกเนไฟรต์ (Nephrite) และดินคอมพาวด์



ภาพที่ 1 ดินคอมพาวด์ หยกเจไดต์ และหยกเนไฟรต์

นำมาผสมเพื่อปั้นขึ้นรูปทำการทดสอบโดยแบ่งการวิจัยเป็นลักษณะดังนี้

1. แบ่งตามประเภทของผงหยกที่นำมาผสมปั้นขึ้นรูปคือหยกเจไดต์ (Jadeite) และหยกเนไฟรต์ (Nephrite)

2. แบ่งตามอัตราส่วนมวลน้ำหนักรในการผสมในแต่ละชิ้นงาน โดย ชิ้นที่ขึ้นรูปใช้มวลน้ำหนักรเท่ากับ 10 กรัม อัตราส่วนผสมที่ดินคอมพาวด์ต่อหยกเจไดต์ (Jadeite)

ตั้งอุณหภูมิเตาที่ 1,200 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง ทำการทดสอบ ชิ้นงานที่ 1 อัตราส่วนเป็น 7 : 3 กรัม ชิ้นงานที่ 2 อัตราส่วนเป็น 5 : 5 กรัม ชิ้นงานที่ 3 อัตราส่วนเป็น 7 : 3 กรัม ชิ้นที่ 4 อัตราส่วน หยกเจไดต์ (Jadeite) 10 กรัม ชิ้นงานที่ 5 ถึง 8 เป็นอัตรา

ส่วนผสมระหว่าง ดินคอมพาวด์กับหยกเนไฟรต์ (Nephrite) ในอัตราส่วนผสมเท่ากันกับชิ้นที่ 1-ถึง 3 ส่วนชิ้นงานที่ 8 เป็นหยกเนไฟรต์ (Nephrite) ล้วน 10 กรัม นำมาขึ้นรูปตามแบบ ปล่อยให้แห้งในอุณหภูมิห้อง จากนั้นนำเข้าเตาเผา ความร้อนสูง เริ่มการเผา อุณหภูมิห้อง 28 องศาเซลเซียส ถึง 925 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นพักเตาเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง ทำการเผาต่อโดยจากนั้นรอให้เตาเย็นในอุณหภูมิห้องทำการเปิดเตาขึ้นงานออกมาเพื่อทำการบันทึกข้อมูล



ภาพที่ 2 หยกปั้นขึ้นรูปทรงกลมเตรียมเผาในเตาความร้อนสูง

จากการทดสอบพบว่า การเผาชิ้นงานในเตาเผาอุณหภูมิ เริ่มต้น 28 – 925 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 5 ชั่วโมงพบว่า ชิ้นงานที่ 1 มีอัตราส่วนผสมดินคอมพาวด์ 3 กรัม ต่อหยกเจไดต์ (Jadeite) 7 กรัม คงรูป ชิ้นงานที่ 2 อัตราส่วนผสมดินคอมพาวด์ 5 กรัม ต่อหยกเจไดต์ (Jadeite) 5 กรัม คงรูป ชิ้นงานที่ 3 อัตราส่วนผสมดินคอมพาวด์ 7 กรัม ต่อหยกเจไดต์ (Jadeite) 3 กรัม คงรูป ชิ้นงานที่ 4 เป็นหยกเจไดต์ (Jadeite) ล้วน 10 กรัม คงรูป ชิ้นงานที่ 5 อัตราส่วนผสมระหว่างดินคอมพาวด์ 3 กรัม ต่อหยกเนไฟรต์ (Nephrite) 7 กรัม คงรูป ชิ้นงานที่ 6 อัตราส่วนดินคอมพาวด์ 5 กรัม ต่อหยกเนไฟรต์ (Nephrite) 5 กรัม คงรูป ชิ้นงานที่ 7 อัตราส่วนดินคอมพาวด์ 7 กรัม ต่อหยกเนไฟรต์ (Nephrite) 3 กรัม คงรูป ชิ้นงานที่ 8 เป็นหยกเนไฟรต์ (Nephrite) ล้วน 10 กรัม ไม่คงรูป ลักษณะแตกเป็นชิ้นส่วน



ภาพที่ 3 ก่อนหยกที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูง

หลังจากพักเตาระยะเวลา 5 ชั่วโมง นำชิ้นงานเผาต่อที่อุณหภูมิเริ่มต้น 925 – 1,200 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 5 ชั่วโมง ปลอบให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง พบว่าชิ้นงานที่ 1 ดินคอมพาวด์ 3 กรัม ต่อหยกเจไดต์ (Jadeite) 7 กรัม หลอมละลายไม่คงรูปเนื้อเป็นเซรามิกส์ ชิ้นงานที่ 2 ดินคอมพาวด์ 5 กรัม ต่อหยกเจไดต์ (Jadeite) 5 กรัม หลอมละลายไม่คงรูปเนื้อเป็นเซรามิกส์ ชิ้นงานที่ 3 ดินคอมพาวด์ 7 กรัม ต่อหยกเจไดต์ (Jadeite) 3 กรัม หลอมละลายไม่คงรูปเนื้อเป็นเซรามิกส์ ชิ้นงานที่ 4 เป็นหยกเจไดต์ (Jadeite) ล้วน 10 กรัม หลอมละลายไม่คงรูปเนื้อเป็นเซรามิกส์ ชิ้นงานที่ 5 ดินคอมพาวด์ 3 กรัม ต่อหยกเนไฟรต์ (Nephrite) 7 กรัม ไม่หลอมละลาย คงรูปเนื้อเป็นเซรามิกส์ ชิ้นงานที่ 6 ดินคอมพาวด์ 5 กรัม ต่อหยกเนไฟรต์ (Nephrite) 5 กรัม หลอมละลาย 50% คงรูป 50% เป็นเนื้อเซรามิกส์ ชิ้นงานที่ 7 ดินคอมพาวด์ 7 กรัม ต่อหยกเนไฟรต์ (Nephrite) 3 กรัม หลอมละลายไม่คงรูป เนื้อเป็นเซรามิกส์ ชิ้นงานที่ 8 เป็นหยกเนไฟรต์ (Nephrite) ล้วน 10 กรัม ไม่หลอมละลาย ไม่คงรูป ลักษณะแตกเป็นชิ้นส่วน เนื้อเป็นเซรามิกส์



ภาพที่ 4 หยกที่ผสมดินคอมพาวด์เพื่อทดสอบการทนความร้อน

หยกชนิดชิ้นงานที่สามารถทนความร้อนได้ดีที่สุดคือ ชิ้นงานชิ้นที่ 5 ดินคอมพาวด์ 3 กรัม ต่อหยกเนไฟรต์ (Nephrite) 7 กรัม ไม่หลอมละลายและไม่เปลี่ยนรูปเนื้อเป็นเซรามิกส์ เหมาะสำหรับการพัฒนาขึ้นรูปทำแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ สำหรับรถจักรยานยนต์ต่อไป

มีการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาเนื้อคอร์เดียไรท์ (Cordierite) สำหรับสร้างแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ โดยใช้วัสดุภายในประเทศ [4] เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการสร้างแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ เพื่อลดปริมาณก๊าซไอเสียที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาวัสดุอื่น มาทดสอบทำการศึกษาเพื่อทำการลดก๊าซพิษจากท่อไอเสียรถจักรยานยนต์โดยใช้ดินคอมพาวด์เซรามิกส์ แคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ เพื่อพัฒนาใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในรถจักรยานยนต์ [5]

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้หยกเป็นส่วนผสมในการสร้างแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ หยกเจไดต์และหยกเนไฟรต์ พบว่าหยกที่สามารถทนความร้อนได้สูงและนำมาผสมกับดินคอมพาวด์ [6] อัดขึ้นรูปเผาด้วยความร้อนสูงได้นั้นคือหยกเนไฟรต์ ซึ่งหยกเนไฟรต์นี้สามารถนำมาพัฒนาใช้ในอุตสาหกรรมไฟฟ้าและยานยนต์ได้ คุณสมบัติการทนความร้อนและการคงรูปของหยกที่ผสมกับดินคอมพาวด์โดยคุณสมบัติของดินคอมพาวด์ ช่วยให้เนื้อหยกเรียงตัวอัดแน่น



ภาพที่ 5 กระบวนการบดหยกเนไฟรต์ก่อนทำการขึ้นรูป

4. วิธีดำเนินการศึกษา

4.1 การสร้างแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ หยกเนไฟรต์ จากงานวิจัยที่ผ่านมา [6] พบว่าหยกเนไฟรต์สามารถนำไปขึ้นรูปเพื่อทำแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ได้ โดยในงานวิจัยครั้งนี้จะทำการผสมอัตราส่วนของหยกเนไฟรต์ที่ทำการบดละเอียดดังภาพที่ 5 กับดินคอมพาวด์ในอัตราส่วน 70:30 ในการสร้างแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ หยกเนไฟรต์ อัตราส่วนผสมได้จากการศึกษาจากงานวิจัยที่ได้ศึกษาและการทดสอบการปั้นขึ้นรูป การอัดขึ้นรูปนั้นเนื้อดินจะถูกนำไปกรองละเอียดดังภาพที่ 1 เพื่อให้ขนาดของเม็ดดินมีขนาดใกล้เคียงกัน เมื่อทำการขึ้นรูปตามขนาดที่ต้องการแล้วก็จะถูกนำไปเผาในเตาความร้อนสูงดังภาพที่ 7 โดยอุณหภูมิเริ่มต้นตามอุณหภูมิห้อง ณ วันที่ทำการทดลอง 29 องศาเซลเซียส โดยทำการเผาจนอุณหภูมิถึง 925 องศาเซลเซียส รวมระยะเวลา 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะทำการพักเตาเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นจะเผาต่อด้วยอุณหภูมิ 925 องศาเซลเซียส ถึง 1,200 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นทำการพักให้ชิ้นงานเย็นตัวลงตามธรรมชาติก็จะได้แคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ ที่สร้างจากหยกเนไฟรต์ (Nephrite) เรียบร้อย ก็นำไปติดตั้งในคอท่อไอเสียที่ออกแบบและสร้างเพื่อการบรรจุแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์หยกเนไฟรต์ เพื่อเตรียมการทดสอบกับรถจักรยานยนต์ต่อไป ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 6 เนื้อดินคอมพาวด์ กรองละเอียดสำหรับผสมขึ้นรูป



ภาพที่ 7 การขึ้นรูปหยกเนไฟรต์กับดินคอมพาวด์และการนำเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูง



ภาพที่ 8 การติดตั้งชุดแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์หยกเนไฟรต์ กับชุดคอท่อไอเสียที่ได้ออกแบบ

จากนั้นทำการประกอบตัวท่อเข้ากับรถจักรยานยนต์เพื่อทำการทดสอบ โดยรถจักรยานยนต์ที่นำมาทดสอบได้แก่ รถจักรยานยนต์ยี่ห้อ YAMAHA รุ่น Grand Filano ขนาด 125 ซีซี.



ภาพที่ 9 รถจักรยานยนต์ Grand Filano ที่ติดตั้งท่อไอเสียที่มีแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ หยกเนฟไตร ภายในคอท่อไอเสีย

4.2 ชุดเครื่องมือวัด Gas Analyzer

ชุดเครื่องมือวัดและวิเคราะห์ปริมาณแก๊สไอเสีย ยี่ห้อ KOENG รุ่น KEG-200 ดังภาพที่ 10 ซึ่งเป็นเครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียสามารถวัดค่าก๊าซได้ทั้งที่ควันมากหรือน้อยได้ตามเกณฑ์ที่ใช้ในสถานตรวจสภาพรถยนต์และรถจักรยานยนต์ (ตรอ.) ตามมาตรฐานกรมการขนส่งทางบกของประเทศไทย โดยคุณลักษณะเฉพาะและค่าความแม่นยำของเครื่องนี้แสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 10 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียยี่ห้อ KOENG รุ่น KEG-200

ตารางที่ 1 คุณลักษณะเฉพาะและค่าความแม่นยำของเครื่อง Gas Analyzer

Specification		
Measuring item	CO, HC	
Measuring method	CO, HC : NDIR	
Measuring range	HC	0-15,000 ppm
Resolution		1 ppm
Measuring range	CO	0.00-10.00%
Resolution		0.01%
Accuracy	Less than 2%	

การศึกษาก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีหน่วยเป็น % ค่าไฮโดรคาร์บอน (HC) หน่วยเป็น ppm. ที่ปล่อยออกมาจากไอเสียรถยนต์ จะทำการเปรียบเทียบไอเสียสำหรับกรณีไม่ติดตั้งชุดแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ หยกเนฟไตร กับกรณีติดตั้งชุดแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ หยกเนฟไตร



ภาพที่ 11 การทดสอบวัดค่าไอเสียรถยนต์ด้วย เครื่อง Gas Analyzer

ตารางที่ 2 ค่ามลพิษมาตรฐานของกรมการขนส่งทางบก
สำหรับรถจักรยานยนต์ [7]

วันจดทะเบียนรถ จักรยานยนต์	มลพิษ	ค่า มาตรฐาน	เครื่องมือที่ ตรวจวัด	วิธีการวัดค่า
จดทะเบียนก่อน วันที่ 1 ก.ค.2549	CO	4.50%	Non- Dispersive Infrared (NDIR)	ตรวจวัด ขณะจอด อยู่กับที่ ไม่มีภาระ ขณะ เครื่องยนต์ เดินเบา
	HC	10,000 ppm.		
จดทะเบียน ตั้งแต่ วันที่ 1 ก.ค.2549	CO	3.50%		
	HC	2,000 ppm.		
จดทะเบียน ตั้งแต่ วันที่ 1 ม.ค. 2552	CO	2.50%		
	HC	1,000 ppm.		

ตารางที่ 2 ปริมาณแก๊สไอเสียค่ามาตรฐานที่ยอมรับ
ค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ค่าไฮโดรคาร์บอน (HC) ซึ่ง
กรมการขนส่งทางบกกระทรวงคมนาคม ได้กำหนดไว้เป็น
ค่ามาตรฐานของรถจักรยานยนต์ โดยได้แบ่งตามปีที่
ผลิตและจดทะเบียน โดยรถจักรยานยนต์ที่นำมาทำการ
ทดสอบนั้นจดทะเบียนเมื่อวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2558 (ปี
ค.ศ. 2015) มีระยะเวลาการใช้งาน 7 ปี จากการตรวจ
สอบในเบื้องต้น พบว่าค่า CO อยู่ที่ 0.178% และค่า HC
อยู่ที่ 51.6 ppm ซึ่งเป็นไปตามค่ามาตรฐานค่ามลพิษ
มาตรฐานของกรมขนส่งทางบก ตามตารางที่ 2

4.3 การทดสอบ

ก่อนการทดสอบ ต้องทำการเตรียมการสำหรับรถ
จักรยานยนต์ให้อยู่ในสภาพพร้อมทำการทดสอบ โดยใช้
เครื่องมือวินิจฉัยเครื่องยนต์รถจักรยานยนต์ ยี่ห้อ DOC-
TOR API รุ่น Yamaha Diagnostic Tool ดังภาพที่ 8 ใน
การวัดค่าอุณหภูมิของน้ำมันเครื่อง วัดความเร็วรอบของ

เครื่องยนต์ของรถจักรยานยนต์ที่นำมาทำการทดสอบ
โดยการทดสอบ เริ่มต้นจากการสตาร์ทเครื่องยนต์ จน
กระทั่งเครื่องยนต์ร้อนประมาณ 105 องศาเซลเซียส และ
รอบเครื่องยนต์เดินเบาอยู่ที่ 1,500 รอบต่อนาที และรอบ
เครื่องยนต์ที่ 4,500 รอบต่อนาที

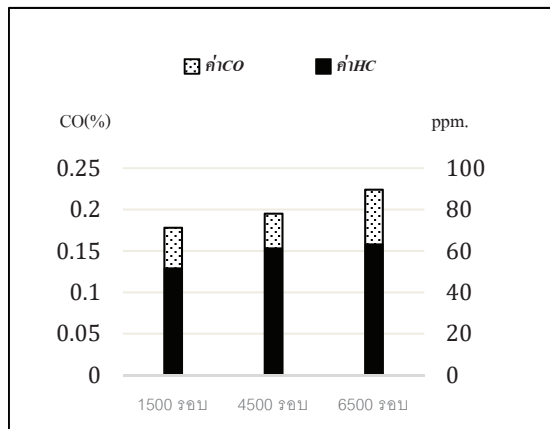
จากนั้นทำการวัดค่า CO และ HC โดยใช้เครื่อง
Gas Analyzer โดยการวัดแบบที่ 1 ไม่มีการติดตั้งชุด
แคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์หยกเนไฟรต์ ทำการวัดค่า
ทั้งสองรวมทั้งหมด 5 ครั้ง การวัดค่าแบบที่ 2 ติดตั้งชุด
แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์หยกเนไฟรต์ทำการวัดค่าเป็น
จำนวน 5 ครั้ง และทำการหาค่าเฉลี่ยทั้งสองแบบ



ภาพที่ 12 เครื่องมือวินิจฉัยเครื่องยนต์รถจักรยานยนต์
ยี่ห้อ DOCTOR API รุ่น Yamaha Diagnostic
Tool

5. ผลการศึกษา

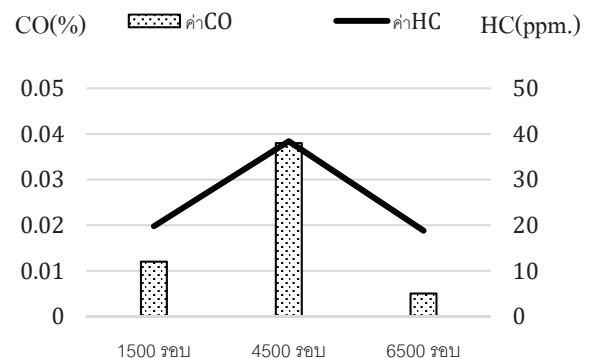
5.1 กรณีไม่ติดตั้งชุดแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์
จากการทดสอบวัดค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)
และไฮโดรคาร์บอน (HC) ที่รอบเครื่องยนต์ 1,500 4,500
และ 6,500 รอบต่อนาที ค่าละ 5 ครั้ง ให้ผลการวัดค่า
ดังภาพที่ 9 โดยค่าเฉลี่ยค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)
อยู่ที่ 0.178%, 0.045%, และ 0.224% ค่าไฮโดรคาร์บอน
(HC) อยู่ที่ 51.6 ppm, 61.2 ppm, และ 62.2 ppm.



ภาพที่ 13 ค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไฮโดรคาร์บอน (HC) กรณีไม่ติดตั้งแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์

จากการทดสอบเพิ่มเติมที่รอบเครื่องยนต์ 2,000 และ 2,500 รอบต่อนาที พบว่าค่าแก๊สไอเสียคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ค่าดังนี้ 0.19%, 0.21% ค่าไฮโดรคาร์บอน (HC) 53 ppm, 56 ppm ซึ่งเปรียบเทียบกับค่ารอบเดินเบาเครื่องยนต์ค่าแก๊สไอเสียคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และค่าไฮโดรคาร์บอน (HC) เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับรอบเดินเบาที่ 1,500 รอบต่อนาที เนื่องจากเครื่องยนต์รถจักรยานยนต์จำนวน 1 สูบ การปรับรอบเครื่องยนต์ที่ 500 – 1,000 รอบต่อนาที อัตราค่าการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยเนื่องจากปริมาตรห้องเผาไหม้ที่เล็กและการเปลี่ยนแปลงของการสันดาปภายในเครื่องยนต์น้อย เมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ของรถยนต์

5.2 กรณีติดตั้งชุดแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์ หยกเนไฟรต์ จากการทดสอบวัดค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไฮโดรคาร์บอน (HC) ที่รอบเครื่องยนต์ 1,500, 4,500 และ 6,500 รอบต่อนาที ค่าละ 5 ครั้ง ให้ผลการวัดค่าเฉลี่ย ดังภาพที่ 14 โดยค่าเฉลี่ยค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) อยู่ที่ 0.012%, 0.038%, และ 0.005% ค่าไฮโดรคาร์บอน (HC) อยู่ที่ 19.8 ppm., 38.4 ppm. และ 18.8 ppm.



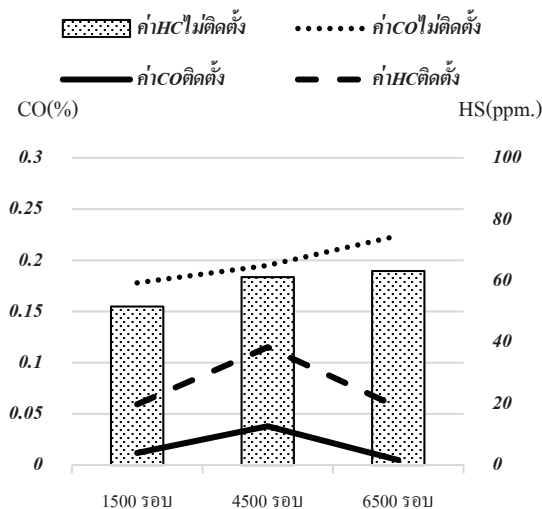
ภาพที่ 14 ค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไฮโดรคาร์บอน (HC) กรณีติดตั้งแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์หยกเนไฟรต์

จากการทดสอบเพิ่มเติมที่รอบเครื่องยนต์ 2,000 และ 2,500 รอบต่อนาที พบว่าค่าแก๊สไอเสียคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ค่าดังนี้ 0.013%, 0.015% ค่าไฮโดรคาร์บอน (HC) 21 ppm, 23 ppm ซึ่งเปรียบเทียบกับค่ารอบเดินเบาเครื่องยนต์ค่าแก๊สไอเสียคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และค่าไฮโดรคาร์บอน (HC) เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับรอบเดินเบาที่ 1,500 รอบต่อนาที เนื่องจากเครื่องยนต์รถจักรยานยนต์จำนวน 1 สูบ การปรับรอบเครื่องยนต์ที่ 500 – 1,000 รอบต่อนาที อัตราค่าการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยเนื่องจากปริมาตรห้องเผาไหม้ที่เล็กและการเปลี่ยนแปลงของการสันดาปภายในเครื่องยนต์น้อย เมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ของรถยนต์

5.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบ

การเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการกรองค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สำหรับกรณีติดตั้งและไม่ติดตั้งชุดแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์หยกเนไฟรต์ ดังภาพที่ 13 จากผลการทดสอบพบว่าค่าสมรรถนะของชุดแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์หยกเนไฟรต์ สำหรับในการกรองค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

สามารถลดค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ลงไปได้จากค่าเฉลี่ยสูงสุดที่รอบเครื่องยนต์ 4,500 รอบต่อนาที ที่ค่า 0.381% และค่าเฉลี่ยที่มีค่าคาร์บอนมอนอกไซด์เฉลี่ยต่ำสุดอยู่ที่ รอบเครื่องยนต์ 6,500 รอบต่อนาที อยู่ที่ค่า 0.005% ซึ่งสามารถลดค่าไปได้ถึง 0.376% ส่วนค่าที่รอบเครื่องยนต์ 4,500 รอบต่อนาที นั้นอยู่ที่ 0.012% เป็นค่ากลางของรอบเครื่องยนต์ทั้ง 3 ค่า



ภาพที่ 15 กราฟเปรียบเทียบค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ระหว่างไม่ติดตั้งกับติดตั้งชุดแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์หยกเนไฟรต์

6. ข้อเสนอแนะการวิจัย

ในการทำการทดสอบเกี่ยวกับแก๊สไอเสียของเครื่องยนต์ จะวัดค่าในรอบเครื่องยนต์ต่ำ หรือรอบเครื่องยนต์เดินเบาไม่มีภาระน้ำหนัก เนื่องจากการเผาไหม้ในรอบเครื่องยนต์ต่ำจะมีปริมาณของของเชื้อเพลิงที่หนา ทำให้การเผาไหม้อาจไม่สมบูรณ์ จึงเป็นเหตุให้เกิดมลพิษทางอากาศ และการวัดค่าด้วยเครื่องมือวัด Gas Analyzer ถูกออกแบบมาเพื่อวัดค่าแก๊สไอเสียในกรณีรถจอดอยู่กับที่จึงไม่สะดวกในการวัดค่ารอบเครื่องยนต์ที่รอบสูง แต่สามารถทำการวัดค่าที่รอบเครื่องยนต์สูงได้ โดยการนำรถไปวิ่งในลู่วิ่งสำหรับการทดสอบ

7. สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาชุดแคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์หยกเนไฟรต์ สำหรับรถมอเตอร์ไซด์ขนาดไม่เกิน 150 ซีซี โดยติดตั้งในท่อไอเสียที่ได้ออกแบบและทำการวัดค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และค่าไฮโดรคาร์บอน (HC) โดยใช้ชุดเครื่องมือวัด Gas Analyzer พบว่าชุดแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์หยกเนไฟรต์ที่ได้ออกแบบและสร้างนี้มีสมรรถนะในการกรองค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ดีขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีไม่ติดตั้งสามารถลดค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ลงไปได้จากค่าเฉลี่ย 0.178% เป็น 0.012% และสามารถลดค่าก๊าซไฮโดรคาร์บอน (HC) ลงไปได้จากค่าเฉลี่ย 51.6 ppm เหลือเพียงค่าเฉลี่ย 19.8 ppm หรือลดลงได้ 38.7% ในรอบเครื่องยนต์ 1,500 รอบต่อนาที ในรอบเครื่องยนต์ 4,500 รอบต่อนาที ชุดแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์หยกเนไฟรต์ ที่ออกแบบและสร้างมีสมรรถนะในการกรองค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ดีขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีไม่ติดตั้งสามารถลดค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ลงไปได้จากค่าเฉลี่ย 0.45% เป็น 0.038% และสามารถลดไฮโดรคาร์บอน (HC) ลงไปได้จากค่าเฉลี่ย 61.2 ppm เหลือเพียงค่าเฉลี่ย 38.4 ppm หรือลดลงได้ 62.7%

สรุปผลการวิจัยพบว่าแคตตาไลติก คอนเวอร์เตอร์หยกเนไฟรต์ (Neprite) สามารถทำความสะอาดก๊าซท่อไอเสียรถจักรยานยนต์ได้จริง โดยสามารถดูดซับก๊าซในอัตราเฉลี่ย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) 0.166 % ก๊าซไฮโดรคาร์บอน (HC) เฉลี่ย 19.8 ppm. ที่รอบเครื่องยนต์ 1,500 รอบต่อนาทีและอัตราเฉลี่ยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) 0.41 % ก๊าซไฮโดรคาร์บอน (HC) เฉลี่ย 22.8 ppm. ที่รอบเครื่องยนต์ 4,500 รอบต่อนาที ลดมลพิษที่ปล่อยจากท่อไอเสียรถจักรยานยนต์ได้

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม ที่เอื้อเพื่อสถานที่และเครื่องมือในการทดสอบทำวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณสาขาเทคนิคพื้นฐาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม ที่เอื้อเพื่อเตาเผาไฟฟ้าความร้อนสูงในการเผาชิ้นงาน ขอขอบคุณช่างบุญเกษะสลักหยกที่เอื้อเพื่อหยกในการทดสอบครั้งนี้

9. บรรณานุกรม

- (1) เมตตา เก่งชูวงศ์, “อนุภาคในอากาศแวดล้อมและผลกระทบต่อประชาชนในเขตเมืองของเทศบาลนครมหาสารคาม” หลักสูตรวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม/ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม หน้า 9-15, (2018).
- (2) กุลจิรา สุจิโรจน์, “กะตะไลติก คอนเวอร์เตอร์” ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ MTEC กรกฎาคม - กันยายน (2541).
- (3) T. Kulimjeerasiri, “Research on the jade industry in China, types of jade, jadeite, nephrite” 15 September, (2015).
- (4) U. Wangrakdisakul, “Development of Cordierite Ceramics for Catalytic Converters using Local Raw Materials” The Journal King Mongkut’s University of Technology North Bangkok vol. 17(3), 39-46 (2007).
- (5) W. Akkhowong, “Reducing toxic gases from Motorcycle exhaust by using clay compound ceramics. catalytic converter, The 14th National Conference on Technical Education “Engineering Education and Blended Learning to the NEXT-GENeration” 09 July, (2022).
- (6) S. Sriburin, “Clay Meat Development Study für die Anwendung in keramischen Produktdesign-Fallstudien in der Provinz Loei”, *Zeitschrift für Industrielle Bildung* Bd. 14 Nr.3 September – Dezember, (2015).
- (7) Department of Land Transport, 2012, Retrieved from <http://www.dlt.go.th/th/index.php>, 31 December, (2012).

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศในการวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลง การใช้ที่ดินด้วยข้อมูลดาวเทียม

The Application of Geo-informatics Technology to Analyze Land Use Changes Using Satellite Imagery

สาโรช แสงเมือง¹

Saroch Sangmuang¹

รองศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์^{1*}

Associate Professor Dr. Pichaya Rachdawong^{1*}

พันเอกหญิง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤตยาภรณ์ เจริญผล²

Colonel Assistant Professor Dr. Krittayaporn Charoenpol²

^{1*} คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 ประเทศไทย

Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, 10330 Thailand

² กองวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

จังหวัดนครนายก 26000 ประเทศไทย

² Department of Environmental Science, Academic Division, Chulachomklao

Royal Military Academy, Nakhon Nayok 26001 Thailand

*Corresponding Author. E-mail: Pichaya.R@chula.ac.th

(Received: August 24, 2022, Revised: April 15, 2023, Accepted: April 18, 2023)

บทคัดย่อ : การบุกรุกเข้ามาบนที่ดินของกองทัพบกเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ทางกองทัพต้องหาวิธีบริหารจัดการด้านที่ดินเพื่อดูแลพื้นที่ และป้องกันผลกระทบต่อศักยภาพในการปฏิบัติงานในห้วงการฝึก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวทางที่จะนำเทคโนโลยีเพื่อเข้ามาช่วยในการจัดการด้านพื้นที่ โดยนำเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศเข้ามาใช้งาน วัตถุประสงค์คือการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศมาวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ในพื้นที่ของกองทัพจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม การวิเคราะห์โดยใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ข้อมูล ลดเวลาในการสำรวจและจำนวนผู้ปฏิบัติงาน ทั้งนี้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบพื้นที่ปฏิบัติการได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ต้องลงไปในพื้นที่จริง ซึ่งบางพื้นที่อาจเป็นพื้นที่เสี่ยงอันตราย ในการศึกษาได้ใช้วิธีการจำแนกประเภทข้อมูลแบบกำกับดูแล (Supervised Classification) โดยใช้วิธี Maximum Likelihood โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมต่างๆ ได้แก่ Landsat 5 Landsat 8 และ THEOS โดยได้เลือกพื้นที่ตัวอย่างคือ ตำบลห้วยโป่ง อำเภอโคกสำโรง จังหวัดลพบุรี ในการศึกษาครั้งนี้ได้จำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน โดยการวิเคราะห์ข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียมทั้ง 3 ชนิด ที่ถูกบันทึกตลอดทั้งปี ผลวิเคราะห์พบว่าการเปลี่ยนแปลงทางด้านพื้นที่ เช่น พื้นที่ป่าไม้เปลี่ยนเป็นพื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่ปลูกสร้าง และพื้นที่เกษตรกรรมเปลี่ยนการใช้ประโยชน์เป็นพื้นที่ปลูกสร้าง หรือพื้นที่อื่นๆ เป็นต้น การศึกษาครั้งนี้ได้มีการทดสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์ข้อมูล โดยใช้ค่าความถูกต้องรวม (Overall Accuracy) ซึ่งอยู่ในช่วง 70.00% – 93.33 % ถือว่าให้ค่าความ

ถูกต้องรวมทั้งสูง นอกจากนี้ยังมีการคำนวณค่าสถิติตามทฤษฎีของ Cohen's kappa (K) ซึ่งอยู่ในช่วง 0.64 – 0.92 ซึ่งบ่งบอกถึงความเชื่อมั่นของผลลัพธ์การแปลภาพถ่ายดาวเทียมที่ดีถึงดีมาก ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์นี้ได้สามารถแสดงข้อมูลที่เกิดการเปลี่ยนแปลงบนแผนที่ภาพถ่ายดาวเทียมผ่านระบบเว็บแอปพลิเคชัน ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการจัดการ การแก้ปัญหาการบุกรุกบนพื้นที่ดินของกองทัพบกได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม การใช้ประโยชน์ที่ดิน

Abstract : Intruding to Royal Thai Army's (RTA) Lands is continuously a concern to the organization. Thus, RTA has to find the solutions for their lands management so that it will not impact the ability to train and work within their military properties. This also includes the safety of life and property of people who encroach for various activities inside the military areas. This research has brought a technology called Geo-informatics to help with the land management. The main objective of this research is to use Geo-informatics for the analysis of change detection in land use derived from satellite images in order to monitor the change of the areas including forest, residential and agricultural areas. This process increases the efficiency of the work, and reduces the amount of time and labors for the monitoring without being in the areas where they could be dangerous. This study has classified satellite images acquired from Landsat 5, Landsat 8 and THEOS sensors using Supervised Classification with Maximum Likelihood method. The study area covers the sub-district of Huay Pong, Kok Sumrong district in the province of Lopburi. The classification has classified into 6 types of land use, which consist of Man-made, forests, water, agricultures, shrubs, and other types of vegetation. The results from three different sensors collected throughout the year have shown that there are some changes in the land use. For example, forested areas have been converted to agricultural areas or man-made structures. Another instance is the change from agricultural areas to man-made objects or other land features. The accuracy assessment has been performed on this research as well and it shows that the overall accuracy has fallen in between 70.00% – 93.33 %, which considers as high accuracy. These have agreed with the results of the Cohen's kappa coefficient (K), which fall in the range of 0.64 – 0.92. The results of this research have been visualized through a web application. In conclusion, the use of Geo-informatics technology is a decent tool to solve a problematic of RTA's land encroachment.

Keywords: Geo-information technology, satellite images, land use

1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันกองทัพบกมีที่ดินในความครอบครองและใช้ประโยชน์ มีจำนวนเนื้อที่ประมาณ 4.5 ล้านไร่ การบริหารจัดการที่ดินของกองทัพบกที่ผ่านมาได้ดำเนินการตามระเบียบของกองทัพบกว่าด้วยการปกครองและวิธีการจัดการที่ดินพุทธศักราช 2509 และ 2527 โดยได้กำหนดประเภทที่ดินในความครอบครองของกองทัพบกไว้ 4 ประเภท ได้แก่ ที่ดินกรรมสิทธิ์ของกองทัพบกหรือของทางราชการซึ่งใช้ในราชการกองทัพบก, ที่ดินสงวนและที่ดินหวงห้ามในความครอบครองของกองทัพบก, ที่ดินยึดจากหน่วยราชการอื่นหรือเอกชนและที่ดินเช่าจากหน่วยราชการอื่นหรือเอกชนกำหนดให้กรมยุทธโยธาทหารบกมีหน้าที่ดำเนินการเกี่ยวกับเรื่องที่ดินของกองทัพบก และให้หน่วยมณฑลทหารบก เป็นหน่วยปกครองที่ดินมีหน้าที่ดูแลและรักษาในเขตพื้นที่รับผิดชอบสำหรับหน่วยใช้ประโยชน์ที่ดินคือหน่วยทหารต่าง ๆ ที่กองทัพบกให้เข้าไปใช้ประโยชน์ในที่ดินโดยมีหน้าที่ดูแลป้องกันที่ดินเพื่อประโยชน์ในราชการทหาร โดยสามารถแบ่งการใช้ประโยชน์ในพื้นที่เป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ พื้นที่สำหรับการจัดตั้งหน่วยและพื้นที่สำหรับการฝึกภาคสนามนอกที่ตั้งหน่วย ซึ่งพื้นที่ส่วนใหญ่ของพื้นที่ทำการฝึกยังคงเป็นสภาพป่าสมบูรณ์เพื่อใช้สำหรับการฝึกในสภาพภูมิประเทศจริง มีพื้นที่ฝึกตั้งอยู่ในทุกภูมิภาคทั่วประเทศ โดยภารกิจหลักคือเพื่อการฝึกเพื่อป้องกันการรุกรานและรักษาอธิปไตยของประเทศไว้ และสามารถดูแลรักษาเพื่ออนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อมได้ในคราวเดียวกัน แต่เนื่องจากสภาพปัจจุบันของประเทศและบริบทของสังคมและเศรษฐกิจที่เปลี่ยนไป ทั้งด้านการพัฒนาประเทศ และการขยายตัวของเมืองอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีความต้องการทางด้านพื้นที่สูงเพิ่มขึ้น ซึ่งในปัจจุบันสถานการณ์การสู้รบขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นจากการรุกรานหรือการสู้รบระหว่างประเทศเพื่อแย่งชิงครอบครองดินแดนเพื่อขยายอาณาเขตแบบสมัยโบราณเกิดขึ้นได้ยากมาก ภารกิจต่าง ๆ

ได้มีการปรับเปลี่ยนให้เข้ากับสถานการณ์และภัยในรูปแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน ภารกิจที่สำคัญอีกประการหนึ่งของกองทัพบกคือการดูแลรักษาพื้นที่ฝึก ซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง โดยในปัจจุบันพบว่าบริเวณพื้นที่ฝึกต่าง ๆ ทั่วประเทศมีพื้นที่ถูกบุกรุกเป็นจำนวนมาก เนื่องจากแต่ละพื้นที่มีขนาดใหญ่ จำนวนเนื้อที่มาก การดำเนินการวิธีในการดูแลรักษาที่ดินไม่สามารถดูแลได้อย่างทั่วถึง ทำให้พื้นที่ที่ทหารหน่วยต่าง ๆ ดูแลรับผิดชอบ ถูกบุกรุกและเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ในพื้นที่เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นจำนวนมาก ทั้งการบุกรุกในการอ้างสิทธิพื้นที่ทำกิน การบุกรุกพื้นที่เพื่อสร้างสิ่งปลูกสร้างในบริเวณพื้นที่ฝึก ทำให้เกิดผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานเพื่อทำการฝึกเป็นอย่างยิ่ง รวมถึงด้านความปลอดภัยต่อประชาชนและทรัพย์สินที่อยู่ในเขตพื้นที่ทำการฝึก อีกทั้งยังมีผลกระทบในด้านกฎหมายต่าง ๆ ตามมาอีกมากมาย

แนวทางการแก้ไขปัญหาการบุกรุกที่ดินสามารถนำเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศและภาพถ่ายดาวเทียมมาประยุกต์ใช้ เพื่อดำเนินการในการตรวจสอบและบันทึกเป็นหลักฐานเพื่อใช้ในการบริหารจัดการที่ดินของกองทัพบกต่อไป และสามารถป้องกันการบุกรุกพื้นที่ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น โดยการนำข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียมทำการรวบรวมข้อมูลภาพที่ได้จากแหล่งต่างๆ นำมาจัดทำฐานข้อมูลและโมเดลเพื่อวิเคราะห์ ในระบบเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ เพื่อใช้ในการช่วยวิเคราะห์และเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบการพื้นที่เพื่อหาความเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ในพื้นที่ ซึ่งสามารถตรวจสอบพื้นที่ที่ดูแลรับผิดชอบได้รวดเร็วยิ่งขึ้นและสูญเสียพื้นที่น้อยที่สุด ซึ่งจะช่วยให้หน่วยที่เกี่ยวข้องที่ดูแลพื้นที่สามารถประหยัดเวลาและทรัพยากรต่าง ๆ ในการส่งกำลังพลเข้าพื้นที่เพื่อทำการลาดตระเวนตรวจสอบดูแลรักษาพื้นที่และหากพื้นที่ในความรับผิดชอบ มีการตรวจพบความเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมหรือมีกิจกรรมต่าง ๆ เกิดขึ้นในพื้นที่โดยไม่ได้รับอนุญาต เช่น มีการบุกรุก แ้วถาง หรือมี

สิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ เกิดขึ้นในพื้นที่ หน่วยลาดตระเวนจะสามารถใช้ระบบระบุพิกัดเพื่อแสดงตำแหน่งทางพื้นที่อย่างแม่นยำ ซึ่งการตรวจสอบเพื่อดูแลรักษาพื้นที่ในปัจจุบัน หน่วยรับผิดชอบพื้นที่มีหน้าที่ตรวจสอบลาดตระเวนมีการดำเนินยุทธวิธีและวงรอบในการลาดตระเวนเพื่อตรวจสอบ แต่ด้วยข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือและกำลังพล การเคลื่อนที่ในพื้นที่รับผิดชอบเพื่อลาดตระเวนในการตรวจสอบ มีพื้นที่ขนาดใหญ่ทำให้ไม่สามารถดำเนินการตรวจสอบพื้นที่ได้อย่างทั่วถึง

จากปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้น ทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดในการนำเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศและเทคนิคการอ่านแปลภาพถ่ายดาวเทียมมาทดลองและประยุกต์ใช้ เพื่อศึกษาลักษณะการแสดงผลของภาพถ่ายดาวเทียม และศึกษาความเปลี่ยนแปลงของพื้นที่จากการอ่านแปลภาพถ่ายดาวเทียม โดยระบบเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศจะสามารถแสดงผลและระบุตำแหน่งของพื้นที่ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือพื้นที่ที่คาดว่าจะมีการบุกรุกได้อย่างรวดเร็วและสามารถบอกขนาดและตำแหน่งพิกัดของพื้นที่ได้ถูกต้องแม่นยำ ซึ่งจะช่วยให้การรักษาพื้นที่และป้องกันการบุกรุกพื้นที่ในความครอบครองดูแลของกองทัพบกมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยพื้นที่ตัวอย่างในการทำการดำเนินการวิจัยบริเวณพื้นที่ตำบลห้วยโป่ง อำเภอโคกสำโรง จังหวัดลพบุรี

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินบริเวณพื้นที่ตำบลห้วยโป่ง อำเภอโคกสำโรง จังหวัดลพบุรี

2.2 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ เพื่อวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ในพื้นที่จากภาพถ่ายดาวเทียม บริเวณพื้นที่ตัวอย่าง ตำบลห้วยโป่ง อำเภอโคกสำโรง จังหวัดลพบุรี ในระหว่างปี พ.ศ. 2543 ถึง 2563

2.3 จัดทำระบบให้บริการข้อมูลภูมิสารสนเทศผ่านเครือข่าย เฝ้าระวัง ติดตามสถานการณ์ บริเวณพื้นที่ตัวอย่างตำบลห้วยโป่ง อำเภอโคกสำโรง จังหวัดลพบุรี

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ

เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ หมายถึง การบูรณาการความรู้และเทคโนโลยีทางด้านการรับรู้จากระยะไกล (Remote Sensing : RS) ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System : GIS) และระบบดาวเทียมนำทางโลก (Global Navigation Satellite System : GNSS) เพื่อประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่วิทยาการด้านการรับรู้จากระยะไกลซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญในการศึกษาองค์ประกอบต่างๆ บนพื้นโลกและในชั้นบรรยากาศ เพื่อศึกษาและติดตามการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติได้โดยการเลือกใช้ข้อมูลจากดาวเทียมที่มีความละเอียดของภาพและประเภทของดาวเทียมหลากหลาย ขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้ในแต่ละเรื่อง นอกจากนี้ข้อมูลจากการสำรวจจากระยะไกลเป็นข้อมูลที่ได้มาอย่างรวดเร็ว สามารถตอบสนองความต้องการได้ทันทีสำหรับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ [5] สามารถจัดการข้อมูลเชิงพื้นที่ วิเคราะห์ข้อมูลและประยุกต์ใช้ในการวางแผนจัดการทรัพยากรธรรมชาติต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศจึงเป็นวิทยาการที่สำคัญที่หลายหน่วยงานได้นำมาพัฒนาประเทศในหลากหลายด้าน เช่นทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เกษตรผังเมือง การจราจรและการขนส่ง ความมั่นคงทางทหาร ภัยธรรมชาติ และการค้าเชิงธุรกิจผลการวิเคราะห์ด้วยเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศสามารถนำมาประกอบการวางแผนการตัดสินใจในเรื่องต่างๆ ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว

3.2 การรับรู้จากระยะไกล (Remote Sensing)

การรับรู้จากระยะไกล หมายถึง การได้มาของข้อมูล (Data acquisition) โดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดที่อยู่ไกลออกไป และทำการสกัดสารสนเทศ (Information extraction) ต่างๆ จากข้อมูลที่ได้มาจากการตรวจวัดเพื่อทำการวิเคราะห์และประมวลผล [1] ซึ่งองค์ประกอบทั้งสองส่วนนี้

มีกระบวนการเริ่มจากการส่งพลังงานจากแหล่งพลังงานเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูล การสกัดสารสนเทศ ต่างๆ [6] ออกมาจากข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดไปจนถึงการนำข้อมูลไปช่วยสนับสนุนการตัดสินใจในเรื่องต่างๆ รายละเอียดในแต่ละองค์ประกอบ ได้แก่ (1) การได้มาของข้อมูลประกอบด้วย แหล่งพลังงาน ปฏิสัมพันธ์ของพลังงานกับวัตถุต่างๆ บนผิวโลกกระบวนการตรวจวัดข้อมูลและการบันทึกข้อมูล (2) การสกัดข้อมูลเพื่อทำการวิเคราะห์และประมวลผล ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆคือ การปรับเทียบข้อมูลเบื้องต้นและการพิมพ์ภาพ (Preprocessing calibration development and printing) การแปลตีความ (Interpretation) ซึ่งต้องอาศัยพื้นฐานความรู้และความเข้าใจของผู้แปล และการตรวจสอบในภาคสนาม เพื่อทำแผนที่และจัดการสารสนเทศต่อไป

3.2.1 การรับรู้จากระยะไกลแบบแพสซีฟ

เป็นการตรวจวัดพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากการสะท้อน (Reflect) หรือแผ่ (Emitted) จากพื้นผิว โดยแหล่งพลังงานในระบบตรวจวัดแบบแพสซีฟคือพลังงานจากดวงอาทิตย์ซึ่งสามารถให้พลังงานที่ตรวจวัดได้ในช่วงคลื่นตามองเห็น (Visible) และอินฟราเรด (Infrared) [1]

3.2.2 การรับรู้จากระยะไกลแบบแอ็กทีฟ

การรับรู้จากระยะไกลแบบแอ็กทีฟเป็นระบบที่มนุษย์สร้างพลังงาน และส่งพลังงานมากระทบวัตถุเป้าหมาย ในช่วงคลื่นไมโครเวฟ เช่น ระบบเรดาร์ (RADAR: Radio Detection And Ranging) ซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 1 มิลลิเมตร ถึง 1 เมตร [1]

ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ หรือ Geographic Information System:GIS คือกระบวนการทำงานเกี่ยวกับข้อมูลในเชิงพื้นที่ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ที่ใช้กำหนดข้อมูลและสารสนเทศ ที่มีความสัมพันธ์กับตำแหน่งในเชิงพื้นที่ เช่น ที่อยู่ บ้านเลขที่ สัมพันธ์กับตำแหน่งในแผนที่ ตำแหน่ง เส้นรุ้ง เส้นแวง ข้อมูลและแผนที่ใน GIS เป็นระบบข้อมูลสารสนเทศที่อยู่ในรูปของตารางข้อมูล และ

ฐานข้อมูลที่มีส่วนสัมพันธ์กับข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Data) [1] ซึ่งรูปแบบและความสัมพันธ์ของข้อมูลเชิงพื้นที่ทั้งหลาย จะสามารถนำมาวิเคราะห์ด้วย GIS และทำให้สื่อความหมายในเรื่องการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กับเวลาได้

4. วิธีดำเนินการศึกษา

4.1 พื้นที่ศึกษา

ในการศึกษานี้ได้เลือกพื้นที่บริเวณตำบลห้วยโป่ง อำเภอกอสุริยง จังหวัดลพบุรี เป็นพื้นที่ตัวอย่างในการศึกษา เนื่องจากพื้นที่มีลักษณะทางกายภาพครบถ้วนใกล้เคียงกับพื้นที่ฝึกของกองทัพบกโดยมีชั้นข้อมูลของพื้นที่ทางทหาร พื้นที่เกษตรกรรม โรงเรียน วัด พื้นที่ชุมชนเส้นทางคมนาคม แหล่งน้ำ สนามบิน พื้นที่ป่าและภูเขาทำให้มีชุดข้อมูลของพื้นที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยที่มีองค์ประกอบของการอ่านแปลภาพถ่ายเทียมครบถ้วน มีตัวอย่างพื้นที่ที่ชัดเจน

สภาพภูมิประเทศของตำบลห้วยโป่ง มีลักษณะเป็นพื้นที่ดอนสลับที่ราบ มีภูเขาบางพื้นที่อาศัยน้ำฝนในการทำการเกษตรมีเนื้อที่ประมาณ 42,500ไร่ หรือ 68 ตารางกิโลเมตร ประกอบด้วย 12 หมู่บ้าน ได้แก่ หมู่ 1 บ้านห้วยโป่ง หมู่ 2 บ้านห้วยโป่ง หมู่ 3 บ้านสะพานขาว หมู่ 4 บ้านหนองหอย หมู่ 5 บ้านสามแยกหลุมข้าว หมู่ 6 บ้านสะพานจันทน์ หมู่ 7 บ้านสะพานนาคร หมู่ 8 บ้านสะพานนาคร หมู่ 9 บ้านหนองคู หมู่ 10 บ้านโพธิ์งาม หมู่ 11 บ้านสะพานพุด และ หมู่12 บ้านน้อย

ตำบลห้วยโป่ง ตั้งอยู่ที่ ละติจูด 14.972 ลองจิจูด 100.668 ห่างจากอำเภอกอสุริยง ไปทางทิศใต้ ประมาณ 13 กิโลเมตร ห่างจากตัวจังหวัดลพบุรีประมาณ 22 กิโลเมตร

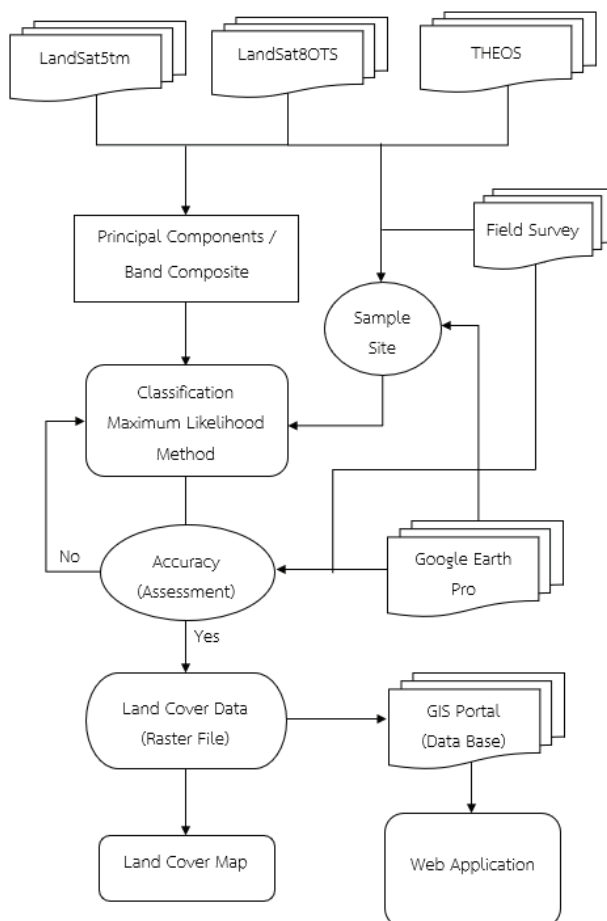
4.2 ขอบเขตการศึกษา

จัดทำระบบเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงในพื้นที่เสี่ยงต่อการถูกบุกรุก โดยการใช้ภาพถ่ายดาวเทียมไทยโชต หรือ THEOS (Thailand Earth Observation System)

ภาพถ่ายเทียม LANDSAT-5 และ ภาพถ่ายเทียม LANDSAT-8 การประยุกต์ใช้โปรแกรม Arc GIS ในการวิเคราะห์ภาพเพื่อจัดทำแผนที่สำหรับการแสดงผล เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์และเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของสภาพพื้นที่ จากภาพถ่ายเทียมในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน โดยใช้เทคนิคจัดทำระบบเพื่ออ่านแปลภาพถ่ายเทียมในการแสดงผลการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจสอบได้ในพื้นที่โดยอัตโนมัติ โดยการนำข้อมูลภาพถ่ายเทียมเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลและแสดงผลในรูปแบบแผนที่ดิจิทัล และการแสดงผลที่ได้ผ่าน GIS Portal

4.3 ขั้นตอนการศึกษา

4.3.1 ขั้นตอนแผนผังการดำเนินงาน แสดงได้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงขั้นตอนแผนผังการดำเนินงาน

4.3.2 ชั้นข้อมูลในการจำแนก แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงจำแนกชั้นข้อมูล

No.	Class Name	ลักษณะข้อมูล
1	สิ่งปลูกสร้าง	สิ่งที่มีมนุษย์สร้างขึ้น เช่น บ้าน ถนน สนามบิน โรงงาน เป็นต้น
2	พื้นที่ป่าไม้	พื้นที่ป่าไม้ ส่วนใหญ่อยู่บริเวณบนเขา
3	แหล่งน้ำ	แหล่งน้ำที่เกิดตามธรรมชาติ และมนุษย์สร้างขึ้น
4	พื้นที่เพาะปลูก	พื้นที่ปลูกพืชชนิดต่างๆ ที่เป็นพื้นที่เกษตรกรรม
5	ไม้พุ่มเตี้ย	ลักษณะพืชที่เป็นต้นเดี่ยวๆ ซึ่งเป็นไม้พุ่มก็ได้หรือไม้ต้นก็ได้ โดยขึ้นกระจายในบริเวณ
6	พื้นที่อื่นๆ	ได้แก่พื้นที่โล่ง ภูเขา และพื้นที่นอกเหนือจากที่กล่าวไว้ข้างต้น

4.3.3 ข้อมูลดาวเทียม (Satellite Data)

ข้อมูลดาวเทียมที่ใช้ในการศึกษามี 3 ชนิด ประกอบด้วย Landsat 5 TM Landsat 8 และ THEOS ข้อมูล Landsat 5 MSS/TM

ในการวิจัยได้เลือกใช้ระบบการบันทึกภาพแบบ Thematic Mapper (TM) ซึ่งให้รายละเอียดภาพอยู่ที่ 30 เมตร โดยในการจำแนกได้เลือกใช้ช่วงคลื่นของ แบนด์ 3 : 0.60 - 0.69 (แดง) แบนด์ 4 : 0.77 - 0.90 (อินฟราเรดใกล้) และ แบนด์ 5 : 1.55 - 1.75 (อินฟราเรดคลื่นสั้น) การผสมสีในแบบ False Color : RGB : 4,5,3 [1]

ข้อมูล Landsat 8

ช่วงคลื่น หรือแบนด์ที่นำมาใช้ในการวิจัย คือ Band 3 0.53 - 0.59 (Green) Band 4 0.64 - 0.67 (Red) และ Band 5 0.85 - 0.88 (Near Infrared NIR) ซึ่งก็จะเป็นในรูปแบบเดียวกับ Landsat 5 ที่จะเน้นในช่วงคลื่นที่เป็น Near Infrared (NIR) ที่มีคุณสมบัติในการสะท้อนได้ดีในส่วนที่เป็นพืชพรรณ [1] และทำการผสมสีในแบบ False Color เช่นเดียวกัน RGB : 5,4,3

ข้อมูลดาวเทียมไทยโชต (THEOS)

ข้อมูลที่ใช้เป็นแบบ Pan-Sharpened ที่รวมข้อมูลที่ตามองเห็นจาก 4 ช่วงคลื่น (น้ำเงิน เขียว แดง อินฟราเรดใกล้) เข้ากับข้อมูลเชิงพื้นที่ของช่วงคลื่นขาวดำ ทำให้ได้ภาพที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้น พร้อมกับข้อมูลสี โดยในการจำแนกได้เลือกใช้แบนด์การผสมสีเท็จ คือ RGB : 432 (อินฟราเรดใกล้ แดง เขียว) [1] ซึ่งให้การมองเห็นสีของพืชพรรณเป็นสีแดงข้อมูลที่เลือกใช้ได้จาก USGS ด้วยการดาวน์โหลดผ่าน <https://earthexplorer.usgs.gov/> ซึ่งมีเงื่อนไขในการเลือกข้อมูลดาวเทียม โดยให้มีเมฆในพื้นที่น้อยที่สุด หรือไม่พบกลุ่มเมฆในพื้นที่ และในแต่ละปีอยู่ในช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด

4.3.4 ขั้นตอนการทำ Principal Components / Band Composite

ขั้นตอนของการรวมชั้นข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น (Band Components) และการกำหนดภาพสีผสมเท็จ (False Color Composite Image) เพื่อเน้นภาพให้ชัดเจน (Image Enhancement) โดยใช้โปรแกรม Arc Map ผ่านชุดคำสั่ง Principal Components และทำ False Color Composite ใช้ข้อมูลดาวเทียม 3 ชนิด คือ Landsat 5 TM Landsat 8 OLI/TIRS และ THEOS แสดงได้ดังตารางที่ 2

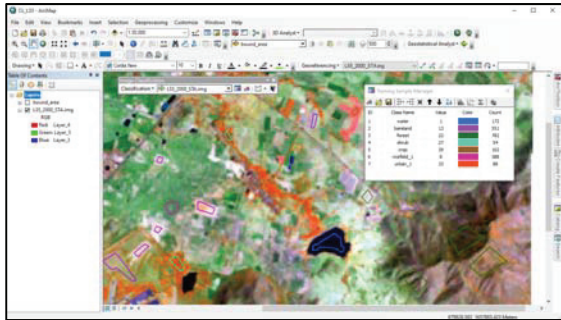
ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดการเลือกใช้แบนด์ และการผสมสี

No.	Satellite	Year	Band Components	Band Composite (RGB)
1	Landsat 5 TM	2543	1,2,3,4,5	4:5:3
2		2548	1,2,3,4,5	4:5:3
3		2550	1,2,3,4,5	4:5:3
4		2552	1,2,3,4,5	4:5:3
5	Landsat 8 OLI/TIRS	2556	2,3,4,5,6	5:6:3
6		2559	2,3,4,5,6	5:6:3
7		2561	2,3,4,5,6	5:6:3
8		2563	2,3,4,5,6	5:6:3
9	THEOS	2552	1,2,3,4	4:2:3
10		2563	1,2,3,4	4:2:3

4.3.5 ขั้นตอนการเลือกพื้นที่ตัวอย่าง (Sample Site)

ขั้นตอนการเลือกพื้นที่ตัวอย่างนี้ เพื่อที่จะใช้เป็นตัวอย่างการเรียนรู้ในการวิเคราะห์ของซอฟต์แวร์ โดยหลักในการเลือกพื้นที่ตัวอย่างจะต้องเลือกตัวอย่างให้ครอบคลุมตามลักษณะของชนิดข้อมูลนั้นๆ

โดยในขั้นตอนในการเลือกพื้นที่ตัวอย่าง โดยการนำเข้าข้อมูลดาวเทียมในปีที่ต้องการจำแนกเข้ามาในโปรแกรม จากนั้น ไปยังแถบเครื่องมือ Image Classification แล้วเลือกเครื่องมือชื่อว่า Training Sample Manager จากนั้นให้ทำการวาดพื้นที่ (Draw Polygon) ตัวอย่างตามลักษณะของชั้นข้อมูลที่ต้องการจำแนก เมื่อทำการวาดตามจำนวนชั้นข้อมูลที่ต้องการจำแนกเรียบร้อยแล้ว จะบันทึกเพื่อจัดเก็บไว้สำหรับขั้นตอนในการจำแนกต่อไป



ภาพที่ 2 ขั้นตอนในการเลือกพื้นที่ตัวอย่าง (Sample Site)

ซึ่งในการศึกษารั้งนี้ ได้เก็บตัวอย่างตามชั้นข้อมูลที่ทำกรจำแนก จำนวนทั้ง 6 ชั้นข้อมูล ประกอบไปด้วย พื้นที่สิ่งปลูกสร้าง พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่แหล่งน้ำ พื้นที่เพาะปลูก พื้นที่ไม้พุ่มเตี้ย และพื้นที่อื่นๆ

4.3.6 ขั้นตอนของการจำแนกประเภทชั้นข้อมูล (Classification)

ในการศึกษารั้งนี้ได้เลือกการจำแนกประเภทข้อมูลแบบกำกับดูแล (Supervised Classification) ซึ่งเป็นวิธีการจำแนกข้อมูลภาพที่จะต้องมีการเลือกตัวอย่างพื้นที่ (Sample Site) ให้เป็นพื้นที่ฝึก (Training areas) เพื่อเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ด้วยการคำนวณทางสถิติให้กับข้อมูลภาพทั้งหมด ในการเลือกพื้นที่ตัวอย่างจะพิจารณาจากองค์ประกอบการแปลตีความภาพถ่ายเป็นหลัก ซึ่งประกอบด้วย ความเข้มของสีและสี (Tone/Color) ขนาด (Size) รูปร่าง (Shape) เนื้อภาพ (Texture) รูปแบบ (Pattern) ความสูงและเงา (Height and Shadow) ที่ตั้ง (Site) ความเกี่ยวพัน (Association) [4] จากนั้นก็จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งภาพ

โดยขั้นตอนในการจำแนกเริ่มด้วยการนำเข้าข้อมูลดาวเทียมที่ต้องการจำแนก ไปยังแถบเครื่องมือ Image Classification แล้วเลือกเครื่องมือที่ชื่อว่า Classification จากนั้นเลือก Maximum Likelihood Classification ซึ่งจะปรากฏหน้าต่างหนึ่งขึ้นมา ให้เลือก Input Raster Bands เป็นข้อมูลดาวเทียมที่เราต้องการ

จำแนก และเลือกข้อมูลพื้นที่ตัวอย่างที่ได้ทำไว้ในช่อง Input Signature file จากนั้นก็ทำการเลือกที่จัดเก็บข้อมูลที่ต้องการ และทำการให้โปรแกรมจำแนกข้อมูล เมื่อได้ผลการจำแนกก็จะนำไปสู่การวิเคราะห์ทางสถิติต่อไป

4.3.7 การประเมินความถูกต้อง (Accuracy Assessment)

ใช้วิธีการตรวจสอบความถูกต้องด้วย Cohen's kappa (K) ค่าสัมประสิทธิ์ค้ำปาของโคเฮน ค่าสูงสุดที่เป็นไปได้คือ 1.0 หมายถึงมีความน่าเชื่อถือของความสอดคล้องของข้อมูลมาก หรือการชี้วัดทางสถิติระหว่างผู้ให้ความเห็นสองฝ่ายมีความเห็นตรงกันมาก ส่วน 0.0 หมายถึงข้อมูลไม่มีความสอดคล้องกันเลย หรือความเห็นของทั้งสองฝ่ายไม่ตรงกัน [3] ค่า Cohen's kappa สามารถคำนวณได้จากสูตร $Kappa\ Score = (Agree - Chance\ Agree) / (1 - Chance\ Agree)$

กล่าวคือ เป็นการเปรียบเทียบอัตราส่วนของเหตุการณ์สังเกตที่สอดคล้องกัน (Observed Agreement: OA) กับ โอกาสที่เหตุการณ์นั้นสอดคล้องกันด้วยความบังเอิญ (Chance Agreement: AC) หรือ สามารถเขียนเป็นสูตรทางคณิตศาสตร์ได้ว่า

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}$$

โดยที่

K คือ Kappa Score

P_o คือ relative observed agreement ระหว่าง raters

P_e คือ hypothetical probability ของ chance agreement

$K = 1$ ถ้ามีความเห็นสอดคล้องอย่างสมบูรณ์

$K = 0$ ถ้ามีความเห็นไม่สอดคล้องกัน (No agreement among the raters) แสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การแปลความหมายค่าสถิติของ Cohen's kappa (K) [2]

ค่าสถิติ Cohen's kappa (K)	ขนาดความสอดคล้อง (Strane of Agreement)
< 0.00	แย่ (Poor)
0.00 – 0.20	น้อย (Slight)
0.21 – 0.40	พอใช้ (Fair)
0.41 – 0.60	ปานกลาง (Moderate)
0.61 – 0.80	ดี (Substantial)
0.81 – 1.00	ดีมาก/ค่อนข้างสอดคล้อง (Almost Perfected)

ในขั้นตอนการทำการประเมินความถูกต้องจัดทำโดยขั้นแรก คือการจัดเตรียมข้อมูลตำแหน่งชั้นข้อมูลที่ต้องเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบซึ่งใช้ข้อมูลที่ได้ข้อมูลดาวเทียมรายละเอียดสูงของภูเกิลข้อมูลภาคสนาม และอื่น ๆ ที่สามารถจัดหา และรวบรวมได้จากนั้นนำไปวางซ้อนทับกับผลการจำแนกข้อมูลในปีนั้นๆ และทำการเปรียบเทียบว่าประเภทชั้นข้อมูลชนิดนั้นตรงกันหรือไม่จากข้อมูลจริงที่นำไปทับซ้อนโดยใช้โปรแกรมคำนวณออกมาจากนั้นไปวิเคราะห์หาค่า Overall Accuracy และ Kappa Coefficient

5. ผลการศึกษา

5.1 ผลการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดิน Landsat 5 TM

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน Landsat 5 TM เมื่อพิจารณาพื้นที่ที่สามารถจำแนกตามแต่ละปีตามตารางที่ 3 พบว่าปี พ.ศ. 2543 พื้นที่ที่มีการจำแนกพบมากที่สุดคือ พื้นที่อื่นๆ จำนวน 36,323.44 ไร่ โดยสังเกตพบว่าส่วนใหญ่เป็นพื้นที่นาข้าวกับพื้นที่ไร่ที่ยังไม่มีการเพาะปลูก รองลงมาคือ พื้นที่ป่า 8,084.81 ไร่ ต่อมาเป็นพื้นที่เพาะ

ปลูก 7,038 ไร่ ซึ่งจากข้อมูลภาคสนามและการสอบถามพบว่าปีดังกล่าวพืชส่วนมากเป็นข้าว และพืชไร่ และอื่น ๆ ตามลำดับ

ในปี พ.ศ. 2548 พื้นที่ที่มีการจำแนกพบมากที่สุดก็ยังคงเป็นพื้นที่อื่นๆ 21,710.81 ไร่ และก็ยังคงพบว่าเป็นพื้นที่นาข้าวกับพื้นที่ไร่ที่ยังไม่มีการเพาะปลูก รองลงมาคือ พื้นที่เพาะปลูกจำนวน 13,374.56 ไร่ พืชส่วนมากยังเป็นข้าว และพืชไร่ ต่อมาเป็นพื้นที่ป่าไม้จำนวน 11,804.63 ไร่ และอื่นๆ ตามลำดับ

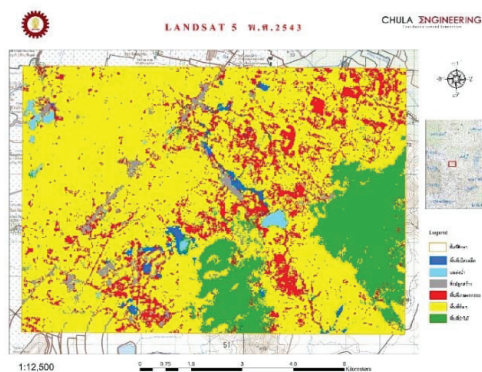
ในปี พ.ศ. 2550 พื้นที่ที่มีการจำแนกพบมากที่สุดคือพื้นที่อื่นๆ จำนวน 27,178.88 ไร่ โดยสังเกตพบว่าส่วนใหญ่เป็นพื้นที่นาที่ยังไม่มีการเพาะปลูก รองลงมาคือ รองลงมาคือ พื้นที่ป่า 17,698.50 ไร่ ต่อมาเป็นพื้นที่เพาะปลูก 3,466.13 ไร่ พืชส่วนมากเป็น ข้าว และพืชไร่ เช่นเดียวกัน และอื่นๆ ตามลำดับ

ในปี พ.ศ. 2552 พื้นที่ที่มีการจำแนกพบมากที่สุดคือ พื้นที่อื่นๆ จำนวน 24,332.07 ไร่ โดยสังเกตพบว่าส่วนใหญ่เป็นพื้นที่นาที่ยังไม่มีการเพาะปลูก รองลงมาคือ พื้นที่ป่า 17,698.50 ไร่ ต่อมาเป็นพื้นที่เพาะปลูกอยู่ที่ 12,335.63 ไร่ พืชส่วนมากเป็น ข้าว และพืชไร่ เช่นเดียวกัน และอื่นๆ ตามลำดับ

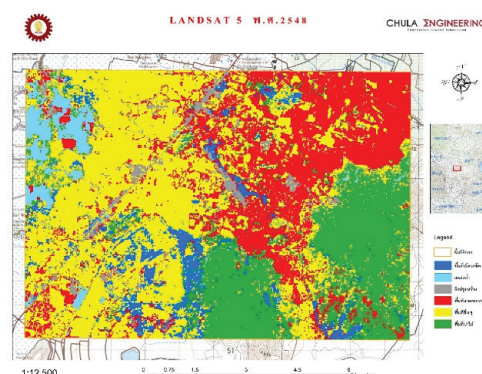
โดยถ้าทำการเปรียบเทียบพื้นที่การเปลี่ยนแปลงทั้งหมด 4 ปี พบว่าปริมาณพื้นที่ที่ได้จากการจำแนกในสามลำดับแรกค่อนข้างที่จะคงเดิม โดยที่มีปริมาณพื้นที่ที่เพิ่มมากขึ้น หรือลดลง อันเนื่องมาจากช่วงเวลาที่ได้ภาพถ่ายดาวเทียมมาใช้ในการวิเคราะห์อยู่ในช่วงเดือน หรือฤดูการในการเพาะปลูกที่แตกต่างกัน และพบว่าพื้นที่ของสิ่งปลูกสร้างมีการขยายพื้นที่เพิ่มขึ้นทุกปี โดยปี พ.ศ. 2543 มีพื้นที่จำนวน 2,337.19 ไร่ และปี พ.ศ. 2552 มีพื้นที่ 3,480.75 ไร่ มีพื้นที่เพิ่มขึ้น 1,143.56 ไร่ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพื้นที่การใช้
ประโยชน์ที่ดิน Landsat 5 TM

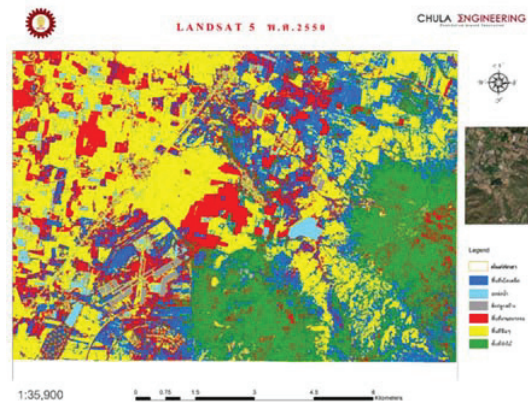
no	Class Name	การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ (หน่วย : ไร่)			
		พ.ศ.2543	พ.ศ.2548	พ.ศ.2550	พ.ศ.2552
1	สิ่งปลูกสร้าง	2,337.19	2,499.75	3,414.38	3,480.75
2	พื้นที่ป่าไม้	8,084.81	11,804.63	17,698.50	12,526.31
3	แหล่งน้ำ	449.44	1,990.69	1,648.69	936.56
4	พื้นที่เพาะปลูก	7,038.00	13,374.56	3,466.13	12,335.63
5	ไม่พุ่มเตี้ย	686.81	3,539.25	1,513.13	1,308.38
6	พื้นที่อื่นๆ	36,323.44	21,710.81	27,178.88	24,332.07
รวม		54,919.69	54,919.69	54,919.69	54,919.70



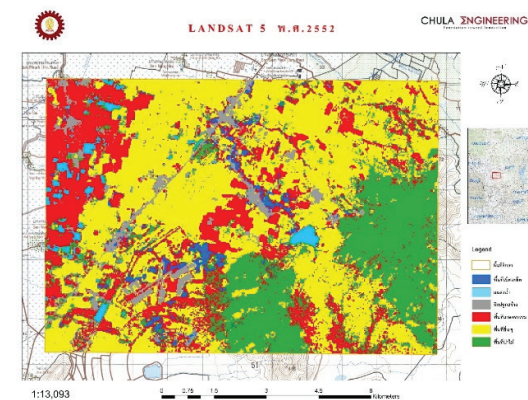
ภาพที่ 3 ผลการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดิน Landsat 5
พ.ศ. 2543



ภาพที่ 4 ผลการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดิน
Landsat 5 พ.ศ. 2548



ภาพที่ 5 ผลการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดิน
Landsat 5 พ.ศ. 2550



ภาพที่ 6 ผลการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดิน
Landsat 5 พ.ศ. 2552

5.2 ผลการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดิน Landsat 8
ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพื้นที่การใช้
ประโยชน์ที่ดิน Landsat 8 เมื่อพิจารณาพื้นที่ที่สามารถ
จำแนกตามแต่ละปีตามตารางที่ 4 พบว่า ปี พ.ศ. 2556
พื้นที่ที่มีการจำแนกพบมากที่สุดคือ พื้นที่อื่นๆ จำนวน
23,368.50 ไร่ โดยสังเกตพบว่าส่วนใหญ่เป็นพื้นที่นาข้าว
กับพื้นที่ที่ยังไม่มีการเพาะปลูก รองลงมาคือ พื้นที่ป่า
จำนวน 9,229.50 ไร่ ต่อมาเป็นพื้นที่ไม่พุ่มเตี้ยอยู่จำนวน
8,822.25 ไร่ และอื่นๆ ตามลำดับ

ในปี พ.ศ. 2559 พื้นที่ที่มีการจำแนกพบมากที่สุดก็ยังคงเป็นพื้นที่อื่นๆ จำนวน 25,585.88 ไร่ และก็ยังคงพบว่าส่วนใหญ่ยังเป็นพื้นที่นาข้าวกับพื้นที่ไร่ที่ยังไม่มีการเพาะปลูก รองลงมาคือ พื้นที่ป่า จำนวน 12,425.06 ไร่ ต่อมาเป็นพื้นที่เพาะปลูก จำนวน 10,362.94 ไร่ พืชส่วนมากเป็น ข้าว และพืชไร่ และอื่นๆ ตามลำดับ

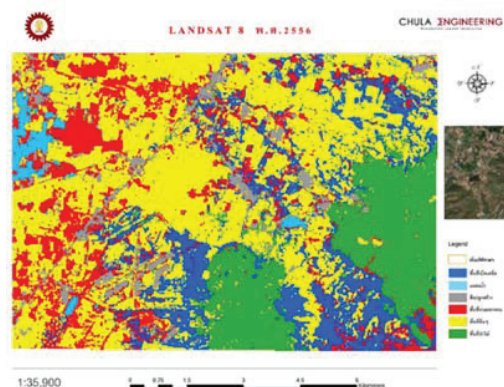
ในปี พ.ศ. 2561 พื้นที่ที่มีการจำแนกพบมากที่สุดคือพื้นที่อื่นๆ จำนวน 18,514.13 ไร่ โดยสังเกตพบว่าส่วนใหญ่เป็นพื้นที่นาที่ยังไม่มีการเพาะปลูก รองลงมาคือ รองลงมาคือ พื้นที่ป่าที่ 17,844.19 ไร่ ต่อมาเป็นพื้นที่เพาะปลูกอยู่จำนวน 7,541.44 ไร่ พืชส่วนมากเป็นข้าว พืชไร่ และพืชสวน และอื่นๆ ตามลำดับ

ในปี พ.ศ. 2563 พื้นที่ที่มีการจำแนกพบมากที่สุดคือพื้นที่เพาะปลูก จำนวน 17,440.31 ไร่ โดยสังเกตพบว่า เป็นข้อมูลดาวเทียมที่อยู่ในช่วงของการเพาะปลูก จึงพบพื้นที่เพาะปลูกเป็นจำนวนมาก รองลงมาคือ พื้นที่อื่นๆ 14,595.75 ไร่ ต่อมาเป็นพื้นที่ป่าที่อยู่ 12,230.44 ไร่ และอื่นๆ ตามลำดับ

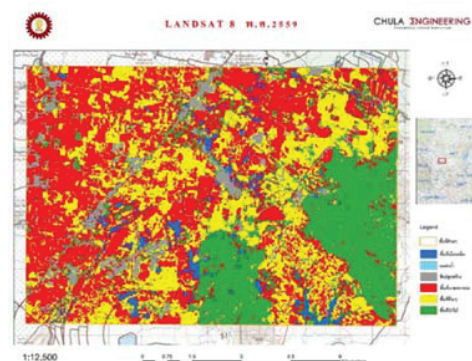
โดยถ้าทำการเปรียบเทียบพื้นที่การเปลี่ยนแปลงทั้งหมด 4 ปี พบว่าปริมาณพื้นที่ที่ได้จากการจำแนกในสามลำดับแรกค่อนข้างที่จะคงเดิม โดยที่มีปริมาณพื้นที่ที่เพิ่มมากขึ้น หรือลดลง เนื่องมาจากช่วงเวลาที่ได้ภาพถ่ายดาวเทียมมาใช้ในการวิเคราะห์อยู่ในช่วงเดือน หรือฤดูกาลในการเพาะปลูกที่ต่างกัน และพบว่าพื้นที่ของสิ่งปลูกสร้างมีการขยายพื้นที่เพิ่มขึ้นทุกปี โดยปี พ.ศ. 2556 มีพื้นที่ 3,981.94 ไร่ และปี พ.ศ. 2563 มีพื้นที่ 5,450.06 ไร่ มีพื้นที่เพิ่มขึ้น 1,418.63 ไร่ แสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน Landsat 8

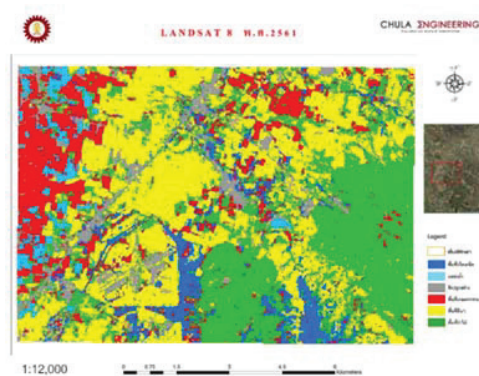
no	Class Name	การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ (หน่วย : ไร่)			
		พ.ศ.2556	พ.ศ.2559	พ.ศ.2561	พ.ศ.2563
1	สิ่งปลูกสร้าง	3,981.94	4,480.31	5,197.5	5,450.06
2	พื้นที่ป่าไม้	9,229.50	12,425.06	17,844.19	12,230.44
3	แหล่งน้ำ	988.31	438.75	1,607.06	1,872.56
4	พื้นที่เพาะปลูก	8,529.19	10,362.94	7,541.44	17,440.31
5	ไม้พุ่มเตี้ย	8,822.25	1,626.75	4,215.38	3,330.56
6	พื้นที่อื่นๆ	23,368.50	25,585.88	18,514.13	14,595.75
รวม		54,919.69	54,919.69	54,919.70	54,919.68



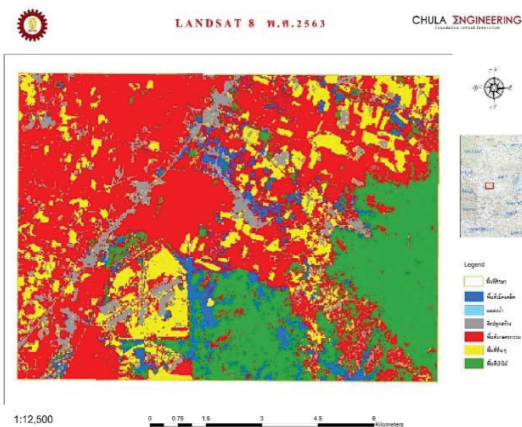
ภาพที่ 7 ผลการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดิน/สิ่งปกคลุมดิน Landsat 8 พ.ศ. 2556



ภาพที่ 8 ผลการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดิน/สิ่งปกคลุมดิน Landsat 8 พ.ศ. 2559



ภาพที่ 9 ผลการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดิน/
สิ่งปกคลุมดิน Landsat 8 พ.ศ. 2561



ภาพที่ 10 ผลการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดิน/
สิ่งปกคลุมดิน Landsat 8 พ.ศ. 2563

5.3 ผลการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดิน THEOS
ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน THEOS พื้นที่ที่สามารถจำแนก

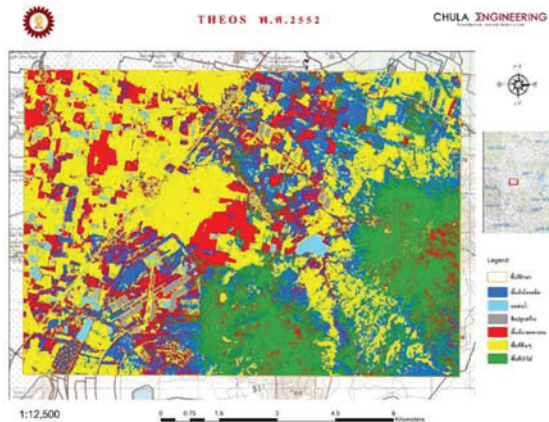
no	Class Name	การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ (หน่วย : ไร่)	
		พ.ศ.2552	พ.ศ.2563*
1	สิ่งปลูก สร้าง	1,836.08	789.71
2	พื้นที่ป่าไม้	10,639.38	5,693.03
3	แหล่งน้ำ	1,307.92	163.58
4	พื้นที่ เพาะปลูก	10,364.23	12,978.53
5	ไม้พุ่มเตี้ย	11,434.38	9,117.81
6	พื้นที่อื่นๆ	19,340.27	12,090.04
รวม		54,922.26	40,832.70

ตามแต่ละปีตาม (ตารางที่ 5) พบว่า ปี พ.ศ. 2552 พื้นที่ที่จำแนกพบมากที่สุดคือ พื้นที่อื่นๆ จำนวน 19,340.27 ไร่ โดยพบว่าส่วนใหญ่เป็นพื้นที่นาข้าวกับพื้นที่ที่ยังไม่มีการเพาะปลูก รองลงมาคือ เป็นไม้พุ่มเตี้ยจำนวน 11,434.38 ไร่ พื้นที่ป่าจำนวน 10,639.38 ไร่ และพื้นที่อื่นๆ ตามลำดับ

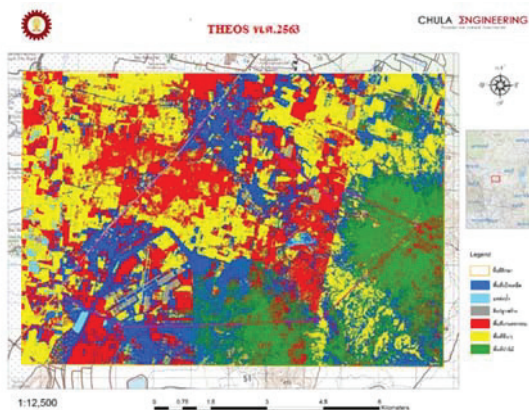
ในปี พ.ศ. 2563 พื้นที่ที่มีการจำแนกพบมากที่สุดเป็นพื้นที่เพาะปลูกจำนวน 12,978.53 ไร่ พืชส่วนมากเป็นข้าว พืชไร่ และพืชสวน รองลงมาคือ พื้นที่อื่นๆ จำนวน 12,090.04 ไร่ พื้นที่ไม้พุ่มเตี้ยจำนวน 9,117.81 ไร่ และพื้นที่อื่นๆ ตามลำดับ โดยข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมปี พ.ศ. 2563 มีพื้นที่น้อยกว่าขอบเขตพื้นที่ศึกษา

โดยถ้าทำการเปรียบเทียบพื้นที่การเปลี่ยนแปลงทั้ง 2 ปี เซกซ์ตัวเลขอาจไม่สามารถพิจารณาเปรียบเทียบได้เนื่องจากพื้นที่ข้อมูลมีพื้นที่ไม่เท่ากัน เนื่องจากดาวเทียมปี พ.ศ. 2563 มีพื้นที่น้อยกว่า แต่ภาพถ่ายดาวเทียมยังสามารถนำมาซ้อนทับกันเพื่ออ่านแปลภาพถ่ายดาวเทียมได้ (ภาพที่ 12) ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน THEOS

หมายเหตุ : *ข้อมูลดาวเทียม THEOS ปี 2562 มีพื้นที่น้อยกว่าขอบเขตพื้นที่ศึกษา



ภาพที่ 11 ผลการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดิน/สิ่งปกคลุมดิน THEOS ปี 2552



ภาพที่ 12 ผลการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดิน/สิ่งปกคลุมดิน THEOS ปี 2563

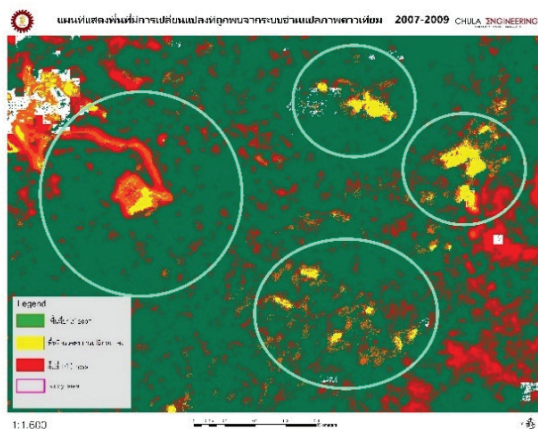
5.4 สรุปผลการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดิน

จากการวิเคราะห์ และเปรียบเทียบของการแปลความของข้อมูลดาวเทียมทั้ง 3 ชนิด จากข้อมูลดาวเทียมตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543 จนถึง พ.ศ. 2563 พบว่า มีทั้งพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงโดยภาพรวมเพิ่มขึ้น คือ พื้นที่สิ่งปลูกสร้าง (ที่อยู่อาศัย อาคารโรงงาน อาคารราชการฯ) พื้นที่ที่มีการลดลง คือ พื้นที่ป่าไม้ เนื่องจาก

ปรับเปลี่ยนไปเป็นพื้นที่เพาะปลูก หรือ สิ่งปลูกสร้าง และพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลง เพิ่มขึ้นและลดลงระหว่างปีไม่คงที่ คือ พื้นที่เพาะปลูก แหล่งน้ำ และพื้นที่อื่นๆ เนื่องจากช่วงเวลาของข้อมูลภาพที่นำมาจำแนกในแต่ละปีต่างกัน ทำให้มีการปรับเปลี่ยนการใช้ที่ดิน หรือ สิ่งปกคลุมดิน เพราะในแต่ละปีการทำการเกษตรในพื้นที่มีหลากหลายชนิด หรือมีกิจกรรมการเกษตรที่หลากหลายตามฤดูกาลในพื้นที่นั้นๆ เป็นผลทำให้การจำแนกมีความแตกต่างกันไปในแต่ละช่วงเวลา และยังพบว่าพื้นที่ที่มีการขยายตัวคือพื้นที่สิ่งปลูกสร้างเกิดขึ้นในพื้นที่อื่นๆ และพื้นที่เพาะปลูก หรือพื้นที่ป่าไม้ที่ลดลงเกิดจากการบุกรุก หรือการขยายพื้นที่สิ่งปลูกสร้างเข้าไปในพื้นที่ป่าไม้ เช่น จากผลข้อมูลการจำแนก Landsat 8 ในปี พ.ศ. 2556 (ภาพที่ 7) เมื่อทำการเปรียบเทียบกับข้อมูล Landsat 5 ในปี พ.ศ. 2552 (ภาพที่ 6) มีการขยายตัวพื้นที่สิ่งปลูกสร้างเข้าไปในพื้นที่ป่าไม้ ใกล้บริเวณเชิงเขาที่พิกัด ละติจูด 14.9642607 N ลองจิจูด 100.6993439 E หรือพิกัดทางทหารคือ 47PPS8274655073 (ภาพที่ 13) เป็นต้น โดยถ้าพิจารณาถึงค่าความถูกต้องเฉลี่ยในการจำแนกข้อมูลดาวเทียม 3 ชนิด พบว่ามีค่าความถูกต้องใกล้เคียงกัน โดยข้อมูลจาก Landsat 5 ได้ความถูกต้อง Overall Accuracy เฉลี่ยมากที่สุด 81.67% รองลงมาคือ Landsat 8 ที่ 78.33% และ THEOS อยู่ที่ 75% และ ค่าเฉลี่ยของ Kappa Coefficient (K) เช่นเดียวกันโดยที่ Landsat 5 มากที่สุด 0.78 รองลงมาคือ Landsat 8 ที่ 0.74 และ THEOS อยู่ที่ 0.74 ซึ่งให้ค่า ความสอดคล้อง (Strange of Agreement) ในระดับดี (Substantial) เท่ากันทั้งหมด โดยแสดงค่าตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าการประเมินความถูกต้องโดยเฉลี่ยของ
การจำแนกข้อมูลดาวเทียม 3 ชนิด

ดาวเทียม	Overall Accuracy (%)	Kappa Coefficient (K)	ความสอดคล้อง (Strange of Agreement)
Landsat 5 TM	81.67	0.78	ดี (Substantial)
Landsat 8	78.33	0.74	ดี (Substantial)
THEOS	75	0.70	ดี (Substantial)



ภาพที่ 13 ผลวิเคราะห์และซ้อนทับภาพดาวเทียม
ตรวจพบการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ป่าไม้

6. สรุปและอภิปรายผล

การศึกษาวิจัยเรื่อง การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี ภูมิสารสนเทศในการวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินด้วยข้อมูลดาวเทียม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ เพื่อวิเคราะห์ ความเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ในพื้นที่จาก ภาพดาวเทียม และเพื่อจัดทำระบบอ่านแปลภาพ ดาวเทียมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อเฝ้าระวัง ติดตาม สถานการณ์ และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงในการใช้ ประโยชน์ในพื้นที่ บริเวณพื้นที่ตัวอย่างตำบลห้วยโป่ง

อำเภอโคกสำโรง จังหวัดลพบุรี ซึ่งงานวิจัยนี้เพื่อเป็นการ พัฒนาและประยุกต์ใช้ในการดูแลรักษาพื้นที่ของกองทัพบก และส่วนงานอื่นๆ และให้หน่วยทหารที่รับผิดชอบดูแล พื้นที่ที่สามารถนำระบบไปใช้ในพื้นที่และเพิ่มขีดความ สามารถในการดูแลพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

6.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จากวัตถุประสงค์ เพื่อ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน โดยการ ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ เพื่อวิเคราะห์ความ เปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ในพื้นที่จากภาพดาวเทียม และเพื่อจัดทำระบบอ่านแปลภาพดาวเทียมด้วยระบบ คอมพิวเตอร์ เพื่อเฝ้าระวัง ติดตามสถานการณ์ และ วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงในการใช้ประโยชน์ในพื้นที่ บริเวณพื้นที่ตัวอย่างตำบลห้วยโป่ง อำเภอโคกสำโรง จังหวัดลพบุรี

โดยผลที่ได้จากกระบวนการวิเคราะห์แปล ความข้อมูลดาวเทียมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ โดยการจำแนกด้วยวิธี กำกับดูแล (Supervised Classification) แบบ การหาตัวประมาณค่าที่ทำให้ฟังก์ชันร่วม มีค่าสูงสุด หรือ ความน่าจะเป็นมากที่สุด (Maximum Likelihood) ด้วยข้อมูลดาวเทียม 3 ชนิด ตามปีที่สามารถ จัดหามาได้ เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ศึกษา ได้จำแนกประเภทชั้นข้อมูล 6 ชั้นข้อมูล คือ พื้นที่สิ่งปลูก สร้าง พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่แหล่งน้ำ พื้นที่เพาะปลูก พื้นที่ไม้พุ่ม เตี้ย และพื้นที่อื่นๆ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์แปลความออก มานั้นทำให้ทราบถึงปริมาณพื้นที่ของประเภทชั้นข้อมูล นั้นๆ และที่สำคัญทำให้ทราบได้ว่าการใช้ที่ดินประเภท หนึ่งเปลี่ยนเป็นอีกประเภทหนึ่ง และสามารถบอกขนาด พื้นที่พร้อมพิกัดหรือตำแหน่งที่ตั้งได้ และภาพดาวเทียม ที่เหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุดคือ ภาพจากดาวเทียม Theos ที่มีรายละเอียดจุดภาพ 2 เมตร ทำให้ผลจากการ วิเคราะห์ให้ความละเอียดในการจำแนกภาพที่ชัดเจน สามารถแสดงผลของรายละเอียดจุดภาพที่ทำให้อ่านแปล ผลภาพดาวเทียมได้ง่าย

ในส่วนการพัฒนา Web Map Service โดยการนำผลลัพธ์จากการจำแนกข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียม ที่ได้จัดทำขึ้น ทำการเชื่อมโยงข้อมูลผ่านระบบ GIS Portal ให้สามารถใช้งานข้อมูลแบบออนไลน์ มีความสะดวก รวดเร็วต่อการใช้งาน ด้วยการใช้งานผ่านระบบเว็บ แอปพลิเคชัน โดยเว็บแอปพลิเคชันสามารถแสดงผลในรูปแบบแผนที่ สามารถแสดงรายละเอียดต่างๆ ได้ครบถ้วน ตามความต้องการของผู้ใช้งานในภาคสนาม โดยใช้งานได้ผ่านโทรศัพท์มือถือหรือแท็บเล็ตเพียงมีสัญญาณอินเทอร์เน็ต โดยชุดข้อมูลที่สร้างไว้ใช้งานถูกจัดเก็บไว้ในระบบที่มีความปลอดภัยสูง มีการเข้ารหัสของข้อมูล และช่วยให้หน่วยที่ทำงานภาคสนาม และหน่วยที่อยู่ในที่ตั้งเห็นภาพ สถานการณ์เป็นภาพเดียวกัน

6.2 การอภิปรายผลการศึกษา

ผลการวิจัยทำให้พบว่า วิธีการศึกษาด้วยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศในการวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินด้วยข้อมูลดาวเทียมเป็นวิธี หรือกระบวนการที่ทำให้ได้มาซึ่งข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน หรือสิ่งปกคลุมดินอย่างรวดเร็ว และง่ายต่อการจัดการ ทำให้ลดการสูญเสียเวลาในการเข้าตรวจสอบพื้นที่ และยังสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทำงาน โดยสามารถแยกพื้นที่เป้าหมายในการเข้าตรวจสอบได้อย่างแม่นยำ

โดยกระบวนการทำงานในการศึกษาครั้งนี้สามารถนำระบบการวิเคราะห์มาช่วยในการบริหารจัดการที่ดิน ในความครอบคลุมดูแล และการใช้ประโยชน์ของกองทัพบก ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพพื้นที่ และการใช้ประโยชน์ในที่ดินหรือสิ่งปกคลุมดิน ในการตรวจสอบและบันทึกเป็นหลักฐาน และการดำเนินการแก้ไขปัญหาการบุกรุก หรือการป้องกัน เนื่องจากข้อมูลที่ได้มีระบบค่าพิกัดในการบอกตำแหน่งพร้อมขนาดของพื้นที่ได้ และสามารถใช้กระบวนการตามงานวิจัยนี้ นำไปใช้งานในการวิเคราะห์ภาพถ่ายดาวเทียมในพื้นที่อื่นๆ ได้ ชุดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่เหมาะสมและสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลได้ดีที่สุด จากการวิจัยพบว่าชุด

ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมจากดาวเทียม Theos หรือไทยโชต สามารถแสดงผลได้ชัดเจนที่สุด เนื่องจากมีรายละเอียดของจุดภาพ มีความละเอียด 2 เมตรต่อหนึ่งจุดการแสดงผลซึ่งให้รายละเอียดของการแปลพื้นที่ที่มีความละเอียดและแสดงผลชัดเจนมากที่สุด และในอนาคตจะมีการปล่อยดาวเทียม Theos2 ของประเทศไทย ซึ่งเป็นดาวเทียมที่มีรายละเอียดจุดภาพ 0.5 เมตร จึงทำให้ข้อมูลภาพที่ได้มาใช้ในการกระบวนการเดียวกันนี้จะสามารถแสดงผลความเปลี่ยนแปลงในพื้นที่ได้ดียิ่งขึ้น

ดังนั้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศในการวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินด้วยข้อมูลดาวเทียม จึงเป็นกระบวนการที่ตอบโจทย์ ในการพัฒนาระบบเพื่อใช้ในการบริหารจัดการที่ดินของกองทัพบกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

7. ข้อจำกัดของงานวิจัย

เนื่องจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่จำกัด ดาวเทียมแต่ละชนิดมีวงรอบการถ่ายภาพที่ไม่ตรงกันทำให้ข้อมูลไม่ครบทุกช่วงเวลาที่ต้องการ และรายละเอียดจุดภาพของภาพถ่ายดาวเทียมแต่ละชนิดไม่เท่ากัน จึงไม่ควรนำผลลัพธ์ของแต่ละดาวเทียมมาเปรียบเทียบกันได้

8. กิตติกรรมประกาศ

นักวิจัยขอขอบคุณ กองข่าวกองทหารภาพ สำนักข่าวกรอง กรมข่าวทหารบก ที่สนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

9. บรรณานุกรม

- (1) GISTDA, (2564) ข้อมูลดาวเทียม THAICHOTE, สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), OCTOBER 09) 2019. Retrieve from <https://www2.gistda.or.th/main/th/node/90>
- (2) J. R. Landis, G. G. Koch, "An application of hierarchical kappa-type statistics in the assessment of majority agreement among multiple observers." Biometrics, 363-374 (1977).

- (3) S. S. Rwanga, J. M. Ndambuki, "Accuracy assessment of land use/land cover classification using remote sensing and GIS." *International Journal of Geosciences*, 8(04), 611 (2017).
- (4) F. Wang, "Fuzzy supervised classification of remote sensing images." *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 28(2), 194-201 (1990).
- (5) ป. ชื่นบางยาง, "การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อศึกษาศักยภาพ การผลิตข้าวอินทรีย์ ของบ้านหนองแวง ตำบลไธสง อำเภอดอนเจดีย์ จังหวัดสุพรรณบุรี" (2553)
- (6) อัญญา บุญยงค์, วณมพร พาหะนิขย์, ภูมิ สาทสินธุ์. เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ กับ การ รู้ เรื่อง ภูมิศาสตร์. *Journal of Humanities and Social Sciences Surin Rajabhat University*, 20(2), 385-397 (2018).

อัลกอริทึมแห่งความสัมพันธ์ระหว่างการไร้ตัวตนกับอาชญากรรมไซเบอร์ The Algorithm of Relationship between Anonymity and Cybercrime

ดร. ประเมศวร์ กุมารบุญ
Dr. Poramez Kumarnboon

วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ

*คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 ประเทศไทย
Defense Engineering and Technology, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand.*

Corresponding Author. E-mail : poramez@live.com

(Received: September 10, 2022, Revised: March 6, 2023, Accepted: March 9, 2023)

บทคัดย่อ : บทความวิจัยนี้มุ่งหมายเพื่อสร้างอัลกอริทึมให้คอมพิวเตอร์ประมวลผลเพื่อพยากรณ์การเกิดอาชญากรรมไซเบอร์ และโอกาสก่อการร้าย จากความสัมพันธ์ระหว่างการไร้ตัวตนกับอาชญากรรมไซเบอร์ที่วิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเกมเป็นวิธีวิจัยแบบผสมผสานเพื่อเข้าใจกระบวนการตัดสินใจของอาชญากรไซเบอร์โดยทฤษฎีการคิดอย่างเป็นเหตุเป็นผล และใช้ทฤษฎีเกมเป็นเครื่องมือในการอธิบายความสัมพันธ์ด้วย ต้นไม้การตัดสินใจ ตารางผลตอบแทน และสมการผลตอบแทน ผลการวิจัยได้พิสูจน์ว่าการไร้ตัวตนและการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์มีความสัมพันธ์ระหว่างกัน

คำสำคัญ : อาชญากรรมไซเบอร์ การก่อการร้ายไซเบอร์ การไร้ตัวตน

Abstract : The aim of using Game theory in this research paper for computer processing algorithm to predicts cybercrime and terrorist probability, that there is the relationship between anonymity and cybercrime in almost in every domain. Consequently, this research is mixed method, and purpose to understand cyber criminal's decision-making by rational choice theory that has been used Game theory as an explanation via Decision Tree, Payoff Matrix and Payoff Function. The result of this research proved that cybercrimes and anonymity are related.

Keyword: Cybercrime, Cyber terrorism, Anonymity

1. บทนำ

แนวโน้มการก่อการร้ายพันทาง (Hybrid terrorist) เปลี่ยนรูปแบบยุทธวิธีไปสู่มิติไซเบอร์มากขึ้น (Cyber-space domain) เรียกว่าเป็น Non-Kinetic Acts (NKA) ไม่ใช้การปะทะโดยตรง ไม่จับตัวประกัน ไม่วางระเบิด พลีชีพ ไม่จี้เครื่องบิน ไม่กราดยิง แต่เปลี่ยนมาก่อการร้ายด้วยการก่อวินาศกรรมโครงสร้างพื้นฐานสาธารณะสำคัญ ด้วยการโจมตีแฮกหรือแรนซัมแวร์ยึดระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุม ท่อส่งน้ำมัน ท่อส่งก๊าซ ระบบไฟฟ้า ระบบรถไฟ ระบบประปา เป็นต้น อีกทั้งปฏิบัติการสงครามจิตวิทยาผ่านไซเบอร์เทคโนโลยีปลุกเร้า (Radicalized) ให้ลุกขึ้นมาก่อการร้ายหรือเกลียดชังกันเองระหว่างคนในชาติ และเกิดเส้นทางการเงินการก่อการร้ายใหม่ผ่านระบบสินทรัพย์ดิจิทัล

การก่อการร้ายไซเบอร์ (Cyber terrorism) เป็นรูปแบบใหม่ที่ปฏิวัติวิธีการก่อการร้ายดั้งเดิม (Disrupted traditional terrorism) ด้วยหลายเหตุผลที่สนับสนุน อาทิ เช่น ค่าใช้จ่ายถูกกว่า สร้างความเสียหายได้มากกว่า ทำให้คนตายในวงกว้างได้มากกว่า ระดมทุนหรือโอนเงินข้ามพรมแดนได้ง่ายกว่า และสามารถก่อการร้ายระยะไกลได้โดยไม่ต้องไปยังพื้นที่ (Remotely) ทำให้ไม่มีโอกาสจับกุมตัว

ควบคู่ไปกับการก่อการร้ายไซเบอร์ก็คืออาชญากรรมไซเบอร์และกลุ่มองค์กรอาชญากรรมข้ามชาติที่ทวีความรุนแรงสร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในสังคม อย่างที่รัฐทั่วโลกแทบไม่มีโอกาสปกป้องประชาชนได้ทันล่วงหน้า ผลงานของทุกรัฐทั่วโลกออกมาในรูปแบบการแถลงข่าวการจับกุม จับได้มากมีผลงานมาก แต่ในความจริงแล้วการเกิดคดีขึ้นหมายถึงมีเหยื่อเกิดขึ้นแล้วสักคน อาจเสียชีวิตหรือเสียชีวิตไปแล้ว โดยไม่อาจมีใครปกป้องประชาชนได้ทัน

ดังนั้นความสามารถในการพยากรณ์ว่าอาชญากรรมไซเบอร์หรือการก่อการร้ายด้วยเทคโนโลยีใดจะมีโอกาสเกิดขึ้นในสังคม รัฐจึงจะสามารถป้องกันล่วงหน้าได้ก่อน

และจะไม่มีประชาชนตกเป็นเหยื่อสักคนเมื่อมีเทคโนโลยีใหม่เกิดขึ้นในสังคม และปิดโอกาสการก่อการร้ายงานวิจัยชิ้นนี้จึงค้นหาจุดร่วมของการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์และการก่อการร้ายทางไซเบอร์โดยใช้ทั้ง ทฤษฎีเกม และทฤษฎีอาชญาวิทยา มาสร้างอัลกอริทึมเป็นสมการคณิตศาสตร์ให้ระบบคอมพิวเตอร์ประมวลผลเพื่อพยากรณ์แนวโน้มของไซเบอร์เทคโนโลยีใดจะเกิดอาชญากรรมไซเบอร์หรือการก่อการร้าย มากขึ้นหรือลดลง เพื่อแสดงผลในห้องบัญชาการ (War room) ในการเฝ้าติดตามสถานการณ์อาชญากรรมไซเบอร์หรือแนวโน้มการก่อการร้ายในอนาคต

สหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union) หรือ ITU เป็นองค์กรชำนาญพิเศษแห่งสหประชาชาติซึ่งมีหน้าที่ในการให้คำแนะนำรัฐต่างๆ ในการกำกับดูแลกิจการสื่อสารได้ดีพิมพ์เอกสารทางวิชาการเรื่อง Understanding Cybercrime: Phenomena, Challenge and Legal Response [7] ประเด็นที่น่าสนใจกล่าวว่า “Cybercrime และ Cyber Security เป็นเรื่องที่แยกจากกันคนละประเด็น”

ITU Development [7] ได้นิยามไว้ว่า Cyber Security เป็นเรื่องสำคัญของการพัฒนาเทคโนโลยีข้อมูลข่าวสาร (Information Technology) ที่เกี่ยวข้องกับบริการอินเทอร์เน็ต ที่จะต้องปกป้องข้อมูลข่าวสารไม่ให้ถูกทำลาย โดยเฉพาะเครือข่ายและข้อมูลข่าวสารของโครงสร้างสาธารณูปโภคพื้นฐานที่สำคัญหรือ Critical Information Infrastructures (CII) อาทิ เครือข่ายการสื่อสารของระบบการไฟฟ้า เครือข่ายการสื่อสารของระบบส่งก๊าซธรรมชาติ เครือข่ายโทรคมนาคม เป็นต้น ล้วนส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจ และความมั่นคงของชาติ หากการรักษาความปลอดภัยบกพร่อง

แต่ Cybercrime เป็นอาชญากรรมทุกรูปแบบที่เกิดจากการใช้ประโยชน์เครือข่ายโทรคมนาคมและเทคโนโลยีสารสนเทศ (ICT Network) ซึ่งเป็นเรื่องวิกฤติสำหรับ

หน่วยงานสืบสวนสอบสวนและเป็นประเด็นท้าทายในการบังคับใช้กฎหมายในปัจจุบัน

ปัจจุบันอาชญากรรมไซเบอร์เติบโตกว้างขวางไปมากในกระบวนการยุติธรรมอาญามีประโยคภาษาละตินว่า Nullum crimen sine lege แปลว่า no crime without law หมายถึง จะไม่มีอาชญากรรมถ้าไม่มีกฎหมาย บัญญัติว่าเป็นโทษอาญา ดังนั้นการก่ออาชญากรรมทุกประเภทที่ย้ายจากโลก Offline ขึ้นไปสู่โลก Online เป็นอาชญากรรมไซเบอร์ทั้งหมด กล่าวคือถ้าไม่มีไซเบอร์ เทคโนโลยีมาเกี่ยวข้องอาชญากรรมประเภทนั้นจะเกิดขึ้นไม่ได้ [2]

เนื่องจากศัพท์บางคำยังใหม่และยังไม่มีคำนิยามอย่างเป็นทางการ ณ ปัจจุบัน (พ.ศ. 2565) ในการวิจัยนี้จึงขออนุญาตศัพท์เป็นการเฉพาะเพื่อให้เป็นการเข้าใจตรงกันและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

“การไร้ตัวตน” (Anonymity) ในบทความวิจัยนี้ หมายถึง องค์ประกอบ 2 ปัจจัยหลัก (Anonymous Factors) ที่ช่วยให้อาชญากรรมรอดพ้นโทษอาญาได้ คือ

(ก.) การหลบพ้นจากการสืบสวนจับกุมทางดิจิทัล (Digital Detective)

(ข.) การรวบรวมพยานหลักฐานดิจิทัล (Digital Forensic) เพื่อดำเนินคดีทำไม่ได้

การวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ตั้งข้อสันนิษฐานจากการสังเกตปรากฏการณ์ในสังคมโลกพบว่า

เหตุผลหนึ่ง การตัดสินใจลงมือก่ออาชญากรรมไซเบอร์หรือการก่อการร้ายทางไซเบอร์อาจเป็นเพราะอาชญากรหรือผู้ก่อการร้ายเชื่อมั่นว่า “จะไม่มีวันถูกจับสามารถหลบพ้นจากการสืบสวนจับกุมทางดิจิทัลได้” จึงกล้าลงมือประกอบอาชญากรรมหรือก่อการร้าย แต่หากเจ้าหน้าที่สามารถสืบสวนจับกุมได้โดยง่ายหรือหาตัวผู้ก่อการร้ายหรืออาชญากรได้รวดเร็ว อาชญากรหรือผู้ก่อการร้ายจะชั่งน้ำหนักเหตุผลไม่ลงมือก่ออาชญากรรมหรือก่อการร้าย เช่น หากอาชญากรต้องการลักทรัพย์ ย่อมเลือกลักทรัพย์บ้านหลังที่ไม่มีกล้องวงจรปิดหรือหา

วิธีทำลายกล้องวงจรปิดเสียก่อน

เหตุผลอีกประการ กล่าวคือ อาชญากรยังเชื่อมั่นว่า แม้ถูกจับกุมตัวได้ในที่สุด แต่เจ้าหน้าที่จะไม่สามารถรวบรวมพยานหลักฐานดิจิทัลเพื่อดำเนินคดีเอาผิดได้ จึงยังกล้าตัดสินใจประกอบอาชญากรรม

ต่อไปบทความนี้ขอใช้คำว่า “อาชญากร” หมายถึง อาชญากรไซเบอร์และผู้ก่อการร้ายทางไซเบอร์ และการก่ออาชญากรรมไซเบอร์หมายรวมถึงการก่อการร้ายทางไซเบอร์ เพื่อประหยัดถ้อยคำ

รูปแบบการก่ออาชญากรรมไซเบอร์แต่ละประเภทขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีการไร้ตัวตนในแต่ละชนิดแต่ละยุคสมัย กล่าวคือ ในยุคหนึ่งหรือในอดีต เทคโนโลยีประเภทหนึ่งสามารถช่วยอาชญากรปิดบังตัวตนล่องหนหายตัวได้ แต่พอเวลาผ่านไปเทคโนโลยีการสืบสวนจับกุมพัฒนาก้าวหน้าขึ้นสามารถสืบสวนจับกุมอาชญากรได้ เช่น ในอดีตแก๊งค์คอลเซ็นเตอร์ใช้เทคโนโลยีโทรศัพท์เสียงผ่านอินเทอร์เน็ต (VOIP) ปิดบังอำพรางตัวตนในการก่ออาชญากรรมมาหลายปี และเมื่อเทคโนโลยีการสืบสวนจับกุมก้าวหน้าแก๊งค์คอลเซ็นเตอร์หมดไปในช่วงหนึ่งและเปลี่ยนรูปแบบวิธีการใหม่ๆ ในการปิดบังอำพรางจนเกิดคดีมากขึ้นในปัจจุบัน

หากอาชญากรรมไซเบอร์ประเภทใดทำการ สืบสวนจับกุมไม่ได้หรือรวบรวมพยานหลักฐานเพื่อดำเนินคดีไม่ได้ อาชญากรรมไซเบอร์ประเภทนั้นจะเติบโตอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าหากเมื่อใดเจ้าหน้าที่ตำรวจสามารถสืบสวนจับกุมอาชญากรรมไซเบอร์ประเภทนั้นได้ และสามารถรวบรวมพยานหลักฐานเพื่อดำเนินคดีได้ครบถ้วน อาชญากรรมไซเบอร์ประเภทนั้นจะลดลงจนหมดสิ้นไป

2. คำถามวิจัย

“การตัดสินใจประกอบอาชญากรรมไซเบอร์มีความสัมพันธ์กับการไร้ตัวตนอย่างไร?”

3. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

3.1 เพื่อศึกษา และรวบรวมรูปแบบการประกอบอาชญากรรมไซเบอร์ในสังคมที่เคยเกิดขึ้นจากอดีตมาจนถึงปัจจุบัน อันเป็นกรณีศึกษาเกี่ยวข้องกับการไร้วัดตน มีความสัมพันธ์กับการเกิดอาชญากรรม

3.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการไร้วัดตน (Anonymous Factor) อันเป็นเหตุให้รอดพ้นจากการสืบสวนจับกุม (Digital Detective) และการรวบรวมพยานหลักฐานดิจิทัล (Digital Forensic) กับการตัดสินใจก่ออาชญากรรมไซเบอร์ของอาชญากร

3.3 เพื่อสร้างรูปแบบความสัมพันธ์การเชื่อมโยงระหว่างการไร้วัดตน (Anonymity) กับอาชญากรรมไซเบอร์ ด้วยทฤษฎีเกม เพื่อเป็นอัลกอริทึมอย่างสมการคณิตศาสตร์ให้ระบบคอมพิวเตอร์ประมวลผลพยากรณ์

4. ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัย ใช้วิธีการวิจัยแบบผสมผสาน (Mixed research method) ทั้งการวิจัยเชิงปริมาณ (Qualitative research จากข้อมูลสถิติกับแบบสำรวจ (จากผู้ตอบแบบสอบถามออนไลน์ 35 ราย) และการวิจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative research) โดยการจัดทำกรณีศึกษา (Case study) ด้วยการวิจัยเอกสาร (Documentary research) อาทิ ข่าว บทความ หนังสือชีวประวัติ เอกสารราชการ งานวิชาการ บทสัมภาษณ์ในสื่อต่างๆ และคำพิพากษา จำนวน 17 กรณี เพื่อศึกษารูปแบบในการกระทำความผิดของ อาชญากรรมไซเบอร์ และวิเคราะห์ถึงความเป็นเหตุเป็นผลในการตัดสินใจกระทำความผิดจากการสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth Interview) เป็นการสัมภาษณ์จากผู้ให้ข้อมูลสำคัญ 3 ท่าน โดยไม่เคยพบตัวจริงและไม่ทราบชื่อจริง ทำการสัมภาษณ์ทางโทรศัพท์เป็นอดีตแอดมินและปัจจุบันเป็นวิศวกรด้านความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ 1 ท่าน และอีก 2 ท่านเป็นอดีตแอดมินทำงานอยู่ในแวดวงไอทีไทย

5. การดำเนินการศึกษาวิจัย

อาชญากรไซเบอร์ทุกประเภทที่ผู้วิจัยได้ศึกษาในทุกกรณี และทุกคดีพบว่า “อาชญากรไซเบอร์เป็นผู้เห็นแก่ตัว และตัดสินใจเลือกอย่างเป็นเหตุเป็นผล” (Rationale)

อาชญากรไซเบอร์ในการวิจัยนี้ ไม่รวมถึงอาชญากรประเภทวิกลจริต และอาชญากรโดยกำเนิดที่มีพฤติกรรมความรุนแรงขาดการใช้เหตุผล จากการศึกษาเชิงประจักษ์ ผู้วิจัยไม่พบอาชญากร 2 ประเภทดังกล่าวในอาชญากรรมไซเบอร์ [2] เพราะเนื่องด้วยอาชญากรไซเบอร์ส่วนใหญ่มีความรู้ความสามารถสูง มีความสามารถในการใช้เทคโนโลยีให้รอดพ้นจากการถูกจับกุม (Perfect criminal) โดยส่วนใหญ่จึงมีลักษณะเป็น อาชญากรตามโอกาส (Occasional criminals) และอาชญากรติดนิสัย (Habitual criminals) โดยมีรูปแบบการคิดของอาชญากรหลักๆ 2 กรณี คือ คิดว่าตนเองมีอำนาจเหนือผู้อื่น (Power orientation) หรือคิดได้ใจเกินจริง (Super-optimism) ว่าสามารถที่จะหลีกพ้นโทษจากการกระทำความผิดของตนเองได้อย่างแน่นอนหรือมั่นใจว่าตนไม่มีทางถูกจับได้ โดยเฉพาะมีประสบการณ์กระทำความผิด และสามารถเอาตัวรอดได้บ่อยๆ [3]

ลักษณะอาชญากร และรูปแบบการคิดของอาชญากรในลักษณะต่างๆ จากที่ได้ศึกษามาเชื่อว่า การกระทำพฤติกรรม อาศัยกระบวนการทางปัญญาเป็นสำคัญในการชั่งน้ำหนักตัดสินใจ สอดคล้องกับทฤษฎีการเลือกอย่างเป็นเหตุเป็นผลของ เอลสเตอร์ ที่ให้แผนภาพลึกซึ้งมากยิ่งขึ้น

ไซยันต์ ไชยพร [1] การเลือกอย่างเป็นเหตุเป็นผลของ เอลสเตอร์ อธิบายสิ่งที่มุ่งให้เกิดการกระทำมีอยู่ 2 ประการนั้นคือ

ก. ความปรารถนา (Desire)

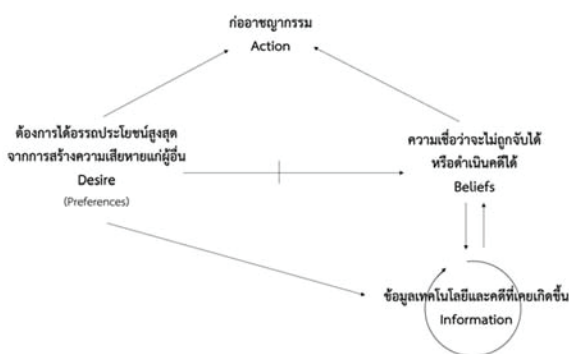
ข. ความเชื่อ (Belief)

ทั้งสองสิ่งนี้เป็นเหตุผลที่เพียงพอในการหาวิธีการใดที่จะทำเพื่อให้บรรลุผลเป้าหมาย เอลสเตอร์ อธิบายเพิ่มว่า ความปรารถนา มีความพอใจเลือก (Preferences) ที่ประกอบไปด้วย พอใจเลือกที่มีเนื้อหา และพอใจเลือกแค่รูปแบบ

ทฤษฎีการเลือกอย่างเป็นเหตุเป็นผลนี้สามารถแสดงมาในรูปแบบกราฟที่แสดงฟังก์ชันอรรถประโยชน์ที่จุดต่างๆ กันได้ โดยแต่ละจุดมีค่าที่แสดงไว้ ทำให้บอกได้ว่าผู้ที่เลือกอย่างเป็นเหตุเป็นผลจะเลือกการกระทำใดที่จะให้ผลลัพธ์สูงสุด (Maximizing utility) ต่ออรรถประโยชน์ของตน แต่ความปรารถนาคือความปรารถนาที่เห็นแก่ตัวหรือตนพึงพอใจหรือชั่วร้าย ด้วยเอาประโยชน์จากผู้อื่น

ในส่วนความเชื่อ (Belief) ที่รองรับการเลือกอย่างเป็นเหตุเป็นผล ต้องเป็นความเชื่อที่มีพื้นฐานที่รองรับ นั่นคือ “ข้อมูล” จำนวนมากที่สนับสนุน

แบบแผนจำลองอธิบายการเลือกอย่างเป็นเหตุเป็นผลของ เอลสเตอร์ [1] ตั้งบนสมมติฐานว่า การกระทำหนึ่งๆ ที่เกิดขึ้น ถือว่าเป็นการกระทำที่เกิดจากการตัดสินใจเลือกอย่างเป็นเหตุเป็นผลได้ โดยผู้วิจัยได้วิเคราะห์เงื่อนไขที่น่าพอใจที่สุด (Optimality conditions) ทั้ง 3 ประการ มาเป็นกรอบเบื้องต้นในการทำความเข้าใจการคิดอย่างเป็นเหตุเป็นผลของอาชญากรไซเบอร์ ได้ดังภาพที่ 1 นี้



ภาพที่ 1 แบบแผนจำลองการเลือกอย่างเป็นเหตุเป็นผลของอาชญากรไซเบอร์

5.1 การวิเคราะห์

5.1.1 ความปรารถนา (Desire)

จากการศึกษาข้อมูลจำนวนมากทั้งกรณีศึกษาและคดีต่างๆ [2] พบว่า อาชญากรไซเบอร์เป็น อาชญากรตามโอกาส และ อาชญากรตติณสัย มีความปรารถนาที่จะสร้างความเสียหายกับผู้อื่นเพื่อสร้างอรรถประโยชน์แก่ตนตลอดเวลา โดยความปรารถนาหรือความชอบนี้ปฏิบัติการณ์ในฐานะที่เป็น “ตัวขับเคลื่อนคงที่ของทฤษฎีการเลือกอย่างเป็นเหตุเป็นผล” ให้คอยมองหาโอกาสอยู่เสมอ การตีความในข้อนี้ย่อมเป็นอันไม่ได้แน่นอน

5.1.2 การกระทำ (Action)

จากการศึกษาข้อมูลทั้งกรณีศึกษาและคดีต่างๆ ผู้วิจัยพบว่า อาชญากรไซเบอร์จะลงมือก่ออาชญากรรมโดยเลือกหนทางที่ดีที่สุดที่จะทำให้บรรลุในสิ่งที่ปรารถนา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเชื่อ (Belief) และข้อมูลข่าวสารที่อาชญากรนั้นมีอยู่ครบถ้วน จะลงมือก่ออาชญากรรมไซเบอร์ทันที

5.1.3 ความเชื่อ (Belief)

จากการศึกษาข้อมูลทั้งกรณีศึกษาและคดีต่างๆ ผู้วิจัยพบว่า เมื่อข้อมูล (Information) ที่อาชญากรไซเบอร์ได้รับเกี่ยวกับเทคโนโลยีนั้นๆ เหมาะสมที่สุดในการก่ออาชญากรรม ซึ่งเชื่อว่า พวกเขาจะไม่ถูกจับ และไม่ถูกดำเนินคดี ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการคิดของอาชญากร 2 กรณี คือ คิดว่าตนเองมีอำนาจเหนือผู้อื่น (Power orientation) หรือคิดได้ใจเกินจริง (Super-optimism) ว่าเขาสามารถที่จะหลีกพ้นโทษจากการกระทำความผิดของตนเองได้อย่างแน่นอนหรือมั่นใจว่าตนไม่มีทางถูกจับได้ โดยเฉพาะมีประสบการณ์กระทำความผิด และสามารถเอาตัวรอดได้บ่อยๆ

5.2 การตีความ (Interpretation)

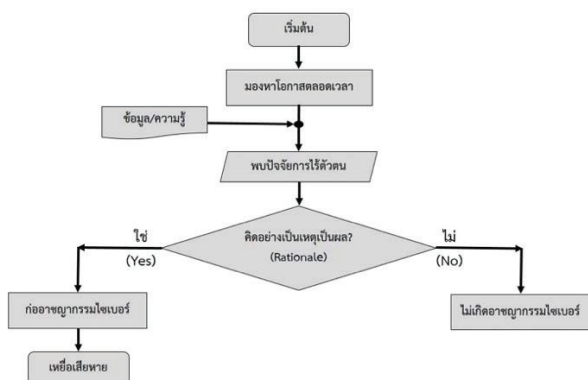
การวิจัยนี้มุ่งหาความสัมพันธ์ระหว่างอาชญากรรมไซเบอร์กับการไร้ตัวตน (Anonymity) จากกระบวนการคิดอย่างเป็นเหตุเป็นผลต่อการตัดสินใจของอาชญากรไซเบอร์บนข้อมูลเทคโนโลยีที่อาชญากรมีเกี่ยวกับการ

หลบพ้นจากการสืบสวนจับกุมทางดิจิทัล และการรวบรวมพยานหลักฐานดิจิทัลเพื่อให้รอดพ้นการถูกดำเนินคดี

ดังนั้น หัวใจสำคัญของการตัดสินใจอย่างเป็นเหตุเป็นผล (Rationale) ก่อนลงมือประกอบอาชญากรรมไซเบอร์ คือ ปัจจัยการไร้ตัวตน (Anonymous factors) ที่อาชญากรเลือกตัดสินใจประกอบอาชญากรรม โดยสามารถค้นหาปัจจัยการไร้ตัวตนของเทคโนโลยีไซเบอร์ในการก่ออาชญากรรมได้ดังนี้

5.3 การใช้ทฤษฎีเกมวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการไร้ตัวตนกับอาชญากรรมไซเบอร์

สมมติฐานทางวิจัย (Research hypothesis) คือ “การตัดสินใจประกอบอาชญากรรมไซเบอร์มีความสัมพันธ์กับการไร้ตัวตน”



ภาพที่ 2 กระบวนการคิดตัดสินใจเลือกอย่างเป็นเหตุเป็นผลของอาชญากรไซเบอร์

จากภาพที่ 2 กระบวนการคิดตัดสินใจเลือกอย่างเป็นเหตุเป็นผลเป็นผลของอาชญากรไซเบอร์ตามสมมติฐานการวิจัย คือ อาชญากรไซเบอร์เห็นแก่ตัวมองหาโอกาสจากเหยื่อตลอดเวลา บนข้อมูลเทคโนโลยีเดิมที่ตนมีอยู่และค้นคว้าหาความรู้เทคโนโลยีใหม่ตลอดเวลา [2] เมื่อพบปัจจัยการไร้ตัวตน (ตามนิยามในการวิจัยนี้) และอาชญากรมีการคิดอย่างเป็นเหตุเป็นผล (Rationale) จะตัดสินใจลงมือก่ออาชญากรรมไซเบอร์ทันที จึงใช้ทฤษฎีเกมเป็นเครื่องมือสำคัญในการวิจัยให้เห็นรูปแบบความ

สัมพันธ์ระหว่างการไร้ตัวตนและอาชญากรรมไซเบอร์ได้ผลดังต่อไปนี้

5.4 การใช้ทฤษฎีเกมวิเคราะห์หาปัจจัยการไร้ตัวตนเพื่อตั้งสมมติฐานการวิจัย

ทฤษฎีเกม มีหลักการทั่วไปดังนี้ [4]

Perfect Information: ผู้เล่นมีข้อมูลครบถ้วนสมบูรณ์เข้าใจ กติกา รางวัล และรู้กลยุทธ์ฝั่งตรงข้าม

Rationale: ผู้เล่นทุกฝ่ายใช้ข้อมูลที่ตนมีตัดสินใจเลือกกลยุทธ์ที่ดีที่สุด อย่างเป็นเหตุและเป็นผล

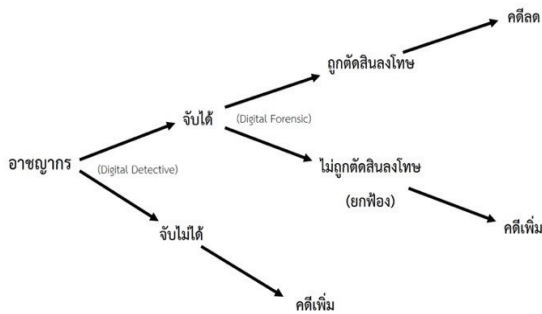
5.4.1 การหา Decision Tree

เทคนิค Decision Tree ของทฤษฎีเกม เป็นการทำความเข้าใจอย่างง่ายต่อสถานการณ์แวดล้อมที่จะเกิดอาชญากรรมไซเบอร์ขึ้น โดยวิเคราะห์ทางเลือกของผู้เล่นเกมหรืออาชญากรในการตัดสินใจมีทางเลือกในการก่ออาชญากรรม และผู้ที่ทำหน้าที่ปกป้อง (Defender) ไม่ว่าทั้งตัวเหยื่อหรือตำรวจจะดำเนินการเป็นไปในทิศทางใดในการวิจัยนี้ตำรวจเป็นผู้ที่ทำหน้าที่ปกป้องเพื่อความเข้าใจง่าย

จากการสังเกตปรากฏการณ์การเกิดอาชญากรรมไซเบอร์ในทุกประเภท ผู้วิจัยได้พบว่า หากอาชญากรรมไซเบอร์ประเภทใด อาชญากรรอดพ้นจากการสืบสวนจับกุมทางดิจิทัล (Digital Detective) จะทำให้อาชญากรรมไซเบอร์ประเภทนั้นเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว หรือแม้จะสืบสวนจับกุมได้ แต่ไม่สามารถรวบรวมพยานหลักฐานดิจิทัล (Digital Forensic) เพื่อดำเนินคดีอาชญากรรมผู้ต้องสงสัยได้ อาชญากรรมไซเบอร์ประเภทนั้นจะยังคงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วต่อไป

ในทางตรงกันข้าม หากอาชญากรรมไซเบอร์ประเภทใด สามารถสืบสวนทางดิจิทัล (Digital Detective) จนจับกุมตัวอาชญากรได้ จะทำให้อาชญากรรมไซเบอร์ประเภทนั้นลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อสืบสวนจับกุมได้ และสามารถรวบรวมพยานหลักฐานดิจิทัล (Digital Forensic) เพื่อดำเนินคดีจนเอาผิดทางอาญาได้ อาชญากรรมไซเบอร์ประเภทนั้นจะลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว

จนหมดไป โดยเขียน Decision Tree ของทฤษฎีเกม
อาชญากรรมไซเบอร์ [2] ดังภาพที่ 3 นี้



ภาพที่ 3 Decision Tree ของทฤษฎีเกม

5.4.2 การหา Payoff Matrix

อาชญากรมีการตัดสินใจอย่างเป็นเหตุเป็น
ผล (Rationale) บนข้อมูลที่ตนได้รับทราบอย่างสมบูรณ์
ว่า ไซเบอร์เทคโนโลยีใดจะไม่สามารถสืบสวนทาง
ดิจิทัล (Digital Detective) ได้ อาชญากรจะลงมือก่อ
อาชญากรรมทันทีเพื่อให้ตนได้รับผลตอบแทนสูงสุด
หรือแม้ถูกสืบสวนจับกุมได้ แต่ไม่สามารถรวบรวมพยาน
หลักฐานดิจิทัล (Digital Forensic) เอาผิดทางอาญา
ได้ [5] อาชญากรก็ยังคงชั่งน้ำหนักเหตุและผลจนลงมือ
ก่ออาชญากรรม เมื่อพบว่าอรรถประโยชน์ที่ได้รับคุ้มค่า
กับความเสี่ยง

ตารางที่ 1 การหาค่าตาราง Payoff Matrix ของทฤษฎี
เกมอาชญากรรมไซเบอร์

		ตำรวจ		
		กลยุทธ์ P1	กลยุทธ์ P2	กลยุทธ์ P3
อาชญากร	กลยุทธ์ Q	$\frac{d}{c} = 0$	$\frac{d}{c} = 1$	$\frac{d}{c} = 1$
	กลยุทธ์ 1-Q	$\frac{s}{d} = 0$	$\frac{s}{d} = 0$	$\frac{s}{d} = 1$

โดยให้

c คือ จำนวนคดีอาชญากรรมไซเบอร์ประเภทใด

d คือ จำนวนคดีที่สืบสวนจนจับกุมอาชญากรได้

s คือ จำนวนคดีที่สามารถรวบรวมพยานหลักฐาน
ดิจิทัล (Digital Forensic) เอาผิดทางอาญาได้
สามารถหา Payoff Matrix ของทฤษฎีเกมได้ดังนี้

อธิบายเกม

ทฤษฎีเกมอาชญากรรมไซเบอร์เป็น Zero-
sum game เป็นเกมที่ไม่มีจุดที่สมประโยชน์สองฝ่าย
ร่วมกัน แต่เป็นเกมที่อาชญากรได้ประโยชน์เท่าที่เหยื่อ
เสียประโยชน์ไป และการปกป้องประโยชน์ของเหยื่อเป็น
หน้าที่ของตำรวจที่จะต้องหาหนทางปกป้องตลอดเวลา

ทฤษฎีเกมอาชญากรรมไซเบอร์เป็นกลยุทธ์
ผสม (Mixed Strategies) เป็นกลยุทธ์ที่ใช้ในการเล่น
เกมระหว่างสองฝ่าย โดยผู้เล่นแต่ละฝ่ายไม่ได้เล่น
กลยุทธ์ใดกลยุทธ์หนึ่งเพียงวิธีเดียว แต่จะเล่นหลายวิธีผสม
กัน โดยอาชญากรเป็นเจ้าของตารางจะมองหาโอกาสอยู่
เสมอ และตำรวจจะคอยหากลยุทธ์ใหม่ปิดโอกาสการเกิด
อาชญากรรมนั้นอยู่เสมอ [4]

อาชญากรชั่งน้ำหนักความเป็นเหตุ (Cause)
และความเป็นผล (Effect) ตลอดเวลาในการใช้ 2 กลยุทธ์
พร้อมกัน ทั้งกลยุทธ์ Q และกลยุทธ์ 1 - Q เพื่อให้รอดพ้น
การจับกุม และรอดพ้นจากการถูกดำเนินคดี ทั้ง 2 กลยุทธ์
รวมกันมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 100% (เนื่องจาก $Q + (1 - Q) = 1$) เป็นองค์ประกอบ ค่าของเกมอธิบายจากตาราง
Payoff Matrix ได้ดังนี้

อาชญากรกับกลยุทธ์ Q

กลยุทธ์ Q คือ การไม่สามารถสืบสวนทางดิจิทัล
(Digital Detective) เพื่อจับกุมอาชญากรได้ สัดส่วน
ของจำนวนคดีที่เกิดขึ้น (c) กับการสืบสวนจับกุมได้ (d)
มีค่าเป็น 0 อาชญากรรมประเภทนั้นจะสูงขึ้นมากเมื่อ

$$\frac{d}{c} = 0$$

อาชญากรจะเลือกใช้ กลยุทธ์ Q ไปตลอด
ตราบเท่าตำรวจเปลี่ยนจากกลยุทธ์ P1 เป็นกลยุทธ์ P2
หรือหาทางสืบสวนจับกุมตัวอาชญากรได้ ซึ่งหากตำรวจ
สามารถจับกุมตัวอาชญากรได้ทั้งหมดทุกคดีที่เกิดขึ้น
สัดส่วนของจำนวนคดีที่เกิดขึ้น (c) กับการสืบสวนจับกุม
ได้ (d) มีค่าเป็น 1 หมายถึง คดีที่เกิดขึ้นเท่าใด ก็สามารถ
จับกุมได้เท่านั้น การไร้ตัวตนจากอาชญากรรมไซเบอร์
ประเภทนั้นจะลดลงเมื่อ

$$\frac{d}{c} = 1$$

อาชญากรกับกลยุทธ์ 1 - Q

กลยุทธ์ 1 - Q คือ การไม่สามารถรวบรวม
พยานหลักฐานดิจิทัล (Digital Forensic) เพื่อดำเนิน
คดีเอาผิดทางอาญาได้ แม้จะถูกจับกุมได้ แต่ถ้าหาก
อาชญากรซึ่งนำหน้าอย่างเป็นเหตุเป็นผล (Rationale)
ว่าเทคโนโลยีไซเบอร์ประเภทใดยังคงให้อรรถประโยชน์
แก่ตนมากกว่าโทษที่ได้รับ แม้จะถูกจับกุมได้ อาชญากร
ย่อมลงมือประกอบอาชญากรรมต่อไป

สัดส่วนจำนวนคดีที่ตัดสินลงโทษได้ (s) ต่อ
จำนวนคดีที่จับกุมได้ (d) มีค่าเท่ากับ 0 อาชญากรจะยัง
คงใช้กลยุทธ์ 1-Q ไปตลอด คู่กับกลยุทธ์ Q อาชญากรรม
ประเภทนั้นจะยังคงเกิดขึ้น

$$\frac{s}{d} = 0$$

หากตำรวจปรับเปลี่ยนกลยุทธ์จากกลยุทธ์
P1 เป็นกลยุทธ์ P2 จนพบกลยุทธ์ P3 เมื่อใด จะทำให้
สัดส่วนการตัดสินคดีลงโทษอาญาอาชญากรได้ทุกราย (s)
ต่อจำนวนคดีที่จับกุมได้ (d) มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึงทุก
คดีที่จับกุมตัวอาชญากรได้เท่าใด สามารถรวบรวมพยาน
หลักฐานดิจิทัลจนเอาผิดต้องคำพิพากษาตัดสินลงโทษ
ได้ทุกราย การไร้ตัวตนจากอาชญากรรมไซเบอร์ประเภท

นั้นจะหมดไปเมื่อ

$$\frac{s}{d} = 1$$

5.4.3 การหา Payoff Function

จาก Decision tree เห็นองค์ประกอบการ
ตัดสินใจว่า ปัจจัยการไร้ตัวตน (Anonymous factor)
ประกอบไปด้วยอะไร จนสามารถนำมาสร้าง Payoff
Matrix ให้เห็นค่าของเกมได้ จึงนำมาสร้างความสัมพันธ์
การตัดสินใจในการก่ออาชญากรรมของอาชญากรเขียน
เป็น Payoff Function ได้ดังนี้

จำนวนคดีอาชญากรรมไซเบอร์ประเภทนั้นจะ
สูงมากถ้าหาก

$$\frac{d}{c} + \frac{s}{d} = 0 \quad (1)$$

จำนวนคดีอาชญากรรมไซเบอร์ประเภทนั้นจะ
หมดไปถ้าหาก

$$\frac{d}{c} + \frac{s}{d} = 2 \quad (2)$$

เมื่อ

$$\frac{d}{c} = 1, \frac{s}{d} = 1$$

เพราะฉะนั้นจะได้ ปัจจัยการไร้ตัวตน (Anony-
mous factor) เท่ากับ

$$2 - \left[\frac{d}{c} + \frac{s}{d} \right] = 0$$

ดังนั้น ในการวิจัยนี้ให้ปัจจัยการไร้ตัวตน
(Anonymous factor) เขียนแทนด้วย k จะได้

$$k = 2 - \left[\frac{d}{c} + \frac{s}{d} \right] \quad (3)$$

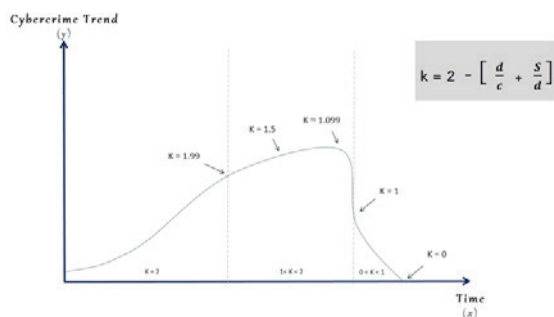
จะได้ $0 \leq k \leq 2$

6. ผลการวิจัย

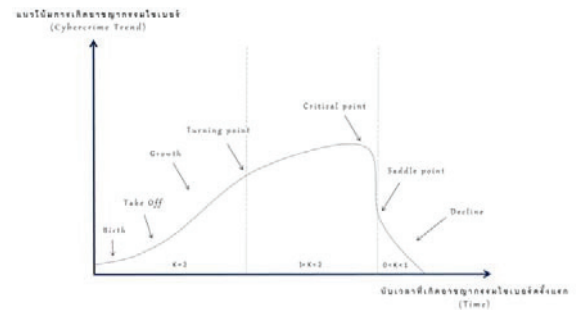
ผู้วิจัยใช้ Matrix payoff และ Payoff Function การตัดสินใจก่ออาชญากรรมไซเบอร์ของอาชญากร อันขึ้นอยู่กับปัจจัยการไร้ตัวตน (Anonymous factor) ดังที่ได้วิเคราะห์ผ่านมา โดย k มีค่าตั้งแต่ $0 \leq k \leq 2$ ซึ่งส่งผลต่อแนวโน้มการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์ในแต่ละช่วงเวลาแตกต่างกัน และผู้วิจัยได้ตั้งมโนทัศน์เพื่อพยายามทำความเข้าใจการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์ ที่ค่าปัจจัยการไร้ตัวตน (Anonymous factor) แตกต่างกัน โดยใช้วิธี Backward induction ของทฤษฎีเกมได้ดังต่อไปนี้

6.1 มโนทัศน์ที่ 1: “แบบจำลองแนวโน้มการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์เป็น Cybercrime trend curve”

จาก Payoff Matrix และ Payoff Function ความสัมพันธ์การตัดสินใจในการก่ออาชญากรรมของอาชญากรขึ้นอยู่กับค่า k หรือ ปัจจัยการไร้ตัวตน (Anonymous factor) อันมาจากสัดส่วนจำนวนคดีกับจำนวนการสืบสวนจับกุม และการรวบรวมพยานหลักฐานดิจิทัลเอาผิดอาญา ดังที่ได้วิเคราะห์ไปแล้วนั้น นำมาตั้งเป็นกรอบให้เห็นภาพเพื่อทำความเข้าใจในรูปแบบกราฟ โดยใช้วิธี Backward induction ได้ดังนี้



ภาพที่ 4 มโนทัศน์ความสัมพันธ์ปัจจัยการไร้ตัวตนกับการตัดสินใจในการก่ออาชญากรรมไซเบอร์



ภาพที่ 5 มโนทัศน์ความสัมพันธ์แนวโน้มการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์ (ตัวแปรตาม) กับช่วงเวลา (ตัวแปรต้น) โดยมีปัจจัยการไร้ตัวตนเป็นตัวแปรควบคุม

ผู้วิจัยได้สังเกตเห็นปรากฏการณ์อาชญากรรมไซเบอร์ในสังคมนับแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบัน และได้ทดลองวาดภาพที่เชื่อมโยงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างการไร้ตัวตนและอาชญากรรมไซเบอร์มีความสัมพันธ์กันอย่างไร ดังภาพที่ 4-5 อธิบายเพิ่มเติมได้ดังนี้

แกน y หรือแกนตั้ง เป็น Cybercrime trend หรือแนวโน้มการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์

แกน x หรือแกนนอน เป็น Time หรือการนับช่วงเวลา จากปีที่เกิดอาชญากรรมไซเบอร์ เช่น ปีที่ 1 ปีที่ 2 ปีที่ 3....ปีที่ n (หรือนับเป็นเดือนหรือสัปดาห์)

สถานะที่ 1 Birth

อาชญากรกลุ่มแรกๆ ได้รับข้อมูลหรือมีการทดลองและค้นพบว่าไซเบอร์เทคโนโลยีใหม่ที่เกิดขึ้นในสังคมสามารถประกอบอาชญากรรมได้ในคดีแรกๆ โดยไม่มีใครล่วงรู้ว่าเป็นฝีมือผู้ใด

หมายเหตุ $k = 2$

สถานะที่ 2 Take off

ข่าวสารการสร้างความเสียหายอย่างไร้ตัวตนผู้กระทำความผิด ด้วยไซเบอร์เทคโนโลยีใหม่ทำให้อุดพ้นจากสืบสวนจับกุมทางดิจิทัล (Digital Detective) ได้แพร่กระจายสู่ อาชญากรตามโอกาส และอาชญากรติดนิสัย ต่างเริ่มเลียนแบบเทคนิควิธี และตัดสินใจประกอบ

อาชญากรรมด้วยไซเบอร์เทคโนโลยีนั้น

จาก Payoff Matrix ในตารางที่ 1 และ Payoff Function ในสมการที่ (3) อาชญากรตัดสินใจเลือกใช้กลยุทธ์ที่ Q และ 1- Q โดยที่ตำรวจใช้กลยุทธ์ P1 ทำให้แนวโน้มการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์ประเภทนั้นๆ เติบโตพุ่งสูงอย่างรวดเร็วในเวลานั้น

หมายเหตุ $k = 2$

สถานะที่ 3 Growth

ข่าวสารการสร้างความเสี่ยงอย่างไร้ตัวตนผู้กระทำความผิด ด้วยไซเบอร์เทคโนโลยีใหม่ทำให้รอดพ้นจากสืบสวนจับกุมทางดิจิทัล (Digital Detective) ได้แพร่กระจายในวงกว้างสู่อาชญากรทั่วทั้งวงการอาชญากรรมต่างก็ตัดสินใจประกอบอาชญากรรมเพื่ออรรถประโยชน์สูงสุดแก่ตน และพวกพ้อง

ทำให้แนวโน้มการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์ประเภทนั้นๆ เติบโตพุ่งสูงอย่างรวดเร็ว และสร้างความเสียหายต่อสังคมต่อเนื่อง ตามระยะเวลาที่เกิดขึ้นนับแต่ปีแรก (หรือเดือนแรกหรือสัปดาห์แรก) หรือคดีแรกที่เกิดขึ้นไปเรื่อยๆ และยังทำการสืบสวนจับกุมไม่ได้สักคดี เมื่อพิจารณาจาก Matrix payoff ตารางที่ 1 หมายความว่าตำรวจยังมีเพียงกลยุทธ์จากกลยุทธ์ P1 เท่านั้น

หมายเหตุ $k = 2$

สถานะที่ 4 Turning point

จาก Payoff Matrix ในตารางที่ 1 และ Payoff Function ในสมการที่ (3) เมื่อตำรวจเริ่มปรับเปลี่ยนกลยุทธ์กลยุทธ์ P1 เมื่อมาค้นพบกลยุทธ์ P2 สามารถสืบสวนจับกุมทางดิจิทัล (Digital Detective) ได้ตัวอาชญากรมาดำเนินคดีครั้งแรก ปัจจัยการไร้ตัวตน (Anonymous factor) เริ่มมีค่า k น้อยกว่า 2 แต่ยังคงมากกว่า 1 แนวโน้มการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์ประเภทนั้นๆ จะเริ่มลดลง แบบ Diminishing (ยังคงเติบโต แต่อัตราการเติบโตที่ลดลง)

หมายเหตุ $1 < k < 2$

สถานะที่ 5 Critical point

จาก Payoff Matrix ในตารางที่ 1 และ Payoff Function ในสมการที่ (3) เมื่อตำรวจเปลี่ยนมาใช้กลยุทธ์ P2 สามารถสืบสวนจับกุมทางดิจิทัล (Digital Detective) ได้ตัวอาชญากรมาดำเนินคดีเรื่อยๆ จนได้เกือบทุกคดีจนถึงจุดวิกฤต (Critical point) ค่า k เข้าใกล้ 1 และเมื่อค่า $k = 1$ แนวโน้มการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์จะลดลงรวดเร็วอย่างกะทันหัน แต่ยังไม่หายไปหมดเสียทีเดียว

หมายเหตุ $k = 1$

สถานะที่ 6 Decline

จาก Payoff Matrix ในตารางที่ 1 และ Payoff Function ในสมการที่ (3) ในที่สุดเมื่อตำรวจค้นพบกลยุทธ์ P3 สามารถสืบสวนจับกุมอาชญากรไซเบอร์ได้ทุกคดี และสามารถรวบรวมพยานหลักฐานดิจิทัล (Digital Forensic) พิสูจน์ตัวตนดำเนินคดีเอาผิดทางอาญาอาชญากรได้ทุกคดี อาชญากรรมไซเบอร์ประเภทนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วจนแนวโน้มการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์มีค่าเป็น 0 หรืออาจจะไม่กลับมาเกิดขึ้นอีกเลย

หมายเหตุ $0 < k < 1$

เมื่อลองเปรียบเทียบกับข้อเท็จจริงในสังคมกับแบบจำลองแนวโน้มการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์ (Cyber-crime trend curve) คล้ายครีบลานลามหรืออาจจะเรียกว่า Shark fin curve จากมโนทัศน์ที่ 1 ที่อธิบายความสัมพันธ์แนวโน้มการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์เป็นตัวแปรตามกับช่วงเวลาเป็นตัวแปรต้น โดยมีปัจจัยการไร้ตัวตนเป็นตัวแปรควบคุม นำมาเปรียบเทียบกับกราฟคดีแก๊งค์คอลเซ็นเตอร์ ในภาพที่ 6 ซึ่งมีลักษณะกราฟใกล้เคียงกันมากดังนี้



ภาพที่ 6 ลักษณะความสัมพันธ์ดี แก๊งค์คอลเซ็นเตอร์ กับ เวลา โดยมีการสืบสวนจับกุม และการดำเนินคดี เอาผิดได้เป็นตัวแปรควบคุม

การตีความ

เดิมแก๊งค์คอลเซ็นเตอร์ [2] ใช้เทคโนโลยี Voice over internet protocol ประกอบอาชญากรรม โดยเจ้าหน้าที่ตำรวจไม่สามารถสืบสวนจับกุมทางดิจิทัล (Digital Detective) เพื่อหาตัวตนอาชญากรกระทำได้อาชญากรรมประเภทนี้จึงเติบโตอย่างรวดเร็วในปี พ.ศ. 2554-2556 จนสามารถสืบสวนจับกุมคดีแรกได้เมื่อปี พ.ศ. 2557 อาชญากรรมจึงลดอย่างรวดเร็วและเมื่อมีการรวบรวมพยานหลักฐานดิจิทัล (Digital Forensic) เพื่อดำเนินคดีกระทำได้ถึงที่สุด อาชญากรรมประเภทนี้แทบจะหมดไป

จนกระทั่งอาชญากรเปลี่ยนกลยุทธ์จากการใช้เทคโนโลยี VoIP มาใช้ Fake ID อาชญากรรมประเภทนี้จึงกลับมาสูงขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง แต่ในที่สุดเจ้าหน้าที่ตำรวจสามารถสืบสวนจับกุม และดำเนินคดีจนถึงที่สุดได้ แนวโน้มอาชญากรรมประเภทนี้จึงลดลง และส่งผลให้อาชญากรรมไซเบอร์เปลี่ยนไปใช้เทคนิคอื่นไปเรื่อยๆ

6.2 มโนทัศน์ที่ 2: “ความสัมพันธ์ระหว่างอาชญากรรมไซเบอร์กับปัจจัยการไร้ตัวตน ควรมีลักษณะเป็นกราฟ และสมการ อย่างคุณสมบัติของฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล”

จากมโนทัศน์ที่ 1 แบบจำลองแนวโน้มการเกิด

อาชญากรรมไซเบอร์ (Cybercrime trend curve) ที่ใช้การให้เหตุผลแบบ หลักการคิดย้อนกลับ (Backward induction) ของทฤษฎีเกม [1] โดยใช้ให้ผลลัพธ์ของเหตุการณ์ว่าท้ายสุดจะเกิดอะไรขึ้น แล้วคิดถอยหลังกลับมาหาปัจจุบัน โดยใช้ผลที่ได้มาจาก Payoff Matrix ในตารางที่ 1 และ Payoff Function ในสมการที่ (3) อธิบายความสัมพันธ์แนวโน้มการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์กับปัจจัยการไร้ตัวตน จึงพยายามที่จะหาสมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) มาอธิบายใช้ประโยชน์

โดยผู้วิจัยได้เริ่มต้นพิจารณาจากรูปแบบกราฟ และสมการทางคณิตศาสตร์หลายรูปแบบเพื่อพิจารณาว่าแบบใดจะใกล้เคียงหรือมีความเหมาะสมในการที่นำมาทดลองใช้อธิบายหรือทำนายอาชญากรรมไซเบอร์ตามวัตถุประสงค์ โดยมีวิธีพิจารณาแนวทางการตั้งมโนทัศน์ดังนี้

จากแบบจำลองแนวโน้มการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์ (Cybercrime trend curve) ในมโนทัศน์ที่ 1 ไม่ใช่ลักษณะกราฟของสมการเชิงเส้น (Linear equation) และไม่ใช่ลักษณะกราฟของสมการ พาราโบลา (Parabola equation) ผู้วิจัยจึงตัดสินใจเลือกลักษณะกราฟของสมการ เอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential equation) มาทดลองพิสูจน์มโนทัศน์ที่ 1 ว่าพอจะมีพลังในการอธิบายได้มากน้อยเพียงใด

เหตุผลที่เลือก ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล มาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการไร้ตัวตน และการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์ ผู้วิจัยให้เหตุผลประกอบคุณสมบัติของ ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล ดังต่อไปนี้

(ก) ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล ไม่ติดลบ และเริ่มจากค่า $y = 1$

คุณสมบัติของ ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล เป็นกราฟ และสมการทางคณิตศาสตร์ ที่มีค่าเป็นบวกเสมอ แตกต่างจากรูปแบบสมการอื่นๆ ซึ่งหากนำมาพยายามใช้อธิบายจะค่อนข้างเห็นภาพได้ยาก และอาจไม่สามารถพิสูจน์ให้

เห็นชัดได้ ซึ่ง ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล มีความเหมาะสมที่สุด โดยมีรูปแบบสมการดังนี้

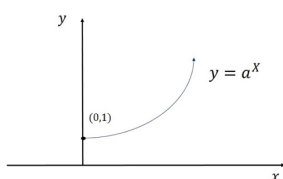
$$y = a^x + c$$

โดยที่ $0 < a$ และ $a \neq 1$ (จุดที่ $a = 1$ ค่า y จะเท่ากับ x)

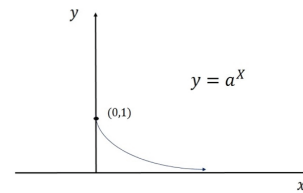
การตั้งมโนทัศน์อธิบายการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์ในสังคม เมื่อพิจารณาถึงหลักความจริง การเกิดคดีขึ้นครั้งแรกนับเป็นครั้งที่ 1 ในปีแรก เป็นเลขบวก ไม่มีทางติดลบ

ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล เริ่มนับที่ค่า y เท่ากับ 1 เมื่อ x เป็น 0 ($x^0 = 1$) สามารถนำมาอธิบายภาพได้จากนั้นเมื่ออาชญากรใช้เทคโนโลยีไซเบอร์ใดที่ตำรวจยังจับไม่ได้ อาชญากรรมประเภทนั้นจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ อย่างรวดเร็ว เป็นฟังก์ชันเพิ่มมีความชันกราฟมากกว่าสมการเชิงเส้น และเมื่อการใช้ไซเบอร์เทคโนโลยีใดที่อาชญากรไม่อาจหลบพ้นตัวตนจนถูกจับกุมดำเนินคดี และถูกพิพากษาลงโทษ อาชญากรรมไซเบอร์ประเภทนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วเป็นฟังก์ชันลดจนมีค่าเป็น 0 ($0^x = 0$) ไม่มีทางติดลบ

หากนำมาตั้งมโนทัศน์อธิบายการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์ในสังคม เมื่อเราพิจารณาถึงหลักความจริง การเกิดคดีขึ้นครั้งแรก นับเป็น 1 (ค่า y) ซึ่งไม่มีค่าติดลบ โดยคุณสมบัติของ ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล จะเริ่มที่จุด (0,1) หรือ x (x คือ ปีที่อาชญากรรมไซเบอร์ประเภทนั้นเกิดขึ้น) มีค่าเท่ากับ 0 และ y จะมีค่าเท่ากับ 1 เสมอ ทั้งฟังก์ชันเพิ่มและ ฟังก์ชันลด



ภาพที่ 7 คุณสมบัติของฟังก์ชันเพิ่มของฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล



ภาพที่ 8 คุณสมบัติของฟังก์ชันลด ของฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล

ตั้งมโนทัศน์ที่ 2 “ความสัมพันธ์ระหว่างอาชญากรรมไซเบอร์กับปัจจัยการไร้ตัวตน ควรมีลักษณะเป็นกราฟ และสมการ อย่างคุณสมบัติของ ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล” สามารถนิยามได้ดังนี้

$$y = k^x + c \quad (4)$$

โดยที่

k คือ ปัจจัยการไร้ตัวตน (Anonymous factor)

y คือ Cybercrime trend หรือ แนวโน้มการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์

x คือ Time หรือการนับช่วงเวลาจากปีที่เกิดอาชญากรรมไซเบอร์ เช่น ปีที่ 1 ปีที่ 2 ปีที่ 3....ปีที่ n (หรือนับเป็นเดือนหรือสัปดาห์)

c คือ ค่าคงที่ (ในกรณีที่มี)

โดยสามารถพิสูจน์คุณสมบัติของ ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล เป็นกราฟ และสมการทางคณิตศาสตร์ ว่าเป็นไปได้ที่จะสอดคล้องกับแบบจำลองแนวโน้มการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์ (Cybercrime trend curve) กับผลที่ได้มาจาก Payoff Matrix ในตารางที่ 1 และ Payoff Function ในสมการที่ 3 อย่างไร ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ดังต่อไปนี้

(ข) เลขฐาน $0 < a$ และ $a \neq 1$ สอดคล้องกับปัจจัยการไร้ตัวตน (Anonymous factor)

คุณสมบัติของ ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล เลขฐาน a จะต้องมากกว่า 0 และไม่เท่ากับ 1 เพราะเลข 1 ยกกำลังอะไรก็เท่ากับ 1 และจุดที่ เลขฐานเริ่มมากกว่า 1 นั้นเป็นจุดเปลี่ยนเป็นฟังก์ชันลด

โดยที่

เลขฐานมากกว่า 1 เป็นฟังก์ชันเพิ่ม $a > 1$

เลขฐานมากกว่า 0 แต่น้อยกว่า 1 เป็นฟังก์ชันลด

$$0 < a < 1$$

พิจารณาประกอบสมมติฐานทางวิจัย ค่า k หรือปัจจัยการไร้ตัวตน (Anonymous factor) นำมาอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

ตารางที่ 2 Payoff Matrix เมื่อสถานการณ์อาชญากรรมไซเบอร์มี ค่า $k = 2$

ตำรวจ

↓

	กลยุทธ์ P1	กลยุทธ์ P2
↑	กลยุทธ์ Q $\frac{d}{c} = 0$	กลยุทธ์ 1-Q $\frac{d}{c} = 1$
↓	กลยุทธ์ 1-Q $\frac{s}{d} = 0$	กลยุทธ์ Q $\frac{s}{d} = 1$

↑

อาชญากร

สัดส่วนการจับกุมได้ต่อจำนวนคดีที่เกิดขึ้น

สัดส่วนการตัดสินลงโทษต่อจำนวนคดีที่จับกุมได้

สถานการณ์ที่ 1 เมื่อ $k = 2$

เมื่อค่า $d = 0$ ค่า k จะเท่ากับ 2 เสมอ นี่คือการณ์ Worst case คือ มีคดีอาชญากรรมไซเบอร์ใหม่เกิดขึ้น แต่ไม่สามารถสืบสวนจับกุมนำตัวอาชญากรมาดำเนินคดีได้เลย เจ้าหน้าที่ตำรวจรู้จักเพียงกลยุทธ์ P1 ยังไม่รู้จักกลยุทธ์ P2 ทำให้ไม่สามารถสืบสวนจับกุมได้ นับวันอาชญากรรมไซเบอร์ประเภทนั้นจะยิ่งทวีคูณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

ตัวอย่างสมการ

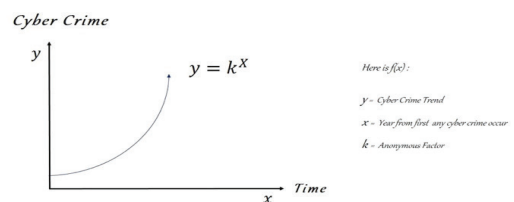
ปัจจัยการไร้ตัวตน (Anonymous factor) เมื่อ $k = 2$ จะได้ว่า

$$k = 2 - \left[\frac{d}{c} + \frac{s}{d} \right]$$

$$k = 2 - \left[\frac{d}{c} + \frac{s}{d} \right]$$

$$k = 2$$

แทนค่า $f(y) = 2^x$



ภาพที่ 9 มโนทัศน์อาชญากรรมไซเบอร์ในสังคมเป็นฟังก์ชันเพิ่ม

สถานการณ์ที่ 2 เมื่อ $1 < k < 2$

เมื่อเจ้าหน้าที่ตำรวจค้นพบกลยุทธ์ P2 เริ่มสามารถสืบสวนจับกุมนำตัวอาชญากรมาดำเนินคดีได้ ค่า d เริ่มมีค่ามากกว่า 0 ทำให้ค่า k เริ่มน้อยกว่า 2 ลงเรื่อย จนเข้าใกล้ 1 ยังคงเป็นฟังก์ชันเพิ่มในอัตราที่ลดลง (Diminishing) เมื่อ $1 < k < 2$

ตารางที่ 3 Payoff Matrix เมื่อสถานการณ์อาชญากรรมไซเบอร์มี เมื่อ $1 < k < 2$

ตำรวจ

↓

	กลยุทธ์ P1	กลยุทธ์ P2
อาชญากร →	กลยุทธ์ Q $\frac{d}{c} = 0$	กลยุทธ์ 1-Q $\frac{d}{c} = 1$
	กลยุทธ์ 1-Q $\frac{s}{d} = 0$	กลยุทธ์ Q $\frac{s}{d} = 0$

↑

สัดส่วนการจับกุมได้ต่อจำนวนคดีที่เกิดขึ้น

↑

สัดส่วนการตัดสินโทษต่อจำนวนคดีที่จับกุมได้

จะเห็นได้ว่า เมื่อค่า d เริ่มมีค่ามากกว่า 0 คือ เริ่มสามารถสืบสวนจับกุมนำตัวอาชญากรมาดำเนินคดีได้มีค่า k จะเริ่มน้อยกว่า 2 แต่ยังคงมากกว่า 1 ดังตัวอย่างในสมการนี้

ตัวอย่างสมการ

สมมติว่า จำนวนคดีอาชญากรรมไซเบอร์ประเภทใดที่เกิดขึ้น (c) มีจำนวน 10 คดี และเริ่มจำนวนคดีที่สืบสวนจนจับกุมอาชญากรได้ (d) จำนวน 1 คดี จึงมีสัดส่วน 1 ต่อ 10 หรือมีค่าเท่ากับ 0.1 เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$k = 2 - \left[\frac{d}{c} + \frac{s}{d} \right]$$

$$k = 2 - \left[\frac{1}{10} + \frac{s}{d} \right]$$

$$k = 1.99$$

$$\text{แทนค่า } f(y) = 1.99^x$$

จากนั้นลองตั้งตัวอย่างสมมติเพิ่ม ถ้าจำนวนคดีอาชญากรรมไซเบอร์ประเภทใดที่เกิดขึ้น (c) มีจำนวนเท่ากับ 10 คดี และเริ่มจำนวนคดีที่สืบสวนจนจับกุมอาชญากรได้ (d) จำนวน 5 คดี จึงมีสัดส่วน 5 ต่อ 10 หรือมีค่าเท่ากับ 0.5 หรือ 50 % เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$k = 2 - \left[\frac{d}{c} + \frac{s}{d} \right]$$

$$k = 2 - \left[\frac{5}{10} + \frac{s}{d} \right]$$

$$k = 1.5$$

$$\text{แทนค่า } f(y) = 1.50^x$$

ทำให้เข้าใจว่า หากเลขฐานลดจำนวนลง ความชันเส้นกราฟจะลดตาม แต่ยังเป็นกราฟฟังก์ชันเพิ่มในอัตราที่ลดลง (Diminishing) เพราะยังยกกำลัง x

สถานการณ์ที่ 3 เมื่อ $k = 1$

เมื่อค่า d มีค่ามากขึ้นเรื่อยๆจนเท่ากับ 1 สามารถสืบสวนจับกุมนำตัวอาชญากรมาดำเนินคดีได้ทุกคดี ค่า k เท่ากับ 1 เป็นจุดเปลี่ยนฟังก์ชันลดในกราฟของสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล ดังตัวอย่างในสมการนี้

ตัวอย่างสมการ

สมมติว่า จำนวนคดีอาชญากรรมไซเบอร์ประเภทใดที่เกิดขึ้น (c) มีจำนวน 10 คดี และสืบสวนจนจับกุมอาชญากรได้ทุกคดี ค่า (d) มีค่าเท่ากับจำนวน 10 คดี จึงมีสัดส่วน 10 ต่อ 10 หรือมีค่าเท่ากับ 1 หรือหมายถึงอัตราสืบสวนจับกุมได้ 100 % เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$k = 2 - \left[\frac{d}{c} + \frac{s}{d} \right]$$

$$k = 2 - \left[\frac{10}{10} + \frac{s}{d} \right]$$

$$k = 1$$

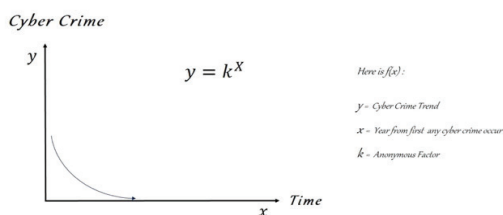
$$\text{แทนค่า } f(y) = 1^x$$

ในกรณีที่เลขฐานสมการ เอ็กซ์โพเนนเชียล มีค่าเท่ากับ 1 ค่า x ไม่ว่าค่าใดจะทำให้ค่า y เท่ากับ 1 จากแบบจำลองแนวโน้มการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์ เมื่อค่า k เท่ากับ 1 หรือหมายถึงอัตราสืบสวนจับกุมได้ 100 % แกน y นั้นคือ แนวโน้มการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์ ไม่ใช่จำนวนคดี ความชันของกราฟจะเกิดการตกลงมาในระดับหนึ่งซึ่งต่ำมาก หากไม่มีค่าคงที่ c ที่ได้จากการคำนวณทางมูลสถิติที่แท้จริงแล้ว ค่า y จะต้องมีค่ากับ 1 หรือมีแนวโน้มเท่าอัตราการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์นั้นในครั้งแรก เป็นจุดเปลี่ยนเข้าสู่ฟังก์ชันลด

(ค) เมื่อเลขฐาน $0 < k < 1$ เป็นฟังก์ชันลด สอดคล้องกับปัจจัยการไร้ตัวตน (Anonymous factor)

สถานการณ์ที่ 4 เมื่อ $0 < k < 1$

แม้เจ้าหน้าที่ตำรวจค้นพบกลยุทธ์ P2 แล้ว อัตราสืบสวนจับกุมตามจำนวนคดีทำได้ 100 % แต่ยังไม่มีความปลอดภัยเพียงพอ บางคดีกลับยกฟ้อง เนื่องด้วยการรวบรวมพยานหลักฐานดิจิทัลไม่ครบถ้วนสมบูรณ์ ยังมีช่องว่างทางเทคโนโลยีอยู่ แม้แนวโน้มการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์ประเภทนั้นจะลดลง แต่ยังคงเกิดในอัตราที่น้อยลง ค่า k ผ่านเลยค่าเท่ากับ 1 มาแล้วเป็นฟังก์ชันลด



ภาพที่ 10 มโนทัศน์อาชญากรรมไซเบอร์ในสังคม เป็นฟังก์ชันลด

ดังตัวอย่างสมมติในสมการนี้ เมื่อปัจจัยการไร้ตัวตน (Anonymous factor) เป็นฟังก์ชันเพิ่มเมื่อ $0 < k < 1$

$$k = 2 - \left[\frac{d}{c} + \frac{s}{d} \right]$$

$$k = 2 - \left[\frac{10}{10} + \frac{5}{10} \right]$$

$$k = 0.5$$

$$\text{แทนค่า } f(y) = 0.5^x$$

(ง) เมื่อเลขฐานเท่ากับ 0 สอดคล้องกับปัจจัยการไร้ตัวตน (Anonymous factor)

คุณสมบัติของ ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล เมื่อเลขฐาน a มีค่าเท่ากับ 0 ฟังก์ชันก็มีค่า y เท่ากับ 0 สอดคล้องกับปัจจัยการไร้ตัวตน (Anonymous factor) เมื่อค่า k เท่ากับ 0 หมายความว่าอาชญากรรมไซเบอร์นั้นหมดไปจากสังคม

สถานการณ์ที่ 5 เมื่อ $k = 0$

สถานการณ์สมมติ เมื่อตำรวจสามารถค้นหากลยุทธ์ P3 ได้สำเร็จ นอกจากอาชญากรไซเบอร์ก่อคดีเท่าใดก็จับได้ทุกคดีแล้ว ยังสามารถรวบรวมพยานหลักฐานดิจิทัลได้ครบถ้วนจนสามารถลงโทษเอาผิดอาชญากรได้ทุกราย ค่า $k = 0$ เป็นจุดจบของอาชญากรรมไซเบอร์ประเภทนั้น เขียนได้ดังนี้

ตารางที่ 4 Payoff Matrix เมื่อสถานการณ์
อาชญากรรมไซเบอร์มี ค่า $k = 0$

		ตำรวจ	
		กลยุทธ์	
อาชญากร	กลยุทธ์ Q	กลยุทธ์ P3	$\frac{d}{c} = 1$
	กลยุทธ์ 1-Q		$\frac{s}{d} = 1$

สัดส่วนการจับกุมได้ต่อจำนวนคดีที่เกิดขึ้น

สัดส่วนการตัดสินลงโทษได้ต่อจำนวนคดีที่จับกุมได้

เมื่อค่า d มีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ จนเท่ากับ 1 สามารถสืบสวนจับกุมนำตัวอาชญากรมาดำเนินคดีได้ทุกคดีแล้ว และจำนวนคดีที่สามารถรวบรวมพยานหลักฐานดิจิทัลเอาผิดทางอาญาได้ คือ s สามารถเพิ่มจำนวนการดำเนินคดีเอาผิดอาญามากขึ้นเรื่อยๆ และลดสัดส่วนการยกฟ้องลงเรื่อยๆ จน ค่า k เท่ากับ 0 กราฟของสมการ เอ็กซ์โพเนนเชียล ลดลงจน y มีค่าเท่ากับ 0 ดังตัวอย่างสมมุติในสมการนี้

ปัจจัยการไร้ตัวตน (Anonymous factor) เป็นฟังก์ชันเพิ่มเมื่อ $k = 2$

$$k = 2 - \left[\frac{d}{c} + \frac{s}{d} \right]$$

$$k = 2 - \left[\frac{10}{10} + \frac{10}{10} \right]$$

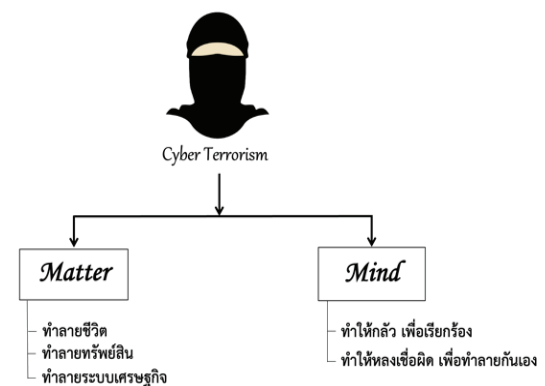
$$k = 0$$

แทนค่า $f(y) = 0^x$

7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

อาชญากรไซเบอร์ แตกต่างจากอาชญากรประเภทอื่นตรงที่ ไม่ก่ออาชญากรรม “ซึ่งหน้า” ต่อเหยื่อ [2] ซึ่งแตกต่างจากอาชญากร Street crime อื่นๆ เช่น การวิ่งราวทรัพย์กระทำซึ่งหน้าเหยื่อ การปล้นทรัพย์ซึ่งหน้าเหยื่อ การทำร้ายร่างกาย เป็นต้น แต่อาชญากรไซเบอร์ระมัดระวังเรื่องการไม่เปิดเผยตัวตน ความลับ การปิดบังอำพราง ตลอดจนการใช้ Bot หรือ AI คิดหาทางก่ออาชญากรรมแทนตน เป็นเรื่องสำคัญที่สุด และในทางตรงกันข้ามเมื่อ ปัจจัยการไร้ตัวตนในเทคโนโลยีได้หายไป อาชญากรไซเบอร์ประเภทนั้นก็จะหายไปด้วย เพราะอาชญากรไซเบอร์จะไม่ตัดสินใจเลือกใช้เทคโนโลยีนั้นประกอบอาชญากรรม

แนวโน้มการก่อการร้ายก็เช่นกัน การไร้ตัวตนบนโลกไซเบอร์ยังเป็นประโยชน์ต่อการก่อการร้ายสมัยใหม่ และสร้างความเสียหายได้มากกว่าการก่อการร้ายแบบเดิม



ภาพที่ 11 การไร้ตัวตนกับการก่อการร้ายไซเบอร์

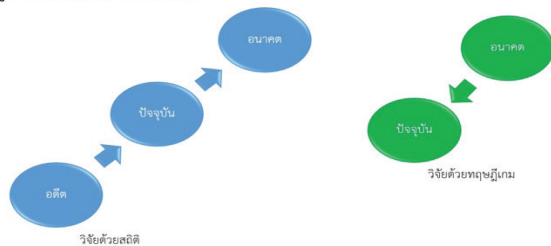
กลุ่มก่อการร้ายก็คิดอย่างเป็นเหตุเป็นผลเช่นเดียวกับอาชญากรไซเบอร์ “การไร้ตัวตน คือ โอกาส” ในการตัดสินใจลงมือก่อการร้าย

ดังนั้นวิธีป้องกันการก่อการร้ายทางไซเบอร์ต้องมุ่งไปที่การเปิดเผยตัวตนเปิดเผยที่มาของอุปกรณ์ปลายทาง (Terminals) และปิดกั้นการสื่อสารอุปกรณ์ปลายทางที่

ไม่สามารถระบุตัวตนผู้ใช้ได้ และเผื่อระวังเทคโนโลยีใหม่ๆ จากโลกไซเบอร์ว่ามีโอกาสใช้ในการก่อการร้ายมากขึ้นเรื่อยๆ เพียงใด [6]

วิธีวิจัยโดยใช้การคิดย้อนกลับแบบ Backward induction [1] หาผลลัพธ์ในอนาคตแล้วคิดย้อนกลับมา ปัจจุบัน เป็นจุดแตกต่างจากการวิจัยทางสถิติในอดีตเพื่อทำนายอนาคต ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อวิธีวิจัยทางเลือกที่มีข้อมูลสถิติน้อย

ผู้วิจัยมองหาวิธีวิจัยทางเลือก



ภาพที่ 12 การพิจารณากระบวนการตัดสินใจทางเลือกของผู้วิจัยระหว่างการใช้อยู่และทฤษฎีเกม

การสร้างรูปแบบความสัมพันธ์หรือสร้าง Model ด้วยทฤษฎีเกมในการวิจัยนี้ แสดงความสัมพันธ์การเชื่อมโยงระหว่าง การไร้ตัวตน (Anonymity) กับอาชญากรรมไซเบอร์ออกมาเป็น Decision Tree, Payoff Matrix และ Payoff Function อธิบายการตัดสินใจลงมือก่ออาชญากรรมไซเบอร์เมื่ออาชญากรคิดอย่างเป็นเหตุและเป็นผล เป็นการอธิบายที่ช่วยให้เห็นภาพความสัมพันธ์ของตัวแปรได้ชัดเจนอีกแบบ

สมการ Payoff Function ได้ชี้ให้เห็นความสำคัญที่สุดที่แสดงความสัมพันธ์ออกมาด้วย ปัจจัยการไร้ตัวตน (Anonymous factors) หรือ ค่า k โดยได้นำมาอธิบายรูปแบบความสัมพันธ์เพิ่มเติมเป็นแบบจำลองแนวโน้มการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์ (Shark fin curve) ที่ริเริ่มเป็นต้นแบบนำมาพัฒนาประยุกต์ใช้ได้อย่างดี โดยการสร้างรูปแบบความสัมพันธ์หรือสร้าง Model แสดงความ

สัมพันธ์การเชื่อมโยงระหว่าง การไร้ตัวตน (Anonymity) กับอาชญากรรมไซเบอร์ และนำมาตั้งเป็นสมมติฐานเป็นฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียล มาใช้อธิบายความสัมพันธ์ของอาชญากรรมไซเบอร์กับปัจจัยการไร้ตัวตน และยังเป็นจุดร่วมของการก่อการร้ายทางไซเบอร์

สมการคณิตศาสตร์ (3)-(4) ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นอัลกอริทึมให้ระบบคอมพิวเตอร์ประมวลผลเพื่อพยากรณ์แนวโน้มการเกิดอาชญากรรมไซเบอร์หรือการก่อการร้าย แสดงผลในห้องบัญชาการ (War room) ในการเฝ้าติดตามสถานการณ์เพื่อกำหนดมาตรการป้องกันและปราบปราม และผู้วิจัยเชื่อว่าเป็นการบุกเบิกงานวิชาการที่น่าสนใจให้ผู้วิจัยรุ่นต่อไปได้ทำวิจัยเพิ่มเติมต่อไป

8. บรรณานุกรม

- (1) ไชยันต์ ไชยพร, "Jon elster & Rational choice theory", สำนักพิมพ์ way of book, มีนาคม (2560).
- (2) ประเมศวร์ กุมาบุญ, "ความสัมพันธ์ระหว่างการไร้ตัวตนกับอาชญากรรมไซเบอร์", ดุษฎีนิพนธ์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (2563).
- (3) L.E. Cohen, M. Felson, "Social Change and Crime Rate Trends: A Routine Activity Approach", *American Sociological Review*, pp. 44, (1979).
- (4) E. Prisner, "Game Theory through Examples", *Published and Distributed by The Mathematical Association of America*, Washington, DC, (2014).
- (5) L.E. Daniel, L.E. Daniel, ผู้แปล สุนีย์ สกาวรัตน์, "การตรวจพิสูจน์หลักฐานดิจิทัลสำหรับผู้ประกอบวิชาชีพกฎหมาย", บริษัท ซีอีดูเคชั่น จำกัด (มหาชน), (2559).
- (6) M. E. Kabay, "A Brief History of Computer Crime: An Introduction for Students", *School of Graduate Studies*, Norwich University, (2008).
- (7) ITU Development, "Understanding cybercrime: phenomena, challenges and legal response", *The ITU publication*, September (2012).

การพัฒนากระบวนการทำกลีเซอรินบริสุทธิ์จากผลพลอยได้ของ การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว

Development of Glycerine Purification Process from By-product of Biodiesel Production Process from Used-oil

พันเอกหญิง พัดชา เพิ่มพิพัฒน์
Colonel Patcha Permpipat

กองวิชาเคมี ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า นครนายก 26001 ประเทศไทย
Department of Chemistry, Academic Division, Chulachomklao Royal Military Academy,
Nakon Nayok 26001, Thailand

Corresponding Author. E-mail : Patcha.ph@crma.ac.th

(Received: September 26, 2022, Revised: March 22, 2023, Accepted: March 27, 2023)

บทคัดย่อ : ปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น ทำให้ต้องมีการมองหาแหล่งพลังงานทางเลือกเข้ามาทดแทนพลังงานหลักที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ไบโอดีเซลเป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจในอนาคต งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการสกัดแยกกลีเซอรินจากกลีเซอรินดิบ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าและช่วยลดต้นทุนการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้กรดซัลฟิวริก 8 M และกรดฟอสฟอริก 8 M ในอัตราส่วนกรดต่อน้ำหนักของกลีเซอรินดิบที่ 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 และ 20% สำหรับการสกัดแยกกลีเซอรินจากกลีเซอรินดิบ หลังจากนั้นกลีเซอรินที่สกัดได้จะถูกนำมาผ่านชุดกรองสุญญากาศ เพื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของกลีเซอริน ผลการวิจัยพบว่าชั้นของกลีเซอรินจะแยกตัวได้เร็วและได้กลีเซอรินปริมาณมากขึ้น เมื่อค่ากรด-เบส ของสารละลายกลีเซอรินมีค่าใกล้เคียง 2 เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่อัตราส่วนกรดต่อน้ำหนักของกลีเซอรินดิบ 10% สามารถผลิตกลีเซอรินได้มากที่สุดและมีค่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์เท่ากับ 89.7 ± 0.01 และเมื่อใช้กรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนกรดต่อน้ำหนักของกลีเซอรินดิบ 16% สามารถผลิตกลีเซอรินได้มากที่สุดและมีค่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์เท่ากับ 87.7 ± 0.01 ทั้งนี้กระบวนการสกัดแยกกลีเซอรินให้บริสุทธิ์โดยใช้กรดซัลฟิวริก 8 M สามารถเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของกลีเซอรินจาก 40.2 ± 0.02 เป็น 89.7 ± 0.01 และกระบวนการสกัดแยกกลีเซอรินให้บริสุทธิ์โดยใช้กรดฟอสฟอริก 8 M สามารถเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของกลีเซอรินจาก 40.2 ± 0.02 เป็น 87.7 ± 0.01

คำสำคัญ: กลีเซอริน กลีเซอรินดิบ การทำให้บริสุทธิ์

Abstract : In the present time, humans are using more and more energy, which has caused the need to look for the alternative energy to replace the current energy. Biodiesel is an interesting one of the alternative energy sources in the future. Moreover, if the cost of biodiesel's production is lower, it will make the biodiesel as an attractive fuel. So, the researcher is interested in extraction of glycerine from crude glycerine in order to add value to the crude glycerine and help to reduce the cost of biodiesel production. The researcher had studied the separation of glycerine by using 8 M of sulfuric acid and 8 M of phosphoric acid. The percentage of each acid ratio by weight of crude glycerine at 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 and 20 were used in the separation process. After the separation process, the separated glycerine was taken through a vacuum extraction process in order to increase the percentage of glycerine purity. From the research, it was found that when pH of glycerine solution was close to 2, the glycerine layer was separated quickly and there was a large amount of glycerine. For sulfuric acid, the percentage of acid ratio by weight of crude glycerine at 10% gave the largest amount of glycerine at the percentage of glycerine purity of 89.7 ± 0.01 . For phosphoric acid, the percentage of acid ratio by weight of crude glycerine at 16% gave the largest amount of glycerine at the percentage of glycerine purity of 87.7 ± 0.01 . The purification process of glycerine extraction by using 8 M of sulfuric acid could increase the percentage of glycerine purity from $40.2 \pm 0.02\%$ to $89.7 \pm 0.01\%$. The purification process of glycerine extraction by using 8 M of phosphoric acid could increase the percentage of glycerine purity from $40.2 \pm 0.02\%$ to $87.7 \pm 0.01\%$.

Keywords : Glycerine, Crude Glycerine, Purification

1. บทนำ

กลีเซอรินเป็นสารโพลีไฮดริคแอลกอฮอล์ (Polyhydric Alcohol) ที่มีสูตรเคมี คือ $C_3H_8O_3$ เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ จึงสามารถละลายน้ำและแอลกอฮอล์ได้ดี มีรสหวาน และมีความคงตัวสูงในสภาวะปกติของการใช้งานและการเก็บรักษา ดังนั้นกลีเซอรินจึงถูกนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารเคมีอื่น ๆ เช่น ใช้เป็นส่วนผสมหรือเป็นตัวช่วยในกระบวนการผลิตไฮโดรเจน [1] เครื่องสำอาง ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด เมทานอล และเภสัชภัณฑ์ เป็นต้น โดยทั่วไปกลีเซอรินสามารถผลิตได้หลายวิธี เช่น กระบวนการสะaponนิฟิเคชัน (Saponification) ซึ่งจะใช้น้ำมันหรือไขมันทำปฏิกิริยากับเบสได้สบู่เป็นผลิตภัณฑ์ และมีกลีเซอรินเกิดขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม การสังเคราะห์จากโพรพิลีนและการหมักน้ำตาลด้วยไซเดียมไบซัลเฟตและยีสต์ เป็นต้น ปัจจุบันไบโอดีเซลจัดเป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือก (Alternative Energy) ซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียน และนิยมใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในการผลิต [2] ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ร่วมคือไบโอดีเซลและกลีเซอรินดิบ [3] ซึ่งเมื่อนำไปจำหน่ายเป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมันเตาก็จะมีราคาประมาณ 4-10 บาทต่อกิโลกรัม แต่หากนำกลีเซอรินดิบไปผ่านกระบวนการสกัดแยกเพื่อทำให้บริสุทธิ์ ก็จะเป็นการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจให้กับกลีเซอรินดิบ โดยกลีเซอรินบริสุทธิ์เกรดยา (Pharmaceutical Grade) ราคาจะอยู่ที่ประมาณ 200 บาทต่อกิโลกรัม กรมพลังงานทหารได้ร่วมมือกับกระทรวงพลังงานในการวิจัยพัฒนาระบบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลขนาดเล็กที่มีกำลังผลิตได้ครั้งละ 100 ลิตร โดยมีวัตถุประสงค์เป็นน้ำมันพืชใช้แล้วหรือน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ซึ่งในการผลิตแต่ละครั้งจะมีกลีเซอรินดิบตกค้าง 10% ของปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้ ทั้งนี้เครื่องมือดังกล่าวได้ถูกแจกจ่ายและนำไปใช้ในหน่วยทหารเกือบทั่วประเทศ [4] ปัจจุบันกลีเซอรินดิบส่วนเกินในตลาดที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ

[5] ส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ล้างคราบน้ำมันหรือเผาเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งทำให้เกิดแก๊สที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมได้ในอนาคต [6] ดังนั้นการทำกลีเซอรินดิบให้บริสุทธิ์ จะช่วยเพิ่มมูลค่าของกลีเซอรินดิบซึ่งนำไปสู่การลดต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซล ทำให้เกิดการกระตุ้นและส่งเสริมการผลิตและใช้ไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น

การทำกลีเซอรินดิบให้บริสุทธิ์มีหลายวิธี เช่น การแยกสลายด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) และการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation) เพื่อกำจัดเกลือ การกลั่นด้วยระบบสุญญากาศ การใช้เทคนิคโครมาโทกราฟี และการใช้เบนโทไนด์ ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับและขจัดสิ่งสกปรก เช่น กรดไขมันอิสระ เมทิลเอสเทอร์ น้ำ และโพแทสเซียมภายในกลีเซอรินดิบ [7] เป็นต้น

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาชนิดและอัตราส่วนกรดโดยน้ำหนักของกลีเซอรินดิบที่มีผลต่อปริมาณ และเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของกลีเซอรินที่ได้จากการสกัดแยกกลีเซอรินดิบซึ่งเป็นผลพลอยได้ของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

W.N.R.W. Isahak et al. [8] ได้ศึกษาเทคนิคการทำกลีเซอรินดิบซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ จะช่วยให้การผลิตไบโอดีเซลเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและลดค่าใช้จ่ายในการผลิตไบโอดีเซลลง ปัจจุบันมีเทคนิคและเทคโนโลยีใหม่ ๆ ในการทำกลีเซอรินให้บริสุทธิ์ เช่น การกรองด้วยอัลตราฟิลเตรชัน การใช้เรซินในการแลกเปลี่ยนไอออน และการกลั่นด้วยระบบสุญญากาศ เป็นต้น จากการศึกษาพบว่า หากนำเทคนิคที่เหมาะสมมาใช้ร่วมกันมากกว่าหนึ่งวิธีจะช่วยเพิ่มค่าความบริสุทธิ์ของกลีเซอรินมากขึ้น

สุพะไชย์ จินดาวุฒิกล และคณะ [9] ได้ศึกษาการทำกลีเซอรินดิบซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟี โดยใช้กรดซัลฟิวริกเพื่อแยกเกลือออกไป พบว่าที่ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 2 สามารถตกตะกอนเกลือได้ดีที่สุด เมื่อกรองเกลือกับสารเจือปนอื่น ๆ ออกแล้ว ต่อบำบัดฟอกสีและกำจัดกลิ่นด้วยถ่านกัมมันต์ หลังจากนั้นนำไปกำจัดเมทานอลและน้ำโดยนำสารที่ได้ไปไว้ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 120 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้กลีเซอรินบริสุทธิ์ 89% และหากนำมากรองด้วยเทคนิคคอลัมน์โครมาโทกราฟีเพิ่มเติม กลีเซอรินจะมีค่าความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นเป็น 92.19% ซึ่งสามารถนำไปใช้ในผลิตอุตสาหกรรมสบู่ และโลชั่น

สายฝน อ่อนทอง [10] ได้ศึกษาการเพิ่มมูลค่าของกลีเซอรินดิบที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยเลือกใช้กรดไฮโดรคลอริกและซัลฟิวริกที่ค่าความเป็นกรด-เบสและอุณหภูมิต่าง ๆ กัน จากการศึกษาพบว่า การสกัดกลีเซอรินดิบด้วยกรดซัลฟิวริก ที่มีค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 2 ที่อุณหภูมิ 70 °C จะได้กลีเซอรินที่มีความบริสุทธิ์ 91%

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การนำวิธีการทำกลีเซอรินให้บริสุทธิ์ที่เหมาะสมมากกว่า 1 วิธี มาใช้ร่วมกันสามารถเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของกลีเซอรินได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาการทำกลีเซอรินดิบให้บริสุทธิ์โดยใช้กรดในการสกัดแยกร่วมกับการกรองและการกลั่นด้วยระบบสุญญากาศ

4. วิธีดำเนินการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้นำกลีเซอรินดิบ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วของกรมอุทกหารเรือ มาทำให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น โดยมีขั้นตอนดังนี้

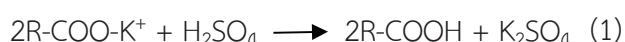
4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของกลีเซอรินดิบ

ตัวอย่างกลีเซอรินดิบที่นำมาวิเคราะห์นั้น เป็น

กลีเซอรินดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วของกรมอุทกหารเรือ แขวงศิริราช เขตบางกอกน้อย จ.กรุงเทพมหานคร โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งการเก็บสารตัวอย่างดำเนินการในช่วงเดือนเมษายน และนำมาวิเคราะห์เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของกลีเซอริน, เปอร์เซ็นต์ของน้ำ และความหนาแน่น ตามลำดับ

4.2 การสกัดแยกกลีเซอรินจากกลีเซอรินดิบโดยใช้กรด ได้แก่ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เพื่อขจัดสบู่ ซึ่งเป็นไปตามขั้นตอนการสกัดแยกของ สุจิตรา เชื้อพรหม [11] แต่ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) แทนโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการปรับค่าความเป็นกรด-เบส ให้เป็นกลาง

4.2.1 การแยกกลีเซอรินจากกลีเซอรินดิบโดยใช้กรดซัลฟิวริก เมื่อชั่งสารกลีเซอรินดิบ 60 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นเติมเมทานอล 30% ของน้ำหนักกลีเซอรินดิบลงในบีกเกอร์ คนสารให้เข้ากันตลอดเวลาด้วยเครื่องกวนสารเชิงกล (Hot Plate Magnetic Stirrer) ที่ระดับความเร็วรอบ 350 rpm เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 8 M โดยใช้ปริมาณกรดที่ 6% ของน้ำหนักกลีเซอรินดิบ และกวนต่อเนื่องอีก 30 นาที หลังจากนั้นนำบีกเกอร์ลงจากเครื่องกวนสารเชิงกล ปรับค่าความเป็นกรด-เบส ให้เป็นกลาง และปล่อยให้เกลือโพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาตามสมการที่ 1 และ 2 ตกตะกอนโดยสมบูรณ์

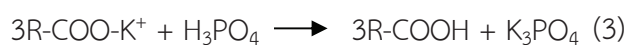


ขั้นตอนต่อไปกรองแยกเกลือ K_2SO_4 ที่ตกตะกอนออก โดยใช้ชุดกรองสุญญากาศและกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 จากนั้นนำกลีเซอรินที่กรองเกลือ K_2SO_4 ออกแล้วไปใส่ไว้ในกรวยแยกและปล่อยให้

กลีเซอริน กรดไขมัน คอลลอยด์ของสบู่ และสิ่งเจือปนอื่น ๆ แยกตัวออกจากกันโดยตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 คืน ในลำดับต่อไปให้ทำขั้นตอนซ้ำอีกครั้งโดยแต่ละครั้งให้เปลี่ยนปริมาณกรดเป็น 8, 10, 12, 14, 16, 18 และ 20% ของน้ำหนักกลีเซอรินดิบ

4.2.2 การแยกกลีเซอรินจากกลีเซอรินดิบโดยใช้กรดฟอสฟอริก

ชั่งสารกลีเซอรินดิบ 60 กรัม ลงในปิกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นเติมเมทานอล 30% ของน้ำหนักกลีเซอรินดิบลงในปิกเกอร์ คนสารให้เข้ากันตลอดเวลาด้วยเครื่องกวนสารเชิงกล ที่ระดับความเร็วรอบ 350 rpm เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเติมกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 8 M โดยใช้ปริมาณกรดที่ 6% ของน้ำหนักกลีเซอรินดิบ และกวนต่อเนื่องอีก 30 นาที หลังจากนั้นนำปิกเกอร์ลงจากเครื่องกวนสารเชิงกล ปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้เป็นกลาง และปล่อยให้เกลือโพแทสเซียมฟอสเฟต (K_3PO_4) ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาตามสมการที่ 3 และ 4 ตกตะกอนโดยสมบูรณ์



กรองแยกเกลือ K_3PO_4 ที่ตกตะกอนออกโดยใช้ชุดกรองสุญญากาศ (Vacuum Extraction) และกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 ดังภาพที่ 1 จากนั้นนำกลีเซอรินที่กรองเกลือ K_3PO_4 ออกแล้วไปใส่ไว้ในกรวยแยก และปล่อยให้กลีเซอริน กรดไขมัน คอลลอยด์ของสบู่ และสิ่งเจือปนอื่น ๆ แยกตัวออกจากกันโดยตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 คืน ในลำดับต่อไปให้ทำขั้นตอนซ้ำอีกครั้งโดยแต่ละครั้งให้เปลี่ยนปริมาณกรดที่ 8, 10, 12, 14, 16, 18 และ 20% ของน้ำหนักกลีเซอรินดิบ ตามลำดับ สำหรับตะกอนเกลือ K_3PO_4 ที่กรองได้จะมีลักษณะดังภาพที่ 2

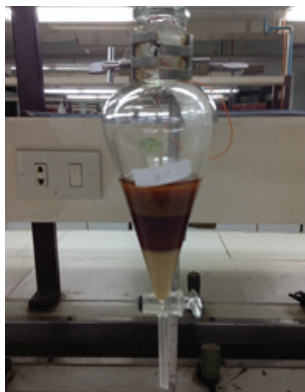


ภาพที่ 1 การกรองตะกอนเกลือด้วยชุดกรองสุญญากาศ



ภาพที่ 2 ตะกอนเกลือที่กรองได้จากเครื่องกรองสุญญากาศ

4.3 การแยกกลีเซอรินจากกรดไขมันและสิ่งเจือปนอื่น ๆ โดยใช้กรวยแยก ตามขั้นตอนของ M.R. Nanda, Z. Yuan. [12] แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การแยกชั้นของเฟสของเหลวในกรวยแยกหลังตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

นำกลีเซอรินดังกล่าวมาไขแยกเอาชั้นกลีเซอรินออกจากกรดไขมัน คอลลอยด์ของสบู่ และสิ่งเจือปนอื่น ๆ จากนั้นจดบันทึกน้ำหนักและปริมาตรของกลีเซอรินที่แยกได้ ต่อมนำกลีเซอรินที่แยกได้มาเติมเฮกเซน 25 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งสารทิ้งไว้ 20 นาที เพื่อขจัดกรดไขมันที่ตกค้างในกลีเซอริน หลังจากนั้นนำสารไปใส่ในกรวยแยกเพื่อไขแยกชั้นกลีเซอรินออกจากเฮกเซน และนำกลีเซอรินที่แยกได้ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปไว้ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Laboratory Water Bath) ที่ 70°C เพื่อระเหยเฮกเซนที่ตกค้างออกจากกลีเซอริน

4.4 การกำจัดสี (Decolorizing) และกำจัดกลิ่น (Deodorizing) โดยการใช้ผงถ่านกัมมันต์ (Activated-Charcoal Powder) ขนาด -100 Mesh ตามขั้นตอนของ นพวรรณ ชันญพานิช [13] แต่มีการปรับสัดส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อกลีเซอรินตามความเหมาะสม

นำกลีเซอรินที่ผ่านการแยกสิ่งเจือปนโดยใช้กรวยแยกมาปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้เป็นกลางโดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5 M จากนั้นเติมผงถ่านกัมมันต์ ขนาด -100 Mesh ในอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อกลีเซอรินเป็น 1:5 โดยน้ำหนัก และนำไปกวนผสมโดยใช้เครื่องกวนสารเชิงกลที่ระดับความเร็วรอบ 350 rpm

ที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 30 นาที ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การใส่ผงถ่านกัมมันต์ขนาด -100 Mesh เพื่อขจัดสี

เมื่อสารผสมกันเรียบร้อยแล้วนำสารดังกล่าวไปกรองแยกผงถ่านกัมมันต์ออกจากกลีเซอรินโดยใช้ชุดกรองสุญญากาศและกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 ดังภาพที่ 5

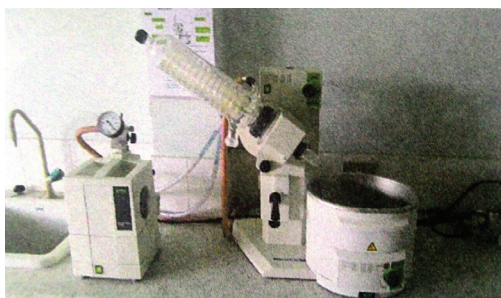


ภาพที่ 5 การกรองผงถ่านด้วยชุดกรองสุญญากาศ

หลังจากนั้นนำกลีเซอรินบริสุทธิ์ที่ได้จากการสกัดแยกด้วยชุดกรองสุญญากาศไปเก็บไว้ในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร โดยเก็บตัวอย่าง 3 ครั้ง ต่อ 1 สารตัวอย่าง เพื่อนำไปกลั่นด้วยระบบสุญญากาศต่อไป

4.5 การนำกลีเซอรินที่ได้ไปกลั่นด้วยระบบสุญญากาศตามขั้นตอนการสกัดแยกของ สุจิตรา เชื้อพรหม [14]

นำกลีเซอรินที่แยกได้จากข้อ 4.4 ไปกลั่นแยกเมทานอลและน้ำออกโดยใช้เครื่องกลั่นแบบลดความดัน (Rotary Evaporator) โดยตั้งค่ากลั่นแบบลดความดันที่อุณหภูมิ 60 °C และความดัน 280 mbar ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรินโดยการกลั่นแบบสุญญากาศ

โดยสารตัวอย่างที่ผ่านการกลั่นแบบสุญญากาศจะถูกนำไปเก็บไว้ในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร เพื่อนำไปไทเทรต และคำนวณหาค่า Percent Recovery ตามสมการที่ 5 ต่อไป

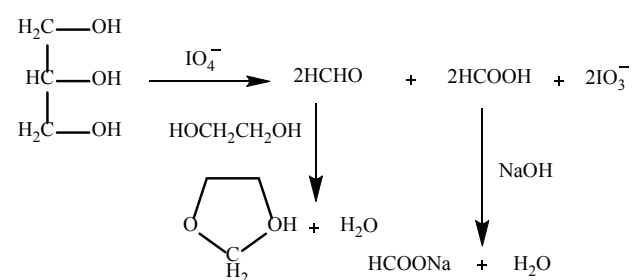
$$\% \text{ Recovery} = \frac{\text{จำนวนกรัมสารที่สกัดแยกได้}}{\text{จำนวนกรัมของสารตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100 \quad (5)$$

4.6 การหาปริมาณกลีเซอริน โดยการไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตาม มอก.337-2538

ชั่งกลีเซอรินตัวอย่างให้ได้น้ำหนัก 0.50 กรัม และใส่ในบีกเกอร์ จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 50 มิลลิลิตร หยดสารบรอมไทมอลบลูอินดิเคเตอร์ 5 ถึง 7 หยด แล้วปรับค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายให้เป็นกรด ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.2 M ต่อมาปรับค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายอีกครั้งให้เป็นกลาง ด้วย

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.05 M ลำดับต่อไปเตรียมตัวควบคุม (Blank) โดยใช้น้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร แทนกลีเซอรินตัวอย่าง และใช้วิธีการเตรียมเช่นเดียวกับที่กล่าวมาข้างต้น จากนั้นปิเปตสารละลายโซเดียมเปอร์ไอโอเดต 50 มิลลิลิตร ลงในสารละลายกลีเซอรินตัวอย่างและตัวควบคุม แก้วบีกเกอร์เบา ๆ และปิดด้วยกระจกนาฬิกา จากนั้นนำสารละลายกลีเซอรินตัวอย่างและตัวควบคุมไปตั้งไว้ในที่มืด ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเติมสารละลายไอโธนไดออล 10 มิลลิลิตร ลงในสารละลายกลีเซอรินตัวอย่างและตัวควบคุม แก้วบีกเกอร์เบา ๆ และตั้งทิ้งไว้ในที่มืด ที่อุณหภูมิห้องอีก 20 นาที

นำสารละลายกลีเซอรินตัวอย่างและตัวควบคุมมาเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 300 มิลลิลิตร แล้วนำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.125 M โดยสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีฟ้าเมื่อถึงจุดยุติ บันทึกปริมาตรสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้จากบิวเรต โดยอ่านละเอียดถึง 0.01 มิลลิลิตร ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการไทเทรตแสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 สมการปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไทเทรตกลีเซอริน

หลังจากนั้นนำปริมาตรสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่บันทึกได้ไปคำนวณหาปริมาณกลีเซอรินตามสมการที่ 6

%ปริมาณกลีเซอรินโดยน้ำหนัก= $9.206 \times M \{(T1-T2)/W\}$ (6)
เมื่อ T1 คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
ที่ใช้ในการไทเทรตกลีเซอรินตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

T2 คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
ที่ใช้ในการไทเทรตกลีเซอรินตัวควบคุม (มิลลิลิตร)

M คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
ที่เตรียมเทียบเท่ากับความเข้มข้น 0.125 M

W คือ น้ำหนักกลีเซอรินตัวอย่าง (g)

4.7 การวิเคราะห์หาความบริสุทธิ์และความหนาแน่น
ของกลีเซอรินที่แยกได้ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
แมสสเปกโตรเมทรี (Agilent GC รุ่น 6890/MS รุ่น 5975)
เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ชนิดใช้ตัวตรวจวัดแบบเฟรม
ไอออนไนเซชัน (GC-FID) พีโคโนมิเตอร์ (Pycnometer) และ
ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer)

นำกลีเซอรินที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าเปอร์เซ็นต์ความ
บริสุทธิ์ และความหนาแน่น ตามลำดับ โดยการวิเคราะห์
จะดำเนินการภายใต้สภาวะแวดล้อมตามเงื่อนไขที่กำหนด
ไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สภาวะที่เหมาะสมของเครื่องมือในการวิเคราะห์
ความบริสุทธิ์ของกลีเซอริน

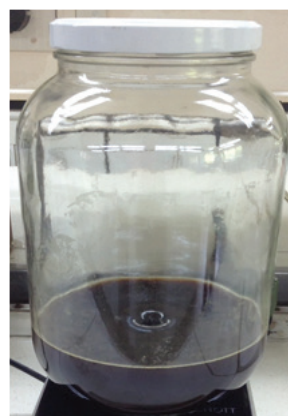
เครื่องมือ (Equipment)	เงื่อนไข (Condition)
Agilent GC รุ่น 6890/MS รุ่น 5975	
Column	DB-5ms, 30 m
Manual injection volume	0.2 μ L
Injection Model	split
Split Ratio	100:1
Gas Carrier	He
Gas CarrierFlow	1 mL/min
Oven Temp	40 $^{\circ}$ C-250 $^{\circ}$ C

เครื่องมือ (Equipment)	เงื่อนไข (Condition)
Agilent Mass Selective Detector รุ่น 5975	
Solvent delay	0.0 min
Transfer line temp	280 $^{\circ}$ C
Mass range	32-350 amu
FID detector	
Heater	280 $^{\circ}$ C
Gas	H ₂
Gas Flow	30 mL/min
Flame	On

5. ผลการศึกษา

5.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของ
กลีเซอรินดิบ

กลีเซอรินดิบที่มีลักษณะดังภาพที่ 8 ถูกนำไป
วิเคราะห์หาองค์ประกอบพื้นฐานโดยใช้เครื่อง GC6890/
MS5975, GC-FID7890A, Karl Fischer Titrator,
Hydrometer และ Pycnometer



ภาพที่ 8 กลีเซอรินดิบจากกรรมอุตสาหกรรมเรือ

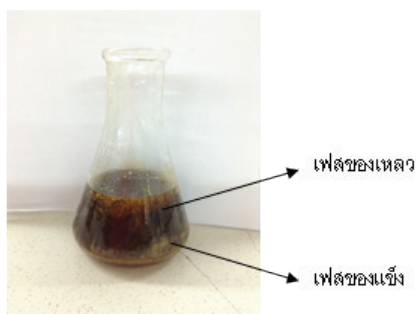
เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของกลีเซอริน เปอร์เซ็นต์ของน้ำ ความหนาแน่น และค่าความเป็นกรด-เบส ผลการวิเคราะห์ สรุปได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของกลีเซอรินดิบจากกรรมอุทธารเรือ

ปัจจัยที่วิเคราะห์	ตัวอย่างกลีเซอรินดิบ (กรรมอุทธารเรือ)
1. ลักษณะทางกายภาพ	สารมีความหนืดและมีสีน้ำตาลเข้ม
2. ค่าความเป็นกรดเบส	8.72 ± 0.02
3. ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.018 ± 0.01
4. เปอร์เซ็นต์ของกลีเซอริน	40.2 ± 0.02
5. เปอร์เซ็นต์ของน้ำ	1.96 ± 0.01
6. เปอร์เซ็นต์ของสิ่งเจือปนอื่น ๆ	57.84 ± 0.02

5.2 ผลการสกัดแยกกลีเซอรินจากกลีเซอรินดิบโดยใช้กรด

5.2.1 ผลการแยกกลีเซอรินจากกลีเซอรินดิบโดยใช้กรดซัลฟิวริก 8 M พบว่า สารละลายเกลือเกิดการตกตะกอนที่ก้นภาชนะ ทำให้เกิดการแยกเฟสของสารเป็น 2 เฟส คือเฟสที่เป็นของเหลวจะอยู่ด้านบน และเฟสที่เป็นของแข็งอยู่ด้านล่าง แสดงดังภาพที่ 9 และปริมาณของเฟสของเหลวและของแข็ง แสดงดังตารางที่ 3



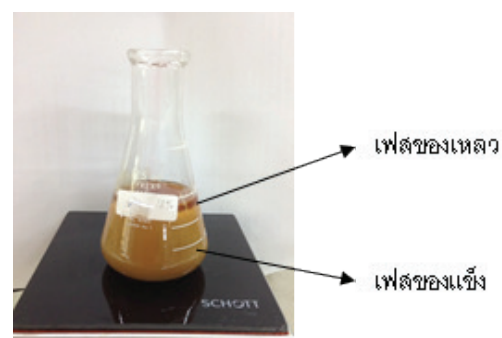
ภาพที่ 9 การตกตะกอนของผลึกเกลือหลังเติมกรดซัลฟิวริก

ตารางที่ 3 ปริมาณของเฟสของเหลวและเฟสของแข็งหลังการเติมกรดซัลฟิวริกลงไปผสม

ปริมาณกรด (%ของน้ำหนักกลีเซอรินดิบ)	ปริมาณของเหลวที่แยกได้ (g)	ปริมาณเกลือที่แยกได้ (g)	ค่ากรด-เบส (pH)
6	44.03 ± 0.25	4.60 ± 0.05	4.21 ± 0.21
8	43.75 ± 0.20	4.52 ± 0.10	2.86 ± 0.15
10	43.96 ± 0.35	4.58 ± 0.05	1.98 ± 0.22
12	44.16 ± 0.20	4.53 ± 0.05	0.35 ± 0.01
14	44.33 ± 0.20	4.57 ± 0.15	0.15 ± 0.01
16	44.30 ± 0.25	4.61 ± 0.10	0.00 ± 0.00
18	44.34 ± 0.25	4.53 ± 0.05	0.00 ± 0.00
20	44.67 ± 0.20	4.56 ± 0.05	0.00 ± 0.00

หมายเหตุ ทำการทดลอง 3 ครั้ง และนำมาหาค่าเฉลี่ยกับค่า S.D. สำหรับแต่ละสารตัวอย่าง

5.2.2 ผลการแยกกลีเซอรินจากกลีเซอรินดิบ 60 กรัม โดยใช้กรดฟอสฟอริก 8 M พบว่า สารละลายเกลือเกิดการตกตะกอนที่ก้นภาชนะ ทำให้เกิดการแยกเฟสของสารเป็น 2 เฟส คือเฟสที่เป็นของเหลวจะอยู่ด้านบน และเฟสที่เป็นของแข็งอยู่ด้านล่างแสดงดังภาพที่ 10 และปริมาณของเฟสของเหลวและของแข็ง แสดงดังตารางที่ 4



ภาพที่ 10 การตกตะกอนของผลึกเกลือหลังเติมกรดฟอสฟอริก

ตารางที่ 4 ปริมาณของเฟสของเหลวและเฟสของแข็ง
หลังการเติมกรดฟอสฟอริกลงไปผสม

ปริมาณกรด (%ของ น้ำหนัก กลีเซอรินดิบ)	ปริมาณ ของเหลวที่ แยกได้ (g)	ปริมาณ เกล็ดที่ แยกได้ (g)	ค่า กรด-เบส
6	39.36±0.23	4.58±0.05	6.33±0.10
8	43.66±0.20	4.52±0.05	5.27±0.22
10	43.13±0.25	4.57±0.10	4.80±0.21
12	44.15±0.25	4.51±0.02	3.41±0.15
14	44.23±0.30	4.57±0.03	2.69±0.25
16	44.17±0.23	4.58±0.10	2.15±0.18
18	44.34±0.22	4.52±0.05	1.77±0.22
20	44.47±0.25	4.55±0.03	1.56±0.25

หมายเหตุ ทำการทดลอง 3 ครั้ง และนำมาหาค่าเฉลี่ยกับค่า S.D.
สำหรับแต่ละสารตัวอย่าง

5.3 ผลการแยกกลีเซอรินจากกรดไขมันและ
สิ่งเจือปนอื่น ๆ โดยใช้กรวยแยก

เมื่อนำเฟสของเหลวที่ได้จากการกรองเกล็ดออกไป
ใส่ในกรวยแยกตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ของเหลวในกรวยแยก
เกิดการแยกชั้น และกลีเซอรินที่ได้จากการแยกโดยใช้
กรวยแยกมีลักษณะเป็นสีน้ำตาล และปริมาณชั้น
กลีเซอรินที่แยกได้จากกรวยแยกสารของกรดแต่ละชนิด
แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ปริมาณชั้นกลีเซอรินที่แยกได้จากการใช้
กรวยแยกของกรดแต่ละชนิด

ชนิดกรด	ปริมาณกรด (%ของน้ำหนัก กลีเซอรินดิบ)	ปริมาณชั้นกลีเซอรินที่ แยกได้จากการใช้ กรวยแยก (g)
H ₂ SO ₄	6	22.42±0.25
	8	22.52±0.22
	10	23.65±0.15
	12	22.55±0.34
	14	22.02±0.27
	16	21.95±0.20
	18	21.75±0.22
	20	21.76±0.25
H ₃ PO ₄	6	20.23±0.23
	8	21.76±0.25
	10	22.46±0.21
	12	22.74±0.24
	14	22.95±0.25
	16	23.15±0.23
	18	22.75±0.22
	20	22.56±0.25

หมายเหตุ ทำการทดลอง 3 ครั้ง และนำมาหาค่าเฉลี่ยกับ
ค่า S.D. สำหรับแต่ละสารตัวอย่าง

5.4 ผลการกำจัดสีและกำจัดกลิ่น โดยใช้ผงถ่าน
กัมมันต์ขนาด -100 Mesh

กำจัดสีและกำจัดกลิ่น โดยใช้ผงถ่านกัมมันต์
ขนาด -100 Mesh และทำการกรองด้วยชุดกรองสุญญากาศ
ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ปริมาณกลีเซอรินหลังการขจัดสีด้วยผง
ถ่านกัมมันต์ขนาด -100 Mesh

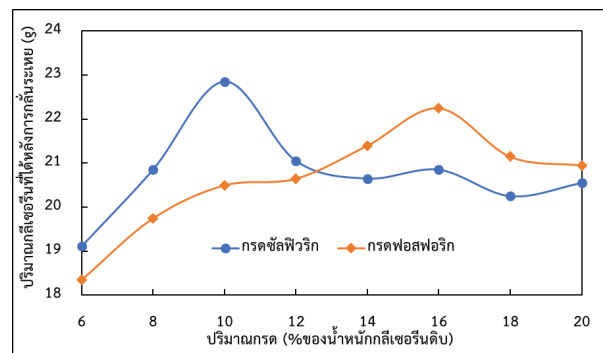
ชนิดกรด	ปริมาณกรด (%ของ น้ำหนัก กลีเซอรินดิบ)	ปริมาณกลีเซอรินหลังการ ขจัดสีด้วยผงถ่านกัมมันต์ ขนาด -100 Mesh (g)
H ₂ SO ₄	6	20.23±0.35
	8	21.76±0.45
	10	23.25±0.25
	12	21.95±0.28
	14	21.39±0.24
	16	21.05±0.28
	18	20.95±0.15
	20	21.10±0.22
H ₃ PO ₄	6	19.26±0.41
	8	20.81±0.36
	10	21.61±0.15
	12	21.75±0.34
	14	22.26±0.22
	16	22.85±0.25
	18	21.95±0.20
	20	21.81±0.23

หมายเหตุ ทำการทดลอง 3 ครั้ง และนำมาหาค่าเฉลี่ยกับ
ค่า S.D. สำหรับแต่ละสารตัวอย่าง

5.5 ผลการนำกลีเซอรินที่ได้ไปกลั่นในระบบ
สุญญากาศ

หลังผ่านกระบวนการขจัดสีด้วยการเติมผงถ่านกัมมันต์
ขนาด -100 Mesh กลีเซอรินจะมีสีใสมากขึ้น แต่ยังมี

สิ่งเจือปนที่ละลายได้ในกลีเซอรินผสมอยู่ ดังนั้นเพื่อให้
กลีเซอรินมีความบริสุทธิ์มากขึ้น จึงนำกลีเซอรินที่ได้
จากการกำจัดสีไปกลั่นด้วยระบบสุญญากาศ โดยกำหนด
ความดันที่ 280 mbar ณ อุณหภูมิที่ 60 °C เพื่อระเหยน้ำและ
เมทานอลออก และทำให้กลีเซอรินมีความบริสุทธิ์มากขึ้น
โดยปริมาณกลีเซอรินที่แยกได้หลังการกลั่นด้วยระบบ
สุญญากาศ แสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ปริมาณกลีเซอรินที่แยกได้หลังการกลั่นด้วย
ระบบสุญญากาศ

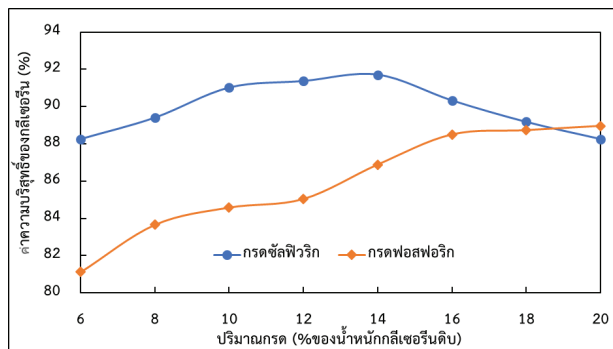
5.6 ผลการหาค่าปริมาณกลีเซอรินโดยการไทเทรต
ตาม มอก.337-2538

กลีเซอรินที่ผ่านกระบวนการกลั่นด้วยระบบ
สุญญากาศถูกนำมาไทเทรตตาม มอก. 337-2538 โดย
ใช้กลีเซอรินที่สกัดได้ 0.5 กรัม มาไทเทรตกับสารละลาย
โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.125 M โดยปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์
ของน้ำกลั่นที่ใช้เป็นตัวควบคุม เท่ากับ 4.50 ลูกบาศก์-
เซนติเมตร ผลการไทเทรตกลีเซอรินด้วยสารละลายโซเดียม-
ไฮดรอกไซด์ แสดงดังตารางที่ 7 และค่าความบริสุทธิ์ของ
กลีเซอรินที่ได้จากกระบวนการสกัดโดยใช้กรดซัลฟิวริก
และกรดฟอสฟอริก แสดงดังภาพที่ 12

ตารางที่ 7 ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต
กลีเซอรินที่ได้จากสกัดแยกของกรดแต่ละชนิด

ชนิดกรด	ปริมาณกรด (%ของน้ำหนัก กลีเซอรินดิบ)	ปริมาตร NaOH ที่ใช้ ในการไทเทรต (cm ³)
H ₂ SO ₄	6	42.85±0.02
	8	43.35±0.01
	10	44.05±0.02
	12	44.20±0.02
	14	44.35±0.01
	16	43.75±0.02
	18	43.25±0.01
	20	42.58±0.02
H ₃ PO ₄	6	39.75±0.02
	8	40.85±0.02
	10	41.25±0.01
	12	41.45±0.02
	14	42.25±0.01
	16	42.95±0.01
	18	43.05±0.02
	20	43.15±0.02

หมายเหตุ ทำการทดลอง 3 ครั้ง และนำมาหาค่าเฉลี่ยกับ
ค่า S.D. สำหรับแต่ละสารตัวอย่าง



ภาพที่ 12 ค่าความบริสุทธิ์ของกลีเซอริน

หลังจากการวิเคราะห์ เปอร์เซ็นต์ของกลีเซอรินโดย
วิธีการไทเทรตเบื้องต้น พบว่ากลีเซอรินที่ได้จากการใช้
กรดซัลฟิวริกในการสกัดแยกกลีเซอรินให้บริสุทธิ์นั้น ใน
ช่วงปริมาณกรดที่ 10-14% โดยน้ำหนักของกลีเซอรินดิบ
จะเป็นช่วงที่มีค่าความบริสุทธิ์ของกลีเซอรินสูง และมีค่า
ความบริสุทธิ์ของกลีเซอรินไม่แตกต่างกันมากนัก แสดง
ดังภาพที่ 11 แต่ที่ปริมาณกรดซัลฟิวริก 10% โดยน้ำหนัก
ของกลีเซอรินดิบ สามารถสกัดแยกกลีเซอรินบริสุทธิ์ได้
ปริมาณมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 23.25±0.25 กรัม และมีค่า
ความบริสุทธิ์เท่ากับ 91.02±0.15% สำหรับกรดฟอสฟอริก
ที่ปริมาณกรด 16% โดยน้ำหนักของกลีเซอรินดิบ สามารถ
สกัดแยกกลีเซอรินบริสุทธิ์ได้ปริมาณมากที่สุด ซึ่งมีค่า
เท่ากับ 22.85±0.25 กรัม และมีค่าความบริสุทธิ์เท่ากับ
88.49±0.18% ในทางอุตสาหกรรมการสกัดแยกกลีเซอริน
จะคุ้มค่าเมื่อสามารถสกัดแยกได้ในปริมาณมากและมีค่า
ความบริสุทธิ์มากกว่า 80% ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือก
ปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ 10% โดยน้ำหนักของกลีเซอรินดิบ
และปริมาณกรดฟอสฟอริกที่ 16% โดยน้ำหนักของ
กลีเซอรินดิบ ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS GC-FID
และ Pycnometer เพื่อยืนยันค่าความบริสุทธิ์และ
หาค่าความหนาแน่น และสมบัติทางกายภาพของ
กลีเซอรินบริสุทธิ์ต่อไป

5.7 ผลการวิเคราะห์กลีเซอรินที่ได้ด้วยเครื่อง GC-MS GC-FID และ Pycnometer

หลังจากการวิเคราะห์กลีเซอรินที่แยกได้โดยใช้เครื่อง GC-MS GC-FID และ Pycnometer เพื่อหาค่าความบริสุทธิ์และสมบัติทางกายภาพ ผลการวิเคราะห์กลีเซอรินที่ได้จากการดซัลฟิวริก 10% โดยน้ำหนักของกลีเซอรินดิบ และกลีเซอรินที่ได้จากการดฟอสฟอริก 16% โดยน้ำหนักของกลีเซอรินดิบ แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์กลีเซอรินที่แยกได้ด้วยเครื่อง GC-MS GC-FID และ Pycnometer เพื่อหาค่าความบริสุทธิ์ และสมบัติทางกายภาพ

ปัจจัยที่วิเคราะห์	กรดซัลฟิวริก 10% โดย น้ำหนักของ กลีเซอรินดิบ	กรดฟอสฟอริก 16% โดย น้ำหนักของ กลีเซอรินดิบ
1.ลักษณะทางกายภาพ	ไม่มีสีและมี ความหนืด	ไม่มีสีและมี ความหนืด
2.ค่าความเป็นกรด-เบส	7.05 ± 0.02	6.98 ± 0.02
3.ความหนาแน่น (g/cm ³)	1.249 ± 0.02	1.238 ± 0.02
4. เปอร์เซ็นต์ของกลีเซอริน	89.7 ± 0.01	87.7 ± 0.01
5. เปอร์เซ็นต์ของน้ำ	7.8 ± 0.01	9.4 ± 0.01
6. เปอร์เซ็นต์ของสิ่งเจือปนอื่น ๆ	2.20 ± 0.02	2.60 ± 0.02

6. สรุปและอภิปรายผล

6.1 การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นของกลีเซอรินดิบจากกรรมอุณหารเรือ

กลีเซอรินดิบของกรรมอุณหารเรือเป็นกลีเซอรินดิบที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้ม มีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 8.72 ± 0.02 และมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำ และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์อยู่ที่ 40.2 ± 0.02 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกลีเซอรินทางการค้า พบว่ากลีเซอรินดิบดังกล่าวยังมีค่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ต่ำกว่าค่ามาตรฐานของกลีเซอรินทางการค้า

6.2 การศึกษาชนิดและความเข้มข้นของกรดที่มีผลต่อปริมาณ และเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของกลีเซอริน

ความเข้มข้นของกรดมีผลต่อปริมาณและความบริสุทธิ์ของกลีเซอริน หากกรดมีความเข้มข้นสูง ๆ จะทำให้ค่าความเป็นกรด-เบส มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางลดลงอย่างรวดเร็วกว่ากรดที่มีความเข้มข้นต่ำ ๆ ซึ่งค่าความเป็นกรด-เบสที่ใกล้เคียงกับ 2 จะทำให้มีปริมาณกลีเซอรินที่แยกชั้นออกมามาก ทั้งนี้จากการทดลองกรดซัลฟิวริกสามารถสกัดแยกกลีเซอรินบริสุทธิ์ได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับกรดชนิดอื่น ๆ ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ในขณะที่กรดฟอสฟอริกสามารถสกัดแยกกลีเซอรินได้ในปริมาณที่ใกล้เคียงกับการใช้กรดซัลฟิวริก ซึ่งมีค่าผลต่างกันเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้กรดฟอสฟอริกมีฤทธิ์การกัดกร่อนและกลืนรุนแรงน้อยกว่ากรดซัลฟิวริก จึงทำให้ความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานเกี่ยวกับกระบวนการผลิตมากยิ่งขึ้น ดังนั้นกรดฟอสฟอริกจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับภาคอุตสาหกรรมในการนำมาใช้ในกระบวนการสกัดแยกกลีเซอรินจากกลีเซอรินดิบ

6.3 การวิเคราะห์อัตราส่วนที่เหมาะสมในการสกัดแยกกลีเซอริน

การสกัดแยกกลีเซอรินจากกลีเซอรินดิบโดยใช้กรดซัลฟิวริก พบว่าที่ปริมาณกรด 10% ของน้ำหนักกลีเซอรินดิบ

มีความเหมาะสมมากที่สุด เพราะสามารถแยกกลีเซอรินได้ในปริมาณมากและมีเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์อยู่ที่ 89.7 ± 0.01 โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของกลีเซอรินเพิ่มขึ้นจากเดิม 49.5 ± 0.01 และมีค่า % recovery เท่ากับ 38.75 ส่วนการสกัดแยกกลีเซอรินจากกลีเซอรินดิบโดยใช้กรดฟอสฟอริก พบว่า ที่ปริมาณกรด 16% ของน้ำหนักกลีเซอรินดิบ มีความเหมาะสมมากที่สุด เพราะสามารถแยกกลีเซอรินได้ในปริมาณมากและมีเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์อยู่ที่ 87.7 ± 0.01 โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของกลีเซอรินเพิ่มขึ้นจากเดิม 47.5 ± 0.01 และมีค่า % recovery เท่ากับ 38.08 ซึ่งกลีเซอรินบริสุทธิ์ที่ได้จากทั้ง 2 กรณี ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด จึงสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในอุตสาหกรรมการผลิตสารทำความสะอาด สบู่ และอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ เป็นต้น

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงบประมาณจากกองทุนพัฒนาโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า (กทพ.ร.จปร.) ขอขอบคุณ ผศ.ดร.รจพรณ นิธิยุติศิลป์ อาจารย์วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ปรึกษางานวิจัย และน.อ.บพิท ทศเทพพิทักษ์ ผอ.โรงเรียนช่างกรรมอยู่ทหารเรือ ที่ให้คำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

8. บรรณานุกรม

- (1) B. Giuseppe et al., "Glycerol production and transformation." A critical review with particular emphasis on glycerol reforming reaction for producing hydrogen in conventional and membrane reactors Membrane, Vol. 7(2) pp.1-31, (2017).
- (2) K. Colombo et al., "Production of biodiesel from soybean oil and methanol, catalyzed by calcium oxide in a recycle reactor." South African Journal of Chemical Engineering, Vol. 28, pp. 19-25, (2019).
- (3) D.P. Fernando, M.D. Anabela, and A.A.C. Barros, "Purification of residual glycerol recovered from biodiesel production." South African Journal of Chemical

Engineering, Vol. 29, pp. 42-51, (2019).

- (4) บุญญภรณ์ วาณิชชาติ, "พลังงานทดแทนและความมั่นคงของประเทศ," วารสารเทคโนโลยีป้องกันประเทศ, ฉบับที่ 18, หน้า 30-35, (2558).
- (5) S.M. Oluwasegus et al., "Review of different purification techniques for crude glycerol from biodiesel production." Journal of Energy Research and Reviews, Vol. 2(1), pp. 1-6, (2018).
- (6) เกรียงไกร อัสวาศบันลือ และวรรณภรณ์ บรรจง, "การศึกษาการกลั่นเมทานอลจากกลีเซอรอลดิบซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมจากการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล," วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก, หน้า 44-49, ปีที่ 3(1), (2553).
- (7) E. Anzar et al, "Purification of crude glycerol from biodiesel by-product by adsorption using bentonite." Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry, Vol. 3(3), pp. 83-88, (2018).
- (8) W.N.R.W. Isahak et al., "Recovery and purification of crude glycerol from vegetable oil transesterification." Separation & Purification Reviews, Vol. 44(3), pp.250-267, (2014).
- (9) สุพะไชย จินดาภูมิกล และคณะ, "การทำกลีเซอรอลดิบให้บริสุทธิ์ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟี., วารสารผลงานวิชาการกรมวิทยาศาสตร์บริการ ปีที่ 4(4), หน้า 81-88, (2558).
- (10) สายฝน อ่อนทอง, "การศึกษามูลค่าเพิ่มของกลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล" ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (2557).
- (11) สุจิตรา พรหมเชื้อ, วิษณีย์ ออมทรัพย์สิน, เพ็ญศิริ จำรัสฉาย และวัชร ศรีรักษา, "การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตกลีเซอรอลบริสุทธิ์," สุราษฎร์ธานี : ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมัน สุราษฎร์ธานี, (2549).
- (12) M.R. Nanda, Z. Yuan, W. Qin, M.A. Poirier and X. Chunbao, "Purification of crude glycerol using acidification: Effects off acid types and product characterization." Austin Chemical Engineering, Vol. 1(1), pp. 1004-1010, (2014).
- (13) นพวรรณ ขันบุญพานิช, วัฒนา ปิ่นเสมอ และบุญมี บุญยผลนันท์, "การทำกลีเซอรินจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์," วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 19(1), หน้า 66-72, (2552).
- (14) สุจิตรา พรหมเชื้อ, วิษณีย์ ออมทรัพย์สิน, เพ็ญศิริ จำรัสฉาย และวัชร ศรีรักษา, "การศึกษาการผลิตกลีเซอรินบริสุทธิ์โดยวิธีการกลั่น," รายงานผลงานวิจัยและพัฒนาด้านพืชและเทคโนโลยีการเกษตร หน้า 239-240, (2551).

The Study of the Optimal Route for Waste Collection by Using Vehicle Routing Problem in Chulachomklao Royal Military Academy

Lieutenant Witchapon Pontuethanagoon^{1*}

¹*Department of Ordnance Engineering, Academic Division,*

Chulachomklao Royal Military Academy, Nakhon Nayok 26001, Thailand

Corresponding Author. E-mail : witchapon.po@crma.ac.th

(Received: March 24, 2023, Revised: June 23, 2023, Accepted: August 23, 2023)

Abstract : The waste problem in Chulachomklao Royal Military Academy has been increasing and affecting the environment, including the quality of personnel's lives. Waste disposal has become increasingly challenging due to changing consumption patterns, necessitating more energy. Presently, the Transportation Section of the Support Division in Chulachomklao Royal Military Academy is responsible for collecting solid waste from government offices and residences for disposal at the landfills managed by the Prommanee Sub-district Administration Organization in Nakhon Nayok Province. However, the support for waste trucks is insufficient in terms of equipment availability due to the limited number of waste trucks. Therefore, proper management of waste collection, particularly in terms of transportation planning is crucial. This research aims to solve these issues by applying a mathematical model for the Vehicle Routing Problem (VRP) and Heuristic Principles including the Cluster-First Route-Second method and the Sweep Heuristic method to find the most optimal waste collection route. Furthermore, a comparison with traditional transportation methods is conducted to identify the shortest route and provide guidelines for resource-efficient waste collection planning. The study concludes that the Cluster First Route Second+ VRP 2 Group method exhibits the shortest transportation distance, reducing the original 110.71 kilometers route to a total of 75.66 kilometers. This reduction in distance also leads to a decrease in transportation costs by 1,525.09 baht per week, equivalent to 31.66 percent of the original transportation costs.

Keywords: Optimal Route, Waste Collection, Vehicle Routing Problem, Mathematical Model, Heuristic Principles

1. Introduction

Presently, the situation of waste management and hazardous waste has been an environmental problem in Thai society for a long time due to the amount of solid waste has increased according to the population rate, economic growth and public consumption. Although there is management according to the National Solid Waste Management Master Plan (2016–2021) [1], it is still insufficient to handle the amount of solid waste that tends to increase every year.

In 2020, there was approximately 25.37 million tons of solid waste. When considering the overall situation of municipal solid waste management, it was found that 8.36 million tons of solid waste were sorted and reused. Related factors include: Many municipalities don't allow people to sort waste at municipal solid waste disposal sites due to fears of the spread of infection from rubbish dumping that may contain pathogens. The global economic crisis caused by the impact of the Coronavirus disease in 2019 has caused many antique shops to close down. As a result, the amount of municipal solid waste that was reused decreased, dividing into about 7.88 million tons of municipal solid waste that were improperly disposed and 9.13 million tons of municipal solid waste that were properly disposed [2].

The amount of hazardous waste generated by communities in Thailand in 2021 was 669,518 tons, most of which were scrap electrical and electronic products 435,187 tons or 65%. Hazardous waste from other communities such as

batteries, chemical containers and cans total 234,331 tons or 35%. Comparing the amount of hazardous waste from the community in the past year, it was found that the amount increased due to the local government organizations and the private sector setting up waste collection points in community areas and department stores for people to conveniently dump waste. An overview of the generation of hazardous waste in the community during the years 2014-2021 found that the amount of waste generation tends to increase continuously every year and has an average constant of 1.60% since 2019. As a result of the epidemic situation of the Coronavirus disease 2019, the consumption behavior of people in the country has changed with increasing demand for electrical appliances and electronic devices, more frequent replacement of equipment to keep up with modern technology, imported low-quality products that shorten product life and cause hazardous waste [3].

The situation with solid waste within the Royal Thai Army is facing the same problem as the rest of the country due to rising consumption and rapidly changing technology. An example of the problem of municipal waste management by local administrative organizations that affects the Army is the waste collection pond of the municipality of Nakhon Si Thammarat Province. There is a problem of overflowing waste that affects the health and environment of the community with polluted water draining into agricultural areas and water sources, causing sickness among the villagers in the area. Waste ponds have residues

in plants, local foods and aquatic animals used as food by villagers in the area, which directly affect the waste management of the 41st Military Circle [4].

The waste problem in Chulachomklao Royal Military Academy or CRMA has been continuously increasing. From the collected data, the average amount of solid waste is 6 tons per day. Disposing of solid waste is becoming increasingly difficult and energy-consuming but the support of garbage trucks is lacking due to the delivery rate. The number of garbage trucks is limited, so waste collection must be properly managed in terms of transportation planning, which is to bring solid waste collected from government offices and residences to the waste disposal site according to the amount of waste. The distance between waste collection points and the number of rounds of transportation affect waste collection within the CRMA as shown in Figure 1.

Based on this concept, the researcher studied the optimal route for waste collection using the Vehicle Routing Problem or VRP principle to propose a waste collection method that uses the resources of transportation equipment cost-effectively, reduces waste collection distance and is beneficial to the government for the next action plan.

2. Objectives

2.1 To study the waste collection route of the Chulachomklao Royal Military Academy.

2.2 To design the optimal route for waste collection in Chulachomklao Royal Military Academy.



Figure 1 A bird's-eye view of CRMA from Google Maps

3. Literature Review

3.1 Reduction and segregation of solid waste

The Pollution Control Department [5] explain that “solid waste” means unused items, paper scraps, fabric scraps, food scraps, product scraps, plastic bags, food containers, ash, manure, carcasses, anything else that is cleared from a street, market, animal feed, products left over from homes, shops, markets, establishments, workplaces, or any other place, etc. Therefore, in order to make the management of solid waste easier to implement, there should be a good plan and the types of solid waste can be divided into four categories as follows:

3.1.1 Recyclable waste: this type of waste will be no problem of contaminating organic waste. it will not smell and it will be easy to recycle by selling it to antique shops and entering the recycling industry to be processed into raw materials or new products such as glass, paper, plastic, metal and etc.

3.1.2 Compostable waste: this type of waste can be collected and used to make compost and biofertilizer. If combined with other types of waste, it will cause rottenness and it is essential that it be sorted out and handled properly such as vegetable scraps, fruit scraps, food scraps and etc.

3.1.3 Hazardous waste: this type of waste, when combined with general waste, will contaminate the soil, water, air and cause adverse effects on living organisms and the ecosystem. It must be properly disposed such as light bulbs, batteries and etc.

3.1.4 General waste: this type of waste is harmless and not worth recycling. After separating solid waste, responsible agencies will dispose of it further.

3.2 Definition of vehicle routing problem

T. Phannikul [6] defined VRP as the arrangement of routes for transporting goods from distribution centers to customers at various points to help support decision making for system users. It has a single distribution center and a loading capacity constraint model that considers the weight and volume of the cargo under the condition of vehicle capacity with the goal of achieving the shortest distance. Vehicle Routing Problem or VRP

is a transport and logistics problem that focuses on delivering on-demand goods to customers with a starting point and ending at a warehouse. The goal is to provide the shortest travel route and the lowest cost. Factors related to routing include:

3.2.1 Set of customers

Each customer is assigned to a different node and needs to receive or deliver different amounts of goods and additional time requirements may be set.

3.2.2 Vehicles

Trucks, ships, planes or transport arrangements that provide services to customers traveling between customers and warehouses with load limitations may be defined as the number of pieces of cargo or the maximum weight of cargo that can be carried per vehicle.

3.2.3 Depots

All warehouses, manufacturing plants or distribution centers are locations that are defined as starting and ending points in a journey. Every vehicle must travel from this point to serve the customer to various points and return to the same point. The complex problems may require many warehouses to serve many groups of customers.

3.2.4 Routes

Assigning any vehicle to travel to different points or any customer and how to travel in an order that consists of sub-paths or multiple paths.

3.3 Find solutions for vehicle routing problem

P. Chunchaiphak [7] studied methods for finding answers to VRP. Finding results or solving problems has two goals. First of all, the quality of the answers can be guaranteed by providing the most optimal answer, specifying the scope of the quality of the answer, and finally by guaranteeing the timing or speed of finding the answer. The way to find the answer is as follows:

3.3.1 Optimization

VRP is a discrete decision problem or an integer programming problem because the answer is only 0 or 1, i.e., the vehicle will travel ($X = 1$) or not travel ($X = 0$). The method for determining which option is the best answer (optimal solution) is sequencing. The sequencing method involves substituting all the variables to make possible alternatives. After that, the answers are compared to choose the best answer, which is called complete enumeration. It takes a long time to find the answer to a large problem and there is almost no answer so this method is not popular.

How to find the best solution to discrete decision problems. There are many techniques for solving problems, such as the Branch and Bound method, Calculation method using the LINGO program and the CPLEX program and etc. There are also several other methods as mentioned above. The Vehicle Routing Problems (VRP) are categorized as NP-hard problems and the answers are numerous. When considering how to find the best answer (optimal solution) in a limited time, it's not suitable for solving

problems. Therefore, there are ways to find an answer that provides a value close to the best answer (a near-optimal solution) using Heuristic and Metaheuristic.

3.3.2 Heuristic methods

Heuristic comes from the Greek word "Heurisko" or "Heuriskein" meaning discovery. It was invented to solve specific problems. Heuristic methods are neither arbitrary nor fixed. The answer may or may not be the best answer, but it is acceptable and involves quick calculations, such as the Saving Heuristic, Nearest Neighbor, Sweep Heuristic, Cluster-First Route-Second, and etc.

3.3.3 Metaheuristic method

This method is commonly used to solve non-polynomial problems such as production scheduling and VRP, similar to heuristic methods. Because of the broader concept of finding a solution, it can be applied to a wider range of decision-making problems than heuristic methods. The popular metaheuristic methods used to find answers such as Genetic Algorithms, Ant Colony, Tabu Search, Local Search and etc.

3.3.4 Neighborhood Solution Method

Answer improvements from default answer generation to a better answer and bring the answer closer to the best answer, such as Swap, Two-opt, Exchange Heuristic, One Move Heuristic and etc.

3.4 Related Research

P. Chunchaiphak [7] applied Heuristics to route school bus for students. There are a total of 1,137 pick-up and transfer students per day who need to be transferred at 39 transfer points. The first step is dividing all transfer points into groups based on their degree. Then, all four heuristic methods, including the Nearest Neighbor heuristic, Clarke-Wright Saving heuristic, Sweep Heuristic, and Farthest-Nearest Neighbor heuristic, were applied. Three types of vehicles were determined: a pick-up, a six-wheel truck, and a bus. The capacity for each vehicle was determined based on the number of seats. The results showed that using the Clarke-Wright Saving heuristic with a bus yielded the shortest distances at 733 kilometers per round and incurred a fuel cost of 206,283 baht per month. When compared with the original cost, it was reduced by 134,817 baht per month.

P. Phanphiphat and P. Khemavuk [8] studied the route of trucks to reduce the distance in Multiple Depot VRP transportation. The research determines the locations of 12 factories, ports and transported by one truck. Then it compares the traditional transportation routing with the heuristic method by using the Nearest Neighbor Method and the applied Saving Algorithm. The results of the study concluded that the Nearest Neighbor Method has the shortest transport distance. The original transportation route is 4,118 km long, with 40.79% of the proportion without cargo in the vehicle. The Nearest Neighbor Method route has a total transportation distance is 3,722.9 km with 34.50 % of the proportion without cargo in the vehicle. Moreover,

the applied Saving Algorithm method (four stages) has a total transportation distance is 4,008.1 km, with 39.16 % of the proportion without cargo in the vehicle.

P. Kabcome and T. Mouktonglang [9] presented a mathematical model to solve the vehicle routing problem with soft time windows (VRPSTW) and the distribution of products with multiple categories. In addition, they include multiple compartments and trips. Each compartment is dedicated to a single type of product. Each vehicle is allowed to have more than one trip, as long as it corresponds to the maximum distance allowed in a workday. Numerical results show the effectiveness of the model.

N. Rungrodchatchaval et al. [10] applied VRP to find a new route for waste collection to have the least distance by using the Savings Algorithm and Evolutionary Method in the Microsoft Excel Solver program by considering two cases as follows: Travel one route and two routes. The results show that the evaluation method provides the path with the least distance and has a more balanced workload than the current route and the route from the Savings Algorithm method.

J. Banthao et al. [11] proposed the application of a mathematical model for VRP to design routes, reduce costs and increase the efficiency of liquor shipments. Under the following conditions for transportation to 24 stores, four trucks were used, each with a loading capacity of 70% of the trucks. The trucks were divided into two large trucks with a loading capacity of 350 crates and two small trucks with a loading capacity of 210 crates. The results

of the experiment found that the new route was organized with a reduced distance of 143.41 kilometers or 19.83%, and the cost of travel decreased by 1,195.50 baht per week or 18.84%.

4. Research Methodology

The methodology steps as shown in Figure 2.

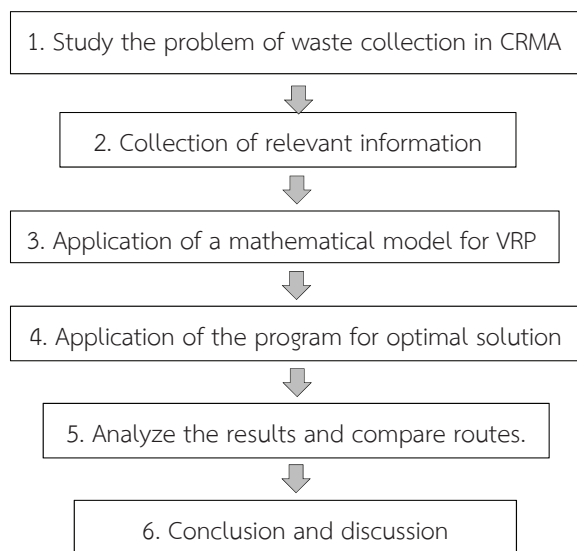


Figure 2 Research Process

4.1 Study the problem of waste collection in CRMA

The transport section of the CRMA general support division operates waste trucks to collect waste on a Monday-Friday cycle. The division of waste collection points at government offices and residences totals 45 locations with the amount of waste 128.2 tons. Then disposed in landfills managed by the Prommanee Sub-district Administration Organization of Nakhon Nayok Province, which has a total distance of 110.71 kilometers. Traditional waste collection

routes create unnecessary distances. From the problems, the researcher uses the transportation limitation factor for designing the waste collection route to find the most optimal route and reduce transportation cost.

4.2 Collection of relevant information

4.2.1 The Depot is located at the waste truck stop of the CRMA General Support Division's Transport section, as shown in Figure 3.

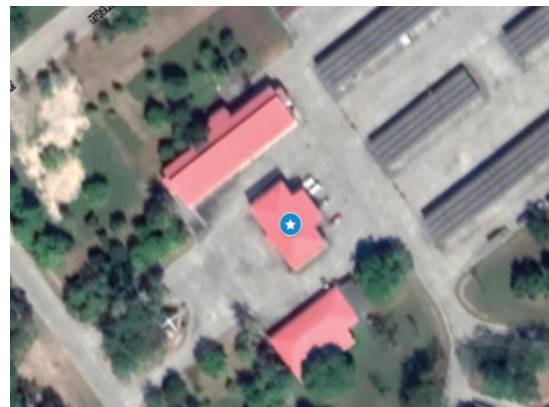


Figure 3 Waste Truck Depot

4.2.2 Set of customers is defined as waste collection points at 45 government offices and residences as shown in Figure 4.

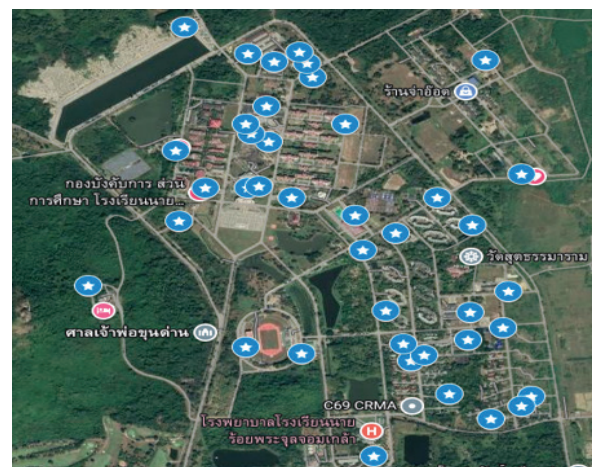


Figure 4 Waste Collection Points

4.2.3 Coordinates of government offices and residences using geographic coordinates from Google Maps are latitude and longitude as shown in Table 1.

Table 1 Coordinates of 45 Waste Collection Points

Code	Waste Collection Points	Latitude	Longitude
A1	CRMA Transportation Section Headquarters	14.3060	101.1665
A2	CRMA General Support Division Headquarters	14.3056	101.1675
...	...	...	...
A44	CRMA Club	14.2788	101.1633
A45	Landfills Prommanee Sub-district Organization	14.2118	101.1435

4.2.4 Determine the distance of government offices and residences from Google Maps as shown in Table 2 and Figure 5.

Table 2 Distance of government offices and residences

Distance (km)	A1	A2	...	A44	A45
A1	0	0.11	...	3.2	11.3
A2	0.11	0	...	3	11.1
...			...		
A44	3.2	3	...	0	8.1
A45	11.3	11.1	...	8.1	0

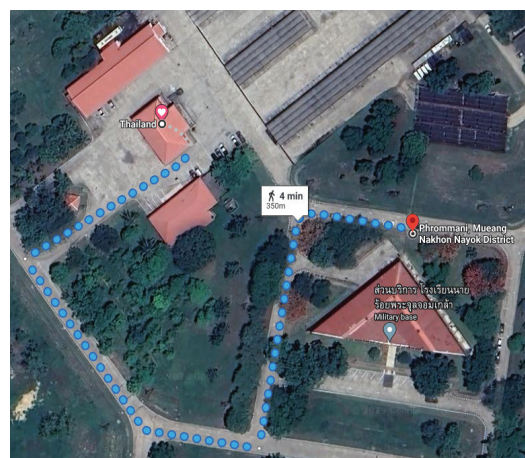


Figure 5 Distance between A1-A2 from Google Maps

4.2.5 The quantity of waste collection units is assigned based on the equivalence that 100 liters of trash is equal to one unit as shown in Table 3.

Table 3 The quantity of waste collection units

Code	Waste Collection Points	Quantity of waste collection units		
		100	200	Total
		(liters)	(liters)	(Unit)
A1	CRMA Transportation Section Headquarters	12X1	3X2	18
A2	CRMA General Support Division Headquarters	8X1	0	8
...	...	...	...	...
A44	CRMA Club	0	6X1	6
A45	Landfills Prommanee Sub-district Organization	0	0	0

4.2.6 Loading restrictions include the type of waste truck and loading capacity in liters and units as shown in Table 4 and Figure 6.

Table 4 Loading restrictions of the waste truck

Type	Loading Capacity (liters)	Loading Capacity (Unit)
Compacted Waste Truck	30,000	300

**Figure 6** HINO Waste Truck Model MNKFG8JJ1XHX

4.3 Application of a mathematical model for VRP

This research considers the application of a mathematical model for the Vehicle Routing Problem or VRP [11]. The variables are defined as follows.

Index

i, j are the transport section, government offices and residences where i or j ; $i, j = 1, \dots, 45$.

k is a compacted waste truck where $k = 1$.

p is the start and end of any i or j point.

Parameter

D_{ij} is the travel distance from point i to j .

a_k is the load of a truck equal to 300 units.

q_i is the amount of waste collection units in terms of any point i or j .

Decision Variable

X_{ij}^k is 1 when vehicle k travels from location i to j , and 0 when it has not traveled.

U_i^k is the decision variable for eliminating the route of incomplete laps or sub tours.

Y_i^k is 1 when point i is traveled by vehicle k and 0 when it has not traveled.

Objective Function

$$\text{Minimize} = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N D_{ij} X_{ij}^k \quad (1)$$

where equation (1) is the minimum distance traveled from point i to point j by vehicle k .

Constraints Function

$$\sum_{j=1}^N X_{1j}^k \geq 1 \quad (2)$$

where Equation (2) states that truck $k = 1$ will leave from transport section $i = 1$ and travel to at least one government office j .

$$\sum_{i=0}^N X_{ip}^k - \sum_{j=0}^N X_{pj}^k = 0 \quad (3)$$

Where Equation (3) states that government offices will travel in and out equally.

$$\sum_{k=1}^K Y_i^k = 1 \quad (4)$$

Where Equation (4) states that government offices will be traveled by truck equal to 1 vehicle.

$$\sum_{i=1}^N q_i Y_i^k \leq a_k \quad (5)$$

Where Equation (5) states that the truck will not carry more than its capacity.

$$Y_i^k \leq \sum_{j=0}^N X_{ji}^k \quad (6)$$

where Equation (6) states that point i can only be reached if vehicle k travels through point i from any path of point j .

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^N X_{ij}^k \geq 1 \quad (7)$$

where Equation (7) states that point j will be traveled by truck at least once through the route from point i .

$$\forall X_{ij}^k \in \{0,1\} \quad (8)$$

where equation (8) is the conditional equation showing that all variables X can be either 0 or 1.

Equation Prevents Sub-Tour

$$[(U_i^k \geq U_j^k) + (q_i - a_k) + (a_k \times (X_{ij}^k + X_{ji}^k)) - X_{ij}^k (q_i + q_j)] \quad (9)$$

$$U_i^k \leq a_k + (a_k - X_{0i}^k (a_k - q_i)) \quad (10)$$

$$U_i^k \leq q_i + \sum_{j=1}^N q_j X_{ji}^k \quad (11)$$

where equations (9) to (11) are substitutions of the variables to obtain possible solutions and prevent the occurrence of Sub-Tour.

4.4 Application of the program for optimal solution

4.4.1 Change the mathematical equations and constraint equations according to Section 4.3 into the form of a program for solving the best value problem.

4.4.2 Check the format of the program for the best value solution.

4.4.3 Apply the distance by designing the route and 45 Waste Collection Points must be traveled.

5. Result and Discussion

5.1 Analysis of Waste Collection Route Results with VRP Mathematical Model Method.

In problem solving with a VRP Mathematical Model Method for 45 Waste Collection Points. The program for optimal solution takes more than 24 hours to calculate. The researcher stopped calculating the program at 26 hours to determine the reason for the long computation of the program. The information obtained is as follows: the route was 53.68 kilometers with a calculated time of 26 hours. There are a total of 6 transport routes and 1,282 waste collection units as shown in Table 5.

According to the data from Table 5, the 2nd Route has two waste collection points and three waste collection units. In contrast, the 4th Route has 14 waste collection points and 290 waste collection units. These results exhibit significant differences. However, utilizing this approach on the actual route might result in unnecessary distance and increased transit time.

Table 5 Route Order of VRP Mathematical Model

Route No.	Route Order	Distance (km)	Load (Unit)
1	A1-A2,A2-A35,A35-A32, A32-A33,A33-A34,A34-A36,A36-A37,A37-A41, A41-A42,A42-A38 & A38-A1	10.01	300
2	A1-A3 & A3-A1	0.9	3
3	A1-A6,A6-A5,A5-A4, A4-A31,A31-A30,A30-A27, A27-A29,A29-A28,A28-A13, A13-A12,A12-A17& A17-A1	6.16	273
4	A1-A8,A8-A9,A9-A10, A10-A14,A14-A15,A15-A26, A26-A25,A25-A24,A24-A45, A45-A44,A44-A20,A20-A21, A21-A19 & A19-A1	28.16	290
5	A1-A11,A11-A7 & A7-A1	1.9	136
6	A1-A16,A16-A18,A18-A22, A22-A23,A23-A40,A40-A39, A39-A43 & A43-A1	6.55	280
Total		53.68	1,282

5.2 The observations in the relevant research studies in Section 3.4

After examining the index values and parameters of equations in J. Banthao [11] research, it is evident that the application of the VRP Mathematical Model is more suitable for a sample consisting of a smaller number of delivery points. This finding supports the theory that Optimization is an NP-Hard problem, necessitating significant

time and yielding multiple solutions that can't be feasibly computed within a limited timeframe. To obtain a solution that is both close to optimal and acceptable within a shorter calculation time, Heuristic Methods are employed. These methods enable rapid computations. The VRP model offers valuable insights into the group of government buildings with the highest waste volume, which is crucial for the heuristic method as shown in Table 6.

Table 6 The highest amount of waste point in CRMA

Code	Waste Collection Points	Load (Unit)
A11	Student Battalion 1–4	110
A25	Flat Kor.1–Kor.12	144
A30-31	Residence and PX of the CRMA Infantry Battalion	120
A41	Residence C (Academic Division)	144

Based on the information presented in Table 6, the four waste collection points with the highest amount of waste are Student Battalion 1–4, Flat Kor.1–Kor.12, Residence and PX of the CRMA Infantry Battalion and Residence C (Academic Division). These four waste collection points are marked with red stars, while other waste collection points are represented by blue circles as shown in Figure 7.

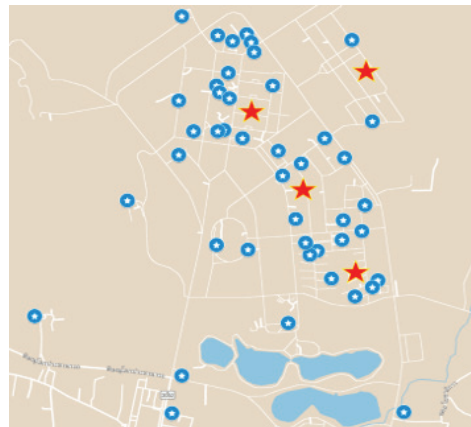


Figure 7 The highest amount of waste in CRMA

5.3 Analysis of Waste Collection Route Results with Heuristic Method.

In the research conducted by P. Chunchaiphak [7], various heuristic methods were studied for path finding. The researcher specifically selected the Cluster-First Route-Second and Sweep Heuristic methods to identify routes with the shortest distance.

5.3.1 Application of Cluster First Route Second+ VRP 2 Group and VRP 3 Group method.

The Cluster-First Route Second method involves finding routes by grouping waste collection points based on vehicle load capacity. Then design transportation routes within each group before moving on to other groups as shown in Figure 8.

5.3.1.1 Determined from the highest amount of waste point in CRMA in Table 6

5.3.1.2 Divide routes within the group into 2 groups using 2 vehicles. Then design the route with the VRP mathematical model.

5.3.1.3 Divide routes within the group into 3 groups using 3 vehicles. Then design the route with the VRP mathematical model.

5.3.1.4 Check the results and the distances.

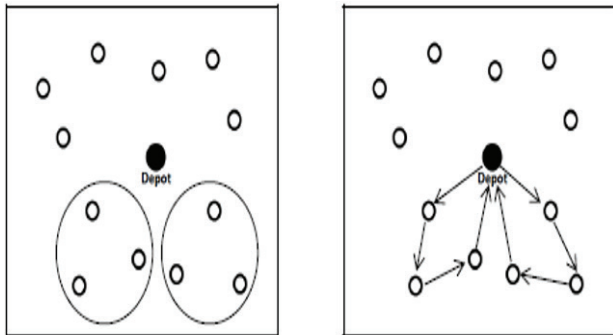


Figure 8 The Cluster-First Route-Second Method

5.3.2 Application of the Sweep Heuristic

The Sweep Heuristic method involves dividing waste collection points into groups by sweeping them either clockwise or counterclockwise. The division takes into account the number of waste collection units until the capacity of the vehicle is not exceeded. The vehicle then returns to the starting point and completes all loops. Transportation routes are then designed within each group before moving on to other groups as shown in Figure 9.

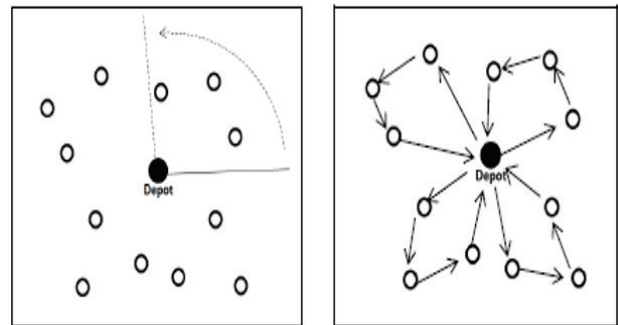


Figure 9 The Sweep Heuristic Method

5.4 Results of Designing Waste Collection Routes by Various methods

There are four methods of designing routes to optimize distance, which include:

5.4.1 Design a route with the VRP Mathematical Model Method using one vehicle. The number of routes is six, with a total distance of 53.68 kilometers and the amount of waste collected in units is 1,282.

5.4.2 Design a route with the Cluster First Route Second+ VRP 2 Group Method using two vehicles. The number of routes is five, with a total distance of 75.66 kilometers and the amount of waste collected in units is 1,282.

5.4.3 Design a route with the Cluster First Route Second+ VRP 3 Group method using three vehicles. The number of routes is five, with a total distance of 94.06 kilometers and the amount of waste collected in units is 1,282.

5.4.4 Design a route with the Sweep Heuristic Method using two vehicles. The number of routes is five, with a total distance of 110.81 kilometers and the amount of waste collected in units is 1,282. The results are shown in Table 7 and Figure 10.

Table 7 Routing Results in Various Methods

Method	Vehicles (cars)	Path (routes)	Distance (km)	Load (Unit)
Present	2	5	110.71	1,282
VRP	1	6	53.68	1,282
Cluster 1 st Route 2 nd + VRP 2G	2	5	75.66	1,282
Cluster 1 st Route 2 nd + VRP 3G	3	5	94.0	1,282
S w e e p Heuristic	2	5	110.81	1,282

From the data in Table 7 and Figure 10, The VRP Mathematical Model Method gives the shortest distance but can't be used because the set of customers or 45 waste collection points in CRMA would provide multiple answers and take longer to calculate as the amount of variables increases. The distance and route information obtained from the calculation of 26 hours of the program is still not the optimal answer. The researcher has applied the Heuristic Method to help find the answer. The route applied to waste collection is a route design with Heuristic Method, Cluster First Route Second+ VRP 2 Group using 2 vehicles that provides an answer close to optimal so that route design can be practical and acceptable as shown in Figure 11.

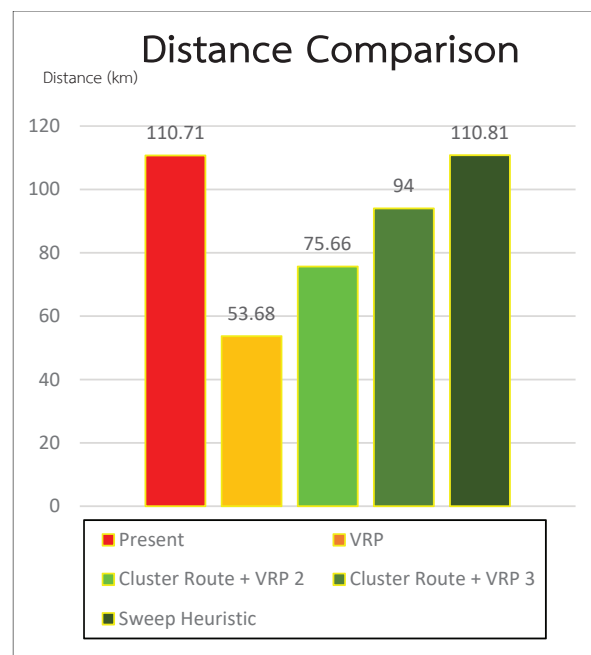


Figure 10 Comparing Distances in Various Methods

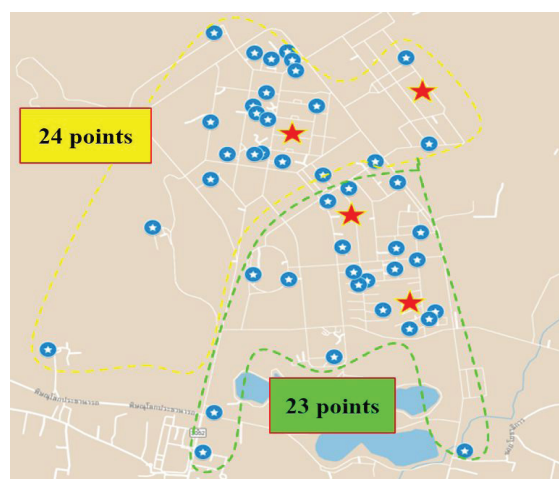


Figure 11 The Cluster First Route Second + VRP 2 Group Method

Based on Figure 11, a comparison of the current transportation distance reveals that there are two vehicles, five routes, and a total distance of 110.71 kilometers. To optimize the route design,

adjustments were made using the Cluster First Route Second + VRP 2 Group approach, while utilizing the same vehicle. The waste collection process was divided into two groups: the 1st truck was assigned to collect waste from 24 government offices, and the 2nd truck was assigned to collect waste from 23 residential groups. This division resulted in a reduction of 35.05 kilometers or 31.66 percent of the original distance. The results are presented in Figure 12.

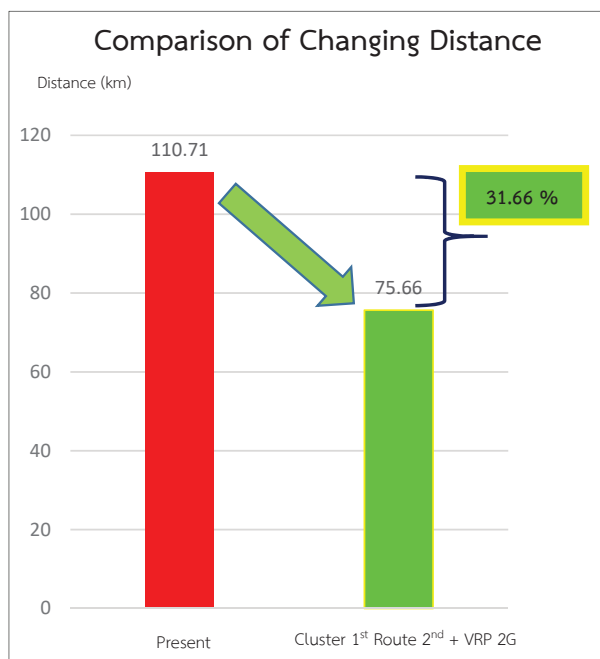


Figure 12 Comparison of changing distances

5.5 Results of Cost Analysis

Cost considerations demonstrate that route design enables transport departments to reduce transportation costs. Currently, the fuel consumption rate of waste truck is 0.803 km/liter in one week and the diesel price of Dec 2022 [12] is 34.94 baht/liter. The comparison cost as shown in Table 8.

Table 8 Comparison of the transportation cost

Method	Distance (km)	Fuel Rate (km/liter)	Fuel Used (liter)	Cost (Baht)
Present	110.71	0.803	137.87	4,817.19
Cluster 1 st Route 2 nd + VRP 2G	75.66	0.803	94.22	3,292.11

Based on the cost analysis, it was determined that the initial transportation cost amounted to 4,817.19 baht. However, after implementing the waste collection route design, the cost decreased to 3,292.11 baht or 1,525.09 baht per week.

6. Conclusion and Recommendation

6.1 Conclusion

From the study, the researcher made observations regarding the application of the VRP mathematical model for the optimization method. It was found that when the number of waste collection points or customer sets exceeds 30 points, the optimization program takes a significant amount of time to compute and fails to provide a solution within a day. Possible answers increase based on the waste collection point, so the optimization method is suitable for research where transport point variables are relatively low. Therefore, it can be calculated quickly with the optimal program such as the research of P. Kabcome and T. Mouktonglang [9] and J. Banthao [11]. In academic research, heuristic methods are commonly favored for designing and solving

route problems, as they are not restricted by limitations on transportation points. The solutions generated by these methods are often in close proximity to the optimal and widely accepted answers, as evidenced by the works of P. Chunchaiphak [7], P. Phanphiphat and P. Khemavuk [8] and N. Rungrodchatchaval [10].

Based on the data obtained from the research and the facts presented in the CRMA case study, the researcher opted to employ the heuristic method known as the Cluster-First Route-Second Method. This approach involved segmenting the route prior to designing the route using the VRP mathematical model. The objective was to reduce the number of variables associated with waste collection points, which originally totaled 45 waste collection points. The transportation was divided into two groups, comprising 24 government offices and 23 residential waste collection points, and utilized two waste collection trucks. Following the segmentation of the route, wherein the number of waste collection points didn't exceed 30, the transportation problem was transformed into the VRP mathematical model. The results obtained from the optimized program showcased reduced computation time compared to the previous approach. Additionally, the route model derived from this method proved effective in enhancing waste collection truck operations and minimizing unnecessary mileage.

Summarize the results of the study by applying the VRP mathematical model together with the heuristic methods, the Cluster First

Route Second+ VRP 2 Group yields distance results that are consistent with the research objectives of the study and provide a suitable route model for this case study. The route model can reduce the transportation distance from 110.71 kilometers to 75.66 kilometers and reduce the transportation cost by 1,525.09 baht per week or 31.66 percent of the original transportation cost.

6.2 Recommendation

6.2.1 The application of the VRP mathematical model for the optimization method and heuristic methods should consider the factors of each case study because there are different limitations such as the number of transportation points, quantity of demand, number of vehicles and load capacity and etc.

6.2.2 This study solves the basic waste collection problem to help make waste collection more convenient and save resources. Further research is required to investigate variables such as travel time, more distribution points or multiple Depots and transit points with uncertainty.

6.2.3 The researcher utilized Google Maps to compute the travel distance, although there is a possibility of the route deviating from the actual transportation conditions. The route application should be adjusted based on the travel itinerary.

7. Acknowledgements

The researcher would like to thank the commanders and personnel of CRMA transportation section for collecting data research and operation. Thanks to all the experts who provided advice to complete this research article. Finally, the researcher hopes that this research article will be useful to the Royal Thai Army as well as government agencies and be a guideline for further researchers.

8. References

- (1) Pollution Control Department, "National Solid Waste Management Master Plan (2016–2021)," Bangkok: Ministry of Natural Resources and Environment, (2016).
- (2) Pollution Control Department, "Thailand State of Pollution Report 2022," Bangkok: Ministry of Natural Resources and Environment, pp.101-103, (2021).
- (3) Waste and Hazardous Substances Management Bureau. "The state of hazardous waste from the community Report 2021," Bangkok: Ministry of Natural Resources and Environment, pp.3-4, (2022).
- (4) P.Apiwantragoon, "Effective Waste Management for the Royal Thai Army," Personal Research, Army War College, Army Training Command, Bangkok, (2017).
- (5) Pollution Control Department, "A guide to reducing and separating solid waste in the home and workplace," Bangkok: Ministry of Natural Resources and Environment, pp. 4-10, (2021).
- (6) T.Phannikul, et al., "Cost Reduction of Vehicle Routing Problem with Mathematical Model Case Study : UbonAqarist Factory, Ubon ratchathani," Operations Research Network 2011 Conference, pp.60-64 (2011),
- (7) P.Chunchaiphak, "School Bus Routing: A Case Study of Prasitsuksasongkroh School," M.Eng. dissertation (Industrial Engineering), Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, 2018.
- (8) P.Phanphiphat and P.Khemavuk, "Vehicle Routing Arrangement Of Heavy Trucks For Bulk And Sack Products: A Case Study of Transportation Company," KasemBundit Engineering Journal, Vol.9 No.1, pp.136-157, (2019).
- (9) P.Kabcome and T.Mouktonglang, "Vehicle Routing Problem for Multiple Product Types, Compartments, and Trips with Soft Time Windows," International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences, pp.1-9, (2015).
- (10) N.Rungrodchatchaval, et al., "Application of Vehicle Routing Problem for Solid Waste Collection: A Case Study Prince of Songkla University, Hatyai Campus," Thai Journal of Operations Research, Vol.4 No.2, pp.18-31, (2016).
- (11) J.Banthao, et al., "Optimizing the Transportation of Liquor Products by Considering the Load of the Vehicle," The Conference of Industrial Engineering Network (IE Network), pp.670-675, (2021).
- (12) PTT Oil and Retail Business Public Company Limited. Petrol Retail prices in the Bangkok and Metropolitan Region. (2022). (Online). Accessed: Dec.4, 2022. Available: <https://www.pttor.com>.

การศึกษาเปรียบเทียบค่ากำลังของวัตถุระเบิดแรงสูง
จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายและค่าจากการทดลอง
A Comparative Study of High Explosive Power by a Simple
Thermochemistry Calculation and Experimental Values

พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืองศักดิ์ อยู่ชา^{1*}
Colonel Assistant Professor Ruangsak Yucha^{1*}
พันตรี ดร. ฐิติพงษ์ กาวิชัย²
Major Dr. Thitipong Kawichai²

¹กองวิชาเคมี ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
นครนายก 26001 ประเทศไทย

¹Department of Chemistry, Academic Division, Chulachomklao royal military academy,
NakhonNayok 26001, Thailand

²กองวิชาคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์ ส่วนการศึกษา
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า นครนายก 26001 ประเทศไทย

²Department of Mathematics and Computer Science, Academic Division,
Chulachomklao royal military academy, Nakhon Nayok 26001, Thailand

*Corresponding Author. E-mail : ruangsak.yu@crma.ac.th

(Received: August 8, 2023, Revised: October 2, 2023, Accepted: October 20, 2023)

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาค่ากำลังของวัตถุระเบิดแรงสูงที่มีการใช้งานทางทหารและทางพลเรือนจำนวน 18 ชนิด จากการคำนวณโดยใช้หลักการทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายเปรียบเทียบกับค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการทดลองโดยใช้วิธี Trauzl Lead Block Test พบว่าค่ากำลังของวัตถุระเบิดทั้ง 18 ชนิด ที่คำนวณโดยใช้หลักการทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่หาโดยวิธี Trauzl Lead Block Test นอกจากนี้จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมมูลออกซิเจนกับค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่หาได้ทั้งจากการคำนวณโดยใช้หลักการทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายและจากการทดลองโดยวิธี Trauzl Lead Block Test พบว่าวัตถุระเบิดที่มีค่าสมมูลออกซิเจนเข้าใกล้ศูนย์จะเป็นวัตถุระเบิดที่มีค่ากำลังของวัตถุระเบิดมากกว่าวัตถุระเบิดที่มีค่าสมมูลออกซิเจนเป็นค่าบวกหรือค่าติดลบมาก ๆ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำไปใช้อธิบายการออกแบบวัตถุระเบิดผสมชนิด Ammonium Nitrate Fuel Oil (ANFO) ที่นิยมใช้อัตราส่วนผสมระหว่างแอมโมเนียมไนเตรท 94% ต่อน้ำมันเชื้อเพลิง 6% ได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ : เทอร์โมเคมีของวัตถุระเบิด สมมูลออกซิเจน กำลังวัตถุระเบิด

Abstract : This research aims to study the power of 18 types of high explosives in military and civilian uses. The comparison result showed that the values of explosive power calculated by the simple thermochemical principle and the ones determined from the experimental method by Trauzl Lead Block Test were close. In addition, the study of relationship between the oxygen balance and the values of explosive power, either from simple thermochemical calculation or from experimental method by Trauzl Lead Block Test, revealed that the explosives with near-zero oxygen balance have much higher power than the ones with positive or negative oxygen balance. This result can be a good explanation for the design of Ammonium Nitrate Fuel Oil (ANFO) mixed explosives, which often have a mixture ratio of 94% ammonium nitrate to 6% fuel oil.

Keyword : Thermochemistry of Explosive, Oxygen Balance, Power of Explosive

1. บทนำ

ปัจจุบันการศึกษาทางด้านเทอร์โมเคมี (Thermochemistry) ของวัตถุระเบิดยังไม่เป็นที่แพร่หลายในประเทศไทยมากนัก อย่างไรก็ตามการศึกษาทางด้านเทอร์โมเคมีของวัตถุระเบิดมีประโยชน์อย่างมากในการนำวัตถุระเบิดไปใช้งานให้เหมาะสมกับชนิดของงาน [1], [2], [3] เนื่องจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีทำให้ทราบคุณสมบัติของวัตถุระเบิดเบื้องต้น ได้แก่ ความร้อนจากการระเบิด (Heat of Explosion, Q) ปริมาตรของแก๊สจากการระเบิด (Volume of Gaseous Product from Explosion, V) และ กำลังของวัตถุระเบิด (Explosive Power, EP) ซึ่งค่าที่คำนวณได้จากหลักการทางเทอร์โมเคมีที่สำคัญคือค่ากำลังของวัตถุระเบิด เนื่องจากสามารถนำไปประมาณการหาค่าอำนาจการฉีกขาดของวัตถุระเบิดได้หากทราบค่าอัตราเร็วในการสลายตัวของวัตถุระเบิด โดยทั่วไปค่ากำลังของวัตถุระเบิดสามารถทำการทดลองหาได้โดยใช้วิธีการตรวจสอบที่เรียกว่า Trauzl Lead Block Test และ Ballistic Mortar Test [4], [5] อย่างไรก็ตามวิธี Trauzl Lead Block Test เป็นวิธีพื้นฐานสำหรับการหาค่ากำลังของวัตถุระเบิดและเป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง [5] รวมทั้งได้มีการรวบรวมผลการทดสอบไว้ในเอกสาร [6], [7]

การทดสอบวัตถุระเบิดนั้นไม่สามารถใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดอ่อนได้ ทำให้ไม่สามารถทราบผลการทดลองที่แน่นอนได้ นอกจากนี้การทดสอบคุณสมบัติของวัตถุระเบิดในทางปฏิบัติไม่เหมาะที่จะทำการทดลองหรือทดสอบด้วยวิธีการใดก็ตามจะนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับวัตถุระเบิดมาตรฐาน โดยวัตถุระเบิดไตรไนโตรโทลูอีน (Trinitrotoluene, TNT) ถูกกำหนดให้เป็นวัตถุระเบิดมาตรฐานของกองทัพอเมริกา ค่าที่วัดได้จากสมบัติของวัตถุระเบิดมักรายงานเป็นเปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบกับวัตถุระเบิดไตรไนโตรโทลูอีน นอกจากนี้การทดลองที่เกี่ยวข้องกับวัตถุระเบิดจำเป็นต้องใช้ความระมัดระวังเป็นอย่างมาก เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการทำทดลอง ดังนั้นการประมาณการค่าสมบัติทางวัตถุระเบิด

เบื้องต้นโดยใช้หลักการทางเทอร์โมเคมีจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการประมาณค่าคุณสมบัติของวัตถุระเบิดเบื้องต้น จากการศึกษาทางด้านเทอร์โมเคมีของวัตถุระเบิดที่ผ่านมาวิธีประมาณค่ากำลังของวัตถุระเบิดหลายวิธี [6], [8], [9], [10], [11] ตัวอย่างงานวิจัยของ M.H. Keshavarz และ F. Seif [9] ได้ทำการหาค่ากำลังของวัตถุระเบิดเปรียบเทียบกับกำลังของวัตถุระเบิดไตรไนโตรโทลูอีน (EP (%TNT)) สำหรับโมเลกุลของวัตถุระเบิดที่มีสูตรเป็น $C_aH_bN_cO_d$ โดยใช้สมการที่ 1

$$EP(\%TNT) = 113 - 5.16 \times CEC - 46.18 \times OCF \quad (1)$$

$$\text{เมื่อ } CEC = a - 0.54 \times c - 0.70 \times d$$

$$\text{และ } OCF = 0.7 \text{ เมื่อ } d - \left(a + \frac{b}{2}\right) \geq 8$$

โดย a, b, c และ d หมายถึงจำนวนอะตอมของคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจนในสูตรโมเลกุลของวัตถุระเบิดตามลำดับ

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาค่ากำลังของวัตถุระเบิดแรงสูง 18 ชนิด โดยใช้เทอร์โมเคมีอย่างง่ายซึ่งเป็นวิธีที่สามารถคำนวณหาค่ากำลังของวัตถุระเบิดได้โดยง่ายและเปรียบเทียบกับกำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการทดลองโดยวิธี Trauzl Lead Block Test ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาเปรียบเทียบค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จาก 2 วิธีดังกล่าว นอกจากนี้ยังศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมดุลออกซิเจน (Oxygen Balance, OB) ของวัตถุระเบิดกับกำลังของวัตถุระเบิดที่หาจากทั้งสองวิธี หลังจากนั้นจะนำวิธีการประมาณค่ากำลังของวัตถุระเบิดโดยใช้เทอร์โมเคมีอย่างง่ายอธิบายการออกแบบวัตถุระเบิดผสมชนิด Ammonium Nitrate Fuel Oil (ANFO) ซึ่งเป็นวัตถุระเบิดที่นิยมใช้ในงานพลเรือนด้านเหมือง งานก่อสร้าง รวมทั้งนิยมนำไปใช้เป็นวัตถุระเบิดแสงเครื่องอีกด้วย ซึ่งอัตราส่วนผสมของวัตถุระเบิดชนิด ANFO ที่

นิยมใช้อัตราส่วนผสมระหว่างแอมโมเนียมไนเตรท 94% ต่อน้ำมันเชื้อเพลิง 6% โดยน้ำหนัก [12], [13] ตามลำดับ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทอร์โมเคมีของวัตถุระเบิด (Thermochemistry of Explosive) เป็นเรื่องสำคัญสำหรับการศึกษาด้านเคมีวัตถุระเบิด โดยเทอร์โมเคมีของวัตถุระเบิดให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงพลังงาน กลไกและจลนศาสตร์ที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุระเบิดเกิดการระเบิดหรือเกิดการสลายตัว [2], [14]

ปฏิกิริยาการระเบิดของวัตถุระเบิดเริ่มขึ้นเมื่อโมเลกุลของวัตถุระเบิดได้รับการกระตุ้นจนแตกออกเป็นอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของโมเลกุลวัตถุระเบิด หลังจากนั้นอะตอมของธาตุที่แตกตัวออกจะรวมตัวกันอย่างรวดเร็วเป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่มีความเสถียร โดยทั่วไปโมเลกุลวัตถุระเบิดที่ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน (C) อะตอมออกซิเจน (O) อะตอมไฮโดรเจน (H) และอะตอมไนโตรเจน (N) เมื่อสลายตัวจะเปลี่ยนเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก ได้แก่ น้ำ (H_2O) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไนโตรเจน (N_2) และแก๊สออกซิเจน (O_2) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจะเป็นโมเลกุลชนิดใดขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนที่มีในขณะที่จะอะตอมของธาตุที่แตกตัวออกมาจากโมเลกุลวัตถุระเบิดรวมตัวเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการระเบิด สำหรับค่าตัวแปรที่สำคัญทางเทอร์โมเคมี ได้แก่ สมดุลออกซิเจน ความร้อนจากการระเบิด ปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิด และกำลังของวัตถุระเบิด [2], [14]

2.1 สมดุลออกซิเจน (Oxygen Balance)

สมดุลออกซิเจน (Oxygen Balance, OB) เป็นอัตราส่วนของปริมาณออกซิเจน (O) ที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุระเบิด กับปริมาณออกซิเจน (O) ที่ต้องการใช้เพื่อให้เชื้อเพลิงในวัตถุระเบิดเกิดออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์ โดยค่า OB จะแสดงปริมาณออกซิเจนที่ปลดปล่อยออกมาเมื่อวัตถุระเบิดเกิดออกซิเดชันสมบูรณ์ หรือปริมาณออกซิเจนที่วัตถุระเบิดต้องการเพื่อทำให้วัตถุระเบิดเกิดออกซิเดชันสมบูรณ์โดยคิดเทียบกับวัตถุระเบิดน้ำหนัก 100 กรัม

ดังนั้น ค่า OB จึงมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) ค่า OB ของวัตถุระเบิดแสดงให้เห็นว่า เมื่อวัตถุระเบิดชนิดนั้นเกิดการระเบิด ปริมาณออกซิเจน (O) ที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุระเบิดมีเพียงพอที่จะเข้าร่วมตัวกับธาตุอื่น ๆ ออกมาเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไอน้ำ (H_2O) หรือไม่ โดยถ้าค่า OB เป็นลบ แสดงว่าวัตถุระเบิดชนิดนั้นมีออกซิเจนในโมเลกุลไม่เพียงพอที่จะให้เชื้อเพลิงที่อยู่ในโมเลกุลของวัตถุระเบิดเกิดออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์ โดยวัตถุระเบิดที่มีสูตรโมเลกุลทั่วไปเป็น $C_aH_bN_cO_d$ จะสามารถหาค่า OB ของวัตถุระเบิดโดยใช้สมการที่ 2

$$OB = \frac{\left(d - 2a - \frac{b}{2}\right) \times 1600}{M} \quad (2)$$

เมื่อ a, b, c และ d หมายถึงจำนวนอะตอมของคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจนในสูตรโมเลกุลตามลำดับ และ M คือมวลโมเลกุลของวัตถุระเบิด [2], [3], [5], [14], [15], [16]

2.2 การสลายตัวของวัตถุระเบิด (Explosive Decomposition)

ในทางเทอร์โมเคมีของวัตถุระเบิดได้มีการพัฒนากฎเพื่อใช้ในการกำหนดปฏิกิริยาการสลายตัวของวัตถุระเบิดที่มีสูตรทั่วไปเป็น $C_aH_bN_cO_d$ โดยกฎดังกล่าวได้รับการพัฒนาโดย Kistiakowsky และ Wilson ซึ่งเรียกว่า K-W rules สำหรับวัตถุระเบิดที่มีค่า OB มากกว่า -40% และ Modified K-W rules สำหรับวัตถุระเบิดที่มีค่า OB น้อยกว่า -40% เงื่อนไขสำหรับการทำนายผลิตภัณฑ์จากการระเบิดตาม K-W rules และ Modified K-W rules แสดงดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ การทำนายผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการระเบิดของวัตถุระเบิดมีความสำคัญในการนำข้อมูลผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการระเบิดไปใช้ในการคำนวณความร้อนจากการระเบิด

ตารางที่ 1 เงื่อนไขแสดงผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจาก
การระเบิดตาม K-W rules [2], [14]

ขั้นที่	เงื่อนไขตาม K-W rules
1	อะตอมคาร์บอน (C) เปลี่ยนเป็นโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)
2	ถ้ามีอะตอมออกซิเจน (O) เหลือ อะตอมออกซิเจน (O) จะรวมกับอะตอมไฮโดรเจน (H) ได้เป็นโมเลกุลของไอน้ำ (H ₂ O)
3	ถ้ายังมีอะตอมออกซิเจน (O) เหลือ โมเลกุลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จะรวมตัวกับอะตอมออกซิเจน (O) ที่เหลือ ได้เป็นโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)
4	อะตอมไนโตรเจน (N) ทั้งหมดเปลี่ยนเป็นโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจน (N ₂)

ตารางที่ 2 เงื่อนไขแสดงผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจาก
การระเบิดตาม Modified K-W rules [2], [14]

ขั้นที่	เงื่อนไขตาม Modified K-W rules
1	อะตอมไฮโดรเจน (H) เปลี่ยนเป็นโมเลกุลของไอน้ำ (H ₂ O)
2	ถ้ามีอะตอมออกซิเจน (O) เหลืออยู่ อะตอมคาร์บอน (C) เปลี่ยนเป็นโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)
3	ถ้ายังมีอะตอมออกซิเจน (O) เหลืออยู่ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) รวมตัวกับอะตอมออกซิเจน (O) ได้เป็นโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)
4	อะตอมไนโตรเจน (N) ทั้งหมดเปลี่ยนเป็นโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจน (N ₂)

2.3 ความร้อนจากการระเบิด (Heat of Explosion)

เมื่อวัตถุระเบิดเกิดการระเบิดหรือสลายตัว พลังงานจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของความร้อน การปลดปล่อยความร้อนภายใต้สภาวะซึ่งไม่มีการได้หรือสูญเสียความร้อน (Adiabatic Conditions) เรียกว่า ความร้อนของการระเบิด ปฏิริยาการระเบิดของวัตถุระเบิดเริ่มขึ้นเมื่อโมเลกุลของวัตถุระเบิดได้รับพลังงานกระตุ้น หลังจากนั้นโมเลกุลของวัตถุระเบิดจะแตกออกเป็นอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของโมเลกุลวัตถุระเบิด หลังจากนั้นอะตอมของธาตุที่แตกตัวออกมาจะรวมตัวกันอย่างรวดเร็วเป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่มีความเสถียร ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีการคายพลังงานความร้อนออกมาตามหลักการของการเกิดสารประกอบทางเคมีจากอะตอมของธาตุ โดยผลต่างของพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวของอะตอมของธาตุแล้วเกิดเป็นสารประกอบกับพลังงานความร้อนที่ใช้ในการทำโมเลกุลของวัตถุระเบิดแตกออกเป็นอะตอมของธาตุคือความร้อนของการระเบิดนั่นเอง

ในการคำนวณความร้อนของการระเบิดของวัตถุระเบิด เริ่มจากการทำนายผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการสลายตัวของวัตถุระเบิด หลังจากนั้นคำนวณค่าความร้อนจากการระเบิดโดยใช้ค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการเกิด (Standard Enthalpies of Formation, ΔH_f^0) โดยค่า ΔH_f^0 หมายถึงการเปลี่ยนแปลงความร้อนจากการที่ทำให้ธาตุองค์ประกอบทำปฏิกิริยากันจนเกิดเป็นสารประกอบหนึ่งจำนวน 1 โมล ที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 atm โดยที่เครื่องหมายบวกหมายถึงพลังงานความร้อนผ่านเข้าไปในระบบ และเครื่องหมายลบหมายถึงพลังงานความร้อนออกจากระบบ ค่าความร้อนจากการระเบิดสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3

$$Q = \sum \Delta H_f^0 (\text{Products}) - \sum \Delta H_f^0 (\text{Reactants}) \quad (3)$$

เมื่อแทนค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการเกิดของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการระเบิดและเอนทัลปีมาตรฐานของการเกิดของวัตถุระเบิดจากเอกสารอ้างอิง [7]

ลงในสมการ 3 จะได้ค่าความร้อนของการระเบิด (Q) โดยทั่วไปค่าความร้อนจากการระเบิดจะมีหน่วยเป็น kJ/kg เพื่อให้่ายต่อการเปรียบเทียบค่าความร้อนที่ได้จากการระเบิดของวัตถุระเบิดแต่ละชนิด [2], [9], [11], [14]

สำหรับค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการเกิดของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการระเบิด ได้แก่ CO, CO₂ และ H₂O แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการเกิด CO, CO₂ และ H₂O [7]

สาร	เอนทัลปีมาตรฐานของการเกิด (ΔH_f^0 , kJ/mol)
CO	- 110.6
CO ₂	- 393.8
H ₂ O (g)	- 242.0

สำหรับธาตุที่มีอยู่ในสภาวะธรรมชาติที่สภาวะมาตรฐาน มีค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการเกิดเป็นศูนย์ ($\Delta H_f^0 = 0$) ได้แก่ C (s), O₂ (g), N₂ (g)

2.4 ปริมาตรของแก๊สที่เกิดจากการสลายตัวของวัตถุระเบิด (Volume of Gaseous Product from Explosion)

การระเบิดของวัตถุระเบิดแต่ละชนิด จะให้ปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิดไม่เท่ากัน ในการคำนวณปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิด (V) นั้น สามารถคำนวณได้จากผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สที่เกิดจากการสลายตัวของวัตถุระเบิด (Decomposition Product) ภายใต้ข้อกำหนดที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Temperature and Pressure, STP) อุณหภูมิ 0 °C หรือ 273 K และความดัน 1 บรรยากาศ ปริมาตรของแก๊สใด ๆ จำนวน 1 โมล มีค่าเท่ากับ 22.4 ลิตร เรียกว่า Molar Gas Volume [2], [14]

การคำนวณปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิดของวัตถุระเบิดแต่ละชนิดที่สภาวะมาตรฐานจะเทียบต่อมวลของวัตถุระเบิดชนิดนั้นปริมาณ 1 กรัม ดังนั้น ปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิดมีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เดซิเมตรต่อกรัม (dm³/g)

2.5 กำลังของวัตถุระเบิด (Explosive Power)

การคำนวณกำลังของวัตถุระเบิด (EP) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ (4) [2]

$$EP = Q \times V \quad (4)$$

โดยที่ Q คือ ความร้อนของการระเบิด (kJ/kg)

V คือ ปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิด (dm³/g)

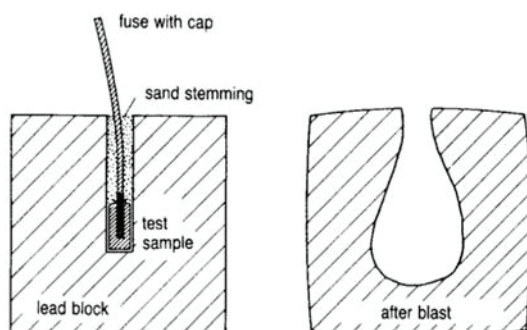
เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกำลังของวัตถุระเบิดชนิดต่าง ๆ ให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น กำลังของวัตถุระเบิดส่วนใหญ่จะแสดงอยู่ในรูปของการเปรียบเทียบกำลังของวัตถุระเบิดชนิดต่าง ๆ กับกำลังของวัตถุระเบิดมาตรฐาน สำหรับประเทศสหรัฐอเมริกา กำหนดให้วัตถุระเบิดมาตรฐาน คือ ทีเอ็นที (TNT) ดังนั้นกำลังของวัตถุระเบิดชนิดต่าง ๆ จะแสดงในรูปของ %TNT ซึ่งในทางทฤษฎีสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ (5) [10], [11]

$$EP (\%TNT) = \frac{Q_{\text{Explosive}} \times V_{\text{Explosive}}}{Q_{\text{TNT}} \times V_{\text{TNT}}} \times 100 \quad (5)$$

2.6 การหาค่ากำลังของวัตถุระเบิดจากการทดลอง

กำลังของวัตถุระเบิด คือพลังงานทั้งหมดที่สามารถทำงานได้ กำลังของวัตถุระเบิดมีความสัมพันธ์กับความร้อนที่เกิดขึ้นจากการระเบิด (Q) และแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิด (V) สำหรับวิธีการตรวจสอบเพื่อหากำลังของวัตถุระเบิดสามารถทำได้โดยใช้วิธีการทดสอบด้วยลูกตุ้มชิปนวิธี (Ballistic Mortar Test) วิธีนี้ทำโดยบรรจุวัตถุระเบิดที่ต้องการทดสอบกำลังลงในแท่งเหล็กทรงกระบอกที่แขวนอยู่ด้านล่างของคานแกว่ง และเมื่อทำการจุดระเบิด

วัตถุระเบิดที่ต้องการทดสอบ แรงระเบิดจะทำให้แท่งเหล็กทรงกระบอกแกว่งซึ่งสามารถวัดค่าการแกว่งเป็นองศาเปรียบเทียบกับการจุดระเบิดวัตถุระเบิดมาตรฐานที่เอ็นทีได้ สำหรับการทดสอบกำลังวัตถุระเบิดอีกวิธีหนึ่งเรียกว่า วิธีการทดสอบด้วยแท่งตะกั่ว (Trauzl Lead Block Test) ซึ่งเป็นการทดสอบการขยายตัวของแท่งตะกั่ว เมื่อทำให้วัตถุระเบิดในปริมาณที่กำหนดระเบิดในรูกระบอกแท่งตะกั่วบริสุทธิ์ (ภาพที่ 1) หลายประเทศจะรายงานผลค่า Trauzl Lead Block Test เทียบกับปริมาตรที่เกิดจากการขยายตัวจากการระเบิดของวัตถุระเบิด TNT (%TNT) และกำหนดให้ปริมาตรที่เกิดจากการขยายตัวจากการระเบิดของวัตถุระเบิด TNT มีค่าเท่ากับ 100% [4], [5]



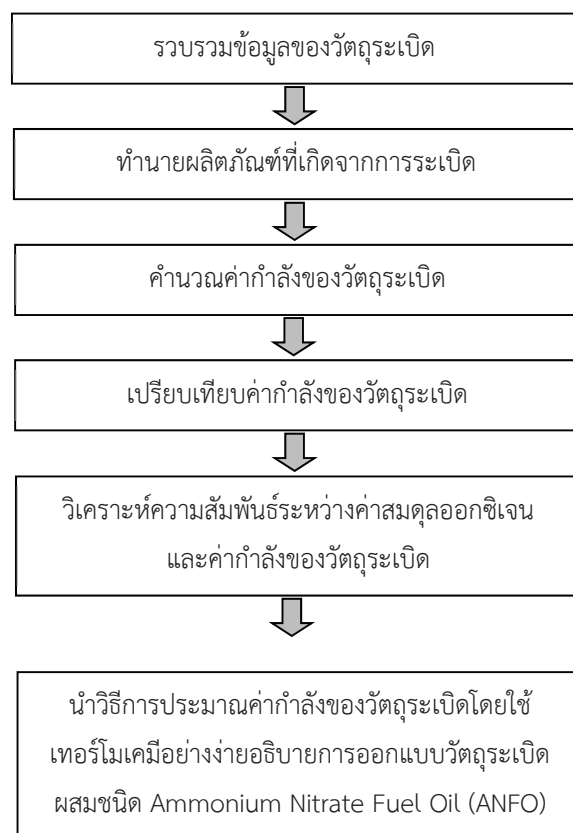
ก่อนการทดสอบ

หลังการทดสอบ

ภาพที่ 1 การหาค่ากำลังของวัตถุระเบิดโดยใช้ Trauzl Lead Block Test [7]

3. วิธีดำเนินการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบค่ากำลังของวัตถุระเบิดจำนวน 18 ชนิด ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้วิธีการทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายกับค่ากำลังของวัตถุระเบิดจากการทดลองโดยใช้ Trauzl Lead Block Test โดยมีขั้นตอนดำเนินการวิจัยทั้งหมด แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนภาพแสดงขั้นตอนดำเนินการวิจัย

3.1 การรวบรวมข้อมูลของวัตถุระเบิด

ข้อมูลพื้นฐานของวัตถุระเบิดทั้ง 18 ชนิด ได้แก่ สูตรโมเลกุล ค่ามวลโมเลกุล ค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการเกิดของโมเลกุลวัตถุระเบิด (ΔH_f^0) และค่าสมมูลออกซิเจน (OB) รวมถึงค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการทดลองโดยใช้วิธี Trauzl Lead Block Test ถูกรวบรวมมาจาก [7]

3.2 การทำนายผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการระเบิด

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการระเบิดของวัตถุระเบิดทั้ง 18 ชนิด สามารถทำนายได้โดยใช้ K-W rules เมื่อวัตถุระเบิดมีค่าสมมูลออกซิเจนมากกว่า -40% และใช้ Modified K-W rules เมื่อวัตถุระเบิดมีค่าสมมูลออกซิเจนน้อยกว่า -40%

3.3 การคำนวณค่ากำลังของวัตถุระเบิด

จากการทำนายผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการระเบิดของวัตถุระเบิด ทำให้สามารถคำนวณความร้อนจากการระเบิด (Q) ได้ ตามสมการที่ 3 สำหรับปริมาตรของแก๊สที่เกิดจากการระเบิดของวัตถุระเบิด (V) สามารถคำนวณได้จากผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของวัตถุระเบิด จากนั้นกำลังของวัตถุระเบิดทั้ง 18 ชนิดจะสามารถคำนวณได้จากค่า Q และ V ตามสมการที่ 4

3.4 การเปรียบเทียบค่ากำลังของวัตถุระเบิด

ค่ากำลังของวัตถุระเบิด (%TNT) ที่คำนวณโดยใช้ข้อมูลทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายและค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการทดลองโดยใช้วิธี Trauzl Lead Block Test ถูกนำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อทดสอบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีนั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองหรือไม่ โดยใช้สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) และค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error, MAE) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 6 และ 7 ตามลำดับ

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (7)$$

เมื่อ y_i คือ ค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการทดลองโดยใช้ Trauzl Lead Block Test (%TNT)

$\hat{y}_i$ คือ ค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่าย (%TNT)

$\bar{y}$ คือ ค่ากำลังของวัตถุระเบิดเฉลี่ยของค่าที่ได้จากการทดลองโดยใช้ Trauzl Lead Block Test

n คือ จำนวนของวัตถุระเบิดที่ใช้ในการศึกษา

3.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมมูล

ออกซิเจนและค่ากำลังของวัตถุระเบิด

ในขั้นตอนนี้ออกซิเจนและค่ากำลังของวัตถุระเบิดทั้งที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายและจากการทดลองโดยใช้ Trauzl Lead Block Test จะถูกนำมาใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมมูลออกซิเจนและค่ากำลังของวัตถุระเบิด โดยใช้การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis) ในรูปของสมการ $Y = \beta_0 + \beta_1 X$ เมื่อ X คือค่าสมมูลออกซิเจน (%) Y คือค่ากำลังของวัตถุระเบิด (%TNT) β_0 และ β_1 แทนค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย นอกจากนี้จะทำการทดสอบสมมติฐานของสัมประสิทธิ์การถดถอย ($H_0: \beta_1 = 0, H_1: \beta_1 \neq 0$) เพื่อทดสอบว่าค่าสมมูลออกซิเจนและค่ากำลังของวัตถุระเบิดมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกันหรือไม่ ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุระเบิดที่มีค่าสมมูลออกซิเจนเป็นบวกมีจำนวนเพียง 2 ชนิด ได้แก่ Ammonium Nitrate (AN) และ Nitroglycerine ซึ่งมีปริมาณไม่มากพอที่จะสามารถนำมาใช้วิเคราะห์ทางสถิติได้ ดังนั้นในการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายและการทดสอบสมมติฐานดังกล่าวจะพิจารณาเพียงข้อมูลของวัตถุระเบิดที่มีค่าสมมูลออกซิเจนเป็นลบหรือศูนย์เท่านั้น

4. ผลการศึกษา

4.1 ข้อมูลของวัตถุระเบิดที่ใช้ในการศึกษา

วัตถุระเบิดที่ใช้ในการศึกษานี้มีจำนวนทั้งสิ้น 18 ชนิด โดยมีข้อมูลพื้นฐาน ได้แก่ ชื่อ สูตรโมเลกุล และการใช้ประโยชน์ แสดงในตารางที่ 4 สำหรับค่ามวลโมเลกุล ค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการเกิด (ΔH_f^0) และค่าสมมูลออกซิเจน (OB) ที่รวบรวมได้จาก [7] แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 สูตรโมเลกุลและการใช้ประโยชน์ของ
โมเลกุลวัตถุระเบิดที่ทำการศึกษา

ชื่อ	สูตรโมเลกุล	การใช้ประโยชน์
Ammonium nitrate (AN)	NH_4NO_3	ใช้เป็นวัตถุระเบิดหลัก และเป็นส่วนผสมในการผลิตไดนาไมท์ และวัตถุระเบิดผสมทางพลเรือน
Cyclotetra-methylenetetra-nitramine (Octogen, HMX)	$\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_8\text{O}_8$	ใช้ผสมกับ TNT เป็นวัตถุระเบิดทางทหารใช้ในการงานการทำลาย
Dinitrobenzene	$\text{C}_6\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_4$	-
Dinitrotoluene (DNT)	$\text{C}_7\text{H}_6\text{N}_2\text{O}_4$	ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตวัตถุระเบิดทางพลเรือน
EthylNitrate	$\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_3$	ใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในจรวด
Hexanitrostibene (HNS)	$\text{C}_{14}\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_{12}$	ใช้ในจรวดอวกาศ
Methylnitrate	CH_3NO_3	ใช้เป็นส่วนผสมของเชื้อเพลิงในจรวด
Nitroglycerine (NG)	$\text{C}_3\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_9$	ใช้เป็นส่วนประกอบของดินส่่งกระสุนและใช้ทำไดนาไมท์
Nitroglycol	$\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_6$	ใช้ผลิตไดนาไมท์สำหรับใช้ในประเทศเขตอากาศหนาว

ชื่อ	สูตรโมเลกุล	การใช้ประโยชน์
Nitromethane	CH_3NO_2	ใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในจรวดอวกาศ
PETN	$\text{C}_5\text{H}_8\text{N}_4\text{O}_{12}$	ใช้ทำฝักกระเบิด ดินนาระเบิดและดินขยายการระเบิด
Picric acid	$\text{C}_6\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_7$	ใช้สำหรับทำวัตถุระเบิดผสม
RDX	$\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6$	ใช้เป็นส่วนประกอบหลักของดินนาระเบิด เชื้อปะทุ และใช้ทำวัตถุระเบิดผสม
TATB	$\text{C}_6\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6$	ใช้เป็นส่วนผสมในวัตถุระเบิดพลาสติก
Tetryl	$\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_5\text{O}_8$	ใช้ทำดินขยายการระเบิด ใช้ทำวัตถุระเบิด ใช้ทำดินนาระเบิด และเชื้อปะทุ
TNT	$\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$	ใช้บรรจุลูกกระสุนปืนใหญ่ ลูกระเบิดอากาศ ลูกระเบิดขว้าง ดินระเบิดทำลาย
Trinitroaniline	$\text{C}_6\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_6$	เป็นส่วนประกอบในหัวระเบิดขนาดเล็ก
Urea Nitrate	$\text{CH}_5\text{N}_3\text{O}_4$	ใช้เป็นส่วนผสมในวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

ตารางที่ 5 คำนวณโมเลกุล เอนทัลปีมาตรฐานของการเกิด (ΔH_f°) และค่าสมมูลออกซิเจน (OB) ของวัตถุระเบิดที่ทำการศึกษา [7]

ชื่อ	มวล โมเลกุล	ΔH_f° (kJ/mol)	OB (%)
AN	80	-365.36	+20.0
HMX	296.2	+75.03	-21.6
Dinitrobenzene	168.1	-27.20	-95.2
DNT	182.1	-43.92	-114.4
Ethyl nitrate	91	-190.28	-61.5
HNS	450.1	+78.23	-67.6
Methyl nitrate	77	-155.82	-10.4
NG	227.1	-370.72	+3.5
Nitroglycol	152.1	-242.81	0.0
Nitromethane	61	-113.02	-39.3
PETN	316.1	-538.85	-10.1
Picric acid	229.1	-248.53	-45.4
RDX	222.1	+66.94	-21.6
TATB	258.1	-139.71	-55.8
Tetryl	287.1	+20.01	-47.4
TNT	227.1	-67.06	-74.0
Trinitroaniline	228.1	-83.96	-56.1
Urea Nitrate	123.1	-562.94	-6.5

4.2 ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการระเบิดของวัตถุระเบิด

จากการใช้ K-W rules และ Modified K-W rules สามารถทำนายผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการระเบิดของวัตถุระเบิดทั้ง 18 ชนิดได้ แสดงผลการทำนายดังต่อไปนี้

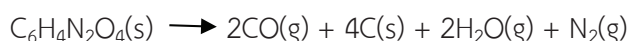
1. AN



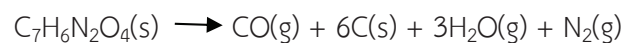
2. HMX



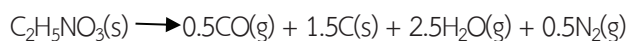
3. Dinitrobenzene



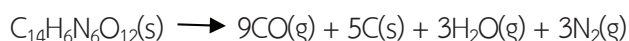
4. DNT



5. Ethyl nitrate



6. HNS



7. Methyl nitrate



8. NG



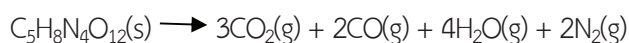
9. Nitroglycol



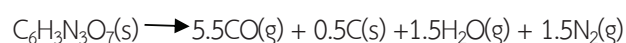
10. Nitromethane



11. PETN



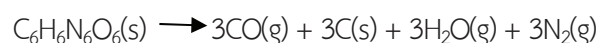
12. Picric acid



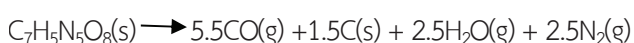
13. RDX



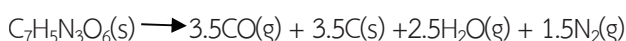
14. TATB



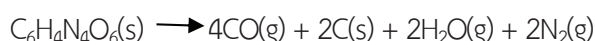
15. Tetryl



16. TNT



17. Trinitroaniline



18. Urea Nitrate



4.3 ผลการคำนวณค่ากำลังของวัตถุระเบิด

ผลการคำนวณความร้อนจากการระเบิด (Q) ปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิดที่สภาวะ STP (V) และค่ากำลังของวัตถุระเบิดโดยวิธีการทางเทอร์โมเคมีอย่างง่าย แสดงดังตารางที่ 6

4.4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังของวัตถุระเบิดจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายและการทดลองโดยวิธี Trauzl Lead Block Test

ค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีการทางเทอร์โมเคมีอย่างง่าย (%TNT) และค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการทดลองโดยวิธี Trauzl Lead Block Test ซึ่งรวบรวมจาก [7] แสดงดังตารางที่ 7

กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลทางเทอร์โมเคมีอย่างง่าย (%TNT) และจากการทดลองโดยวิธี Trauzl Lead Block Test (%TNT) ของวัตถุระเบิด 18 ชนิด แสดงดังภาพที่ 3 โดยจุดแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังที่ได้จากการทดลองโดยวิธี Trauzl Lead Block Test (X) และค่ากำลังที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่าย (Y) ของวัตถุระเบิดแต่ละชนิด เส้นตรงแสดงบริเวณที่ค่ากำลังของวัตถุระเบิดจากการคำนวณมีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากการทดลองโดยวิธี Trauzl Lead Block Test

ตารางที่ 6 ค่าความร้อนจากการระเบิด (Q) ปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิด (V) และกำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมี อย่างง่าย

ชื่อ	Q (kJ/kg)	V (dm ³ /g)	กำลังของวัตถุระเบิดจากการคำนวณ (%TNT)
AN	-1,483.00	0.980	48.22
HMX	-5,014.96	0.907	150.90
Dinitrobenzene	-4,033.31	0.666	89.12
DNT	-4,352.99	0.615	88.82
Ethylnitrate	-5,165.05	0.862	147.71
HNS	-3,998.29	0.747	99.09
Methylnitrate	-5,965.97	0.873	172.79
NG	-6,233.73	0.715	147.87
Nitroglycol	-6,763.91	0.736	165.16
Nitromethane	-5,004.59	0.918	152.42
PETN	-5,794.84	0.780	149.96
Picric acid	-3,154.82	0.831	86.98

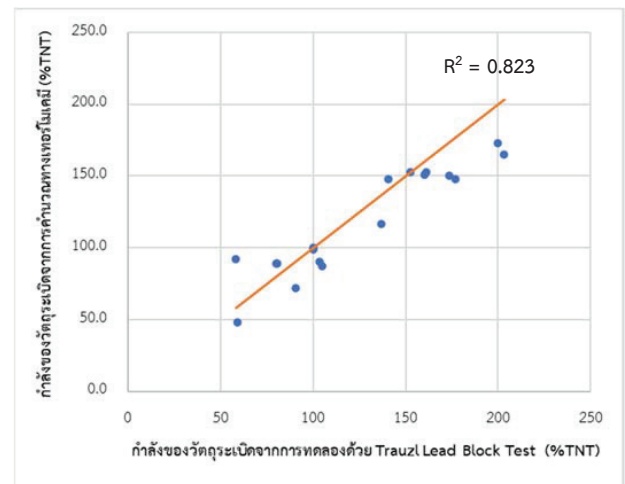
ตารางที่ 6 ค่าความร้อนจากการระเบิด (Q) ปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิด (V) และกำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมี อย่างง่าย (ต่อ)

ชื่อ	Q (kJ/kg)	V (dm ³ /g)	กำลังของวัตถุระเบิดจากการคำนวณ (%TNT)
RDX	-5,064.11	0.908	152.55
TATB	-3,557.11	0.781	92.17
Tetryl	-4,295.75	0.819	116.72
TNT	-4,073.27	0.740	100.00
Trinitroaniline	-3,693.29	0.786	90.30
Urea Nitrate	-2,390.41	0.910	72.17

ชื่อ	กำลังของวัตถุระเบิดจากการคำนวณ (%TNT)	กำลังของวัตถุระเบิดจากการทดลอง (cm ³ /10g)	กำลังของวัตถุระเบิดจากการทดลอง (%TNT)
PETN	149.96	520	173.33
Picric acid	86.98	315	105.00
RDX	152.55	483	161.00
TATB	92.17	175	58.33
Tetryl	116.72	410	136.67
TNT	100.00	300	100
Trinitroaniline	90.30	311	103.67
Urea Nitrate	72.17	272	90.67

ตารางที่ 7 กำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายและจากการทดลองโดยวิธี Trauzl Lead Block Test

ชื่อ	กำลังของวัตถุระเบิดจากการคำนวณ (%TNT)	กำลังของวัตถุระเบิดจากการทดลอง (cm ³ /10g)	กำลังของวัตถุระเบิดจากการทดลอง (%TNT)
AN	48.22	178	59.33
HMX	150.90	480	160.00
Dinitrobenzene	89.12	242	80.67
DNT	88.82	240	80.00
Ethyl Nitrate	147.71	422	140.67
HNS	99.09	301	100.33
Methyl Nitrate	172.79	600	200
NG	147.87	530	176.67
Nitroglycol	165.16	610	203.33
Nitromethane	152.42	458	152.67

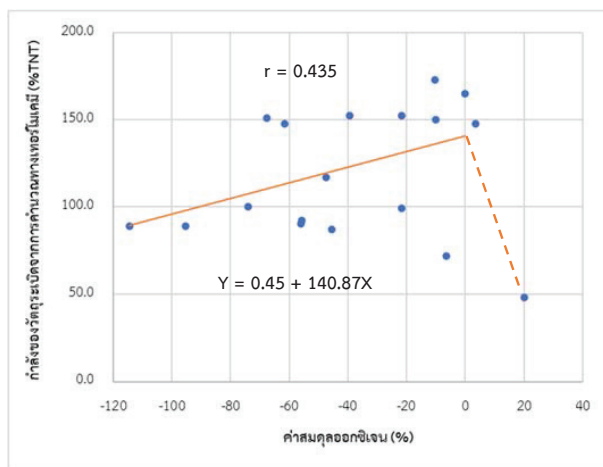


ภาพที่ 3 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังวัตถุระเบิดจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีและจากการทดลองด้วย Trauzl Lead Block Test

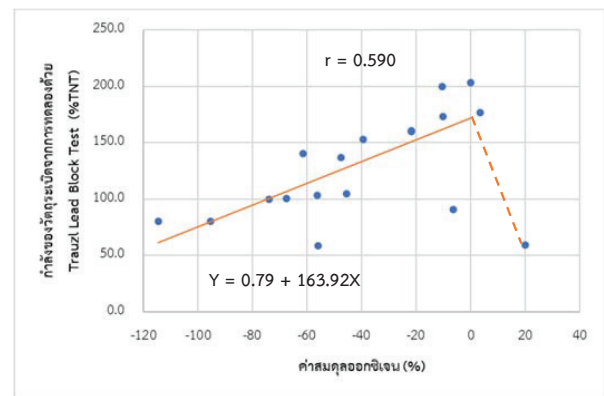
จากภาพที่ 3 พบว่าค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองโดยใช้ Trauzl Lead Block Test เป็นอย่างมาก โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination) หรือ R^2 เท่ากับ 0.823 และมีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error, MAE) เท่ากับ 14.51%

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมมูลออกซิเจนและกำลังของวัตถุระเบิด

กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมมูลออกซิเจน (%) และกำลังของวัตถุระเบิด (%TNT) ที่ได้ทั้งจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีและจากการทดลอง Trauzl Lead Block Test แสดงดังภาพที่ 4 และ 5 ตามลำดับ โดยเส้นตรงแสดงแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมมูลออกซิเจนที่เป็นลบหรือศูนย์และกำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากทั้งสองวิธีดังกล่าว โดยใช้การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย สำหรับเส้นประใช้แสดงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมมูลออกซิเจนที่มีค่าเป็นบวกและกำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากทั้งสองวิธีดังกล่าว



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมมูลออกซิเจนและกำลังของวัตถุระเบิดจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่าย



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมมูลออกซิเจน (%) และกำลังวัตถุระเบิดจาก Trauzl Lead Block Test (%TNT)

จากการทดสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าสมมูลออกซิเจนและค่ากำลังของวัตถุระเบิดจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายด้วยการทดสอบสมมติฐานของสัมประสิทธิ์การถดถอย ($H_0: \beta_1 = 0$, $H_1: \beta_1 \neq 0$) พบว่าค่าสมมูลออกซิเจนมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับกำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมี ที่ระดับนัยสำคัญ 0.10 ($t = 1.809$, $p\text{-value} = 0.092$) และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient, r) เท่ากับ 0.435 (ดังแสดงในภาพที่ 4)

จากการทดสอบสมมติฐานของสัมประสิทธิ์การถดถอย ($H_0: \beta_1 = 0$, $H_1: \beta_1 \neq 0$) ของตัวแบบสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายของกำลังของวัตถุระเบิดจาก Trauzl Lead Block Test พบว่าค่าสมมูลออกซิเจนมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการทดลองด้วย Trauzl Lead Block Test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($t = 2.736$, $p\text{-value} = 0.016$) และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.590 (ดังแสดงในภาพที่ 5)

ดังนั้นค่าสมมูลออกซิเจนมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับกำลังของวัตถุระเบิดทั้งจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายและการทดลอง Trauzl Lead Block test นอกจากนี้ จากภาพที่ 4 และ 5 ยังพบว่าในกรณีที่ค่าสมมูลออกซิเจนมีค่าเป็นลบ กำลังของวัตถุระเบิดทั้งจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีและจาก Trauzl Lead Block Test จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งค่าสมมูลออกซิเจนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และในกรณีที่ค่าสมมูลออกซิเจนมีค่าเป็นบวก กำลังของวัตถุระเบิดจากทั้งสองวิธีมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ เมื่อค่าสมมูลออกซิเจนมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือ กำลังของวัตถุระเบิดจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อมีค่าสมมูลออกซิเจนเข้าใกล้หรือเท่ากับศูนย์

4.6 การนำวิธีการประมาณค่ากำลังของวัตถุระเบิดโดยใช้เทอร์โมเคมีอย่างง่ายอธิบายการออกแบบวัตถุระเบิดผสมชนิด Ammonium Nitrate Fuel Oil (ANFO)

โดยทั่วไปวัตถุระเบิดผสมชนิด ANFO ที่นิยมใช้ในงานทางด้านเหมืองแร่ และผู้ก่อการร้ายนิยมใช้ในการก่อความไม่สงบ จะมีอัตราส่วนผสมระหว่างแอมโมเนียมไนเตรท (NH_4NO_3) และน้ำมันเชื้อเพลิง (CH_2) เป็น 94% ต่อ 6% โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถอธิบายเหตุผลสนับสนุนการใช้อัตราส่วนผสมดังกล่าวได้ เนื่องจากส่วนผสมดังกล่าวมีค่าสมมูลออกซิเจนเท่ากับศูนย์ จึงทำให้ค่ากำลังของวัตถุระเบิดผสมชนิด ANFO ที่มีส่วนผสมดังกล่าวมีค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายสูงสุด ซึ่งจะอธิบายตามลำดับดังนี้

4.6.1 การหาอัตราส่วนผสมระหว่างแอมโมเนียมไนเตรทและน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อให้ได้วัตถุระเบิดผสมที่มีค่าสมมูลออกซิเจนเท่ากับศูนย์ ($\text{OB} = 0$)

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมมูลออกซิเจนกับค่ากำลังของวัตถุระเบิด (%TNT) ทั้งที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายและการทดลอง Trauzl Lead Block test พบว่าวัตถุระเบิดที่มีค่าสมมูลออกซิเจนเข้าใกล้ศูนย์จะมีค่ากำลังของการระเบิดสูงสุด ดังนั้นในการออกแบบวัตถุระเบิดผสมระหว่าง

แอมโมเนียมไนเตรทกับน้ำมันเชื้อเพลิงจึงควรผสมในอัตราส่วนที่ทำให้สมมูลออกซิเจนของวัตถุระเบิดผสมมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยสมมูลออกซิเจนของวัตถุระเบิดผสมหาได้โดยใช้สมการที่ 8

$$\text{OB}_{\text{mixed Ex}} = \frac{\% \text{Mass}_{\text{Ex1}} \times \text{OB}_{\text{Ex1}} + \% \text{Mass}_{\text{Ex2}} \times \text{OB}_{\text{Ex2}}}{100} \quad (8)$$

เมื่อ $\text{OB}_{\text{mixed Ex}}$ หมายถึง สมมูลออกซิเจนของวัตถุระเบิดผสม

OB_{Ex1} หมายถึง สมมูลออกซิเจนของวัตถุระเบิดชนิดที่ 1

OB_{Ex2} หมายถึง สมมูลออกซิเจนของวัตถุระเบิดชนิดที่ 2

$\% \text{Mass}_{\text{Ex1}}$ หมายถึง % โดยมวลของวัตถุระเบิดชนิดที่ 1 ในวัตถุระเบิดผสม

$\% \text{Mass}_{\text{Ex2}}$ หมายถึง % โดยมวลของวัตถุระเบิดชนิดที่ 2 ในวัตถุระเบิดผสม

สามารถหาเปอร์เซ็นต์โดยมวลของแอมโมเนียมไนเตรทและน้ำมันเชื้อเพลิงในส่วนผสมของวัตถุระเบิด ANFO ที่มีค่าสมมูลออกซิเจนเท่ากับศูนย์ได้โดยแทนค่าสมมูลออกซิเจนของแอมโมเนียมไนเตรท (NH_4NO_3) เท่ากับ +20% และเนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นส่วนผสมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด แต่เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณในงานนี้จะใช้โมเลกุลของ CH_2 แทนน้ำมันเชื้อเพลิง [17] ซึ่งมีค่าสมมูลออกซิเจนจากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 2 เท่ากับ -342.86% จากนั้นแทนลงในสมการที่ 8 จะได้

$$0 = \frac{\% \text{Mass}_{\text{AN}} \times (+20) + \% \text{Mass}_{\text{Fuel}} \times (-342)}{100}$$

จะได้ $\% \text{Mass}_{\text{AN}}$ ในวัตถุระเบิดผสม ANFO = 94.5% และ $\% \text{Mass}_{\text{Fuel oil}} = 5.5\%$ ซึ่งประมาณการอัตราส่วนผสมระหว่างแอมโมเนียมไนเตรท (NH_4NO_3) และน้ำมันเชื้อเพลิง (CH_2) เป็น 94% ต่อ 6% โดยน้ำหนัก

ซึ่งสอดคล้องกับส่วนผสมของ ANFO ที่มีใช้ทั่วไป [12], [13]

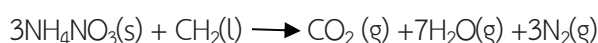
4.6.2 การประมาณค่ากำลังของวัตถุระเบิดผสม ANFO ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างแอมโมเนียมไนเตรท (NH_4NO_3) และน้ำมันเชื้อเพลิง (CH_2) เป็น 94.5% ต่อ 5.5% โดยน้ำหนัก โดยใช้การคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่าย สามารถทำได้ตามลำดับขั้นตอนต่อไปนี้

(1) แปลงอัตราส่วนผสมระหว่างแอมโมเนียมไนเตรท (NH_4NO_3) และน้ำมันเชื้อเพลิง (CH_2) 94.5% ต่อ 5.5% โดยน้ำหนัก ให้เป็นอัตราส่วนโดยโมลเพื่อให้ง่ายต่อการทำนายการเกิดผลิตภัณฑ์หลังการระเบิด

ANFO ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างแอมโมเนียมไนเตรท (NH_4NO_3) และน้ำมันเชื้อเพลิง (CH_2) เป็น 94.5% ต่อ 5.5% โดยน้ำหนัก สามารถเขียนในรูปอัตราส่วนโดยโมลเป็นจำนวนเต็มเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณได้เป็น NH_4NO_3 3 โมล ต่อ CH_2 1 โมล ($3 \text{ โมล } \text{NH}_4\text{NO}_3 + 1 \text{ โมล } \text{CH}_2$)

(2) การทำนายผลิตภัณฑ์หลังการระเบิดของ ANFO ($3 \text{ โมล } \text{NH}_4\text{NO}_3 + 1 \text{ โมล } \text{CH}_2$)

เนื่องจาก ANFO ($3 \text{ โมล } \text{NH}_4\text{NO}_3 + 1 \text{ โมล } \text{CH}_2$) มีค่าสมดุลออกซิเจนเป็นศูนย์ ดังนั้นในการทำนายผลิตภัณฑ์หลังการระเบิดของ ANFO จึงทำนายตาม K-W rules ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์หลังการระเบิดดังนี้



(3) การทำนายค่าความร้อนจากการระเบิดของ ANFO ($3 \text{ โมล } \text{NH}_4\text{NO}_3 + 1 \text{ โมล } \text{CH}_2$)

เมื่อแทนค่าเอนทัลปี (ΔH_f^0) ของการเกิด CO_2 , H_2O จากตารางที่ 3 ΔH_f^0 ของการเกิด NH_4NO_3 จากตารางที่ 5 และแทนค่า ΔH_f^0 ของ $\text{CH}_2 = -29.31 \text{ kJ/mol}$ [17] ลงในสมการที่ 3 จะได้ความร้อนจากการระเบิดของ ANFO ($3 \text{ โมล } \text{NH}_4\text{NO}_3 + 1 \text{ โมล } \text{CH}_2$) มีค่า 3,823.09 kJ/kg

(4) การทำนายปริมาตรของแก๊สที่เกิดจากการระเบิดของ ANFO ($3 \text{ โมล } \text{NH}_4\text{NO}_3 + 1 \text{ โมล } \text{CH}_2$)

จากสมการเคมีของการทำนายผลิตภัณฑ์หลังการระเบิดของ ANFO ($3 \text{ โมล } \text{NH}_4\text{NO}_3 + 1 \text{ โมล } \text{CH}_2$) พบว่าหลังการระเบิดมีผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเกิดขึ้น 11 โมล คิดเป็นปริมาตรแก๊สที่สภาวะมาตรฐาน $11 \times 22.4 = 246.4 \text{ dm}^3$ ต่อ ANFO มวล 254 กรัม ดังนั้นปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิดของ ANFO ($3 \text{ โมล } \text{NH}_4\text{NO}_3 + 1 \text{ โมล } \text{CH}_2$) มีค่า $0.970 \text{ dm}^3/\text{g}$

(5) การหาค่าเปรียบเทียบ (%TNT) ของ ANFO ($3 \text{ โมล } \text{NH}_4\text{NO}_3 + 1 \text{ โมล } \text{CH}_2$)

จากการแทนค่าความร้อนจากการระเบิดของ ANFO และ TNT ปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิดของ ANFO และ TNT ลงในสมการที่ 5 จะได้กำลังวัตถุระเบิด (%TNT) ของ ANFO ($3 \text{ โมล } \text{NH}_4\text{NO}_3 + 1 \text{ โมล } \text{CH}_2$) มีค่า 121.93% ในทำนองเดียวกันสามารถหาสมดุลออกซิเจน (OB) ความร้อนจากการระเบิด (Q) ปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิด (V) และค่ากำลังของวัตถุระเบิด (Power) ของวัตถุระเบิดผสม ANFO ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างแอมโมเนียมไนเตรท (NH_4NO_3) และน้ำมันเชื้อเพลิง (CH_2) ในอัตราส่วนอื่น ๆ ได้โดยใช้การคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบสมมูลออกซิเจนและค่ากำลังของวัตถุระเบิดของแอมโมเนียมไนเตรทและวัตถุระเบิดผสม ANFO ที่มีอัตราส่วนการผสมต่าง ๆ

วัตถุระเบิด	OB (%)	Q (kJ/kg)	V (dm ³ /g)	Power (%TNT)
NH ₄ NO ₃	+20.0	-1,483.00	0.980	48.20
ANFO (96.6% NH ₄ NO ₃ + 3.4% CH ₂)	+7.7	-2,897.80	0.974	93.64
ANFO (94.5% NH ₄ NO ₃ + 5.5% CH ₂)	0.0	-3,789.02	0.970	121.93
ANFO (92.0% NH ₄ NO ₃ + 8.0% CH ₂)	-9.0	-3,221.67	1.030	110.09
ANFO (89.6% NH ₄ NO ₃ + 10.4% CH ₂)	-17.7	3,327.99	1.003	110.74

จากตารางที่ 8 แสดงให้เห็นว่าสารประกอบแอมโมเนียมไนเตรทมีค่าสมมูลออกซิเจนเท่ากับ +20% เมื่อคำนวณกำลังของการระเบิดเทียบกับวัตถุระเบิดมาตรฐาน TNT โดยใช้หลักการทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายพบว่าแอมโมเนียมไนเตรทมีค่ากำลังการระเบิด (%TNT) ประมาณ 48.20% เนื่องจากในโมเลกุลแอมโมเนียมไนเตรท

มีปริมาณอะตอมออกซิเจนมากกว่าปริมาณอะตอมของออกซิเจนที่ต้องการใช้ในการทำให้โมเลกุลของเชื้อเพลิงในวัตถุระเบิดเกิดการออกซิเดชันสมบูรณ์ ออกซิเจนที่เป็นส่วนเกินจึงไม่ได้ช่วยเพิ่มพลังงานในการระเบิด ในขณะที่เมื่อเติมน้ำมันเชื้อเพลิง (CH₂) ลงไปในส่วนผสมวัตถุระเบิด ANFO จนได้วัตถุระเบิดผสมที่มีปริมาณ NH₄NO₃ ต่อ CH₂ เป็น 94.5% ต่อ 5.5% เป็นการเพิ่มอะตอมคาร์บอน (C) ที่เป็นเชื้อเพลิงลงไปในวัตถุระเบิดผสม ซึ่งปริมาณส่วนผสมดังกล่าวทำให้วัตถุระเบิดผสมมีค่าสมมูลออกซิเจนเท่ากับศูนย์หมายความว่าปริมาณอะตอมของออกซิเจนที่ต้องการใช้ในการทำให้อะตอมของเชื้อเพลิงในวัตถุระเบิดเกิดการออกซิเดชันสมบูรณ์มีปริมาณพอดีกันจึงเป็นอัตราส่วนที่ทำให้เกิดกำลังของการระเบิดสูงสุด ในขณะที่ถ้าเติมน้ำมันเชื้อเพลิงลงไปในวัตถุระเบิดผสมมากขึ้นจะทำให้วัตถุระเบิดผสมมีค่าสมมูลออกซิเจนติดลบหมายความว่า ปริมาณอะตอมของออกซิเจนที่ต้องการใช้ในการทำให้อะตอมของเชื้อเพลิงในวัตถุระเบิดเกิดการออกซิเดชันสมบูรณ์มีปริมาณน้อยกว่าปริมาณอะตอมของเชื้อเพลิงทำให้มีอะตอมของเชื้อเพลิงเหลือ กำลังของวัตถุระเบิดจึงมีค่าน้อยลง ซึ่งผลการคำนวณที่แสดงไว้ข้างต้นสอดคล้องกับกราฟแสดงค่าของพลังงานที่สูญเสียไปใน ANFO เมื่อผสมน้ำมันเชื้อเพลิงกับแอมโมเนียมไนเตรทที่อัตราส่วนต่าง ๆ ดังที่ปรากฏในคู่มือของ Federal Highway Administration, US. Department of Transportation เรื่อง Rock Blasting and Overbreak Control [17] นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังสนับสนุนเงื่อนไขการทำนายผลิตภัณฑ์จากการระเบิดตาม K-W rules และ Modified K-W rules เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการทำนายกำลังของวัตถุระเบิดได้เป็นอย่างดี

5. สรุปและอภิปรายผล

การคำนวณกำลังของวัตถุระเบิดแรงสูงจำนวน 18 ชนิด โดยใช้หลักการทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายพบว่า ค่าที่ได้ใกล้เคียงกับการหาลำดับของวัตถุระเบิดโดยใช้วิธี Trauzl Lead Block Test เป็นอย่างมาก โดยเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่ากำลังของวัตถุระเบิด (%TNT) ที่หาจากวิธีการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายกับค่ากำลังของวัตถุระเบิด (%TNT) ที่หาโดยวิธี Trauzl Lead Block Test พบว่ากราฟที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.827 และมีค่าคลาดเคลื่อนสมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 14.3% นอกจากนี้ค่าสมมูลออกซิเจนยังมีความสัมพันธ์กับกำลังวัตถุระเบิดทั้งจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายและการทดลองโดยวิธี Trauzl Lead Block Test โดยในกรณีที่ค่าสมมูลออกซิเจนมีค่าเป็นลบพบว่า กำลังของวัตถุระเบิดทั้งจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีและจาก Trauzl Lead Block Test จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งค่าสมมูลออกซิเจนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ สำหรับกรณีที่ค่าสมมูลออกซิเจนมีค่าเป็นบวกกำลังของวัตถุระเบิดจากทั้งสองวิธีมีแนวโน้มลดลง นั่นคือกำลังวัตถุระเบิดจะมีค่าสูงสุดเมื่อค่าสมมูลออกซิเจนของวัตถุระเบิดมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ W. C. Lothrop และ G. R. Handrick [5] ที่แสดงไว้ว่ากำลังของวัตถุระเบิดและอำนาจการฉีกขาดของวัตถุระเบิด (%TNT) ที่วัดโดยวิธี Trauzl Lead Block Test จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าสมมูลออกซิเจนของวัตถุระเบิดติดลบน้อยลง และกำลังของวัตถุระเบิดและอำนาจการฉีกขาดของวัตถุระเบิด (%TNT) จะมีค่าสูงสุดเมื่อวัตถุระเบิดมีค่าสมมูลออกซิเจนเป็นศูนย์ นอกจากนี้วิธีการคำนวณกำลังของวัตถุระเบิดโดยใช้หลักการทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายยังสามารถอธิบายการออกแบบวัตถุระเบิดผสมชนิด ANFO ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างแอมโมเนียมไนเตรท 94% ต่อน้ำมันเชื้อเพลิง 6% ซึ่งเป็นวัตถุระเบิดผสมชนิด ANFO ที่มีกำลังของการระเบิดสูงที่สุดได้เป็นอย่างดี งานวิจัยนี้ให้ข้อมูลสนับสนุนว่าข้อมูลจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมี

อย่างง่ายและข้อมูลค่าสมมูลออกซิเจนสามารถใช้ในการทำนายกำลังของวัตถุระเบิดและออกแบบวัตถุระเบิดผสมได้

6. บรรณานุกรม

- (1) A. Bailey and S. G. Murray, "Explosives, Propellants and Pyrotechnics," Brassey's (UK) Ltd, pp. 55-57, (1989).
- (2) J. Akhavan, "The Chemistry of Explosives," 3rd ed. The Royal Society of Chemistry, pp. 74-102, (2004).
- (3) J.P. Agrawal, "High Energy Materials," John Wiley & Sons, pp. 17-33, (2010).
- (4) Department of the Army Technical Manual, "TM9-1300-214 Military Explosives," Washington D.C.: US Army, pp. 3-1-3-4, (1984).
- (5) W.C. Lothrop, and G.R. Handrick, "The relationship between performance and constitution of pure organic explosive compounds," Chemical Reviews, vol. 44, no. 3, pp. 419-445, doi: 10.1021/cr60139a001, (1949).
- (6) M.H. Keshavarz, M. Ghorbanifaraz, H. Rahimi, and M. Rahmani, "Simple pathway to predict the power of high energy materials," Propellants, Explosives, Pyrotechnics, vol. 36, no. 5, pp. 424-429, doi: 10.1002/prep.201000083, (2011).
- (7) R. Meyer, J. Kohler, and A. Homburg, "Explosives," 6th ed. John Wiley & Sons, (2007).
- (8) A.R. Martin, and H. J. Yallop, "The correlation of explosive power with molecular structure," Journal of Applied Chemistry, vol. 9, no. 6, pp. 310-315, doi: 10.1002/jctb.5010090604, (2007).
- (9) M.H. Keshavarz, and F. Seif, "Improved approach to predict the power of energetic Materials," Propellants, Explosives, Pyrotechnics, vol. 38, no. 5, pp. 709-714, doi: 10.1002/prep.201200165, (2013).
- (10) W. P. Lai, P. Lian, Y. Z. Liu, T. Yu, W. L. Zhu, Z. X. Ge, and J. Lv, "Design and theoretical study of 15 novel high energy density compounds," Journal of Molecular Modeling, vol. 20, no. 11, doi: 10.1007/s00894-014-2479-y, (2014).
- (11) P. Lian, C. Kang, Y. X. Zhang, S. Chen, and W. P. Lai, "Theoretical study on new high energetic density compounds with high power and specific impulse," FirePhysChem, vol. 1, no. 2, pp.103-108, doi: 10.1016/j.fpc.2021.04.006, (2021).

- (12) M. Fabin, and T. Jarosz, "Improving ANFO: Effect of additives and ammonium nitrate morphology on detonation parameters," *Materials*, vol. 14, no. 19, doi: 10.3390/ma14195745, (2011).
- (13) P. Suppajariyawat, M. Elie, M. Baron, and J. Gonzalez-Rodriguez, "Classification of ANFO samples based on their fuel composition by GC-MS and FTIR combined with chemometrics," *Forensic Science International*, vol. 301, pp. 415-425, doi: 10.1016/j.forsciint.2019.06.001, (2019).
- (14) P. Kang, Z. Liu, H. Abou-Rachid, and H. Guo, "Machine-learning assisted screening of energetic materials," *The Journal of Physical Chemistry A*, vol. 124, no. 26, pp. 5341-5351, doi: 10.1021/acs.jpca.0c02647, (2020).
- (15) I. Sochet, D. Gardebas, S. Calderara, Y. Marchal, and B. Longuet, "Blast Wave parameters for Spherical Explosives Detonation in Free Air," *Open Journal of safety Science and Technology*, vol. 1 No. 2, pp. 31-42, doi: 10.4236/ojsst.2011.12004, (2011).
- (16) สุราณี อโณทัยรุ่งรัตน์ และโกวิท ปิยะมั่งคณา, "การใช้สมมูลออกซิเจนเพื่อประเมินความเสี่ยงอันตรายทางความร้อนเบื้องต้นของวัตถุระเบิด," *วารสารวิจัยราชมณฑลกรุงเทพ*, ปีที่ 15, ฉบับที่ 1, หน้า 83-92, มกราคม-มิถุนายน, (2564).
- (17) National Highway Institute, Federal Highway Administration, US. Department of Transportation, "Rock Blasting and Overbreak Control," pp. 1-13. (1991).

ผลของโครงสร้างการทอเส้นใยเสริมพอลิเบนซอกซาซีนเรซินต่อคุณสมบัติทางกล Effects of Weave Structure on Mechanical Behavior of Carbon Fiber Fabric Reinforced Polybenzoxazine Composites

ร้อยเอกหญิง กังสดาล อินทกุล
Captain Kangsadan Inthakun

กองวิชาเคมี ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า นครนายก 26001 ประเทศไทย
Department of Chemistry, Academic Division, Chulachomklao royal military academy,
Nakhon Nayok 26001, Thailand

*Corresponding Author. E-mail : Kangsadan.in@crma.ac.th

(Received: August 24, 2023, Revised: October 5, 2023, Accepted: October 27, 2023)

บทคัดย่อ : จุดมุ่งหมายของงานวิจัยเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุคอมโพสิตโดยใช้เบนซอกซาซีนเรซินเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา, ลายสองหรือลายทแยง และลายคาร์บอนทิศทางเดียว เพื่อใช้ในการพัฒนาเกราะกันกระสุนในส่วนของแผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะที่มีน้ำหนักเบาและประสิทธิภาพสูงจากผลการทดลองในส่วนของสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตพอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายสองหรือลายทแยงให้ค่าสูงที่สุด โดยค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดโค้งและความต้านทานแรงกระแทกสูงสุดในชิ้นงานคอมโพสิต มีค่าเท่ากับ 763 ± 55 เมกะปาสคาล และ 43 ± 2 กิโลจูล/ตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งชิ้นงานคอมโพสิตหลังการทดสอบจะเกิดความเสียหายเป็นรูปโคนกตลิกบริเวณผิวหน้าคล้ายกับการยิงกระสุนปะทะวัสดุในส่วนของค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดพบว่าในชิ้นงานคอมโพสิตเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนทิศทางเดียวมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 517 ± 26 เมกะปาสคาล เนื่องจากมีความหนาแน่นและจำนวนของเส้นใยคาร์บอนที่สูง และเส้นใยคาร์บอนมีทิศทางในแนวเดียวกับแรงดัด จากสมบัติทางกายภาพพบว่าพอลิเบนซอกซาซีนเมตริกียึดติดได้ดีกับทุกโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนตรวจสอบโดยโครงสร้างพื้นฐานของวัสดุคอมโพสิต นอกจากนี้วัสดุคอมโพสิตพอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายสองหรือลายทแยงที่มีสมบัติความหนาแน่นต่ำจะมีความแข็งแรงต่อแรงดัดโค้งและความต้านทานแรงกระแทกสูงที่สุด เนื่องจากโครงสร้างการทอ 2 มิติ มีความสามารถในการส่งผ่านภาระได้พร้อมกันทั้ง 2 ทิศทางในแนวตามยาวและตามขวาง จึงมีความทนทานต่อการเปลี่ยนรูป การรับและกระจายแรงได้ดี นอกจากนี้ลักษณะโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายสองหรือลายทแยงมีจุดสัมผัสแรงเสียดทานการหยักของเส้นใยและจุดการสอดประสานกัน ที่น้อยกว่าโครงสร้างการทอเส้นใยลักษณะอื่น ซึ่งส่งผลให้มีคุณสมบัติทางกลที่สูงขึ้นจึงเหมาะสำหรับนำมาพัฒนาเกราะกันกระสุนจากวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตในส่วนของแผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะ

คำสำคัญ : พอลิเบนซอกซาซีน พอลิเมอร์คอมโพสิต เกราะกันกระสุน โครงสร้างการทอ

Abstract : This work aimed to study the effects of weaving structures of fiber-reinforced polybenzoxazine resin composites (plain weave, twill weave, and unidirectional carbon fabric) on the physical and mechanical properties to develop a lightweight and high-performance strike panel of hard ballistic armor. The experimental results revealed that the flexural strength and impact resistance of the twill weave structure of the composite exhibited the greatest value among other structures in which those values of 763 ± 55 MPa and 43 ± 2 kJ/m², respectively. After testing, the specimen composites would cause damage deep on the surface area in the shape of base/cone, similar to the shooting of strike panel. The highest tensile strength of 517 ± 26 MPa was from the specimen reinforced with unidirectional fabrics structures due to the high density and high filament count of carbon fibers and the same direction as the tensile testing of carbon fibers. Physical properties, it was found an excellent adhesion between carbon fiber weave structure and the polymer matrix, so demonstrating that both cooperating to achieve good result these laminates by scanning electron microscopy. Moreover, will weave structures of composite with low-density properties would have high flexural strength and impact resistance composites. Due to the 2D woven structure, these were able to transmit load simultaneously in longitudinal and transverse weave directions. Therefore, it had good resistance to stiffness, stress, and stress distribution. As in weave structure of composite, it could be seen that twill weave had low contact friction, crimp, and binding effect because of its minimum intersection point compared with plain weave and unidirectional fabrics, therefore twill weave is a low level of fiber crimp impart relatively high mechanical properties compared with a plain weave therefore twill weave is suitable to develop strike panel for a hard ballistic armor application.

Keyword : Polybenzoxazine, Polymer composite, Ballistic impact, Weave design

1. บทนำ

ปัจจุบันเหตุการณ์ความไม่สงบในประเทศไทยโดยเฉพาะในเขตสามจังหวัดชายแดนภาคใต้ทำให้ทหาร ตำรวจ รวมไปถึงพลเรือนในพื้นที่เสี่ยง จำเป็นต้องใช้ยุทธภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพสูงทางด้านการต้านทานแรงกระแทก ยุทธภัณฑ์ที่ช่วยลดการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินคือเกราะกันกระสุน หมวกกันกระสุน และรถกันกระสุน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันหรือลดอันตรายจากกระสุนปืน [1] เกราะกันกระสุนที่ถูกพัฒนาจากอดีตถึงปัจจุบันของผู้ประกอบการนิยมใช้คือ เหล็กและเซรามิก แต่วัสดุดังกล่าวมีน้ำหนักมาก ราคาแพง และเมื่อรับแรงปะทะจากกระสุนปืนอาจทำให้เกิดการแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ซึ่งเป็นอันตรายต่อบุคคลอื่นและผู้สวมใส่ วัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตเริ่มได้รับความนิยมมากขึ้นสำหรับนำมาประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน เนื่องจากมีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรง ขึ้นรูปได้ง่าย และสามารถนำมาปรับปรุงสมบัติได้หลากหลาย [2-4]

วัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ พอลิเมอร์เมตริก (Polymer Matrix) และส่วนที่เป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcement Materials) ซึ่งส่วนที่เป็นพอลิเมอร์เมตริก ทำหน้าที่เป็นกาวประสานยึดวัสดุเสริมแรงทำให้เกิดความคงรูปของชิ้นงานคอมพอสิต โดยพอลิเมอร์เมตริกที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ผลิตเป็นเกราะกันกระสุนที่มีประสิทธิภาพสูงคือ เทอร์โมเซตเรซิน เช่น อีพอกซี (Epoxy) ฟีนอลิกส์ (Phenolics) ไวนิลเอสเตอร์ (Vinyl Ester) และพอลิเบนซอกซาซีน (Polybenzoxazine) [5-15] เป็นต้น และส่วนที่เป็นวัสดุเสริมแรง นิยมใช้เส้นใยเป็นวัสดุเสริมแรงซึ่งสามารถช่วยเพิ่มสมบัติทางกลให้สูงขึ้นเหมาะสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ผลิตเป็นเกราะกันกระสุน โดยวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ที่นิยมนำมาผลิตเกราะกันกระสุนได้แก่ เส้นใยอะรามิด (Aramid Fiber) หรือที่รู้จักในชื่อทางการค้าคือ เคฟลาร์ (Kevlar), เส้นใยพอลิเอธิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (Ultra High Molecular Weight Polyethylene:

UHMWPE), เส้นใยแก้ว (Glass Fiber) และเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) เป็นต้น จึงส่งผลให้เกราะกันกระสุนที่ผลิตจากวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตมีความแข็งแรงสูงและน้ำหนักเบา [5-13, 16]

พอลิเบนซอกซาซีน [14,15 และ17] เป็นเทอร์โมเซตเรซินที่พัฒนาจากฟีนอลิกส์เรซินมีสมบัติที่โดดเด่น คือ สังเคราะห์ได้ง่าย ไม่เกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้อื่นจากการบ่มมอดอเมอร์ให้เป็นพอลิเมอร์มีเสถียรภาพทางความร้อนและทางกลสูง ค่าการหดตัวจากการขึ้นรูปใกล้ศูนย์ ค่าการดูดซึมน้ำต่ำ ค่าความหนืดก่อนการขึ้นรูปต่ำ และสามารถทำอัลลอยด์ร่วมกับเรซินอื่นได้หลายชนิด เช่น ระบบของพอลิเบนซอกซาซีนกับอีพอกซี [18] พอลิเบนซอกซาซีนกับสารไดแอนไฮไดรด์ [19] และพอลิเบนซอกซาซีนกับยูรีเทน [20-22] เป็นต้น ทำให้ได้เรซินมีสมบัติกว้างขวางและหลากหลายมากขึ้น

เส้นใยคาร์บอนประกอบด้วยแกรไฟต์ (Graphite) ซึ่งเป็นรูปแบบของคาร์บอนบริสุทธิ์ ประกอบด้วยวงแหวน 6 เหลี่ยมต่อกันเป็นรังผึ้งมีสมบัติที่โดดเด่นคือ น้ำหนักเบา มีความแข็งแรงต่อแรงดึงในทิศตั้งฉากสูง ทนทานต่อการกระแทก ทนทานต่อสารเคมีและความร้อนสูง และทนต่อการขีดถู สมบัติดังกล่าวข้างต้นทำให้เส้นใยคาร์บอนได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมการบิน วิศวกรรมอวกาศ การทหาร อุตสาหกรรมยานยนต์ และการกีฬา เป็นต้น ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะใช้พอลิเบนซอกซาซีนเป็นพอลิเมอร์เมตริกหลักทำงานร่วมกับเส้นใยคาร์บอนที่มีโครงสร้างการทอแบบต่าง ๆ เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมพอสิต [23, 24]

โดยทั่วไปเกราะแข็งกันกระสุนที่เตรียมจากวัสดุคอมพอสิตประกอบด้วย 2 ส่วน ที่สำคัญ คือ แผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะ (Strike Panel) ทำหน้าที่ทำลายหัวกระสุนให้แตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ และช่วยลดความเร็วของลูกกระสุนก่อนถึงแผ่นหลังหรือแผ่นดูดซับพลังงาน ต้องมีสมบัติที่แข็งแรง รับแรงปะทะจากกระสุนปืนได้ในหลายตำแหน่ง และสามารถทำลายหัวกระสุนปืน และส่วนที่ 2

คือ แผ่นหลังหรือแผ่นดูดซับพลังงาน (Support Panel) ทำหน้าที่ดูดซับพลังงาน กระจายแรงปะทะตามแนวเส้นใย และทำให้กระสุนสูญเสียพลังงานจนหยุดในที่สุด ต้องมีสมบัติที่เหนียว ยืดหยุ่น และดูดซับพลังงานได้สูง [1, 25] วัสดุคอมพอสิตประเภทเสริมแรงด้วยเส้นใยการทอเริ่มมีบทบาทมากขึ้นในการผลิตชิ้นงานในอุตสาหกรรมยานยนต์ งานด้านโยธา งานด้านการต้านทานแรงกระแทก เป็นต้น เนื่องจากวัสดุคอมพอสิตประเภทเสริมแรงด้วยเส้นใยการทอมีข้อดีในแง่ของความทนทานต่อการเปลี่ยนรูป (Stiffness) การรับและกระจายแรง (Stress and Stress Distribution) ที่ดี [2] ส่วนการเสริมแรงที่เป็นเส้นใยการทอที่ใช้โดยทั่วไปเป็นการทอโครงสร้างแบบสองมิติ ซึ่งเป็นพื้นฐานการทอที่ง่าย มีหลายรูปแบบ ได้แก่ การทอลายขัดธรรมดา (Plain Weave Fabric) การทอลายสองหรือลายทแยง (Twill Weave Fabric) และ การทอลายตัววน (Satin Weave Fabric) เป็นต้น จากงานวิจัยของ Saiman M.P. และคณะ (2014) วัสดุเสริมแรงที่มีลักษณะโครงสร้างการทอเส้นใยที่แตกต่างกันย่อมมีผลต่อคุณสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน [27] ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และทางกลของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต โดยใช้พอลิเบนซอซซาลีนเรซินเป็นเมทริกซ์ และใช้โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบทอลายขัดธรรมดา ทอลายสองหรือลายทแยง และคาร์บอนทิศทางเดียว (Unidirectional Carbon Fabric) เป็นวัสดุเสริมแรง เพื่อใช้ในการพัฒนาทำเกราะกันกระสุนต่อไป [5-15]

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ และ ทางกลของวัสดุคอมพอสิตโดยใช้เบนซอซซาลีนเรซินเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลักษณะต่าง ๆ

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Murugan และคณะ (2014) [26] ศึกษาผลของสมบัติทางกลจากการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตของอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอน โดยกำหนดจำนวนชั้น และการจัดลำดับชั้นจำนวน 4 ชั้นงาน โดยทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง, แรงดัดโค้ง และแรงกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM D3039, ASTM D790 และ ASTM D256 ตามลำดับ ผลที่ได้วัสดุที่มีการจัดลำดับชั้นในรูปแบบ GCCG (โครงสร้างแซนวิชที่มีเส้นใยคาร์บอนเป็นแกนกลาง) ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกสูงกว่าการจัดลำดับชั้นในรูปแบบ CGGC ซึ่งมีค่าเท่ากับ 194.8 เมกะปาสคาล และ 143.58 กิโลจูล/ตารางเมตร ตามลำดับ ในส่วนการจัดลำดับชั้นในรูปแบบ CGGC (โครงสร้างแซนวิชที่มีเส้นใยแก้วเป็นแกนกลาง) ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดโค้งสูงกว่าการจัดลำดับชั้นในรูปแบบ GCCG ซึ่งมีค่าเท่ากับ 198.7 เมกะปาสคาล

Saiman M.P. และคณะ (2014) [27] ศึกษาโครงสร้างการทอเส้นใยเสริมแรงที่ทำจากเส้นใยปอแก้วจำนวนสี่รูปแบบที่แตกต่างกัน เหตุผลในการใช้รูปแบบการทอที่แตกต่างกันเพื่อลดเปอร์เซ็นต์การหักเห เนื่องจากช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานได้ รูปแบบการทอคือ Twill 4/4, Satin 8/3 และ Basket 4/4 ในขณะที่ Plain 1/1 ใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานสำหรับความต้านทานแรงดึง การทอเส้นใยที่มีรูปแบบการทอแตกต่างกันได้รับการปรับให้เหมาะสมโดยใช้แบบจำลองของซอฟต์แวร์ Wisetex โดยใช้ พอลิเอสเตอร์ไม่อิมตัว (UPE) เป็นเมทริกซ์เรซินที่ใช้เป็นตัวประสานในชิ้นงานโดยใช้กระบวนการสุญญากาศเพื่อผลิตแผ่นชิ้นงานคอมพอสิต จากนั้นนำชิ้นงานคอมพอสิตมาทดสอบความต้านทานแรงดึง และทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของชิ้นงานคอมพอสิต จากผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างการทอที่มีลักษณะแตกต่างกันส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานคอมพอสิตเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยปอแก้ว โดยโครงสร้างการทอที่มี

เปอร์เซ็นต์การหักที่ต่ำ จะส่งผลให้ชิ้นงานคอมพอสิตมีค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้น

Ismail A.E. และคณะ (2015) [28] ศึกษาความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมพอสิตพอลิเอสเตอร์เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยปอแก้ว เส้นใยปอแก้วที่นำมาใช้ผ่านการทอและจัดเรียงตามแนวเส้นใย ทำการทดสอบด้วยพอลิเอสเตอร์เรซิน เพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นชิ้นงานคอมพอสิตที่มีรูปร่างตามรูปทรงเรขาคณิตมาตรฐานการทดสอบและทำการโหลดในแนวแกนเดียวกับชิ้นงาน เพื่อศึกษาคุณสมบัติแรงดึง โดยทำการศึกษาตัวแปรสำคัญ 2 ตัว คือ ทิศทางของเส้นใย และจำนวนชั้น จากผลการศึกษาพบว่า ทิศทางการวางแนวของเส้นใยในการทดสอบมีผลอย่างมากต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุด แต่ไม่ได้มีผลกับโมดูลัสความยืดหยุ่นของชิ้นงาน มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและโมดูลัสของ Young อยู่ในช่วง 27.7-30.9% และ 2.4-3.7% ตามลำดับ โดยทำการโหลดชิ้นงานให้เส้นใยอยู่ในแนวแกนเดียวกับแรงดึง ในการทดสอบ

Rios-Soberanis และคณะ (2012) [29] ศึกษาพฤติกรรมทางกลของวัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างการทอเส้นใยกับลำดับความเสียหายภายใต้การรับแรงดึงสำหรับคอมพอสิตเสริมด้วยโครงสร้างการทอของเส้นใยแก้ว โดยใช้โครงสร้างการทอที่แตกต่างกัน คือ แบบเสื้อ (เส้นใยสุม) และแบบผ้าทอ (แกนสองแกนสลับกัน) โดยใช้ชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตขึ้นรูปโดยใช้อีพอกซีเรซินเป็นเมทริกซ์ บ่มด้วยสารชุบแข็งที่อุณหภูมิสูง โดยใช้ Bifunctional Epoxy และ Diglycidyl Ether of Bisphenol A (DGEBA) ผสมกับ Tetrafunctional amine และ Diamino Diphenyl Sulfone (DDS) ที่อุณหภูมิสูง จะได้วัสดุคอมพอสิตที่มีลักษณะโปร่งใสมีความแข็ง และมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม จากการวิเคราะห์และบ่งชี้กระบวนการเกิดความเสียหาย และกลไกความล้มเหลวซึ่งนำไปสู่การแตกหักของวัสดุ พบว่าโครงสร้างการทอเสริมแรงเส้นใยรูปทรงเลขาคณิตส่งผลต่อการเกิดความเค้น (Stress) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้น

ของความล้มเหลวของชิ้นงาน และการแพร่กระจายของรอยร้าวนำไปสู่การแยกขนาดเล็กในพื้นที่ส่วนต่อประสานระหว่างเส้นใยตามยาวและเส้นใยตามขวางโดยโครงสร้างการทอที่มีอิทธิพลต่อความล้มเหลวของเส้นใยจะวางขนานกับทิศทางการโหลดในมุม 0 องศา และ 90 องศาของการทดสอบภายใต้การทดสอบแรงดึง

P.V.Cavallaro และคณะ (2015) [30] ศึกษาผลกระทบของโครงสร้างการทอ และการไล่ระดับการหัก (CGs) ของวัสดุคอมพอสิตอีพอกซีเรซินที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยเคพล่า การศึกษาผลกระทบของรูปแบบการทอและความหักบนเส้นใยที่มีต่อระดับความทนทานต่อความเสียหายและความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์ เสริมแรงด้วยเส้นใยการทอ (WFRP) จากงานวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบ และตรวจสอบกลไกความล้มเหลว, การยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์, การแตกร้าวของเมทริกซ์ และเส้นใย, การโก่งตัวของเส้นใยซึ่งเป็นผลมาจากการโหลดแบบคงที่และไดนามิก, การทดสอบด้วยแรงดัด แรงเฉือนแบบคานสั้น, การตกกระแทก, การโค้งงอหลังจากการกระแทก, แรงกระแทกแบบบอลิสติก และการบีบอัดแบบแยกส่วน (SHCB) โดยทำการทดสอบกับชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยเคพล่าจำนวน 20 ชั้น โดยมีโครงสร้างการทอเส้นใยเคพล่าที่แตกต่างกันสามรูปแบบ ได้แก่ โครงสร้างการทอเส้นใยลายขัดธรรมดา โครงสร้างการทอเส้นใยลายทแยง 2×2 และโครงสร้างการทอเส้นใยแบบชาติน 4H ลามิเนตถูกสร้างขึ้นโดยมีสไลด์การทอแบบไล่ระดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้โครงสร้างการทอ และการไล่ระดับการหัก (CGs) ของวัสดุคอมพอสิต แบบสานส่งผลเชิงบวกต่อการกระจายความเค้นเชิงพื้นที่ในช่วงหนึ่ง เมื่อมีการโหลดที่รุนแรง และความเค้นระหว่างเส้นใย และเมทริกซ์ ที่ยึดเกาะกันเหนียวแน่น นำไปสู่ความสามารถในการหลุดลอกเมื่อวัสดุที่แตกหักเป็นชั้นๆ ลดลง ดังนั้นการพึงพาประสิทธิภาพเชิงกลกับรูปแบบการ

ทอเส้นใย, การหยักของเส้นใย และการไล่ระดับการหยัก (CGs) มีผลต่อระดับความทนทานต่อความเสียหายและความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยการทอ (WFRP) ได้ จากผลการทดลองพบว่าเส้นใยที่มีโครงสร้างการทอเส้นใยลายขัดธรรมดา (Plain) ซึ่งมีรอยหยักมากที่สุด ส่งผลให้สมบัติทางกล ความแข็งแรง และการดูดซับพลังงานได้น้อยลง

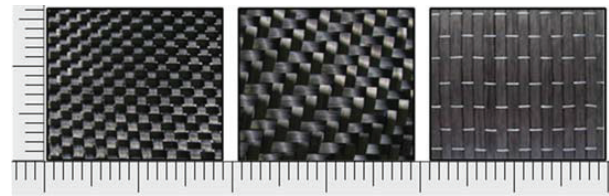
4. วิธีดำเนินการศึกษา

4.1 การเตรียมเมทริกซ์เรซิน

เบนซอกซาซีนมอนอเมอร์ (BA-a) สังกะราษท์จากบิสฟีนอลเอ (Bisphenol A) บริษัท PTT Phenol ประเทศไทยฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) บริษัท Merck-Chemical Co, Ltd. ประเทศเยอรมนี และอะนิลีน (Aniline) บริษัท LOBA Chemie Pvt. Ltd. ประเทศอินเดีย ในอัตราส่วน 1:4:2 โดยโมล ตามลำดับ ด้วยเครื่องให้ความร้อนพร้อมปั่นกวนสารละลายที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที โดยเทคนิคไม่ใช้ตัวทำละลาย ทิ้งไว้ให้เย็น และนำมาบดด้วยโกร่งบดสารให้ละเอียดจะได้ของแข็งลักษณะเป็นผงสีเหลืองที่อุณหภูมิห้อง

4.2 การเตรียมวัสดุพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอน

4.2.1 วัสดุคอมพอสิตคือ พอลิเบนซอกซาซีนเรซินเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนในอัตราส่วน 35:65 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เตรียมโดยนำพอลิเบนซอกซาซีนให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส ทาลงบนโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอน 3 แบบ ได้แก่ ทอลายขัดธรรมดา ทอลายสองหรือทอลายทแยง และผ้าคาร์บอนทิศทางเดียว ดังภาพที่ 1 บนเตาให้ความร้อน (Hot plate) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพที่ 1 โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ (ก) โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา (ข) โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายสองหรือลายทแยง, (ค) โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายทิศทางเดียว

4.2.2 การเรียงชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนชนิดต่าง ๆ ในการทดสอบสมบัติทางกลทำการทดสอบ 7 ชิ้นงานต่อโครงสร้างการทอ โดยทุก ๆ ชิ้นงานมีจำนวน 8 ชั้นเท่ากันทุกชิ้นงาน เพื่อให้ได้ความหนาตามมาตรฐานการทดสอบโดยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบทอลายขัดธรรมดา และทอลายสองหรือลายทแยง (เส้นใยการทอลักษณะทิศทางมุม 0 และ 90 องศา) มีการจัดเรียงในทิศทางเดียวกันทุกชั้น ส่วนการจัดเรียงของโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนผ้าคาร์บอนทิศทางเดียว (ไม่ใช่เส้นใยการทอ) จะสลับไขว้กันลักษณะทิศทางมุม 0 และ 90 องศา และขึ้นรูปชิ้นงานคอมพอสิตโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molder) ที่ความดัน 15 เมกะปาสกาล และที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.3 การวัดความหนาแน่นของวัสดุพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนชนิดต่าง ๆ

ความหนาแน่นของวัสดุพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ทำการทดสอบโดยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำตามมาตรฐาน ASTM D08-792 (Method A) จำนวน 5 ชิ้นงาน ซึ่งแต่ละชิ้นงานคอมพอสิตมีจำนวนชั้น 8 ชั้น โดยมีขนาด 50 มิลลิเมตร × 25 มิลลิเมตร และทำการชั่งน้ำหนักทั้งในอากาศและในน้ำ และทำการ

เปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นตามทฤษฎีโดยใช้ข้อมูลปริมาณเส้นใย เพื่อประเมินคุณภาพของชิ้นงานคอมพอสิตความหนาแน่นคำนวณโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\rho = \frac{A}{A-B} \rho_o \quad (1)$$

โดย ρ และ ρ_o คือ ความหนาแน่นของชิ้นงานและของน้ำที่อุณหภูมิที่กำหนด (กรัม/ลบ.ซม.) ตามลำดับ

A และ B คือ น้ำหนักของชิ้นงานในอากาศและในน้ำ (กรัม) ตามลำดับ

4.4 การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Test) ของวัสดุพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

การทดสอบความต้านทานแรงดึง โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3039 ทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (Instron Model 8801) โดยใช้ความเร็วในการดึง (Test Speed) 2 มิลลิเมตร/นาที ด้วยน้ำหนักกด 100 กิโลนิวตัน และความยาวของเกจ (Gage Length) 70 มิลลิเมตร จำนวน 5 ชิ้นงาน ซึ่งแต่ละชิ้นงานคอมพอสิตมีจำนวนชั้น 8 ชั้น

4.5 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural Test) ของวัสดุพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

การทดสอบความต้านแรงกระแทก โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790 ทดสอบแบบ 3 จุด (3-Points Bending) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (Instron รุ่น 5567) ใช้ความเร็วในการดึง (Test Speed) 2 มิลลิเมตร/นาที ด้วยน้ำหนักกด 1 กิโลนิวตัน และอัตราระยะห่างของขารองรับชิ้นงาน (Ratio of Span to Depth) เท่ากับ 16:1 จำนวน 5 ชิ้นงาน ซึ่งแต่ละชิ้นงานคอมพอสิตมีจำนวนชั้น 8 ชั้น

4.6 การทดสอบความต้านแรงกระแทก (Impact Test) ของวัสดุพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

การทดสอบความต้านแรงกระแทก โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 แบบไอซอด (Izod Type) ทดสอบด้วย เครื่อง Pendulum Impact Tester (Ceast รุ่น DAS 8000 Junior) ใช้ลูกตุ้มขนาด 25 จูล จำนวน 5 ชิ้นงาน ซึ่งแต่ละชิ้นงานคอมพอสิตมีจำนวนชั้น 8 ชั้น ค่าความแข็งแรงต่อการกระแทก (Impact strength) คำนวณโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\text{Impact Strength} = \frac{W}{A} \quad (2)$$

โดย W คือ ค่าพลังงานกระแทก (กิโลจูล, kJ)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (ตารางเมตร, m^2)

4.7 การวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐาน (Morphology) ของวัสดุพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

การวิเคราะห์การยึดเกาะระหว่างเมตริกซ์พอลิเบนซอกซาซินกับเส้นใยคาร์บอนเสริมแรงแบบต่าง ๆ วิเคราะห์ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยนำชิ้นงานมาเคลือบพื้นผิวด้วยทองคำก่อนนำไปวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐาน ซึ่งใช้ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์

5. ผลการศึกษา

5.1 ความหนาแน่นของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

การวัดค่าความหนาแน่นเป็นสิ่งสำคัญสำหรับประเมินคุณภาพของวัสดุ โดยให้ข้อมูลลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยในเมตริกซ์ของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตรวมถึงการเกิดช่องว่างหรือช่องว่างของอากาศภายในวัสดุ โดยค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดลอง ความหนาแน่นตามทฤษฎี และช่องว่างภายในชิ้นงานของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

แสดงดังตารางที่ 1 โดยค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองคำนวณดังสมการที่ 1 ส่วนค่าความหนาแน่นตามทฤษฎี และช่องว่างภายในชิ้นงานคำนวณดังสมการที่ 3 และ 4 [31] ตามลำดับ โดยความหนาแน่นของเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดาและลายสองหรือลายทแยง มีค่าเท่ากับ 1.76 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ความหนาแน่นของเส้นใยคาร์บอนลายทิศทางเดียวมีค่าเท่ากับ 1.80 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และความหนาแน่นของพอลิเบนซอกลาซีนมีค่าเท่ากับ 1.19 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

$$\rho_{ct} = \frac{1}{\frac{w_f}{\rho_f} + \frac{(1-w_f)}{\rho_m}} \quad (3)$$

โดย ρ_{ct} คือ ความหนาแน่นตามทฤษฎีของวัสดุคอมพอสิต (The Density of Composite Material) หน่วย คือ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ρ_f คือ ความหนาแน่นของเส้นใยเสริมแรง (The Density of Fiber) หน่วยคือ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ρ_m คือ ความหนาแน่นของเมตริกซ์ (The Density of Matrix Resin) หน่วยคือ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

w_f คือ สัดส่วนน้ำหนักของเส้นใยเสริมแรง (The Weight Fraction of Fiber) หน่วยคือ กรัม

$$\Delta v = \frac{\rho_{ct} - \rho_{ex}}{\rho_{ct}} \quad (4)$$

โดย Δv คือ ช่องว่างภายในชิ้นงาน (Void Fraction)

ρ_{ct} คือ ความหนาแน่นตามทฤษฎีของวัสดุคอมพอสิต หน่วย คือ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ρ_{ex} คือ ความหนาแน่นจากการทดลองของวัสดุคอมพอสิต (The Density of Experimental) หน่วยคือ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ทำการคำนวณชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลักษณะต่าง ๆ แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุคอมพอสิต และค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนช่องว่างภายในชิ้นงานของวัสดุ

คอมพอสิต ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความหนาแน่นจากการทดลองจากทฤษฎี และช่องว่างภายในชิ้นงานของการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกลาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

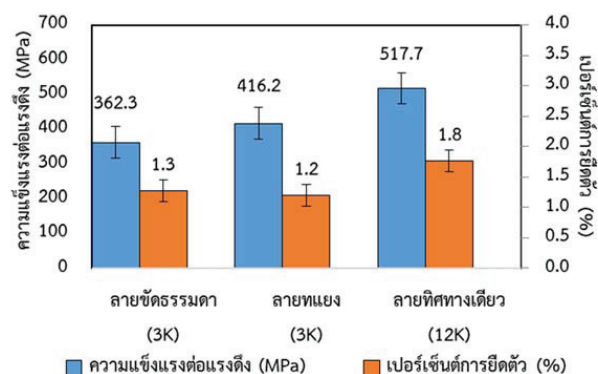
ชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ	ความหนาแน่นจากการทดลอง (ρ_{ex}) (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความหนาแน่นตามทฤษฎี (ρ_{ct}) (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	อัตราส่วนช่องว่างภายในชิ้นงาน (Δv) (%)
การทอลายขัดธรรมดา (Plain Weave Fabric)	1.428±0.028	1.507	5.258±1.839
การทอลายสองหรือลายทแยง (Twill Weave Fabric)	1.457±0.028	1.507	3.332±1.839
การทอลายทิศทางเดียว (Unidirectional Carbon Fabric)	1.450±0.026	1.526	4.993±1.726

จากตารางที่ 1 ความหนาแน่นจากการทดลองของชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเบนซอกลาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ มีค่าเท่ากับ 1.428, 1.457 และ 1.450 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ในชิ้นงานคอมพอสิตเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา ลายสองหรือลายทแยง และลายทิศทางเดียว ตามลำดับ ซึ่งความหนาแน่นของชิ้นงานคอมพอสิตที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นตามทฤษฎี ส่งผลให้สัดส่วนช่องว่างภายในชิ้นงานของวัสดุคอมพอสิตมีค่าต่ำ ดังตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 ความหนาแน่นจากการทดลองของชิ้นงานคอมพอสิตเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลาย ขัดธรรมดาลายสองหรือลายทแยง และลายทิศทางเดียวมีอัตราส่วนช่องว่างภายในชิ้นงานเท่ากับ 5.258 ± 1.839, 3.332 ± 1.839 และ 4.993 ± 1.726 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยสัดส่วนช่องว่างภายในชิ้นงาน

อยู่ระหว่าง $3.332 \pm 1.839 - 5.258 \pm 1.839$ เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับตารางการเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตเพื่อทำโครงสร้าง (Structural Composites) กับวัสดุคอมโพสิตเพื่อทำเกราะกันกระสุนน้ำหนักเบา (Lightweight Ballistic Composites) ของ Bhatnagar A. (2006) [32] พบว่าค่าช่องว่างภายในชิ้นงานของวัสดุคอมโพสิตเพื่อทำเกราะกันกระสุนน้ำหนักเบาต้องมีความมากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ถือว่ามีค่าช่องว่างภายในชิ้นงานที่ต่ำกว่าสามารถยอมรับได้ซึ่งบ่งบอกถึงช่องว่างอากาศในชิ้นงานที่น้อยและความสม่ำเสมอภายในชิ้นงานแต่ละชิ้นนั่นเอง นอกจากนี้แล้วในการทดลองของ Agarwal และคณะ (2014) [31] ได้ศึกษาการจัดลำดับชั้นของชิ้นงานคอมโพสิตอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วโดยมีอัตราส่วนช่องว่างในชิ้นงานอยู่ระหว่าง $0.705 - 5.156$ เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการที่ค่าอัตราส่วน ช่องว่างภายในชิ้นงานที่ใช้ทดสอบสูง ส่งผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าพอลิเบนซอกซาซีนเรซินมีความสามารถในการอบเส้นใยทั่วถึงและยึดติดกับเส้นใยคาร์บอนเป็นอย่างดี เนื่องจากพอลิเบนซอกซาซีนเรซินมีคุณสมบัติด้านความหนืดขณะหลอมเหลวต่ำ

5.2 ความต้านทานแรงดึง (Tensile Test) ของวัสดุคอมโพสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ สมบัติความต้านทานแรงดึงเป็นสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงหรือความต้านทานในการเปลี่ยนรูปร่างเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ



ภาพที่ 2 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

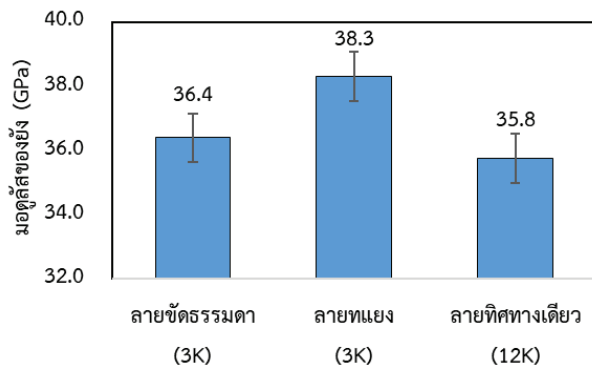
จากภาพที่ 2 ค่าความแข็งแรงของแรงดึงบ่งบอกถึงค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตพอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา ลายสองหรือลายทแยง และลายทิศทางเดียว มีค่าเท่ากับ 362 ± 16 , 416 ± 17 และ 517 ± 26 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จะเห็นว่าวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายทิศทางเดียว มีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่าวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างแบบการทอลายขัดธรรมดา และการทอลายสองหรือลายทแยง เนื่องจากโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายทิศทางเดียวนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงมีความหนาแน่นของเส้นใย และจำนวน

เส้นใยหรือฟิลาเมนต์ที่สูงกว่า ดังตารางที่ 2 และมีเส้นใยทั้งหมดขนานกับทิศทางการทดสอบแรงดึงในทิศทางเดียว (Uniaxial Tensile Test) ซึ่งเป็นทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดขวางของวัสดุ จึงมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่าวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา และลายสองหรือลายทแยง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ismail A.E. และคณะ (2015) [28] พบว่าทิศทางการวางแนวของเส้นใยในการทดสอบมีผลอย่างมากต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุด และเนื่องจากโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา และลายสองหรือลายทแยงซึ่งเป็นโครงสร้างการทอ 2 มิติที่มีกลุ่มเส้นใยตามยาวและเส้นใยตามขวาง (Warp และ Weft) โดยกลุ่มเส้นใยทั้งสองสอดประสานกัน (Interlacing) เกิดการแยกขนาดเล็กในพื้นที่ส่วนต่อประสานทำให้เกิดรอยแยกและรอยแตกของวัสดุได้ง่ายเมื่อได้รับแรงดึงในทิศทางเดียว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rios-Soberanis และคณะ (2012) [29] พบว่ารอยร้าวช่วยเพิ่มการแยกและความล้มเหลวของชิ้นงานทดสอบอธิบายว่ารอยแตกตามขวางจะนำไปสู่การแยกขนาดเล็กในพื้นที่ส่วนต่อประสานระหว่างเส้นใยตามยาวและเส้นใยตามขวาง และยังระบุด้วยว่าการสอดแทรกของเส้นใยตามยาวเป็นจุดเริ่มต้นของรอยแตกที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเครียดสูงจึงทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นของรอยแตก และจากค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา ลายสองหรือลายทแยง และลายทิศทางเดียว มีค่าเท่ากับ 1.27 ± 0.13 , 1.20 ± 0.09 และ 1.76 ± 0.11 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พบว่าวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายทิศทางเดียวมีร้อยละการยืดตัวของชิ้นงานทดสอบที่จุดขาดเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวเริ่มต้นที่สูงกว่าวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดาและลายสองหรือลายทแยงเนื่องจากความหนาแน่นของเส้นใยและจำนวนเส้นใยหรือ

ฟิลาเมนต์ที่สูงกว่า ดังตารางที่ 2 คุณสมบัติของโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ ตัวแปรอิสระจึงทำให้วัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายทิศทางเดียวมีความสามารถในการยืดตัวที่สูงกว่าวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดาและการทอลายสองหรือลายทแยง ผลลัพธ์เหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนมีอิทธิพลอย่างมาก ต่อความต้านทานแรงดึง ความสามารถในการยืดตัว และความสามารถนำไปขึ้นรูปของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซิน [33, 34]

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ [35]

หัวข้อ	การทอลายขัดธรรมดา	การทอลายสองหรือลายทแยง	ผ้าคาร์บอนทิศทางเดียว
บริษัท Companies	Toray	Toray	Toray
ชนิดของเส้นใย Fiber Type	T300	T300	T700S
จำนวนเส้นใยฟิลาเมนต์ Filament Count	3K	3K	12K
เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย Filament Diameter (μm)	7	7	7
ความแข็งแรงต่อแรงดึง Tensile Strength (MPa)	3530	3530	4800
มอดูลัสของยัง Tensile Modulus (GPa)	230	230	230
เปอร์เซ็นต์การยืดตัว Break Elongation (%)	1.5	1.5	2.1
ความหนาแน่นของเส้นใย Density (g/cm^3)	1.76	1.76	1.80
เทกซ์ Tex (g/km) น้ำหนักเป็นกรัมของเส้นด้ายยาว 1000 เมตร	198	198	800



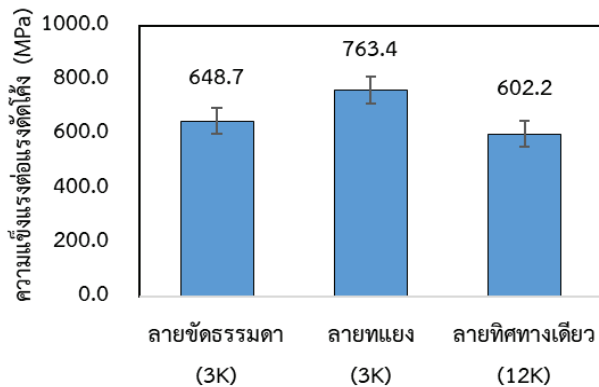
ภาพที่ 3 ผลการทดสอบมอดูลัสของยังของวัสดุโพลิเบน-
ซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วย โครงสร้างการทอเส้นใย
คาร์บอนแบบต่าง ๆ

จากภาพที่ 3 แสดงค่ามอดูลัสของยังของวัสดุคอม-
พอสิตโพลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอ
เส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา ลายสองหรือลายทแยง
และลายทิศทางเดียวมีค่าเท่ากับ 36.40 ± 1.27 ,
 38.30 ± 1.29 และ 35.77 ± 0.83 จิกะปาสคาล ตามลำดับ
จะเห็นว่าวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยการทอลายสอง
หรือลายทแยงมีค่ามอดูลัสสูงกว่าวัสดุคอมพอสิต ที่เสริม
แรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา
และลายทิศทางเดียว เนื่องจากโครงสร้างการทอเส้นใย
คาร์บอนลายสองหรือลายทแยงเป็นโครงสร้างการทอ
2 มิติ ที่มีกลุ่มเส้นใยตามยาวและเส้นใยตามขวาง โดย
กลุ่มเส้นใยทั้งสองสอดประสานกันและโครงสร้างการ
ทอเส้นใยคาร์บอนลายสองหรือลายทแยงที่เกิดการสอด
ประสานกันมีน้อยกว่าโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอน
ลายขัดธรรมดา จึงมีค่าความแข็งแรง (Stiffness)
สูงกว่าโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา
และลายทิศทางเดียว จึงช่วยเพิ่มความทนทานต่อการ
เปลี่ยนรูปให้แก่ชิ้นงาน วัสดุคอมพอสิตได้ดี

5.3 ความต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural test)
ของวัสดุคอมพอสิตโพลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วย
โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

ค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดโค้ง (Flexural Strength) ของ
วัสดุโพลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอ
เส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 4 พบว่าค่า
ความแข็งแรงต่อแรงดัดโค้งของวัสดุคอมพอสิตโพลิเบน-
ซอกซาซีนเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอน
ลายขัดธรรมดา การทอลายสองหรือลายทแยง และลาย
ทิศทางเดียว มีค่าเท่ากับ 649 ± 56 , 763 ± 55 และ
 602 ± 26 เมกะปาสคาล ตามลำดับ วัสดุคอมพอสิตที่
เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายสอง
หรือลายทแยงมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดโค้งสูงกว่า
วัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใย
คาร์บอนลายขัดธรรมดา และลายทิศทางเดียว เนื่องจาก
โครงสร้างการทอ 2 มิติ มีความสามารถในการส่งผ่าน
ภาระได้พร้อมกันทั้ง 2 ทิศทาง ในระนาบที่ตั้งฉากกันใน
แนวแกน X และแกน Y หรือตามยาวและตามขวาง จึง
มีความทนทานต่อการเปลี่ยนรูป การรับและกระจายแรง
(Stress and Stress Distribution) ที่ดีกว่าวัสดุคอมพอสิต
ที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลาย
ทิศทางเดียว นอกจากนี้โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอน
ลายสองหรือลายทแยงเป็นการทอ 2 มิติ ที่มีกลุ่มเส้นใย
ตามยาวและเส้นใยตามขวางที่ทอสอดประสานในแนวตั้ง
ฉากโดยการแทรกเส้นใยผ่านช่องว่างของเส้นใยตามขวาง
เกิดเป็นระยะห่างของช่องว่างระหว่างเส้นใยซึ่งเป็นช่อง
ว่างที่เกิดจากการรกลายของเส้นใยเพื่อส่งผ่านเส้นใย
ตามขวางเข้าไปทำมุมหลักทอกับเส้นใยตามยาว (90 องศา)
ซึ่งการรกลับของโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอน
ลายสองหรือลายทแยงจะมีการสอดประสานกันที่น้อย
กว่าโครงสร้างการทอลายขัดธรรมดาจึงมีความสามารถ
โค้งงอได้มาก และการคืนกลับสู่สภาพเดิมต่อแรงดัดโค้ง
ได้ดีกว่าโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา
[36] ดังนั้นคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมพอสิตจะขึ้นอยู่กับ
รูปแบบโครงสร้างการทอของเส้นใยคาร์บอนด้วยเช่นกัน
ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Tong, Mouritz และ
Bannister (2002) [37] พบว่าคุณสมบัติของสิ่งทอจะขึ้น

อยู่กับชนิดของเส้นใยปริมาณเส้นใยที่ใช้ และรูปแบบการผลิตโดยรูปแบบและลวดลายบนพื้นเส้นใยและสิ่งทอจะขึ้นอยู่กับกรยกลสลับหรือการสอดประสานกันของเส้นใย

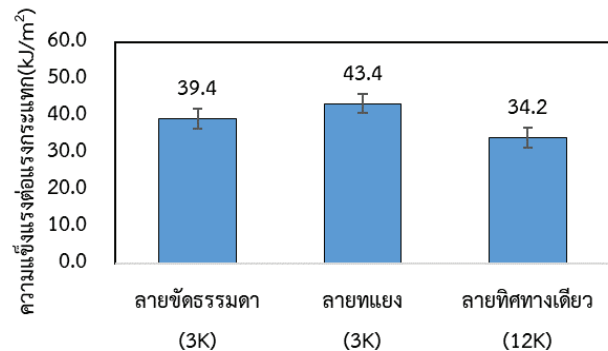


ภาพที่ 4 ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดัดโค้งของวัสดุพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

5.4 ความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Test) ของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหักของวัสดุซึ่งบ่งบอกถึงความเหนียว (Toughness) ของวัสดุนั้นเอง ดังภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกและวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่างๆ พบว่าค่าความแข็งแรงต่อการกระแทก (Impact Strength) ของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดาลายสองหรือลายทแยง และลายทิศทางเดียวมีค่าเท่ากับ 39 ± 7 , 43 ± 2 และ 34 ± 1 กิโลจูล/ตารางเมตรตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยโครงสร้าง การทอเส้นใยคาร์บอนลายสองหรือลายทแยงมีสมบัติในการดูดซับพลังงานที่ดี

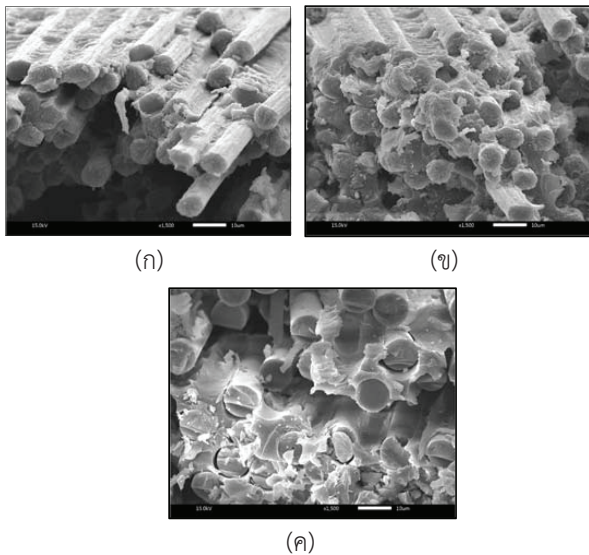
กว่าวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยลายขัดธรรมดาและลายทิศทางเดียว เนื่องจากมีลักษณะการทอเส้นใยเป็นโครงสร้างแบบ 2 มิติ จึงที่ความทนทานต่อการเปลี่ยนรูปการรับและกระจายแรงได้ดี



ภาพที่ 5 ความแข็งแรงต่อแรงกระแทกของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอน แบบต่าง ๆ

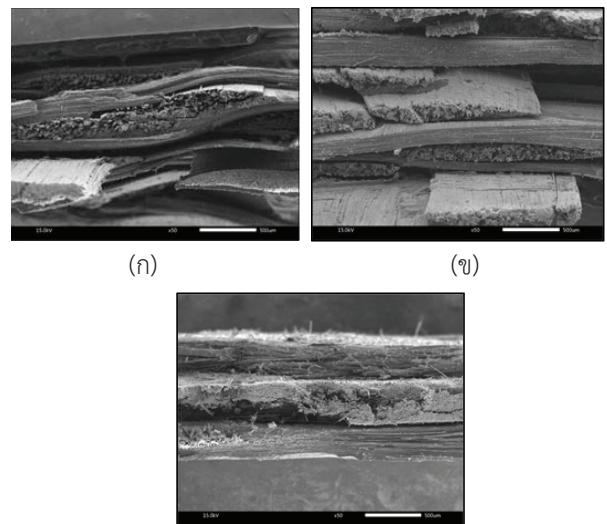
5.5 ลักษณะสัณฐานของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

การศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด รุ่น JSM-6610 ขนาดกำลังขยาย 1500 เท่า (X1500) เพื่อตรวจสอบ การยึดติดกันระหว่างเมตริกซ์และเส้นใยเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิต โดยให้ข้อมูลเกี่ยวกับเฟสและลักษณะความเสียหายของวัสดุบ่งบอกถึงการตัดสินใจเลือกใช้เมตริกซ์และวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิต [38]



ภาพที่ 6 ลักษณะพื้นฐานของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ (ก) โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา (ข) โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายสองหรือลายทแยง, (ค) โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายทิศทางเดียว ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย X1500

จากภาพที่ 6 แสดงลักษณะพื้นผิวของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าพอลิเบนซอกซาซีนเรซินมีความสามารถในการอบเส้นใยทั่วถึงและยึดติดได้ดีกับเส้นใยคาร์บอนในโครงสร้างการทอแบบต่าง ๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดความหนาแน่นของวัสดุในหัวข้อการทดลอง 5.1 จากการคำนวณอัตราส่วนช่องว่างภายในชิ้นงานจากความหนาแน่นในการทดลองและความหนาแน่นตามทฤษฎี



ภาพที่ 7 ลักษณะพื้นฐานของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ (ก) โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา (ข) โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายสองหรือลายทแยง, (ค) โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายทิศทางเดียว ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย X50

การศึกษาพื้นฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM-6610 ขนาดกำลังขยาย 50 เท่า (X50) เพื่อตรวจสอบดูโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ จากภาพที่ 7 แสดงลักษณะโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนที่แตกต่างกันตามรูปแบบการทอและการยกสลับหรือการสอดประสานกันของชิ้นงานคอมพอสิต

6. สรุปและอภิปรายผล

ในงานวิจัยได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและกายภาพของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ โดยใช้วัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยโครงสร้างการ

ทอเส้นใยคาร์บอนลาย ขัดธรรมดา ลายสองหรือลายทแยง และลายทิศทางเดียว จำนวน 8 ชั้น เพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลและกายภาพ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

6.1 พอลิเบนซอกซาซินเมตริกซ์ยึดติดได้ดีกับ โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา ลายสอง หรือลายทแยง และลายทิศทางเดียว ซึ่งตรวจสอบได้จากค่าช่องว่างภายในชิ้นงานจากการวัดค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีมีอัตราส่วนช่องว่างภายในชิ้นงานเท่ากับ 5.258 ± 1.839 , 3.332 ± 1.839 และ 4.993 ± 1.726 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยสัดส่วนช่องว่างภายในชิ้นงานอยู่ระหว่าง 3.332 ± 1.839 - 5.258 ± 1.839 เปอร์เซ็นต์ มีค่าต่ำบอกลถึงช่องว่างอากาศในชิ้นงานที่น้อยและสม่ำเสมอในชิ้นงานแต่ละชิ้นนั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะสัญญาณของวัสดุคอมพอสิต พอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นพอลิเบนซอกซาซินเรซินมีความสามารถในการอาบเส้นใยทั่วถึงและยึดติดได้ดีกับเส้นใยคาร์บอนในโครงสร้างการทอแบบต่าง ๆ เป็นอย่างดีเนื่องมาจากสมบัติความหนืดขณะหลอมเหลวต่ำของ พอลิเบนซอกซาซินเรซิน ซึ่งสัดส่วนช่องว่างภายในชิ้นงานที่ต่ำและการยึดติดได้ดีระหว่างพอลิเบนซอกซาซินเรซิน และเส้นใยคาร์บอนในโครงสร้างการทอแบบต่าง ๆ แสดงให้เห็นถึงคุณภาพในการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตที่ดี

6.2 วัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายทิศทางเดียวจะมีค่าความแข็งแรงต่อนแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นทิศทางการรับแรงดึงในทิศทางเดียว (Uniaxial Tensile Test) เป็นทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดขวางของวัสดุสูงสุด มีค่าเท่ากับ 517 ± 26 เมกะปาสคาล เนื่องจากโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายทิศทางเดียว มีความหนาแน่นของเส้นใยและจำนวนเส้นใยหรือฟิลาเมนต์ที่สูง โดยมีเส้นใย

คาร์บอนทั้งหมดในทิศทางเดียวกันซึ่งขนานกับทิศทางการทดสอบแรงดึงในทิศทางเดียวซึ่งเป็นทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดขวางของชิ้นงานคอมพอสิตจึงมีค่าความแข็งแรงต่อนแรงดึงสูง

6.3 วัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบลายสองหรือลายทแยงจะมีค่าความแข็งแรงต่อนแรงดัดโค้ง (Flexural Strength) ซึ่งมีทิศทางของแรงกดตั้งฉากกับชิ้นงานคอมพอสิตสูงสุด มีค่าเท่ากับ 763 ± 55 เมกะปาสคาล เนื่องจากโครงสร้างการทอ 2 มิติ มีความสามารถในการส่งผ่านภาระ (Load) ได้พร้อมกันทั้ง 2 ทิศทาง ในระนาบที่ตั้งฉากกันไปตามยาวและตามขวาง จึงมีความทนทานต่อการเปลี่ยนรูป (Stiffness) การรับและกระจายแรง (Stress and Stress Distribution) ได้ดี นอกจากนี้ ลักษณะโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายสองหรือลายทแยงมีจุดสัมผัส (Contact Friction) การหยัก (Crimp) และจุดการสอดประสานกัน (Intersection Point) ที่น้อยกว่าโครงสร้างการทอลักษณะอื่น ส่งผลให้มีคุณสมบัติความแข็งแรงต่อนแรงดัดโค้งที่สูงขึ้น

6.4 วัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบลายสองหรือลายทแยงยังมีค่าความแข็งแรงต่อการกระแทก (Impact Strength) ซึ่งมีทิศทางของแรงกระแทกจากการเหวี่ยงของลูกตุ้มตั้งฉากกับความหนาของชิ้นงานคอมพอสิตสูงสุดมีค่าเท่ากับ 43 ± 2 กิโลจูล/ตารางเมตร จึงมีสมบัติในการดูดซับพลังงานสูงสุดจึงเหมาะสำหรับนำมาพัฒนาเกราะแข็งกันกระสุนจากวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตในส่วน of แผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะ

6.5 จากการผลการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้พบว่าวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบลายสองหรือลายทแยงมีสมบัติความหนาแน่นต่ำ ค่าความแข็งแรงต่อนแรงดัดโค้ง และความต้านทานแรงกระแทกสูงซึ่งลักษณะการทดสอบดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ

คอมพอสิตคล้ายกับการยิงกระสุนปะทะวัสดุ ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปโคนกลดจากผิวด้านหน้าที่ถูกกระแทกจากลูกกระสุนไปยังผิวด้านหลังของวัสดุ ซึ่งสามารถนำมาพัฒนาเป็นเกราะแข็งกันกระสุนจากวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตในส่วนของแผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะ โดยทำการทดสอบยิงเกราะกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ 0101.06 ต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงบประมาณจากกองทุนพัฒนาโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า (กทพ.ร.จปร.) ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์.ดร. ศราวุธ ริมดุสิต อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ปรึกษางานวิจัย ที่กรุณาให้คำแนะนำปรับปรุง แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในงานวิจัยตั้งแต่ต้นจนจบสมบูรณ์ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ และหน่วยงานภายในหรือภายนอกของรัฐบาลไปเป็นแนวทางในการพัฒนาทำเกราะกันกระสุนในแผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะต่อไป

8. บรรณานุกรม

- (1) กรรณิการ์ เดชรักษา. เกราะกันกระสุน.วารสารเทคโนโลยีวัสดุ ฉบับที่ 74, กรกฎาคม-กันยายน 2557: หน้า 59-65.
- (2) S. Rimdusit, S. Pirstpindvong, W. Tanthapanichakoon, S. Damrongsakkul, Toughening of Polybenzoxazine by Alloying with Urethane Prepolymer and Flexible Epoxy: A Comparative Study, Polymer Engineering Science, 45, pp. 288-296, (2005).
- (3) Rimdusit S., Jubsilp C., Kunopast P. and W. Bangsen, "Handbook of Benzoxazine Resins, Chapter 6: Chemorheology of Benzoxazine-based Resins" H. Ishida, and T. Agag, eds., Elsevier, Amsterdam, (2011).
- (4) วรณัฐ ศิละมัน คาร์บอนไฟเบอร์วัสดุป้องกันอาคารจากแผ่นดินไหวจากเว็บไซต์ศูนย์วิจัยและพัฒนาการป้องกันและจัดการภัยพิบัติ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ สืบค้นเมื่อ 17 กันยายน 2557 <http://dpm.nida.ac.th/main/index.php/articles/tsunami-and-earthquake/item/79>.
- (5) E. D. Pilpel, R.H.Holland, S.R.S. Johnson, "Composite Ballistic Panels and Method of Use", Google Patents, (2009)
- (6) F. Larsson, L. Svensson, "Carbon, Polyethylene and PBO Hybrid Fibre Composites for Structural Lightweight Armour", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 33(2), pp. 221-231, (2002).
- (7) S.N. Monteiro, et al., "Novel Ballistic Ramie Fabric Composite Competing with Kevlar Fabric in Multilayered Armor", Materials & Design, 96 (Supplement C), pp. 263-269, (2016).
- (8) K.S. Pandya, et al., "Ballistic Impact Behavior of Hybrid Composites", Materials & Design, 44 (Supplement C), pp. 128-135, (2013).
- (9) L.H. Nguyen, et al., "A Methodology for Hydrocode Analysis of Ultra-high Molecular Weight Polyethylene Composite under Ballistic Impact", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 84 (Supplement C), pp. 224-235, (2016).
- (10) M. Grujicic, et al., "Material Modeling and Ballistic-Resistance Analysis of Armor-Grade Composites Reinforced with High-Performance Fibers", Journal of Materials Engineering and Performance, 18(9), pp. 1169, (2009).
- (11) M. Grujicic, et al., "Ballistic-performance Optimization of a Hybrid Carbon-nanotube/E-glass Reinforced Polyvinyl-ester-epoxy-matrix Composite Armor", Journal of Materials Science, 42(14), pp. 5347-5359, (2007).
- (12) A.K. Bandaru, L. Vetiyatil, S. Ahmad, "The Effect of Hybridization on the Ballistic Impact Behavior of Hybrid Composite Armors", Composites Part B: Engineering, 76(Supplement C), pp. 300-319, (2015).
- (13) N.K. Naik, A.V. Doshi, "Ballistic Impact Behaviour of Thick Composites: Parametric Studies", Composite Structures, 82(3), pp. 447-464, (2008).
- (14) S. Rimdusit, C.J., S. Tiptipakorn, "Alloys and Composites of Polybenzoxazines", Properties and Applications, New York: Springer, (2013).
- (15) N.N. Ghosh, B. Kiskan, Y. Yagci, "Polybenzoxazines New High Performance Thermosetting Resins: Synthesis and Properties", Progress in Polymer Science, 32(11): pp. 1344-1391, (2007).
- (16) P.K. Mallick, Fiber-Reinforce Composite. (1993).
- (17) H. Ishida, Handbook of Benzoxazine Resin. Elsevier Press, (2012).

- (18) C. Jubsilp, et al., "High Performance Wood Composites Based on Benzoxazine-Epoxy Alloys", *Bioresource Technology*, 99(18), pp. 8880-8886, (2008).
- (19) C. Jubsilp, T. Takeichi, S. Rimdusit, "Property Enhancement of Polybenzoxazine Modified with Dianhydride", *Polymer Degradation and Stability*, 96(6), pp. 1047-1053, (2011).
- (20) S. Rimdusit, W. Bangsen, P. Kasemsiri, "Chemorheology and Thermomechanical Characteristics of Benzoxazine-urethane Copolymers", *Journal of Applied Polymer Science*, 121(6): pp. 3669-3678, (2011).
- (21) S. Rimdusit, et al., "Toughening of Polybenzoxazine by Alloying with Urethane Prepolymer and Flexible Epoxy: A Comparative Study", *Polymer Engineering & Science*, 45(3): pp. 288-296, (2005).
- (22) Rimdusit S., et al., Effects of Polyol Molecular Weight on Properties of Benzoxazine-urethane Polymer Alloys. *Polymer Engineering & Science*, 48(11), pp. 2238-2246, (2008).
- (23) Chand, S., Review Carbon Fiber for Composites. *J. Mater. Sci*, 35: pp. 1303-1313, (2000).
- (24) Japan Chemical Fibers Association Carbon Fiber and Product. <http://www.carbonfiber.gr.jp/english/material/what.html>.
- (25) V. Okhawilai, S. Rimdusit, Chapter 35 Hard Armor Composites from Ballistic Fiber-reinforced Polybenzoxazine Alloys, pp. 699-723, (2017).
- (26) R. Murugan, R. Ramesh, K. Padmanabhan, "Investigation on Static and Dynamic Mechanical Properties of Epoxy Based Woven Fabric Glass/Carbon Hybrid Composite Laminates", *Procedia Engineering*, 97(Supplement C), pp. 459-468, (2014).
- (27) M.P. Saiman, M.S. Wahab, M.U. Wahit, "The Effect of Fabric Weave on Tensile Strength of Woven Kenaf Reinforced Unsaturated Polyester Composite", *International Colloquium on Textile Engineer, Fashion, Apparel & Design*, pp. 52-56, (2014).
- (28) A.E. Ismail, M.A. Che Abdul Aziz, "Tensile strength of woven yarn kenaf fiber reinforced polyester composites", *Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES)*, December 2015; Volume 9, pp. 1695-1704, (2015).
- (29) Rios-Soberanis et al., "Study of Mechanical Behavior of Textile Reinforced Composite Material", *Dyna*, year 79, No. 176, Medellin, December, 2012 : pp. 115-123, (2012).
- (30) P.V. Cavallaro., Society for Experiment Mechanics (outside the USA). Effects of Weave Styles and Crimp Gradients in Woven Kevlar/Epoxy Composites, (2015).
- (31) G. Agarwal, et al., "Effect of Stacking Sequence on Physical, Mechanical and Tribological Properties of Glass-carbon Hybrid Composites", *Friction*, 2(4): pp. 354-364, (2014).
- (32) A. Bhatnagar, "Lightweight Ballistic Composites: Military and Law-Enforcement Applications", *Woodhead Publishing in Materials*, pp. 285, (2006).
- (33) M.R. O'Masta, H.N.G. Wadley, "Mechanisms of Projectile Penetration in Dyneema Encapsulated Aluminum Structures", *International Journal of Impact Engineering*, 74 pp. 16-35, (2014).
- (34) D.K.Y. Tam, P. Gao, T. Yi, "High-performance Ballistic Protection using Polymer Nanocomposites", pp. 213-237, (2012).
- (35) Toray Composite Materials America, Inc., Types of Carbon Fiber. from <https://www.toraycma.com/page.php?id=661>, (2018).
- (36) เข็มชัย เหมะจันทร์, สิ่งทอเทคนิค (Technical textiles), พิมพ์ครั้งที่ 1, บริษัท ออฟเซ็ท ครีเอชั่น จำกัด, สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ, (2549).
- (37) L. Tong, A.P. Mouritz, M.K. Bannister, "3D Fiber Reinforced Polymer Composites", *Elsevier Science Ltd*, (2002).
- (38) N. Hameed, et al., "Mechanical Properties of Poly(styrene-co-acrylonitrile)-modified Epoxy Resin /glass Fiber Composites", *Journal of Applied Polymer Science*, 110(6): pp. 3431-3438, (2008).

การพัฒนากระบวนการผลิต “ข้าวหอมมะลิสำเร็จรูป” เพื่อใช้เป็นเสบียงรบประจำบุคคล Product Development of “Instant-Jasmine Rice” as a Personal Combat Ration

พันตรี ดร. ปัญญวุฒิ จันทรธนามสุข¹
Major Dr. Panyawut Janthanomsuk¹

พันเอก มารุต วัชรคุปต์²
Colonel Marut Vajcharakup²

พันเอกหญิง รองศาสตราจารย์ ดร. จินตนา แสนวงศ์^{1*}
Colonel Associate Professor Dr. Chintana Sanvong^{1*}

1 กองวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ส่วนการศึกษา

โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า นครนายก 26001 ประเทศไทย

1 Department of Environmental Science, Academic Division,

Chulachomklao Royal Military Academy, Nakhon Nayok 26001, Thailand

2 กรมพลธิการทหารบก นนทบุรี 11000 ประเทศไทย

2 Quartermaster Department, Nonthaburi 11000, Thailand.

*Corresponding Author. E-mail : Chintana.sa@crma.ac.th

(Received: August 23, 2023, Revised: October 31, 2023, Accepted: November 2, 2023)

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาเสบียงรบประจำบุคคลรูปแบบใหม่ให้แก่ออกแบบ โดยทำออกมาในรูปแบบของข้าวหอมมะลิสำเร็จรูป ซึ่งมีข้อดีคือใช้เวลาในการคั้นรูปหรือปรุงเป็นข้าวสวยสั้นกว่าการหุงข้าวสาร บทความนี้กล่าวถึงปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตที่ส่งผลต่อคุณภาพของข้าวหอมมะลิ (ข้าวหอมมะลิ 105) กึ่งสำเร็จรูป โดยขั้นตอนการผลิตที่สำคัญประกอบด้วย 1) การแช่ข้าวและให้ความร้อนขั้นต้น 2) การทำให้สุกจนเกิดเจล และ 3) การทำให้แห้ง ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิต คือแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 15 นาที ในสารละลาย 0.05 w/v โซเดียมฟอสเฟต จากนั้น ต้มข้าวในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 นาที แล้วนำมาทำให้แห้งในเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 75 °C จนได้ข้าวที่มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 7 ข้าวกึ่งสำเร็จรูปที่ถูกพัฒนาขึ้นได้ถูกบรรจุในถุงสุญญากาศปริมาณ 150 กรัมต่อถุง ซึ่งให้พลังงาน 534 kcal ผลการทดสอบประสาทสัมผัสโดย นักเรียนนายร้อย โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จำนวน 94 นาย พบว่า ความพึงพอใจโดยเฉลี่ยต่อผลิตภัณฑ์อยู่ในเกณฑ์ “ชอบ” โดยค่าคะแนนไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับข้าวหอมมะลิที่หุงสุกด้วยวิธีทั่วไป ($p \leq 0.05$) อีกทั้งผลการทดสอบความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในภาคสนาม พบว่านักเรียนนายร้อย ให้คะแนนความเหมาะสมโดยเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์ “ดี”

คำสำคัญ: ข้าวกึ่งสำเร็จรูป การทำแห้ง เเสบียง การทดสอบทางประสาทสัมผัส

Abstract : This research aims to develop a new type of personal combat ration for Royal Thai Army. The ration is developed as an instant Jasmine-rice (Khao Dawk Mali 105) which has several advantages over uncooked rice such as shorter cooking time. The article proposes optimum process conditions for producing the instant rice. The process composes of 3 steps i.e., 1) soaking and preheat, 2) cooking and gelatinizing, and 3) drying. The optimal conditions are soaking at 70 °C for 15 min. in 0.05 w/v sodiumphosphate solution, boiling at 100 °C for 5 min., and then drying in hot air oven at 75 °C until rice's moisture reach below 7 percent. The product is packed in vacuum seal bag at amount of 150 g./bag which gives energy of 534 kcal. Sensory evaluation is performed by 94 cadets of Chulachomklao Royal Military Academy. Result shows that average score for our product fall into "like" category. Moreover, the product's score is not significantly differed to those for conventional cooked rice ($p \leq 0.05$). The suitability in battlefield is also evaluated by the cadets with the average score fall into "good" category.

Keywords: Instant rice, Drying, Ration, Sensory evaluation

1. บทนำ

ในปัจจุบัน สถานะเศรษฐกิจและสังคมส่งผลให้มนุษย์ต้องแข่งขันกับเวลา อาหารที่สามารถเตรียมได้สะดวก รวดเร็ว เช่น อาหารกึ่งสำเร็จรูปจึงได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากสะดวก ง่าย และใช้เวลารวดเร็วในการปรุง โดยในปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์อาหารกึ่งสำเร็จรูปวางขายอย่างหลากหลาย เช่น บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป โจ๊กกึ่งสำเร็จรูป ข้าว กึ่งสำเร็จรูป และอาหารกึ่งสำเร็จรูปแช่แข็ง เป็นต้น [1] สำหรับอาหารกึ่งสำเร็จรูปที่กล่าวมา ข้าวกึ่งสำเร็จรูปมีความน่าสนใจที่จะนำมาใช้ในการวิจัยและพัฒนามากที่สุด เนื่องจากข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจและเป็นที่ยอมรับโดยคนไทย เป็นอาหารหลักของคนไทย โดยเฉพาะข้าวหอมมะลิ จัดเป็นสินค้าส่งออกซึ่งทั่วโลกให้การยอมรับในคุณภาพ ข้าวยังเป็นแหล่งอาหารสำคัญที่ให้พลังงานแก่ร่างกาย มีสารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นสารอาหารหลัก รวมถึงมีวิตามินและแร่ธาตุที่จำเป็น อย่างไรก็ตาม การวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับข้าวหอมมะลิกึ่งสำเร็จรูปของไทย ยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำมาพัฒนาเป็นเสบียงรบและใช้ประโยชน์ในราชการทหารของกองทัพไทย

ในการประกอบเลี้ยงอาหารแก่ทหารในกองทัพไทย มีการใช้เสบียงรบอยู่หลายประเภท เช่น เสบียง ก. คืออาหารสดหรือแห้งที่ต้องนำมาปรุงก่อนรับประทาน เช่น เนื้อสัตว์ ผัก เครื่องปรุง เป็นต้น เสบียง ข. คืออาหารกระป๋องหรืออาหารกึ่งสำเร็จรูป ส่วนเสบียง ค. คืออาหารชุดพร้อมรับประทานหรือ Meal Ready to Eat (MRE) สำหรับข้าวหอมมะลิกึ่งสำเร็จรูปนั้นจัดเป็นเสบียง ข. เสบียงประเภทนี้จะใช้แทนเสบียง ก. เมื่อไม่มีสิ่งอำนวยความสะดวกในการเก็บเย็น โดยสามารถเก็บไว้ได้ในอุณหภูมิปกติ 2-1 ปี เสบียง ข. นั้นถือได้ว่าเป็นเสบียงที่มีราคาถูก จัดหาและผลิตได้ง่ายกว่าเสบียง ค. จึงเป็นเสบียงที่มีโอกาสใช้งานบ่อยกว่า [2]

การวิจัยนี้มุ่งหวังที่จะพัฒนาเสบียงรบประจำบุคคลประเภท ข. ชนิดใหม่ในรูปแบบของข้าวหอมมะลิ

สำเร็จรูปให้แก่กองทัพ โดยนำข้าวหอมมะลิสุรินทร์ (ข้าวดอกมะลิ 105) ซึ่งเป็นข้าวที่ผ่านการสีจากโรงสีข้าวพระราชทาน โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ในสมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี มาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่สามารถจัดหาได้ในกองทัพ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ง่าย ค่าใช้จ่ายไม่สูง และไม่ซับซ้อนมาใช้ในการผลิต เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ซึ่งมีรสสัมผัสเป็นที่พึงพอใจของทหาร อีกทั้งยังมุ่งเน้นการออกแบบบรรจุภัณฑ์ ให้มีความเหมาะสมและสะดวกต่อการพกพาไปใช้ในการฝึก หรือราชการสนาม เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดแก่กองทัพ

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตข้าวหอมมะลิกึ่งสำเร็จรูป และหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิต เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงที่สุด

2.2 เพื่อพัฒนาเป็นเสบียงรบประจำบุคคล (เสบียง ข.) รูปแบบใหม่ที่มีรสสัมผัสเป็นที่พึงพอใจแก่ทหาร และมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการปฏิบัติงานภาคสนามให้แก่กองทัพ

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ข้าวกึ่งสำเร็จรูป อาจเรียกอีกอย่างว่าข้าวหุงสุกไว (Instant rice หรือ Quick-cooking rice) เป็นข้าวที่ผ่านกรรมวิธีการทำให้สุกในระดับหนึ่งก่อนนำมาทำแห้ง ซึ่งเก็บรักษาได้นานที่อุณหภูมิห้อง และยังสามารถหุงหรือคืนรูปได้รวดเร็วกว่าข้าวสารด้วยวิธีที่ไม่ยุ่งยาก การคืนรูปอาจทำได้โดยการเติมน้ำร้อนหรือน้ำเดือดแล้วทิ้งให้คืนรูปหรือเติมน้ำแล้วนำไปให้ความร้อนด้วยเตาไมโครเวฟประมาณ 10-5 นาที วิธีการแปรรูปข้าวสารเป็นข้าวกึ่งสำเร็จรูป มีมากมายหลายวิธี อาทิ 1) การแช่น้ำ-ต้ม-ไอน้ำ-ทำแห้ง (Soak-boil steam-dry method) 2) การทำแห้งเยือกแข็ง (Freeze-drying) 3) การใช้สารเคมี (Chemical

treatment) 4) การใช้พลังงานไมโครเวฟ และ 5) การใช้เครื่องทำแห้งแบบ ฟลูอิดซ์เบด อย่างไรก็ตามกรรมวิธีที่ 5 – 2) นั้น มีค่าใช้จ่ายและค่าอุปกรณ์เครื่องมือค่อนข้างสูง [3] ดังนั้นวิธีการแช่น้ำ-ต้มไอน้ำ-ทำแห้ง จึงน่าจะเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการผลิตเสบียงของกองทัพบก

โดยทั่วไปกระบวนการผลิตและพัฒนาข้าวกล้องสำเร็จรูปประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การแช่ข้าวและให้ความร้อน (Soaking and preheat) การให้ความร้อนจนข้าวเกิดเจล (Cooking and gelatinization) การทำแห้ง (Drying) การคืนรูปข้าวในน้ำ (Rehydration) และการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส (Sensory evaluation) [4] ศิวพร ศิวเวช และอุดม กาญจนปกรณ์ชัย [5] ได้ศึกษาการใช้สารให้ความคงตัว ช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของข้าวกล้องสำเร็จรูป พบว่า การแช่ข้าวพันธุ์ขาวตาแห้ง 17 ในสารละลาย โซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต 0.5 % w/v สามารถช่วยปรับปรุงการคืนรูปของข้าวกล้องสำเร็จรูปได้ นอกจากนี้ สุรยา พิมพ์พิโล [6] ได้ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อข้าวแดงกล้องแบบสุกเร็ว พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตคือ การแช่ข้าวในน้ำที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปให้ความร้อนในหม้อหนึ่งความดัน ที่อุณหภูมิ 121 °C นาน 2 นาที แล้วทำให้แห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 60 นาที และ ไม่นานมานี้ Songserpong and Phukamas [7] ได้กล่าวถึงปัญหาของการผลิตข้าวกล้องสำเร็จรูปในระดับอุตสาหกรรม อาทิเช่นการคืนรูปที่ช้าและคุณภาพไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค จึงได้นำเสนอกระบวนการผลิตด้วยเตาพลังงานไมโครเวฟ มาใช้ในระดับอุตสาหกรรม

4. วิธีดำเนินการศึกษา

4.1 การผลิตข้าวกล้องสำเร็จรูป

4.1.1 การแช่ข้าวและให้ความร้อนขั้นต้น ทำโดยการนำข้าวหอมมะลิสุรินทร์ (ขาวดอกมะลิ 105) จากโรงสีข้าวพระราชทาน โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

มาแช่ในน้ำ หรือสารละลายโซเดียมฟอสเฟตที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ในอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ (หรือสารละลาย) 1:5 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปให้ความร้อนเป็นเวลา 15 นาที

4.1.2 การทำให้ข้าวสุกและเกิดเจลอย่างสมบูรณ์ ตามวิธีการของ ขวัญใจ เลหาสวัสดิ์ และ วรณดี บินไชย [4] โดยนำข้าวที่ผ่านการแช่และให้ความร้อนขั้นต้น มาต้มในสารละลายโซเดียมฟอสเฟต 0.05% w/v ให้เดือด และคงไว้ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นตักข้าวไปแช่ในน้ำเย็น 3-5 °C ทันททีเป็นเวลาประมาณ 30 วินาที

4.1.3 การทำแห้งข้าว นำข้าวที่ต้มแล้วมาวางแผ่ให้บาง บนแผ่นซิลิโคนอบอาหารซึ่งวางบนแผ่นตะแกรงเหล็ก โดยไม่ให้หนาหรือติดกันเป็นแผ่น ให้มีลักษณะเรียงเม็ด จากนั้นนำเข้าอบในตู้อบลมร้อนขนาด 1500 W จนข้าวมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 7 โดยมีการนำตัวอย่างข้าวมาตรวจวัดความชื้นเป็นระยะ ด้วยเครื่องวัดความชื้นอาหาร

4.2 การศึกษาปัจจัยต่างๆในกระบวนการผลิตในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้การวางแผนการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตข้าวกล้องสำเร็จรูป ทั้งสิ้น 3 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยที่ศึกษามีการทำการทดลอง 3 ซ้ำ ได้แก่

4.2.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการแช่ข้าว ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการแช่ข้าวในขั้นตอน 4.1.1 ได้แก่ ที่ 50, 70 และ 90 °C ตามลำดับ

4.2.2 ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้แช่ข้าว นำสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จาก 4.2.1 มาใช้ทำการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมฟอสเฟตที่เหมาะสมในการแช่ข้าวในขั้นตอน 4.1.1 โดยศึกษาที่ 0.05, 0.1 และ 0.5 % w/v ตามลำดับ

4.2.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งข้าว นำสภาวะอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จาก 4.2.1 และ 4.2.2 มาใช้ทำการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบข้าวในขั้นตอน 4.1.3

โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 50, 65, 75, 80 และ 90 °C ตามลำดับ

4.3 การบรรจุ

นำข้าวกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านกรรมวิธีข้างต้นบรรจุลงในถุงสุญญากาศขนาด 30*20 cm ปริมาณ 150 กรัม ต่อถุงนำไปซีลด้วยเครื่องซีลสุญญากาศ และติดโลโก้บรรจุภัณฑ์

4.4 การคืนรูปข้าวกล้องสำเร็จรูปในหม้อสนาม

ฉีกซองบรรจุภัณฑ์ นำข้าวใส่ในหม้อสนาม แล้วเติมน้ำร้อนหรือน้ำเดือดลงไปปริมาณ 2 เท่าของข้าวโดยน้ำหนัก (หรือ 300 ml.) รอประมาณ 15-10 นาที จากนั้นเทน้ำส่วนที่เหลือออกจะได้ข้าวสวยพร้อมรับประทาน

4.5 ผู้เข้าร่วมการทดสอบประสาทสัมผัสและการประเมินความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในภาคสนาม กลุ่มประชากรที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ นักเรียนนายร้อยโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า (จำนวน 1,490 นาย) เพื่อเป็นตัวแทนทหารของกองทัพบก สุ่มตัวอย่างที่ระดับความคลาดเคลื่อนร้อยละ 10 ตามวิธีของ Taro Yamane เพื่อให้ผลการทดสอบสามารถสะท้อนถึงความพึงพอใจโดยรวมของนักเรียนนายร้อยทั้งหมด มีสูตรการคำนวณดังนี้

$$n = \frac{N}{1 + Ne^2}$$

n คือ ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง

N คือ ขนาดประชากร

e คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้เกิดขึ้นได้คือ

0.10

เมื่อแทนค่าจะได้ขนาดของกลุ่มตัวอย่างที่เหมาะสมดังนี้

$$\begin{aligned} n &= \frac{1490}{1 + 1490 (0.10)^2} \\ &= 94 \text{ นาย} \end{aligned}$$

4.6 การทดสอบประสาทสัมผัส

ทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส 5 ด้าน ได้แก่

1) ลักษณะปรากฏและสี 2) กลิ่น 3) รสชาติ 4) เนื้อสัมผัส และ 5) ความชอบโดยรวม ระดับความชอบในการประเมิน 5 ระดับ คือ 1. ไม่ชอบมาก 2. ไม่ชอบ 3. เฉย ๆ 4. ชอบ และ 5. ชอบมาก [4] มีการเปรียบเทียบตัวอย่างข้าว 3 ชนิด ได้แก่ 1) ข้าวขาวดอกมะลิที่หุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวทั่วไป และ 2) ข้าวขาวดอกมะลิที่สำเร็จรูปที่ผ่านการคืนรูปโดยการเติมน้ำเดือด เป็นเวลา 10 นาที และ 3) ข้าวขาวดอกมะลิที่สำเร็จรูปที่ผ่านการคืนรูปโดยการเติมน้ำเดือดเป็นเวลา 15 นาที

ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (Analysis of Variance, ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test

4.7 การประเมินความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในภาคสนาม

ให้ผู้เข้าร่วมทดสอบประเมินคุณลักษณะ 4 ด้านดังนี้

1) ความเหมาะสมของปริมาณข้าว 2) ความสะดวกในการพกพา 3) ความง่ายในการคืนรูปข้าว และ 4) รูปแบบบรรจุภัณฑ์ ระดับความชอบ 5 ระดับ คือ 1. แย่มาก 2. แย่ 3. ปานกลาง 4. ดี และ 5. ดีมาก

4.8 การคำนวณพลังงาน

คำนวณพลังงานและสารอาหารของข้าวกล้องสำเร็จรูป โดยใช้โปรแกรมคำนวณคุณค่าสารอาหารของอาหารไทย INMUCAL V.8[3.0]

5. ผลการศึกษา

5.1 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการแช่ข้าวและให้ความร้อนขั้นต้น

จากการทดลองแช่ข้าวในน้ำในอัตราส่วน ข้าวต่อน้ำ 1:5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 50, 70 และ 90 °C เป็นเวลา 15 นาที พบว่าที่อุณหภูมิ 70 และ 90 °C ให้ผลดีกว่าที่อุณหภูมิ 50 °C ซึ่งที่อุณหภูมินี้พบว่าเมล็ดข้าวที่ได้

หลังจากผ่านการต้มและอบแห้งแล้วมีลักษณะแตกหักมากกว่า 70 % ของข้าวทั้งหมด (ตารางที่ 1) อย่างไรก็ตามการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 90 °C มีผลทำให้ข้าวเปลี่ยนสี ดังนั้นการแช่ข้าวในน้ำที่อุณหภูมิ 70 °C จึงเหมาะสมที่สุด (ตารางที่ 1)

5.2 ความเข้มข้นของสารละลายที่เหมาะสมในการแช่ข้าวและให้ความร้อนขึ้นต้น

ทำการศึกษารอบการแช่ข้าวในสารละลายโซเดียมฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 ,0.05 และ 0.5 % w/v โดยแช่ข้าวต่อสารละลายในอัตราส่วน 1:5 โดยน้ำหนัก ที่ 70 °C 15 นาที ผลการทดลองพบว่า โซเดียมฟอสเฟต 0.05 % w/v ให้

ผลดีที่สุด (ตารางที่ 2) โดยที่ระดับความเข้มข้นกว่าที่สูงกว่านี้ จะทำให้สีของข้าวเปลี่ยนแปลงหลังจากการต้ม และอบแห้งแล้ว จึงอาจไม่เป็นที่ยอมรับของผู้ร่วมการทดสอบ

5.3 สภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งข้าว

นำข้าวที่ผ่านการแช่ในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ แช่ใน 0.05 % w/v โซเดียมฟอสเฟต ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 15 นาที มาทำให้สุกและเกิดเจลอย่างสมบูรณ์ ตามวิธีการในหัวข้อ 4.1.2 จากนั้นทำการศึกษาการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้แก่ 80 ,75 ,65 ,50 และ 90 °C โดยทำการอบจนข้าวมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 7 ซึ่งในระหว่างการอบมีการนำตัวอย่างข้าวมาตรวจวัดความชื้นเป็นระยะจากการทดลองพบว่า การอบที่อุณหภูมิ 90 °C ทำให้ข้าวแห้งเร็วแต่มีผลทำให้ข้าวเปลี่ยนสี ส่วนการอบข้าวที่ 75 และ 80 °C ใช้ระยะเวลาในการทำให้ข้าวมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 7 ใกล้เคียงกัน คือประมาณ 3.5-3 ชั่วโมง (ภาพที่ 1) และไม่ทำให้ข้าวเปลี่ยนสี ทั้งนี้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบยังขึ้นกับความหนาแน่นของข้าวที่วางบนถาด ถ้าข้าวกระจายตัวดีก็จะทำให้ใช้เวลาอบสั้นลง

ตารางที่ 1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในขั้นตอนการแช่ข้าวและให้ความร้อนขึ้นต้นต่อลักษณะของข้าวที่ปรากฏเมื่อแช่ข้าวในน้ำ

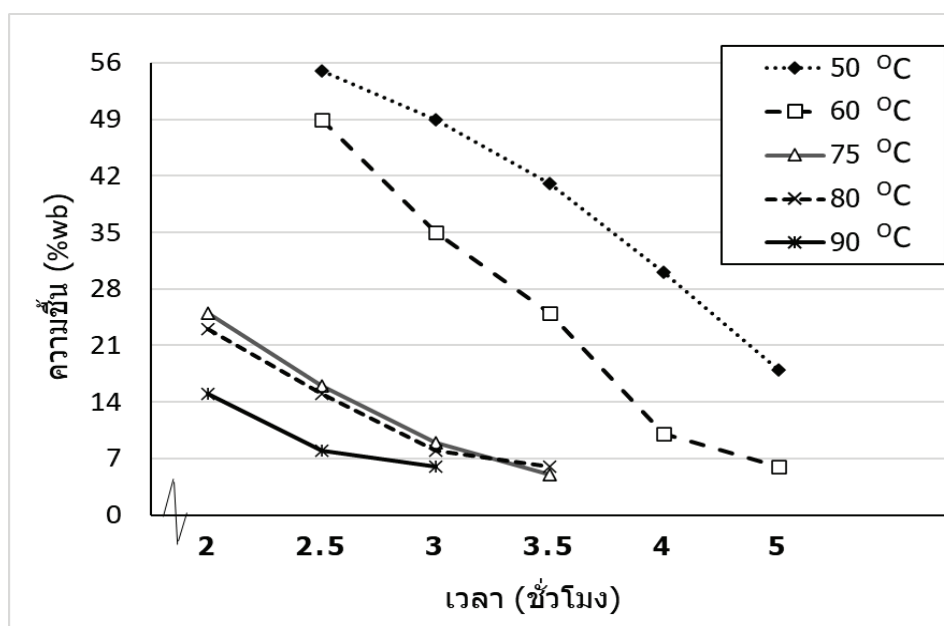
อุณหภูมิ (°C)	ลักษณะของข้าวที่ได้หลังจากผ่านการต้ม 5 นาที และอบแห้งที่ 80 °C จนมีความชื้นต่ำกว่า 7 %	
	ลักษณะเมล็ดข้าว*	สีของข้าว*
50	แตกหักมาก (> 50 % ของข้าวทั้งหมด)	ปกติ (เมื่อเทียบกับข้าวที่หุงโดยวิธีปกติ)
70	แตกหักน้อย (10-30 % ของข้าวทั้งหมด)	ปกติ (เมื่อเทียบกับข้าวที่หุงโดยวิธีปกติ)
90	แตกหักน้อยมาก (< 5 % ของข้าวทั้งหมด)	เปลี่ยนแปลง (สีเหลือง-น้ำตาล)

* ผลจากการสังเกตด้วยตาเปล่า

ตารางที่ 2 ผลของสารละลายที่ใช้แช่ข้าวในขั้นตอนการแช่ข้าวและให้ความร้อนขึ้นต้นต่อลักษณะของข้าวที่ปรากฏเมื่อให้ความร้อนที่ 70 °C

น้ำหรือสารละลายที่ใช้แช่	ลักษณะของข้าวที่ได้หลังจากผ่านการต้ม 5 นาที และอบแห้งที่ 80 °C จนมีความชื้นต่ำกว่า 7 %	
	ลักษณะเมล็ดข้าว*	สีของข้าว*
น้ำ	แตกหักน้อย (10-30 % ของข้าวทั้งหมด)	ปกติ (เมื่อเทียบกับข้าวที่หุงโดยวิธีปกติ)
โซเดียมฟอสเฟต 0.05 % w/v	แตกหักน้อยมาก (< 5 % ของข้าวทั้งหมด)	ปกติ (เมื่อเทียบกับข้าวที่หุงโดยวิธีปกติ)
โซเดียมฟอสเฟต 0.1 % w/v	แตกหักน้อยมาก (< 5 % ของข้าวทั้งหมด)	เปลี่ยนแปลง (สีเหลืองอ่อน)
โซเดียมฟอสเฟต 0.5 % w/v	แตกหักน้อยมาก (< 5 % ของข้าวทั้งหมด)	เปลี่ยนแปลง (สีเหลืองอ่อน)

* ผลจากการสังเกตด้วยตาเปล่า



ภาพที่ 1 ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งข้าวจนมีความชื้นต่ำกว่า 7% ที่อุณหภูมิการอบต่างๆ

5.4 ปริมาณและพลังงานต่อบรรจุภัณฑ์

จากผลการทดลองข้างต้น สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตข้าวกล้องสำเร็จรูปคือ การแช่ข้าวใน %0.05 w/v โซเดียมฟอสเฟต ที่อุณหภูมิ 70 °C นาน 15 นาที จากนั้นทำให้ข้าวสุก แล้วนำมาทำแห้งที่อุณหภูมิ 75 °C จนความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 7 ผู้ทำการทดลองได้นำสภาวะนี้มาทำการผลิตเสบียงข้าวกล้องสำเร็จรูป โดยทำการบรรจุผลิตภัณฑ์ที่

ผลิตได้ลงในบรรจุภัณฑ์สุญญากาศ ปริมาณ 150 กรัม ต่อถุง (ภาพที่ 2) จากการคำนวณด้วย โปรแกรม INMUCAL V.3.0 พบว่าในแต่ละถุงให้พลังงาน 534 kcal



ภาพที่ 2 เสบียงข้าวหอมมะลิกล้องสำเร็จรูปในบรรจุภัณฑ์สุญญากาศ

5.5 การทดสอบทางประสาทสัมผัสและความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ปฏิบัติงานในภาคสนาม

5.5.1 การทดสอบทางประสาทสัมผัส ทำการสุ่มคัดเลือกนักเรียนนายร้อยจำนวน 94 นาย เพื่อเป็นตัวแทนของทหารในกองทัพบก มาทำการทดสอบทางประสาทสัมผัส โดยมีการเปรียบเทียบตัวอย่างข้าว 3 ชนิด ผลการทดสอบประสาทสัมผัส พบว่าความพึงพอใจของผู้บริโภคในทุกด้านของเสบียงข้าวกล้องสำเร็จรูปที่ผ่านการคืนรูปโดยการเติมน้ำร้อน 15 นาทีนั้น อยู่ในเกณฑ์ “ชอบ” และผลคะแนนไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับข้าวหุงสุกด้วยวิธีทั่วไป ($p \leq 0.05$) แต่การคืนรูปข้าวโดยการเติมน้ำร้อน 10 นาที มีผลทำให้เนื้อสัมผัสของข้าวด้อยลงกว่าข้าวชนิดอื่นอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามคุณลักษณะด้านอื่น ๆ นั้นไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3

5.5.2 ความเหมาะสมต่อการนำเสบียงข้าวกล้องสำเร็จรูปไปใช้ปฏิบัติงานในภาคสนาม นำเสบียงข้าวกล้องสำเร็จรูปที่ผลิตขึ้น ให้กลุ่มตัวอย่างประเมินความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ปฏิบัติงานในภาคสนาม โดยแบ่งเป็น 1) ด้านปริมาณของข้าวและพลังงานที่ได้ 2) ด้านน้ำหนักและความสะดวกในการพกพา 3) ด้านความง่ายและเวลาในการคืนรูปข้าวให้พร้อมทานเมื่อเทียบกับหุงข้าวสาร และ 4) ด้านรูปแบบบรรจุภัณฑ์และความน่าใช้ โดยให้ทำการคืนรูปข้าวในหม้อสนามเพื่อประเมินผลการนำไปใช้จริง ผลการประเมินพบว่า มีความเหมาะสมต่อการพกพาไปใช้ในการฝึก หรือราชการสนาม โดยคะแนนเฉลี่ยของทุกด้าน อยู่ในเกณฑ์ “ดี” (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส* โดยนักเรียนนายร้อยต่อข้าวหุงสุกโดยวิธีปกติ และข้าวกล้องสำเร็จรูปที่คั้นรูปแล้ว

ลักษณะที่ทดสอบ	ข้าวหุงสุกโดยวิธีปกติ	ข้าวกล้องสำเร็จรูป คั้นรูปโดยเติมน้ำเดือด 10 นาที	ข้าวกล้องสำเร็จรูป คั้นรูปโดยเติมน้ำเดือด 15 นาที
ลักษณะปรากฏและสี	4.5 ± 0.2 ^a	4.0 ± 0.6 ^a	4.3 ± 0.4 ^a
กลิ่น	4.5 ± 0.5 ^a	4.1 ± 0.7 ^a	4.3 ± 0.5 ^a
รสชาติ	4.3 ± 0.4 ^a	3.8 ± 0.5 ^a	4.2 ± 0.6 ^a
เนื้อสัมผัส	4.2 ± 0.4 ^a	3.3 ± 0.4 ^b	3.9 ± 0.3 ^a
การยอมรับ	4.1 ± 0.5 ^a	3.8 ± 0.4 ^a	4.0 ± 0.6 ^a
เฉลี่ย	4.3 ± 0.4 ^a	3.8 ± 0.5 ^a	4.1 ± 0.5 ^a

* ผู้เข้าร่วมทดสอบ 94 นาย ระดับความชอบ 5 ระดับ คือ 1. ไม่ชอบมาก 2. ไม่ชอบ 3. เฉยๆ 4. ชอบ 5. ชอบมาก

** a และ b ในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4 ผลการประเมินความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการฝึก หรือราชการสนาม ของนักเรียนนายร้อย

ลักษณะที่ทดสอบ	คะแนนประเมิน
ความเหมาะสมของปริมาณข้าว	4.6 ± 0.3
ความสะดวกในการพกพา	4.7 ± 0.4
ความง่ายในการคั้นรูปข้าว	4.1 ± 0.4
รูปแบบบรรจุภัณฑ์	4.5 ± 0.2
เฉลี่ย	4.4 ± 0.3

* ผู้ตอบแบบประเมิน 94 นาย ระดับคะแนน 5 ระดับ คือ 1. แย่มาก 2. แย่ 3. ปานกลาง 4. ดี 5. ดีมาก

6. สรุปและอภิปรายผล

จากการดำเนินโครงการวิจัยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตข้าวหอมมะลิกิ่งสำเร็จรูปคือแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 70 °C ใน %0.05 w/v โซเดียมฟอสเฟต นาน 15 นาที จากนั้นต้มเดือด 5 นาที แล้วนำมาทำแห้งที่ 75 °C จนความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 7 การแช่ข้าวที่อุณหภูมิสูงให้ผลดีเนื่องจากอุณหภูมิสูงจะทำให้ข้าวเกิดการพองตัว จึงทำให้เมล็ดข้าวไม่แตกหักหลังจากผ่านการต้มและอบแห้งแล้ว อย่างไรก็ตามหากใช้อุณหภูมิสูงเกินไป (90 °C) อาจทำให้ข้าวบางส่วนบริเวณก้นภาชนะไหม้และเปลี่ยนสี ทั้งยังต้องใช้พลังงานสูงขึ้นจึงไม่มีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการผลิต นอกจากนี้การแช่ข้าวในสารให้ความคงตัว เช่น สารละลายโซเดียมฟอสเฟต ในความเข้มข้นที่เหมาะสม สามารถช่วยป้องกันการแตกหักของเมล็ดข้าวได้ เนื่องจากสารละลายนี้ช่วยในการจับน้ำ ทำให้ข้าวดูดซึมน้ำได้ดี [6]

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกิ่งสำเร็จรูป (มอก.) อาหารกิ่งสำเร็จรูปต้องมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 7 เพื่อให้สามารถเก็บรักษาอาหารให้มีคุณภาพคงเดิมในบรรจุภัณฑ์ที่ปิดสนิทได้นาน 2-1 ปี [9] งานวิจัยของสุรยา พิมพ์พิไล [6] พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบจะอยู่ในช่วง 80 °C หรือสูงกว่า โดยจะทำให้ระยะเวลาการอบสั้นลง อย่างไรก็ตามการอบที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 °C เช่นที่ 90 °C มีผลทำให้ข้าวเปลี่ยนสีอาจไม่เป็นที่น่าพึงพอใจของผู้บริโภค การอบข้าวที่อุณหภูมิไม่เกิน 80 °C จึงเหมาะสมมากกว่า จากผลการทดลอง การอบที่ 75 และ 80 °C ใช้ระยะเวลาในการทำให้ข้าวมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 7 ใกล้เคียงกัน ซึ่งตู้อบลมร้อนระดับครัวเรือนโดยทั่วไปจะสามารถปรับอุณหภูมิได้สูงสุดที่ 90 °C ดังนั้นการอบข้าวที่อุณหภูมิ 75 °C จึงเป็นการประหยัดพลังงานและถนอมการใช้งานตู้อบได้ดีกว่าอีกด้วย

เสปียงข้าวกิ่งสำเร็จรูปที่พัฒนาขึ้นนี้นำไปบรรจุในถุงสุญญากาศ ในปริมาณ 150 กรัม ให้พลังงาน 534 kcal ต่อถุง เมื่อบริโภคเสปียงนี้ 3 มื้อ ร่วมกับเนื้อกระเทียม

พริกไทยกระป๋องของกรมพลานการทหารบก (210 kcal ต่อกระป๋อง) จะให้พลังงาน 2,232 kcal ซึ่งมีปริมาณพลังงานที่เพียงพอต่อวัน ใกล้เคียงกับปริมาณพลังงานที่ทหารอเมริกันบริโภคต่อวันที่ 2,466 kcal [10] และตามหนังสือประกาศของกองทัพบกที่ได้กำหนดว่าอาหารที่เลี้ยงดูทหารนั้นจะต้องมีปริมาณพลังงานที่ 2,400 kcal ต่อวัน [11] นอกจากนี้ ยังออกแบบให้สะดวกต่อการพกพาและเก็บรักษา เป็นที่พึงพอใจของนักเรียนนายร้อยในด้านความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการฝึก หรือราชการสนาม

ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของเสปียงข้าวกิ่งสำเร็จรูปชี้ให้เห็นว่ารสสัมผัสของเสปียงนี้ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับข้าวหุงสุกด้วยวิธีทั่วไป สามารถคืนรูปเป็นข้าวสวยได้ง่ายเพียงแค่เติมน้ำเดือดลงในข้าวแล้วรอ 15-10 นาที อย่างไรก็ตามการคืนรูปโดยการเติมน้ำเดือดแล้วรอเพียง 10 นาทีนั้น เนื้อสัมผัสอาจยังแข็งอยู่บ้างเนื่องจากข้าวยังคั้นตัวไม่เต็มที่จึงควรรอนานขึ้น ทั้งนี้ขึ้นกับความชอบด้านความแข็งหรือนุ่มของข้าวของผู้ชิมด้วย

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเสปียงรบประจำบุคคล (เสปียง ข.) รูปแบบใหม่ โดยใช้เทคโนโลยีที่ง่าย ค่าใช้จ่ายไม่สูง สามารถผลิตโดยกรรมวิธีที่ไม่ซับซ้อนภายใต้ขีดความสามารถที่มีของกองทัพบก ซึ่งสภาวะในการผลิตที่เหมาะสมตามผลการวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้ในการผลิตเสปียงข้าว (ข้าวดอกมะลิ 15) กิ่งสำเร็จรูปที่มีคุณลักษณะเป็นที่พึงพอใจของกำลังพลในกองทัพบก ทั้งทางด้านรสสัมผัสและด้านความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในภาคสนาม ในอนาคตผู้วิจัยยังมีแนวคิดในการเสริมคุณค่าทางโภชนาการลงในเสปียงด้วยการเติมผักจากโครงการทหารพันธุ์ดี และพัฒนากับข้าวแบบถุงพร้อมรับประทานให้สามารถบริโภคควบคู่กับเสปียงข้าวกิ่งสำเร็จรูปได้อีกด้วย

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ กองทุนพัฒนา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ที่ได้มอบทุนสนับสนุน ทำให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

8. บรรณานุกรม

- (1) พรพิไล นิยมเวช, ปฐมพร สรรพสิทธิ์, อติกานต์ วารี และ เพ็ญศิริ คงสิทธิ์, "การพัฒนาสูตรโจ๊กข้าวไรซ์เบอร์รี่สำเร็จรูป," วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, ปีที่ 23, ฉบับที่ 3, (2561).
- (2) กรมพลธิการทหารบก, คู่มือราชการสนามว่าด้วยการเลี้ยงดูและประกอบเลี้ยงในสนาม, (2563).
- (3) อโนชา สุขสมบุญ และกุลยา ล้มรุ่งเรืองรัตน์, "การพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องสำเร็จรูปลดดัชนีไกลซีมิก," รายงานการวิจัย, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, (2562).
- (4) ขวัญใจ เลาสวัสดิ์ และ วรณดี บินไชย, "เทคโนโลยีการผลิตข้าวกล้องสำเร็จรูป," รายงานการวิจัย, กองวิทยาศาสตร์ชีวภาพ, กรมวิทยาศาสตร์บริการ, (2540).
- (5) ศิวาพร ศิวเวช และ อุดม กาญจนปกรณชัย, "การศึกษาการปรับปรุงคุณภาพข้าวกล้องสำเร็จรูป," (ออนไลน์).<http://fic.nfi.or.th/knowledgedatabank/Research-detail.php-756>. (เข้าถึงเมื่อ 13 สิงหาคม 2563).
- (6) สุธยา พิมพ์พิไล, "การศึกษากิจกรรมวิธีการผลิตข้าวหอมมะลิแดงแบบหุงสุกเร็ว," รายงานการวิจัย, คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, (2549).
- (7) S. Songserppong and P. Phukasma, "Instant Rice Process Development: Effect of Rice Cooking Methods on the Quality of Jasmine Instant Rice Dried by Industrial Microwave Oven," Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences, vol. 9, no. 2, pp. 330-334, (2019).
- (8) บัณฑิต ล่ำลือธรรม, พร้อมลักษณ์ สรรพอคำ, สุธรรม นันทมงคลชัย และ ฉัตรภา หัตถโกศล, "การพัฒนาตำรับอาหารว่างและเครื่องดื่มสำหรับเด็กนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 4-6," วารสารวิจัยสาธารณสุข มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ปีที่ 14, ฉบับที่ 3, กรกฎาคม-กันยายน, (2564).
- (9) กฤติยา เชื้อนเพชร, รวิพร พลพิข, กนกพร ลีวานิชญกุล และ ศิริยา กาวิเชียร. "ผลของชนิดข้าวและวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพของโจ๊กข้าวไรซ์เบอร์รี่สำเร็จรูปผสมแก่นตะวัน," Thai Science and Technology Journal (TSTJ), vol. 28, no. 10, (2562).
- (10) J. McAdam, K. McGinnis, R. Ory, K. Young, A. Frug, M. Roberts, and J. Sefton. "Estimation of energy balance and training volume during Army Initial Entry Training," Journal of International Society of Sports and Nutrition, vol. 15, no. 55, (2018).
- (11) กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ, หนังสือกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศที่ กท.0404/3970 ลง 30 พ.ย. 64, เรื่อง ขอบปรับปรุงและพัฒนาแนวทางการประกอบเลี้ยงภัตตาคารกองประจำการ, (2564).

คำแนะนำสำหรับผู้นิพนธ์บทความ

วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้ามีจุดประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้และผลงานทางวิชาการด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี ในทุกแขนง โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานที่มีประโยชน์ต่อการวิชาการ การพัฒนาประเทศ และงานที่สามารถประยุกต์ใช้ในทางทหาร การรักษาความปลอดภัย และความมั่นคงของชาติ โดยมีกำหนดออกในเดือนธันวาคมของแต่ละปี ผู้นิพนธ์สามารถส่งบทความมาตีพิมพ์ได้ โดยไม่จำเป็นต้องเป็นสมาชิกของวารสารหรือเป็นบุคลากรของกองทัพไทย

วารสารฯ รับผิดชอบต้นฉบับทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ผลงานที่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์ จะต้องมีความน่าสนใจ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เป็นองค์ความรู้ใหม่ หรือนำเสนอองค์ความรู้เดิมในมุมมองใหม่ ไม่เคยถูกนำไปตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารอื่นใดมาก่อน และไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นใด

วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า รับผิดชอบบทความดังต่อไปนี้

1. บทความวิจัย (Research Articles) เป็นบทความที่นำเสนอผลการดำเนินการวิจัยอย่างเป็นระบบ และได้บรรลุวัตถุประสงค์ของการวิจัย ประกอบด้วยชื่อเรื่องและรายละเอียดผู้เขียน บทคัดย่อ และเนื้อหาบทวิจัยซึ่งประกอบไปด้วย บทนำ วัตถุประสงค์ เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วิธีดำเนินการศึกษา ผลการศึกษา สรุปและอภิปรายผล กิตติกรรมประกาศ และบรรณานุกรม
2. บทความปริทัศน์ (Review Articles) เป็นบทความที่เขียนจากการรวบรวมความรู้ในเรื่องที่น่าสนใจในปัจจุบัน เรื่องใดเรื่องหนึ่ง ผ่านกระบวนการ วิเคราะห์ สังเคราะห์ เปรียบเทียบ และ/หรือ วิจัย เพื่อให้เกิดเป็นองค์ความรู้ใหม่ ประกอบด้วย บทนำ เนื้อหา วิจัย สรุป และบรรณานุกรม

การส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์

ผู้นิพนธ์สามารถส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ได้ทางเว็บไซต์ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/crma-journal>

การดำเนินงานของกองบรรณาธิการวารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

เมื่อกองบรรณาธิการได้รับบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์จะจัดให้มีการกลั่นกรองเพื่อคัดเลือกเฉพาะบทความที่อยู่ในขอบข่ายการตีพิมพ์ของวารสารฯ และมีระดับคุณภาพที่ยอมรับได้ โดยบทความที่ได้รับการยอมรับให้ตีพิมพ์ ต้องผ่านเกณฑ์การประเมินแบบ Double-Blind Peer Review จากผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความอย่างน้อย 2 ท่านจากผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความจำนวน 3 ท่านและ/หรือ ผ่านการพิจารณาจากกองบรรณาธิการเป็นรายกรณี สำหรับบทความที่ได้รับการตอบรับอย่างมีเงื่อนไข ผู้นิพนธ์ของบทความนั้นต้องดำเนินการแก้ไขให้เสร็จสมบูรณ์ภายในระยะเวลาที่กองบรรณาธิการระบุ บทความที่ได้รับการยอมรับให้ตีพิมพ์จะถูกเผยแพร่ทั้งในแบบรูปเล่มและแบบ online บนเว็บไซต์ของวารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ผู้นิพนธ์แต่ละคนจะได้รับเล่มวารสารที่มีบทความของตน จำนวนคนละ 1 เล่ม การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นการรับผิดชอบต่อผู้ส่งบทความโดยตรง

บทบาท หน้าที่ และจริยธรรมของบรรณาธิการ (Duties and Ethics of Editors)

1. บรรณาธิการต้องคัดเลือกผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาของบทความที่ประเมินสามารถประเมินและให้คำแนะนำต่อผู้นิพนธ์ได้เป็นอย่างดี
2. บรรณาธิการต้องคัดเลือกบทความบนพื้นฐานของความเป็นองค์ความรู้ใหม่ ความสำคัญ และความสอดคล้องกับขอบเขตการตีพิมพ์ของวารสารฯ
3. บรรณาธิการต้องมีการตรวจสอบการคัดลอกผลงานผู้อื่น (Plagiarism) หากตรวจพบการคัดลอกผลงาน บรรณาธิการต้องหยุดกระบวนการประเมินในทันที
4. ในช่วงระยะเวลาของการประเมินบทความ บรรณาธิการต้องไม่เปิดเผยชื่อผู้นิพนธ์ และชื่อผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความแก่บุคคลอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้อง
5. บรรณาธิการต้องไม่ตีพิมพ์บทความที่เคยตีพิมพ์ที่ใด ๆ มาแล้ว
6. บรรณาธิการต้องไม่ปฏิเสธการตีพิมพ์บทความด้วยเหตุผลอันเนื่องมาจากความสงสัยหรือไม่แน่ใจ โดยให้ออกาสผู้นิพนธ์ได้จัดหาหลักฐานมาพิสูจน์ข้อสงสัยที่มีอยู่
7. บรรณาธิการต้องไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้นิพนธ์หรือผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

บทบาท หน้าที่ และจริยธรรมของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ (Duties and Ethics of Reviewers)

1. ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องประเมินบทความในสาขาวิชาที่ตนมีความชำนาญเท่านั้น
2. ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องประเมินบทความโดยพิจารณาความสำคัญของเนื้อหาในบทความที่จะมีต่อสาขานั้น ๆ โดยไม่ใช้ความคิดเห็นส่วนตัวมาตัดสินบทความ
3. ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องระบุผลงานวิจัยที่สำคัญตอบบทความที่ประเมิน นอกจากนี้หากมีส่วนใดของบทความที่มีความเหมือนหรือซ้ำซ้อนกับผลงานอื่น ๆ ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องแจ้งให้บรรณาธิการทราบ

4. ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องไม่เปิดเผยข้อมูลส่วนใดส่วนหนึ่งของบทความที่อยู่ระหว่างการพิจารณาแก่บุคคลที่ไม่เกี่ยวข้อง
5. ถ้าผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความตระหนักว่าตนเองอาจมีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้นิพนธ์ เช่น รู้จักผู้นิพนธ์เป็นการส่วนตัว เป็นผู้ร่วมโครงการ หรือเหตุผลอื่น ๆ ที่ทำให้ไม่สามารถให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะอย่างอิสระได้ ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องแจ้งให้บรรณาธิการทราบ และปฏิเสธการประเมินบทความนั้น ๆ

บทบาท หน้าที่ และจริยธรรมของผู้นิพนธ์ (Duties and Ethics of Authors)

1. บทความที่ส่งมาขอตีพิมพ์ต้องเป็นบทความใหม่ของผู้นิพนธ์เอง ไม่เคยตีพิมพ์ที่ไหนมาก่อน ไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์โดยผู้ตีพิมพ์อื่นใด และเป็นไปตามจรรยาวิชาชีพวิจัยและแนวทางปฏิบัติของสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ
2. ผู้นิพนธ์ที่มีชื่อปรากฏในบทความทุกคน ต้องเป็นผู้ที่มีส่วนในการดำเนินการวิจัยจริง
3. หากมีการนำผลงานของผู้อื่นมาใช้ ผู้นิพนธ์ต้องอ้างอิงผลงานเหล่านั้น
4. ผู้นิพนธ์ต้องรายงานข้อเท็จจริงที่เกิดขึ้นจากการทำวิจัย ไม่มีการบิดเบือน ไม่ให้ข้อมูลที่เป็นเท็จ
5. ผู้นิพนธ์ต้องระบุแหล่งทุนที่สนับสนุนในการทำวิจัยนี้ (ถ้ามี)
6. ผู้นิพนธ์ต้องระบุผลประโยชน์ทับซ้อน (ถ้ามี)
7. ผู้นิพนธ์ต้องเขียนบทความวิจัยให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดไว้ใน “คำแนะนำสำหรับผู้นิพนธ์บทความ”

ลิขสิทธิ์

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของวารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า



แบบฟอร์มขอส่งบทความเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

ข้าพเจ้า

ตำแหน่ง / สังกัด

ตำแหน่งทางวิชาการ ☐ ผศ. ☐ รศ. ☐ ศ.

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย (Research Article) ☐ บทความปริทัศน์ (Review Article)

ชื่อเรื่องภาษาไทย.....

.....

คำสำคัญ

ชื่อเรื่องภาษาอังกฤษ.....

.....

Keywords (ภาษาอังกฤษ).....

ชื่อผู้เขียน (ภาษาไทย).....

.....

ชื่อผู้เขียน (ภาษาอังกฤษ).....

.....

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้..... หมู่ที่..... ซอย..... ถนน.....

ตำบล..... อำเภอ..... จังหวัด..... รหัสไปรษณีย์.....

โทรศัพท์..... โทรศัพท์มือถือ..... โทรสาร.....

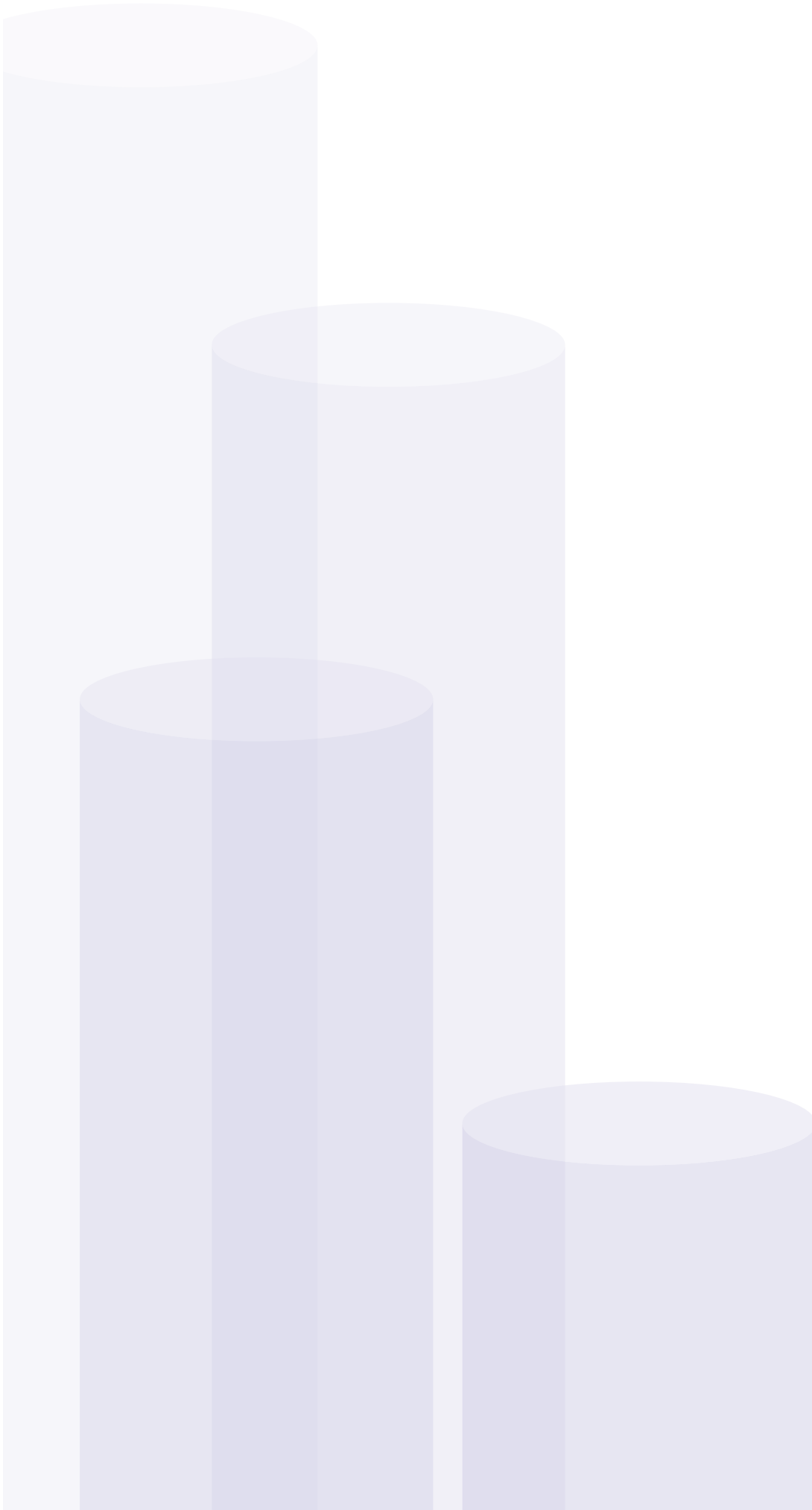
E-mail.....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้

1. เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุในบทความ (ถ้ามี) จริง
2. ไม่เคยถูกนำไปตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารอื่นใดมาก่อน และไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นใด

ลงนาม.....

(.....)



การศึกษาพัฒนาหยกเนไฟรต์เพื่อลดก๊าซพิษไอเสีย
ในท่อรถจักรยานยนต์

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศในการวิเคราะห์
ความเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินด้วยข้อมูลดาวเทียม

อัลกอริทึมแห่งความสัมพันธ์ระหว่างการไร้วัดน
กับอาชญากรรมไซเบอร์

การพัฒนากระบวนการทำกลีเซอรินบริสุทธิ์จากผลพลอยได้
ของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว

The Study of the Optimal Route for Waste Collection by Using
Vehicle Routing Problem in Chulachomklao Royal Military
Academy

การศึกษาเปรียบเทียบค่ากำลังของวัตถุระเบิดแรงสูงจากการคำนวณ
ทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายและค่าจากการทดลอง

ผลของโครงสร้างการทอเส้นใยเสริมพอลิเบนซอกซาซีนเรซิน
ต่อคุณสมบัติทางกล

การพัฒนากระบวนการผลิต “ข้าวหอมมะลิกิ่งสำเร็จรูป”
เพื่อใช้เป็นเสบียงรบประจำบุคคล



CRMA Journal 2023

**Chulachomklao
Royal Military Academy**

ผู้ออกแบบศิลป์ พ.อ.พศ.ดร.ฐนัส มานวงศ์