



พืชวงศ์ทานตะวัน

ในอุทยานแห่งชาติน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์



KKU SCIENCE JOURNAL



วารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ปีที่ 37 ฉบับที่ 4 (ก.ค. - ธ.ค. 63) Vol. 37 No. 4 (Dec. 2020)

ISSN : 0125-2364

เจ้าของ

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สำนักงาน

คณะวิทยาศาสตร์ ตึก 6 มหาวิทยาลัยขอนแก่น

อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

โทรศัพท์ 0-4320-2372 โทรสาร 0-4320-2371

วัตถุประสงค์

1. เพื่อส่งเสริมและเผยแพร่วิทยาการในสาขาวิชาต่าง ๆ ทางด้านวิทยาศาสตร์
2. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางด้านการวิจัย และการศึกษา ค้นคว้าของอาจารย์และนักศึกษา
3. เพื่อเป็นสื่อกลางการแลกเปลี่ยนความรู้ และแนวความคิดทางวิชาการระหว่างอาจารย์ นักศึกษา และผู้สนใจ ทั้งภายในและภายนอกสถาบัน

กำหนดออก ปีละ 4 ฉบับ

- ฉบับที่ 1 มกราคม - มีนาคม
ฉบับที่ 2 เมษายน - มิถุนายน
ฉบับที่ 3 กรกฎาคม - กันยายน
ฉบับที่ 4 ตุลาคม - ธันวาคม

ที่ปรึกษา

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(เกียรติ แสงอรุณ)

บรรณาธิการ

สมปอง ธรรมศิริรักษ์

กองบรรณาธิการ

กิตติกร ศาสตราวุฒิมา	นาคประสิทธิ์ วงศ์ธนสุข
เอกพรรณ ตักดา	หาญจวนิช สวัสดิ์จิตรัง
ศักดิ์ดา สัมเดช	ดาวง กนกมธากุล
สุพรรณิ งามนิจ	อึ้งปญ์สัถวงศ์ นนทโส
อัจฉราภรณ์	ภักดี

ฝ่ายศิลป์และภาพ

กิลาน ดิณนรเศรษฐ์

ฝ่ายจัดการและ เลขานุการ

สุภาพ วุฒิฉัตร	พิมพ์วาปี น้อยนรินทร์
ศักดิ์สิทธิ์ พิกุล	สุวรรณ ราชพลแสน
จิราภรณ์	พิมพ์ภูมิ

“ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงาน
คณะกรรมการการอุดมศึกษา”

บทความหรือข้อคิดเห็นใด ๆ ในวารสารนี้เป็นของผู้เขียน ไม่จำเป็นต้องสอดคล้องกับทัศนะของกองบรรณาธิการ



KKU SCIENCE JOURNAL

วารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ปีที่ 37 ฉบับที่ 4 (ต.ค. - ธ.ค. 52) Vol. 37 No. 4 (Oct. - Dec. 09)

ISSN 0125 - 2364

บรรณาธิการแถลง

บทความ

- ☐ การพัฒนากลิ่นหอมของไวน์
Development of Wine Aroma
จุฑาทพร แสงแก้ว..... 357

- ☐ 프리ไบโอติก
Prebiotic
สุดาทิพย์ จูฑะโกศา..... 366

- ☐ การวิเคราะห์สปีชีส์ของสารประกอบซีลีเนียม
Speciation of Selenium Compounds
ปิยะเนตร จันทร์ถิระติกุล..... 376

งานวิจัย

- ☐ แผนภูมิควบคุมคุณภาพหลายตัวแปรด้วยข่ายงาน
ระบบประสาทสำหรับการควบคุมกระบวนการ
เชิงสถิติ
Multivariate Quality Control Charts by Neural
Networks for Statistical Process Control
จตุภัทร เมฆพ่าย..... 386

- ☐ การประยุกต์แบบจำลองเชิงตัวเลขที่มีการนำเข้า
ข้อมูลใหม่ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงในมหาสมุทร
Applications of Numerical Model with
Data-Assimilation to Study Ocean Variations
ธเนศร์ โรจน์ศิริพิศาล..... 398



KKU SCIENCE JOURNAL

วารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ปีที่ 37 ฉบับที่ 4 (ต.ค. - ธ.ค. 52) Vol. 37 No. 4 (Oct. - Dec. 09)

ISSN 0125 - 2364

งานวิจัย

- ความคงตัวของเอนไซม์เซลลูเลสจากจุลินทรีย์
สารเร่ง พด.1 เพื่อการประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรม
The Stability of Cellulase Produced by Compost
Microorganisms for Industrial Application

รุสนี โตะกิเล

ฉันทดี เตชะภักทวรกุล สุขสาโรจน์

เบญจมาศ เขียร์ศิลป์.....

407

- การเดินรำเพื่อสื่อสารบอกทิศทางแหล่งอาหาร
ของผึ้งมัม (*Apis florea* Fabricius, 1787)
Dance Communication on Food Resources
of Dwarf Honey Bee (*Apis florea* Fabricius,
1787)

ปิยมาศ นานอก พรพิมล พงษ์อ่อน

อภิญา แก้วใส.....

417

- ความหลากหลายของพืชวงศ์ทานตะวันในอุทยาน
แห่งชาติน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์
Diversity of Asteraceae in Nam Nao
National Park, Phetchabun Province

สุสติ พรหมประสิทธิ์

อมรัตน์ ประจักษ์สูตร

พิมพ์ดี พรพวงศรีรุ่งเรือง.....

426



KKU SCIENCE JOURNAL

วารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ปีที่ 37 ฉบับที่ 4 (ต.ค. - ธ.ค. 52) Vol. 37 No. 4 (Oct. - Dec. 09)

ISSN 0125 - 2364

งานวิจัย

- การกำจัดโลหะหนักที่มีพิษในน้ำทิ้งด้วยถังบำบัดแบบอยู่กับที่
Removal of Toxic Heavy Metals from Wastewater by Onsite Treatment Plant
รัตนา มหาชัย ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง
ชุดิมา ภู่อัฐมุนทร นาด ภูวงศ์ผา
ชาญเชาว์ พรหมราชกูร์..... 435
- การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยระบบเอสบีอาร์ที่ตามด้วยไคโตซาน
Study on Efficiency of Leachate Treatment by SBR System and Chitosan
ศุภยา ฤทธิศร จุไรรัตน์ ดวงเดือน
อรรพรรณ ชื่นคุ้ม..... 444
- ผลของอุณหภูมิซินเตอร์ต่อสมบัติของเซรามิก $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{O}_3$
Effects of Sintering Temperature on Properties of $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{O}_3$ Ceramics
พรสุดา บ่มได้..... 454
- การคำนวณสัมประสิทธิ์สภาพขุ่นมัวของบรรยากาศจากข้อมูลทัศนวิสัยในจังหวัดขอนแก่น
A Determination of Atmospheric Turbidity Coefficient from Visibility Data in Khon Kaen Province
สายนต์ โพธิ์เกิด..... 463



KKU SCIENCE JOURNAL

วารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ปีที่ 37 ฉบับที่ 4 (ต.ค. - ธ.ค. 52) Vol. 37 No. 4 (Oct. - Dec. 09)

ISSN 0125 - 2364

งานวิจัย

- ❑ เรียบวิธีสมาชิกตามขอบ โดยใช้วิธีสมาชิก
กำลังสอง ใน 2 มิติกับโปรแกรมแมทแลบ
The Boundary Element Method using
Quadratic Element for Two - Dimensional
with MATLAB
จักรี ภาชา
วัฒนา เถาว์ทิพย์.....

472
- ❑ การจำลองการไหลคงตัวใน 2 มิติของของไหล
แบบมีความหนืดที่อัดตัวไม่ได้ โดยใช้โปรแกรม
FlexPDE student version 5.1.0s
2D-Flow Simulation of Iscous Incompressible
Fluid using FlexPDE Student Version 5.1.0s
อัครพงศ์ วงศ์พัฒน์
สุพนัน ไวทย์ยางกูร.....

482
- ❑ ตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยกของค่าเฉลี่ย
ประชากรในการชักตัวอย่างอย่างง่ายแบบแบ่งเป็น
ชั้นภูมิ
Separate Ratio Estimator of the Population
Mean in Stratified Random Sampling
นิวัตร สุวรรณะ
พัชรี วงษ์เกษม
คณินทร์ ชีรภาพโอฬาร.....

495

KKU SCIENCE JOURNAL



วารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ปีที่ 37 ฉบับที่ 4 (ก.ค. - ธ.ค. 57) Vol. 37 No. 4 (Oct. - Dec. 09)

ISSN 0125 - 2364

Advisory Committee Dean, Faculty of Science
(Kiat Sangaroon)

Editor Sompong Thammasirirak

Editorial Board
Kittikorn Nakpasit
Sartra Wongthanavasu
Chutima Hanjavanit
Ekaphan Swatsitang
Sakda Daduang
Somdej Kanokmedhakul
Supunnee Ungpansattawong
Ngamnit Nontaso
Adcharaporn Pagdee

Artists Kilen Tinnoraset

Managing Staff and Secretary
Suphaporn Phimwapi
Vuttichat Noynarin
Saksit Suwan
Phikun Ratphonsan
Jiraporn Pimphumee

Publisher

Faculty of Science, Khon Kaen University,
Thailand.

Office

Faculty of Science, Building 6, Khon Kaen
University, Khon Kaen Thailand, 40002
Tel. 0-4320-2372 Fax 0-4320-2371

Objectives

1. To promote dissemination of knowledge in all fields of science.
2. To publish research results of faculty, researchers and students.
3. To be a medium for the exchange of knowledge and ideas among faculty, researchers and students of Khon Kaen University and other institutions.

Publishing frequency

KKU Science Journal is a quarterly journal. Each volume consists of 4 numbers.

Number 1 January - March

Number 2 April - June

Number 3 July - September

Number 4 October - December

“ With the Financial Support
of the Commission on
Higher Education ”

The views and opinions expressed in this journal are those of the author(s), and do not necessarily reflect the views and opinions of the editorial board.

บรรณาธิการ **แถลง**

สวัสดีค่ะ ท่านผู้อ่านที่เคารพรักทุกท่าน

ในที่สุดก็มาถึงฉบับสุดท้ายของปีแล้วค่ะ ฉบับนี้ก็มีทั้งบทความปริทรรศน์และบทความวิจัยที่อัดแน่นไปด้วยเนื้อหาวิชาเหมือนเดิมค่ะ ซึ่งมีทั้งเรื่อง ทั่วไปอดีต การพัฒนากลิ่นหอมของไวน์ การเดินร่ำเพื่อสื่อสารบอกทิศทางแหล่งอาหารของผึ้งมิม และการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยระบบเอสปีอาร์ที่ตามด้วยโคโคซาน เป็นต้น ก็ขอเชิญชวนอาจารย์ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาทุกท่าน ตีพิมพ์ผลงานของท่านในวารสารของเรา ซึ่งในปีหน้าทางกองบรรณาธิการจะปรับปรุง และรับรองว่าผลงานทางวิชาการของท่านจะได้ตีพิมพ์อย่างรวดเร็ว และมี Peer review ที่เข้มข้น และสุดท้ายนี้ในวาระดิถีขึ้นปีใหม่ ดิฉันและกองบรรณาธิการทุกท่านก็ขออวยพรให้ท่านผู้อ่านทุกคน มีความสุข ประสบผลสำเร็จในหน้าที่การงานตลอดปี 2553 ด้วยค่ะ

ขอพระคุณค่ะ

สมปอง ธรรมศิริรักษ์



กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข. ขอกราบขอบพระคุณท่านผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้เกียรติพิจารณาบทความวิจัยและบทความปริทัศน์ เพื่อลงวารสาร ฉบับปีที่ 37 (ปี พ.ศ. 2552) ดังรายนามต่อไปนี้ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับความกรุณาจากท่านตลอดไป

รศ.ดร.กนกอร อินทราพิเชฐ	ผศ.ดร.นิภา มลิณทวิสมัย	ดร.เนตรนภิส เขียวขำ
รศ.ดร.กมล บุญบา	ผศ.ดร.กมลชนก พานิชการ	ดร.ประกาศ สว่างโชติ
รศ.ดร.จักษ์ อัสวานันท์	ผศ.ดร.ชมพูนุช พิษมาก	ดร.ประดิษฐ์ แสงทอง
รศ.ดร.จินตนา สิริพิทยานานนท์	ผศ.ดร.ชรินทร์ เตชะพันธุ์	ดร.ปราณี นางงาม
รศ.ดร.ณสรวรต์ ผลโลก	ผศ.ดร.ชัยวัฒน์ นามนาค	ดร.ปิยะรัตน์ บุญแสวง
รศ.ดร.ดนัย บุญเกียรติ	ผศ.ดร.ชังแข็ง เลียงจินดาถาวร	ดร.ไพโรจน์ ประมวล
รศ.ดร.ดำรงค์ ทิพย์โยธา	ผศ.ดร.ธรรมบุญ โปรดปราน	ดร.ขวัญเนตร สมบัติสมภพ
รศ.ดร.ทวีศักดิ์ บุญเกิด	ผศ.ดร.นิทัศน์ จีระอรุณ	ดร.จิรากร สิงห์ทอง
รศ.ดร.ธีรยุทธ วิไลวัลย์	ผศ.ดร.ผกาดี แก้วกันเนตร	ดร.วิทยา เงินแท้
รศ.อรพินท์ เขียวระพงษ์	ผศ.ดร.พยุง มีสัง	ดร.วิภารัตน์ เชื้อชวด
รศ.ดร.ภาวณี ชัยประเสริฐ	ผศ.ดร.ภาณุวรรณ จันทวรรณกูร	ดร.สงกรานต์ เชื้อครุฑ
รศ.ดร.วรรณภา อธิชะ	ผศ.ดร.รุ่งนภา ทิพากรอุติกุล	ดร.สมพร เกษแก้ว
รศ.ดร.วิรัช เรื่องศรีตระกูล	ผศ.ดร.ศศิธร วงศ์เรือง	ดร.สมศักดิ์ พิมานแพง
รศ.ดร.ศักดิ์ดา คางวง	ผศ.ดร.ศิริวรรณ เนติวานนท์	ดร.สรัญญา ขวพันธุ์
รศ.ดร.ศักดิ์สิทธิ์ จันทน์ไทย	ผศ.ดร.สุนิรัตน์ เรื่องสมบูรณ์	ดร.สวัสดิ์ ยอดขยัน
รศ.ดร.สมจิต โชติชัยสถิตย์	ผศ.ดร.สุพิชญา จันทะชุม	ผศ.ดร.สิริวดี ชมเดช
รศ.ดร.สมเดช กนกเมธากุล	ผศ.ดร.เสาวนิต ทองพิมพ์	ดร.สุริรัตน์ อารีรักษ์สกุล ก้องโลก
รศ.ดร.สมปอง ธรรมศิริรักษ์	ผศ.ดร.อนุชา วัชรภาสกร	ดร.เสาวรัตน์ จันทะโร
รศ.ดร.สมพงษ์ คุณชัยจินดาขบาร	ผศ.ดร.อรพินท์ เขียวถาวร	ดร.อรอนงค์ พริ้งสุกละ
รศ.ดร.สังคม เตชะวงศ์เสถียร	ผศ.ดร.อัญชลี คัดตะวะศาสตร์	ดร.อุไร เต่งเจริญกุล
รศ.ดร.สันทนต์ ศิริอนันต์ไพบูลย์	ผศ.ดร.อุทิศ อินทร์ประสิทธิ์	อ.เบญจวรรณ ชิวปรีชา
รศ.ดร.สืบสกุล อยู่ยืนยง	ผศ.ดร.เอกพรรณ สวัสดิ์ชัยตั้ง	อ.พุทธพร วานิชกร
รศ.ดร.สุพล อนันดา	ผศ.ดร.ณหทัย ราตรี	นางอุมา บริบูรณ์
รศ.ดร.สุรศักดิ์ วงศ์รัตนชีวิน	ผศ.ดวงใจ สุขเฉลิม	
รศ.ดร.สุรศักดิ์ วัฒนเสถียร	ผศ.พงศ์เชษฐ์ พิชิตกุล	
รศ.ดร.สุรินทร์ เหล่าสุขสถิตย์	ผศ.พิชัย คงพิทักษ์	
รศ.ดร.อรัญ หันพงศ์กิตติกุล	ผศ.ดร.รสมันต์ จงเจริญ	
รศ.น.สพ.ดร. กิตติศักดิ์ อังลวิชะขจร	ดร.ณัฐกาญจน์ ใจดี	
รศ.ชยากริต ศิริอุปถัมภ์	ดร.ทิพย์สุดา ดังตระกูล	
รศ.นราพร หาญจนวนวงศ์	ดร.เทพปัญญา เจริญรัตน์	
รศ.ศุภฤกษ์ วัฒนสิทธิ์	ดร.นงคราญ สระโสม	

บรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข.



การพัฒนากลิ่นหอมของไวน์ Development of Wine Aroma

จุฑาทพร แสงแก้ว¹

บทนำ

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมนุษย์ได้มีการค้นคิด และปรุงแต่งเครื่องดื่มประเภทต่างๆ เพื่อตอบสนอง ต่อความต้องการและรสนิยมของผู้บริโภค เครื่องดื่ม มีหลายประเภทประกอบด้วยเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ และไม่มีแอลกอฮอล์เป็นองค์ประกอบเครื่องดื่มที่นิยมดื่ม มาก รู้จักและหลงเสน่ห์อีกประเภทหนึ่ง คือ ไวน์ ซึ่งไวน์ เป็นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ประเภทหนึ่งที่นิยมดื่มมาก ในประเทศแถบตะวันตกและได้แพร่กระจายมายัง ประเทศไทยมาตั้งแต่สมัยโบราณ ไวน์ที่วางจำหน่ายใน ประเทศไทยมีทั้งที่ผลิตขึ้นเองในประเทศและนำเข้า จากต่างประเทศ ส่วนราคาของไวน์จะถูกหรือแพง ขึ้นอยู่กับคุณภาพของไวน์ ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการดื่มไวน์เพิ่มมากขึ้นและนิยมดื่มทั้งผู้หญิงและผู้ชาย ไวน์เป็นตัวเพิ่มสีสันบนโต๊ะอาหาร ตลอดจนช่วยให้ เจริญอาหารได้อีกด้วย เสน่ห์ของไวน์อยู่ที่รสชาติและ กลิ่นหอมของไวน์ ซึ่งไวน์แต่ละประเภทจะมีรสชาติ และกลิ่นที่แตกต่างกัน ความหอมของไวน์ประกอบ

ด้วยกลิ่นหลายร้อยกลิ่นมารวมกันอย่างลงตัว กลิ่นที่ พบในไวน์ ได้แก่ กลิ่นดอกไม้ กลิ่นผลไม้ กลิ่น เครื่องเทศ เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีทาง ด้านเอนไซม์จากจุลินทรีย์มาใช้ในการเพิ่มกลิ่นหอม ของไวน์ ในบทความนี้จะกล่าวถึงการเพิ่มกลิ่นหอม ของไวน์โดยเอนไซม์จากจุลินทรีย์

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไวน์

ไวน์ (wine) หรือเหล้าองุ่น หมายถึง เครื่องดื่มประเภทสุราแช่ (สุราที่ไม่มีการกลั่นในขั้นตอน สุดท้าย) นิยมดื่มและมีประวัติบันทึกไว้นานมากกว่า 6,000 ปี ก่อนคริสตกาล (Charter, 2006) ไวน์เป็นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ที่เกิดจากการหมักน้ำองุ่นด้วยเชื้อยีสต์ (นิยมหมักด้วยสายพันธุ์ *Saccharomyces cerevisiae*) ยีสต์จะเปลี่ยนน้ำตาลในองุ่นไปเป็นแอลกอฮอล์ ดัง รูปที่ 1 โดยทั่วไป ไวน์มีเอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) เป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 5 ถึง 14 โดยปริมาตร



รูปที่ 1 ปฏิกิริยาการเปลี่ยนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดคาร์บอนหกอะตอมไปเป็นเอทิลแอลกอฮอล์

¹ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

นอกจากองุ่นที่นิยมนำมาหมักไวน์แล้วยังมีผลไม้ชนิดอื่นๆ ที่นำมาหมักไวน์ โดยไวน์ที่ผลิตจากผลไม้ชนิดอื่นๆ จะเรียกชื่อผลไม้ชนิดนั้นตามหลังคำว่าไวน์ เช่น ไวน์หม่อน ไวน์มะยม ไวน์มะขาม ไวน์สับปะรด ไวน์ลิ้นจี่ ไวน์เชอรี่ เป็นต้น อย่างไรก็ตามไวน์ผลไม้ไม่ได้รับความนิยมจากผู้ดื่มเท่าที่ควรเมื่อเทียบกับไวน์ที่หมักจากองุ่น ดังนั้น ในบทความนี้จะกล่าว เฉพาะไวน์ที่หมักจากองุ่นเท่านั้น

โดยทั่วไป ไวน์แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามสีของไวน์ คือ ไวน์ขาว (white wine) เป็นไวน์ที่ผลิตจากองุ่นสีเขียว ไวน์แดง (red wine) เป็นไวน์ที่ผลิตจากองุ่นสีแดงหรือม่วงเข้ม และไวน์ชมพู (roses wine) เป็นไวน์ที่ผลิตจากองุ่นที่มีสีแดง นอกจากนั้นยังแบ่งไวน์ออกเป็น 3 ประเภท ตามความหวานของไวน์ คือ ไวน์ไม่หวาน (dry wine) เป็นไวน์ที่มีน้ำตาลไม่เกินร้อยละ 1 ไวน์หวานเล็กน้อย (semi dry wine) เป็นไวน์ที่มีน้ำตาลประมาณร้อยละ 2 ถึง 5 และ ไวน์หวาน (sweet wine) เป็นไวน์ที่มีน้ำตาลมากกว่าร้อยละ 5 (Jackson, 2000) คุณลักษณะของไวน์แต่ละชนิดจะแตกต่างกัน เช่น คุณภาพ รสชาติ และกลิ่นของไวน์ โดยคุณภาพของไวน์จะขึ้นอยู่กับสายพันธุ์องุ่น บริเวณที่ปลูกองุ่น ชนิดของยีสต์ และขั้นตอนการหมัก

ขั้นตอนการผลิตไวน์อย่างง่าย เริ่มต้นจากเก็บเกี่ยวองุ่นมาแยกช่ขององุ่นออกเสียก่อน จากนั้นบีบน้ำแล้วทำการหมักในถัง ก่อนการหมักอาจจะเติมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ในรูป potassium metabisulfate (KMS) เพื่อฆ่าแบคทีเรียที่ปนเปื้อนมากับองุ่น ซึ่งแบคทีเรียที่ปนเปื้อนจะส่งผลให้คุณภาพของไวน์ไม่ดี หากเป็นไวน์แดงจะใช้องุ่นสีแดงหมักทั้งเปลือกพร้อมกับหมักด้วยยีสต์สายพันธุ์ที่ใช้ในการหมักไวน์ โดยสีของไวน์แดงเกิดจากเปลือกองุ่น กระบวนการหมักจะหมักประมาณ 10 ถึง 30 วัน หากเป็นไวน์ขาวจะใช้องุ่นเขียวจะหมักไปพร้อมเปลือกประมาณ 12-48 ชั่วโมงเท่านั้นเพื่อให้ได้กลิ่นและรสชาติจากเปลือกองุ่น จากนั้นแยกเปลือกออกและหมักด้วยยีสต์สายพันธุ์ที่ใช้ในการหมักไวน์ เมื่อกระบวนการหมักเสร็จสิ้นแล้ว

ไวน์จะถูกนำไปบ่ม (aging) ต่อไปอีกไม่ไ้เกินหนึ่งปี กลิ่นรสที่ดี จากนั้นนำไวน์มาทำให้ใสก่อนที่จะบรรจุขวดเพื่อจำหน่าย (Jackson, 2000)

กลิ่นหอมของไวน์

กลิ่นหอม (aroma) ของไวน์ เป็นสิ่งสำคัญ และเป็นตัวบ่งบอกคุณภาพของไวน์อย่างหนึ่ง กลิ่นหอมเป็นส่วนอย่างหนึ่งของไวน์ที่ทำให้กลิ่นไวน์หลงเหลือไวน์แต่ละชนิดจะมีกลิ่นที่จำเพาะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสายพันธุ์องุ่นที่นำมาหมักไวน์ ซึ่งไวน์คุณภาพดีจะมีกลิ่นไม่ผิดเพี้ยนจากคุณลักษณะของสายพันธุ์องุ่นนั้นๆ ปัจจัยที่ทำให้เกิดกลิ่นหอมของไวน์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด เริ่มตั้งแต่สายพันธุ์องุ่น สภาพแวดล้อมในการปลูกองุ่น เช่น คุณภาพของดิน น้ำ แสงแดด อากาศ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับขั้นตอนการหมักไวน์ สายพันธุ์ยีสต์ที่ใช้ในกระบวนการหมัก ตลอดจนกรรมวิธีในการบ่มไวน์ (Clarke and Bakker, 2004) ดังนั้นไวน์ที่หมักจากองุ่นต่างชนิดกันหรืออาจจะใช้องุ่นชนิดเดียวกันแต่ปลูกในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน หรือองุ่นสายพันธุ์เดียวกันปลูกที่เดียวกัน แต่ปลูกคนละปี ลักษณะและคุณภาพของไวน์จะมีลักษณะแตกต่างกันออกไป

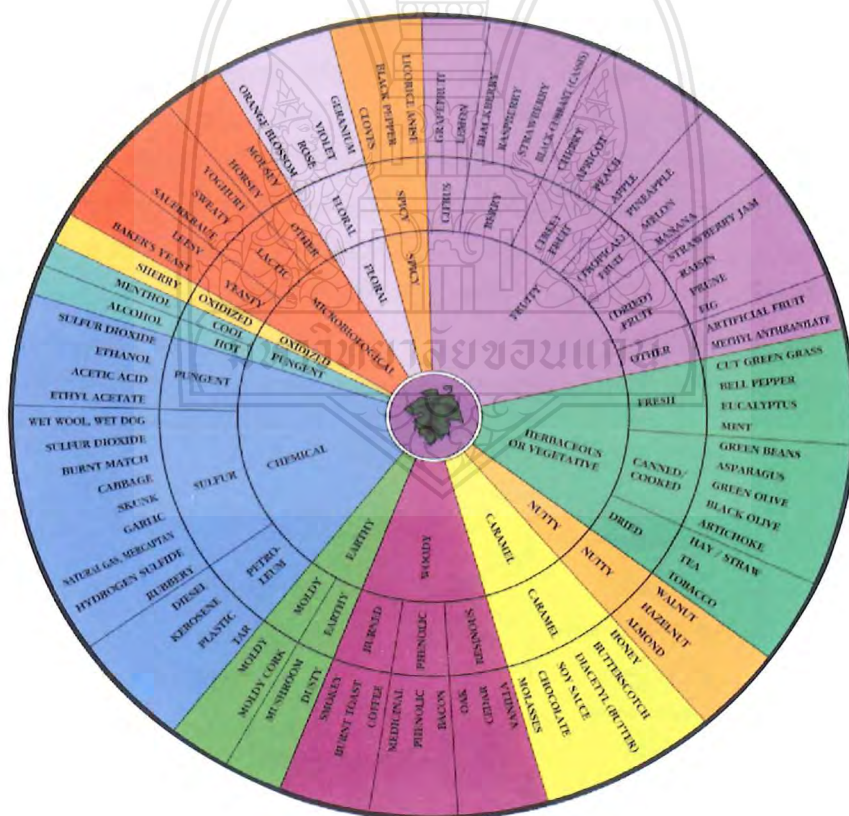
กลิ่นหอมของไวน์มาจากองุ่นซึ่งที่เปลือกของผลองุ่นจะประกอบไปด้วยสารให้กลิ่นหอม (aroma compound) ได้แก่ สารในกลุ่ม monoterpenes เช่น linalool (กลิ่นดอกไม้ และผลไม้) ได้แก่ มะนาวและองุ่น geraniol (กลิ่นดอกไม้) nerol (กลิ่นดอกไม้) citronellol α -terpineol (กลิ่นดอกไม้และกลิ่นหอมหวาน) เป็นต้น (Mateo and Jimenez, 2000) ดังนั้นกลิ่นหอมของไวน์จะเกิดในขั้นตอนการหมักไวน์และบ่มไวน์นั่นเอง

Professor Dr. Ann C. Noble แห่งมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย เดวิส (University of California, Davis) ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ศึกษากลิ่นหอมของไวน์จากการดมกลิ่นของไวน์แต่ละชนิดและได้ประดิษฐ์ “วงล้อเทียบกลิ่นหอม (aroma wheel)” ดังรูปที่ 2 ซึ่งวงล้อเทียบกลิ่นหอมมีประโยชน์ต่อนักชิมไวน์เพื่อใช้

ในการประกอบกับการพรรณนาและแยกแยะกลิ่นหอมของไวน์ กลิ่นหอมของไวน์สามารถแบ่งออกได้เป็น 12 กลิ่นพื้นฐานใหญ่ๆ ที่พบทั่วไปในไวน์ (Noble et al., 1987) นอกจากนั้นกลิ่นพื้นฐานทั้ง 12 กลิ่นยังสามารถแบ่งแยกย่อยออกไปได้อีกตามกลุ่มความหอมที่จัดจำแนก ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างเฉพาะกลิ่นพื้นฐานทั้ง 12 กลิ่น ดังต่อไปนี้

1. กลิ่นสารเคมี (chemical) เช่น กลิ่นซัลเฟอร์ (sulfur) กลิ่นปิโตรเลียม (petroleum)
2. กลิ่นฉุน (pungent) เช่น กลิ่นแอลกอฮอล์ (alcohol)
3. กลิ่นออกซิไดซ์ (oxidized) เช่น กลิ่นอะเซทัลดีไฮด์ (acetaldehyde)
4. กลิ่นจุลินทรีย์ (microbiological) เช่น กลิ่นยีสต์ (yeast) กลิ่นกรดแลคติก (lactic acid)

5. กลิ่นดอกไม้ (floral) เช่น กลิ่นเจอรัราเนียม (geranium)
6. กลิ่นเครื่องเทศ (spicy) เช่น กลิ่นชะเอม (licorice) กลิ่นยี่ห่วย (anise)
7. กลิ่นผลไม้ (fruity) เช่น กลิ่นแบลคเคอร์แรนท์ (blackcurrant) กลิ่นแอพลีค็อต (apricot)
8. กลิ่นผัก (vegetative) เช่น กลิ่นยูคาลิปตัส (eucalyptus)
9. กลิ่นถั่ว (nutty) เช่น กลิ่นวอลนัท (walnut), เฮเซลนัท (hazelnut)
10. กลิ่นคาราเมล (caramelized) เช่น กลิ่นเนย (butterscotch) กลิ่นกากน้ำตาล (molasses)
11. กลิ่นไม้ (woody) เช่น กลิ่นวานิลลา (vanilla) กลิ่นกาแฟ (coffee)
12. กลิ่นดิน (earthy) เช่น กลิ่นเห็ด (mushroom)



รูปที่ 2 วงล้อเทียบกลิ่นหอมของไวน์ (Noble et al., 1987)

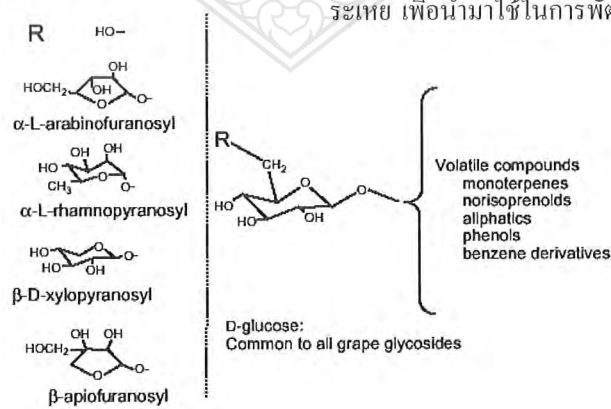
การประเมินกลิ่นหอมของไวน์ทำได้โดยใช้ความรู้สึทางประสาทสัมผัส คือ การดมกลิ่นทางจมูก วิธีการดมกลิ่นจะต้องแก้วไวน์ในแก้วแล้วสูดดมให้กลิ่นระเหยเข้าสู่โพรงจมูก จากนั้นจะต้องวิเคราะห์แยกแยะให้ได้ว่ามีกลิ่นหอมอะไรบ้างที่อยู่ในไวน์ ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญเนื่องจากมีกลิ่นหลายพันชนิดที่มนุษย์รู้จัก เป็นการยากที่จะสามารถจดจำกลิ่นต่างๆ และแยกแยะกลิ่นต่างๆ ได้ ดังนั้น ผู้ประเมินกลิ่นหอมหรือคุณภาพของไวน์จะต้องมีความชำนาญในการดมไวน์และสามารถแยกแยะกลิ่นต่างๆ ได้เป็นพิเศษ ตลอดจนผู้ประเมินคุณภาพไวน์จะต้องมีความสามารถในการจำดกลิ่นเฉพาะของไวน์ที่หมักจากองุ่นสายพันธุ์ต่างๆ อย่างไรก็ตาม การตรวจสอบกลิ่นหอมของไวน์โดยประสาทสัมผัสนั้นเป็นเพียงการประเมินกลิ่นหอมโดยใช้ความรู้สึกเท่านั้น

ปัจจุบันเครื่องมือที่นับได้ว่ามีประโยชน์ที่สุดในการวิจัยและศึกษาเกี่ยวกับกลิ่นหอมในไวน์ คือ แก๊สโครมาโตกราฟี (gas chromatography) หรือ จีซี (GC) ซึ่งใช้แยกและวัดองค์ประกอบสารระเหยง่ายในไวน์ และเมื่อนำมารวมเข้ากับเทคนิคของแมส สเปกโตรเมตรี (mass spectrometry) เป็นเครื่องตรวจวัด (detector) ที่สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของสารในตัวอย่างโมเลกุลของสารระเหยง่ายในไวน์จะถูกแยกออกมาจากไวน์ตัวอย่างโดยเครื่องจีซี จากนั้นจะถูกทำให้เป็นไอออน (ionize) ในสถานะสูญญากาศแล้วตรวจวัดออกมาเป็นเลขมวล (mass number) เทียบกับสารมาตรฐานหรือ

ฐานข้อมูลอ้างอิงและแปลผลออกมาเป็นชื่อของสารประกอบนั้น ซึ่งข้อมูลดังกล่าวทำให้สามารถวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของสารหอมระเหยได้

การเพิ่มกลิ่นหอมของไวน์

จากที่กล่าวไปแล้วในข้างต้นว่า กลิ่นหอมของไวน์มาจากองุ่น บริเวณเปลือกของผลองุ่นจะประกอบไปด้วยสารให้กลิ่นหอม (aroma compound) หลายชนิดในธรรมชาติสารให้กลิ่นหอม เช่น สารในกลุ่ม monoterpene จะพบ 2 ลักษณะ ลักษณะแรกจะอยู่ในรูปสารหอมระเหยอิสระ (volatile compound) ส่วนอีกลักษณะจะอยู่ในรูปสารเชิงซ้อนกับน้ำตาล ทำให้ไม่สามารถระเหยได้ (non-volatile compound) โดยปกติสารให้กลิ่นหอมส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปไม่ระเหยมากกว่าในรูปอิสระ สารดังกล่าวจะเชื่อมอยู่กับน้ำตาลโมเลกุลคู่ด้วยพันธะบีต้า 1,4 โกลโคซิดิก (β -1,4 glycosidic bond) ส่วนน้ำตาลโมเลกุลคู่จะประกอบไปด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสเชื่อมพันธะกับน้ำตาลชนิดอื่นๆ เช่น น้ำตาลแรมโนส (ramnose) น้ำตาลอะราบินโนส (arabinose) ดังรูปที่ 3 (D’Incecco et al., 2004) ส่งผลให้สารให้กลิ่นหอมมีคุณลักษณะไม่ระเหย ส่งผลให้ไวน์ไม่ค่อยมีความหอมหรือขาดกลิ่นหอมบางอย่างไปตลอดจนทำให้ไวน์มีกลิ่นที่ผิดแปลกจากคุณสมบัติของไวน์ไปทำให้ไวน์มีคุณลักษณะที่ไม่ดี ดังนั้นได้มีการค้นคว้าและวิจัยการนำสารเคมีหรือเอนไซม์มาใช้ในการปลดปล่อยให้สารให้กลิ่นหอมอยู่ในรูปสารหอมระเหย เพื่อนำมาใช้ในการพัฒนาคุณภาพของไวน์

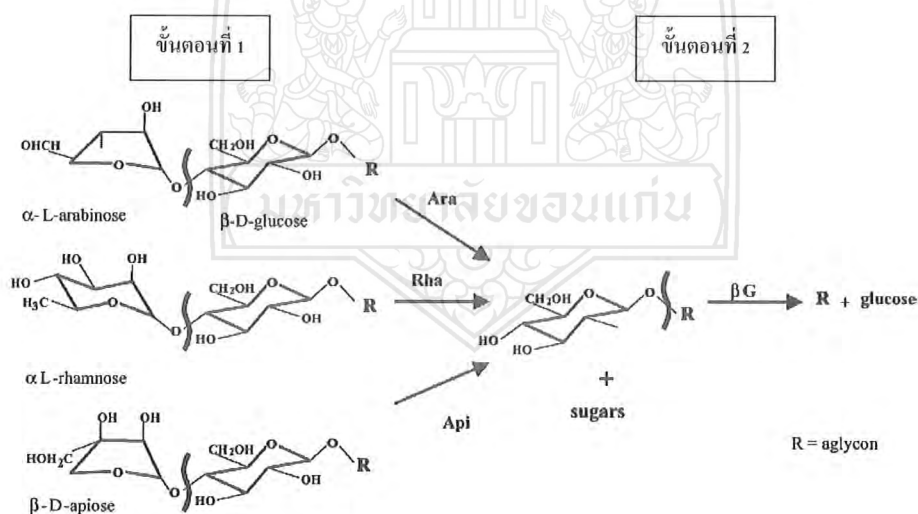


รูปที่ 3 พันธะระหว่างสารให้กลิ่นหอมกับโมเลกุลของน้ำตาล (D’Incecco et al., 2004)

การทำให้ไวน์มีกลิ่นหอมจำเป็นต้องใช้กรรมวิธีต่างๆ ขั้นตอนการปลดปล่อยสารให้กลิ่นหอมออกจากโมเลกุลของสารเชิงซ้อน เพื่อให้สารดังกล่าวเปลี่ยนไปอยู่ในรูปสารระเหย กลไกนี้ทำได้หลายวิธี เช่น การใช้กระบวนการทางเคมีโดยการตัด (hydrolyze) บริเวณพันธะบีต้า 1,4 กลไกโคซิดิกของสารให้กลิ่นหอมกับโมเลกุลของน้ำตาล ส่งผลให้สารให้กลิ่นหอมอยู่ในรูปอิสระและระเหยได้ Williams และคณะ (1982) รายงานว่าความร้อนและค่าความเป็นกรดสูง (พีเอช 1 ถึง 3) สามารถตัดพันธะบีต้า 1,4 กลไกโคซิดิก ระหว่างสารให้กลิ่นหอมกับโมเลกุลของน้ำตาลได้ แต่อย่างไรก็ตาม กระบวนการดังกล่าวไม่สามารถควบคุมปฏิกิริยาได้และยังส่งผลให้สารให้กลิ่นหอมเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางธรรมชาติหรือเปลี่ยนเป็นสารอื่นทำให้ไวน์มีคุณภาพไม่ดี ดังนั้นวิธีการนี้จึงไม่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตไวน์

กิจกรรมของเอนไซม์ในกลุ่ม 'ไกลโคซิเดส (glycosidase) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถทำให้ไวน์มี

กลิ่นหอม เนื่องจากเอนไซม์ในกลุ่มนี้มีคุณสมบัติในการเร่งปฏิกิริยาการตัดพันธะไกลโคไซด์ได้อย่างจำเพาะและมีประสิทธิภาพ การปลดปล่อยสารให้กลิ่นหอมที่กักพันธะระหว่างโมเลกุลของน้ำตาลให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารอิสระและหอมระเหย อาศัยปฏิกิริยาของเอนไซม์ 2 ขั้นตอน ดังรูปที่ 4 ขั้นตอนแรกเอนไซม์อัลฟาแอลแรมโนซิเดส (α -L-rhamnosidase) หรือเอนไซม์อัลฟาแอลอะราบินโนฟูรานโนซิเดส (α -L-arabinofuranosidase) หรือ เอนไซม์บีต้าอะปิโอฟูรานโนซิเดส (β -D-apiofuranosidase) ตัดบริเวณพันธะไกลโคไซด์ของน้ำตาลโมเลกุลคู่ได้เป็นน้ำตาลกลูโคสโมเลกุลเดี่ยว ซึ่งเชื่อมต่อกับสารให้กลิ่นหอม ในขั้นตอนที่สอง สารให้กลิ่นหอมจะถูกปลดปล่อยออกจากโมเลกุลเชิงซ้อน โดยกิจกรรมของเอนไซม์บีต้ากลูโคซิเดส (β -glucosidase) เอนไซม์บีต้ากลูโคซิเดสจะเข้าตัดบริเวณพันธะบีต้า 1,4 ของสารให้กลิ่นหอมกับน้ำตาลกลูโคส ทำให้สารให้กลิ่นหอมอยู่ในรูปอิสระและหอมระเหย (Günata et al., 1988; Riou et al., 1998)



รูปที่ 4 กลไกการปลดปล่อยสารให้กลิ่นหอมจากโมเลกุลเชิงซ้อน (Palmeri and Spagna, 2007) (Ara: α -L-furanosidase; Rha: α -L-pyranosidase; Api: β -D-apiofuranosidase; β G: β -glucosidase, R= mono-terpenes, sesquiterpenes, norisoprenoids, benzene derivatives, aliphatic alcohols)

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าเอนไซม์ในกลุ่มไกลโคซิเดสเป็นเอนไซม์ที่มีความสำคัญต่อการเพิ่มกลิ่นหอมในไวน์ ซึ่งเอนไซม์อัลฟาแอลแรมโนซิเดส (α -L-rhamnosidase) หรือ เอนไซม์อัลฟาแอลอะราบินโนฟูราโนซิเดส (α -L-arabinofuranosidase) หรือ เอนไซม์บีต้าดีอะพีโอฟูราโนซิเดส (β -D-apiofuranosidase) เป็นเอนไซม์ที่ใช้ขั้นตอนแรกเพื่อปลดปล่อยสารให้กลิ่นหอม อย่างไรก็ตาม เอนไซม์บีต้ากลูโคซิเดสเป็นเอนไซม์ที่น่าสนใจ เนื่องจากเอนไซม์ดังกล่าวเป็นหัวใจของการปลดปล่อยสารให้กลิ่นหอมให้อยู่ในรูปสารหอมระเหย ดังนั้น จึงมีการศึกษาเกี่ยวกับเอนไซม์บีต้ากลูโคซิเดสอย่างกว้างขวาง

เอนไซม์บีต้ากลูโคซิเดสพบในพืช เช่น องุ่น (Lecas et al., 1991) นอกจากนั้นยังพบในในจุลินทรีย์หลายชนิด ได้แก่ รา เช่น *Aspergillus niger* (Riou et al., 1998) แบคทีเรีย เช่น *Oenococcus oeni* (Ugliano et al., 2003) และ ยีสต์ เช่น *Saccharomyces cerevisiae*, *Pichia anomala*, *Hanseniaspora* sp. (Spagna et al., 2002) อย่างไรก็ตาม เอนไซม์บีต้ากลูโคซิเดสที่พบในพืช รา และแบคทีเรียมีกิจกรรมของเอนไซม์ต่ำและไม่เสถียรในสภาวะของการหมักไวน์ คือ ที่อุณหภูมิระหว่าง 3 ถึง 4 นอกจากนั้นกิจกรรมของเอนไซม์บีต้ากลูโคซิเดสยังถูกยับยั้งในสภาวะที่มีความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสและแอลกอฮอล์สูง (Lecas et al., 1991; Riou et al., 1998; Barbagallo et al., 2004) ทั้งนี้พบว่าเอนไซม์บีต้ากลูโคซิเดสที่ผลิตจากยีสต์สายพันธุ์ *Pichia anomala* มีความเหมาะสมสำหรับการปรับปรุงกลิ่นหอมของไวน์ กล่าวคือ มีกิจกรรมของเอนไซม์เพิ่มสูงขึ้นในสภาวะที่มีแอลกอฮอล์ (Spagna et al., 2002; Swangkeaw et al., 2009)

การประยุกต์ใช้เอนไซม์ในกลุ่มไกลโคซิเดสเพื่อเพิ่มกลิ่นของไวน์

สารให้กลิ่นหอมที่ระเหยได้เป็นสารหลักที่ทำให้เกิดกลิ่นหอมของไวน์ สารดังกล่าวนี้มาจากองุ่นและกลไก เกิดกลิ่นหอมของไวน์นั้นเกิดจากกิจกรรม

ของเอนไซม์ในกลุ่มไกลโคซิเดส ปัจจุบันบริษัทโนโว นอร์ดิสก์ ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ (Novo Nordisk, Switzerland) ได้จำหน่ายเอนไซม์ทางการค้าชื่อ โนวาลอมจี (Novarom G) ซึ่งผลิตจากเชื้อรา *Aspergillus niger* มาประยุกต์ใช้เพิ่มกลิ่นหอมของไวน์ Martino และคณะ (2000) ได้ศึกษาการนำเอนไซม์โนवालอมจี มาใช้ในการเพิ่มกลิ่นหอมของไวน์ขาว (Falanghina white wine) โดยการเติมเอนไซม์ดังกล่าวลงไปในช่วงกระบวนการหมักไวน์ พบว่า สารกลิ่นหอมในกลุ่ม monoterpenes เช่น linalool, α -terpineol, citronellol, nerol, geraniol มีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับไวน์ขาวที่ไม่ได้เติมเอนไซม์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเอนไซม์ในกลุ่มไกลโคซิเดส มีความสำคัญในการทำให้เกิดกลิ่นหอมในไวน์

นอกจากการนำเอนไซม์ไกลโคซิเดสจากเชื้อรามาใช้ในการเพิ่มกลิ่นของไวน์แล้ว ยังมีการนำเอนไซม์ในกลุ่มไกลโคซิเดสจากยีสต์สายพันธุ์ต่างๆ มาเพิ่มกลิ่นหอมของไวน์ด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่น Gueguen และคณะ (1997) ได้ศึกษาการเพิ่มกลิ่นหอมในไวน์ที่หมักจากองุ่นสายพันธุ์มัสแคท (Muscat) โดยใช้เอนไซม์บีต้ากลูโคซิเดสจากยีสต์ *Candida molischiana* 35M5N พบปริมาณของ nerol, geraniol, benzylalcohol, 2-phenylethanol, γ -terpinene และ linalool เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับไวน์ที่ไม่ได้เติมเอนไซม์ ดังตารางที่ 1 Fernandez-Gonzales และคณะ (2003) ได้ศึกษาการเพิ่มกลิ่นหอมในไวน์ขาวที่หมักจากองุ่นสายพันธุ์มัสแคท (Muscat) โดยการหมักไวน์ร่วมกับยีสต์สายพันธุ์ *Hanseniaspora uvarum* พบว่าไวน์มีปริมาณของ linalool เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 1 ปริมาณสารให้กลิ่นหอมในไวน์มัสแคท (Muscat wine) ที่ได้จากกระบวนการหมักที่มีการเติมและไม่เติมเอนไซม์บีต้ากลูโคซิเดส (Gueguen et al., 1997)

สารให้กลิ่นหอม (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)	ไวน์ที่ไม่ได้หมักร่วมกับเอนไซม์ บีต้ากลูโคซิเดส	ไวน์ที่หมักร่วมกับเอนไซม์ บีต้ากลูโคซิเดส
Nerol	0.05	0.27
Geraniol	0.02	0.21
Benzylalcohol	0.04	0.61
2-Phenylethanol	0.05	0.27
γ-Terpinene	non-detectable	0.10
Linalool	39.00	45.00
รวม	39.16	46.46

ต่อมาได้มีการศึกษาการเพิ่มกลิ่นหอมในไวน์ขาว 2 ชนิด ที่หมักจากองุ่นสายพันธุ์เรซลิง (Riesling) และ ชาร์โดแนย์ (Chardonnay) โดยการหมักร่วมกับยีสต์สายพันธุ์ *Saccharomyces* sp. ที่สามารถสร้างเอนไซม์บีต้ากลูโคซิเดส พบว่า ไวน์ดังกล่าวมีกลิ่นหอมของผลไม้เพิ่มมากขึ้น (Egli et al., 1998) ต่อมา Arevalo Villena และคณะ (2006) ได้ศึกษาการหมักไวน์ร่วมกับ *Debaryomyces pseudopolymorphus* ซึ่งเป็นสายพันธุ์ยีสต์ที่สามารถผลิตเอนไซม์บีต้ากลูโคซิเดส พบว่า ปริมาณของ terpenes มีความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับไวน์ที่ไม่ได้หมักร่วมกับยีสต์ดังกล่าว

ปัจจุบันในประเทศไทยได้มีการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับเอนไซม์บีต้ากลูโคซิเดส เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มกลิ่นหอมของไวน์ ตัวอย่างเช่น การศึกษาเอนไซม์บีต้ากลูโคซิเดสจากสายพันธุ์ยีสต์ที่ใช้ในการเพิ่มกลิ่นหอมของไวน์มะม่วง (Sripunya et al., 2005) นอกจากนี้ Swangkeaw และคณะ (2006) ได้คัดเลือกสายพันธุ์ยีสต์จำนวน 762 ไอโซเลต จากองุ่นและผลไม้ชนิดต่างๆ ที่ปลูกในประเทศไทย จำนวน 40 ตัวอย่าง ได้ยีสต์จำนวน 39 ไอโซเลตที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตเอนไซม์บีต้ากลูโคซิเดสเมื่อเลี้ยง

เชื้อในอาหารเหลว จากนั้นได้ศึกษาคุณลักษณะของเอนไซม์บีต้ากลูโคซิเดสจากยีสต์สายพันธุ์ *Pichia anomala* MDD24 ซึ่งเป็นยีสต์ที่แยกได้จากองุ่น พบว่าในสภาวะที่มีเอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 4 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ต่อปริมาตร สามารถกระตุ้นกิจกรรมของเอนไซม์ได้ (Swangkeaw et al., 2008; 2009) ดังนั้นเอนไซม์ ดังกล่าวมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เพิ่มกลิ่นหอมของไวน์ได้

บทสรุป

กลิ่นหอมของไวน์เป็นคุณลักษณะอย่างหนึ่งที่บ่งบอกคุณภาพของไวน์ การพัฒนากลิ่นหอมของไวน์เป็นการนำวิทยาศาสตร์มาใช้เพิ่มคุณภาพของไวน์ได้อย่างเหมาะสม เช่น การนำเอนไซม์บีต้ากลูโคซิเดสจากยีสต์ ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการหมักไวน์มาใช้ในการเพิ่มกลิ่นหอมของไวน์ โดยเอนไซม์ดังกล่าวจะตัดพันธะ บีต้า-1,4 ระหว่างน้ำตาลกับสารให้กลิ่นหอม ซึ่งพบในปริมาณมากบริเวณผิวขององุ่น และยังพบในผลไม้ชนิดอื่นๆที่นำมาใช้ในการผลิตไวน์ ทำให้สารให้กลิ่นหอมถูกปลดปล่อยออกมาในปริมาณที่มากและรวดเร็วกว่าปกติ

เมื่อพิจารณาถึงอุตสาหกรรมเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ประเภทไวน์ของประเทศไทยในปัจจุบัน ได้มีการพัฒนามากขึ้นและหากสามารถเพิ่มกลิ่นหอมของไวน์ได้ จะทำให้ไวน์มีคุณภาพและราคาสูงขึ้นได้หรืออาจเป็นการประหยัดเวลาในขั้นตอนการหมักและบ่มไวน์เพื่อให้ได้กลิ่นหอมที่เหมาะสม ดังนั้นหากมีการศึกษาและพัฒนาการนำเอนไซม์บีต้ากลูโคซิเดสมาประยุกต์ใช้ในไวน์หรือไวน์ผลไม้ชนิดต่างๆ จะส่งผลให้ได้ไวน์ที่มีคุณภาพมากขึ้น ตลอดจนสามารถเพิ่มมูลค่าในเชิงคุณภาพและราคาของไวน์ได้ อันจะทำให้เกิดการพัฒนาลูกค้าเครื่องดื่มประเภทแอลกอฮอล์ที่ไม่ผ่านการกลั่น ทั้งในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ กลาง และเล็กในระดับชุมชนได้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- Arevalo Villena, M., Ubeda Iranzo, J. F., Gundllapalli, S. B., Cordero Otero, R. R. and Briones Perez, A. I. (2006). Characterization of an exocellular β -glucosidase from *Debaryomyces pseudopolymorphus*. *Enzyme Microb. Technol.* 39: 229-234.
- Barbagallo, R. N., Spagna, G., Palmeri, R., Restuccia, C. and Giudici, P. (2004). Selection, characterization and comparison of β -glucosidase from mould and yeasts employable for enological applications. *Enzyme Microb. Technol.* 35: 58-66.
- Charter, S. (2006). *Wine and Society: The Social and Culture Context of a Drink*. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Clarke, R. J. and Bakker, J. (2004). *Wine flavour chemistry*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd.
- D'Incecco N., Bartowsky E., Kassara S., Lante A., Spettoli P. and Henschke P. (2004). Release of glycosidically bound flavour compounds of Chardonnay by *Oenococcus oeni* during malolactic fermentation. *Food Microbiol.* 21: 257-265.
- Egli, C. M., Edinger, W. D., Mitrakul, C. M. and Henick-Kling, T. (1998). Dynamics of indigenous and inoculated yeast populations and their effect on the sensory character of Riesling and Chardonnay wines. *J. Appl. Microb.* 85: 779-789.
- Fernandez-Gonzalez, M., Di Stefano, R. and Briones, A. (2003). Hydrolysis and transformation of terpene glycosides from Muscat must by different yeast species. *Food Microbiol.* 20: 35-41.
- Gueguen, Y., Chemardin, P., Pien, S., Arnaud, A. and Galzy, P. (1997). Enhancement of aromatic quality of Muscat wine by the use of immobilized β -glucosidase. *J. Biotechnol.* 55: 151-156.
- Günata, Z., Bitteur, S., Brillouet, J. M., Bayonove, C. and Cordonnier, R. (1988). Sequential enzymic hydrolysis of potentially aromatic glycosides from grape. *Carbohydr. Res.* 184: 139-149.
- Jackson, R. S. (2000). *Wine science: principles, practice, perception*. New York: Academic Press.
- Lecas, M., Gunata, Z. Y., Sapis, J. C. and Bayonove, L. (1991). Purification and characterization of β -glucosidase from grape. *Phytochem.* 30: 451-454.
- Marino, A., Schiraldi, C., Di Lazzaro, A., Fiume, I., Spagna, G., Pifferi, P. G. and De Rosa, M. (2000). Improvement of the flavour of Falanghina white wine using a purified glycosidase preparation from *Aspergillus niger*. *Process Biochem.* 36: 93-102.

- Mateo, J. J. and Jimenez, M. (2000). Review: Monoterpenes in grape juice and wines. *J. Chromatogr.* 881: 557-567.
- Noble, A. C., Arnold, R. A., Buechsenstein, J., Leach, E. J., Schmidy, J. O. and Stern, P. M. (1987). Modification of a standardized system of wine aroma terminology. *Am. J. Enol. Vit.* 38: 143-146.
- Palmeri, R., and Spagna, G. (2007). β -Glucosidase in cellular and acellular form for winemaking application. *Enzyme Microbial. Technol.* 40: 382-389.
- Riou, C., Salmon, J. M., Vallier, M. J., Günata, Z. and Barre, P. (1998). Purification, characterization, and substrate specificity of a novel highly glucose-tolerant β -glucosidase from *Aspergillus oryzae*. *Appl. Environ. Microbiol.* 64: 3607-3614.
- Spagna, G., Barbagallo, R. N., Palmeri, R., Restuccia, C. and Giudici, P. (2002). Properties of endogenous β -glucosidase of a *Pichia anomala* strain isolated from Sicilian musts and wines. *Enzyme Microb. Technol.* 31: 1036-1041.
- Sripunya, P., Wanapu, C. and Boonkerd, N. (2005). Effect of β -glucosidase enzyme in *Saccharomyces cerevisiae* strains on aroma production during mango (Chok-anan) wine fermentation. *Thai J. Biotech.* 6: 50-56.
- Swangkeaw, J., Vichitphan, S., Thanonkeo, P. and Vichitphan, K. (2006). Screening, production and localization of glycosidase from isolated yeasts. Proceedings of findings of the young researchers on applied science 2006 (CAS 2006), Kuala Lumpur, Malaysia, 349-353.
- Swangkeaw, J., Vichitphan, S. and Vichitphan, K. (2008). Production and characterization of extracellular beta-glucosidase from *Pichia anomala* MDD24 for enhancing wine aroma. *J. Biotech.* 136s: S296
- Swangkeaw, J., Vichitphan, S., Butzke, C. and Vichitphan, K. (2009). The characterisation of a novel *Pichia anomala* β -glucosidase with potentially aroma enhancing capabilities in wine. *Ann. Microbiol.* 59: 335-343.
- Ugliano, M., Genovese, A. and Moio, L. (2003). Hydrolysis of wine aroma precursors during malolactic fermentation with four commercial starter cultures of *Oenococcus oeni*. *J. Agri. Food Chem.* 51: 5073-5078.
- Williams, P. J., Strauss, C. R., Wilson, B. and Massay-Westropp, R. A. (1982). Studies on the hydrolysis of *Vitis vinifera* monoterpene precursor compounds and model monoterpene β -D-glucosides rationalizing the monoterpene composition of grapes. *J. Agric. Food Chem.* 30: 1219-1223.





พรีไบโอติก Prebiotic

สุดาทิพย์ จิตะโกศา¹

ในโลกปัจจุบันอาหารไม่ได้เป็นเพียงแค่ให้สิ่งมีชีวิตบริโภคเพื่อดำรงชีวิตอยู่เท่านั้นแต่อาหารยังเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยส่งเสริมสุขภาพของผู้บริโภคให้แข็งแรงอีกด้วย เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าในร่างกายของสิ่งมีชีวิตมีจุลินทรีย์ประจำถิ่น (normal flora) อาศัยอยู่ภายในระบบทางเดินอาหาร (gastrointestinal tract) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์แก่ร่างกายหรือที่เราเรียกว่าจุลินทรีย์โปรไบโอติก (probiotics) เช่น *Lactobacillus* sp. และ *Bifidobacterium* sp. และจุลินทรีย์ที่ไม่ก่อให้เกิดประโยชน์หรือก่อโรค (pathogen) เช่น *Clostridium* sp. และ *Staphylococcus* sp. เป็นต้น โดยจุลินทรีย์ต่างๆ นั้นมีความหลากหลายทั้งด้านชนิดและปริมาณขึ้นกับตำแหน่งหรืออวัยวะส่วนที่จุลินทรีย์นั้นอาศัยอยู่ เช่น ในร่างกายมนุษย์ในกระเพาะอาหารมีจุลินทรีย์ประจำถิ่นประมาณ $10^2 - 10^4$ เซลล์ต่อกรัมกระเพาะอาหาร ในลำไส้เล็กมีจุลินทรีย์ประจำถิ่นประมาณ $10^6 - 10^8$ เซลล์ต่อกรัมลำไส้เล็ก และในลำไส้ใหญ่มีจุลินทรีย์ประจำถิ่นประมาณ $10^{10} - 10^{12}$ เซลล์ต่อกรัมลำไส้ใหญ่ เป็นต้น (Crittenden and Playne, 2009) จุลินทรีย์ประจำถิ่นในระบบทางเดินอาหารทำหน้าที่เปรียบเหมือนเป็นกันชนป้องกันจุลินทรีย์ก่อโรคดีังนั้น การรักษาสสมดุลของปริมาณจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์และจุลินทรีย์ที่ก่อโรครวมถึงกิจกรรมหรือเมแทบอลิซึมที่เกิดขึ้นของจุลินทรีย์นั้นๆจึงเป็นสิ่งสำคัญ

ชนิดของพรีไบโอติก (Type of prebiotic)

พรีไบโอติกเป็นสารอาหารที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ในร่างกายของสิ่งมีชีวิต (non-digestible food ingredients) และมีฤทธิ์กระตุ้นการเจริญของจุลินทรีย์ และ/หรือกิจกรรมของจุลินทรีย์ โดยใช้เป็นแหล่งพลังงานหรือแหล่งคาร์บอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์แก่ร่างกายของสิ่งมีชีวิต รวมทั้งลดการเจริญของจุลินทรีย์ก่อโรคที่มีในระบบทางเดินอาหาร จึงมีผลให้สุขภาพของสิ่งมีชีวิตนั้นดีขึ้น (Gibson, 1998)

สารอาหารส่วนใหญ่อันยังคงเหลือในระบบทางเดินอาหารของร่างกายก่อนที่จะถูกกำจัดออกทางอุจจาระทุกชนิดสามารถเรียกว่าเป็นพรีไบโอติก เช่น เส้นใยอาหาร (dietary fiber) โปรตีน ไขมัน โอลิโกแซคคาไรด์ และ resistant starch เป็นต้น อย่างไรก็ตามปัจจุบันสารอาหารที่ถูกจัดเป็นพรีไบโอติกคือ สารในกลุ่มโอลิโกแซคคาไรด์ ทั้งนี้เนื่องจาก

- ก) เป็นสารที่ไม่ถูกย่อยสลายหรือถูกย่อยสลายบางส่วนในระบบทางเดินอาหาร
- ข) ไม่ถูกดูดซับในลำไส้เล็ก
- ค) แบคทีเรียในช่องปากใช้ประโยชน์ได้น้อย
- ง) แบคทีเรียที่ดีในระบบทางเดินอาหารสามารถเลือกใช้ในการเจริญเติบโตได้

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ปทุมธานี 12121

จ) แบคทีเรียก่อโรคในระบบทางเดินอาหารไม่สามารถใช้ในการเจริญเติบโตได้

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า 프리ไบโอติกคือสารกลุ่มโอลิโกแซคคาไรด์ที่ไม่ถูกย่อยสลายในระบบทางเดินอาหารของสิ่งมีชีวิต (non-digestible oligosaccharides) ซึ่ง 프리ไบโอติกแต่ละชนิดจะมีผลต่อจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหารที่แตกต่างกัน เช่น ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ (fructo-oligosaccharides: FOS) ปริมาณเท่ากับ 7-15 กรัมต่อวัน สามารถเพิ่มการเจริญของสกุล *Bifidobacterium* ได้ (Bounnik et al., 2006) กาแลคโตโอลิโกแซคคาไรด์ (galacto-oligosaccharides: GOS) และแลคตูโลส (lactulose) ในน้ำนมมีปริมาณที่เหมาะสมต่อการเพิ่มการเจริญของสกุล *Lactobacillus* และสกุล *Bifidobacterium* เท่ากับ 10-20 กรัมต่อวัน (Ben

et al., 2004) และ 8-20 กรัมต่อวัน (Vanhoutte et al., 2006) ตามลำดับ

กระบวนการผลิต 프리ไบโอติก (Production of prebiotic)

การผลิต 프리ไบโอติกทำได้หลายวิธี ทั้งการสกัดโดยตรงจากพืชที่มีปริมาณโพลีแซคคาไรด์หรือโอลิโกแซคคาไรด์สูง เช่น กล้วย ข้าวสาลี หัวกระเทียม หัวหอม หรือพืชต่างประเทศ เช่น ชิโครี (chicory) และเยรูซาเลม อาร์ติโชก (Jerusalem artichoke) เป็นต้น อย่างไรก็ตามปัจจุบันนิยมผลิต 프리ไบโอติกโดยใช้ชีววิธีคือการใช้เอนไซม์ และการผลิตด้วยกระบวนการทางเคมี ดังตารางที่ 1 แสดงกระบวนการผลิต 프리ไบโอติกทางการค้า

ตารางที่ 1 กระบวนการผลิต 프리ไบโอติกทางการค้า

วิธีการผลิต	ตัวอย่าง 프리ไบโอติก
1.การสกัดโดยตรงจากพืช ผัก ผลไม้ที่มีส่วนประกอบของโพลีแซคคาไรด์	ซอเยบินโอลิโกแซคคาไรด์ (soybean oligosaccharide) จากน้ำมันถั่วเหลือง อินูลิน (inulin) จากชิโครี
2.การใช้เอนไซม์ย่อยสลายสารประกอบโพลีแซคคาไรด์แล้วใช้เทคนิคโครมาโตกราฟีทำผลิตภัณฑ์ให้บริสุทธิ์	ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ ไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ (xylo-oligosaccharide) จาก ชังข้าวโพด
3. กระบวนการทรานสโกลิโคซิเลชัน (transglycosylation) คือการใช้เอนไซม์เพื่อสังเคราะห์โอลิโกแซคคาไรด์แล้วใช้เทคนิคโครมาโตกราฟีทำผลิตภัณฑ์ให้บริสุทธิ์	กาแลคโตโอลิโกแซคคาไรด์จากแลคโตส ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์จากซูโครส
4. กระบวนการทางเคมี	แลคตูโลสจากปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของแลคโตส

ที่มา: Crittenden และ Playne (2009)

ก) การสกัด (extraction)

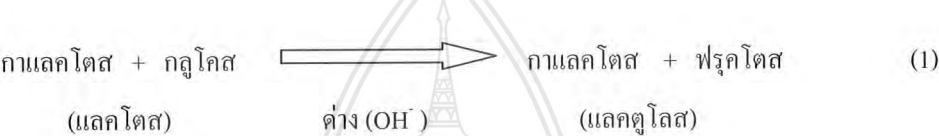
วิธีที่ง่ายที่สุดในการผลิต 프리ไบโอติกคือการสกัดโดยตรงจากพืชหรือผลไม้ที่มีสารโพลีแซคคาไรด์เป็นส่วนประกอบ เช่น การสกัดอินูลินจากชิโครีเพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์ โดยการสกัดด้วยน้ำร้อน จากนั้น

ใช้เทคนิคโครมาโตกราฟีเพื่อทำอินูลินที่ได้ให้มีความบริสุทธิ์และเข้มข้น จากนั้นนำไปทำให้เป็นผงด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray dryer machine) เพื่อนำไปผสมเป็นสารเสริมในอาหารสัตว์

ข) การใช้ปฏิกิริยาทางเคมี (chemical reaction)

แลกคูโลสเป็นพรีไบโอติกชนิดเดียวในปัจจุบันที่ผลิตโดยใช้กระบวนการทางเคมี (Timmermans, 1996) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใช้ต่างเป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน (isomerisation) ของโมเลกุลกลูโคสซึ่งเป็นองค์ประกอบของ

น้ำตาลแลคโตสให้กลายเป็นฟรุคโตสเรียกปฏิกิริยานี้ว่า Lobry de Bruyn-Alberda van Ekenstein ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันนี้ทำงานภายใต้สภาวะที่เป็นด่างโดยนิยมใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) และบอเรต (borate) โดยเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้วจะทำให้เกิดแลกคูโลสได้ดังสมการที่ 1



ค) เทคโนโลยีเอนไซม์ (enzyme technology)
การผลิตพรีไบโอติกโดยใช้เทคโนโลยีเอนไซม์มีวัตถุประสงค์ทั้งเพื่อขยายสายและสังเคราะห์โอลิโกแซคคาไรด์จากสารประกอบโพลิแซคคาไรด์ซึ่งถึงแม้ว่าปฏิกิริยาทางเคมีจะสามารถสังเคราะห์โอลิโกแซคคาไรด์ได้ แต่การผลิตด้วยกระบวนการทางเคมีจะต้องทำภายใต้สภาวะที่รุนแรง เช่น สภาวะที่มีความเป็นด่างและอุณหภูมิสูงและอาจเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ไม่ต้องการ เช่น สี กลิ่นและรสชาติที่ไม่ต้องการได้ ซึ่งจำเป็นต้องเพิ่มขั้นตอนการกำจัดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงดังกล่าวด้วย ดังนั้นการผลิตพรีไบโอติก

ในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้เทคโนโลยีเอนไซม์เนื่องจากควบคุมการผลิตได้ง่ายและผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากความจำเพาะในการทำงานของเอนไซม์ที่ใช้ในการผลิตนั่นเอง

1. การใช้เอนไซม์สังเคราะห์ (enzymatic synthesis)

พรีไบโอติกบางชนิด เช่น ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ ไอโซมอลโตสโอลิโกแซคคาไรด์ และทรานกานแลกโตโอลิโกแซคคาไรด์ สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาของเอนไซม์แสดง ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พรีไบโอติกที่ถูกสังเคราะห์จากเอนไซม์

ชนิดของพรีไบโอติก	เอนไซม์	เอกสารอ้างอิง
ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์	ฟรุคโตซิลทรานสเฟอเรส	Perrin et al. (2001)
ไอโซมอลโตสโอลิโกแซคคาไรด์	เบต้า-กานแลกโตซิเดส	Crittenden (1999)
ทรานกานแลกโตโอลิโกแซคคาไรด์	เอนไซม์ผสมของอะไมเลส พูลูลานส และแอลฟากลูโคซิเดส	Kohmoto et al. (1988)

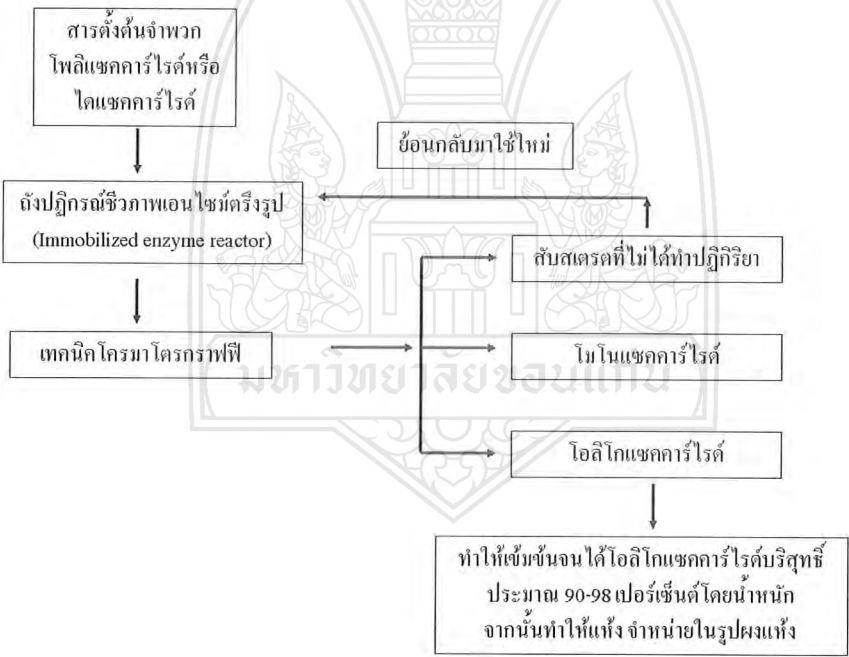
อย่างไรก็ตาม ปัจจัยในการใช้เอนไซม์เพื่อสังเคราะห์พรีไบโอติกต้องคำนึงถึงแหล่งที่มาของเอนไซม์ กลไกการทำงานของเอนไซม์ สภาวะที่ใช้ในการผลิตและชนิดของสับสเตรตที่ใช้ซึ่งปัจจัยต่างๆ จะส่งผลถึงคุณภาพและองค์ประกอบของสาร

พรีไบโอติกที่ได้โดยตรง เช่น การผลิตทรานกานแลกโตโอลิโกแซคคาไรด์จากเอนไซม์เบต้า-กานแลกโตซิเดสที่ผลิตจากจุลินทรีย์ต่างชนิดกันจะทำให้องค์ประกอบของทรานกานแลกโตโอลิโกแซคคาไรด์ที่แตกต่างกันเช่น Tanaka และคณะ (1983) ใช้เอนไซม์เบต้า-กานแลกโต-

ชีดะจาก *Aspergillus oryzae* พบว่าได้ทรานกลาแลคโต-โอลิโกแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วยไตรแซคคาไรด์ (trisaccharides) เตตราแซคคาไรด์ (tetrasaccharides) เพนตะแซคคาไรด์ (pentasaccharides) และเฮกซะกาแลคโตโอลิโกแซคคาไรด์ (hexagalacto-oligosaccharides) ในขณะที่ Ito และคณะ (1990) ได้ ทรานกลาแลคโต-โอลิโกแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วยไดแซคคาไรด์ (disaccharides) โมโนแซคคาไรด์ (monosaccharide) ไตรแซคคาไรด์ เตตราแซคคาไรด์ เพนตะแซคคาไรด์ และเฮกซะกาแลคโตโอลิโกแซคคาไรด์เมื่อใช้เอนไซม์เบต้า-กาแลคโตชีดะจาก *Aspergillus oryzae* ร่วมกับเบต้า-กาแลคโตชีดะจาก *Streptococcus thermophilus*

2. การใช้เอนไซม์ย่อยสลาย (enzymatic hydrolysis)

ตามที่กล่าวข้างต้นว่าสารพรีไบโอติกส่วนใหญ่เป็นสารในกลุ่มโอลิโกแซคคาไรด์ ดังนั้นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการผลิตสารพรีไบโอติกคือการใช้เอนไซม์เพื่อย่อยสลายสารประกอบโพลีแซคคาไรด์ เช่น แป้ง และเซลลูโลสเพื่อสร้างผลิตภัณฑ์เป็นน้ำตาลสายสั้นๆ หรือโอลิโกแซคคาไรด์นั่นเอง อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ที่ได้มักอยู่ในรูปของสารผสมของโอลิโกแซคคาไรด์หลายชนิด จึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคการคัดแยกสารผลิตภัณฑ์ให้บริสุทธิ์ เช่น เทคนิคโครมาโตกราฟี เป็นต้น รูปแบบการผลิตพรีไบโอติกโดยใช้เอนไซม์ย่อยสลายแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งจะทำได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 85-99 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 1 การผลิตพรีไบโอติกโดยการย่อยสลายด้วยเอนไซม์
ที่มา: Crittenden และ Playne (2009)

การศึกษาการทำงานของสารพรีไบโอติก (Determination of prebiotic effect)

การศึกษาการทำงานของพรีไบโอติกวัดได้จากความสามารถหรือความจำเพาะในการใช้สารพรีไบโอติก เป็นแหล่งคาร์บอนหรือแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหาร อย่างไรก็ตามความหลากหลายของชนิดและปริมาณของจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหาร ความแตกต่างของชนิดและโครงสร้างของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของสารพรีไบโอติกทำให้กลไกการทำงานของพรีไบโอติกแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน การศึกษาความสัมพันธ์ของโครงสร้างและหน้าที่ของสารพรีไบโอติกกับจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหารโดยเฉพาะอย่างยิ่งพรีไบโอติกได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น ดังรายงานของ Kaplan และ Hutkins (2000) พบว่า *Lactobacillus plantarum* และ *L. rhamnosus* สามารถใช้น้ำตาลฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ที่อยู่ในรูปของไตรแซคคาไรด์และเตตราแซคคาไรด์ได้แต่จะไม่ใช้เพนตรแซคคาไรด์ ในขณะที่ Goh และคณะ (2006) พบว่า *L. paracasei* สามารถใช้น้ำตาลฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ในรูปไดแซคคาไรด์และไตรแซคคาไรด์ได้ดีกว่าเตตราแซคคาไรด์ Roberfroid และคณะ (1998) พบว่ามีจุลินทรีย์หลายสายพันธุ์ที่สามารถใช้อินูลินและน้ำตาลฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานได้คือ *Klebsiella pneumonia*, *Staphylococcus aureus*, *S. epidermidis*, *Enterococcus faecalis*, *E. faecium*, *Bacteroides vulgatus*, *Bact. thetaiotaomicron*, *Bact. ovatus*, *Bact. fragilis*, *L. acidophilus*, *Clostridium* sp., และ *Bifidobacterium* sp. (Gibson and Wang, 1994) นอกจากนี้ *Bacillus lactis* สามารถเจริญได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีน้ำตาลกลูโคสโอลิโกแซคคาไรด์ ในรูปของไตรแซคคาไรด์และเตตราแซคคาไรด์ ในขณะที่ *L. rhamnosus* เจริญได้ดีในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีโมโนแซคคาไรด์และไดแซคคาไรด์มากกว่า นั้นแสดงให้เห็นว่า *B. lactis* มีความสามารถในการใช้น้ำตาลกลูโคสโอลิโกแซคคาไรด์ได้ดีกว่า

L. rhamnosus (Gopal et al., 2001)

จากสมบัติของพรีไบโอติกที่จุลินทรีย์สามารถเลือกเพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต การศึกษาการทำงานและสมบัติของพรีไบโอติกจึงสามารถใช้วิธีการวัดอัตราการเจริญของจุลินทรีย์โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสง (optical density) ของอาหารเลี้ยงเชื้อหรือวัดปริมาณเซลล์ที่เจริญจากงานเพาะเชื้อเพื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารพรีไบโอติก (Titapoka et al., 2008) หรือวัดจากสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการเพาะเลี้ยงโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าพีเอช เนื่องจากดังที่กล่าวข้างต้นแล้วว่าจุลินทรีย์จำพวกพรีไบโอติก ส่วนใหญ่สามารถเลือกใช้สารพรีไบโอติกในการเจริญเติบโตได้ ดังนั้น การติดตามค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการเพาะเลี้ยงคือมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น (ค่าพีเอชลดลง) จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่แสดงให้เห็นว่า พรีไบโอติกนั้นส่งผลต่อเชื้อจุลินทรีย์อย่างไร นอกจากนั้นการศึกษาสมบัติของพรีไบโอติกยังสามารถติดตามจากสารเมตาบอไลต์ที่เปลี่ยนแปลงไปของสิ่งมีชีวิตที่ได้รับพรีไบโอติกได้อีกด้วย เช่น อะซิเตต โพรพิโอเนต บิวทิเรต และกรดไขมันสายสั้นๆ (Short Chain Fatty Acid: SCFA) เป็นต้น (Gibson et al., 2000) ดังตารางที่ 3 แสดงตัวอย่างของสารเมตาบอไลต์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตในลำไส้ใหญ่ของมนุษย์และจุลินทรีย์ที่พบ อย่างไรก็ตาม วิธีที่นิยมใช้ศึกษาสมบัติของพรีไบโอติกทางการค้า คือ การศึกษาปริมาณและชนิดของจุลินทรีย์ด้วยวิธีทางพันธุศาสตร์โมเลกุล (molecular genetic) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้ผลแม่นยำและรวดเร็ว

ตารางที่ 3 สารเมตาบอไลต์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตในลำไส้ใหญ่ของมนุษย์

สารเมตาบอไลต์	จุลินทรีย์
อะซิเตต	Bacteroides, bifidobacteria, eubacteria, lactobacilli, clostridia, ruminococci, peptococci, veillonella, peptostreptococci, propionibacteria, fusobacteria และ butyrvivrio
โพรพิโอเนต	Bacteroides, propionibacteria และ veillonella
บิวทิเรต	Clostridia, fusobacteria, butyrvivrio, eubacteria และ peptostreptococci
เอทานอล ชักซินเนต แลกเตต ไพรูเวต	Bacteroides, bifidobacteria, eubacteria, lactobacilli clostridia, peptostreptococci, ruminococci, fusobacteria, actinomycetes และ enterococci
ไฮโดรเจน	Clostridia, ruminococci และ fusobacteria

ที่มา: Gibson และคณะ (2000)

ดังนั้น การศึกษาสมบัติของพรีไบโอติกในปัจจุบันนอกจากใช้วิธีดั้งเดิม คือ การติดตามการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเลี้ยงเชื้อโดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงและ/หรือวัดจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นบนอาหารแข็ง มักนิยมทำควบคู่กับเทคนิคทางพันธุศาสตร์โมเลกุล เช่น Restriction Fragment Length Polymorphism: RFLP Amplified Fragment Length Polymorphism: AFLP Denaturing Gradient Gel Electrophoresis; DGGE และ Fluorescent in situ Hybridization: FISH เป็นต้น (Singh et al., 2009; Montesi et al., 2005; Harmsen et al., 2002) เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบดีเอ็นเอ หรือ 16S rDNA ที่ปรากฏในกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการศึกษาได้อย่างถูกต้อง มีความจำเพาะและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น

นอกจากสมบัติของสารพรีไบโอติกที่จุลินทรีย์ที่มีประโยชน์กับร่างกายจะสามารถใช้เพื่อเป็นแหล่งพลังงานและเพิ่มการเจริญเติบโตแล้ว พบว่า จุลินทรีย์ที่ก่อโรบบางสายพันธุ์ เช่น *Escherichia coli*, *Salmonella* sp. และ *Clostridium difficile* มีความจำเพาะกับ

น้ำตาลบางชนิดที่เป็นองค์ประกอบของพรีไบโอติกเช่น ฟรุคโตส แมนโนส และกาแลคโตสเป็นต้น (Gibson et al., 2000) ซึ่งความจำเพาะดังกล่าวจะก่อให้เกิดประโยชน์ คือ เมื่อจุลินทรีย์ก่อโรคเข้าสู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิตที่ได้รับสารพรีไบโอติก จุลินทรีย์ก่อโรคจะเลือกจับกับสารพรีไบโอติกแทนที่จะจับกับอวัยวะต่างๆ เช่น ลำไส้ใหญ่ ซึ่งจะก่อให้เกิดภาวะของโรคขึ้นที่เราเรียกว่าเกิดการติดเชื้อนั่นเอง และจุลินทรีย์ก่อโรคเหล่านั้นจะถูกกำจัดออกทางอุจจาระซึ่งเราเรียกสมบัติของสารพรีไบโอติกนี้ว่า anti-adhesive prebiotics ดังนั้นวิธีการศึกษาสมบัติของสารพรีไบโอติกอีกวิธีหนึ่งคือ เปรียบเทียบปริมาณและชนิดของจุลินทรีย์ที่หลุดรอดมาที่อุจจาระนั้นเอง

การประยุกต์ใช้พรีไบโอติก

การใช้พรีไบโอติกเป็นสารเสริมในอาหารมีวัตถุประสงค์เพื่อส่งเสริมให้สิ่งมีชีวิตที่ได้รับพรีไบโอติกมีสุขภาพที่ดีขึ้น โดยเพิ่มความต้านทานต่อเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคได้ดียิ่งขึ้น รูปแบบการใช้สารเสริมพรีไบโอติกในอาหารอยู่ในรูปที่ใช้แทนที่สารให้พลังงาน (fat

replacers) เช่น แป้ง หรือมอลโตเดรกซ์ตริน (maltodextrin) โดยนิยมใช้ในผลิตภัณฑ์นม (dairy products) หรือใช้เป็นสารลดแรงตึงผิว และสารให้ความหวานในอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น สมบัติของสารฟรีไบโอติกที่เหมาะสมสำหรับใช้ในทางการค้าแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สมบัติของฟรีไบโอติกทางการค้าที่ดี

คุณสมบัติที่ต้องการ	ตัวอย่างสมบัติของฟรีไบโอติกทางการค้าที่ดี
1. แสดงผลของฟรีไบโอติกได้แม้ใช้ในปริมาณน้อย	<i>Bifidobacterium</i> และ/หรือ <i>Lactobacillus</i> sp. สามารถเลือกใช้ในการเจริญได้ดีที่สุด
2. ไม่ส่งผลข้างเคียง	จำเพาะกับจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์เท่านั้น
3. ไม่ถูกย่อยสลายในระบบทางเดินอาหาร	มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีองค์ประกอบของน้ำตาลและสมบัติทางเคมีที่ถูกต้องตรงกับความต้องการของจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย
4. มีความหนืด (viscosity) ที่หลากหลาย	ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างของโอลิโกแซคคาไรด์
5. มีความคงตัวตลอดกระบวนการผลิตและการเก็บรักษา	โครงสร้างในสายโอลิโกแซคคาไรด์ประกอบด้วยน้ำตาลตั้งแต่ 1-6 วงแหวน
6. สามารถควบคุมปริมาณจุลินทรีย์ได้ง่าย	มีความจำเพาะต่อสายพันธุ์ของจุลินทรีย์
7. มีความหวานที่หลากหลาย	มีความแตกต่างกันที่องค์ประกอบของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวในสายโอลิโกแซคคาไรด์
8. ชะลอการขึ้นราคาของจุลินทรีย์ก่อโรค	มีความจำเพาะกับลำดับเบสที่ตำแหน่งจดจำของจุลินทรีย์ก่อโรค

ที่มา: Gibson และคณะ (2000)

ปัจจุบันนิยมใช้สารฟรีไบโอติกในรูปของซินไบโอติก (synbiotic) ซึ่งหมายถึง ส่วนผสมระหว่างฟรีไบโอติกและเชื้อโปรไบโอติกที่ให้ประโยชน์ที่ดีต่อ สิ่งมีชีวิต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความอยู่รอดให้โปรไบโอติก (Gilliland, 2001) อย่างไรก็ตามรูปแบบการทำงานของซินไบโอติกยังไม่ชัดเจน ดังนั้น การศึกษายังคงต้องเจาะจงเฉพาะสายพันธุ์ของจุลินทรีย์กับฟรีไบโอติกที่สนใจเท่านั้น แล้วทำการออกแบบจำลองสภาวะแวดล้อมในระบบทางเดินอาหาร เช่น ลำไส้ใหญ่ (colon system) เป็นต้น ดังนั้น เทคนิคที่น่าสนใจที่สามารถนำมาใช้เพื่อศึกษาการทำงานของซินไบโอติก คือ วิธี encapsulation โดยเฉพาะอย่างยิ่งการ encapsulated เชื้อจุลินทรีย์ Lactic acid bacteria ในอุตสาหกรรมประเภทผลิตภัณฑ์นม (Nazzaro et al.,

2009; Homayouni et al., 2008; Tsen et al., 2004; Chen et al., 2005; Tsen et al., 2008; Bielecka et al., 2002; Adhikari et al., 2000; Sultana et al., 2000)

กฎข้อบังคับและความปลอดภัยสำหรับฟรีไบโอติก

Food for Specified Health Use system; FOSHU ของประเทศญี่ปุ่นเป็นหน่วยงานแรกที่สร้างกฎเกณฑ์ในการใช้ฟรีไบโอติกเพื่อเป็นสารเสริมอาหารทางการค้า คือ ใช้กาแลคโตโอลิโกแซคคาไรด์และฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ในผลิตภัณฑ์นม จากนั้นองค์กรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับเรื่องความปลอดภัยทางอาหาร เช่น Codex, Committee on Medical Aspects of Food Policy; COMA ของสหภาพยุโรปได้ออก

กฎหมายเกี่ยวกับการใช้สารฟรีไบโอติกในอาหาร โดยสามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้ถึงกฎหมายล่าสุดได้ที่เว็บไซต์ www.codexalimentarius.net

บทสรุป

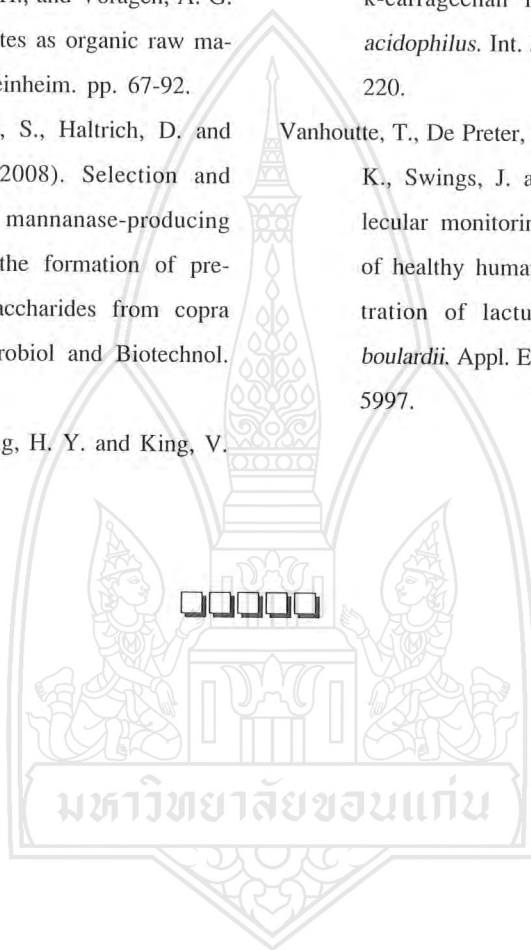
ความรู้ที่เพิ่มมากขึ้นในเรื่องระบบทางเดินอาหารของสิ่งมีชีวิตทั้งมนุษย์และสัตว์ทั้งเรื่องสภาพแวดล้อม ชนิดและปริมาณของจุลินทรีย์ กิจกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้น ข้อมูลทางพันธุกรรมจะเป็นตัวช่วยให้เกิดความเข้าใจและพัฒนาการใช้สารฟรีไบโอติกได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งความรู้ทั้งหมดอยู่บนวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสุขภาพของสิ่งมีชีวิตที่ได้รับสารฟรีไบโอติกให้มีสุขภาพที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้สารฟรีไบโอติกเป็นสารเสริมในอาหารจะต้องอยู่ภายใต้การยอมรับและความปลอดภัยตามกฎหมายสากล

เอกสารอ้างอิง

- Adhikari, K., Mustapha, A., Grun, I. U. and Fernando, L. (2000). Viability of microencapsulated bifidobacteria in set yogurt during refrigerated storage. *J. Dairy Sci.* 83: 1946-1951.
- Ben, X-M., Zhou, X-Y., Zhao, W-H., Yu, W-L., Pan, W., Zhang, W-L., Wu, S-M., Beusekom, C. M. and van Schaafsma, A. (2004). Growth and development of term infants fed with milk with long-chain polyunsaturated fatty acid supplement. *Chin. Med. J.* 117: 1268-1270.
- Bielecka, M., Biedrzycka, E. and Majkowska, A. (2002). Selection of probiotics and prebiotics for symbiotic and confirmation of their in vivo effectiveness. *Food. Res. Int.* 35: 125-131.
- Bounnik, Y., Raskine, L., Simoneau, G., Paineau, D. and Borner, F. (2006). The capacity of short-chain fructo-oligosaccharides to stimulate faecal bifidobacteria: a dose-response relationship study in healthy humans. *J. Nutr.* pp. 5-8.
- Chen, K. N., Chen, M. J., Liu, J. R., Lin, C. W. and Chiu, H. Y. (2005). Optimization of incorporated prebiotics as coating materials for probiotic microencapsulation. *J. Food Sci.* 70: 260-266.
- Crittenden, R. G. (1999). Prebiotics. In Tannock, G. (Ed). *Probiotics: A critical Review*. London : Academic Press. pp. 141-156.
- Crittenden, R. G. and Playne, M. J. (2009). Prebiotics In Y. K. Lee and S. Salminen (Eds.). *Handbook of probiotics and prebiotics* (2nd ed.). New Jersey: John Wiley & son Inc. pp. 535-581.
- Gibson, G. R. (1998). Dietary modulation of human gut microflora using prebiotics. *Brit. J. Nutri.* 80: S209-S212.
- Gibson, G. R., Ottaway, P. B. and Rastall, R. A. (2000). Prebiotics new developments in functional foods. England. Chandos Publishing (Oxford) Ltd. p. 108.
- Gibson, G. R. and Wang, X. (1994). Enrichment of bifidobacteria from human gut contents by oligofructose using continuous culture. *FEMS Microbiol. Letters.* 118: 121-128.
- Gilliland, S. E. (2001). Probiotics and prebiotics. In E. H. Marth and J.L. Steele (Eds.). *Applied dairy microbiology* (2nd ed.). New York: Marcel Dekker. pp. 327-343.
- Goh, Y-J., Zhang, C., Benson, A. K., Schlegel, V., Lee, J-H. and Hutkins, R. W. (2006). Identification of a putative operon involved in fructo-oligosaccharide utilization by *Lactobacillus paracasei*. *Appl. Environ. Microbiol.* 72: 7518-7530.

- Gopal, P. K., Sullivan, P. A. and Smart, J. B. (2001). Utilisation of galacto-oligosaccharides as selective substrates for growth by lactic acid bacteria including *Bifidobacterium lactis* DR10 and *Lactobacillus rhamnosus* DR20. *Int. Dairy*. 11: 19-25.
- Harmsen, H. J. M., Raangs, G. C., Franks, A. H., Wildeboer-Veloo, ACM. and Welling, G. W. (2002). The effect of the prebiotic inulin and the probiotic *Bifidobacterium longum* on the fecal microflora of healthy volunteers measured by FISH and DGGE. *Microb. Ecol. Health. Dis.* 14: 211-219.
- Homayouni, A., Azizi, A., Ehsani, M. R., Yarmand, M. S. and Razavi, S. H. (2008). Effect of microencapsulation and resistant starch on the probiotic survival and sensory properties of symbiotic ice cream. *Food Chemistry*. 111: 50-55.
- Ito, M., Deguchi, Y., Miyamori, A., Matsumoto, K., Kikuchi, H., Kobayashi, Y., Yajima, T. and Kan T. (1990). Effects of administration of galactooligosaccharides on the human fecal microflora, stool weight and abdominal sensation. *Microbiol Ecology in Health and Disease*. 3: 285-292.
- Kaplan, H. and Hutkins, R. W. (2000). Fermentation of fructo-oligosaccharides by lactic acid bacteria and bifidobacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* 66: 2682-2684.
- Kohmoto, T., Fukui, F., Takaku, H., Machida, Y., Arai, M. and Mitsuoka, T. (1988). Effect of isomalto-oligosaccharides on human fecal flora. *Bifidobact. Microflora*. 7: 61-69.
- Montesi, A., Garcia-Albiach, R., Pozuelo, M. J., Pintado, C., Goni, I. and Rotger, R. (2005). Molecular and microbiological analysis of caecal microbiota in rats fed with diets supplemented either with prebiotics or probiotics. *Int. J. Food. Microbiol.* 98: 281-289.
- Nazzaro, F., Fratianni, F., Coppola, R., Sada, Alfonso. and Orlando, P. (2009). Fermentative ability of alginate-prebiotic encapsulated *Lactobacillus acidophilus* and survival under simulated gastrointestinal condition. *J. Func. Foods*. 1: 319-323.
- Perrin, S., Warchol, M., Grill, J. P. and Schneider, F. (2001). Fermentations of fructo-oligosaccharides and their components by *Bifidobacterium infantis* ATCC 15697 on batch culture in semi-synthetic medium. *J. Appl. Microbiol.* 90: 859-865.
- Roberfroid, M. B., Van Loo, J. and Gibson, G. R. (1998). The bifidogenic nature of chicory inulin and its hydrolysis products. *J. Nutri.* 128: 11-19.
- Singh, S., Goswami, P., Singh, R. and Heller, K.J. (2009). Application of molecular identification tools for *Lactobacillus*, with a focus on discrimination between closely related species: A review. *LWT-Food Sci Technol.* 42: 448-457.
- Sultana, K., Godward, G., Reynolds, N., Arumugaswamy, R., Peiris, P. and Kailasapathy, K. (2000). Encapsulation of probiotic bacteria with alginate-starch and evaluation of survival in simulated gastrointestinal conditions and in yoghurt. *Int. J. Food Microbiol.* 62: 47-55.
- Tanaka, R., Takayama, H., Morotomi, M., Kuroshima, T., Ueyama, S., Matsumoto, K., Kuroda, A.

- and Mutai, M. (1983). Effects of administration of TOS and *Bifidobacterium breve* 4006 on the human fecal flora. *Bifidobact. Microflora*. 2: 17-24.
- Timmermans, E. (1996). Lactose; its manufacture and physicochemical properties. In Van Bakkum, H., Roper, H., and Voragen, A. G. J. (Eds). *Carbohydrates as organic raw materials III*. VCH, Weinheim. pp. 67-92.
- Titapoka, S., Keawsompong, S., Haltrich, D. and Nitisinprasert, S. (2008). Selection and characterization of mannanase-producing bacteria useful for the formation of prebiotic manno-oligosaccharides from copra meal. *World J. Microbiol and Biotechnol*. 24: 1425-1433.
- Tsen, J. H., Lin, Y. P., Huang, H. Y. and King, V. A. (2008). Studies on the fermentation of tomato juice by using k-carrageenan immobilized *Lactobacillus acidophilus*. *J. Food Processing. Preservation*. 32: 178-189.
- Tsen, J.H., Lin, Y.P. and King, V.A. (2004). Fermentation of banana media by using k-carrageenan immobilized *Lactobacillus acidophilus*. *Int. J. Food Microbiol*. 91: 215-220.
- Vanhoutte, T., De Preter, V., De Brandt, E., Verbeke, K., Swings, J. and Huys, G. (2006). Molecular monitoring of the fecal microbiota of healthy human subjects during administration of lactulose and *Saccharomyces boulardii*. *Appl. Environ. Microbiol*. 72: 5990-5997.





การวิเคราะห์สปีชีส์ของสารประกอบซีลีเนียม Speciation of Selenium Compounds

ปิยะเนตร จันทร์ถิระติกุล¹

บทนำ

ซีลีเนียมจัดเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อมนุษย์และสัตว์เนื่องจากซีลีเนียมเป็นส่วนประกอบในเอนไซม์กลูตาไธโอน-เปอร์ออกซิเดส (glutathione peroxidase) ซึ่งมีคุณสมบัติในการช่วยปกป้องเซลล์จากการถูกทำลายโดยกระบวนการออกซิเดชัน (Zingaro and Cooper, 1974) นอกจากนี้ สารประกอบซีลีเนียมยังทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเมแทบอลิซึมและด้านความเป็นพิษของโลหะบางชนิด เช่น สารหนู (arsenic, As) แคดเมียม (cadmium, Cd)ปรอท (mercury, Hg) และดีบุก (tin, Sn) เป็นต้น (Tandon et al., 1986) ในสิ่งแวดล้อมพบสารประกอบซีลีเนียมได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมแก๊วอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และการเกษตร เป็นต้น

คุณสมบัติความเป็นพิษและหน้าที่ทางชีวภาพของซีลีเนียมขึ้นอยู่กับสปีชีส์ทางเคมี ในธรรมชาติซีลีเนียมมีหลายสปีชีส์ ทั้งที่เป็นสารประกอบอนินทรีย์และสารประกอบอินทรีย์ ซีลีเนียมอนินทรีย์ที่พบมากในน้ำและดิน คือ ซีลีไนท์ (SeO_3^{2-} , Se (IV)) และซีลีเนท (SeO_4^{2-} , Se (VI)) สารประกอบเหล่านี้สามารถเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบที่ระเหยได้ เช่น ไดเมทิลซีลีไนด์ (dimethylselenide, DMSe) และไดเมทิลไดซีลีไนด์ (dimethyldiselenide, DMDS₂) โดยการย่อยสลายของ

เชื้อและรา ไตรเมทิลซีลีไนด์ไอออน (trimethylselenonium ion, TMSe⁺) เป็นสารผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการเมแทบอลิซึมของซีลีเนียมที่ปล่อยออกจากร่างกายมนุษย์ทางปัสสาวะ เมื่อร่างกายได้รับซีลีเนียมมากเกินไป ซึ่งกระบวนการเมทิลเลชัน (methylation process) ถือได้ว่าเป็นขั้นตอนการลดความเป็นพิษเนื่องจากไดเมทิลซีลีไนด์และไตรเมทิลซีลีไนด์ไอออน เป็นสารที่มีพิษน้อยกว่าสารประกอบซีลีเนียมอื่นๆ (Vadhanavikit and Genther, 1993) ส่วนกรดซีลีโนอะมิโนเป็นกรดอะมิโนที่มีซีลีเนียมเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง เช่น ซีลีโนซิสเทอีน (selenocysteine) และซีลีโนเมทไธโอนีน (selenomethionine) จัดเป็นสปีชีส์ที่มีความสำคัญที่สุดในสปีชีส์ของซีลีเนียมทั้งหมดเนื่องจากร่างกายมนุษย์สามารถดูดซึมไปใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้ ยังเป็นส่วนประกอบในเอนไซม์บางชนิดที่มีซีลีเนียมเป็นองค์ประกอบและทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระอีกด้วย (Gutbrie and Picciano, 1995)

การพัฒนาเทคนิคที่จะใช้ในการศึกษาสปีชีส์ของซีลีเนียมในสิ่งแวดล้อมและตัวอย่างชีวภาพจะต้องมีความเข้าใจในวัฏจักรชีวเคมี การเคลื่อนย้าย ตลอดจนความเป็นพิษของซีลีเนียมด้วย พบว่า การหาปริมาณซีลีเนียมในสปีชีส์ต่างๆ นั้นมีขั้นตอนค่อนข้าง

¹ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อําเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

ซับซ้อนเนื่องจากมีความเข้มข้นของซีลีเนียมในสปีชีส์ต่างๆ ที่ต่ำมากและมีความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากการรบกวนของสารประกอบซีลีเนียมและการปนเปื้อนจากแหล่งต่างๆ

นักวิจัยหลายท่านได้เสนอวิธีการวิเคราะห์เพื่อหาสปีชีส์ของซีลีเนียมอินทรีย์แต่เมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ปริมาณซีลีเนียมรวม ซีลีเนต หรือซีลีไนท์แล้วก็ยังมีข้อมูลน้อยมาก บทความนี้ได้รวบรวมแนวคิดในการหาปริมาณซีลีเนียมในสปีชีส์ต่างๆ ดังนี้

ซีลีเนียมรวม (Total selenium)

เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณรวมของธาตุมีหลายเทคนิค เช่น เทคนิคฟลูออโรเมตรี (fluorimetry) (Rodriguez et al., 1999) เทคนิคโพลาร์กราฟีและโวลแทมเมตรี (polarography and voltametry) (Ochsenkuhn-Petropoulou and Tsopelas, 2002) เทคนิคไฮโดรได์เจเนอเรชัน (hydride generation) ด้วยโซเดียมเตตระไฮโดรโบเรต (sodium tetrahydroborate, NaBH_4) หรือสารผสมระหว่างกรดทาร์ทาริก (tartaric acid) กับโซเดียมเตตระไฮโดรโบเรต และตรวจวัดด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรเมตรี (atomic absorption spectrometry, AAS) (Borella et al., 1998; Maleki et al., 2005) หรือตรวจวัดด้วยเทคนิคอะตอมมิกฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรเมตรี (atomic fluorescence spectrometry, AFS) (Smrkolj and Stibilj, 2004) เทคนิคแกรฟไฟท์เฟอร์เนสอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรเมตรี (graphite furnace atomic absorption spectrometry, GFAAS) (Borella et al., 1998; Sahim et al., 2005) เทคนิคอินดักทีฟลีคัปเปิลพลาสมา-แมสสเปกโตรเมตรี (inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS) (Nardi et al., 2009; Giannenas et al., 2009) และเทคนิคแมสสเปกโตรเมตรี (mass spectrometry, MS) (Montes-Bayon et al., 2002) เป็นต้น นอกจากนี้ Borella และคณะ (1998) ได้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างเทคนิคฟลูออโรเมตรีและ Hydride Generation AAS (HGAAS)

พบว่าเทคนิคฟลูออโรเมตรีให้ความถูกต้องสูงกว่า ในการเตรียมตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเหล่านี้ ควรจะทำการย่อยตัวอย่างให้เป็นสารละลายใสก่อน เช่น การย่อยแบบเปียก (wet digestion) การใช้ไมโครเวฟ ร่วมกับการใช้กรดไนตริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Nardi et al., 2009) ในการย่อยตัวอย่างอาหาร หรือมีการใช้สารลดแรงตึงผิว triton X-114 ร่วมด้วย (Ghambarian et al., 2009) ในตัวอย่างสิ่งแวดล้อม และตัวอย่างทางชีวภาพ เป็นต้น

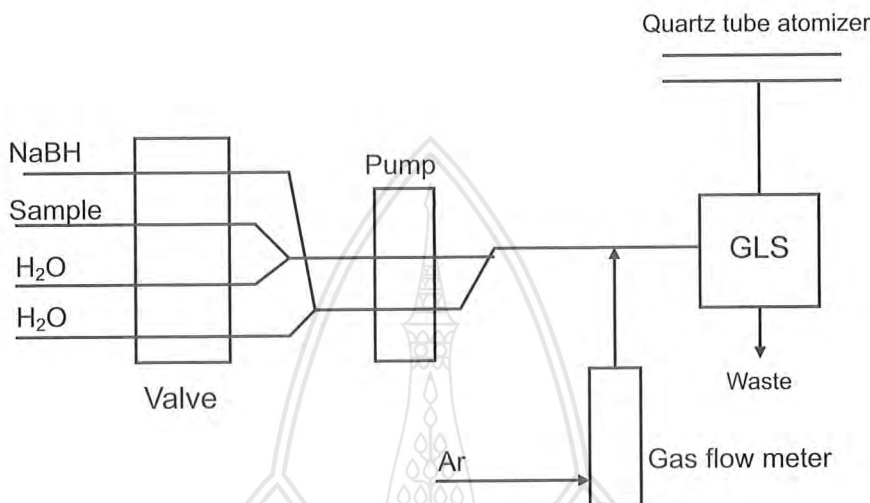
ซีลีไนท์และซีลีเนต (Selenite และ Selenate)

ซีลีไนท์และซีลีเนตเป็นสปีชีส์ที่มีการเปลี่ยนแปลงในระบบชีวธรณีมากที่สุด พบว่าซีลีไนท์มีความเป็นพิษมากกว่าซีลีเนต อัตราส่วนของซีลีไนท์และซีลีเนตในน้ำธรรมชาติขึ้นอยู่กับความเป็นพีเอช (pH) สารที่จะเกิดสารเชิงซ้อน (complexing agents) แก๊สที่ละลาย (dissolved gas) โดยเฉพาะอย่างยิ่งออกซิเจน และสารแขวนลอย (suspended matter) ในน้ำ (Pyrzynska, 1998)

เทคนิคไฮโดรได์เจเนอเรชันควบคู่กับการตรวจวัดด้วยเครื่อง AAS และ ICP เป็นเทคนิคที่นิยมใช้มากที่สุดในการหาซีลีเนียมอินทรีย์ ซึ่งซีลีไนท์จะถูกรีดิวซ์อย่างเฉพาะเจาะจงเป็น SeH_2 โดยโซเดียมเตตระไฮโดรโบเรต ในกรดไฮโดรคลอริก ปฏิกริยานี้สามารถนำไปหาปริมาณซีลีไนท์และซีลีเนียมอินทรีย์รวมได้หลังจากเปลี่ยนซีลีเนตหรือ Se(VI) เป็นซีลีไนท์แล้ว โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก หรือทำการแยกออกจากกันโดยอาศัยเทคนิค LC (Rubio et al., 1997) หรือใช้เทคนิคอะลตราอีเล็กโตรโฟเรซิส (capillary electrophoresis, CE) (Deng et al., 2007) นอกจากนี้พบว่า เทคนิค CE ยังสามารถลดการรบกวนเนื่องจากโลหะไอออนชนิดอื่น เนื่องจากมีสภาพเคลื่อนที่ (mobility) ที่แตกต่างกัน การเตรียม SeH_2 สามารถเตรียมได้โดยวิธี batch หรือโฟลอินเจกชันอะนาไลซิส (flow injection analysis, FIA) หรือการไหลอย่างต่อเนื่อง (continuous flow) พบว่าเทคนิค FIA จะให้ข้อดีที่เหนือ

กว่าการเตรียมโดยวิธี batch เนื่องจากเป็นระบบอัตโนมัติ วิเคราะห์ได้รวดเร็ว ใช้สารตัวอย่างและสารเคมีน้อยกว่า (Fernandez et al., 1993) เพื่อเพิ่มความไวในการ

ตรวจวัดจึงทำตัวอย่างเป็นกรดที่อุณหภูมิ 140°C และการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรด์เจนเนอเรชันในอ่างน้ำแข็ง เพื่อลดการสลายตัวของ NaBH_4 ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงการจัดเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณซีลีเนียมอนินทรีย์ด้วยเทคนิค FI-HG-AAS (Zhang and Adelejo, 2008)

เทคนิคฟลูออโรเมตริกที่อาศัยการตรวจวัดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง Se (IV) และ 2,3-diaminonaphthalene หรือ DAN นั้นพบว่ามีความจำเพาะกับ Se (IV) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนซีลีเนียมสปีชีส์อื่นเป็น Se (IV) โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก จึงจะสามารถวิเคราะห์ได้ ดังนั้นการเตรียมตัวอย่างสามารถเตรียมได้โดยการย่อยตัวอย่างโดยการต้มในกรดไฮโดรคลอริก นอกจากนี้ Se(IV) ยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับรีเอเจนต์อื่น เช่น เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ 2,3-diamino-1,4-dibromonaphthalene (Br_2 -DAN) หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ 2-(α -pyridyl)-thioquinaldinamide (PTQA) ในสภาวะกรด (Rodriguez et al., 1999) ซึ่งเทคนิคฟลูออโรเมตริกสามารถใช้ในการหาปริมาณซีลีเนียมในตัวอย่างชนิดต่างๆ ทั้งตัวอย่างทางสิ่งแวดล้อมและชีวภาพ

เทคนิคสเปกโทรโฟโตเมตริกทำได้โดยการรีดิวซ์ Se (IV) ให้เป็นซีลีเนียมด้วย 2-mercaptoethanol จากนั้นเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับลิแกนด์ที่เหลือเป็น SeL₆ ที่ pH 10 ถึง 13 (Afsar et al., 1989) หรือการรีดิวซ์ Se(IV) โดยเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) จากนั้นเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไซโอไฮยาเนต (KSCN) (Somer and Kutay, 1993) หรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง Se (IV) กับรีเอเจนต์ต่าง ๆ เช่น 6-amino-1-3-sulphonic acid (Ramachandran et al., 1993) methdilazine (Melwanki and Seetharamappa, 2000) potassium iodide และ thionin ในสารละลายกรด (Revanasiddappa and Kiran Kumar, 2002) potassium iodide และใช้น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ (Narayan et al., 2003) trifluoroacetic acid (Suchocki et al., 2003) leuco malachite green (Revanasiddappa and Dayananda, 2006) เป็นต้นพบว่า เทคนิคนี้สามารถใช้ในการศึกษาในตัวอย่างได้

หลายชนิด เช่น น้ำ (เตรียมโดยการเคี้ยวสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และ EDTA กรองตะกอนแล้วนำสารละลายไปวิเคราะห์) ดิน (เตรียมโดยการย่อยด้วยกรด HCl จากนั้นปรับพีเอช ให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางและ EDTA) พืช (เตรียมโดยการย่อยด้วยกรด HNO_3 กรด HClO_4 และกรด HCl เคี้ยวสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และ EDTA) ยา (เตรียมโดยการย่อยด้วยกรด HNO_3 รุ่ยเหยจนสารแห้ง กักจัดตะกอนด้วยกรด H_2SO_4 จากนั้นปรับพีเอช ให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางและ EDTA) เป็นต้น

เทคนิคแก๊สเฟสเพอร์เนส อะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรเมตรี (GFAAS) เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถใช้ในการหาปริมาณซีลีเนียมและซีลีโนน ซึ่งจะต้องทำการแยกทั้งสองสปีชีส์ก่อนด้วยเทคนิคการแยกแบบต่างๆ เช่น การใช้เทคนิคไอออนโครมาโทกราฟี (ion chromatography) โดยใช้ KHP เป็นสารละลายพา (Kolbl et al., 1993) ใช้กรดไฮโดรคลอริกเพื่อรีดิวซ์ Se(IV) เป็น Se(VI) (Profumo et al., 2001) เกิดไอออนแพร์ (ion-pair) กับ tetrabutylammonium phosphate แล้วแยกโดยใช้คอลัมน์แบบ reversed phase (Do et al., 2001) ใช้คอลัมน์ขนาดเล็กที่บรรจุด้วยเรซิน Dowex 1X8 แล้วชะด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M และ กรดไฮโดรคลอริก 4 M สำหรับซีลีโนนและซีลีโนตามลำดับ (Stripeikis et al., 2004) สกัดด้วยเฟสของแข็ง (solid phase extraction, SPE) โดยอาศัยปฏิกิริยาระหว่าง Se (IV) กับ ammonium pyrrolidine dithiocarbamate (APDC) บน Diaion HP-2MG (Saygi et al., 2007) หรือใช้คอลัมน์อนุมินา (Pyrzynska et al., 1998) เป็นต้น

เทคนิคโครมาโทกราฟีแบบของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC) ควบคุมกับตัวตรวจวัดที่เฉพาะเจาะจงกับซีลีเนียม เช่น เทคนิค AAS, ICP-AES, ICP-MS เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์สปีชีส์ของซีลีเนียมอนินทรีย์ ซึ่งซีลีโนนและซีลีโนนจะถูกแยกโดยใช้โครมาโทกราฟีแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ (anion

exchange chromatography) หรือ โครมาโทกราฟีแบบ ion-pair reverse phase ก็ได้ พบว่าเทคนิคนี้ให้ข้อจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (สำหรับการฉีด 100 μL ลงในคอลัมน์) เท่ากับ 10 ng 1 ng และ 0.1 ng Se/L สำหรับการตรวจวัดด้วย FAAS GFAAS และ ICP-MS ตามลำดับ (Kolbl, 1995)

เทคนิค FIA ที่มีการเชื่อมต่อกับคอลัมน์แลกเปลี่ยนประจุลบ (anion exchange) ขนาดเล็ก และตรวจวัดด้วยเครื่อง ICP-MS (Jitmanee et al., 2007) พบว่าสามารถตรวจวัดซีลีโนนและซีลีโนนพร้อมกันได้ถึงระดับ $\text{sub } \mu\text{g L}^{-1}$

ไตรเมทิลซีลีโนเนียมไอออน

(Trimethylselenonium ion, TMSe^+)

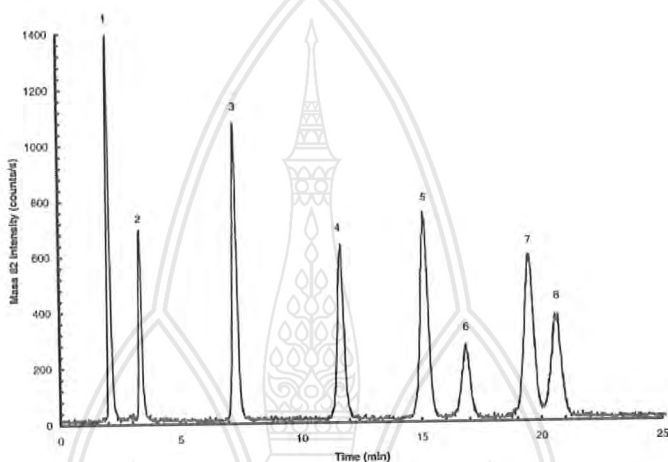
ไตรเมทิลซีลีโนเนียมไอออนเป็นสารที่พบมากในพืชสวะ ในการหาปริมาณ TMSe^+ จะแยก TMSe^+ ออกจากสารอื่นโดยการตกตะกอนด้วย ammonium reineckate จากนั้นอาศัยพื้นฐานของโครมาโทกราฟีแบบแลกเปลี่ยน ไอออนเนื่องจากสารชนิดนี้เป็นสารที่มีประจุบวก ดังนั้น การเพิ่มความเข้มข้นและแยกออกจากซีลีเนียมอนินทรีย์สปีชีส์อื่นๆ จะใช้คอลัมน์แลกเปลี่ยนประจุบวก (Kraus et al., 1985) คอลัมน์แลกเปลี่ยนประจุลบ (Blotcky et al., 1987) หรือ ion-pair reversed phase (Yang and Jiang, 1995) ก็ได้ ก่อนทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง AAS หรือ ICP-MS ต่อไป

กรดซีลีโนอะมิโน (Selenoamino acid)

มีหลายเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์สปีชีส์กรดซีลีโนอะมิโนหรือบางครั้งเรียกสารประกอบซีลีเนียมอินทรีย์พบว่าขั้นตอนการเพิ่มความเข้มข้นก่อนตรวจวัด เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย ตกตะกอนร่วม หรือการใช้สารดูดซับของแข็ง มีความสำคัญมาก ได้มีนักวิจัยหลายท่านได้ใช้ HPLC ในการแยกกรดซีลีโนอะมิโนและสารประกอบซีลีเนียมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ในตัวอย่างทางชีวภาพหรือโปรตีน และในการวิเคราะห์พืชบางชนิด เช่น หอมหัวใหญ่ (Wrobel et al., 2004) พักทอง

(Smrekolj, 2005) กระเทียม (Dumont et al., 2006) และบรอกโคลี (Pedrero et al., 2007) ที่ปลูกในอาหารเสริมโซเดียมซัลเฟต พืชเหล่านี้สามารถเปลี่ยนซัลเฟตในอนินทรีย์ไปเป็นซัลเฟตในอนินทรีย์สปีชีส์ต่าง ๆ ได้ รูปที่ 2 (Bird et al., 1997) Gosetti และคณะ (2007) ได้

เสนอเทคนิค HPLC ที่มีระบบตรวจวัดเป็น MS/MS โดยคอลัมน์ C_{18} และใช้สารละลายพาเป็นสารละลายผสมเมทานอลและน้ำ ซึ่งมีการเติม 0.05% trifluoroacetic acid เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกสปีชีส์ต่างๆ ของกรดซัลโฟโนอิมิโน



รูปที่ 2 ไอออนแฟร็กโครมาโทแกรมของสารละลายกรดซัลโฟโนอิมิโนมาตรฐาน ความเข้มข้น 300 ppb พิก: 1, selenocystine; 2, Se-methyl-DL-selenocysteine; 3, selenomethionine; 4, Se-allyl-DL-selenocysteine; 5, cis-Se-1-propenyl-DL-selenocysteine; 6, trans-Se-1-propenyl-DL-selenocysteine; 7, selenoethionine; 8, Se-propyl-DL-selenocysteine. (Bird et al., 1997)

นอกจากนี้ กรดซัลโฟโนอิมิโนยังสามารถแยกด้วยคอลัมน์แลกเปลี่ยนไอออนลบ (Huerta et al., 2005; Liang et al., 2006) นอกจากนี้ การวิเคราะห์กรดซัลโฟโนอิมิโนยังสามารถศึกษาโดยการเตรียมอนุพันธ์กับเอทิลคลอโรฟอร์มหรือเมทิลคลอโรฟอร์มแล้ววิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS (Haberhauer-Troyer et al., 2003) ได้อีกด้วย

อัลคิลซัลไฟด์ที่ระเหยได้ (Volatile alkylselenides)

ไดเมทิลซัลไฟด์และไดเมทิลไดซัลไฟด์เป็นผลผลิตของกระบวนการเมทิลเลชันของซัลเฟตในอนินทรีย์ในสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้ยังพบสารทั้งสองชนิดนี้ระเหย

จากดิน ดินตะกอนได้น้ำและของเสียด้วย ในการวิเคราะห์อัลคิลซัลไฟด์ที่ระเหยได้จากตัวอย่างอากาศหรือน้ำ จะจับไว้บนสารดูดซับของแข็งหรือเพิ่มความเข้มข้นโดยใช้ระบบ purge-และ-trap (Campillo et al., 2005) ในไนโตรเจนเหลว และไล่ออกด้วยความร้อนก่อนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีที่มีหน่วยตรวจวัดเป็น MS AAS microwave-induced plasma atomic emission spectrometry (MIP-AES) ควบคู่กับ แก๊สโครมาโทกราฟีแบบ multicapillary (MC) (Dietz et al., 2004) หรือ AFS ก็ได้ นอกจากนี้ การรวมเทคนิค headspace-solid phase microextraction (HS-SPME) กับเทคนิค GC-ICP-MS พบว่าสามารถ

หาปริมาณ ไดเมทิลซีลีไนด์ และ ไดเมทิลไดซีลีไนด์ ได้พร้อมกัน (Bueno and Pannier, 2009)

เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีเป็นเทคนิคที่ใช้ในการระบุชนิดและหาปริมาณซีลีเนียมอินทรีย์ที่ระเหยได้ ซึ่งหน่วยตรวจวัดที่นิยมใช้ในการหาปริมาณ ไดเมทิลซีลีไนด์ และ ไดเมทิลไดซีลีไนด์ คือ flame ionization (FID) เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ได้ง่าย โดยไม่จำเป็นต้องเตรียมอนุพันธ์ก่อนการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตาม หน่วยตรวจวัดชนิดนี้ก็มีข้อด้อยในเรื่องของความเร็วในการตรวจวัด ดังนั้น จึงได้มีการใช้หน่วยตรวจวัดอื่นๆ เช่น MS (Gomez-Ariza et al., 1998) อีกด้วย นอกจากนี้ Hunter และ Kuykendall (2004) เสนอการวิเคราะห์สารทั้งสองชนิดนี้ โดยใช้หน่วยตรวจวัดแบบ photoionization พบว่า สามารถวิเคราะห์ได้โดยไม่ต้องเตรียมอนุพันธ์เช่นเดียวกัน ได้ขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ที่ต่ำกว่ากับ 60 pg และ 150 pg สำหรับ ไดเมทิลซีลีไนด์ และ ไดเมทิลไดซีลีไนด์ ตามลำดับ

สรุป

ในปัจจุบันนี้การศึกษาชีวเคมีของซีลีเนียมได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากซีลีเนียมเป็นธาตุที่มีความจำเป็นในสิ่งมีชีวิต และถ้าได้รับมากเกินไปก็เป็นพิษได้ ดังนั้น นักวิทยาศาสตร์ยังคงมีการพัฒนาเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์หาสปีชีส์ของซีลีเนียมได้อย่างถูกต้อง อย่างไรก็ตาม เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุส่วนใหญ่สามารถวิเคราะห์ได้เพียงปริมาณรวมเท่านั้น จึงต้องมีการแยกสปีชีส์ต่างๆ ก่อนการตรวจวัดหรือนำเทคนิคคู่ควบมาใช้ เพื่อให้ทราบถึงสปีชีส์ของซีลีเนียมที่มีผลต่อกลไกในการต้านอนุมูลอิสระและอื่นๆ ในร่างกาย

เอกสารอ้างอิง

- Afsar, H., Apak, R. and Tor, I. (1989). Spectrophotometric determination of selenium with 2-mercaptoethanol. *Analyst*. 114: 1319-1321.
- Bird, S. M., Ge, H., Uden, P. C., Tyson, J. F., Block, E. and Denoyer, E. (1997). High-

performance liquid chromatography of selenoamino acids and organo selenium compounds speciation by inductively coupled plasma mass spectrometry. *J. Chromatogr. A*. 789: 349-359.

Blotcky, A. J., Hansen, G. T., Borkar, N., Ebrahim, A. and Rack, E. P. (1987). Simultaneous determination of selenite and trimethylselenonium ions in urine by anion exchange chromatography and molecular neutron activation analysis. *Anal. Chem.* 59: 2063-2066.

Borella, P., Bargellini, A., Caselgrandi E., Menditto A., Patriarca M., Taylor A. and Vivoli G. (1998). Selenium determination in biological matrices. *Microchem. J.* 58: 325-336.

Bueno, M. and Pannier F. (2009). Quantitative analysis of volatile selenium metabolites in normal urine by headspace solid phase micro-extraction gas chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*. 78: 759-763.

Campillo, N., Aguinaga, N., Vinas, P., Lopez-Garcia, I. and Hernandez-Cordoba, M. (2005). Gas chromatography with atomic emission detection for dimethylselenide and dimethyldiselenide determination in water and plant materials using a purge-and-trap preconcentration system. *J. Chromatogr. A*. 1095: 138-144.

Deng, B., Feng, J. and Meng, J. (2007). Speciation of inorganic selenium using capillary electrophoresis-inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry with on-line hydride generation. *Anal. Chim. Acta.* 583: 92-97.

- Dietz, C., Landaluze, J., Ximenez-Embun, P., Madrid-Albarrañ, Y. and Camara, C. (2004). Volatile organo-selenium speciation in biological matter by solid phase micro-extraction-moderate temperature multicapillary gas chromatography with microwave induced plasma atomic emission spectrometry detection. *Anal. Chim. Acta.* 501: 157-167.
- Do, B., Robinet, S., Pradeau D. and Guyon, F. (2001). Speciation of arsenic and selenium compounds by ion-pair reversed-phase chromatography with electrothermal atomic absorption spectrometry: application of experimental design for chromatographic optimization. *J. Chromatogr. A.* 918: 87-98.
- Dumont, E., Ogra, Y., Vanhaecke, F., Suzuki, K. T. and Cornelis, R. (2006). Liquid chromatography-mass spectrometry (LC-MS): A powerful combination for selenium speciation in gallic (*Allium sativum*). *Anal. Bioanal. Chem.* 384: 1196-1206.
- Fernandez, M. G. C., Palacios, M. A. and Camara, C. (1993). Flow-injection and continuous-flow systems for the determination of Se(IV) and Se(VI) by hydride generation atomic absorption spectrometry with on-line prereluction of Se(VI) to Se(IV). *Anal. Chim. Acta.* 283: 386-392.
- Ghambarian, M., Yamini, Y., Saleh, A., Shariati, S. and Yazdanfar, N. (2009). Taguchi OA16 orthogonal array design for the optimization of cloud point extraction for selenium determination in environmental and biological samples by tungsten-modified tube electrothermal atomic absorption spectrometry. *Talanta.* 78: 970-976.
- Giannenas, I., Nisianakis, P., Gavriil, A., Kontopidis, G. and Kyriazakis (2009). Trace mineral content of conventional, organic and courtyard eggs analysed by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). *Food Chem.* 114: 706-711.
- Gomez-Ariza, J. L., Pozas, J. A., Giraldez, I. and Morales, E. (1998). Speciation of volatile forms of selenium and inorganic selenium in sediments by gas chromatography-mass spectrometry. *J. Chromatogr. A.* 823: 259-277.
- Gosetti, F., Frascarolo, P., Polati, S., Medana, C., Gianotti, V., Palma, P., Aigotti, R., Baiocchi, C. and Gennaro, M.C. (2007). Speciation of selenium in diet supplements by HPLC-MS/MS methods. *Food Chem.* 105: 1738-1747.
- Gutbrie H. A. and Picciano M. F. (1995). *Human Nutrition*. Boston. WCB/McGraw-Hill.
- Haberhauer-Troyer, C., Alvarez-Llamas, G., Zitting, E., Rodriguez-Gonzalez, P., Rosenberg, E. and Sanz-Medel, A. (2003). Comparison of different chloroformates for the derivatisation of seleno amino acids for gas chromatographic analysis. *J. Chromatogr.* 1015: 1-10.
- Huerta, V. D., Sanchez, M. L. F. and Sanz-Medel, A. (2005). Qualitative and quantitative speciation analysis of water soluble selenium in three edible wild mushrooms species by liquid chromatography using post-column isotope dilution ICP-MS. *Anal. Chim. Acta.* 538: 99-105.
- Hunter, W. J. and Kuykendall, L. D. (2004). Determination of dimethylselenide and dimethyldiselenide by gas chromatography-photoio-

- nization detection. *J. Chromatogr. A*. 1038: 295-297.
- Itoh, K., Nakayama, M., Chikuma, M. and Tanaka, H. (1986). Determination of selenium in sediments by fluorimetry with 2,3-diaminonaphthalene after an improved pretreatment by tellurium coprecipitation. *Fres. Z. Anal. Chem.* 325: 539-543.
- Jitmanee, K., Teshima, N., Sakai, T. and Grudpan, K. (2007). DRCTM ICP-MS coupled with automated flow injection system with anion exchange minicolumns for determination of selenium compounds in water samples. *Talanta*. 73: 352-357.
- Kolbl, G. (1995). Concepts for the identification and determination of selenium compounds in the aquatic environment. *Marine Chem.* 48: 185-197.
- Kraus, R. J., Foster, S. J. and Ganther, H. E. (1985). Analysis of trimethylselenonium ion in urine by high-performance liquid chromatography. *Anal. Biochem.* 147: 432-436.
- Liang, L., Mo, S., Zhang, P., Cai, Y., Mou, S., Jiang, G. and Wen, M. (2006). Selenium speciation by high-performance anion-exchange chromatography-post-column UV irradiation coupled with atomic fluorescence spectrometry. *J. Chromatogr. A*. 1118: 139-143.
- Maleki, N., Safavi, A. and Doroodmand, M. M. (2005). Determination of selenium in water and soil by hydride generation atomic absorption spectrometry using solid reagents. *Talanta*. 66: 858-862.
- Melwanki, M. B. and Seetharamappa, J. (2000). Spectrophotometric determination of selenium (IV) using methdilazine hydrochloride. *Turk J. Chem.* 24: 287-290.
- Montes-Bayon, M., Grant, T. D., Meija, J. and Caryso, J. A. (2002). Selenium in plants by mass spectrometric techniques: developments in bio-analytical methods. *J. Anal. At. Spectrom.* 17: 1015-1023.
- Narayan, B., Mathew, M., Bhat, N. G. and Sreekumar, N. V. (2003). Spectrophotometric determination of selenium using potassium iodide and starch as reagents. *Microchim. Acta*. 141: 175-178.
- Nardi, E. P., Evangelista, F. S., Tormen, L., SaintPierre, T. D., Curtius, A. J., de Souza, S.S. and Barbosa Jr, F. (2009). The use of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) for the determination of toxic and essential elements in different types of food samples. *Food Chem.* 112: 727-732.
- Ochsenkuhn-Petropoulou, M. and Tsopeles, F. (2002). Speciation analysis of selenium using voltametric technique. *Anal. Chim. Acta*. 467: 167-178.
- Pedrero, Z., Elvira, D., Camara, C. and Madrid, Y. (2007). Selenium transformation studies during Broccoli (*Brassica oleracea*) growing process by liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry (LC-ICP-MS). *Anal. Chim. Acta*. 596: 251-256.
- Profumo, A., Spini, G., Cucca, L. and Mannucci, B. (2001). Sequential extraction procedure for speciation of inorganic selenium in emissions and working areas. *Talanta*. 55: 155-161.

- Pyrzynska, K. (1998) Speciation of selenium compounds. *Anal. Sci.* 14: 479-483.
- Pyrzynska, K., Drzewicz, P. and Trojanowicz, M. (1998). Preconcentration and separation of inorganic selenium species on activated alumina. *Anal. Chim. Acta* 363: 141-146.
- Ramachandran, K. N., Kaveeshwar, R. and Gupta, V. K. (1993). Spectrophotometric determination of selenium with 6-amino-1-naphthol acid (J-acid) and its application in trace analysis. *Talanta*. 40: 781-784.
- Revanasiddappa, H. D. and Dayananda, B. P. (2006). A new reagent system for the highly sensitive spectrophotometric determination of selenium. *Cent. Eur. J. Chem.* 4: 592-603.
- Revanasiddappa, H. D. and Kiran Kumar, T. N. (2002). Spectrophotometric determination of selenium by use of thionin. *Anal. Bioanal. Chem.* 374: 1121-1124.
- Rodriguez, E. M., Alaejos, S. M. and Romero D. C. (1999). Fluorimetric determination of selenium in biological samples. *Anal. Lett.* 32: 1699-1721.
- Rubio, R., Padro, A. and Rauret G. (1997). Photoreduction-hydride generation: a new on-line system for the determination of selenate and selenite. *Anal. Chim. Acta.* 353: 91-97.
- Sahin, F., Volkan, M. and Ataman, O. Y. (2005). Effect of nitric acid for equal stabilization and sensitivity of different selenium species in electrothermal atomic absorption spectrometry. *Anal. Chim. Acta.* 547: 126-131.
- Saygi, K. O., Melek, E., Tuzen, M. and Soylak M. (2007). Speciation of selenium (IV) and selenium (VI) in environmental samples by the combination of graphite furnace atomic absorption spectrometric determination and solid phase extraction on Diaion HP-2MG. *Talanta*. 71: 1375-1381.
- Smrkolj, P. and Stibilj, V. (2004). Determination of selenium in vegetable by hydride generation atomic fluorescence spectrometry. *Anal. Chim. Acta.* 512: 11-17.
- Smrkolj, P., Stibilj, V., Kreft, I. and Kapolna, E. (2005). Selenium speciation in selenium-enriched pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) seeds by HPLC-UV-HG-AFS. *Anal. Sci.* 21: 1501-1504.
- Somer, G. and Kutay, N. (1993). A new and simple spectrophotometric method for the determination of selenium in the presence of copper and tellurium. *Can. J. Chem.* 71: 834-835.
- Stripeikis, J., Pedro, J., Bonivardi, A. and Tudino, M. (2004). Determination of selenite and selenate in drinking water: a fully automatic on-line separation/pre-concentration system coupled to electrothermal atomic spectrometry with permanent chemical modifiers. *Anal. Chim. Acta.* 502: 99-105.
- Suchocki, P., Jakoniuk, D. and Fitak B. A. (2003). Specific spectrophotometric method with trifluoroacetic acid for the determination of selenium(IV) in selenitetriglycerides. *J. Pharm. Biomed. Anal.* 32: 1029-1036.
- Tandon, S. K., Magos, L. and Webb, M. (1986). The simulation and inhibition of the exhalation of volatile selenium. *Biochem. Pharm.* 35: 2763-2766.
- Vadhanavikit, S. and Genther, H. E. (1993). Selenium requirements of rat for normal hepatic and thyroidal 5'-deiodinase (type I) activities.

- J. Nutr. 23: 1124-1128.
- Wrobel, K., Wrobel, K., Kannamkumarath, S. S., Caruso, J. A., Wysocka, I. A. and Bulska, E. (2004). HPLC-ICP-MS speciation of selenium in enriched onion leaves- A potential dietary source of Se-methylselenocysteine. Food Chem. 86: 617-623.
- Yang, K. L. and Jiang S. J. (1995). Determination of selenium compounds in urine samples by liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry with an ultrasonic nebulizer. Anal. Chim. Acta. 307: 109-115.
- Zingaro R. A. and Cooper W. C. (1974). Selenium. New York. Van Nostrand Reinhold.





แผนภูมิควบคุมคุณภาพหลายตัวแปรด้วยข่ายงาน ระบบประสาทสำหรับการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ Multivariate Quality Control Charts by Neural Networks for Statistical Process Control

จตุภัทร เมฆพ่าย¹

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้ต้องการแสดงให้เห็นถึงการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติสำหรับการควบคุมคุณภาพหลายตัวแปรด้วยแผนภูมิควบคุมไคกำลังสอง แผนภูมิควบคุม MEWMA และวิธีของข่ายงานระบบประสาทที่มีโครงสร้างแบบ Multi-Layer Perceptron (MLP) ซึ่งมีความแกร่ง (robust) ต่อข้อตกลงเบื้องต้น (assumption) ที่ว่าคุณลักษณะเชิงคุณภาพต้องมีการแจกแจงปกติหลายตัวแปร (multivariate normal distribution) และยังให้การตรวจค้นพบ (detecting) การเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยสำหรับคุณลักษณะเชิงคุณภาพ (quality characteristics) ได้ดีกว่าแผนภูมิควบคุมไคกำลังสองและแผนภูมิควบคุม MEWMA ในเกือบทุกกรณี ไม่ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยสำหรับคุณลักษณะเชิงคุณภาพจะมีขนาดเล็ก (small shift) หรือมีขนาดใหญ่ (large shift)

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Abstract

This article is purposed to show how to use Chi-square control chart, MEWMA control chart and Neural Networks, Multi-Layer Perceptron (MLP), for Statistical Process Control (SPC) of Multivariate Quality Control. MLP provides the robustness to normality assumption for quality characteristics and a good performance in detecting most cases rather than Chi-square control chart and MEWMA control chart both small shift and large shift.

¹ ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี 20131

คำสำคัญ : แผนภูมิควบคุมคุณภาพหลายตัวแปร ข่ายงานระบบประสาท โครงสร้างข่ายงานระบบประสาทที่ใช้ควบคุมกระบวนการเชิงสถิติสำหรับคุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปร จำนวนผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยที่ทำการตรวจสอบได้ก่อนที่จะมีจำนวนผลิตภัณฑ์ของข้อมูลตัวอย่างตกอยู่นอกขีดจำกัดควบคุม

Keywords: Multivariate Quality Control Charts, Neural Networks, Multi-Layer Perceptron (MLP), Average Run Length (ARL)

บทนำ

งานด้านอุตสาหกรรมของประเทศไทยในปัจจุบันกำลังเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว จึงปฏิเสธไม่ได้ว่ามีการแข่งขันสำหรับธุรกิจอุตสาหกรรมค่อนข้างสูง คุณภาพของสินค้าที่ผลิตจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญซึ่งจะช่วยสร้างโอกาสทางธุรกิจให้อยู่เหนือคู่แข่ง การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (Statistical Process Control: SPC) จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการควบคุมคุณภาพของกระบวนการผลิตให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ การควบคุมกระบวนการเชิงสถิตินั้นสามารถควบคุมคุณลักษณะเชิงคุณภาพได้ทั้งตัวแปรเชิงปริมาณ (quantity variable) และตัวแปรเชิงคุณภาพ (quality variable) แผนภูมิที่ใช้มีทั้งแผนภูมิควบคุมสำหรับหนึ่งตัวแปร (control charts for univariate) และแผนภูมิควบคุมสำหรับหลายตัวแปร (control charts for multivariate) ในที่นี้จะขอกล่าวถึงแผนภูมิควบคุมสำหรับหลายตัวแปรซึ่งเป็นที่ยอมรับกันในปัจจุบัน อาทิเช่น แผนภูมิควบคุมไคกำลังสอง (Chi-square Control Chart) และแผนภูมิควบคุม MEWMA (Multivariate Exponentially Weighted Moving Average Control Chart)

เมื่อไม่นานมานี้ นักวิจัยได้จำลองการทำงานของระบบประสาท (neural systems) เพื่อประยุกต์ใช้กับการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติหรือที่เป็นที่รู้จักกันในชื่อ “ข่ายงานระบบประสาท (neural networks หรือ neural nets)” และสถาปัตยกรรม (architecture) หรือโครงสร้างของข่ายงานระบบประสาทที่นำมาใช้ควบคุมกระบวนการเชิงสถิติสำหรับคุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปรซึ่งเป็นที่นิยมอยู่นั้นคือ โครงสร้างแบบ Multi-Layer Perceptron (MLP) โดยสมรรถนะ (performance) ของโครงสร้างข่ายงานระบบประสาทแบบ MLP จะเหมาะสมสำหรับการควบคุมกระบวนการผลิตเชิงสถิติหรือไม่นั้นอาจวัดได้จากค่าของจำนวนผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยที่ทำการตรวจสอบได้ก่อนที่จะมีจำนวนผลิตภัณฑ์ของข้อมูลตัวอย่างตกอยู่นอกขีดจำกัดควบคุม (Average Run Length : ARL) บทความวิชาการฉบับนี้มุ่งเน้นศึกษาสมรรถนะของแผนภูมิควบคุมไคกำลังสอง แผนภูมิควบคุม MEWMA และโครงสร้างข่ายงานระบบประสาทแบบ MLP สำหรับการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติสำหรับหลายตัวแปร

แผนภูมิควบคุมแบบดั้งเดิม

1. แผนภูมิควบคุมไคกำลังสอง (Chi-square Control Chart)

กำหนดให้ p แทนจำนวนคุณลักษณะเชิงคุณภาพ (quality characteristics)

$\mathbf{x}' = [x_1, x_2, \dots, x_p]$ แทนเวกเตอร์สุ่มของคุณลักษณะเชิงคุณภาพ $\boldsymbol{\mu}' = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p]$ แทน

เวกเตอร์ค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะเชิงคุณภาพ $\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} & \sigma_{13} & \dots & \sigma_{1p} \\ & \sigma_2^2 & \sigma_{23} & \dots & \sigma_{2p} \\ & & \ddots & & \vdots \\ & & & & \sigma_p^2 \end{bmatrix}$ แทนเมทริกซ์ความ

แปรปรวนร่วมของคุณลักษณะเชิงคุณภาพ โดยที่ σ_i^2 แทนความแปรปรวนของคุณลักษณะเชิงคุณภาพ x_i และ σ_{ij} แทนความแปรปรวนร่วมระหว่างคุณลักษณะเชิงคุณภาพ x_i และ x_j เมื่อ $i \neq j$ โดยที่ $i = 1, 2, \dots, p$ และ $j = 1, 2, \dots, p$

การแจกแจงความน่าจะเป็นร่วม (joint probability distribution) ของคุณลักษณะเชิงคุณภาพ $x_1, x_2, \dots, x_p$ มีการแจกแจงปกติ (multivariate normal distribution) ด้วยค่าเฉลี่ย $\boldsymbol{\mu}$ และความแปรปรวนร่วม Σ ซึ่งเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $\mathbf{X} \sim N_p(\boldsymbol{\mu}, \Sigma)$ Hotelling's (1947) เสนอการสร้างแผนภูมิควบคุมดังนี้

สถิติที่ใช้คำนวณ

$$\chi_0^2 = n(\bar{\mathbf{x}} - \boldsymbol{\mu})' \Sigma^{-1} (\bar{\mathbf{x}} - \boldsymbol{\mu}) \quad \text{เมื่อ } \bar{\mathbf{x}}' = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_p]$$

โดยที่ขีดจำกัดควบคุมบน (Upper Control Limit : UCL) คือ

$$UCL = \chi_{\alpha, p}^2 \quad \text{เมื่อ } \alpha \text{ แทนความผิดพลาดแบบที่ 1 (type I error)}$$

p แทนจำนวนคุณลักษณะเชิงคุณภาพซึ่งเป็นองศาเสรี (degree of freedom)

และขีดจำกัดควบคุมล่าง (Lower Control Limit : LCL) คือ

$$LCL = 0$$

การสร้างแผนภูมิควบคุมไคกำลังสองนั้นจะใช้ข้อมูลจากตัวอย่างที่เป็นค่าสังเกตปัจจุบันเท่านั้น ดังนั้น ในทางปฏิบัติแล้วจะไม่ทราบค่า $\boldsymbol{\mu}$ และ Σ จึงต้องทำการประมาณค่าจากตัวอย่างขนาด n และกลุ่มย่อย (subgroup) ขนาด m เมื่อกระบวนการผลิตอยู่ในการควบคุม (process in control หรือ in-control) จะได้ตัวประมาณค่าของ $\boldsymbol{\mu}$ ดังนี้

$$\bar{\mathbf{x}}' = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_p] \quad \text{เมื่อ } \bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \bar{x}_{jk} ; j = 1, 2, \dots, p$$

และตัวประมาณค่าของ Σ คือ

$$S = \begin{bmatrix} \overline{s}_1^2 & \overline{s}_{12} & \overline{s}_{13} & \dots & \overline{s}_{1p} \\ & \overline{s}_2^2 & \overline{s}_{23} & \dots & \overline{s}_{2p} \\ & & \ddots & & \vdots \\ & & & & \overline{s}_p^2 \end{bmatrix}$$

เมื่อ

$$\overline{s}_j^2 = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m s_{jk}^2 ; j = 1, 2, \dots, p$$
$$\overline{s}_{jh} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m s_{jhk} ; \begin{cases} j, h = 1, 2, \dots, p \\ j \neq h \end{cases}$$
$$s_{jhk} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ijk} - \bar{x}_{jk})(x_{jkh} - \bar{x}_{hk}) ; \begin{cases} j = 1, 2, \dots, p \\ k = 1, 2, \dots, m \\ j \neq h \end{cases}$$

โดยที่ x_{ijk} แทนค่าสังเกตที่ i ของคุณลักษณะเชิงคุณภาพที่ j จากกลุ่มย่อยที่ k
เมื่อกระบวนการผลิตอยู่ในการควบคุมค่าเฉลี่ยของ S จะเป็นตัวประมาณค่าไม่เอนเอียง (unbiased estimator) ของ Σ และเมื่อใช้ $\bar{\mathbf{x}}$ และ S ประมาณค่า μ และ Σ ตามลำดับแล้วจะได้แผนภูมิควบคุมเป็นดังนี้

สถิติที่ใช้คำนวณ คือ

$$T^2 = n(\bar{\mathbf{x}} - \bar{\bar{\mathbf{x}}})' S^{-1} (\bar{\mathbf{x}} - \bar{\bar{\mathbf{x}}})$$

และจะเรียกสถิติ T^2 ว่า “สถิติ Hotelling's T^2 ” และเรียกแผนภูมินี้ว่า “แผนภูมิควบคุม Hotelling's T^2 ”

ขีดจำกัดควบคุมในเฟส 1 (The phase I control limits) สำหรับแผนภูมิควบคุม Hotelling's T^2 เป็นดังนี้

ขีดจำกัดควบคุมบนคือ

$$UCL = \frac{p(m-1)(n-1)}{mn-m-p+1} F_{\alpha; p, mn-m-p+1}$$

ขีดจำกัดควบคุมล่างคือ

$$LCL = 0$$

และขีดจำกัดควบคุมในเฟส 2 (The phase II control limits) เป็นดังนี้

ขีดจำกัดควบคุมบนคือ

$$UCL = \frac{p(m+1)(n-1)}{mn-m-p+1} F_{\alpha; p, mn-m-p+1}$$

ขีดจำกัดควบคุมล่างคือ

$$LCL = 0$$

ในกรณีที่กลุ่มย่อยมีขนาดใหญ่จะประมาณ $F_{\alpha; p, mn-m-p+1}$ ด้วย $\chi^2_{\alpha, p}$ ดังนั้นขีดจำกัดควบคุมบนทั้งเฟส 1 และเฟส 2 จะเป็น $UCL = \chi^2_{\alpha, p}$ โดย Lowry และ Montgomery (1995) เสนอว่าควรใช้กลุ่มย่อยที่มีขนาดมากกว่า 20 ($m > 20$)

การพิจารณาสมรรถนะของแผนภูมิควบคุมนั้นอาจพิจารณาได้จากความไว (sensitive) ของการตรวจค้นพบการเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิตเมื่อค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะเชิงคุณภาพมีการเปลี่ยนแปลง Montgomery (2005) เสนอว่าควรพิจารณาจากขนาดการเปลี่ยนแปลง (shift size) ที่เรียกว่า “พารามิเตอร์ไม่ศูนย์กลาง (noncentrality parameter)” ซึ่งเขียนแทนด้วย δ โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\delta = (\mu' \Sigma^{-1} \mu)^{1/2} ; \delta \geq 0$$

ความหมายของ δ นิยามดังนี้ (1) เมื่อ $\delta = 0$ แสดงว่ากระบวนการผลิตอยู่ในการควบคุม (2) เมื่อ $\delta > 0$ แสดงว่ากระบวนการผลิตออกนอกการควบคุม (process out control หรือ out-of-control) โดย (2.1) δ มีค่ามากหมายความว่าขนาดการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการผลิตมีขนาดใหญ่ (large shift) และ (2.2) δ มีค่าน้อยหมายความว่าขนาดการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการผลิตมีขนาดเล็ก (small shift)

แผนภูมิควบคุมไคกำลังสองและแผนภูมิควบคุม Hotelling's T^2 เป็นแผนภูมิควบคุมที่ใช้ข้อมูลจากตัวอย่างที่เป็นค่าสังเกตปัจจุบันเท่านั้น ทำให้เป็นแผนภูมิที่ไม่ไว (insensitive) ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยสำหรับคุณลักษณะเชิงคุณภาพที่มีขนาดเล็ก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าแผนภูมิทั้งสองสามารถตรวจค้นพบการเปลี่ยนแปลงได้ไม่ดีเมื่อค่าเฉลี่ยสำหรับคุณลักษณะเชิงคุณภาพมีขนาดเล็ก ในทางกลับกันแผนภูมิควบคุมไคกำลังสองและแผนภูมิควบคุม Hotelling's T^2 สามารถตรวจค้นพบการเปลี่ยนแปลงได้ดีเมื่อค่าเฉลี่ยสำหรับคุณลักษณะเชิงคุณภาพมีขนาดใหญ่

2. แผนภูมิควบคุม MEWMA (Multivariate Exponentially Weighted Moving Average Control Chart)

Lowry และคณะ (1992) เสนอแผนภูมิควบคุม EWMA สำหรับคุณลักษณะเชิงคุณภาพหลายตัวแปรหรือที่เรียกว่า “แผนภูมิควบคุม MEWMA” ดังนี้

เมื่อ

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & 0 & & \lambda_p \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z}_i = \mathbf{R}\mathbf{x}_i + (\mathbf{I} - \mathbf{R})\mathbf{Z}_{i-1} ; i = 1, 2, \dots \text{ และ } \mathbf{Z}_0 = \bar{\bar{\mathbf{x}}}$$

และ λ_i แทนค่าคงตัวถ่วงน้ำหนัก (weighted constants) โดยที่

$i = 1, 2, \dots, p$

สถิติที่ใช้สำหรับแผนภูมิควบคุมคือ

$$T_i^2 = \mathbf{z}_i' \Sigma_i^{-1} \mathbf{z}_i$$

เมื่อ $\Sigma_{\mathbf{z}_i}$ แทนเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของ $\mathbf{z}_i$

ในกรณีที่ค่าคงตัวถ่วงน้ำหนักของคุณลักษณะเชิงคุณภาพ p มีค่าเท่ากัน จะได้ว่า $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_p$ ดังนั้น แผนภูมิควบคุม MEWMA จะเป็นดังนี้

$$\mathbf{z}_i = \lambda \mathbf{x}_i + (1 - \lambda) \mathbf{z}_{i-1} \quad \text{โดยที่} \quad \Sigma_{\mathbf{z}_i} = \frac{\lambda}{2 - \lambda} [1 - (1 - \lambda)^{2i}] \Sigma$$

และกระบวนการผลิตจะออกนอกการควบคุมเมื่อ $T_i^2 > h$ โดย h เป็นขีดจำกัดควบคุมบนที่สอดคล้องกับ Lowry และคณะ (1992)

จากแผนภูมิควบคุม MEWMA จะเห็นได้ว่าเมื่อ $\lambda = 1$ แผนภูมิควบคุม MEWMA ก็คือแผนภูมิควบคุม Hotelling's T^2 นั้นเอง

ผลการวิจัยของ Stoumbos และ Sullivan (2002); Testik, Runger และ Borrer (2003) แสดงให้เห็นว่า λ ที่มีค่าน้อยจะมีสมรรถนะที่ดีสำหรับการตรวจค้นพบการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยสำหรับคุณลักษณะเชิงคุณภาพขนาดเล็ก แผนภูมิควบคุม MEWMA จึงเป็นแผนภูมิควบคุมที่ใช้ในการตรวจค้นพบการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยสำหรับคุณลักษณะเชิงคุณภาพขนาดเล็ก

แผนภูมิควบคุม MEWMA จะตรวจค้นพบการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยสำหรับคุณลักษณะเชิงคุณภาพขนาดเล็กได้ไวว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยสำหรับคุณลักษณะเชิงคุณภาพขนาดใหญ่ หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยสำหรับคุณลักษณะเชิงคุณภาพยังมีขนาดเล็กแล้วแผนภูมิควบคุม MEWMA ยังสามารถตรวจค้นพบการเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิตได้ไวขึ้นนั่นเอง

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

วิธีของข่ายงานระบบประสาท (Neural Networks)

ข่ายงานระบบประสาทเป็นแบบจำลอง (model) ทางคณิตศาสตร์ที่นักวิจัยนิยมใช้ประมวลผลข้อมูลเพื่อเลียนแบบการทำงานของระบบประสาทของมนุษย์ สำหรับการวิจัยเชิงสถิติจะประยุกต์ใช้ข่ายงานระบบประสาทสำหรับการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติทั้งแบบหนึ่งตัวแปรและแบบหลายตัวแปร Hwang และ Hubele (1993a, 1993b); Cheng (1997) เป็นคนริเริ่มในการนำข่ายงานระบบประสาทมาประยุกต์ใช้กับการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ

1. โครงสร้างหรือสถาปัตยกรรม (Architecture)

Lippmann (1987) ได้เสนอโครงสร้างหรือสถาปัตยกรรมข่ายงานระบบประสาทไว้ทั้งหมด 6 แบบ ดังนี้ (1) Hopfield (2) Hamming (3) Carpenter/Grossberg Classifier (4) Perceptron (5) MLP และ (6) Kohonen Self-Organizing Feature Maps ต่อมา Hwang และ Hubele (1993a, 1993b); Zorriassatine และ

Tannock (1998) เสนอโครงสร้างข่ายงานระบบประสาทซึ่งเป็นที่ยอมรับ 6 แบบ ดังนี้ (1) Multi-Layer perceptron (MLP) (2) Radial Basis Function (RBF) (3) Learning Vector Quantization (LVQ) (4) Adaptive Resonance Theory (ART) (5) Auto-Associative NNs และ (6) Kohonen Self-Organising Maps (SOM)

ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะโครงสร้างข่ายงานระบบประสาทแบบ MLP เท่านั้น เนื่องจากเป็นโครงสร้างอย่างง่ายจึงเป็นโครงสร้างที่ไม่ยุ่งยากและซับซ้อนต่อผู้วิจัยซึ่งมีผู้วิจัยให้ความสนใจศึกษาสำหรับโครงสร้าง MLP สำหรับหนึ่งตัวแปรที่มีผู้สนใจศึกษา อาทิเช่น Pugh (1989, 1991); Guo และ Dooley (1992); Smith (1994); Stutzle (1995) ส่วนโครงสร้าง MLP สำหรับหลายตัวแปรที่มีผู้สนใจศึกษา อาทิเช่น Zorriassatine และ Tannock (1998); กิดาการ สายธนู และ ปรียารัตน์ นาคสุวรรณ (2551) เป็นต้น

โครงสร้างข่ายงานระบบประสาทแบบ MLP ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ (1) ส่วนที่หนึ่งประกอบด้วยชั้นอินพุต (input layer) จำนวน 1 ชั้น (2) ส่วนที่สองประกอบด้วยชั้นซ่อน (hidden layer) อย่างน้อย 1 ชั้น และ (3) ส่วนที่สามประกอบด้วยชั้นเอาต์พุต (output layer) จำนวน 1 ชั้น

ในแต่ละชั้นประกอบด้วยโหนด (node) สำหรับโหนดในชั้นอินพุตเรียกว่า “โหนดชั้นอินพุต (input layer node)” ส่วนโหนดในชั้นซ่อนเรียกว่า “โหนดชั้นซ่อน (hidden layer node)” และโหนดที่อยู่ในชั้นเอาต์พุต เรียกว่า “โหนดชั้นเอาต์พุต (output layer node)”

2. จำนวนของชั้นซ่อน (Number of hidden layers)

Guo และ Dooley (1992) เสนอว่าการกำหนดจำนวนชั้นซ่อนที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างข่ายงานระบบประสาทแบบ MLP นั้นไม่มีกฎเกณฑ์แน่นอน แต่ระบุไว้ว่าจะต้องมีชั้นซ่อนอย่างน้อย 1 ชั้นเสมอ

3. จำนวนของโหนด (Number of nodes)

(1) จำนวนของโหนดชั้นอินพุต จะมีจำนวนของโหนดเท่ากับจำนวนตัวแปรอินพุต (input variable)

(2) จำนวนของโหนดชั้นซ่อน Guo และ Dooley (1992) เสนอว่าไม่มีกฎเกณฑ์ตายตัวสำหรับการกำหนดจำนวนของโหนดชั้นซ่อนซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Hwang และ Hubele (1993b); Cheng (1997)

(3) จำนวนของโหนดชั้นเอาต์พุต ขึ้นอยู่กับรูปแบบ (pattern) ของตัวแปรเอาต์พุตที่ต้องการจะศึกษา และจะต้องสัมพันธ์กับสถาปัตยกรรมของข่ายงานระบบประสาทด้วย

4. ชนิดของการเชื่อมต่อ (Type of connection)

เป็นการเชื่อมต่อระหว่างโหนดของแต่ละชั้น อาทิเช่นการเชื่อมต่อระหว่างโหนดอินพุตของชั้นอินพุตและโหนดซ่อนของชั้นซ่อน หรือการเชื่อมต่อระหว่างโหนดซ่อนของชั้นซ่อนและโหนดเอาต์พุตของชั้นเอาต์พุต เป็นต้น โดยการเชื่อมต่อนั้นมี 2 ประเภทด้วยกันคือ (1) โยงไปข้างหน้า (feed-forward) ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ (1.1) โยงไปข้างหน้าแบบทั่วถึง (fully-connected feed-forward) และ (1.2) โยงไปข้างหน้าบางส่วน (partial-connected feed-forward) โดย Pugh (1991); Change และ Aw (1996) เสนอว่าควรจะใช้การเชื่อมต่อจากโหนดอินพุต ไปยังทุก ๆ โหนดของแต่ละชั้นเป็นแบบโยงไปข้างหน้าแบบทั่วถึง ซึ่งจะ

ทำให้ทำงานระบบประสาทมีการลู่เข้า (convergence) (2) โยงย้อนกลับ (feedback หรือ recurrent) เอาต์พุตจากโหนดจะถูกส่งกลับเข้ามายังโหนดเดิมเพื่อใช้เป็นข้อมูลอินพุต กระบวนการจะดำเนินการไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ข้อมูลเอาต์พุต ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภทเช่นกันคือ (2.1) โยงย้อนกลับแบบทั่วถึง (fully-connected feedback) และ (2.2) โยงย้อนกลับบางส่วน (partial-connected feedback)

5. ฟังก์ชันการกระตุ้น (Activation function) หรือฟังก์ชันการส่งต่อ (Transfer function)

เนื่องจากโครงสร้างข่ายงานระบบประสาทแบบ MLP มีการเชื่อมต่อระหว่างโหนดในแต่ละชั้นเป็นแบบโยงไปข้างหน้าแบบทั่วถึงซึ่งจะแสดงอยู่ในรูปของฟังก์ชันผกผัน (inverse function) ของฟังก์ชันการกระตุ้นของโหนดเอาต์พุต (output activation function) ซึ่งเขียนแทนด้วย $g_i(\bullet)$; $i = 0, 1, \dots, n$ และจะเรียก $g_i(\bullet)$ ว่าเป็น “ฟังก์ชันการกระตุ้นหรือฟังก์ชันการส่งต่อ” ซึ่งฟังก์ชันดังกล่าวอาจเป็น (1) ฟังก์ชันเชิงเส้น (linear function) (2) ฟังก์ชันไม่เชิงเส้น (nonlinear function) (3) ฟังก์ชันสมมาตร (symmetrical function) หรือ (4) ฟังก์ชันไม่สมมาตร (nonsymmetrical function) จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการสร้างแผนภูมิควบคุมโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทนั้นส่วนใหญ่จะใช้ฟังก์ชันการกระตุ้นไม่เชิงเส้น ส่วนข้อมูลเอาต์พุต (output data) ที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับการใช้ฟังก์ชันการกระตุ้น อาทิเช่นถ้าเลือกใช้ฟังก์ชัน sigmoid เป็นฟังก์ชันการกระตุ้นค่าเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าอยู่ในระหว่าง 0 ถึง 1 หรือถ้าเลือกใช้ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิคแทนเจนต์ (hyperbolic tangent) เป็นฟังก์ชันการกระตุ้นค่าเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 เป็นต้น

เมื่อใช้ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิคแทนเจนต์เป็นฟังก์ชันการกระตุ้นสำหรับข่ายงานระบบประสาทแบบ MLP โดย Cheng (1997) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าข่ายงานระบบประสาทแบบ MLP จะมีคุณสมบัติของความไม่แปรเปลี่ยนของทิศทาง (directional invariance) นั่นคือไม่ว่าค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะเชิงคุณภาพ $\bar{x}_i$; $i = 1, 2, \dots, p$ ใด ๆ เปลี่ยนแปลง หรือค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะเชิงคุณภาพทั้ง p คุณลักษณะเปลี่ยนแปลงพร้อมกัน จะไม่ทำให้ค่า ARL เปลี่ยนแปลง ต่อมา Saithanu (2007) ได้ศึกษาข่ายงานระบบประสาทแบบ MLP โดยใช้ฟังก์ชัน sigmoid เป็นฟังก์ชันการกระตุ้น ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าข่ายงานระบบประสาทดังกล่าวไม่มีคุณสมบัติในข้อนี้

6. ฟังก์ชันการเชื่อมต่อ (Combination function)

ฟังก์ชันการกระตุ้นมีอาร์กิวเมนต์ (argument) ที่เรียกว่า “ฟังก์ชันการเชื่อมต่อ” ฟังก์ชันการเชื่อมต่อที่ใช้ในโครงสร้างข่ายงานระบบประสาทแบบ MLP นั้นจะใช้การเชื่อมต่อเชิงเส้น (linear combination) ส่วนการเชื่อมต่อประเภทอื่นนั้นจะใช้กับข่ายงานระบบประสาทแบบ RBF

7. ขั้นตอนวิธี (Algorithm)

ขั้นตอนวิธีที่ใช้สำหรับโครงสร้างข่ายงานระบบประสาทมีหลายขั้นตอนวิธี อาทิเช่น ขั้นตอนวิธีแบบ backpropagation ขั้นตอนวิธีแบบ genetic ขั้นตอนวิธีแบบ marquardt เป็นต้น Pugh (1989, 1991); Guo และ Dooley (1992); Smith (1994); Stutzle (1995) เสนอการใช้ขั้นตอนวิธีแบบ backpropagation สำหรับโครงสร้างข่ายงานระบบประสาทแบบ MLP เนื่องจากขั้นตอนวิธีนี้จะมีหลักการเรียนรู้แบบมีผู้สอน (supervised learning rule) เพราะทราบทั้งข้อมูลอินพุตและข้อมูลเอาต์พุต

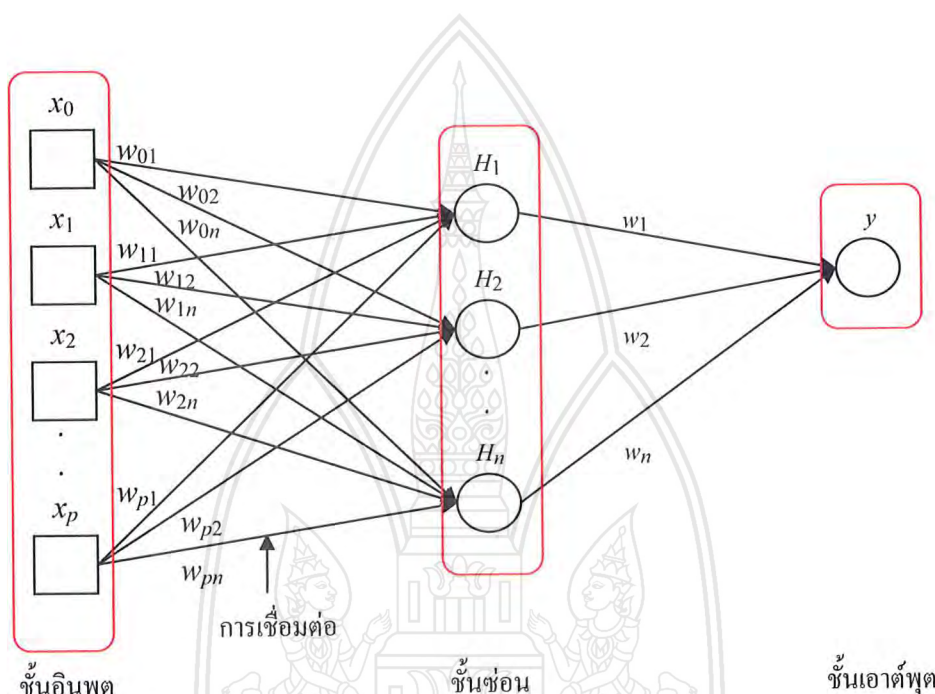
$$g_0^{-1}(E(y)) = w_0 + w_1 H_1 + w_2 H_2 + \dots + w_n H_n$$

$$\text{เมื่อ } H_1 = \tanh(w_{01} + w_{11}x_1 + w_{21}x_2 + \dots + w_{p1}x_p)$$

$$H_2 = \tanh(w_{02} + w_{12}x_1 + w_{22}x_2 + \dots + w_{p2}x_p)$$

$$\vdots$$

$$H_n = \tanh(w_{0n} + w_{1n}x_1 + w_{2n}x_2 + \dots + w_{pn}x_p)$$



รูปที่ 1 แผนภาพ (diagram) ข่ายงานระบบประสาทแบบ MLP

ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างโครงสร้างข่ายงานระบบประสาทแบบ MLP ที่ประกอบด้วย (ดังรูปที่ 1)

- (1) ชั้นอินพุต 1 ชั้น ชั้นซ่อน 1 ชั้น และชั้นเอาต์พุต 1 ชั้น
- (2) จำนวนของโหนดในแต่ละชั้นประกอบด้วย
 - (2.1) โหนดของชั้นอินพุตมีจำนวนเท่ากับจำนวนคุณลักษณะเชิงคุณภาพนั้นคือ p
 - (2.2) โหนดของชั้นซ่อนมี n โหนด
 - (2.3) โหนดของชั้นเอาต์พุตมี 1 โหนด
- (3) ฟังก์ชันการกระตุ้นเป็นฟังก์ชัน ไฮเพอร์โบลิคแทนเจนต์
- (4) ฟังก์ชันการเชื่อมต่อเป็นการเชื่อมต่อแบบเชิงเส้น
- (5) ใช้ขั้นตอนวิธีแบบ backpropagation

สรุป

แผนภูมิควบคุมไคกำลังสองและแผนภูมิควบคุม MEWMA เป็นแผนภูมิที่ใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการผลิตเมื่อคุณลักษณะเชิงคุณภาพ p และเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วม Σ มีความสัมพันธ์กัน และแผนภูมิควบคุมทั้งสองต้องอาศัยข้อตกลงเบื้องต้นเชิงสถิติสำหรับการวิเคราะห์นั่นคือการแจกแจงความน่าจะเป็นร่วมของคุณลักษณะเชิงคุณภาพมีการแจกแจงปกติด้วยค่าเฉลี่ย μ และความแปรปรวนร่วม Σ แต่วิธีของข่ายงานระบบประสาทไม่ต้องอาศัยข้อตกลงเบื้องต้นดังกล่าว จึงทำให้วิธีของข่ายงานระบบประสาทนั้นมีความแกร่งต่อข้อตกลงเบื้องต้นด้านความปกติ (normality) ของคุณลักษณะเชิงคุณภาพ

Lowry และ Montgomery (1995) แสดงให้เห็นว่าแผนภูมิควบคุมไคกำลังสองและแผนภูมิควบคุม MEWMA มีคุณสมบัติความไม่แปรเปลี่ยนของทิสทาง ส่วน Saithanu (2007) แสดงให้เห็นไว้อย่างชัดเจนว่าวิธีของข่ายงานระบบประสาทแบบ MLP ที่ใช้ฟังก์ชัน sigmoid เป็นฟังก์ชันการกระตุ้นนั้นไม่มีคุณสมบัติดังกล่าว

กิดาการ สายธนู และ ปรียารัตน์ นาคสุวรรณ (2551) ทำการศึกษาการควบคุมคุณภาพหลายตัวแปรโดยการสร้างแผนภูมิควบคุมด้วยวิธีข่ายงานระบบประสาทแบบ MLP เพื่อจำลองการทำงานของแผนภูมิควบคุมไคกำลังสองและแผนภูมิควบคุม MEWMA ภายใต้เงื่อนไขเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมระหว่างคุณลักษณะเชิงคุณภาพมีค่าน้อยและมาก ซึ่งผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าแผนภูมิควบคุมด้วยวิธีข่ายงานระบบประสาทแบบ MLP ให้การตรวจค้นพบได้ดีกว่าแผนภูมิควบคุมไคกำลังสองและแผนภูมิควบคุม MEWMA ในเกือบทุกกรณีไม่ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยสำหรับคุณลักษณะเชิงคุณภาพจะมีขนาดเล็กหรือใหญ่ก็ตาม มีเพียงกรณีเดียวเท่านั้นที่แผนภูมิควบคุม MEWMA ให้การตรวจค้นพบได้ดีกว่าคือกรณีที่เมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมระหว่างคุณลักษณะเชิงคุณภาพมีค่าน้อยและของค่าเฉลี่ยสำหรับคุณลักษณะเชิงคุณภาพมีขนาดเล็ก

ข้อเสนอแนะ

การประยุกต์ใช้ข่ายงานระบบประสาทสำหรับการควบคุมกระบวนการเชิงสถิตินั้นยังไม่มีโครงสร้างที่แน่นอน โครงสร้างข่ายงานระบบประสาทแบบ MLP เป็นโครงสร้างหรือสถาปัตยกรรมชนิดหนึ่งของข่ายงานระบบประสาทอย่างง่ายจึงไม่ยุ่งยากและซับซ้อนซึ่งมีโครงสร้างแบบ Multi-Layer ที่ใช้ขั้นตอนวิธีแบบ backpropagation เนื่องจากมีหลักการเรียนรู้แบบมีผู้สอน และใช้ฟังก์ชัน sigmoid เป็นฟังก์ชันการกระตุ้น ส่วนการเชื่อมต่อกันจากโหนดในชั้นอินพุตไปยังทุก ๆ โหนดในชั้นซ่อนและโหนดในชั้นซ่อนไปยังทุก ๆ โหนดในชั้นเอาต์พุตเป็นแบบโยงไปข้างหน้าแบบทั่วถึง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในการตรวจค้นพบการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของกระบวนการได้ดี การปรับปรุงสมรรถนะดังกล่าวนี้ อาจเลือกใช้โครงสร้างข่ายงานระบบประสาทชั้นสูงสำหรับการควบคุมคุณภาพของกระบวนการเชิงสถิติ อาทิเช่น ข่ายงานระบบประสาทแบบ RBF ซึ่งอาจจะให้ผลการตรวจค้นพบการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของกระบวนการ ได้ดีกว่าข่ายงานระบบประสาทแบบ MLP

เอกสารอ้างอิง

- กิตติการ สายธนู และ ปรียารัตน์ นาคสุวรรณ. (2551). การหาค่าประมาณของขีดจำกัดควบคุมของวิธีข่ายงานระบบประสาทสำหรับการควบคุมคุณภาพแบบหลายตัวแปร. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 13(2): 57-65.
- Chang, S. I. and Aw, C. A. (1996). A Neural Fuzzy Control Chart for Detecting and Classifying Process Mean Shifts. *International Journal of Production Research*. 34: 2265-2278.
- Cheng, C. S. (1997). A Neural Network Approach for the Analysis of Control Chart Patterns. *International Journal of Production Research*. 35: 667-697.
- Guo, Y. and Dooley, K. J. (1992). Identification of Change Structure in Statistical Process Control. *International Journal of Production Research*. 30: 1655-1669.
- Hotelling, H. (1947). *Multivariate Quality Control. Illustrated by the Air Testing of Sample Bombsights from the book Techniques of Statistical Analysis*, edited by Eisenhart, Churchill, Hastay, Millard W., and Wallis, W. Allen, 1st Edition. New York and London: McGraw Hill Book Company. pp. 111-184.
- Hwang, H. B. and Hubele, N. F. (1993). Back-propagation Pattern Recognizers for $\bar{x}$ Control Charts: Methodology and Performance. *Computers Industrial Engineering*. 24: 219-235.
- Hwang, H. B. and Hubele, N. F. (1993). Bar $\bar{x}$ control chart pattern identification through efficient off-line neural network training. *IIE Transactions*. 25: 27-38.
- Limppmann, P. R. (1987). An Introduction to Computing with Neural Nets. *IEEE ASSP Magazine*. 4: 4-22.
- Lowry, C. A., Woodall, W. H., Champ, C. W. and Rigdon, S. E. (1992). A Multivariate Exponentially Weighted Moving Average Control Chart. *Technometrics*. 34: 46-53.
- Lowry, C. A. and Montgomery, D. C (1995). A Review of Multivariate Control Charts. *IIE Transactions*. 27(6): 800-810.
- Montgomery, D. C. (2005). *Introduction to Statistical Quality Control*, 5th Edition. New York: John Wiley & Sons.
- Pugh, G. A. (1989). Synthetic Neural Networks for Process Control. *Computers and Industrial Engineering*. 17: 24-26.
- Pugh, G. A. (1991). A Comparison of Neural Networks to SPC Charts. *Computers and Industrial Engineering*. 21: 253-255.
- Saithanu, K. (2007). Neural Networks: Construction and Evaluation, in *Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability*. Chichester UK: John Wiley & Sons Ltd. pp. 1234-1239
- Smith, A. E. (1994). $\bar{X}$ and R Control Chart Interpretation Using Neural Computing. *International Journal of Production Research*. 32: 309-320.
- Stoumbos, Z. G. and Sullivan, J. H. (2002). Robustness to Non-normality of the Multivariate EWMA Control Chart. *Journal of Quality Technology*. 34(3): 260-276.
- Stutzle, T. (1995). A Neural Network Approach to Quality Control Charts from Natural to Artificial Neural Computation. *Proceedings of the International Workshop on Artificial Neural Networks*, Malaga-Torremolinos, Spain. pp. 1135-1141.

- Testik, M. C., Runger, G. C. and. Borror, C. M. (2003). Robustness Properties of Multivariate EWMA Control Charts. *Quality and Reliability Engineering International*. 19(1): 31-38.
- Zorriassatine, F. and Tannock, J. D. T. (1998). A Review of Neural Networks for Statistical Process Control. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 9: 209-224.





การประยุกต์แบบจำลองเชิงตัวเลขที่มีการนำเข้า ข้อมูลใหม่ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงในมหาสมุทร Applications of Numerical Model with Data-Assimilation to Study Ocean Variations

ธเนศร์ โรจน์ศิริพิศาล¹

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันผลกระทบจากสภาวะโลกร้อนเป็นปัญหาที่บุคคลทั่วโลกต่างให้ความสนใจ แหล่งเก็บความร้อนที่สำคัญที่สุดแห่งหนึ่งบนโลก คือ มหาสมุทร ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงของสมบัติในทะเล เช่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและกระแสน้ำในมหาสมุทรเป็นผลเนื่องมาจากลม การทำความเข้าใจการเปลี่ยนแปลงในมหาสมุทรจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับใช้ศึกษาผลของสภาวะโลกร้อน แต่การศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในมหาสมุทรด้วยการเก็บข้อมูลโดยตรงนั้นต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง วิธีการหนึ่งที่นักวิทยาศาสตร์ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงในมหาสมุทร คือ การใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข ในบทความนี้จะนำเสนอสมการพริมิทีฟ (primitive equations) และกระบวนการนำเข้าข้อมูลใหม่ (data-assimilation) สำหรับใช้ในแบบจำลองเชิงตัวเลขซึ่งจะทำให้ค่าเริ่มต้นที่ใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นจริงอยู่เสมอ ทำให้ผลเฉลยที่ได้มีความแม่นยำค่อนข้างมาก

Abstract

Currently, people concern about Global warming issue. One of the largest heat sources of the world is the ocean. Variations of properties in the ocean such as temperature and water currents are mainly affected by wind. Study of these variations is important in understanding the Global warming. However, study of the ocean variations using in-situ data is very expensive. Scientists usually study the ocean variations by using a numerical ocean modeling as a tool. Here we introduce a numerical ocean model using the set of equations so-called "primitive equations" with data-assimilation that yields reasonable results compare to real situation.

คำสำคัญ: แบบจำลองเชิงตัวเลข สมการพริมิทีฟ กระบวนการนำเข้าข้อมูลใหม่

Keywords: Numerical ocean model, Primitive equation, data-assimilation

¹ ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี 20131

บทนำ

โลกประกอบด้วยบริเวณที่เป็นพื้นน้ำ (ทะเลและมหาสมุทร) ประมาณสองในสามส่วน ทำให้มหาสมุทรเป็นแหล่งเก็บความร้อนที่สำคัญที่สุดแห่งหนึ่งบนโลก การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาวะในทะเลจึงเป็นสิ่งสำคัญในการศึกษาปัญหาโลกร้อน ข้อมูลทางทะเลแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ แยกตามที่มาของข้อมูล คือ 1) ข้อมูลที่ได้จากการเก็บโดยตรง (in-situ) ซึ่งได้มาจากการออกสำรวจทางเรือ ข้อมูลจากทุ่นเป็นต้น ข้อมูลชนิดนี้มีความถูกต้องค่อนข้างมาก แต่มหาสมุทรครอบคลุมพื้นโลกเป็นบริเวณกว้าง การเก็บข้อมูลโดยตรงจึงเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมากทำให้การศึกษาจากข้อมูลโดยตรงเป็นสิ่งที่เกือบจะเป็นไปไม่ได้ 2) ข้อมูลที่เก็บสำรวจโดยดาวเทียม ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้ทั่วโลก แต่ดาวเทียมมีความสามารถจำกัด เพราะสามารถเก็บข้อมูลได้เฉพาะบริเวณพื้นผิวน้ำทะเลเท่านั้น จึงไม่สามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลอื่นๆ ได้ผิวทะเลได้

นักวิทยาศาสตร์จึงใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขเป็นเครื่องมือในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงในมหาสมุทรในระดับพื้นผิวทะเลรวมทั้งได้ทะเลของตัวแปรต่างๆ ในปัจจุบันมีการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงในทะเลและมหาสมุทรมากมาย ตัวอย่างเช่น GFD POM FVCOM NCOM ECOM ROM GOTM SWAN MOM

กลศาสตร์การไหลภาคพื้นดิน (Geophysical Fluid Dynamics หรือ GFD) เป็นแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ออกแบบเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงในอากาศและทะเลในระดับมหภาค (global scale) ซึ่งพัฒนาโดยทีมจาก GFDL (Bryan and Cox, 1968) ในเวลาต่อมาได้มีนักวิทยาศาสตร์หลายกลุ่มพัฒนาแบบจำลองทางทะเลที่มีความซับซ้อนมากขึ้นเพื่อให้ผลเฉลยเหมาะสมกับสิ่งที่ต้องการศึกษามากยิ่งขึ้น เช่น ทีมจากมหาวิทยาลัยพรินซ์ตัน (Princeton University) (Mellor, 1992) ได้พัฒนา Princeton Ocean Model (POM) ซึ่งเป็นแบบจำลองหนึ่งที่ได้รับคามนิยมอย่างแพร่หลายโดยมุ่งเน้นศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระแสน้ำ

อุณหภูมิ ความเค็ม และสมบัติอื่นๆ ในทะเล ซึ่งมีลมเป็นปัจจัยหลักทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเหล่านี้ มีการประยุกต์ใช้แบบจำลองนี้ในบริเวณต่างๆ เช่น อ่าวเม็กซิโก มหาสมุทรแอตแลนติก และพื้นน้ำในบริเวณขั้วโลกเหนือ (Blumberg and Mellor, 1985; Choi et al., 1995; Ezer and Mellor, 2000; Hakkinen et al., 1992) ต่อมาได้มีการพัฒนา POM ให้สามารถนำเข้าข้อมูลอุณหภูมิบนผิวน้ำทะเลและความสูงคลื่นมาประกอบในการคำนวณ เพื่อให้ผลเฉลยมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น มีการนำแบบจำลองนี้ไปใช้ในบริเวณทะเลและมหาสมุทรต่างๆ รอบโลก (Ezer and Mellor 1994; 2000; Choi et al., 1995; Hakkinen et al., 1992; Kantha et al., 2008; Lopez, 1998; Lopez and Kantha, 2000a; 2000b; Rojsiraphisal, 2007)

ในบทความนี้จะนำเสนอโครงสร้างของแบบจำลองจากมหาวิทยาลัยโคโลราโด (University of Colorado, Boulder) ที่ผู้เขียนเป็นหนึ่งในทีมพัฒนารวมทั้งนำเสนอตัวอย่างการนำผลที่ได้จากแบบจำลองไปใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางทะเลในหัวข้อต่าง ๆ

แบบจำลองเชิงตัวเลข CUPOM โดยใช้ Data-Assimilation

CUPOM เป็นแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาโดยทีมจากมหาวิทยาลัยโคโลราโด ซึ่งต่อยอดจากแบบจำลอง POM โดยเพิ่มกระบวนการนำเข้าข้อมูลใหม่ (data-assimilation) ในการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับผู้สนใจสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้ใน Kantha และ Clayson, 2000; Lopez และ Kantha, 2000a; 2000b; Rojsiraphisal, 2007 ในที่นี้จะนำเสนอรายละเอียดโดยสังเขป ดังนี้

สมการพริมีทีฟ

สมการพริมีทีฟ (primitive equations) เป็นสมการที่เกี่ยวข้องกับการไหล ประกอบด้วย (1) “สมการอนุรักษ์โมเมนตัม” (momentum conservation equation) หรือ “สมการการเคลื่อนที่” (equation of motion)

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} + 2\Omega \times \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \vec{g} + (\vec{A} \cdot \nabla^2) \vec{V} \quad \text{----- (2.1)}$$

โดยที่ $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$ และ $\nabla^k = \frac{\partial^k}{\partial x^k} + \frac{\partial^k}{\partial y^k} + \frac{\partial^k}{\partial z^k}$ และ $\vec{V} = (u, v, w)$ ความเร็วในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ, $2\Omega \times \vec{V}$ คือ แรงโคริโอลิส (coriolis force) ซึ่งเป็นแรงที่เกี่ยวข้องกับการหมุนของโลก โดยมี Ω เป็นความเร็วเชิงมุมของโลก, ∇P คือ การเปลี่ยนแปลงความดันของน้ำทะเล (pressure gradient), ρ คือความหนาแน่นของน้ำทะเล, $\vec{g}$ คือ แรงโน้มถ่วงของโลก และ $(\vec{A} \cdot \nabla^2) \vec{V}$ เป็นแรงเสียดทาน เมื่อ $\vec{A} = (A_x, A_y, A_z)$ คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดในการไหลวนของน้ำทะเล (eddy viscosity coefficient) เนื่องจาก $\vec{V} = (u, v, w)$ ทำให้สมการ (2.1) เขียนแยกได้ 3 สมการในการเคลื่อนที่ 3 ทิศทาง

(2) “สมการอนุรักษ์มวล” (mass conservation equation) หรือ “สมการความต่อเนื่อง” (continuity equation)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad \text{----- (2.2)}$$

สมการนี้ได้กำหนดสมมติฐานว่าน้ำทะเลเป็นของเหลวที่ไม่อัดตัว (incompressible fluid)

(3) “สมการอนุรักษ์อุณหภูมิและความเค็ม” (temperature and salinity equations) หรือรวมเรียกว่า “สมการถ่ายเท” (transport equations)

$$\frac{D}{Dt} \theta = K_h \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) + K_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad \text{----- (2.3)}$$

$$\frac{D}{Dt} S = K_h \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + K_z \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad \text{----- (2.4)}$$

เมื่อ θ คือ อุณหภูมิหลังมีการขยายตัว (potential temperature), S คือ ความเค็ม, K_h และ K_z คือสัมประสิทธิ์การผสมในแนวระนาบ (horizontal mixing coefficient) และแนวดิ่ง (vertical mixing coefficient) ตามลำดับ

(4) “สมการสถานะ” (equation of state)

$$\rho = \rho(\theta, S, P) \quad \text{----- (2.1)}$$

สมการนี้อยู่ในรูปของการกระจายพหุนามของตัวแปรอุณหภูมิ ความเค็ม รวมทั้งความดัน สามารถดูตัวอย่างสมการได้ใน Kantha และ Clayson (2000)

จากสมการ (2.1) - (2.5) ทำให้สมการปริมิทีฟ มีสมการทั้งสิ้น 7 สมการ 7 ตัวแปรประกอบด้วย $\vec{V} = (u, v, w)$, ρ , P , θ และ S ซึ่งเป็นระบบสมการที่ยากสำหรับการหาคำตอบชัดแจ้ง (explicit solution) ดังนั้นการหาผลเฉลยของสมการปริมิทีฟจึงจำเป็นต้องใช้การหาคำตอบเชิงตัวเลข ผู้เขียนได้นำระบบสมการนี้ไปประยุกต์ใช้ในมหาสมุทรอินเดียเพื่อสร้างฐานข้อมูลสำหรับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในมหาสมุทรอินเดียระหว่างปี ค.ศ. 1993-2005

พัฒนาการของแบบจำลอง CUPOM

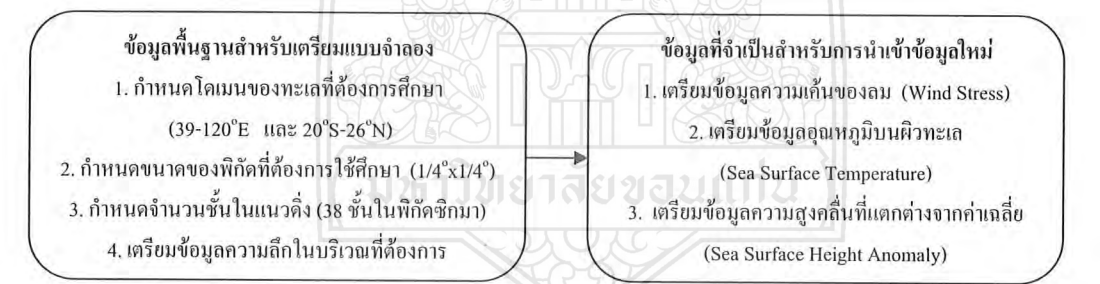
CUPOM มีการพัฒนาที่สำคัญดังนี้ Choi และคณะ (1995) ได้ประยุกต์แบบจำลองนี้ในอ่าวเม็กซิโก โดยสามารถรับข้อมูลใหม่ (data-assimilation) ของอุณหภูมิบนผิวทะเล ความสูงคลื่น และความเค็มของลม (wind stresses) ซึ่งอาศัยความเร็วลมที่ตรวจวัดได้จากดาวเทียมและใช้สัมประสิทธิ์แตร็ก (drag coefficient) ของ Smith (1980) ในการคำนวณ จากนั้น Kantha และ Clayson (2000) ได้ปรับปรุง POM โดยเปลี่ยนแปลงกระบวนการเชิงตัวเลขที่ขอบเขตใต้ท้องทะเลเพื่อให้ผลเฉลยที่เกิดจากการผสมของสมบัติต่างๆ ที่ใต้ท้องทะเลมีความแม่นยำถึงอันดับ 2 (2nd order turbulence mixing) ต่อมา Lopez และ Kantha (2000a; 2000b) ได้นำแบบจำลองชนิดเดียวกันไปประยุกต์ใช้ในมหาสมุทรอินเดียโดยใช้ฟังก์ชันแบบเชิงเส้นโค้ง (Curvilinear) ในแนวแกน x และแกน y และใช้ฟังก์ชันกามา (sigma) ในแนวดิ่ง เพื่อศึกษาการแปลงทางคณิตศาสตร์จากความลึกในพิกัดมากเป็นพิกัดกามาด้วยความ

สัมพันธ $\sigma = (z - \eta) / D, H \leq z \leq \eta$ เมื่อ H คือ ความลึกจากก้นทะเลถึงผิวน้ำทะเล, η คือ ความสูงของ คลื่นจากผิวน้ำทะเล และ $D = H + \eta$ คือ ความลึกรวม ทำให้แบบจำลองมีจำนวนพิกัดในแนวตั้งเท่ากันทุก ตำแหน่ง ซึ่งเป็นข้อดีของการใช้พิกัดซิกมา นอกจากนั้น ได้ปรับปรุงแบบจำลองให้สามารถรับข้อมูลความสูง คลื่นจากดาวเทียม ซึ่งทำให้ข้อมูลของอุณหภูมิใน มหาสมุทรตั้งแต่ผิวน้ำทะเลจนถึงความลึกถึงประมาณ 100 เมตร มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ต่อมา Kantha และคณะ (2008) ได้ปรับปรุง พัฒนาแบบจำลองนี้เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงในมหาสมุทรอินเดียระหว่างปี ค.ศ. 1993 -2004 และในปี ค.ศ. 2007 (Rojisraphisal, 2007) ได้ปรับปรุงแบบจำลองในมหาสมุทรอินเดียให้ มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นด้วยการปรับขนาดของพิกัดให้ มีความละเอียด 25 กิโลเมตรในแนวนอน และมีพิกัด ซิกมา จำนวน 38 ชั้นในแนวตั้ง โดยเน้นให้มีจำนวน ชั้นหนาแน่นในบริเวณใกล้ผิวน้ำ รวมทั้งให้สามารถ รับข้อมูลความสูงคลื่นจากดาวเทียมในช่วง 5 วันก่อน

และหลังวันที่กำลังจำลองผล ทำให้อุณหภูมิใน มหาสมุทรมีความถูกต้องใกล้เคียงกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นมากกว่าที่ได้จากแบบจำลองของ Lopez และ Kantha (2000a; 2000b) และสามารถใช้ศึกษาเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในมหาสมุทรอินเดียระหว่างปี ค.ศ. 1993-2005 ดังตัวอย่างในหัวข้อต่อไป

กระบวนการที่จำเป็นในการประยุกต์แบบ จำลอง CUPOM ที่มีการนำเข้าข้อมูลใหม่เพื่อใช้ศึกษา การเปลี่ยนแปลงทางทะเลสามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ 1) การเตรียมแบบจำลองโดยต้องกำหนดขอบเขต ที่ต้องการศึกษา และ 2) การเตรียมข้อมูลที่จำเป็น ดัง แผนภาพที่ 1 ซึ่งแสดงตัวอย่างการเตรียมข้อมูลเพื่อ ประยุกต์ใช้สำหรับมหาสมุทรอินเดียซึ่งประกอบไปด้วย การกำหนดขอบเขตการศึกษา ในที่นี้บริเวณที่สนใจ คือ ระหว่าง 39-120°E และ 20°S-26°N และกำหนดพิกัด ที่ต้องการใช้ทั้งสามทิศทาง จากนั้นเตรียมข้อมูลนำเข้า เพื่อใช้ในกระบวนการนำเข้าข้อมูลใหม่ ได้แก่ ความ เหนือของลม และอุณหภูมิตื้นผิวน้ำทะเล รวมทั้งเตรียม ข้อมูลความสูงของคลื่นเพื่อปรับผลเฉลยให้แม่นยำขึ้น



แผนภาพที่ 1 ตัวอย่างการเตรียมข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางทะเลด้วยแบบจำลอง CUPOM สำหรับมหาสมุทรอินเดีย

Carnes และคณะ (1990) ได้พบว่าอุณหภูมิ ที่ต่างจากค่าเฉลี่ย (temperature anomaly) ในแนวตั้ง ของทะเลสามารถประมาณได้จากความสูงคลื่น ดังนั้น ในกระบวนการนำเข้าข้อมูลใหม่ใน CUPOM จึงนำข้อมูลความสูงคลื่นมาคำนวณหาผลเฉลยของ

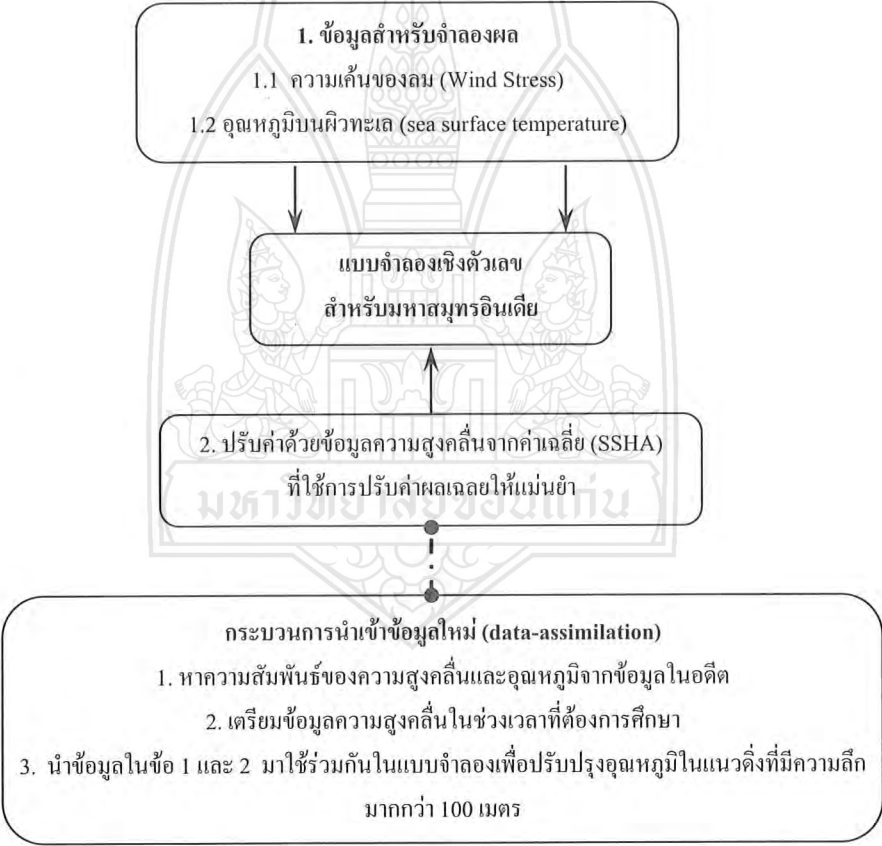
อุณหภูมิในแนวตั้ง โดยสร้างความสัมพันธ์ของข้อมูล ความสูงคลื่นจากดาวเทียมและข้อมูลอุณหภูมิในอดีต มาใช้ปรับปรุงอุณหภูมิในแนวตั้งในบริเวณที่มีความลึก มากกว่า 100 เมตร วิธีการนี้จะไม่กระทบต่ออุณหภูมิตื้นผิวน้ำทะเลเนื่องจากแบบจำลองมีข้อมูลอุณหภูมิตื้น

ผิวทะเลเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิในความลึกน้อยกว่า 100 เมตรอยู่แล้ว

การคำนวณในแบบจำลองจะรับข้อมูลนำเข้าใหม่ๆ ของลมและอุณหภูมิบนผิวทะเลเพื่อดำเนินการหาผลเฉลย จากนั้นจะนำข้อมูลความสูงที่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของคลื่น (sea surface height anomaly) มาใช้ในการปรับผลเฉลยในบริเวณที่มีความลึกมากกว่า 100 เมตร ซึ่งผลที่ได้จากแบบจำลองโดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิตั้งแต่ผิวทะเลจนถึงความลึกกว่า 200 เมตร มีค่าแม่นยำมากยิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการสำรวจ กระบวนการเหล่านี้สามารถสรุปได้ดัง

แผนภาพที่ 2

การจำลองตามโครงสร้างข้างต้นทำให้สามารถใช้ผลจากการจำลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงร่วมกันบนผิวทะเลบริเวณมหาสมุทรอินเดียและอ่าวไทยที่เกิดขึ้นระหว่างปี ค.ศ. 1993-2005 (Rojrsiraphisal et al., 2009a) และเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของกระแสน้ำที่ตำแหน่ง 90 °E บนเส้นศูนย์สูตร (Rojrsiraphisal et al., 2009b) รวมถึงศึกษาการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในทะเลบริเวณมหาสมุทรอินเดีย (Rojrsiraphisal and Kantha, 2009) ในหัวข้อต่อไปจะนำเสนอผลที่ได้จากแบบจำลอง



แผนภาพที่ 2 โครงสร้างของแบบจำลองกระบวนการนำเข้าข้อมูลใหม่ใน CUPOM สำหรับประยุกต์ในมหาสมุทรอินเดีย

ผลเฉลยของแบบจำลอง

กระบวนการเชิงตัวเลขที่ใช้หาผลเฉลยของสมการปริมาตรที่ประกอบไปด้วย 7 สมการ และ 7 ตัวแปรนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ผู้เขียนและคณะได้เขียนโปรแกรมด้วยฟอร์แทรน 77 (FORTRAN 77) โดยใช้วิธีผลต่างอันดับ (finite difference method) เพื่อหาผลเฉลยนี้โดยสามารถดูเพิ่มเติมได้ใน Rojsiraphisal (2007) ส่วนการแสดงผลส่วนใหญ่ใช้โปรแกรม Generic Mapping Tools (GMT) แต่อย่างไรก็ตามการนำแบบจำลองมาใช้ประโยชน์มักมีคำถามเกิดขึ้นเสมอว่า ผลเฉลยของแบบจำลองนั้นมีความถูกต้องแม่นยำมากเพียงใด ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการเปรียบเทียบผลของการจำลองกับข้อมูลจริง หรือเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองอื่น Lopez และ Kantha (2000b) ได้เปรียบเทียบผลเฉลยระหว่างแบบจำลองซึ่งถูกประยุกต์ในมหาสมุทรอินเดียระหว่าง มิและไม่มีกรนำเข้าข้อมูลใหม่ พบว่าผลของแบบจำลองทั้งสองประเภทสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงสำคัญที่เกิดขึ้นในมหาสมุทรอินเดียได้ในเวลาต่างๆ ได้ แต่ผลจากแบบจำลองที่มีการนำเข้าข้อมูลใหม่ สามารถแสดงทิศทางและขอบเขตการไหลของกระแสน้ำในแนวเส้นศูนย์สูตร ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่มีการเก็บในแนวดังกล่าวได้ดีกว่า และสามารถแสดงลักษณะเด่นที่เกิดขึ้นเฉพาะในบริเวณใกล้กับเกาะลากาดีฟ ที่เรียกว่า Laccadive High/Low ซึ่งเกิดจากค่าเฉลี่ยของความสูงคลื่นบริเวณใกล้เกาะลากาดีฟมีค่าสูงหรือต่ำกว่าบริเวณอื่น ๆ อย่างเด่นชัด รวมทั้งสามารถแสดงตำแหน่งที่เกิดขึ้นของกระแสน้ำวนขนาดใหญ่ (great whirl) และลักษณะเหมือนอ่างน้ำวนในบริเวณใกล้เกาะโซโคตรา (Socotra Gyre) ในบริเวณปลายแหลมโซมาเลีย แต่ผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองที่มีการนำเข้าข้อมูลใหม่จะแสดงตำแหน่งและเวลาที่เกิดขึ้นได้แม่นยำและชัดเจนกว่าแบบจำลองที่ไม่มีการนำเข้าข้อมูลใหม่อย่างเห็นได้ชัด

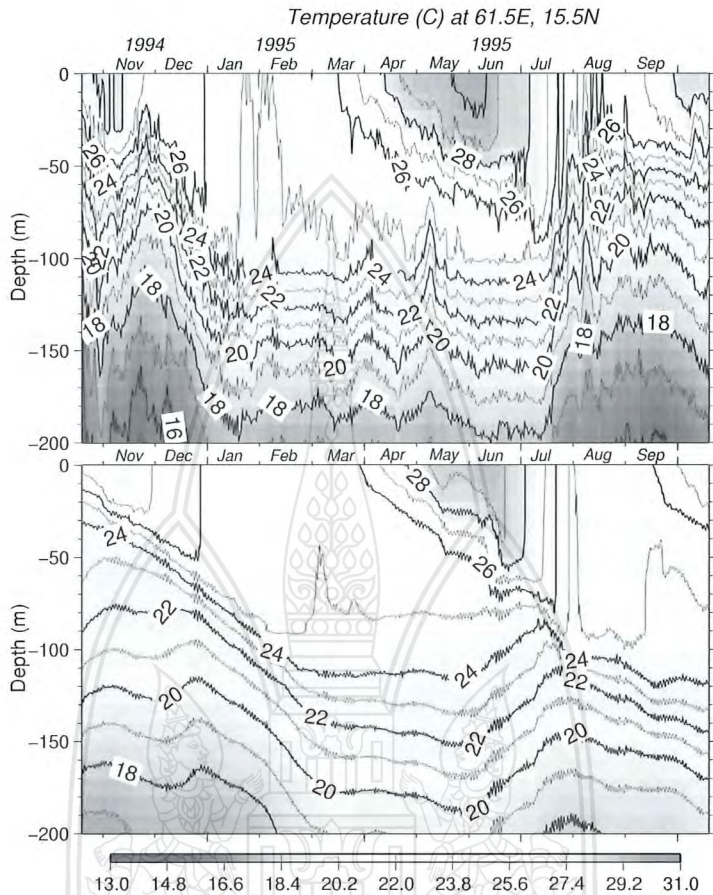
Brown และคณะ (2008) ได้นำข้อมูลกระแสน้ำที่ได้จากแบบจำลองที่มีการนำเข้าข้อมูลใหม่ไปศึกษา

ผลกระทบของกระแสน้ำในแนวเส้นศูนย์สูตรในขณะที่ยอดหลุมบิบนควินาในมหาสมุทรอินเดียมีลักษณะที่เหมือนแบ่งเป็นสองขั้ว (Indian Ocean Dipole - IOD) และพบว่ากระแสน้ำในบริเวณนี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับในปีที่ไม่มีเหตุการณ์นี้เกิดขึ้น

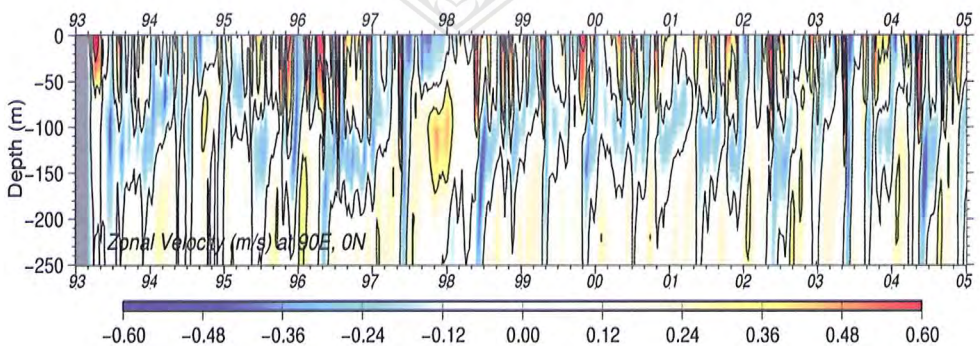
Kantha และคณะ (2008) ได้นำผลเฉลยแบบจำลองที่มีการนำเข้าข้อมูลใหม่ในบริเวณมหาสมุทรอินเดียไปเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิพื้นผิวน้ำทะเลในแนวลึกกับอุณหภูมิที่ถูกระบุจากการสำรวจพบว่าอุณหภูมิในแนวลึกให้ค่าที่ค่อนข้างแม่นยำทั้งในระดับตั้งแต่พื้นผิวทะเลจนถึงความลึกประมาณ 200 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งแสดงอนุกรมเวลาของอุณหภูมิในระดับความลึกที่ถูกระบุจากการวางทุ่นสำรวจ (บน) และจากแบบจำลองที่มีการนำเข้าข้อมูลใหม่ (ล่าง) ณ พิกัด 61.5°E 15.5°N ระหว่าง ค.ศ. 1994 ถึง ค.ศ. 1995 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิในความลึกที่ระดับต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการวางทุ่น รวมทั้งยังสามารถแสดงช่วงเวลาที่ยอดหลุมบิบนควินาอุณหภูมิสูงได้ถูกต้อง แต่ข้อมูลที่ี้ได้จากแบบจำลองเป็นข้อมูลที่ประกอบไปด้วยตำแหน่งและเวลา (3 มิติ) จึงต้องใช้เนื้อที่และเวลาในการบันทึกข้อมูลมาก ดังนั้นในการจำลองผลเฉลยนี้จึงบันทึกข้อมูล 3 มิติได้เพียงวันละ 1 ครั้งเท่านั้น ทำให้ได้รายละเอียดของอุณหภูมิจากแบบจำลองน้อยกว่าค่าจากการวางทุ่น

Rojsiraphisal และคณะ (2009b) ได้เปรียบเทียบกระแสน้ำที่พิกัด 90°E บนเส้นศูนย์สูตรกับข้อมูลจากเครื่องตรวจความเร็วและทิศทางกระแสน้ำด้วยคลื่นเสียง (Acoustic Doppler Current Profiler หรือ ADCP) พบว่ากระแสน้ำในตำแหน่งนี้มีค่าสลับพัทธ์ระหว่าง 0.61-0.84 ที่ความลึก 200 150 100 และ 50 เมตร ซึ่งแสดงว่ากระแสน้ำที่ความลึกต่างๆ มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่เก็บจริงค่อนข้างดี นอกจากนี้ยังพบการเปลี่ยนแปลงของกระแสน้ำที่พิกัดนี้ในขณะที่มีสภาวะไม่ปกติที่เสมือนเกิดสองขั้ว หรือที่เรียกว่า dipole-like ในมหาสมุทรอินเดีย โดยจะพบชัดเจนในปี ค.ศ. 1997-98 จะเห็นว่ากระแสน้ำที่ไหลในทิศทาง

ตะวันออก-ตก (zonal current) ที่ระดับความลึกระหว่าง 100-200 เมตร มีทิศทางการไหลตรงกันข้ามกับ ในรูปที่ 2



รูปที่ 1 เปรียบเทียบอนุกรมเวลาของอุณหภูมิ ณ พิกัด 61.5°E 15.5°N ระหว่าง ค.ศ. 1994 - ค.ศ. 1995 เก็บจากการวางทุ่นสำรวจ (บน) และจากแบบจำลองที่มีการนำข้อมูลใหม่ (ล่าง)



รูปที่ 2 อนุกรมเวลาของกระแสในทิศทางตะวันออก-ตก ณ พิกัด 90°E บนเส้นศูนย์สูตร

Rojsiraphisal และ Kantha (2009) ได้นำแบบจำลองชนิดเดียวกันนี้ไปศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในมหาสมุทรอินเดียที่ถ่ายเทผ่านเข้าออกเส้นศูนย์สูตร แต่เพราะว่าไม่สามารถเปรียบเทียบผลที่ได้กับข้อมูลที่เก็บจริง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องเปรียบเทียบผลการถ่ายเทกับแบบจำลองอื่นๆ ซึ่งพบว่าผลที่ได้สอดคล้องกัน และโดยรวมมีการถ่ายเทความร้อนออกจากมหาสมุทรอินเดียตอนบนผ่านเส้นศูนย์สูตรทั้งนี้อาจเป็นเพราะมหาสมุทรอินเดียเป็นมหาสมุทรแห่งเดียวบนโลกที่ไม่มีเส้นทางติดต่อกับขั้วโลกเหนือ จึงไม่สามารถถ่ายเทความร้อนจากเขตศูนย์สูตรไปยังขั้วโลกเหนือได้เหมือนมหาสมุทรอื่น

ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

การเก็บข้อมูลของสมบัติต่างๆ ทั้งบนผิวทะเลและใต้ทะเลให้ครอบคลุมพื้นที่บริเวณกว้างเป็นไปได้ยาก และต้องเสียค่าใช้จ่ายมาก การนำแบบจำลองเชิงตัวเลขมาใช้จึงเป็นเครื่องมือสำคัญในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของมหาสมุทร แบบจำลองเชิงตัวเลขทางทะเลมีหลากหลายและถูกออกแบบเพื่อใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางทะเลเฉพาะด้าน เช่น การสร้างฐานข้อมูลทางทะเลซึ่งไม่สามารถเก็บได้จากการเก็บข้อมูลจริงเพื่อศึกษาผลกระทบจากสภาวะโลกร้อน การพยากรณ์เพื่อใช้ในการช่วยเหลือนาวประมงและผู้ประมงทางทะเล การจำลองเหตุการณ์สึนามิเพื่อเตือนภัย เป็นต้น

ในช่วงเวลาที่ไม่มีการเก็บข้อมูลในอดีต เช่น ในช่วงปี ค.ศ. 1993-1994 และ 1997-1998 ที่มหาสมุทรอินเดียมีอุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อเทียบกับอุณหภูมิในปีก่อนๆ และในช่วงเวลาดังกล่าวมีการเก็บข้อมูลทางทะเลน้อยมาก ทำให้ไม่สามารถเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาดังกล่าว เราจึงนำแบบจำลอง CUPOM ที่มีกรนำเข้าข้อมูลใหม่นี้มาใช้จำลองผลเฉลย เพื่อให้เข้าใจการเปลี่ยนแปลงในมหาสมุทรในช่วงเวลาที่ผ่านมามาทำให้เข้าใจปัญหาสภาวะโลกร้อนได้ดียิ่งขึ้น

Indian National Centre for Ocean Information Services (INCOIS) ซึ่งเป็นองค์กรแห่งชาติของประเทศอินเดียที่ก่อตั้งขึ้นเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางทะเล ได้นำแบบจำลองชนิดนี้ไปพัฒนาต่อยอดเพื่อพยากรณ์การไหลวนของกระแสน้ำในมหาสมุทรอินเดีย และใช้เป็นข้อมูลให้ศูนย์ช่วยเหลือและเตือนภัยสำหรับชาวประมงรอบชายฝั่งมหาสมุทรอินเดีย โดยหวังว่าแบบจำลองนี้จะมีประโยชน์ต่อประชากรจำนวนมากที่ทำการประมงอยู่รอบชายฝั่งในบริเวณเอเชียใต้

แบบจำลองนี้จะมีประโยชน์หลายด้าน แต่ยังคงพัฒนาให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น เช่น การปรับปรุงผลเฉลยด้านความเค็ม ซึ่งต้องการข้อมูลความเค็ม รวมทั้งปริมาณน้ำที่ปล่อยลงสู่มหาสมุทร แต่ไม่มีการเก็บข้อมูลเหล่านี้อย่างสม่ำเสมอ ทำให้ไม่สามารถใช้เป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองได้ และหากต้องการนำแบบจำลองเหล่านี้มาใช้ในการเตือนภัย ความสามารถของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผลต้องมีความเร็วสูงรวมทั้งมีเนื้อที่ในการบันทึกข้อมูลมาก เพราะข้อมูลในมหาสมุทรเป็นข้อมูลที่มีทั้งตำแหน่งและเวลาจะต้องใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างมาก

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ จารุวรรณ สิงห์ม่วง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ สหัทธรา รัตนะมงคลกุล ที่ช่วยให้คำแนะนำในการเขียนและช่วยปรับปรุงแก้ไขบทความให้ดีขึ้นรวมทั้งผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะเพื่อให้บทความนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Blumberg, A. F. and Mellor, G. L. (1985). A simulation of the circulation in the Gulf of Mexico. *Israel J. Earth Sci.* 34: 122-144.
- Brown, J., Clayson, C. A., Kantha, L. and Rojsiraphisal, T. (2008). North Indian Ocean variability during the Indian Ocean dipole. *Ocean Sci. Discuss.* 5: 213-253.

- Bryan, K. and Cox, M. D. (1968). A nonlinear model of an ocean driven by wind and differential heating. Parts I and II. *J. Atmos. Sci.* 25: 945-978.
- Carnes, M. R., Mitchell, J. L. and de Witt, P. W. (1990). Synthetic temperature profiles derived from Geosat altimetry: Comparisons with air-dropped expendable bathythermograph profiles. *J. Geophys. Res.* 95: 17979-17992.
- Choi, J. K., Kantha, L. H. and Leben, R. R. (1995). A nowcast/forecast experiment using TOPEX/POSEIDON and ERS-1 altimetric data-assimilation into a three-dimensional circulation model of the Gulf of Mexico. IUGG, XXI General Assembly. Colorado, Boulder.
- Ezer, T. and Mellor, G. L. (2000). Sensitivity studies with the North Atlantic Princeton Ocean Model. *Dyn. Atmos. Ocean.* 32: 185-208.
- Ezer, T. and Mellor, G. L. (1994). Continuous assimilation of Geosat altimeter data into a three-dimensional primitive equation Gulf Stream model. *J. Phys. Oceanogr.* 24: 832-847.
- Hakkinen, S., Mellor, G. L., and Kantha, L. H. (1992). Modeling deep convection in the Greenland Sea. *J. Geophys. Res.* 97(C4): 5389-5408.
- Kantha, L. H. and Clayson, C. A. (2000). *Numerical Models of Oceans and Oceanic Processes*, San Diego : Academic Press. p. 940.
- Kantha, L. H., Rojsiraphisal, T. and Lopez, J. (2008). The North Indian Ocean circulation and its variability as seen in a numerical hindcast of the years 1993 to 2004. *Progr. Oceanogr.* 76(1): 111-147.
- Lopez, J. W. (1998). A study of physical processes of the Northern Indian Ocean using a comprehensive primitive equation numerical model, Ph.D. dissertation, Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado, Boulder, CO. p. 144.
- Lopez, J. W. and Kantha, L. H. (2000a). Results from a numerical model of the Northern Indian Ocean: Circulation in the South Arabian Sea, *J. Mar. Syst.* 24: 97-117.
- Lopez, J. W. and Kantha, L. H. (2000b). A data-assimilative model of the North Indian Ocean, *J. Atmos. Oceanic Technol.* 17: 1525-1540.
- Mellor, G. L. (1992). User's guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model, Program in Atmospheric and Oceanic Sciences Rep. Princeton University. p. 35.
- Rojsiraphisal, T. (2007). A study of variability in the North Indian Ocean, Dissertation, Applied Mathematics, University of Colorado, Boulder, CO. p. 153.
- Rojsiraphisal, T., Rajagopalan, B. and Kantha, L. (2009a). The use of MTM-SVD technique to explore the joint spatiotemporal modes of wind and sea surface variability in the North Indian Ocean during 1993-2005, *Int. J. Oceanogr.* 2009: Article ID 214828, 11 pages.
- Rojsiraphisal, T., Kantha, L. and Masumoto, Y. (2009b). Variability of currents at 90 degrees east in the Equatorial Indian Ocean. to appear in *Atlantic and Indian Oceans: New Oceanographic Research*, Nova Publishers.
- Rojsiraphisal, T. and Kantha, L. (2009). Meridional heat fluxes in the North Indian Ocean. to appear in *Atlantic and Indian Oceans: New Oceanographic Research*, Nova Publishers.
- Smith, S. D. (1980). Wind stress and heat flux over the ocean in gale force winds. *J. Phys. Oceanogr.* 10: 709-726.



ความคงตัวของเอนไซม์เซลลูเลสจากจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1 เพื่อการประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรม

The Stability of Cellulase Produced by Compost Microorganisms for Industrial Application

รุสนี โตะเกิ้ล¹ ชันวดี เตชะภัทรรกุล สุขสาโรจน์^{1,2*} และเบญจมาศ เขียวศิลป์³

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสโดยจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1 และการประยุกต์ใช้เอนไซม์ที่ผลิตได้ในเชิงอุตสาหกรรม โดยทำการศึกษการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสโดยใช้ขานอ้อย และเปลือกถั่วลิสงที่ปรับสภาพด้วยด่างเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่า ขานอ้อยสามารถใช้เป็นแหล่งคาร์บอนทดแทนผงเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้เป็นอย่างดี แต่การใช้เปลือกถั่วลิสงเป็นแหล่งคาร์บอนให้ค่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลส และ specific activity ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อนำสารละลายเอนไซม์ที่ผลิตได้มาทดสอบความคงตัวในสภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับเอนไซม์เซลลูเลสบริสุทธิ์จาก *Aspergillus niger* ATCC 6275 พบว่า เอนไซม์เซลลูเลสจากจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1 มีความคงตัวสูงในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 70 องศาเซลเซียส (°C) มีความคงตัวในช่วงพีเอชเป็นกรด (3-6) และมีความคงตัวต่ออุณหภูมิในสารละลายผงซักฟอกที่อุณหภูมิ 30°C เช่นเดียวกับเอนไซม์บริสุทธิ์ทางการค้า นอกจากนี้ เอนไซม์เซลลูเลสจากจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1 และเอนไซม์บริสุทธิ์ยังมีความเหมาะสมในการย่อยเส้นใยฝ้าย ทำให้ผ้าฝ้ายมีน้ำหนักลดลง 0.002 กรัม/หน่วยเอนไซม์ และผ้ามีความเรียบมากขึ้นเช่นเดียวกัน

Abstract

The objective of this research is to study the properties of cellulase in crude enzyme produced by compost microorganisms (PD.1) and the possibility for its industrial application. In this study, bagasse and peanut hulls treated with NaOH was used as carbon source which the bagasse showed effectively pure

¹ คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

² ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย ศูนย์เครือข่ายมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

³ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

* Corresponding Author, E-mail: thunwadee.t@psu.ac.th

cellulose. The use of peanut hulls yielded significantly lower cellulase activity and specific activity than that of bagasse and pure cellulose. The obtained crude enzymes were investigated their stability in variable conditions and compared the result with the commercial cellulase from *Aspergillus niger* ATCC 6275. It was found that cellulase in crude enzyme from PD.1 was stable at temperature lower than 70 °C, in acidic condition (pH 3-6) and in detergent solution at 30 °C as found in commercial enzyme. They were also examined for their cotton digest stabilities, the crude enzyme from PD.1 could reduce cotton by 0.002 g/unit enzyme that was not different from the ability of commercial cellulase.

บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ในแต่ละปีนอกจากผลผลิตทางการเกษตรที่ผลิตได้ปริมาณมากแล้ว ยังมีวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในปริมาณมากเช่นกัน ไม่ว่าจะเป็น ฟางข้าว ชานอ้อย และเปลือกถั่วลิสง เป็นต้น (จุฑารัตน์ พงษ์นิริ และธีรพร กงบังเกิด, 2548) ที่ผ่านมามีการนำวัสดุเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ เช่น ทำปุ๋ยหมัก อาหารสัตว์ หรือเป็นเชื้อเพลิง และเมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร พบว่า วัสดุเหล่านี้มีองค์ประกอบของเซลลูโลส ซึ่งสามารถนำไปเป็นแหล่งคาร์บอนในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลส โดยคุณสมบัติของเซลลูโลสสามารถถูกย่อยหรือแตกพันธะเพื่อนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อื่น เช่น แอลกอฮอล์ เป็นต้น การย่อยสลายเซลลูโลสอย่างสมบูรณ์เพื่อให้ได้น้ำตาลกลูโคส ต้องอาศัยเอนไซม์เซลลูเลสในการย่อยสลาย และปัจจุบันเอนไซม์ชนิดนี้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท แต่ปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมที่ต้องใช้เอนไซม์เซลลูเลสในกระบวนการผลิต เช่น อุตสาหกรรมการผลิตกระดาษหรือแอลกอฮอล์ ได้แก่ เอนไซม์ทั้งจากจุลินทรีย์ที่ผลิตได้เองและนำเข้าจากต่างประเทศมีต้นทุนสูง จึงได้มีการหาแนวทางในการลดต้นทุนการผลิตเอนไซม์เซลลูเลส โดยใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรราคาถูกละมาเป็นแหล่งคาร์บอน (พรยา ภูณะพยัคฆ์ และ เนริสา คุณประทุม, 2546) และอาศัยจุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรียเชิรราหรือกลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสมาย่อยสลายวัสดุทางการเกษตร ดังนั้น การคัดเลือกกลุ่มจุลินทรีย์ที่ผลิต

เอนไซม์เซลลูเลสได้สูง ก็เท่ากับเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร สำหรับประเทศไทยมีการหมักปุ๋ยจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เพื่อใช้ประโยชน์ในการเกษตรอย่างแพร่หลาย ทางกรมพัฒนาที่ดินจึงได้วิจัยเพื่อผลิตสารเร่งสำหรับทำปุ๋ยหมักทำให้กระบวนการย่อยสลายพืชให้เป็นปุ๋ยหมักรวดเร็วยิ่งขึ้น และได้ปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพดีและปลอดภัย ผลิตภัณฑ์ที่ทางกรมพัฒนาที่ดินผลิตขึ้นนี้ คือ สารเร่ง พด.1 สารเร่งชนิดนี้ประกอบด้วยจุลินทรีย์หลายสายพันธุ์ อยู่ในสภาพแห้ง สะดวกแก่การนำไปใช้และการเก็บรักษา มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้สูง และเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว (กรมพัฒนาที่ดิน, 2549) จึงสามารถนำไปเป็นหัวเชื้อในการหมักเพื่อย่อยสลายวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรได้เป็นอย่างดี จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะศึกษาเพิ่มเติมถึงประสิทธิภาพของจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1 ในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และการประยุกต์ใช้เอนไซม์ที่ผลิตได้ในเชิงอุตสาหกรรม

งานวิจัยนี้จึงเน้นศึกษาถึงคุณสมบัติของจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1 ในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลส โดยใช้ชานอ้อย และเปลือกถั่วลิสงเป็นแหล่งคาร์บอน และศึกษาคุณสมบัติเพื่อการประยุกต์ใช้เอนไซม์ในเชิงอุตสาหกรรม ผลที่ได้จากการศึกษาอาจเป็นแนวทางเลือก ในการจัดการวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และเพิ่มคุณประโยชน์ของสารเร่ง พด.1 เพื่อเป็นทางเลือกในการลดต้นทุนแก่อุตสาหกรรมผู้ใช้ประโยชน์จากเอนไซม์เซลลูเลสต่อไป

วิธีดำเนินการ

การเตรียมวัตถุดิบ

ขานอ้อยที่ใช้ในการทดลองได้รับความอนุเคราะห์จากโรงหีบอ้อย ในเขตอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ซึ่งผ่านการรีดน้ำอ้อยออกจนหมด ส่วนเปลือกถั่วลิสงดิบได้รับความอนุเคราะห์จากแม่ค้าตลาดคลองเรียน เขตอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา นำขานอ้อยและเปลือกถั่วลิสงมาตัดให้ได้ขนาดยาว 1 นิ้ว จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกจากขานอ้อยและเปลือกถั่วลิสง นำขานอ้อยและเปลือกถั่วลิสงที่ผ่านการอบมาบดให้มีขนาดเล็กลง ด้วยเครื่องบดอาหาร แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 40 mesh เพื่อให้ได้ขนาดต่ำกว่า 0.5 มิลลิเมตร นำวัตถุดิบแต่ละชนิดไปแช่ในสารละลาย 1% NaOH (w/v) ในสัดส่วน 10 ต่อ 1 (สารละลาย : สับสตรพ) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (Solomon et al., 1999) ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นกรองแยกสารละลายออกแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งสารละลายที่ชะออกมามีสภาพเป็นกลาง (pH 7) นำตัวอย่างมาวิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน โดยวิธีของแวนซูท (พูนสุข ประเสริฐสรรพ และ อัครวิทย์ กาญจนโอภาส, 2532) ก่อนนำไปทดลอง ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ได้นำเซลลูโลสบริสุทธิ์ (Merck) มาทำการทดสอบโดยการเปรียบเทียบกับขานอ้อย และเปลือกถั่วลิสงที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว

การเตรียมและตรวจนับสารละลายจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1

จุลินทรีย์สารเร่ง พด.1 ที่ใช้ในการทดลองได้รับความอนุเคราะห์จากสำนักงานพัฒนาที่ดิน เขต 12 กรมพัฒนาที่ดิน จังหวัดสงขลา กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ โดยนำจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1 มาละลายน้ำกลั่นที่ผ่านการฆ่าเชื้อในสัดส่วน 100 กรัมต่อน้ำ 20 ลิตร ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที แล้วตรวจนับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์สารเร่งพด. 1 ด้วยวิธี Dilution plate count สำหรับการนับจำนวนเชื้อแบคทีเรียใช้ Plate count agar (PCA) เชื้อราใช้ Potato dextrose agar

(PDA) และแอกติโนมัยซีสใช้ Yeast extract agar (YEA)

การศึกษาการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสโดยจุลินทรีย์สารเร่ง พด. 1 เมื่อใช้แหล่งคาร์บอนแตกต่างกัน

ชุดที่หนึ่งใช้ Standard cellulose medium (จิตรลดา กาญจนสาวิตรี และ ชญานุศม์ ศรีพิทักษ์, 2547) เป็นอาหารเลี้ยงเชื้อ ชุดที่สองใช้ อาหารเลี้ยงเชื้อเหมือนชุดที่ 1 แต่เปลี่ยนแหล่งคาร์บอน จากผงเซลลูโลส 10 กรัม เป็นขานอ้อย 10 กรัม และชุดที่สาม ใช้อาหารเลี้ยงเชื้อเช่นเดียวกับชุดที่ 1 แต่เปลี่ยนแหล่งคาร์บอนเป็นเปลือกถั่วลิสง 10 กรัม แล้วนำสารละลายจุลินทรีย์สารเร่งพด. 1 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ไปเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อปริมาตร 100 มิลลิลิตรที่ปรับพีเอช 4 ด้วย Sodium citrate buffer ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ซึ่งผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121°C ความดัน 15 ปอนด์/ตร.นิ้ว เป็นเวลา 20 นาที แล้วนำไปบ่มในเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบ/นาที อุณหภูมิ 45°C เป็นเวลา 10 วัน ทุก 1 วัน จะนำตัวอย่างมาทำการทดสอบค่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสตามวิธีการของ Mandels และ Weber (1969) วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลที่เกิดขึ้น ตามวิธี DNS Method (Miller, 1959) ตรวจวัดปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ (Lowry et al., 1951) และคำนวณหาค่า specific activity

การศึกษาคุณสมบัติของเอนไซม์เซลลูเลสที่ผลิตจากจุลินทรีย์ในสารเร่ง พด.1

1. ความคงตัวของเอนไซม์เซลลูเลสที่อุณหภูมิต่างๆ (thermal stability)

นำสารละลายเอนไซม์ที่มีค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสสูงสุด 0.5 มิลลิลิตร ที่พีเอช 4.8 มาบ่มที่อุณหภูมิ 50 60 70 80 90 100°C วัดค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสที่เหลืออยู่เมื่อเวลาผ่านไป 30 60 90 นาที

2. ความคงตัวของเอนไซม์เซลลูเลสที่พีเอชต่างๆ (pH stability)

นำสารละลายเอนไซม์ที่มีค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสสูงสุด 0.5 มิลลิลิตร มาผสมกับ sodium citrate buffer (pH 3-6) sodium citrate-phosphate buffer (pH 7-9) tris-HCl buffer (pH 9) และ glycine-NaOH (pH 10) มาบ่มที่อุณหภูมิ 50 °C วัดค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสที่เหลืออยู่เมื่อเวลาผ่านไป 30 60 และ 90 นาที

3. ความคงตัวของอุณหภูมิของเอนไซม์เซลลูเลสในสารละลายผงซักฟอก

นำผงซักฟอกที่มีขายตามท้องตลาด (3 ยี่ห้อ) โดยพิจารณาจากส่วนประกอบที่ต่างกันซึ่งได้ระบุไว้ข้างบรรจุภัณฑ์ มาละลายน้ำ (ตามกรรมวิธีข้างกล่อง) ด้วยน้ำกลั่นที่ต้มเดือด เป็นเวลา 60 นาที (Lima et al., 2005) เพื่อทำลายเอนไซม์ที่มีอยู่ให้เหลือน้อยที่สุดปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง วัดค่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสที่เหลืออยู่ในผงซักฟอก หลังจากนั้นเติมสารละลายเอนไซม์ลงไปในสารละลายผงซักฟอก ปริมาตร 1:1 (สารละลายเอนไซม์ปริมาตร 10 มิลลิลิตร : สารละลายผงซักฟอกปริมาตร 10 มิลลิลิตร) บ่มที่ 30 °C และ 50 °C วัดค่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสที่เหลืออยู่ เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที

4. การย่อยเส้นใยฝ้าย

นำผ้าฝ้าย น้ำหนัก 1.5 กรัม ขนาด 8 x 15 เซนติเมตร มาแช่ใน 40 มิลลิลิตร ของสารละลายเอนไซม์ ใน 0.1 M acetate buffer (pH 4.8) ทั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 วัน หลังจากนั้นนำผ้ามาล้างในน้ำ ริดให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนักของผ้าหลังการทดลอง ทำซ้ำจากข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนเป็นการทดสอบคุณสมบัติความคงตัวของเอนไซม์ เซลลูเลสจากเชื้อ *Aspergillus niger* ATCC 6275 ที่มีจำหน่ายทางการค้า (commercial enzyme) เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติความคงตัวของสารละลายเอนไซม์เซลลูเลสที่ผลิตจากจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1

ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเซลลูโลส เอมิเซลลูโลส และลิกนิน ของขานอ้อย และเปลือกถั่วลิสง

ก่อนปรับสภาพ ขานอ้อยมีปริมาณเซลลูโลส (35.19±1.29%) และลิกนิน (10.89±1.14%) น้อยกว่าเปลือกถั่วลิสงซึ่งมีปริมาณเซลลูโลสและลิกนินเป็นองค์ประกอบเท่ากับ 42.04±1.64% และ 15.88±0.92% ตามลำดับ แต่ขานอ้อยมีปริมาณเอมิเซลลูโลส (26.45±0.42%) มากกว่าที่ตรวจวิเคราะห์ได้ในเปลือกถั่วลิสง (17.10±0.48%) หลังการปรับสภาพด้วยสารละลายด่างพบว่า ทั้งขานอ้อย และเปลือกถั่วลิสง มีปริมาณเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบเพิ่มสูงขึ้น โดยปริมาณเซลลูโลสในขานอ้อย และเปลือกถั่วลิสงที่ผ่านการปรับสภาพมีค่าเท่ากับ 47.98±0.74% และ 44.29±2.14% ตามลำดับ

ผลการตรวจนับจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1

พบว่าแบคทีเรียมีจำนวนเชื้อ 6.2×10^8 CFU/g มีลักษณะโคโลนีแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลมแบนขอบเรียบ แต่ไม่มันวาว และกลมมนขอบเรียบมันวาว สีขาว และสีน้ำตาลอ่อน ส่วนเชื้อรา มีจำนวนเชื้อ 3.2×10^7 CFU/g มีลักษณะโคโลนีแบ่งได้เป็น 1 กลุ่ม คือ เส้นใยสีขาว และเชื้อแอคติโนมัยซีตมีจำนวนเชื้อ 6.2×10^8 CFU/g มีลักษณะโคโลนีแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ กลมแบนขอบเรียบแต่ไม่มันวาว กลมมนขอบเรียบมันวาว และเส้นใย มีสีขาว และสีน้ำตาลอ่อน

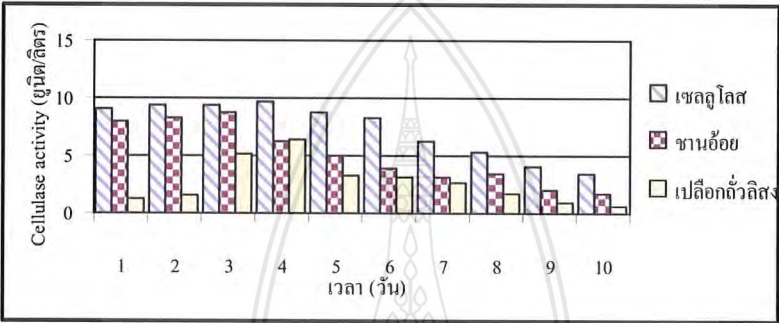
ผลการศึกษาการผลิตเอนไซม์ของจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1 จากแหล่งคาร์บอนแตกต่างกัน

1. ผลของกิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสจากแหล่งคาร์บอนแตกต่างกัน

เมื่อใช้ผงเซลลูโลสบริสุทธิ์เป็นแหล่งคาร์บอน สารละลายเอนไซม์ที่ได้มีค่าของกิจกรรมเอนไซม์ เซลลูเลสเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 9.7±0.5 ยูนิต/ลิตร ในวันที่ 4 ซึ่งสูงกว่าที่วิเคราะห์ได้ในสารละลายเอนไซม์เซลลูเลสจากการทดลองที่ใช้ขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพโดยให้ค่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 8.8±0.3 ยูนิต/ลิตร ในวันที่ 3 และเมื่อใช้เปลือก

ถั่วลิสงที่ผ่านการปรับสภาพพบว่ามีค่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 6.4 ± 0.3 ยูนิต/ลิตร ในวันที่ 4 (รูปที่ 1) เมื่อทดสอบทางสถิติ พบว่าเมื่อใช้ขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพเป็นแหล่งคาร์บอน สารละลายเอนไซม์มีค่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสในวันที่ 3 ไม่แตกต่างจากกิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสที่ได้จากชุด

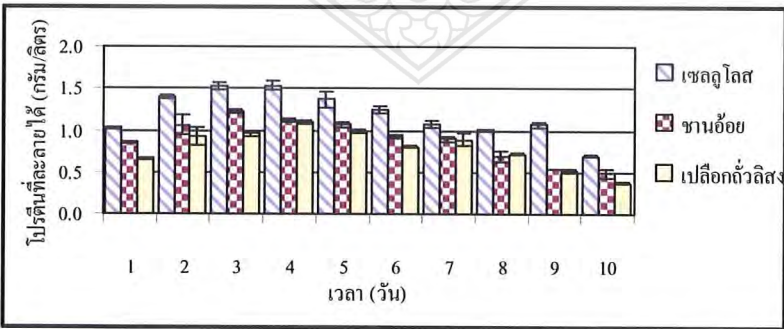
การทดลองที่ใช้เซลลูโลสบริสุทธิ์เป็นแหล่งคาร์บอน ในวันที่ 4 แต่สำหรับชุดการทดลองที่ใช้เปลือกถั่วลิสงที่ผ่านการปรับสภาพเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าสารละลายเอนไซม์ที่ได้จากจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1 ให้ค่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)



รูปที่ 1 กิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสที่ผลิตโดยจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1

2. ผลการวิเคราะห์โปรตีนที่ละลายได้
จากผลการวิเคราะห์โปรตีนที่ละลายได้ซึ่งเป็นปริมาณโปรตีนของเอนไซม์ที่จุลินทรีย์ปลดปล่อยออกมาในสารละลาย พบว่า จุลินทรีย์สารเร่ง พด.1 มีปริมาณโปรตีนที่ละลายได้เฉลี่ยสูงสุดในชุดการทดลองที่ใช้ผงเซลลูโลสเป็นแหล่งคาร์บอนเท่ากับ 1.5334 ± 0.0563 กรัม/ลิตร ในวันที่ 4 รองลงมา คือ ชุดการทดลองที่ใช้ขานอ้อยปรับสภาพเป็นแหล่งคาร์บอน โดยมี

ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้เฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 1.2176 ± 0.0190 กรัม/ลิตร ในวันที่ 3 แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ในชุดการทดลองที่ใช้เปลือกถั่วลิสงที่ปรับสภาพเป็นแหล่งคาร์บอนเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 1.0929 ± 0.0264 กรัม/ลิตร ในวันที่ 4 (รูปที่ 2) โดยให้ค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งให้ผลน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ผงเซลลูโลส และขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพเป็นแหล่งคาร์บอน

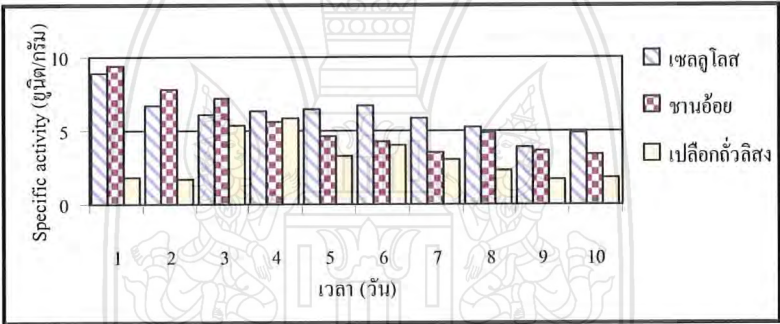


รูปที่ 2 โปรตีนที่ละลายได้ของจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1

3. ผลการวิเคราะห์หา Specific activity

เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หา specific activity ของเอนไซม์เซลลูเลส (รูปที่ 3) พบว่า สารละลายเอนไซม์ ให้ค่า specific activity ของเอนไซม์เซลลูเลสสูงสุดในชุดการทดลองที่ใช้ขานอ้อยปรับสภาพเป็นแหล่งคาร์บอนโดยมีค่าเท่ากับ 9.3666 ยูนิต/กรัม รองลงมา คือ ชุดการทดลองที่ใช้ผงเซลลูโลสเป็นแหล่งคาร์บอนซึ่งมีค่า specific activity ต่ำกว่าเล็กน้อยเท่ากับ 8.8651 ยูนิต/กรัม โดยพบว่าค่า specific activity ในชุดการทดลองที่ใช้ผงเซลลูโลสและขานอ้อยปรับสภาพเป็นแหล่งคาร์บอน ค่อยๆ ลดลงเมื่อใช้ระยะเวลาบ่มนาน แสดงให้เห็นว่าเอนไซม์เซลลูเลสมีความจำเพาะต่อสับสเตรททั้ง 2 ชนิด (ผงเซลลูโลส ขานอ้อย) สูงในช่วงแรก ทั้งนี้เนื่องจากผงเซลลูโลส และขานอ้อยภายหลังการปรับสภาพมีความละเอียด และอ่อนนุ่ม ทำให้

ง่ายต่อการสลายพันธะได้มากกว่า และยังสามารถบ่งบอกว่าเอนไซม์มีความบริสุทธิ์กว่าชุดการทดลองที่ใช้เปลือกถั่วลิสงเป็นแหล่งคาร์บอน ส่วนชุดการทดลองที่ใช้เปลือกถั่วลิสงที่ปรับสภาพเป็นแหล่งคาร์บอนให้ค่า specific activity ต่ำกว่า 2 ชุดการทดลองดังกล่าว เท่ากับ 1.7212-5.8559 ยูนิต/กรัม ซึ่งพบว่าค่า specific activity ในชุดการทดลองที่ใช้เปลือกถั่วลิสงที่ปรับสภาพเป็นแหล่งคาร์บอนค่อยๆ เพิ่มขึ้น และลดลงหลังจากวันที่ 4 แสดงให้เห็นว่า เอนไซม์เซลลูเลสมีความจำเพาะต่อสับสเตรทน้อยในช่วงแรกทั้งนี้เนื่องจากเปลือกถั่วลิสงที่ใช้มีความแข็ง และมีสีน้ำตาลเข้ม แสดงว่าลักษณะโครงสร้างของเปลือกถั่วลิสงมีความแข็งแรง ยากต่อการสลายพันธะได้มากกว่าและยังบ่งบอกเอนไซม์มีความบริสุทธิ์น้อยกว่าทำให้ specific activity ที่ได้น้อยนั่นเอง



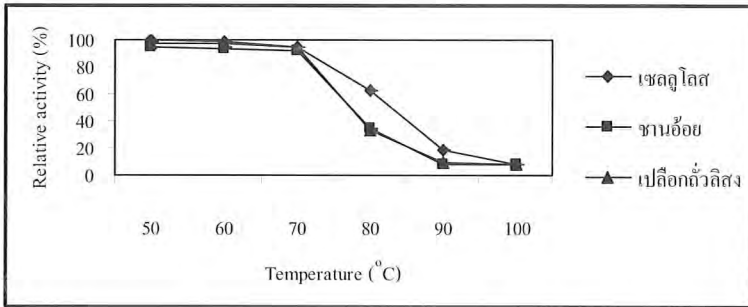
รูปที่ 3 Specific activity ของเอนไซม์เซลลูเลสของจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1

ผลการศึกษาคุณสมบัติของเอนไซม์เซลลูเลสที่ผลิตจากจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1

1. ผลความคงตัวของเอนไซม์เซลลูเลสที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการทดสอบความคงตัวของกิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสเมื่อใช้แหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิดที่อุณหภูมิต่างๆ ผลิตโดยเชื้อจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1 นำสารละลายเอนไซม์ที่มีค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสสูงสุด ที่พีเอช 4.8 มาบ่มที่อุณหภูมิ 50-100 °C และวัดค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสที่เหลืออยู่เมื่อเวลา

ผ่านไป 30 60 และ 90 นาที พบว่าเอนไซม์เซลลูเลสทั้ง 3 ชนิด ยังคงมีความคงตัวสูงในช่วง อุณหภูมิ 50-70 °C เวลาบ่ม 30 นาที (รูปที่ 4) แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงกว่า 70 °C ความคงตัวของเอนไซม์จะลดลงอย่างรวดเร็ว เช่นเดียวกับการทดสอบความคงตัวของเอนไซม์เซลลูเลสทางการค้า ที่อุณหภูมิและเวลาบ่มเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อใช้เวลาในการบ่มเพิ่มเป็น 60 และ 90 นาที ค่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสทั้ง 3 ชนิด และค่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสทางการค้าลดลงอย่างรวดเร็ว ในทุกอุณหภูมิของช่วง 50-100 °C

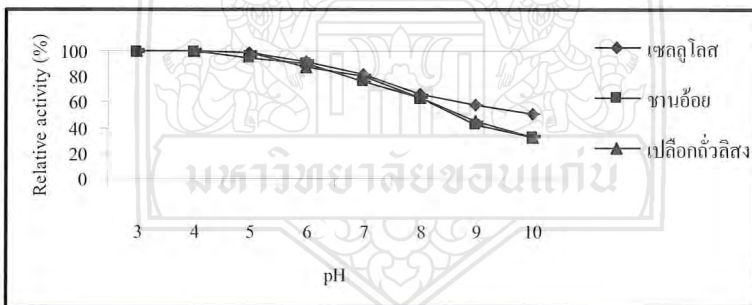


รูปที่ 4 ผลของอุณหภูมิต่อความคงตัวของเอนไซม์เซลลูเลสที่ผลิตโดยจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1 เมื่อใช้เวลาบ่ม 30 นาที

2. ผลความคงตัวของเอนไซม์เซลลูเลสที่พีเอชต่างๆ

จากการทดสอบความคงตัวของกิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสเมื่อใช้แหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิดที่ pH ต่างๆ (pH 3-10) ผลิตโดยเชื้อจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1 นำสารละลายเอนไซม์ที่มีค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสสูงสุด ควบคุมอุณหภูมิที่ 50 °C และวัดค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสที่เหลืออยู่เมื่อเวลาผ่านไป 30 60 90 นาที พบว่าสารละลายเอนไซม์เซลลูเลสทั้ง 3 ชนิด มีความคงตัวสูงในช่วง pH ที่เป็นกรด (3-5)

เวลาบ่ม 30 นาที (รูปที่ 5) แต่เมื่อบ่มเอนไซม์ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH สูงกว่า 7 ความคงตัวของเอนไซม์จะลดลงอย่างรวดเร็ว เช่นเดียวกับทดสอบความคงตัวของเอนไซม์เซลลูเลสทางการค้า พบว่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสทางการค้ามีความคงตัวที่ pH เป็นกรด (pH 3-5) เมื่อใช้เวลาบ่ม 30 นาที แต่ขณะที่ค่า pH เพิ่มขึ้นสูงกว่าพีเอช 6 ความคงตัวของกิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อเพิ่มเวลาในการบ่มเป็น 60 และ 90 นาที กิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสลดลงอย่างรวดเร็วในทุกค่า pH ของช่วง 3-10

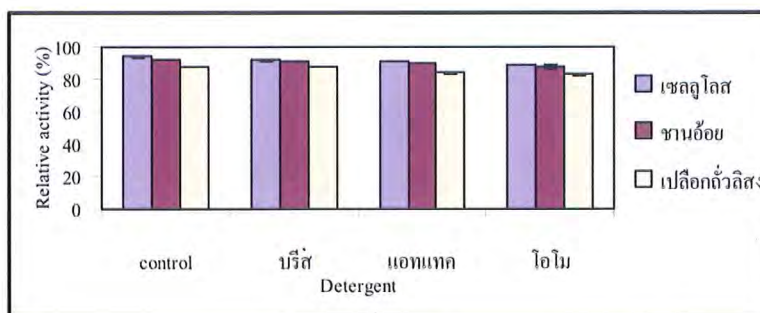


รูปที่ 5 ผลของพีเอชต่อความคงตัวของเอนไซม์เซลลูเลสที่ผลิตโดยจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1 เมื่อใช้เวลาบ่ม 30 นาที

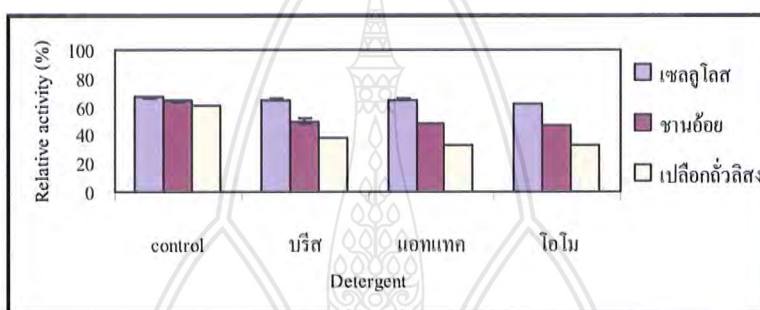
3. ผลความคงตัวต่ออุณหภูมิของเอนไซม์เซลลูเลสในสารละลายผงซักฟอก

นำสารละลายเอนไซม์ทั้ง 3 ชนิด ที่มีค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสสูงสุด มาเติมลงในสารละลายผงซักฟอก 3 ยี่ห้อการค้า แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 30 และ 50 °C เป็นเวลา 60 นาที การทดลองครั้งนี้มีจุดควบคุมกิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสที่ผลิตจากจุลินทรีย์

สารเร่ง พด.1 ที่ไม่เติมสารละลายผงซักฟอก เพื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองที่เติมสารละลายผงซักฟอก พบว่ากิจกรรมเอนไซม์มีค่าความคงตัวที่อุณหภูมิ 30 °C (รูปที่ 6) โดยลดลงเหลือ 66% ที่อุณหภูมิ 50 °C (รูปที่ 7) เช่นเดียวกับความคงตัวของกิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสทางการค้า พบว่ากิจกรรมเอนไซม์มีค่าความคงตัวที่อุณหภูมิ และเวลาบ่มเดียวกัน



รูปที่ 6 ผลความคงตัวของเอนไซม์เซลลูเลส เมื่อต้มที่อุณหภูมิ 30 °C



รูปที่ 7 ผลความคงตัวของเอนไซม์เซลลูเลส เมื่อต้มที่อุณหภูมิ 50 °C

4. ผลของเอนไซม์เซลลูเลสต่อการย่อยเส้นใยฝ้าย

จากการนำผ้าฝ้ายน้ำหนัก 1.5 กรัม แช่ในสารละลายเอนไซม์เซลลูเลสที่ผลิตจากจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1 ที่มีค่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสสูงสุด จากแหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิด เป็นเวลา 6 วัน การทดลองครั้งนี้มีชุดควบคุม โดยนำผ้าฝ้ายมาแช่ในน้ำสะอาดเพื่อทำการเปรียบเทียบน้ำหนักที่หายไปหลังการแช่ผ้า พบว่าผ้าฝ้ายมีน้ำหนักลดลงจากน้ำหนักเดิม โดยผ้าฝ้ายที่แช่ในสารละลายเอนไซม์เซลลูเลส ที่ใช้ผงเซลลูโลสเป็นแหล่งคาร์บอนสูญเสียน้ำหนักไป $13 \pm 0.0033\%$ ซึ่งสูญเสียหนักมกกว่าน้ำหนักผ้าฝ้ายที่แช่ในสารละลายเอนไซม์เซลลูเลสที่มีชานอ้อยปรับสภาพเป็นแหล่งคาร์บอน และน้ำหนักผ้าฝ้ายที่แช่ในสารละลายเอนไซม์เซลลูเลส ที่มีเปลือกถั่วลิสงปรับสภาพเป็นแหล่งคาร์บอน (สูญเสียน้ำหนักไป $30 \pm 0.007\%$ และ $1.2 \pm 0.0048\%$ ตามลำดับ) เมื่อพิจารณาน้ำหนักเป็นกรัม

ต่อยูนิตเอนไซม์ที่แช่ในสารละลายเอนไซม์เซลลูเลส สูงสุดจากแหล่งคาร์บอนทั้ง 3 ชนิด มีน้ำหนักลดลงจากเดิม 0.002 กรัม/ยูนิตเอนไซม์ ส่วนผ้าฝ้ายที่แช่ในน้ำสะอาด พบว่าน้ำหนักผ้าฝ้ายไม่ได้ลดลงจากน้ำหนักก่อนการทดลองแต่อย่างใด นอกจากนี้ยังได้นำผ้าฝ้ายมาแช่ในสารละลายเอนไซม์เซลลูเลสทางการค้าเป็นเวลา 6 วัน พบว่าผ้าฝ้ายมีน้ำหนักสูญเสียไป $0.3 \pm 0.003\%$

บทสรุปและวิจารณ์

จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ผงเซลลูโลสบริสุทธิ์เป็นแหล่งคาร์บอนสามารถให้กิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลส สูงสุดในวันที่ 4 โดยมีค่ากิจกรรมสูงสุดเท่ากับ 9.7 ± 0.5 ยูนิต/ลิตร ซึ่งสูงกว่าเมื่อใช้ชานอ้อยเป็นแหล่งคาร์บอนเล็กน้อย โดยมีค่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลส สูงสุดในวันที่ 3 เท่ากับ 8.8 ± 0.3 ยูนิต/ลิตร แต่เมื่อใช้เปลือกถั่วลิสงให้กิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสสูงสุดในวันที่ 4 เท่ากับ 6.4 ± 0.3 ยูนิต/ลิตร เมื่อพิจารณาแหล่ง

คาร์บอนทั้ง 3 ชนิด ขานอ้อยสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนแทนผงเซลลูโลสบริสุทธิ์ทางการค้าได้ เนื่องจากให้ค่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสไม่แตกต่างกันมาก และใช้ระยะเวลาสั้นกว่า แต่เมื่อใช้เปลือกถั่วลิสงเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่า ให้ค่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสต่ำกว่าเล็กน้อย ดังนั้น หากจะนำมาใช้แทนกันได้ต้องให้ความสำคัญในเรื่องของการปรับสภาพของวัตถุดิบ หรือแหล่งคาร์บอนที่นำมาใช้ เนื่องจากแหล่งคาร์บอนมีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบต่างกันมีการย่อยสลายยากง่ายต่างกัน จากผลการทดลองสารละลายเอนไซม์ ให้ค่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสสูงสุดในระยะเวลาเพียง 3-4 วัน ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Lima และคณะ (2005) ที่พบว่า กิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสที่ดีที่สุด อยู่ในวันที่ 3 แต่จากการทดลองครั้งนี้กิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสที่ได้มีค่าน้อย อาจเนื่องจากสารละลายเอนไซม์ที่ได้เป็นสารละลายเอนไซม์เซลลูเลสที่ผลิตจากการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์ 3 กลุ่ม และการศึกษาครั้งนี้วิเคราะห์เฉพาะกิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลส เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการย่อยสลายเซลลูโลส นอกจากนี้ กระบวนการปรับสภาพด้วยสารละลายด่าง (1% NaOH) ไม่สามารถกำจัดลินินที่มีอยู่ในโครงสร้างของขานอ้อยและเปลือกถั่วลิสงได้ ซึ่งลินินมีคุณสมบัติยับยั้งการปลดปล่อยของเอนไซม์ และการทำงานของจุลินทรีย์ทำให้ปฏิกิริยาช้าลง ส่งผลให้เซลลูโลสถูกใช้ไปได้ไม่มาก และเป็นการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์หลายชนิดซึ่งต้องการสภาวะที่เหมาะสมต่างกัน ดังนั้นต้องศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่เอื้อต่อการทำงานของจุลินทรีย์ผสมนี้ต่อไป ถึงแม้จะเป็นจุลินทรีย์ที่คัดเลือกเฉพาะที่ผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้ แต่ก็ยังมีคุณสมบัติที่ต่างกัน

จากนั้นได้นำเอนไซม์เซลลูเลสสูงสุดที่ผลิตจากจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1 โดยมีเซลลูโลส ขานอ้อย และเปลือกถั่วลิสง เป็นแหล่งคาร์บอน มาทดสอบคุณสมบัติความคงตัวที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่ามีความคงตัวสูงในช่วงอุณหภูมิ 50-70 °C เมื่อใช้เวลานาน 30 นาที แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงกว่า 70 °C พบว่ากิจกรรม

ของเอนไซม์เซลลูเลสลดลงอย่างรวดเร็ว เช่นเดียวกับการทดสอบคุณสมบัติความคงตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของเอนไซม์เซลลูเลสทางการค้า ที่อุณหภูมิ และเมื่อใช้เวลานานเดียวกันส่วนการทดสอบคุณสมบัติความคงตัวที่พีเอชต่างๆ พบว่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสที่ผลิตจากจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1 มีความคงตัวสูงในช่วงพีเอชที่เป็นกรด (พีเอช 3-5) แต่ขณะที่ค่าพีเอชเป็นด่าง ความคงตัวของกิจกรรมเอนไซม์ลดลงอย่างรวดเร็ว เช่นเดียวกับผลการทดสอบคุณสมบัติความคงตัวที่พีเอชต่างๆ ของเอนไซม์เซลลูเลสทางการค้า ทั้งนี้เนื่องจากเอนไซม์มีคุณสมบัติเป็นโปรตีนเมื่อถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิสูง และในสารละลายที่มีความเป็นกรด-ด่างสูง ใช้เวลาในการบ่มนานขึ้น ทำให้โครงสร้างของเอนไซม์เปลี่ยนไป ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของเอนไซม์ หรือการจับกับสับสเตรตลดลง จึงส่งผลทำให้กิจกรรมเอนไซม์ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสที่ผลิตจากเชื้อจุลินทรีย์ต่างชนิดกันมีความคงตัวในช่วงอุณหภูมิใกล้เคียงกัน และมีความคงตัวในช่วงพีเอชที่เป็นกรด เช่นเดียวกับการศึกษาของ Lima และคณะ (2005) ที่พบว่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสที่ผลิตจากเชื้อ *Streptomyces drozdowiczii* มีความคงตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 50-60 °C เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 70 °C กิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสลดลงจากเดิม 50% และมีความคงตัวอยู่ในช่วงพีเอช 5

ส่วนการทดสอบความคงตัวของเอนไซม์เซลลูเลสในสารละลายผงซักฟอกอยู่ที่อุณหภูมิ 30 °C เวลาบ่ม 60 นาที ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้บ่มไม่สูงมาก ทำให้โครงสร้างของเอนไซม์ยังไม่ถูกเปลี่ยนไป และสามารถจับกับสับสเตรตได้มากขึ้น ส่งผลให้กิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสสูงสุด ทั้ง 3 ชนิด ที่นำมาเติมลงในสารละลายผงซักฟอกยังคงมีความคงตัวอยู่ในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มเป็น 50 °C ความคงตัวของเอนไซม์ในสารละลายผงซักฟอกลดลงครั้งหนึ่ง เช่นเดียวกับผลการทดสอบคุณสมบัติของเอนไซม์เซลลูเลสทางการค้า

สำหรับการย่อยผ้าฝ้าย พบว่ามีน้ำหนักลดลงจากน้ำหนักเดิม โดยผ้าฝ้ายที่แช่ในสารละลายเอนไซม์เซลลูเลส ที่ใช้ผงเซลลูโลสเป็นแหล่งคาร์บอน สูญเสียน้ำหนักมากกว่าผ้าฝ้ายที่แช่ในสารละลายเอนไซม์เซลลูเลสที่มีขานอ้อยเป็นแหล่งคาร์บอน และผ้าฝ้ายที่แช่ในสารละลายเอนไซม์เซลลูเลสที่มีเปลือกถั่วลิสงเป็นแหล่งคาร์บอน ตามลำดับ เช่นเดียวกับผ้าฝ้ายที่แช่ในสารละลายเอนไซม์เซลลูเลสทางการค้า เมื่อพิจารณาน้ำหนักผ้าฝ้ายที่แช่ในสารละลายเอนไซม์ทั้ง 3 ชนิด และเอนไซม์เซลลูเลสทางการค้าเป็นกรัมต่อยูนิตเอนไซม์ พบว่ามีน้ำหนักลดลงจากเดิมไม่แตกต่างกัน โดยผ้าฝ้ายมีน้ำหนักลดลง 0.002 กรัม/ยูนิตเอนไซม์

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. การผลิตปุ๋ยหมักโดยใช้สารเร่ง พด.1 (อ้างเมื่อ 26 ธันวาคม 2549) ทางเว็บไซต์ <http://www.idd.go.th>.

จิตรลดา กาญจนสาวิตรี และชญาณุตม์ ศรีพิทักษ์. (2547). การคัดเลือกจุลินทรีย์ที่ผลิตเอนไซม์เซลลูเลสและเอนไซม์ไซลานีสเพื่อแยกน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ปัญหาพิเศษ. คณะอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

จุฑารัตน์ พงษ์โนรี และ ชีรพร กงบังเกิด. (2548). การเตรียมเซลลูโลสจากขังข้าวโพด ตอนที่ 1 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสกัด. ภาควิชาอุตสาหกรรม. คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยนเรศวร.

พูนสุข ประเสริฐสรรพ และ อัครวิทย์ กาญจนโอภาส. (2532). ปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดอีมีเซลลูโลสจากฟางข้าว. รายงานวิจัย. ภาควิชาอุตสาหกรรม คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

พรรษา ปุณณะพยัคฆ์ และนริสา คุณประทุม. (2546). การผลิตเอนไซม์จากวัสดุทางการเกษตรเพื่อเป็นแนวทางการใช้ในอาหารสัตว์. ภาควิชาพฤกษศาสตร์. คณะวิทยาศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Lima, A. L. G., Nascimento, R. P. DO., Bon, E. P. S. and Coelho, R. R. R. (2005). *Streptomyces drozdowiczii* cellulase production using agro-industrial by-products and its potential use in the detergent and textile industries. *Enzyme Microb. Technol.* 37: 272-277.

Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Faww, A. L. and Randall, R. J. (1951). Protein measurement with folin phenol reagent. *J. Biol. Chem.* 195: 265-275.

Mandels, M. and Weber, J. (1969). The production of cellulase. *Adv. Chem. Ser.* pp. 394-414.

Miller, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Biotechnol. Bioeng. Symp.* 5: 193-219.

Solomon, B. O., Amingun, B., Betiku, E., Ojumu, T. V. and Layokun, S. K. (1999). Optimization of cellulase production by *Aspergillus flavus* Linn isolate NSPR 101 grown on bagasse. *JNSChE.* 16: 61-68.





การเต้นรำเพื่อสื่อสารบอกทิศทางแหล่งอาหารของผึ้งมิม (*Apis florea* Fabricius, 1787)

Dance Communication on Food Resources of Dwarf Honey Bee (*Apis florea* Fabricius, 1787)

ปิยมาศ นานอก^{1*} พรพิมล พงษ์อ่อน¹ และ อภิญญา แก้วไส¹

บทคัดย่อ

ผึ้งในสกุล *Apis* เป็นแมลงสังคมแท้ที่ในแต่ละรังประกอบด้วยผึ้ง 3 วรรณะ คือ ผึ้งนางพญา ผึ้งตัวผู้ และผึ้งงาน ผึ้งมีความสามารถในการสื่อสารกันโดยใช้ภาษาเฉพาะที่เรียกว่า “ภาษาเต้นรำ” ซึ่งสามารถสื่อสารได้หลายอย่าง โดยเฉพาะการสื่อสารบอกทิศทาง ระยะทาง และความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งอาหาร การศึกษาครั้งนี้เป็นการสังเกตพฤติกรรมการเต้นรำของผึ้งมิม (*Apis florea* Fabricius, 1787) เพื่อบอกทิศทางของแหล่งอาหารที่ระยะทาง 50 70 80 90 100 และ 150 เมตร พบว่า ผึ้งมิมใช้เวลาในการเดินรำเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางของแหล่งอาหารห่างจากรังมากขึ้น และเมื่อทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ผึ้งแต่ละตัวใช้ในการเดินรำครบ 1 รอบ และเวลาที่ผึ้งแต่ละตัวใช้ในการเดินรำครบ 1 ครั้ง ในแต่ละระยะทาง พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในระยะทางเดียวกันผึ้งแต่ละตัวมีความสามารถในการบอกระยะทางของแหล่งอาหาร และความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งอาหารได้แตกต่างกัน เมื่อสังเกตรูปแบบการเดินรำของผึ้ง พบว่า ที่ระยะทาง 50 และ 70 เมตร มีการเดินรำแบบวงกลมทั้งหมด ที่ระยะทาง 100 และ 150 เมตร มีการเดินรำแบบส่ายท้องทั้งหมด ในขณะที่ระยะทาง 80 และ 90 เมตร พบการเดินรำของผึ้งทั้ง 2 รูปแบบ

Abstract

Honey bees (Genus *Apis*) are eusocial insects. There are three castes of honey bees in a colony; queen, drones and workers. The bees communicate using unique language called “dance language” which used for various meanings, especially for indicate direction, distance and richness of food resources. This study was to observe dancing behavior of dwarf honey bees (*Apis florea* Fabricius, 1787) at different distances of food resource (50, 70, 80, 90, 100, and 150 m). The results showed that the greater distance,

¹ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

* Corresponding Author, E-mail: piyamas.n@msu.ac.th

the longer time of circuit duration. After tested relationship of circuit duration of each bee and also dance duration of individual bee at the same distance. It was found that each bee had significantly different ($p < 0.05$) in capability to signal location and richness of the food resource. Two patterns of bee dance were found which are round dance and waggle dance. All bees performed round dance at 50 and 70 m, and performed waggle dance at 100 and 150 m. Whereas both of dance patterns were found at 80 and 90 m.

คำสำคัญ : ผึ้งมิม การเดินรำ แหล่งอาหาร

Keywords : Dwarf honey bee, *Apis florea*, Bee dance, Food resources

บทนำ

ผึ้งเป็นสัตว์เศรษฐกิจที่ทำรายได้ให้กับผู้เลี้ยงเป็นอย่างมาก มีผลิตภัณฑ์มากมายที่เป็นสินค้าเศรษฐกิจ เช่น น้ำผึ้ง นมผึ้ง (royal jelly) เกสรผึ้ง (bee pollen) พรอพอลิส (propolis) เป็นต้น นอกจากนี้ ผึ้งยังช่วยในการผสมเกสรดอกไม้ทำให้เกษตรกรได้รับผลผลิตทางการเกษตรมากขึ้นด้วย (สิริวัฒน์ วงษ์ศิริ, 2532; Crane, 1980) ผึ้งในสกุล *Apis* ที่พบในประเทศไทยมีด้วยกัน 5 ชนิด ได้แก่ ผึ้งหลวง (*A. dorsata*) ผึ้งมิม (*A. florea*) ผึ้งม้าน (*A. andreniformis*) ผึ้งโพรง (*A. cerana*) และผึ้งพันธุ์ (*A. mellifera*) โดยผึ้ง 4 ชนิดแรกเป็นผึ้งพื้นเมือง (native species) ของประเทศไทย ส่วนผึ้งพันธุ์เป็นผึ้งที่มีการนำเข้า (introduced species) เพื่ออุตสาหกรรมเลี้ยงผึ้ง (สิริวัฒน์ วงษ์ศิริ, 2532)

ผึ้งสกุล (Genus) *Apis* เป็นแมลงสังคมแท้ (eusocial insect) ในอันดับ (Order) Hymenoptera วงศ์ (Family) Apidae ที่มีวิวัฒนาการในการอยู่ร่วมกันมานานกว่า 30 ล้านปี (Oldroyd and Wongsiri, 2006) มี

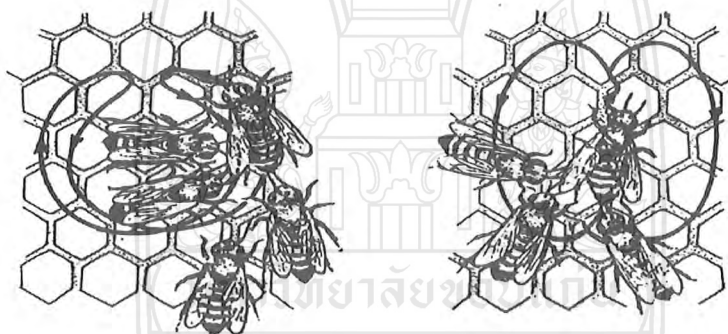
การช่วยกันสร้างรังและอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม ภายในรังประกอบไปด้วยผึ้ง 3 วรรณะ คือ ผึ้งนางพญา (queen) ผึ้งตัวผู้ (drones) และผึ้งงาน (workers) (รูปที่ 1) ซึ่งทั้ง 3 วรรณะ จะมีขนาดรูปร่าง และหน้าที่แตกต่างกันออกไป กล่าวคือ ผึ้งนางพญาเป็นผึ้งที่มีขนาดตัวใหญ่ และมีลำตัวยาว มีปีกขนาดสั้น ทำหน้าที่ในการผสมพันธุ์ และวางไข่ รวมถึงการผลิตเฟอโรโมน (pheromone) เพื่อควบคุมสังคมของผึ้งให้อยู่ในสภาพปกติ ภายในหนึ่งรังจะมีผึ้งนางพญาเพียงหนึ่งตัวเท่านั้น ผึ้งตัวผู้จะมีขนาดใหญ่และตัวอ้วนแต่มีความยาวน้อยกว่า ผึ้งนางพญา มีหน้าที่ในการผสมพันธุ์เพียงอย่างเดียว ส่วนผึ้งงานเป็นผึ้งที่มีขนาดเล็กที่สุดภายในรัง แต่มีจำนวนมากที่สุด ผึ้งงานเป็นผึ้งเพศเมียเช่นเดียวกับผึ้งนางพญาแต่ไม่สามารถผสมพันธุ์และวางไข่ได้ เนื่องจากรังไข่ไม่เจริญดี ผึ้งงานทำหน้าที่หลายอย่าง เช่น การสร้างและซ่อมแซมรัง การทำความสะอาดรัง การป้องกันรัง การหาอาหาร และน้ำ เป็นต้น (Free, 1982; Oldroyd and Wongsiri, 2006; Seeley, 1985; Winston, 1987)



รูปที่ 1 แสดงวรรณะต่างๆ ของผึ้งมิม

เนื่องจากภายในรังผึ้งหนึ่งนั้นประกอบไปด้วยประชากรจำนวนหลายพันถึงหลายหมื่นตัวขึ้นอยู่กับชนิดของผึ้ง (สิริวัฒน์ วงษ์ศิริ, 2532; Oldroyd and Wongsiri, 2006) ดังนั้น ผึ้งจึงต้องมีการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพเพื่อให้กิจกรรมต่างๆ ของสมาชิกภายในรังสามารถดำเนินต่อไปได้ โดยวิธีการสื่อสารของผึ้งโดยทั่วไป คือ การผลิตสารเคมีที่เรียกว่าเฟอโรโมน ได้แก่ เฟอโรโมนของนางพญา (queen pheromone) เฟอโรโมนเตือนภัย (alarm pheromone) เฟอโรโมนตามรอย (foot-print pheromone) เป็นต้น (Free, 1987) และการสื่อสารอีกวิธีหนึ่งที่เป็นที่รู้จักกันดี คือ การใช้ภาษาเต้นรำ (dance language) ซึ่งสามารถสื่อความหมายได้หลายอย่าง เช่น การเต้นรำแบบเตือนภัย การเต้นรำเพื่อทำความสะอาด การเต้นรำเพื่อการรบกวน (Gary, 1992; Seeley, 1992) นอกจากนี้ยังเป็นการเต้นรำเพื่อสื่อสารให้สมาชิกภายในรังรับรู้ถึงตำแหน่งและทิศทางของแหล่งอาหารด้วย โดยเมื่อผึ้งงานที่ออกไปหาอาหาร

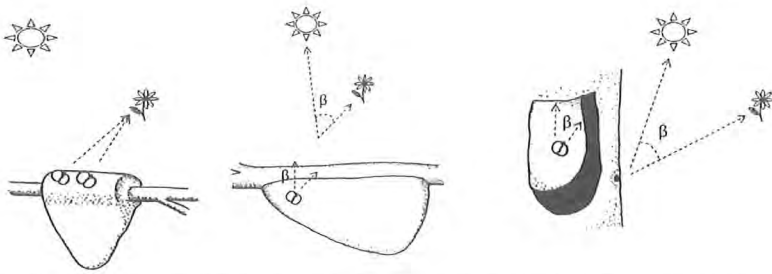
(foraging bee) กลับมาถึงรังจะต้องมีการสื่อสารบอกที่ตั้งของแหล่งอาหารให้แก่สมาชิกตัวอื่นภายในรังรู้ด้วยการเต้นรำ ซึ่งมี 2 แบบ คือการเต้นรำแบบวงกลม (round dance) และการเต้นรำแบบส่ายท้อง (waggle dance) หรือการเต้นรำแบบเลขแปด (figure-of-eight pattern) (รูปที่ 2) โดยรูปแบบและระยะเวลาของการเต้นรำขึ้นอยู่กับระยะทางและสภาพความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งอาหารด้วย (von Frisch, 1993) ในการศึกษาการเต้นรำของผึ้งพันธุ์ (*Apis mellifera*) ผึ้งงานจะสื่อสารบอกผึ้งตัวอื่นๆ ภายในรังด้วยการเต้นรำแบบวงกลมหากแหล่งอาหารอยู่ห่างจากรังไปไม่เกิน 100 เมตร แต่ถ้าหากแหล่งอาหารอยู่ไกลกว่า 100 เมตร ผึ้งจะเต้นรำแบบส่ายท้อง (von Frisch, 1973) โดยอัตราเร็ว ระยะเวลาและความแรงของการเต้นรำนั้นจะสามารถบ่งบอกความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งอาหารได้ (Seeley et al., 2000)



รูปที่ 2 การเต้นรำแบบวงกลม (ซ้าย) และการเต้นรำแบบส่ายท้อง (ขวา) (ที่มา: สิริวัฒน์ วงษ์ศิริ, 2532)

สำหรับผึ้งมีมันนั้นเป็นผึ้งที่มีการสร้างรังเป็นแบบรังเดี่ยวอยู่ตามพุ่มไม้หรือกิ่งไม้ที่ไม่สูงมากนักเส้นผ่าศูนย์กลางของรังประมาณ 20 เซนติเมตร สามารถพบเห็นได้ทั่วไปในประเทศไทย (Wongsiri et al., 1996) การสื่อสารโดยการเต้นรำของผึ้งมีความแตกต่างไปจากผึ้งชนิดอื่นๆ คือ ผึ้งงานที่กลับมาจากการหา

อาหารจะเต้นรำในแนวราบขนานกับพื้นดิน (horizontal) ที่บริเวณลานด้านบนของรวงรังหรือที่เรียกว่า หัวคอน และจะเต้นรำขึ้นไปยังทิศทางของแหล่งอาหารโดยตรง ในขณะที่ผึ้งชนิดอื่นจะเต้นรำในแนวตั้ง (vertical) และต้องอาศัยดวงอาทิตย์ในการบอกทิศทางของแหล่งอาหาร (รูปที่ 3) (Oldroyd and Wongsiri, 2006)



รูปที่ 3 การเดินร่าบอทิศทางของผึ้งมีม (ซ้าย) ผึ้งหลวง (กลาง) และผึ้งโพรง (ขวา) (Oldroyd and Wongsiri, 2006)

เนื่องจากพฤติกรรมการบินร่าของผึ้งมีมที่แตกต่างไปจากผึ้งชนิดอื่นนี้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาการสื่อสารโดยการเดินร่าของผึ้งมีม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบอัตราเร็วและรูปแบบในการเดินร่าของผึ้งมีมในระยะทางที่แตกต่างกัน และเพื่อตรวจสอบระยะทางที่ผึ้งมีมมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของการเดินร่าจากแบบวงกลมเป็นแบบสายทอ ผึ้งมีมให้ประโยชน์กับประชาชนในหลายพื้นที่ของประเทศไทยหลายประการ เช่น การนำน้ำผึ้งมาเป็นอาหาร หรือ แม้แต่เป็นส่วนประกอบในการทำยา และในปัจจุบันมีการตัดรังผึ้งมีมมาขายจำนวนปีละหลายพันรัง โดยเป็นรังที่ได้มาจากธรรมชาติทั้งหมดซึ่งถ้าหากมีการทำลายผึ้งมีมในธรรมชาติจำนวนมากเช่นนี้ จะทำให้ประชากรของผึ้งมีมลดจำนวนลงอย่างรวดเร็ว ผลที่ได้จากการศึกษานี้จะเป็นข้อมูลทางชีววิทยาของผึ้งมีมในประเทศไทย และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการอนุรักษ์แหล่งอาหาร การเพาะเลี้ยงและการอนุรักษ์ผึ้งมีมต่อไป

วิธีดำเนินงาน

1. การเตรียมผึ้งมีมสำหรับการทดลอง

1.1 การทดลองได้ดำเนินการในเดือนเมษายน 2550 โดยทำการตัดรังผึ้งมีมมาทั้งรัง ด้วยการพ่นน้ำสะอาดหรือน้ำหวานลงไปในรังผึ้งเพื่อไม่ให้ผึ้งแตกรัง จากนั้นตัดกิ่งไม้ที่มีรังผึ้งอยู่โดยตัดให้ห่างจากรังผึ้งออกไปด้านละประมาณ 10-15 เซนติเมตร เพื่อให้สะดวกต่อการเคลื่อนย้ายและการตั้งรังผึ้งในระหว่างการทดลอง

1.2 ย้ายรังผึ้งไปยังสถานที่ทำการทดลอง

คือบริเวณสนามหญ้าด้านหลังอาคารวิทยาศาสตร์ชีวภาพและอาคารวิทยาศาสตร์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยใช้กล่องกระดาษหรือกล่องไม้ใส่รังผึ้งในระหว่างการเคลื่อนย้าย เมื่อถึงตำแหน่งวางรังผึ้งสำหรับการทดลองแล้วจึงผูกมัดผึ้งไว้กับแท่นวางที่เตรียมไว้

2. การหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจากรังผึ้งไปยังแหล่งอาหาร และเวลาที่ผึ้งใช้ในการเดินร่า

2.1 เตรียมสารละลายน้ำตาลทรายที่มีความเข้มข้น 2 M และเติมกลิ่นดอกไม้มลงไปให้น้ำหวาน (Dyer and Seeley, 1991; Punchihewa et al., 1985) ในการทดลองนี้ได้ทดลองใช้กลิ่นดอกมะลิ โดยได้ทดสอบกับผึ้งก่อนทำการทดลอง พบว่า สามารถดึงดูดให้ผึ้งเข้ามากินน้ำหวานได้เป็นจำนวนมาก

2.2 ฝึกผึ้งให้กินน้ำหวานจากถาดน้ำหวาน (feeder) ที่เตรียมไว้ เพื่อให้ผึ้งได้คุ้นเคยกับรสชาติและกลิ่นของน้ำหวานนั้น โดยนำถาดน้ำหวานที่เตรียมไว้ มาวางไว้หน้ารังห่างจากรังประมาณ 30 เซนติเมตร เพื่อสังเกตพฤติกรรมของผึ้งที่มีต่อน้ำหวาน

2.3 ขยับถาดน้ำหวานไปที่ระยะ 50 70 80 90 100 และ 150 เมตร ตามลำดับ

2.4 แด้มสีที่บริเวณอกของผึ้งตัวที่ออกมาตอมที่ถาดน้ำหวานในแต่ละระยะทาง โดยหลังจากที่วางถาดน้ำหวานผ่านไป 10 นาที ให้สังเกตพฤติกรรมการเดินร่าของผึ้งที่กลับมาจากแหล่งอาหาร โดยสังเกตผึ้งที่

ถูกแฉ้มสี่ พร้อมทั้งบันทึกภาพวิดีโอ

2.5 เปลี่ยนระยะทางของถาดน้ำหวานเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 30 นาที และทำเช่นเดียวกับข้อ 2.4 ในทุกระยะทาง

3. การศึกษาและเก็บข้อมูลในห้องปฏิบัติการ

3.1 จับเวลาที่ผึ้งเดินร่า 1 รอบ และ 1 ครั้ง จากภาพวิดีโอ

3.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง โดยหาค่าเฉลี่ย เวลาที่ผึ้งเดินร่าครบ 1 รอบ และ 1 ครั้ง ในทุกระยะทางที่ทำการทดลอง และทดสอบความแตกต่างของเวลาที่ผึ้งเดินร่าครบ 1 รอบ และ 1 ครั้ง ในทุกระยะทางที่ทำการทดลอง โดยใช้ T-test (กลายาวานิษฐ์บัญชา, 2551)

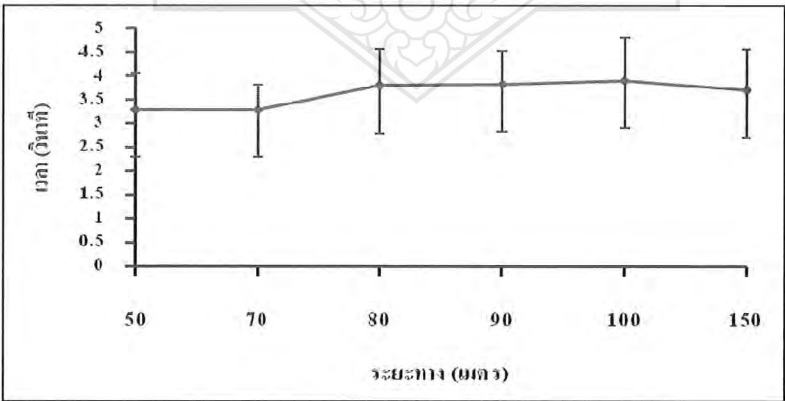
ผลการศึกษา

จากการสังเกตพฤติกรรมการเดินร่าเพื่อบอกทิศทางแหล่งอาหารของผึ้งมิมิที่ระยะทาง 50 70 80 90 100 และ 150 เมตร ตามลำดับ โดยจับเวลาที่ผึ้งเดินร่าครบ 1 รอบ ได้ผลดังตารางที่ 1 และรูปที่ 4

เมื่อทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ผึ้งแต่ละตัวใช้ในการเดินร่าครบ 1 รอบ ในแต่ละระยะทาง พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในระยะทางเดียวกันผึ้งแต่ละตัวมีความสามารถในการบอกระยะทางของแหล่งอาหารได้แตกต่างกัน และจากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าผึ้งใช้เวลาในการเดินร่าครบ 1 รอบเพิ่มขึ้นขึ้นเมื่อระยะทางของแหล่งอาหารห่างจากรังมากขึ้น

ตารางที่ 1 แสดงเวลาที่ผึ้งเดินร่าครบ 1 รอบ

ระยะทาง (เมตร)	เวลาดำสุด - สูงสุดที่ผึ้งเดินร่า 1 รอบ (วินาที)	เวลาเฉลี่ย (mean ± S.D.) ที่ผึ้งเดินร่า 1 รอบ (วินาที)	จำนวนผึ้งที่สังเกต (ตัว)
50	2.0 - 5.0	3.29 ± 0.75	24
70	2.5 - 5.0	3.29 ± 0.53	35
80	3.0 - 5.0	3.80 ± 0.76	25
90	3.0 - 5.0	3.83 ± 0.70	21
100	3.0 - 5.0	3.91 ± 0.90	23
150	2.0 - 5.0	3.71 ± 0.86	31



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ย (วินาที) ที่ผึ้งเดินร่าครบ 1 รอบ และ ระยะทาง (เมตร)

จากการสังเกตพฤติกรรมการเดินรำเพื่อบอกทิศทางแหล่งอาหารของผึ้งมิมที่ระยะทาง 50 70 80 90 100 และ 150 เมตร โดยจับเวลาที่ผึ้งเดินรำครบ 1 ครั้ง เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการสื่อสารบอกความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งอาหาร ได้ผลดังตารางที่ 2 และ

เมื่อทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ผึ้งแต่ละตัวใช้ในการเดินรำครบ 1 ครั้ง ในแต่ละระยะทาง พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผึ้งแต่ละตัวมีความสามารถในการบอกความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งอาหารได้แตกต่างกัน

ตารางที่ 2 แสดงเวลาที่ผึ้งเดินรำครบ 1 ครั้ง

ระยะทาง (เมตร)	เวลาดำสุด - สูงสุดที่ผึ้งเดินรำ 1 ครั้ง (วินาที)	เวลาเฉลี่ย (mean $\pm$ S.D.) ที่ผึ้งเดินรำ 1 ครั้ง (วินาที)	จำนวนผึ้งที่สังเกต (ตัว)
50	3.0-30.5	10.83 $\pm$ 7.20	24
70	3.0-33.0	12.64 $\pm$ 6.30	35
80	3.0-32.0	10.92 $\pm$ 6.64	25
90	3.0-18.0	8.29 $\pm$ 4.71	21
100	5.0-41.0	14.83 $\pm$ 8.47	23
150	5.0-34.0	14.73 $\pm$ 6.57	31

เมื่อสังเกตรูปแบบการเดินรำของผึ้งมิมที่ระยะทาง 50 70 80 90 100 และ 150 เมตร พบว่า มีการเดินรำ 2 แบบ คือ การเดินรำแบบวงกลม และการเดินรำแบบสายทอ โดยในระยะ 50 และ 70 เมตร ผึ้งมีการเดินรำแบบวงกลมทั้งหมดและผึ้งเริ่มต้นเปลี่ยน-

แปลงรูปแบบของการเดินรำจากแบบวงกลมเป็นแบบสายทอที่ระยะ 80 เมตร และเปลี่ยนเป็นเดินรำแบบสายทอทั้งหมดที่ระยะทางของแหล่งอาหารห่างจากรัง 100 เมตร (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 แสดงรูปแบบการเดินรำของผึ้งที่ระยะทาง 50 70 80 90 100 และ 150 เมตร

ระยะทาง (เมตร)	จำนวน (ตัว)	รูปแบบการเดินรำ	วงกลม	สายทอ
50	24	วงกลม	100 %	-
70	35	วงกลม	100 %	-
80	25	วงกลม และ สายทอ	16 %	84 %
90	21	วงกลม และสายทอ	28.6 %	71.4 %
100	23	สายทอ	-	100 %
150	31	สายทอ	-	100 %

สรุปและอภิปรายผล

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงเวลาที่ผึ้งมีมใช้ในการเดินร่าในระยะทางของแหล่งอาหารที่แตกต่างกัน โดยผึ้งงานที่สังเกตในแต่ละระยะทางนั้นมีความสามารถในการสื่อสารบอกระยะทางได้แตกต่างกัน เนื่องจากเวลาที่ผึ้งใช้ในการเดินร่าใน 1 รอบ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกระยะทางของแหล่งอาหาร ($p < 0.05$) และเมื่อระยะทางของแหล่งอาหารเพิ่มขึ้น พบว่า เวลาที่ผึ้งใช้เดินร่ารอบ 1 รอบ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Puchihiwewa และคณะ (1985) สำหรับการเดินร่าเพื่อสื่อสารบอกความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งอาหารของผึ้งนั้นถ้าหากแหล่งอาหารนั้นอุดมสมบูรณ์ผึ้งที่สำรวจนี้จะเดินแรงและเร็วเป็นเวลานาน แต่ถ้าแหล่งอาหารไม่อุดมสมบูรณ์ผึ้งก็จะเดินช้าและมักไม่ได้รับความสนใจจากสมาชิกผึ้งงานที่อยู่รอบๆ (Oldroyd and Wongsiri, 2006; Seeley et al., 2000) ดังนั้น เวลาที่ผึ้งที่เดินร่าใน 1 ครั้ง จึงสามารถแสดงถึงความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งอาหารได้ ในการสังเกตพฤติกรรมการเดินร่าของผึ้งครั้งนี้ พบว่า ผึ้งแต่ละตัวใช้เวลาเดินร่าใน 1 ครั้ง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกระยะทางของแหล่งอาหาร ($p < 0.05$) แสดงว่าผึ้งแต่ละตัวบอกความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งอาหารได้แตกต่างกัน

รูปแบบของการเดินร่าของผึ้งงานที่สังเกตได้จากการศึกษาครั้งนี้พบการเดินร่า 2 รูปแบบ คือ การเดินร่าแบบวงกลม และการเดินร่าแบบสายทอ โดยผึ้งงานจะเดินร่าแบบวงกลมทั้งหมดเมื่อระยะทางของแหล่งอาหารห่างจากรัง 50 และ 70 เมตร และจะเริ่มเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเดินร่าจากแบบวงกลมเป็นแบบสายทอที่ระยะทางของแหล่งอาหาร 80 เมตร โดยในระยะทาง 80 และ 90 เมตรนี้ ผึ้งจะมีการเดินร่าทั้ง 2 รูปแบบ และผึ้งจะเดินร่าแบบสายทอทั้งหมดเมื่อระยะทางของแหล่งอาหารห่างจากรัง 100 เมตร ขึ้นไป ซึ่งผลที่ได้จากการสังเกตแสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะทางของแหล่งอาหารเพิ่มมากขึ้นรูปแบบการเดินร่าของผึ้งมีมจะเปลี่ยนแปลงไปจากแบบวงกลมเป็นแบบสายทอ

(Oldroyd and Wongsiri, 2006; von Frisch, 1993) โดยผลการสังเกตดังกล่าวนี้แตกต่างจากการศึกษาของ Towne (1985) ซึ่งได้ศึกษาการเดินร่าของผึ้งมีมในตอนใต้ของประเทศอินเดีย โดยพบว่า ผึ้งมีมเปลี่ยนรูปแบบการเดินร่าจากแบบวงกลมเป็นแบบสายทอเมื่อแหล่งอาหารอยู่ห่างจากรังเป็นระยะทางน้อยกว่า 1 เมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผึ้งมีมที่ทำการศึกษาในครั้งนี้มีความสามารถในการบอกตำแหน่งของแหล่งอาหารแตกต่างจากการศึกษาของ Towne (1985) เนื่องจากผึ้งมีมที่เปลี่ยนการเดินร่าจากวงกลมเป็นแบบสายทอเมื่อแหล่งอาหารอยู่ห่างจากรังเป็นระยะทางสั้นๆ นั้น จะมีความสามารถในการสื่อสารบอกตำแหน่งของแหล่งอาหารได้แม่นยำกว่าผึ้งที่เปลี่ยนแปลงรูปแบบการเดินร่าเมื่อระยะทางของแหล่งอาหารอยู่ห่างจากรังมากขึ้น (Oldroyd and Wongsiri, 2006) ซึ่งจะช่วยให้ผึ้งงานตัวอื่นๆ ในรังหาแหล่งอาหารได้ง่ายขึ้นเป็นการลดการใช้พลังงานในการออกหาอาหารของผึ้งอีกวิธีหนึ่ง

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของการเดินร่าในผึ้งชนิดอื่นได้แก่ ผึ้งพันธุ์ (*A. mellifera*) ผึ้งโพรง (*A. cerana*) และ ผึ้งหลวง (*A. dorsata*) พบว่าระยะทางที่เริ่มการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเดินร่าของผึ้งพันธุ์จะเป็นแบบวงกลมเมื่อระยะห่างของแหล่งอาหารน้อยกว่า 100 เมตร และจะเปลี่ยนเป็นแบบสายทอเมื่อระยะห่างของแหล่งอาหารมากกว่า 100 เมตร (von Frisch, 1973) เมื่อศึกษาการเดินร่าในผึ้งพันธุ์ (*A. mellifera fasciata*) ในประเทศแถบตะวันออกกลาง พบว่า ผึ้งเริ่มเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเดินร่าจากวงกลมเป็นสายทอเมื่อแหล่งอาหารห่างจากรัง 3 เมตร และเปลี่ยนเป็นการเดินร่าแบบสายทอทั้งหมดเมื่อระยะทางของแหล่งอาหารห่างจากรัง 10 เมตร และเมื่อศึกษาในผึ้งพันธุ์ (*A. mellifera carnica*) ในประเทศยุโรปตะวันออก พบว่า ผึ้งงานเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเดินร่าที่ระยะทางของแหล่งอาหาร 20 เมตร และเปลี่ยนเป็นการเดินร่าแบบสายทอทั้งหมดที่ระยะทาง 85 เมตร (Oldroyd and Wongsiri, 2006) สำหรับการศึกษานี้ในผึ้งโพรงและผึ้งหลวงใน

ตอนใต้ของประเทศอินเดีย พบว่า ผึ้งงานมีการเปลี่ยนรูปแบบการเดินร่าเป็นแบบสายทอทั้งหมดที่ระยะทางของแหล่งอาหารห่างจากรัง 5 เมตร และ 2.5 เมตร ตามลำดับ (Towne, 1985) จากการศึกษาทั้งหมดจะเห็นว่าระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของการเดินร่าจากแบบวงกลมไปเป็นแบบสายทอในผึ้งแต่ละชนิดนั้นไม่แน่นอนทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุกรรมและสภาพแวดล้อมที่ทำการศึกษา (Johnson et al., 2002; Oldroyd and Wongsiri, 2006; Schneider and McNally, 1994; Rinderer and Beaman, 1995)

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณรายได้คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามประจำปี 2550 ทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยมหาสารคาม และทุนวิจัยโครงการกลุ่มวิจัยด้านความหลากหลายทางชีวภาพและการขยายพันธุ์ของผึ้งและไหมไทย สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ

เอกสารอ้างอิง

กัลยา วานิชย์บัญชา. (2551). หลักสถิติ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สิริวัฒน์ วงษ์ศิริ. (2532). ชีววิทยาของผึ้ง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ดินอ้อ.

Crane, E. (1980). A Book of Honey. Oxford: Oxford University Press.

Dyer, F. C. and Seeley, T. D. (1991) Dance dialects and foraging range in three Asian honey bee species. Behavioral Ecology and Sociobiology. 28: 227-234.

Free, J. B. (1982). Bees and Mankind. London: Alden Press.

Free, J. B. (1987). Pheromones of Social Bees. London: Chapman & Hall.

Gary, N. E. (1992). Activities and behavior of honey bee. In: The Hive and the Honey Bee, J. M. Graham (ed.). Hamilton: Dadant & Sons.

Johnson, R. N., Oldroyd, B. P., Barron, A. B., and Crozier, R. H. (2002). Genetic control of the honey bee (*Apis mellifera*) dance language: segregating dance forms in a back-crossed colony. Journal of Heredity. 93: 170-173.

Oldroyd, B. P. and Wongsiri, S. (2006). Asian Honey Bee: Biology, Conservation, and Human Interaction. London: Harvard University Press.

Punchihewa, R. W. K., Koeniger, N., Kevan, P. G., and Gadawski, R. (1985). Observations on the dance communication and the natural foraging ranges of *Apis cerana*, *Apis florea* and *Apis dorsata* in Sri Lanka. Journal of Apicultural Research. 24(3): 168-175.

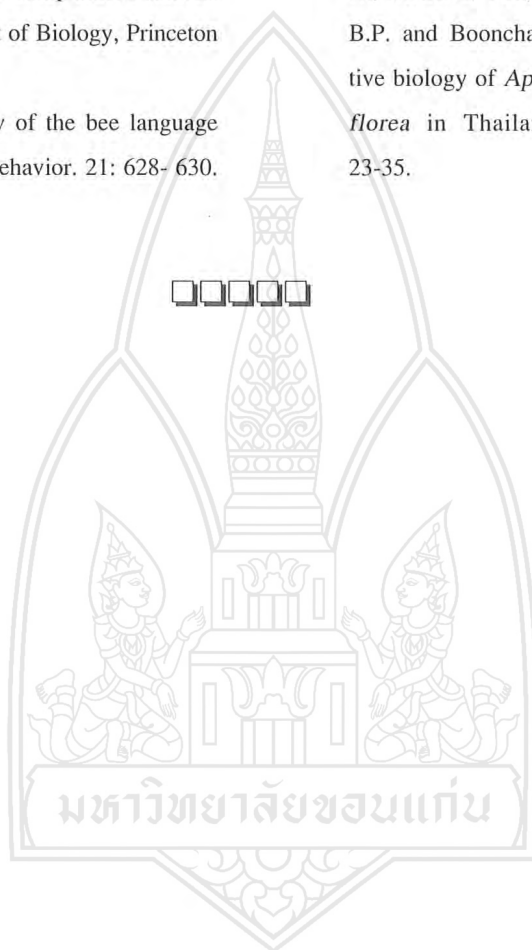
Rinderer, T. E. and Beaman, L. D. (1995). Genic control of honey bee dance language dialect. Theoretical and Applied Genetics. 91: 727-732.

Schneider, S. S. and McNally, L. C. (1994) Waggle dance behavior associated with seasonal absconding in colonies of the African honeybee, *Apis mellifera scutellata*. Insectes Soc. 41: 115-127.

Seeley, T. D. (1985). Honeybee Ecology. Princeton: Princeton University Press.

Seeley, T. D., Mikheyev, A. S. and Pagano, G. J. (2000). Dancing bees tune both duration and rate of waggle-run production in relation to nectar source profitability. Journal of Comparative Physiology A. 186: 813-819.

- Seeley, T. D. (1992). The tremble dance of the honey bee: message and meanings. *Behavioral Ecology and Sociobiology*. 31: 375-383.
- Towne, W. F. (1985). The spatial precision and mechanism of dance communication of honey bees: experimental and comparative studies. Ph.D. diss. Department of Biology, Princeton University.
- von Frisch, K. (1973). Review of the bee language controversy. *Animal Behavior*. 21: 628- 630.
- von Frisch, K. (1993). *The Dance Language and Orientation of Bees*. Cambridge: Harvard University Press.
- Winston, M. L. (1987). *The Biology of the Honey Bee*. Cambridge: Harvard University Press.
- Wongsiri, S., Lekprayoon, C., Thapa, R., Therakhupt, K., Rinderer, T.E., Sylvester, H.A., Oldroyd, B.P. and Booncham, U. (1996). Comparative biology of *Apis andreniformis* and *Apis florea* in Thailand. *Bee World*. 77(4): 23-35.





ความหลากหลายของพืชวงศ์ทานตะวันในอุทยาน แห่งชาติน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์

Diversity of Asteraceae in Nam Nao National Park, Phetchabun Province

สุสดี พรหมประสิทธิ์¹ อมรรัตน์ ประจักษ์สูตร^{1*} และพิมพ์ดี พรพงศ์รุ่งเรือง¹

บทคัดย่อ

ศึกษาความหลากหลายของพืชวงศ์ทานตะวันในอุทยานแห่งชาติน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์ ระหว่างเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2550 ถึงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2551 โดยศึกษาตัวอย่างพรรณไม้แห้งจากหอพรรณไม้ต่างๆ และตัวอย่างพรรณไม้ภาคสนาม พบ 31 สกุล 52 ชนิด (53 แทกซา) สกุลที่พบมากที่สุดคือ สกุล *Blumea* DC. มี 12 ชนิด และพบพรรณไม้ประจำถิ่นของอุทยานแห่งชาติน้ำหนาว 2 ชนิด คือ *Senecio namnaoensis* H. Koyama และ *Vernonia namnaoensis* H. Koyama

Abstract

Species diversities of the Asteraceae in Nam Nao National park, Phetchabun province were studied between November 2007 and November 2008. Herbarium specimens from various herbaria, plant specimens and living specimens were studied. Thirty-one genera, 52 species (53 taxa) were collected. *Blumea* DC. is the most common genus in the area with 12 species. *Senecio namnaoensis* H. Koyama and *Vernonia namnaoensis* H. Koyama are endemic to Nam Nao National park.

คำสำคัญ: วงศ์ทานตะวัน อุทยานแห่งชาติน้ำหนาว *Senecio namnaoensis* *Vernonia namnaoensis*

Keywords : Asteraceae (Compositae), Nam Nao National Park, *Senecio namnaoensis*, *Vernonia namnaoensis*

¹ ศูนย์วิจัยอนุกรมวิธานประยุกต์ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

* Corresponding author: amopra@kku.ac.th.

บทนำ

พืชวงศ์ทานตะวัน (Asteraceae) เป็นพืชใบเลี้ยงคู่ที่มีจำนวนชนิดมากที่สุดในโลกประมาณ 1,535 สกุล 23,000 ชนิด (Bremer, 1994) ส่วนใหญ่เป็นไม้ล้มลุก มีประมาณร้อยละ 2 ที่เป็นไม้ยืนหรือไม้พุ่ม (Rahman et al., 2008) มีการกระจายพันธุ์ทั่วโลก บริเวณพื้นที่แห้งแล้งในเขตอบอุ่น และกึ่งอบอุ่น มีจำนวนน้อยที่พบในเขตร้อนชื้น และไม่พบแถบแอนตาร์กติก (Heywood et al., 2007) ในประเทศไทยมีรายงานพบ 65 สกุล 193 ชนิด (Craib and Kerr, 1932) ปัจจุบันการจำแนกพืชวงศ์นี้โดยพิจารณาจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาและชีววิทยาโมเลกุล จำแนกเป็น 11 วงศ์ย่อย (subfamily) 35 เผ่า (tribe) (Panero and Funk, 2002)

อุทยานแห่งชาติน้ำหนาวมีพื้นที่ครอบคลุมในพื้นที่อำเภอเมือง อำเภอหล่มสัก อำเภอหล่มเก่า จังหวัดเพชรบูรณ์ และอำเภอกอนสน จังหวัดชัยภูมิ เป็นอุทยานแห่งชาติลำดับที่ 5 เมื่อ พ.ศ. 2515 ของประเทศ มีเนื้อที่ทั้งหมดประมาณ 966 ตารางกิโลเมตร ลักษณะทางภูมิประเทศโดยทั่วไปเป็นเทือกเขาสูงทอดยาวผ่านจังหวัดชัยภูมิและจังหวัดเพชรบูรณ์ มียอดเขาภูผาจิตเป็นยอดเขาที่สูงที่สุดสูงถึง 1,271 เมตรจากระดับน้ำทะเล และยังเป็นแหล่งกำเนิดของลำน้ำหลายสาย เช่น แม่น้ำป่าสัก แม่น้ำพอง และห้วยน้ำพรหมสภาพป่าเป็นป่าผืนใหญ่ติดต่อกัน (เพ็ญภาทรพย์เจริญ, 2549) ประกอบด้วยสังคมป่าหลายชนิดเช่น ป่าดิบชื้น ป่าเบญจพรรณ ป่าสนเขา ป่าเต็งรัง และทุ่งหญ้า (สำนักอุทยานแห่งชาติกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, น.ป.ป.) อุทยานแห่งชาติน้ำหนาวมีความหลากหลายของพรรณไม้สูง และยังไม่มีการศึกษาความหลากหลายของพืชวงศ์นี้ในพื้นที่นี้มาก่อน มีเพียงรายงานของ Koyama (1981-2005) พิมพัลดิ พรพงศ์

รุ่งเรือง (2544) และสุคนธ์ทิพย์ บุญวงศ์ (2547) ศึกษาพืชวงศ์ทานตะวันบางเผ่าในประเทศไทย พบพืชวงศ์นี้ 69 สกุล 175 ชนิด ซึ่งในจำนวนนี้มี 15 สกุล 22 ชนิดที่มีรายงานจากเขตจังหวัดเพชรบูรณ์ แต่เนื่องจากการศึกษาดังกล่าวเป็นการศึกษาทั่วประเทศ ดังนั้น ข้อมูลของพรรณไม้ที่มีรายงานในจังหวัดเพชรบูรณ์นี้จึงเป็นแค่เพียงส่วนหนึ่งเท่านั้น ซึ่งคาดว่าการศึกษาความหลากหลายของพืชวงศ์นี้ในพื้นที่เฉพาะน่าจะพบพืชมากกว่าที่เคยมีรายงานไว้ และข้อมูลที่ได้จะเป็นการเพิ่มข้อมูลความหลากหลายของพรรณพืชในอุทยานแห่งชาติน้ำหนาว หรือเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้ต่อไป

วิธีการวิจัย

ศึกษาเอกสารและตัวอย่างพรรณไม้แห้งจากพิพิธภัณฑ์พืชต่างๆ ในประเทศไทย ออกสำรวจและเก็บตัวอย่างพืชในอุทยานแห่งชาติน้ำหนาว ระหว่างเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2550 ถึงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2551 โดยสำรวจเดือนละ 1-2 ครั้ง (ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่เหมาะสมกับการมีดอกของพืช) ศึกษาตามเส้นทางศึกษาธรรมชาติและเส้นทางเดินป่าใน ป่าดิบแล้ง ป่าไม้ก่อไม้สน ป่าเต็งรัง-ไม้สน ป่าเบญจพรรณ และพื้นที่เปิดโล่ง บันทึกข้อมูลทางนิเวศวิทยา และถ่ายภาพประกอบ จากนั้นระบุชื่อวิทยาศาสตร์และจัดทำเป็นตัวอย่างพรรณไม้แห้งเก็บไว้ที่พิพิธภัณฑ์พืช มหาวิทยาลัยขอนแก่น (KKU) และหอพรรณไม้ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช (BKFP)

ผลการวิจัย

จากการศึกษาความหลากหลายของพืชวงศ์ทานตะวันในอุทยานแห่งชาติน้ำหนาว พบ 31 สกุล 52 ชนิด (53 แทกซา) ดังตารางที่ 1 รูปที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 พืชวงศ์ทานตะวันในอุทยานแห่งชาติน้ำหนาว (SRF = ป่าดิบแล้ง (seasonal rain forest), LMP = ป่าไม้ก่อ-ไม้สน (lower montane pine-oak forest), PDD = ป่าเต็งรัง-ไม้สน (pine-deciduous dipterocarp forest), MDF = ป่าเบญจพรรณ (mixed deciduous forest) และ open area = บริเวณพื้นที่เปิดโล่ง

ลำดับ	ชื่อวิทยาศาสตร์	ชื่อไทย	นิเวศวิทยา					ระยะเวลาที่มีดอก
			SRF	LMP	PDD	MDF	open area	
1	<i>Adenostemma lavenia</i> (L.) Kuntze	เยี่ยวหนู				√		ก.ค.-ธ.ค.
2	<i>Ageratum conyzoides</i> L.	สาบแ้งสาบกา	√	√	√	√	√	ตลอดปี
3	<i>Anisopappus chinensis</i> (L.) Hook. et Arn.	ดาวเรืองภู			√			พ.ย.-ก.พ.
4	<i>Bidens biternata</i> (Lour.) Merr. et Sherff	ก้นจ้ำ	√	√	√	√	√	มี.ค.-ต.ค.
5	<i>B. pilosa</i> L.	ปิ่นนกลี้น		√	√	√	√	มิ.ย.-ม.ค.
6	<i>Blumea clarkei</i> Hook.f.	กะหนาด			√			ก.ค.-ก.พ.
7	<i>Bl. flava</i> DC.	ผักกาดโคก		√	√			ธ.ค.-พ.ค.
8	<i>Bl. fistulosa</i> (Roxb.) Kurz	ผักกาดขี้หมา				√		ก.ค.-ก.พ.
9	<i>Bl. hieracifolia</i> (D.Don) DC.	หนาดขน	√					ม.ค.-มี.ค.
10	<i>Bl. lacera</i> (Burm.f.) DC.	หนาดวัว		√	√			ธ.ค.-มี.ค.
11	<i>Bl. lanceolaria</i> (Roxb.) Druce	เขียงคำข้าง	√					พ.ย.-ก.ค.
12	<i>Bl. mollis</i> (D.Don) Merr.	ละอองเพชร				√		พ.ย.-เม.ย.
13	<i>Bl. napifolia</i> DC.	กระเม็งหอม				√		ก.ค.-มี.ค.
14	<i>Bl. paniculata</i> (Willd.) M.R. Almeida	สะโมะโพอ	√	√				ธ.ค.-มี.ค.
15	<i>Bl. sessiliflora</i> Decne.	ขนนึ่ง				√		พ.ย.-มี.ค.
16	<i>Bl. sinuata</i> (Lour.) Merr.	หญ้าขาว	√			√		ธ.ค.-มี.ค.
17	<i>Bl. virens</i> DC.	หนาดน้อย				√		พ.ย.-ก.พ.
18	<i>Chromolaena odorata</i> (L.) R.M.King et H.Rob.	สาบเสือ					√	พ.ย.-มี.ค.
19	<i>Conyza sumatrensis</i> (Retz.) E.Walker	ลูกลอยลม			√	√	√	ก.พ.-ต.ค.
20	<i>C. leucantha</i> (D.Don) Ludlow et P.H.Raven	-			√			ธ.ค.-ก.พ.
21	<i>Crassocephalum crepidioides</i> (Benth.) S.Moore	ผักค้ออ่อน	√	√	√	√		ตลอดปี

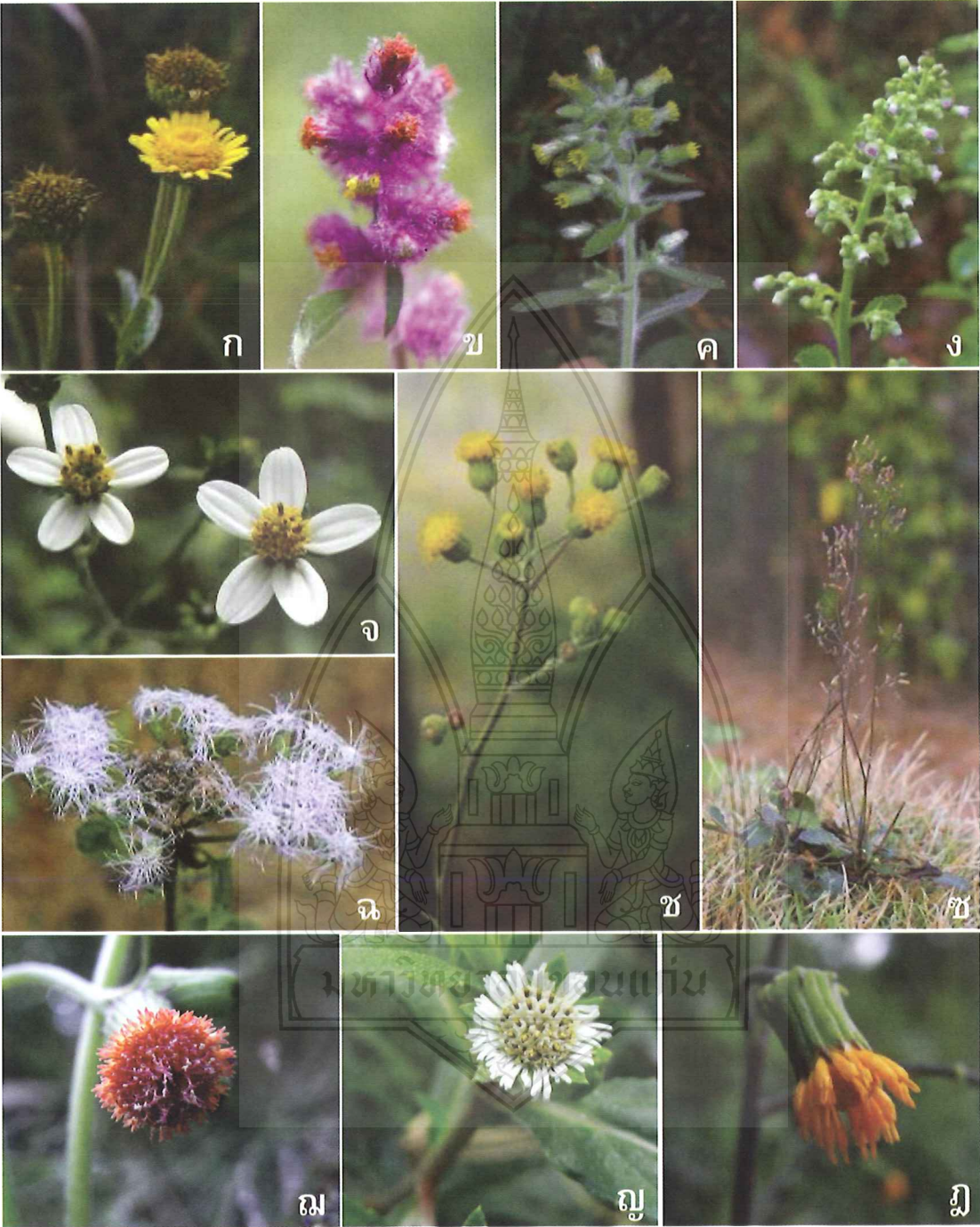
ตารางที่ 1 พืชวงศ์ทานตะวันในอุทยานแห่งชาติน้ำหนาว (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อวิทยาศาสตร์	ชื่อไทย	นิเวศวิทยา					ระยะเวลาที่มีดอก
			SRF	LMP	PDD	MDF	open area	
22	<i>Crepis chloroclada</i> Coll. et Hemsl.	-		√	√			มี.ค.-ก.ย.
23	<i>Cr. linea</i> (Vant.) Babcock	-		√	√			มี.ค.-ก.ย.
24	<i>Dichrocephala integrifolia</i> (L.f.) Kuntze	ผักชีค้อย		√	√			ตลอดปี
25	<i>Duhaldea cappa</i> (DC.) Anderb.	หนาดคำ				√		ต.ค.-ก.พ.
26	<i>Eclipta prostrata</i> (L.) L.	กระเม็ง					√	ส.ค.-มี.ค.
27	<i>Elephantopus scaber</i> L.	โคไม้รูปล้น	√			√		ก.ค.-ม.ค.
28	<i>Emilia sonchifolia</i> (L.) DC.	หางปลาช่อน					√	ตลอดปี
29	<i>Eupatorium</i> sp.	สาบม่วง					√	ตลอดปี
30	<i>Gochnatia decora</i> (Kurz) Cabrera	หมั่นส้อย				√		ก.พ.-เม.ย.
31	<i>Gynura integrifolia</i> Gagnep.	ว่านแดง			√		√	พ.ค.-พ.ย.
32	<i>G. pseudochina</i> (L.) DC.	ว่านมหากาฬ			√			ก.พ.-พ.ค.
33	<i>Lactuca parishii</i> Craib ex Hoss.	จิ้มกึ่ง	√		√	√		พ.ย.-มี.ค.
34	<i>Laggera alata</i> (D.Don) Sch.Bip. ex Oliver	หนาดวัว			√			ก.ค.-ก.พ.
35	<i>Launaea acaulis</i> (Hook.f.) Babcock ex Kerr	-			√			ม.ค.-มี.ค.
36	<i>Microglossa pyrifolia</i> Kuntz	ขาเป็ช			√			พ.ย.-เม.ย.
37	<i>Piloselloides hirsuta</i> (Forssk.) C. Jeffrey ex Cufod.	ว่านคางคก			√	√		พ.ค.-ม.ค.
38	<i>Pseudoconyza viscosa</i> (Mill.) D'Arcy	-	√	√	√		√	มี.ค.-พ.ค.
39	<i>Senecio namnaoensis</i> H. Koyama	ขางนาม		√	√			ธ.ค.-ม.ค.
40	<i>Sonchus arvensis</i> L.	-					√	มี.ค.-ธ.ค.
41	<i>Spilanthes acmella</i> Merr.	ผักคราดหัวแหวน					√	ตลอดปี
42	<i>S. paniculata</i> Wall. ex DC.	-					√	ตลอดปี
43	<i>Synedrella nodiflora</i> (L.) Gaertn.	ผักแครด	√			√	√	ตลอดปี
44	<i>Tridax procumbens</i> L.	ตีนตุ๊กแก					√	ตลอดปี
45	<i>Vernonia cumingiana</i> Benth.	พญารักป่า	√					ธ.ค.-เม.ย.

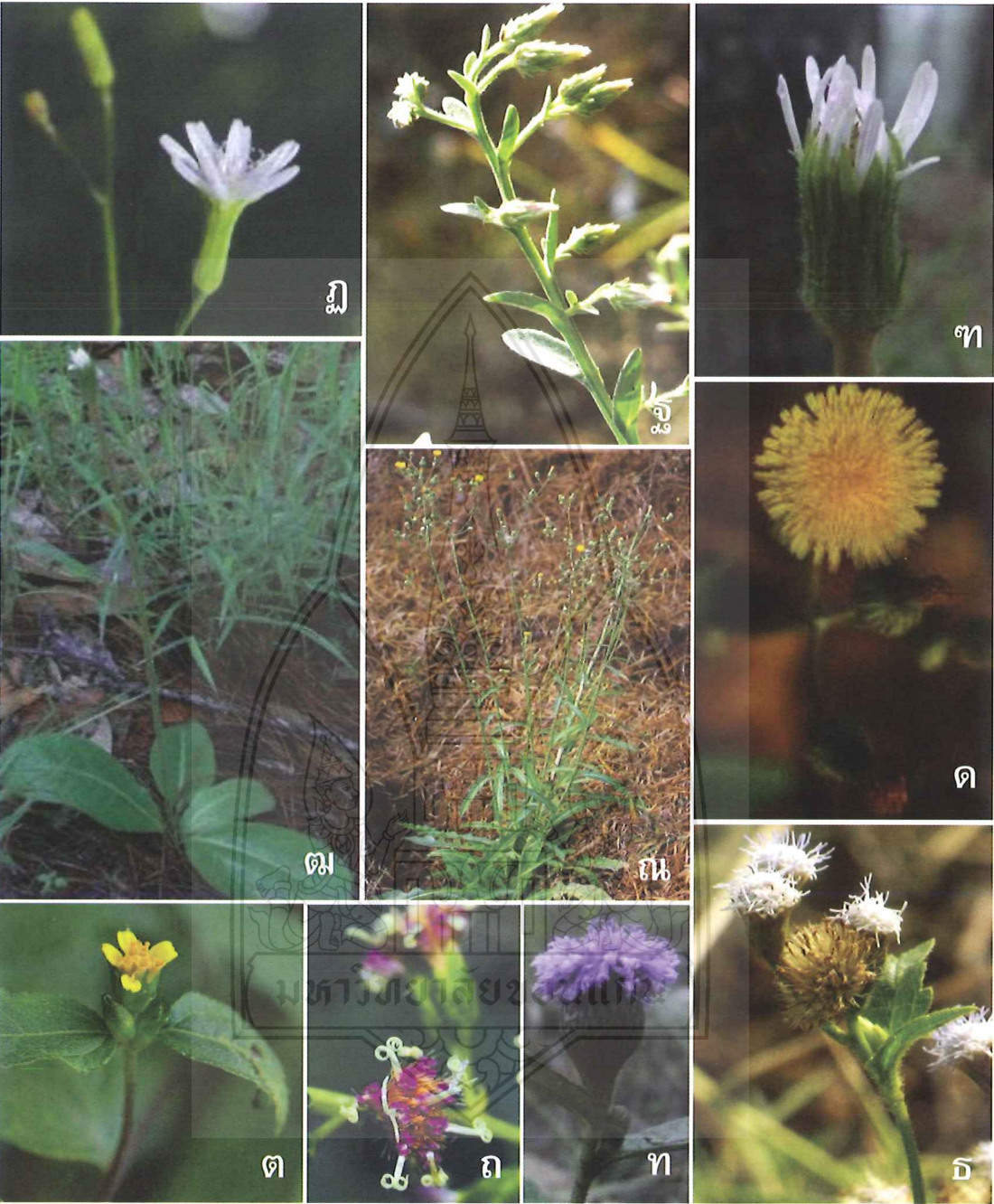
ตารางที่ 1 พืชวงศ์ทานตะวันในอุทยานแห่งชาติน้ำหนาว (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อวิทยาศาสตร์	ชื่อไทย	นิเวศวิทยา					ระยะเวลา ออกดอก
			SRF	LMP	PDD	MDF	open area	
46	<i>V. cinerea</i> (L.) Less. var. <i>cinerea</i>	หมอน้อย	√	√	√	√	√	ตลอดปี
47	<i>V. cinerea</i> (L.) Less. var. <i>montana</i> (C.B.Clarke) Koster	หมอน้อย	√			√		ต.ค.-ก.พ.
48	<i>V. eberhardtii</i> Gagnep.	พญารักป่า ใบเกลี้ยง	√			√		ธ.ค.-มี.ค.
49	<i>V. namnaoensis</i> H. Koyama	หนาดม่วง	√			√		ต.ค.-ธ.ค.
50	<i>V. silhetensis</i> (DC.) Craib ex Kerr	หญ้าหางนก เขียว		√	√			มี.ย.-ก.พ.
51	<i>V. squarrosa</i> (D.Don) Less.	เกียงพางช้าง, หนาดคำ		√	√			ต.ค.-เม.ย.
52	<i>Wedelia montana</i> (Blume) Boerl.	เบญจมาศ เครือ		√	√	√	√	พ.ค.-ธ.ค.
53	<i>Youngia japonica</i> (L.) DC.	-					√	พ.ค.-ธ.ค.





รูปที่ 1 พืชวงศ์ทานตะวันในอุทยานแห่งชาติน้ำหนาว: ก. *Anisopappus chinensis* ข. *Blumea fistulosa*
ค. *Bl. hieraciifolia* ง. *Bl. Mollis* จ. *Bidens pilosa* ฉ. *Chromolaena odorata* ช. *Senecio namnaoensis* ฌ. *Youngia japonica* ญ. *Crassocephalum crepidioides* ฎ. *Eclipta prostrate*
ฏ. *Gynura pseudochina*



รูปที่ 2 พืชวงศ์ทานตะวันในอุทยานแห่งชาติน้ำหนาว: ฉ. *Lactuca parishii* ฐ. *Laggera alata* ท. และ ณ. *Piloselloides hirsute* ณ. และ ด. *Sonchus arvensis* ต. *Synedrella nodiflora* ถ. *Vernonia eberhardtii* ท. *V. squarrosa* และ ธ. *Eupatorium* sp.

สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

จากผลการสำรวจพบพืชวงศ์ทานตะวันในอุทยานแห่งชาติน้ำหนาว 31 สกุล 52 ชนิด 53 แทกซา สกุลที่พบมากที่สุด คือ สกุล *Blumea* DC. มี 12 ชนิด และสกุล *Vernonia* Schreb. พบมากเป็นอันดับที่ 2 คือ พบ 7 ชนิด จากการเปรียบเทียบชนิดของพืชที่เคยมีรายงานในจังหวัดเพชรบูรณ์ โดย Koyama (1981-2005). พืชวงศ์ *พริกขี้หนู* (2544) และ *สุคนธ์ทิพย์* บุญวงศ์ (2547) พบพืชที่ยังไม่เคยมีรายงานในพื้นที่มาก่อน 29 ชนิด พืชส่วนใหญ่มีการกระจายพันธุ์กว้างพบทุกสภาพป่า ได้แก่ ป่าดิบแล้ง ป่าไม้ก่อ-ไม้สน ป่าเต็งรัง-ไม้สน ป่าเบญจพรรณ และบริเวณพื้นที่เปิดโล่ง พืชที่มีการกระจายพันธุ์แคบ คือ พบเฉพาะบางบริเวณและยังเป็นชนิดที่พบว่ามีจำนวนประชากรน้อยมาก คือ *ดาวเรืองภู* (*Anisopappus chinensis* (L.) Hook. et Arn.), *หนาดชน* (*Blumea hieraciifolia* (D. Don) DC.), *Crepis chloroclada* Coll. et Hemsl., *Cr. lignea* (Vant.) Babcock และ *หมั่นส้อย* (*Gochnatia decora* (Kurz) Cabrera) นอกจากนี้ยังพบพรรณไม้ประจำถิ่นของอุทยานแห่งชาติน้ำหนาว 2 ชนิด คือ (1) *ขางนาม* (*Senecio namnaoensis* H. Koyama) กระจายพันธุ์อยู่ทั่วไปในบริเวณสวนสนภู่มั่วซึ่งเป็นป่าเต็งรัง-ไม้สน และป่าไม้ก่อ-ไม้สน อยู่สูงจากระดับน้ำทะเลตั้งแต่ 819-869 เมตร (2) *หนาดม่วง* (*Vernonia namnaoensis* H. Koyama) กระจายพันธุ์แคบบนบริเวณเส้นทางศึกษาธรรมชาติภายในอุทยานฯ ซึ่งเป็นป่าดิบแล้งและป่าเบญจพรรณ การศึกษาครั้งนี้ไม่สามารถระบุชนิดพืชได้ 1 ชนิด คือ *Eupatorium* sp. ซึ่งเป็นวัชพืชต่างถิ่นที่กระจายพันธุ์กว้างและรวดเร็วเนื่องจากสามารถปรับตัวให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมได้ดีพบทั่วไปบริเวณพื้นที่เปิดโล่งหรือชายป่า ทางอุทยานแห่งชาติน้ำหนาวควรเตรียมพร้อมในการป้องกันการคุกคามของวัชพืชชนิดนี้ เพราะเกรงว่าจะมีผลต่อการกระจายพันธุ์ของพืชประจำถิ่นอื่นๆ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนและส่งเสริมการทำวิทยานิพนธ์สำหรับนักศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษารหัสทุน 51131106 และขอขอบคุณศูนย์วิจัยอนุกรมวิธานประยุกต์ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และเจ้าหน้าที่อุทยานแห่งชาติน้ำหนาวที่ให้ความช่วยเหลือในการศึกษาภาคสนามในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- พิมพวดิ พรพงศ์รุ่งเรือง. (2544). อนุกรมวิธานของพืชเผ่า Inuleae (Asteraceae) ในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาชีววิทยา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 121 หน้า.
- เพ็ญนภา ทรัพย์เจริญ. (2549). สมุนไพรในอุทยานแห่งชาติภาคอีสาน. กรุงเทพฯ: สามเจริญพานิชย์ (กรุงเทพฯ) จำกัด. หน้า 82-83.
- สุคนธ์ทิพย์ บุญวงศ์. (2547). อนุกรมวิธานของพืชเผ่า Vernonieae (Asteraceae) ในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาชีววิทยา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 132 หน้า.
- สำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ที่ 11. (พินิจโลก) ม.ป.ป. อุทยานแห่งชาติน้ำหนาว. กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, พินิจโลก.
- Bremer, K. (1994). *Asteraceae Cladistics & Classification*. Timber press, Oregon. 751 pp.
- Craib, W. G. and Kerr, A. F. G. (1932). *Florae Siamensis Enumeratio, A List of the Plants Known*. Vol. 2. Siam Society, Bangkok. 347 pp.
- Heywood, V. H., Brummitt, R.K., Culham, A. and Seberg, O. (2007). *Flowering Plant Families of the World*. Royal Botanic Gardens, Kew. 46-52.

- Koyama, H. (1981). Taxonomic Studies in the Compositae of Thailand 1. *Acta Phytotaxonomica et Geobotanica*. 32(1-4): 56-67.
- _____. (1983). Taxonomic Studies in the Compositae of Thailand 2. *Acta Phytotaxonomica et Geobotanica*. 34(1-3): 1-9.
- _____. (1984a). Taxonomic Studies in the Compositae of Thailand 3. *Acta Phytotaxonomica et Geobotanica*. 35(1-3): 49-58.
- _____. (1984b). Taxonomic Studies in the Compositae of Thailand 4. *Acta Phytotaxonomica et Geobotanica*. 35(4-6): 113-125.
- _____. (1985a). Taxonomic Studies in the Compositae of Thailand 5. *Acta Phytotaxonomica et Geobotanica*. 36(1-3): 59-68.
- _____. (1985b). Taxonomic Studies in the Compositae of Thailand 6. *Acta Phytotaxonomica et Geobotanica*. 36(4-6): 167-172.
- _____. (1986). Taxonomic Studies in the Compositae of Thailand 7. *Acta Phytotaxonomica et Geobotanica*. 37(4-6): 111-116.
- _____. (1988). Taxonomic Studies in the Compositae of Thailand 8. *Acta Phytotaxonomica et Geobotanica*. 39(4-6): 151-163.
- _____. (1989). Taxonomic Studies in the Compositae of Thailand 9. *Bulletin of the Science Museum Series B (Botany)*. 15(3): 105-110.
- _____. (1993). Taxonomic Studies in the Compositae of Thailand 10. *Acta Phytotaxonomica et Geobotanica*. 44(1): 29-34.
- _____. (1997). Taxonomic Studies in the Compositae of Thailand 11. *Bulletin of the Science Museum Series B (Botany)*. 23(4): 159-166.
- _____. (1998). Taxonomic Studies in the Compositae of Thailand 12. *Bulletin of the Science Museum Series B (Botany)*. 24(3): 109-115.
- _____. (2001). Taxonomic Studies in the Compositae of Thailand 13. *Bulletin of the Science Museum Series B (Botany)*. 27(4): 133-148.
- _____. (2002). Taxonomic Studies in the Compositae of Thailand 14. *Bulletin of the Science Museum Series B (Botany)*. 28(2): 49-60.
- _____. (2003). Taxonomic Studies in the Compositae of Thailand 15. *Bulletin of the Science Museum Series B (Botany)*. 29(1): 15-22.
- _____. (2004). Taxonomic Studies in the Compositae of Thailand 16. *Bulletin of the Science Museum Series B (Botany)*. 30(1): 21-34.
- _____. (2005). Taxonomic Studies in the Compositae of Thailand 17. *Bulletin of the Science Museum Series B (Botany)*. 31(2): 67-78.
- Panero, J. L. and Funk, V. A. (2002). Toward a phylogenetic subfamilial classification for the Compositae (Asteraceae). *Proceedings of the Biological Society of Washington*. 115(4): 760-773.
- Rahman, A. H. M. M., Alam, M. S., Khan, S. K., Ahmed, F., Islam, A. K. M. R. and Rahman, M. M. (2008). Taxonomic Studies on the Family Asteraceae (Compositae) of the Rajshahi Division. *Agriculture and Biological Sciences*. 4(2): 134-140.





การกำจัดโลหะหนักที่มีพิษในน้ำทิ้งด้วยถังบำบัดแบบอยู่กับที่

Removal of Toxic Heavy Metals from Wastewater by Onsite Treatment Plant

รัตนา มหาชัย^{1*} ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง¹ ชุติมา คุญ์สมุทร¹
 นาถ ภูวงศ์ผา¹ และ ชาญเขาว์ พรหมราษฎร์¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการกำจัดอออนแคดเมียม (Cd^{2+}) ตะกั่ว (Pb^{2+}) แมงกานีส (Mn^{2+}) โครเมียม (Cr^{3+}) โปรท (Hg^{2+}) และอาร์ซีนิก (As^{3+}) จากสารละลายและน้ำทิ้งโดยวิธีการตกตะกอนและการดูดซับ เริ่มแรกทำการตกตะกอน อออนเหล่านี้ที่พีเอช 2 ถึง 10 พบว่า เมื่อสารละลายมีพีเอชมากขึ้นอออนโลหะจะตกตะกอนมากขึ้น ที่พีเอชมากกว่าหรือเท่ากับ 6 ได้ทำการหาค่าความจุการดูดซับของโลหะแต่ละตัวที่พีเอช 6 8 และ 10 ด้วยวัสดุดูดซับถ้ำ แกลบ ขี้เถ้า และดินขาว โดยวิธีแบบดั้งแช่ ค่าการดูดซับคำนวณโดยอาศัยฟรอยด์คลิคไอโซเทอร์ม พบว่า ค่าการดูดซับสูงสุดของโลหะแต่ละตัวดังนี้ อออนแคดเมียมให้ค่า 17.92 มิลลิกรัม/กรัม ที่พีเอช 6 โดยใช้วัสดุขี้เถ้า อออน ตะกั่วให้ค่า 15.54 มิลลิกรัม/กรัมที่พีเอช 6 โดยใช้วัสดุขี้เถ้า อออนแมงกานีสให้ค่า 6.17 มิลลิกรัม/กรัมที่พีเอช 8 โดยใช้วัสดุขี้เถ้า อออนโครเมียมให้ค่า 6.17 มิลลิกรัม/กรัม ที่พีเอช 8 โดยใช้วัสดุขี้เถ้า อออนโปรทให้ค่า 15.60 มิลลิกรัม/กรัมที่พีเอช 10 โดยใช้วัสดุถ้ำแกลบ อออนโปรทให้ค่า 3.65 มิลลิกรัม/กรัมที่พีเอช 8 โดยใช้วัสดุถ้ำแกลบ และอออนอาร์ซีนิกให้ค่า 6.14 มิลลิกรัม/กรัมที่พีเอช 6 โดยใช้วัสดุถ้ำแกลบ และได้ออกแบบถังบำบัดติดตั้งที่อำเภอนบพ จังหัดขอนแก่น ลักษณะประกอบด้วยถังพักและถังฝังดิน 2 ชุด บรรจุวัสดุถ้ำแกลบ ถังทั้งหมดต่อแบบอนุกรม น้ำทิ้งเทใส่ถังพักจะปรับเป็นเบสก่อน แล้วส่วนใสจะไหลสู่ถังกลางของถังชุดที่ 1 น้ำจะซึมผ่านถ้ำแกลบ และล้นไป ยังถังชุดที่ 2 น้ำล้นจากถังชุดที่ 2 จะเก็บมาวิเคราะห์ค่าปริมาณออกซิเจนทางชีวภาพ (BOD) และค่าปริมาณ ออกซิเจนทางเคมี (COD) พบว่าค่าที่ได้ลดลงร้อยละ 99.02 99.71 และ 98.93 ตามลำดับ อออนของโลหะทุกตัว ลดลงร้อยละ 100 และทุกค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง

¹ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

* Corresponding Author, E-mail : ratmah1@kku.ac.th

Abstract

In this study, the removal of cadmium ion (Cd^{2+}), lead ion (Pb^{2+}), manganese ion (Mn^{2+}), chromium ion (Cr^{3+}), mercury ion (Hg^{2+}), and arsenic ion (As^{3+}) from aqueous solutions and wastewater by precipitation and adsorption was investigated. The metal ion-precipitation was carried out by varying pH of solutions from 2 to 10. The results indicated that precipitation increased when pH was increased, in particular more than or equal pH 6. A batch experiment was conducted to demonstrate the sorption capacity of each metal at pH 6, 8 and 10 using different sorbents, including rice husk ash, rice ash and kaolin. The adsorption data were analysed by Freundlich isotherm. The highest sorption capacity of each metal at suitable pH and sorbent was Cd^{2+} 17.92 mg/g at pH 6 using fly rice ash, Pb^{2+} 15.54 mg/g at pH 6 using fly rice ash, Mn^{2+} 6.17 mg/g at pH 8 using fly rice ash, Cr^{3+} 15.60 mg/g at pH 10 using rice husk ash, Hg^{2+} 3.65 mg/g at pH 8 using rice husk ash and As^{3+} 6.14 mg/g at pH 6 using rice husk ash. On site treatment plant was constructed at Chon-na-bot District Khon Kaen Province. The treatment plant was consisted of a reservoir and 2 chambers containing rice husk ash (sited underground) with series of connection. Wastewater was poured into the reservoir and adjusted to alkali pH. After sedimentation, the solution was allowed to flow through the central pipe and rice husk ash permeably by up ward flowing. The effluent passing through the overflow side pipe from the first chamber to the central pipe of the second chamber was collected and quantified its properties. The color unit, BOD, COD values were decreased by 99.02%, 99.71% and 98.93%, respectively, whereas the amounts of Cd^{2+} , Mn^{2+} , Cr^{3+} , Hg^{2+} and As^{3+} were removed from wastewater by 100%. Thus this treatment plant was practically efficient for metal ion-removal with passing over the standard of industrial regulations.

คำสำคัญ : อีออนของโลหะหนักที่มีพิษ กำจัด และเถ้าแกลบ

Keyword : Some heavy toxic metals, Removal, Rice husk ash

บทนำ

ปัญหาน้ำทิ้งจากชุมชนส่วนใหญ่ไม่มีการบำบัด ชาวบ้านจะเทลงท่อระบายน้ำและน้ำทิ้งจะไหลลงคูคลอง หรือแม่น้ำ ทำให้น้ำเกิดการเน่าเสียดังที่เป็นข่าวอยู่เสมอ เช่น ปัญหาน้ำเน่าที่ห้วยเหี้ยด และแก่งละว้า อำเภอชนบท จังหวัดขอนแก่น ปัญหาการสะสมของตะกั่วที่ห้วยคลิสต์ จังหวัดกาญจนบุรี ปัญหาของแคดเมียมที่บ้านแม่ดาว อำเภอแม่สวด จังหวัดตาก เป็นต้นปัญหาน้ำทิ้งที่มาจากโลหะหนักที่มีพิษปนเปื้อนไม่สามารถถูกย่อยสลายตามธรรมชาติเหมือนสารอินทรีย์ เป็นสาเหตุหนึ่งทำให้น้ำเน่าเสีย และเกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม คณะวิจัยจึงมีแนวคิดว่าจะนำวัสดุ

เถ้าแกลบมากำจัดโลหะหนักที่มีพิษในน้ำทิ้ง เนื่องจากวัสดุเถ้าแกลบมีองค์ประกอบซิลิคอนออกไซด์และคาร์บอนอยู่ร้อยละ 43.85 และ 53.00 ตามลำดับ มีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ 64.66 เมตร² ต่อกรัม ตามแลงเมียร์ จากภาพถ่าย SEM พบว่าพื้นผิวมีรูพรุนขนาดเล็กและใหญ่จำนวนมาก (รัตนamahach และคณะ, 2541) นำมาดูดซับ Cu^{2+} โดยมีค่าความจุการดูดซับเท่ากับ 1.26 และ 3.45 มิลลิกรัม/กรัม ในแบบดั้งและต่อเนื่อง ตามลำดับ (รัตนamahach และคณะ, 2545) นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดเหล็กในน้ำได้คืนได้ร้อยละ 20 (รัตนamahach และคณะ, 2548) นำมาใช้บำบัดเสีย้อมโดยสามารถลดค่าปริมาณสี ค่า

COD ค่า BOD ได้ร้อยละ 94.74 93.34 และ 94.84 ตามลำดับ (รัตนา มหัชย และคณะ, 2552) ดังนั้น คณะวิจัยจึงคิดออกแบบระบบบำบัดแบบง่าย ต้นทุนต่ำและใช้วัสดุธรรมชาติในท้องถิ่น โดยอาศัยหลักการดูดซับด้วยวัสดุที่มีความพรุนร่วมกับการตกตะกอนเพื่อกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้ง

วัตถุประสงค์

นำวัสดุธรรมชาติ ได้แก่ เถ้าแกลบ ขี้เถ้าและดินขาวมาใช้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักที่มีพิษบางตัว ได้แก่ แคดเมียม (Cd^{2+}) ตะกั่ว (Pb^{2+}) แมงกานีส (Mn^{2+}) โครเมียม (Cr^{3+})ปรอท (Hg^{2+}) และอาร์เซนิก (As^{3+}) ในตัวอย่างน้ำพร้อมทั้งออกแบบระบบบำบัดในห้องปฏิบัติการ และนำไปใช้ในภาคสนาม ติดตั้งในชุมชนเป้าหมายในจังหวัดขอนแก่น

วิธีการดำเนินงาน

การดำเนินงานมีทั้งหมด 4 ขั้นตอน

1. ศึกษาการกำจัดโลหะโดยวิธีการตกตะกอน

นำน้ำตัวอย่างสังเคราะห์มาปรับพีเอช 4 6 8 และ 10 ด้วย CaO หรือ NaOH แล้วกรองและนำ

สารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะแต่ละตัวที่เหลือ

2. การศึกษาหาค่าความจุของการดูดซับ

นำตัวอย่างน้ำสังเคราะห์เข้มข้นอยู่ในช่วง 5-100 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ที่ พีเอช 6 8 และ 10 ใส่ในวัสดุแต่ละชนิด (เถ้าแกลบ ขี้เถ้า และดินขาว)หนัก 1 กรัม เป็นเวลา 3 วัน ปิดภาชนะมิดชิดแล้วนำน้ำตัวอย่างหลังการดูดซับไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะที่เหลือแต่ละตัว

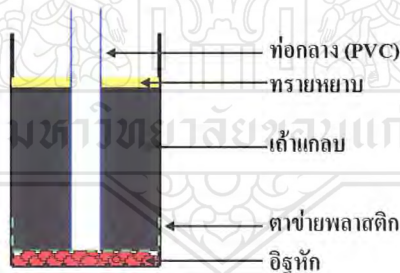
3. ศึกษาการออกแบบถังบำบัดโลหะในห้องปฏิบัติการ

การเตรียมวัสดุดูดซับ

วัสดุเถ้าแกลบ ดินขาว และขี้เถ้า นำมาบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช

การบรรจุวัสดุ

ชั้นล่างสุดบรรจุหินแล้ววางตาข่ายกั้นไว้ วางท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร ลงกึ่งกลางขวด บรรจุวัสดุดูดซับหนัก 10 กรัม ปิดด้านบนของวัสดุด้วยทราย ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การบรรจุวัสดุในภาชนะ

วิธีการ

ภาชนะที่บรรจุน้ำตัวอย่างจะปล่อยให้น้ำไหลต่อจากหลอดประมาณ 0.2 มิลลิลิตร/นาที เพื่อให้มีเวลาการคงอยู่ (retention time) ในคอลัมน์ประมาณ 3 วัน ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 600 มิลลิลิตร น้ำจะไหลผ่าน

ท่อกกลางและซึมขึ้นผ่านวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด เมื่อน้ำขึ้นจะไหลออกทางท่อด้านข้าง เก็บน้ำตัวอย่างน้ำขึ้นไปวิเคราะห์ตามวิธีการดังตารางที่ 1 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์และวิธี/เครื่องมือ

พารามิเตอร์	วิธี / เครื่องมือ *
- pH	พีเอชมิเตอร์
- ค่าการนำไฟฟ้า	คอนดักติวิตีมิเตอร์
- ค่าปริมาณออกซิเจนทางชีวภาพ (BOD)	บ่มในตู้อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสเวลา 5 วัน
- ค่าปริมาณออกซิเจนทางเคมี (COD)	วิธีโปแตสเซียมไดโครเมท
- โลหะ Pb Cd Mn Cr	อะตอมมิกแอคซอร์พชันสเปกโทรเมทรี
- โลหะ Hg As	วิธีโกลด์เวเปอร์และไฮโดรไรด์

* ตามคู่มือ Standard Methods for Water and Wastewater Examination Version 2005

4. การออกแบบถังบำบัดโลหะในภาคสนาม

เลือกสถานที่เพื่อติดตั้งถังบำบัดโลหะที่

ปนเปื้อนในตัวอย่างน้ำสีข้มเคมี ที่บ้านนางหนูพัน

แจ่มจันทร์ อยู่บ้านเลขที่ 25 หมู่ที่ 1 ตำบลชนบท อำเภอ

ชนบท จังหวัดขอนแก่น

อุปกรณ์

(1) ท่อเกรอะ (ปูน) เส้นผ่าศูนย์กลาง 80

เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร 6 ท่อ

(2) ท่อพลาสติก (พีวีซี) ขนาดเส้นผ่า

ศูนย์กลาง 4 นิ้ว ยาว 160 เซนติเมตร 2 ท่อ (ใช้ทำ

ท่อกกลาง)

(3) ท่อพลาสติก (พีวีซี) ขนาดเส้นผ่า

ศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว ยาว 1 เมตร 1 ท่อ (ใช้น้ำน้ำเสีย

ลงสู่ท่อกกลางของถังที่ 2) ท่อพลาสติกผ่าศูนย์กลาง

1.5 นิ้ว ยาว 1 เมตร 2 ท่อ เจาะรูขนาดเล็กเป็นแนว

เดียว กันระยะห่างรูประมาณ 3 เซนติเมตร (เพื่อกระจาย

น้ำเสียจากถังที่ 2 ลงสู่พื้นดิน ท่อนี้ฝังอยู่ใต้ดินระดับ

30 เซนติเมตร)

(4) ท่อพลาสติก (พีวีซี) ขนาดเล็กผ่า

ศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว ยาว 2 เมตร 1 ท่อ
- (5) ตะแกรงตาข่ายพลาสติก 2 ผืนๆ ละ

1 x 1 เมตร

(6) ภาชนะพักน้ำทิ้งทำด้วยสแตนเลส

รูปทรงกรวยกว้าง x ยาว x สูง = 50 x 50 x 50

เซนติเมตร ปลายล่างมีท่อต่อและวาล์วสปีด-เปิดเพื่อไข

ตะกอนทิ้ง ด้านข้างมีท่อยาวพร้อมก๊อกรู้เพื่อต่อลงท่อ

กลางของถังใบที่ 1

วัสดุ

(1) ถังแกลบเผา ประมาณ 300 กิโลกรัม

(2) ทรายหยาบ ประมาณ 120 กิโลกรัม

(3) หินก้อนเล็กๆ ประมาณ 120 กิโลกรัม

(4) สารละลายเบส NaOH เพิ่มขึ้น

ร้อยละ 50

ทำการก่อสร้างระบบบำบัดโดยมีถังพักบน

ดินแล้วต่อท่อที่มีก๊อกรู้ควบคุมให้น้ำไหลลงท่อกกลางของ

ถังบำบัดผิวดิน 2 ชุด ที่บรรจุถังแกลบ (เหมือนรูป

ที่ 1) ต่อแบบอนุกรมกัน ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ภาพถ่ายจริงถึงบำบัดโลหะบ้านนางหนูพัน แจ่มจันทร์

วิธีการบำบัด

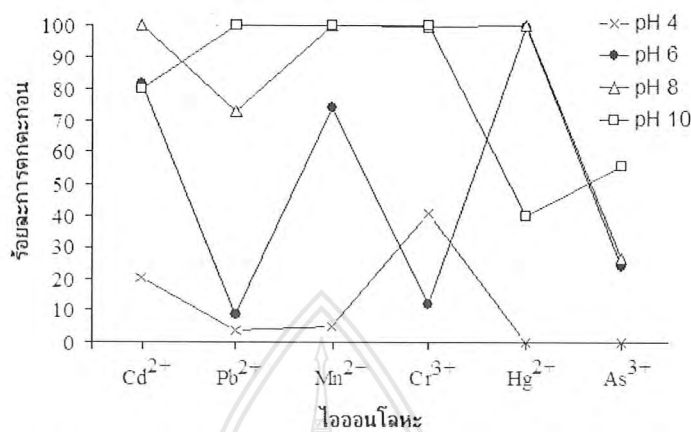
เทน้ำที่ต้องการบำบัดลงในถังพักแล้วเติมปูนขาว (หรือโซดาไฟ) ลงไปจนน้ำมีฤทธิ์เป็นด่าง คนน้ำรอให้ตกตะกอนก่อน แล้วปล่อยน้ำให้ออกทางท่อด้านข้างซึ่งมีก๊อปรับความเร็วลงกลางของถังชุดที่ 1 อย่างช้าๆ น้ำจะไหลออกปลายท่อ น้ำจะไหลจากถังพักลงที่กลางของถังชุดที่ 1 โดยจะซึมผ่านวัสดุเถ้าแกลบขึ้นมาและล้นออกทางท่อด้านข้างของถังชุดที่ 1 ลงสู่ที่กลางถังชุดที่ 2 น้ำจะซึมจากล่างขึ้นบนผ่านวัสดุ แล้วล้นออกทางท่อต่อด้านข้าง น้ำล้นกระจายลงผิวดิน

ผลการทดลอง

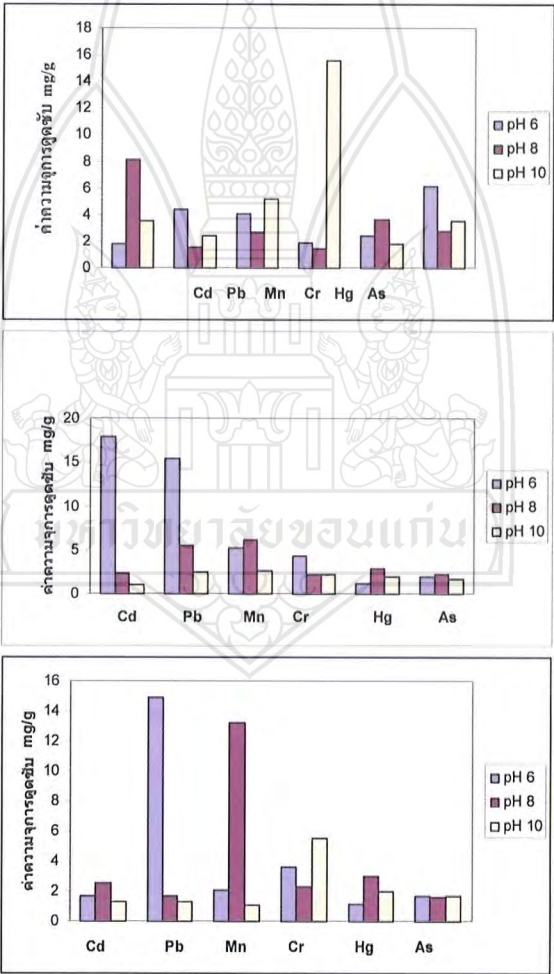
ผลการทดลองการตกตะกอนและค่าความจุ

การดูดซับ

จากการศึกษาการตกตะกอนไอออนของโลหะแคดเมียม (Cd^{2+}) ตะกั่ว (Pb^{2+}) แมงกานีส (Mn^{2+}) โครเมียม (Cr^{3+}) ปรอท (Hg^{2+}) และอาร์ซีนิก (As^{3+}) ในสารละลาย ในช่วงพีเอช 2 ถึง 10 พบว่าตั้งแต่พีเอช 4 ขึ้นไป ไอออนโลหะเหล่านี้เริ่มตกตะกอนในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ โดยไอออนของโลหะแต่ละชนิดจะตกตะกอนได้มากขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้นและมีค่าร้อยละการตกตะกอนแตกต่างกัน ดังรูปที่ 3 ดังนั้นจึงเลือกพีเอช 6.8 และ 10 เพื่อศึกษาหาค่าความจุของการดูดซับไอออนของโลหะแต่ละตัวในวัสดุดูดซับทั้งสามชนิด ได้แก่ เถ้าแกลบ ขี้เถ้า และดินขาว ในแต่ละคู่ ผลของค่าความจุของการดูดซับดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 แสดงร้อยละการตกตะกอนของไอออนโลหะที่พีเอชต่าง ๆ



รูปที่ 4 เปรียบเทียบค่าความจุการดูดซับไอออนโลหะที่พีเอชต่าง ๆ ในวัสดุ (ก) เปลือกไข่ (ข) ดินขาว

จากรูปที่ 4 ได้ข้อสรุปว่า วัสดุเถ้าแกลบให้ค่าการดูดซับไอออนของโลหะ Cr Hg และ As สูงสุด และวัสดุขี้เถ้าให้ค่าการดูดซับไอออนของโลหะ Cd Pb และ Mn สูงสุด จึงสรุปได้ว่าวัสดุเถ้าแกลบและขี้เถ้าเหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะในน้ำทิ้ง

ผลการทดลองระบบบำบัดในห้องปฏิบัติการ
การออกแบบถังบำบัดโลหะในห้องปฏิบัติการต้องการให้อิออนของโลหะมีการตกตะกอนก่อนแล้วจึงทำการดูดซับกับน้ำตัวอย่างสี่ย้อมเคมีแล้ววิเคราะห์หาปริมาณโลหะ พบว่า ค่าปริมาณโลหะในน้ำสี่ย้อมมีค่าน้อยมาก จึงเติมไอออนของโลหะทั้ง 6 ตัวเพิ่มลงไปแต่ละตัวเข้มข้นประมาณ 1000 มิลลิกรัม/ลิตร เพื่อตรงตามวัตถุประสงค์ของโครงการ แล้วทำการวิเคราะห์

หาพารามิเตอร์น้ำ ตัวอย่างหลังเติมไอออนของโลหะลงไป ได้แก่ พีเอช ซี ค่า BOD ปริมาณโลหะ Cd^{2+} Pb^{2+} Mn^{2+} Cr^{3+} Hg^{2+} และ As^{3+} ของตัวอย่างน้ำก่อนเข้าระบบ แล้วทำการปรับพีเอชสารละลายเป็นเบสมีค่าเท่ากับ 8 แล้วทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์น้ำอีกครั้งพบว่า ไอออนของโลหะส่วนมากตกตะกอนออกไปมีค่ามากกว่าร้อยละ 50 ยกเว้นปรอทและอาร์ซีนิกที่ตกตะกอนน้อย สอดคล้องกับงานวิจัยเดิม (รัตนา มหาชัย และคณะ, 2545, 2552) เมื่อนำน้ำตัวอย่างมาบำบัดในระบบแบบคอลัมน์ภายในบรรจุวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด และให้น้ำตัวอย่างไหลลงท่อกลางและซึมผ่านวัสดุขึ้นมาและทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์น้ำอีกครั้ง ผลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์น้ำหลังบำบัดด้วยระบบที่ออกแบบในห้องปฏิบัติการ

พารามิเตอร์	ค่าปริมาณ ก่อนเข้า ระบบ	วัสดุเถ้าแกลบ			วัสดุขี้เถ้า			วัสดุดินขาว		
		ค่า ลงเหลือ	ค่าดูดซับ	ร้อยละ	ค่า ลงเหลือ	ค่าดูดซับ	ร้อยละ	ค่า ลงเหลือ	ค่า ดูดซับ	ร้อยละ
			มิลลิกรัม/ กรัม	ร้อยละ		มิลลิกรัม/ กรัม	ร้อยละ		มิลลิกรัม/ กรัม	ร้อยละ
พีเอช	8.20	8.50	-	-	9.80	-	-	8.42	-	-
ปริมาณซี (มิลลิกรัม/ลิตร)	480.00	1.40	478.60	99.71	0.00	480.00	100.00	0.40	479.60	99.92
ค่า BOD (มิลลิกรัม/ลิตร)	452.00	80.25	371.75	82.28	40.15	411.85	91.12	72.12	379.88	84.04
ค่า COD (มิลลิกรัม/ลิตร)	326.00	150.12	175.88	53.95	145.72	180.25	51.29	132.00	194.00	59.51
โลหะ Cd (มิลลิกรัม/ลิตร)	224.00	26.59	197.41	88.13	7.50	216.50	96.65	5.62	218.38	97.49
โลหะ Pb (มิลลิกรัม/ลิตร)	215.90	102.99	112.01	51.88	87.59	128.31	59.43	91.50	123.50	57.20
โลหะ Mn (มิลลิกรัม/ลิตร)	234.90	11.50	223.40	95.10	11.79	223.11	94.98	64.15	170.75	72.69
โลหะ Cr (มิลลิกรัม/ลิตร)	52.50	36.55	15.95	30.38	31.35	21.15	40.29	22.25	30.25	57.62
โลหะ Hg (มิลลิกรัม/ลิตร)	341.00	309.10	31.90	9.35	321.90	19.10	5.60	315.50	25.50	7.48
โลหะ As (มิลลิกรัม/ลิตร)	860.00	781.00	79.00	9.19	690.00	170.00	19.77	778.00	82.00	9.53

จากตารางที่ 2 น้ำหลังบำบัดอาศัยการดูดซับได้ข้อสรุปว่าวัสดุเถ้าแกลบขี้เถ้าและดินขาวดูดซับสีได้ลดลงมีค่าเท่ากับร้อยละ 99.71 100 และ 99.92 ตามลำดับ ค่า BOD ลดลงร้อยละ 82.28 ถึง 91.12 และค่า COD ลดลงร้อยละ 51.29 ถึง 59.51 สำหรับโลหะ Cd^{2+} Pb^{2+} Mn^{2+} และ Cr^{3+} มีค่าลดลง ร้อยละ 30.38 ถึง 95.51 40.29 ถึง 96.65 และ 57.62 ถึง 97.47 ในวัสดุเถ้าแกลบ ขี้เถ้า และดินขาว ตามลำดับ ส่วนโลหะ Hg^{2+} As^{3+} มีค่าลดลงร้อยละ 9.35 9.19 และ 5.60 19 72 และ 7.48 9.53 ในวัสดุทั้งสามตามลำดับ

ผลการทดลองระบบบำบัดในภาคสนาม

ทำการออกแบบถังบำบัดโลหะที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งในภาคสนาม วัตถุประสงค์เดิมต้องการติดตั้งระบบให้กับงานชุบโลหะ แต่ไม่ได้รับการตอบรับ จึงเปลี่ยนมาติดตั้งระบบกับน้ำทิ้งสีย้อมฟอกเส้นไหมที่มีไอออนของโลหะปนเปื้อนอยู่ ทำการติดตั้งที่บ้านนาง

หนูพัน แจ่มจันทร์ บ้านเลขที่ 25 หมู่ที่ 1 ตำบลชนบท อำเภอนบพ จังหัดขอนแก่น ดังรูปที่ 2 การออกแบบมีถึงพักบนดินทำด้วย สแตนเลสรูปกรวย ปลายล่างมีก๊อกไขตะกอนทิ้ง เมื่อปรับสภาพน้ำทิ้งให้เป็นเบสน้ำส่วนสีจะไหลผ่านท่อด้านข้างลงในท่อกกลางของถังบำบัดที่บรรจุวัสดุเถ้าแกลบการไหลของน้ำทิ้งจะไหลลงท่อกกลางและน้ำจะซึมผ่านวัสดุเถ้าแกลบขึ้นมาล้นลงสู่ถังบำบัดถังที่ 2 ผลการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 3 พารามิเตอร์น้ำดื่มจากถังที่ 2 ได้แก่ ค่าสี ค่า BOD และค่า COD ลดลงร้อยละ 99.02 99.71 และ 98.93 ตามลำดับ ส่วนโลหะ Cd^{2+} Pb^{2+} Mn^{2+} Cr^{3+} Hg^{2+} และ As^{3+} ลดลงร้อยละ 100 สอดคล้องกับงานวิจัยเดิม (รัตน นมราช และคณะ, 2552) และพบว่า น้ำทิ้งหลังบำบัดทุกพารามิเตอร์ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม และเมื่อวัสดุดูดซับหมดประสิทธิภาพ เราสามารถเปลี่ยนวัสดุดูดซับเถ้าแกลบได้โดยการรื้อออกและทำการบรรจุวัสดุลงไปใหม่ ชาวบ้านสามารถดำเนินการได้เอง

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างจากถังบำบัดในภาคสนาม

พารามิเตอร์	ค่าปริมาณก่อนบำบัด	ค่าปริมาณหลังตกตะกอน	ค่าปริมาณจากระบบบำบัด	ร้อยละการลดลง	$\sqrt{\text{ค่าผ่าน}}$ $\times = \sqrt{\text{ค่าผ่าน}}$	เกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม
pH	7.51	8.97	8.13	-	$\sqrt{}$	5.5-9.0
ปริมาณสี (มิลลิกรัม/กรัม)	369.31	261.10	3.63	99.02	$\sqrt{}$	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
ค่า BOD (มิลลิกรัม/กรัม)	449.91	372.62	1.31	99.71	$\sqrt{}$	ไม่เกิน 20-200 มิลลิกรัม/ลิตร
ค่า COD (มิลลิกรัม/กรัม)	540.40	400.75	5.78	98.93	$\sqrt{}$	ไม่เกิน 400 มิลลิกรัม/ลิตร
โลหะ Cd (มิลลิกรัม/กรัม)	0.6120	nil	nil	100	$\sqrt{}$	ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัม/ลิตร
โลหะ Pb (มิลลิกรัม/กรัม)	0.9170	nil	nil	100	$\sqrt{}$	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร
โลหะ Mn (มิลลิกรัม/กรัม)	0.0508	nil	nil	100	$\sqrt{}$	ไม่เกิน 5 มิลลิกรัม/ลิตร
โลหะ Cr (มิลลิกรัม/กรัม)	2.2000	nil	nil	100	$\sqrt{}$	ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัม/ลิตร
โลหะ Hg (มิลลิกรัม/กรัม)	nil	nil	nil	100	$\sqrt{}$	ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัม/ลิตร
โลหะ As (มิลลิกรัม/กรัม)	nil	nil	nil	100	$\sqrt{}$	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัม/ลิตร

หมายเหตุ nil ตรวจไม่พบ

บทสรุปและวิจารณ์

จากการศึกษาการจัดโลหะในน้ำทิ้งทำแบบ 2 ขั้นตอนร่วมกัน ได้แก่ การตกตะกอนและการดูดซับ ได้ข้อสรุปเพื่อใช้เป็นแนวทางได้ดังนี้ (1) ถ้าน้ำทิ้งมีไอออนของโลหะมีความเข้มข้นหรือปริมาณมาก (< 500 มิลลิกรัม/ลิตร) และมีไอออนของโลหะเดียวและมีการปนเปื้อนของไอออนของโลหะอื่นๆ อยู่ด้วย ควรปรับสภาพน้ำทิ้งเป็นเบสก่อน แล้วแยกตะกอนออก นำน้ำทิ้งส่วนใสทำการกำจัดโดยอาศัยการดูดซับด้วยวัสดุที่เหมาะสม (2) ถ้าน้ำทิ้งมีไอออนของโลหะผสมหลายตัว และมีปริมาณมาก ควรปรับสภาพน้ำทิ้งเป็นเบสก่อนเช่นกันและนำน้ำทิ้งส่วนใสในสภาพเป็นเบสกำจัดแบบการดูดซับด้วยวัสดุชั้นถัดไป (3) กรณีที่น้ำทิ้งมีไอออนของโลหะเดียวหรือไอออนของโลหะผสมมีปริมาณน้อยๆ สามารถกำจัดโดยอาศัยการดูดซับด้วยวัสดุที่เหมาะสมหรือหาได้ง่ายตามท้องถิ่นได้เลย

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิเคราะห์และขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประจำปี 2551

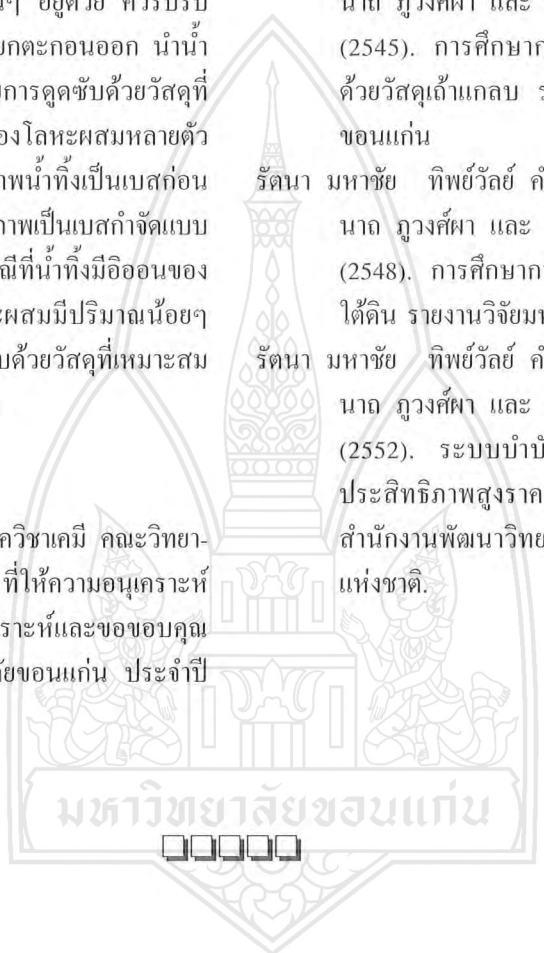
เอกสารอ้างอิง

รัตน มหาชัย ทิพย์วัลย์ ลำเมียง ชูติมา คู่อัฐมุทร
นาถ ภูวงศ์ผา และ ชาญชาวี พรหมราษฎร์
(2541). ศึกษาหาพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุเถ้า
แกลบ รายงานวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น

รัตน มหาชัย ทิพย์วัลย์ ลำเมียง ชูติมา คู่อัฐมุทร
นาถ ภูวงศ์ผา และ ชาญชาวี พรหมราษฎร์
(2545). การศึกษาการดูดซับทองแดง (II)
ด้วยวัสดุเถ้าแกลบ รายงานวิจัยมหาวิทยาลัย
ขอนแก่น

รัตน มหาชัย ทิพย์วัลย์ ลำเมียง ชูติมา คู่อัฐมุทร
นาถ ภูวงศ์ผา และ ชาญชาวี พรหมราษฎร์
(2548). การศึกษาการกำจัดสนิมเหล็กในน้ำ
ใต้ดิน รายงานวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น

รัตน มหาชัย ทิพย์วัลย์ ลำเมียง ชูติมา คู่อัฐมุทร
นาถ ภูวงศ์ผา และ ชาญชาวี พรหมราษฎร์
(2552). ระบบบำบัดน้ำเสียแบบอยู่กับที่
ประสิทธิภาพสูงราคาประหยัด รายงานวิจัย
สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
แห่งชาติ.





การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอย ด้วยระบบเอสบีอาร์ ที่ตามด้วยไคโตซาน

Study on Efficiency of Leachate Treatment by SBR System and Chitosan

สุชยา ฤทธิศร ^{1*} จุไรรัตน์ ดวงเดือน ² และ อรวรรณ ชื่นคุ้ม ³

บทคัดย่อ

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยระบบเอสบีอาร์ตามด้วยไคโตซาน น้ำเสียที่ใช้ในระบบเป็นน้ำชะมูลฝอยจากการฝังกลบแบบสุขาภิบาล มีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 2,160-3,120 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าทีเคเอ็นอยู่ในช่วง 139.44-207.20 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วง 61.6-96.88 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าไนเตรทอยู่ในช่วง 2.16 - 4.44 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าออร์โธฟอสเฟตอยู่ในช่วง 13-23 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดอยู่ในช่วง 52-73 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 135-151 เอ็นทียู ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดรวมของระบบในการบำบัดค่าซีโอดี ทีเคเอ็น แอมโมเนียไนโตรเจน ออร์โธฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมดและความขุ่น มีค่าเท่ากับ 41.82 % 62.37% 97.03 % 12.95% 14.47% และ 73.94% ตามลำดับ และพบว่าไม่สามารถบำบัดไนเตรทได้

Abstract

Study on efficiency of leachate treatment with the SBR system follow with chitosan which the leachate used in the system was taken from sanitary landfill had parameters as followed: COD was in range of 2,160-3,120 mg/l, TKN was range of 139.44-207.20 mg/l, ammonia-nitrogen was range of 61.6-96.88 mg/l, nitrate was range of 2.16-4.44 mg/l, total phosphorus was ranged of 52-73 mg/l, orthophosphate was range of 13-23 mg/l and the turbidity was range of 135-151 NTU. From this study, the system overall treatment efficiency had ability to treat COD, TKN, ammonia-nitrogen, orthophosphate, total phosphorus and the

¹ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

² ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา (สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

* Corresponding Author. E-mail: Ritthisorn_s@yahoo.co.th

turbidity were 41.82, 62.37, 97.03, 12.95, 14.47% and 73.94%, respectively, and nitrate could not be treated by this system.

คำสำคัญ: น้ำชะมูลฝอย ระบบเอสบีอาร์ ไคโตซาน

Keywords : Leachate, SBR system, Chitosan

บทนำ

ในปัจจุบันปัญหามลพิษจากขยะมูลฝอยในประเทศไทยยังคงเป็นปัญหาสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร การพัฒนาด้านเศรษฐกิจ และสังคมอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ปริมาณขยะมูลฝอยเพิ่มขึ้นสูงตามไปด้วย ขยะมูลฝอยเป็นมลพิษที่ก่อให้เกิดผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อประชาชนและสิ่งแวดล้อม เช่น มลพิษทางน้ำ ดิน และอากาศ เป็นแหล่งเพาะพันธุ์เชื้อโรคและแหล่งนำโรค ทำให้เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจ และทำให้ขาดสุนทรียภาพ สำหรับวิธีที่นิยมในการกำจัดขยะมูลฝอยมี 3 วิธี ได้แก่ วิธีการเผา การฝังกลบ การทำปุ๋ยหมัก ซึ่งการฝังกลบเป็นวิธีการกำจัดมูลฝอยที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในประเทศไทย เพราะสามารถจะกำจัดขยะมูลฝอยได้ทุกชนิด น้ำชะมูลฝอย (leachate) เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นตามมาจากการฝังกลบอันเกิดจากน้ำฝนที่ตกในบริเวณที่ฝังกลบขยะมูลฝอยน้ำใต้ดินที่ซึมผ่าน รวมทั้งความชื้นที่มีอยู่ในองค์ประกอบของขยะ น้ำชะมูลฝอยเป็นน้ำที่มีความสกปรกสูง มีค่าซีโอดี (COD) สูงมาก มีลักษณะสีน้ำตาล-ดำ น้ำขุ่นเยิ้ม และมีกลิ่นเหม็นรุนแรง ประกอบด้วยสารอินทรีย์ อนินทรีย์ แบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคและโลหะหนักปนเปื้อน หากไม่มีการควบคุมหรือบำบัดอย่างถูกวิธีจะทำให้เกิดการปนเปื้อนสู่ น้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน ก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ในแหล่งน้ำ การบำบัดน้ำชะมูลฝอยมีหลากหลายกระบวนการ ในการบำบัดส่วนมากมักใช้ระบบบำบัดทางชีวภาพ เช่น ระบบบำบัดแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์หรือเอส (Activated Sludge, AS) ระบบบำบัดบ่อไร้อากาศ (anaerobic ponds) ระบบบ่อเติมอากาศ (aerated lagoons) เป็นต้น ระบบเอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor, SBR) เป็นระบบทางชีวภาพอีกระบบหนึ่งที่นิยมใช้ซึ่งประยุกต์มาจากระบบ

แบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ ระบบเอสบีอาร์เป็นระบบที่มีถังเติมอากาศและถังตกตะกอนเป็นถังเดียวกัน มีลักษณะการบำบัดแบบ เติมน้ำ-ถ่ายออก ขั้นตอนการบำบัดประกอบด้วย การเติมน้ำเสีย (fill) การบำบัด (react) การตกตะกอน (settle) การถ่ายน้ำทิ้ง (draw) และการพัก (idle) ซึ่งระบบเอสบีอาร์สามารถลดข้อเสียที่เกิดขึ้นในระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ โดยใช้ถังเพียงหนึ่งถังแทนการทำงานสองถัง ไม่ต้องมีระบบหมุนเวียนตะกอน มีการปรับสภาพโดยทำหน้าที่เป็นถังปรับสภาพด้วยตัวเอง ซึ่งทำให้ระบบมีความสามารถในการรองรับต่อสภาวะการเปลี่ยนแปลงจลพลักษณ์ของอัตราการป้อนน้ำเสียได้เป็นอย่างดี (ขวัญเนตร สมบัติสมภพ และ วลัยรัตน์ จันทรวงศ์, 2550; สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์, 2550) นอกจากนี้ยังประหยัดค่าใช้จ่ายในเรื่องของไฟฟ้ามากกว่าระบบบ่อเติมอากาศ ไม่ก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดจากระบบบำบัดบ่อไร้อากาศ โดยทั่วไปการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีทางชีวภาพเพียงอย่างเดียวอาจยังไม่เพียงพอ น้ำที่ผ่านระบบยังคงมีความขุ่นอยู่มากหากปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกจะส่งผลให้แหล่งน้ำตามธรรมชาติมีความขุ่นมากขึ้นและส่งผลต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ดังนั้น ในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยให้ดียิ่งขึ้นจึงนำไคโตซานมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน ไคโตซาน (chitosan) เป็นอนุพันธ์ของไคตินมีชื่อทางเคมีว่า Poly-β-(1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose ซึ่งสามารถผลิตได้โดยการแยกหมู่เอซีทิลออก (deacetylation) จากไคตินเหลือเป็นหมู่อะมิโนอิสระ (NH₂) ทำให้ไคโตซานมีคุณสมบัติเป็นสารแคทไอออนโพลีอิเล็กโทรไลต์ ใช้เป็นสารตกตะกอนเพื่อขจัดโปรตีนจากของเสีย ลดความขุ่นของน้ำเสีย หรือใช้เป็นคีเลติงเมททีเรียล (chelating material) เพื่อขจัดโลหะหนักจากของเสียหรือใช้เป็นสารดูดซับ ไคโตซานมีคุณสมบัติที่ละลายได้ในสาร

ละลายที่มีพีเอชในช่วงที่เป็นกรด สามารถพบโคโคซานได้ในเปลือกกุ้ง กระดองปู แมลง เชื้อรา และยีสต์ อีกทั้งโคโคซานเป็นสารธรรมชาติที่ปลอดภัยและสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ (บุญชู มหาผล, 2547; สุทธิธรา บัวนาค, 2547) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงให้ความสนใจในการนำโคโคซานมาใช้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำชะมูลฝอยหลังจากผ่านการบำบัดด้วยระบบเอสปืออาร์

วิธีดำเนินงาน

1. สร้างแบบจำลองระบบเอสปืออาร์ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

ถังจำลองระบบเอสปืออาร์ มีขนาดกว้าง 36 เซนติเมตร ยาว 18 เซนติเมตร สูง 23 เซนติเมตร ปริมาตรความจุจนถึงเท่ากับ 30 ลิตร มีการเติมอากาศโดยใช้เครื่องเติมอากาศยี่ห้อ Lifetech รุ่น AP 1600 ผลิตในประเทศไทย จำนวน 2 ตัวต่อระบบบำบัดน้ำเสียเอสปืออาร์ 1 ชุด

2. การเก็บตัวอย่างน้ำชะมูลฝอย

เก็บตัวอย่างน้ำชะมูลฝอยจากแหล่งฝังกลบชุมชน และนำน้ำชะมูลฝอยมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำตามมาตรฐานการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2545) โดยใช้พารามิเตอร์ดังนี้ คือ ซีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน ทีเคเอ็น ไนเตรท ฟอสฟอรัสทั้งหมด ออร์โธฟอสเฟต และวัดความขุ่นของน้ำชะมูลฝอยโดยใช้เครื่องมือวัดความขุ่น ยี่ห้อ HACH รุ่น 2100N ซึ่งผลิตโดยประเทศสหรัฐอเมริกา

3. เริ่มทำการเดินระบบ

การเดินระบบเอสปืออาร์จะทำการทดลองในห้องปฏิบัติการที่มีอุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง 28-30 องศาเซลเซียส พีเอชของระบบจะถูกควบคุมให้อยู่ในช่วง 6.5-8.5 และค่าออกซิเจนละลายน้ำควบคุมไม่ให้มีค่าต่ำกว่า 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ดำเนินการเริ่มเดินระบบเอสปืออาร์โดยนำตะกอนจุลินทรีย์สำหรับใส่ระบบเอสปืออาร์ ซึ่งตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ได้เพาะเลี้ยงไว้ให้มี

ความคุ้นเคยกับน้ำชะมูลฝอยก่อน นานประมาณ 1 เดือน ซึ่งทราบได้จากค่าซีโอดีและค่าเอ็มแอลเอสเอส (Mixed Liquor Suspended Solids, MLSS) โดยมีการลดลงของซีโอดีในระบบแต่ยังมีค่าไม่คงที่และค่าเอ็มแอลเอสเอสเริ่มต้นควบคุมให้อยู่ในช่วง 5,000-5,500 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงเริ่มใส่น้ำชะมูลฝอยให้มีปริมาตรของน้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 16 ลิตร (ใส่น้ำตะกอนจุลินทรีย์ 6 ลิตร และปริมาณน้ำเสียจริง 10 ลิตร) ควบคุมให้มีระยะเวลาพักเก็บน้ำเท่ากับ 24 ชั่วโมง โดยแบ่งออกเป็นช่วงการเติมน้ำ 1 ชั่วโมง ช่วงบำบัด 21 ชั่วโมง ช่วงตกตะกอน 1 ชั่วโมง ช่วงการถ่ายน้ำและพัก 1 ชั่วโมง

นำน้ำที่ผ่านระบบเอสปืออาร์มาทำการตกตะกอนด้วยโคโคซานจากเปลือกกุ้งที่เตรียมไว้ด้วยความเข้มข้น 0.2% ในสารละลายกรดอะซิติก (โคโคซาน 2 กรัม ละลายในกรดอะซิติกเข้มข้น 1 มิลลิลิตร และทำการปรับปริมาตรให้เท่ากับ 1 ลิตร) โคโคซานที่นำมาใช้นี้เป็นผลิตภัณฑ์จากบริษัท เอ็นเอ็นซี โพรดักส์ จำกัด มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาว มีขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร ความชื้นอยู่ที่ 11% ระดับการลดลงของหมู่แอซิติล (degree of deacetylation) อยู่ที่ 85.08 ± 0.72 น้ำหนักมวลโมเลกุล 5,000 ทำการหาปริมาณโคโคซานและค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนน้ำเสีย วิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ออกจากระบบเอสปืออาร์และน้ำที่ผ่านการตกตะกอนด้วยโคโคซานตามมาตรฐานการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย โดยใช้พารามิเตอร์ดังนี้ คือ ซีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน ทีเคเอ็น ไนเตรท ฟอสฟอรัสทั้งหมด ออร์โธฟอสเฟต และวัดความขุ่นของน้ำเสียโดยใช้เครื่องมือวัดความขุ่น

ผลการวิจัย

1. ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอย

น้ำชะมูลฝอยมาจากแหล่งฝังกลบชุมชนผ่านการบำบัดแบบไร้อากาศมาแล้ว จำนวน 4 บ่อ มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยจากแหล่งฝังกลบก่อนบำบัด

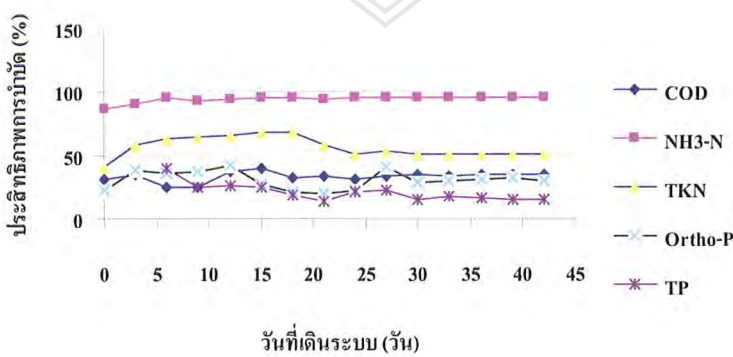
พารามิเตอร์	ช่วงค่า
พีเอช	7-9
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	27-30
ซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	2,160-3,120
บีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	800-1,200
ทีเคเอ็น (มิลลิกรัม/ลิตร)	139.44-207.20
แอมโมเนียไนโตรเจน (มิลลิกรัม/ลิตร)	61.60-96.88
ไนเตรท (มิลลิกรัม/ลิตร)	2.16-4.44
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (มิลลิกรัม/ลิตร)	52-73
ออร์โธฟอสเฟต (มิลลิกรัม/ลิตร)	13-23
ความขุ่น (เอ็นทียู)	135-151

จากตารางที่ 1 พบว่า อัตราส่วนของบีโอดีต่อซีโอดี (BOD:COD) มีค่าอยู่ในช่วง 0.37-0.38 และค่า BOD:N:P อยู่ในช่วง 100:7.6:1.6 ถึง 100:8:1.9 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการนำมาบำบัดด้วยระบบเอสปีอาร์

2. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยของระบบเอสปีอาร์ตามด้วยโคโตซาน

2.1 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยของระบบเอสปีอาร์

ในการศึกษาครั้งนี้เริ่มทำการเดินระบบ (start - up) ด้วยการใส่น้ำชะมูลฝอยเข้าระบบครั้งละ 10 % เพื่อให้ตะกอนจุลินทรีย์มีการปรับตัวให้เข้ากับระบบสถานะของน้ำชะมูลฝอยเมื่อเดินระบบครบ 100% จะใช้เวลาในการเดินระบบ 18 วัน หลังจากนั้นจะเริ่มทำการเก็บวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งนับเป็นวันแรกของการเดินระบบจริง



รูปที่ 1 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบเอสปีอาร์

1) ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีของระบบ เอสบีอาร์

จากตารางที่ 1 น้ำชะมูลฝอยที่เข้าสู่ระบบ เอสบีอาร์มีค่าชีโอดีอยู่ในช่วง 2,160-3,120 มิลลิกรัม/ลิตร ช่วงเริ่มต้นเดินระบบประสิทธิภาพการบำบัดมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก ในวันที่ 6 และวันที่ 9 ของการเดินระบบ จะสังเกตได้ว่า ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงมีค่าเท่ากับ 25% และ 24% ตามลำดับ เนื่องจากน้ำเข้าระบบมีค่าชีโอดีสูงซึ่งเป็นน้ำที่เก็บมาจากหลุมฝังกลบมูลฝอยชุดใหม่ จึงอาจส่งผลให้ตะกอนจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบไม่สามารถรองรับปริมาณค่าชีโอดีที่สูงได้ ซึ่งน้ำชะมูลฝอยประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนยากแก่การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ สังเกตได้จากค่าเอ็มแอลเอสเอสและค่าเอ็มแอลวีเอสเอส (Mixed Liquor Volatile Suspended Solids, MLVSS) ในวันที่ 6 ของการทดลองมีค่า 4,225 มิลลิกรัม/ลิตร และ 2,875 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 2 พารามิเตอร์จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับวันแรกของการเดินระบบ (ในวันแรกของการเดินระบบค่าเอ็มแอลเอสเอสอยู่ในช่วง 5,000 - 5,500 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าเอ็มแอลวีเอสเอส อยู่ในช่วง 3,400 - 3,800 มิลลิกรัม/ลิตร) ซึ่งค่าเอ็มแอลเอสเอส และค่าเอ็มแอลวีเอสเอส เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย เมื่อมีค่ามากแสดงว่าจุลินทรีย์สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้และมีการเพิ่มจำนวน ในทางกลับกัน ถ้าค่าลดลงอาจเป็นไปได้ว่ามีปัจจัยบางอย่างที่ทำให้จุลินทรีย์ลดจำนวนลง เช่น สารพิษ ปริมาณอาหารที่ลดลงหรือไม่เหมาะสม (สุเทพ สิริวิทยาปรกรณ์, 2550) เมื่อเวลาผ่านไป 18 วันพบว่าระบบเริ่มมีการทำงานคงที่ (steady state) น้ำที่ออกจากระบบบำบัดมีค่าชีโอดีอยู่ในช่วง 1,360-1,600 มิลลิกรัม/ลิตร โดยประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบเอสบีอาร์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 33.20%

2) ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนของระบบเอสบีอาร์

• ประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็น

น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบเอสบีอาร์มีค่าที่เคเอ็นอยู่ในช่วง 139.44-207.20 มิลลิกรัม/ลิตร จากการ

ศึกษาพบว่า การเดินระบบในวันแรกจนถึงวันที่ 18 ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็นสูงขึ้นเรื่อยๆ แต่ในวันที่ 21 จนถึงวันสุดท้ายของการเดินระบบ ประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากตะกอนจุลินทรีย์ที่ตายในระบบได้หลุดออกไปกับน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว สังเกตได้จากของแข็งแขวนลอยที่มีค่าสูงมากถึง 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งตามมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) กำหนดให้ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งที่จะปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมหรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 150 มิลลิกรัม/ลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2543; กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545) ค่าของแข็งที่ออกมาจากน้ำที่ผ่านการบำบัดในการทดลองนี้อาจเป็นสารอินทรีย์ไนโตรเจนที่ทำให้ค่าที่เคเอ็นมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็นลดลง ซึ่งน้ำที่ออกจากระบบบำบัดของการเดินระบบมีค่าที่เคเอ็นอยู่ในช่วง 62.72-92.68 มิลลิกรัม/ลิตร โดยประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบเอสบีอาร์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 55.95%

• ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย

ไนโตรเจน

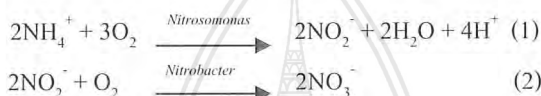
น้ำเสียที่เข้าระบบเอสบีอาร์มีค่าแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วง 61.60-96.88 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนมีประสิทธิภาพสูงตั้งแต่วันแรกของการเดินระบบ (86.59%) อาจเป็นเพราะการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในสภาวะที่มีออกซิเจนทำให้ไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียถูกออกซิไดซ์ให้เป็นไนไตรท์และไนเตรทโดยแบคทีเรียกลุ่ม Nitrosomonas และ Nitrobacter (Black, 2005) ดังนั้น จากการที่ระบบเอสบีอาร์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการเติมอากาศให้กับระบบจึงสามารถทำให้แอมโมเนียถูกนำไปใช้ในเซลล์จุลินทรีย์และถูกเปลี่ยนรูปไป ค่าแอมโมเนียจึงลดลง

ทำให้การบำบัดแอมโมเนียของระบบมีประสิทธิภาพดี น้ำเสียที่ออกจากระบบในวันสุดท้ายของการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 3.22-8.26 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนเฉลี่ยเท่ากับ 95.33%

• ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรท

จากการศึกษาพบว่า น้ำเข้าระบบมีปริมาณไนเตรทที่ค่อนข้างต่ำมีค่าอยู่ในช่วง 2.16-4.44 มิลลิกรัม/ลิตร แต่น้ำที่ผ่านการบำบัดกลับมีปริมาณ

ของไนเตรทสูงขึ้นเรื่อยๆ ตลอดระยะเวลาของการทดลอง ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ซึ่งแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสียถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นไนไตรท์และไนเตรท (สมการ 1 และ 2) (Bitton, 1999; Maier et al., 2000; Sigg, 2005) จึงส่งผลให้น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบเอสปีอาร์มีค่าของไนเตรทเพิ่มขึ้น



3) ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสของระบบเอสปีอาร์

• ประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟต

น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบเอสปีอาร์มีค่าออร์โธฟอสเฟตอยู่ในช่วง 13-23 มิลลิกรัม/ลิตร ในสถานะที่มีการเติมอากาศ จุลินทรีย์จะทำการดูดซึมออร์โธฟอสเฟตเข้าไปในเซลล์เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและสะสมไว้ในแกรนูล (เอมอร์ วัฒนานนท์, 2544; Metcalf and Eddy, 2004; Singleton, 2004) แต่ในระบบบำบัดเอสปีอาร์ที่ทำการศึกษาค้นพบว่าระบบมีประสิทธิภาพต่ำในการลดปริมาณฟอสเฟตในน้ำชะมูลฝอย น้ำเสียที่ออกจากระบบในวันสุดท้ายของการทดลองอยู่ในช่วง 9.68-15.33 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตเฉลี่ยเท่ากับ 19.96- 40.92 %

• ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมด

น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบเอสปีอาร์มีค่าฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 39-73 มิลลิกรัม/ลิตร จากการศึกษาค้นพบว่าในช่วง 3 วันแรกของการทดลอง ระบบไม่สามารถลดค่าฟอสฟอรัสได้เลย ต่อมาในวันที่ 6 ของการทดลองจนถึงวันที่ 42 ของการทดลอง ระบบบำบัดสามารถบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมดได้แต่มีประสิทธิภาพต่ำ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในน้ำชะมูลฝอย

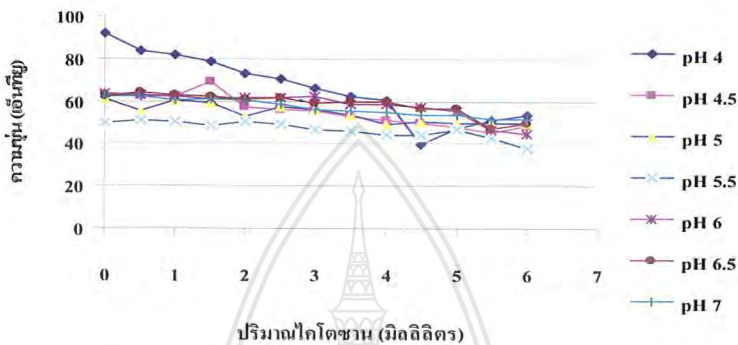
อาจมีองค์ประกอบของฟอสเฟตที่อยู่ในรูปของโพลีฟอสเฟตซึ่งต้องเกิดไฮโดรไลซิสและเปลี่ยนเป็นออร์โธฟอสเฟตก่อนจึงจะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ประโยชน์ได้ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2547; มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และ มั่นรัช ตัณฑุลเวศม์, 2547) ส่งผลให้ไม่สามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตและอินทรีย์ฟอสเฟตได้หมด โดยน้ำเสียที่ออกจากระบบในวันสุดท้ายของการทดลองอยู่ในช่วง 29-63 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่าเท่ากับ 16.92 %

2.2 ศึกษาประสิทธิภาพของโคโคซานในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยที่ออกจากระบบเอสปีอาร์

1) ค่าพีเอชและปริมาณโคโคซานที่เหมาะสมในการลดค่าความขุ่นของน้ำชะมูลฝอย

จากการทดลองนี้พบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ที่พีเอช 4.0 ปริมาณโคโคซาน 4.5 มิลลิลิตร (สารละลายโคโคซาน 0.2%) โดยสามารถลดค่าความขุ่นได้จาก 98.8 เอ็นทียู ลดลงเหลือ 39.35 เอ็นทียู ซึ่งมีประสิทธิภาพเท่ากับ 60.17% โคโคซานมีคุณสมบัติในการเป็นสารสร้างตะกอนและตกตะกอนที่ดี (coagulation and flocculation) และประกอบด้วยหมู่อะมิโน (ในรูปประจุบวก) จำนวนมากบนสายพอลิเมอร์ที่สามารถจับกับสารที่มีประจุลบ ซึ่งในน้ำชะมูลฝอยประกอบไปด้วยสารประกอบอินทรีย์ โดยเฉพาะพวก

กรดคาร์บอกซิลิกซึ่งเป็นกรดอินทรีย์เมื่อละลายในน้ำ จะเกิดการแตกตัวเพียงบางส่วนให้ H^+ และ $RCOO^-$ ส่วนแอมโมเนีย คลอไรด์ ซัลเฟต และโลหะ เช่น เหล็ก แคลเซียม โซเดียม และโพแทสเซียม พบอยู่ในความเข้มข้นที่ต่ำลงมา (ชาลิต รัตนธรรมสกุล, 2545; ชูตากัก เกษมโชติช่วง, 2547)



รูปที่ 2 ค่าพีเอชและปริมาณไคโตซานที่เหมาะสมในการลดค่าความขุ่นของน้ำชะมูลฝอย

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยที่ออกจากระบบเอสปีอาร์ด้วยไคโตซาน

พารามิเตอร์	น้ำหลังผ่านระบบเอสปีอาร์ (มิลลิกรัม/ลิตร)	น้ำหลังผ่านไคโตซาน (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
ซีโอดี	1,440	1,280	11.11
ทีเคเอ็น	80.64	61.32	23.66
แอมโมเนียไนโตรเจน	3.92	2.66	26.92
ไนเตรท	47.74	46.12	3.39
ออร์โธฟอสเฟต	11.03	13.51	*
ฟอสฟอรัสทั้งหมด	37.38	37.63	*
ความขุ่น	98.80 (เอ็นทียู)	39.35 (เอ็นทียู)	60.17

หมายเหตุ * หมายถึง 'ไม่สามารถบำบัดได้'

2) ประสิทธิภาพของไคโตซานในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยที่ออกจากระบบเอสปีอาร์

ตารางที่ 2 แสดงประสิทธิภาพไคโตซานในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบเอสปีอาร์ จากการศึกษาพบว่า น้ำที่ออกจากระบบเอสปีอาร์ก่อนทำการตกตะกอนด้วยไคโตซานมีค่าซีโอดี ทีเคเอ็น แอมโมเนียไนโตรเจน ไนเตรท ออร์โธฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด และความขุ่นเท่ากับ 1,440 80.64 3.92 47.74 11.03 37.38 มิลลิกรัม/ลิตร และ 98.8

เอ็นทียู ตามลำดับ เมื่อนำไปทำการตกตะกอนด้วยไคโตซาน 4.5 มิลลิกรัม/ลิตร ที่พีเอช 4.0 จะพบว่า มีค่าซีโอดี ทีเคเอ็น แอมโมเนียไนโตรเจน ไนเตรท ออร์โธฟอสเฟต ฟอสฟอรัส ทั้งหมด และความขุ่นมีค่าเท่ากับ 1,280 61.32 2.66 46.12 13.51 37.63 มิลลิกรัม/ลิตร และ 39.35 เอ็นทียู ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี ทีเคเอ็น แอมโมเนีย

ไนโตรเจน ไนเตรท และความชุ่ม ด้วยไคโดซานนั้น มีประสิทธิภาพเท่ากับ 11.11% 23.66% 26.92% 3.39% และ 60.17 % ตามลำดับ ส่วน ประสิทธิภาพในการ บำบัดของออร์โธฟอสเฟต และฟอสฟอรัสทั้งหมดไม่สามารถบำบัดได้ เนื่องจากในการ ตกตะกอนน้ำชะ มูลฝอยด้วยไคโดซานที่มีประสิทธิภาพ ที่ดีที่สุดมีค่า

ระดับพีเอช เท่ากับ 4.0 จึงอาจส่งผลทำให้ อนินทรีย์ฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำมีการเปลี่ยนแปลงมาอยู่ในรูปของออร์โธฟอสเฟตมากขึ้น และทำให้ปริมาณ ออร์โธฟอสเฟตและฟอสฟอรัสทั้งหมดมีค่าสูงขึ้น (เอมอร วัฒนานนท์, 2544)

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพรวมในการบำบัดของระบบเอสบีอาร์ตามด้วยไคโดซาน

พารามิเตอร์	น้ำเข้า (มิลลิกรัม/ลิตร)	น้ำที่ผ่านระบบเอสบีอาร์(มิลลิกรัม/ลิตร)	น้ำหลังผ่านเอสบีอาร์ตามด้วยไคโดซาน(มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพ (%)
ซีไอดี	2,200	1,440	1,280	41.82
ทีเคเอ็น	162.96	80.64	61.32	62.37
แอมโมเนียไนโตรเจน	89.46	3.92	2.66	97.03
ไนเตรท	3.91	47.74	46.12	*
ออร์โธฟอสเฟต	15.52	11.03	13.51	12.95
ฟอสฟอรัสทั้งหมด	44.00	37.38	37.63	14.47
ความชุ่ม	151 (เอ็นทียู)	98.80 (เอ็นทียู)	39,35 (เอ็นทียู)	73.94

หมายเหตุ * หมายถึง ไม่สามารถบำบัดได้

2.3 ศึกษาประสิทธิภาพรวมในการบำบัดของระบบเอสบีอาร์ตามด้วยไคโดซาน

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบเอสบีอาร์ตามด้วยไคโดซานดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าซีไอดี ทีเคเอ็น แอมโมเนียไนโตรเจน ออร์โธฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด และความชุ่ม มีค่าน้ำเข้าเฉลี่ยเท่ากับ 2,200 162.96 89.46 15.52 44.00 มิลลิกรัม/ลิตร และ 151 เอ็นทียู ตามลำดับ เมื่อผ่านการบำบัดด้วยระบบเอสบีอาร์ตามด้วยไคโดซานทำให้มีค่าซีไอดี ทีเคเอ็น แอมโมเนียไนโตรเจน ออร์โธฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด และความชุ่มลดลงเฉลี่ยเท่ากับ 1,280 61.32 2.66 13.51 37.63 มิลลิกรัม/ลิตร และ 39.35 เอ็นทียู ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพรวมทั้งหมดของระบบในการบำบัดซีไอดี ทีเคเอ็น แอมโมเนียไนโตรเจน ออร์โธฟอสเฟต ฟอสฟอรัส

ทั้งหมด และความชุ่ม ของชุดการทดลองนี้มีค่า 41.82% 62.37% 97.03% 12.95% 14.47 % และ 73.94% ตามลำดับ ยกเว้นไนเตรทที่มีค่าเฉลี่ยน้ำเสียก่อนเข้าระบบเท่ากับ 3.91 มิลลิกรัม/ลิตร แต่เมื่อผ่านระบบการบำบัดด้วยระบบเอสบีอาร์ตามด้วยไคโดซานแล้วพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 46.12 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งระบบไม่มีประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรท

สรุปและวิจารณ์

น้ำชะมูลฝอยที่ใช้ในการศึกษามีค่าซีไอดีอยู่ในช่วง 2,160-3,120 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าทีเคเอ็นมีค่าอยู่ในช่วง 139.44-207.20 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าแอมโมเนียไนโตรเจนมีค่าอยู่ในช่วง 61.60-96.88 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าไนเตรทมีค่าอยู่ในช่วง 2.16 - 4.44 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าออร์โธฟอสเฟตอยู่ในช่วง 13-23 มิลลิกรัมต่อลิตร

ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 52 - 73 มิลลิกรัมต่อลิตร และความขุ่นอยู่ในช่วง 135-151 เอ็นทียู จากการศึกษาพบว่าน้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดเอสบีอาร์แล้วทำการตกตะกอนด้วยโคโคซานสามารถลดค่าซีโอดีทีเคเอ็น แอมโมเนียไนโตรเจน ออร์โธฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด และความขุ่นได้เหลือเท่ากับ 1,280 61.32 2.66 13.51 37.63 มิลลิกรัม/ลิตร และ 39.35 เอ็นทียูตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดเฉลี่ยเท่ากับ 41.82 % 62.37% 97.03 % 12.95% 14.47% และ 73.94% ตามลำดับ และพบว่า ไม่สามารถบำบัดค่าในเตรทได้ อาจเกิดจากการที่จุลินทรีย์ทำการย่อยสลายและเปลี่ยนรูปจากแอมโมเนียไนโตรเจนไปเป็นไนเตรทและไนเตรท ตามลำดับ ทำให้ไนเตรทมีค่าสูงขึ้นซึ่งไม่ควรปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ดังนั้น จึงควรมีระบบบำบัดน้ำเสียชนิดอื่นมารองรับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบนี้อีกขั้นตอนหนึ่งเพื่อที่จะสามารถปล่อยน้ำที่ผ่านการบำบัดสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้

ในพื้นที่ฝั่งกลบขยะแบบสุขาภิบาลถ้าจะนำระบบเอสบีอาร์มาใช้ควรที่จะมีระบบบำบัดแบบบ่อไร้อากาศที่มีจำนวนมากพอ เนื่องจากระบบบำบัดแบบบ่อไร้อากาศจะสามารถบำบัดค่าซีโอดีสูงๆ ของน้ำเสียได้ดี แล้วจึงใช้ระบบเอสบีอาร์ในการช่วยลดปริมาณไนโตรเจนโดยเฉพาะแอมโมเนียไนโตรเจนซึ่งจะมีประสิทธิภาพดีมาก หรืออาจใช้ระบบเอสบีอาร์ 2 ระบบต่อกัน (two-stage SBR process) ซึ่ง Zeng และคณะ (2004) กล่าวว่าไว้ว่า การใช้ระบบเอสบีอาร์ 2 ระบบต่อกันจะสามารถรองรับน้ำเสียที่มีค่าซีโอดีและไนโตรเจนสูงๆ ได้ดี ส่วนการกำจัดฟอสฟอรัสโดยวิธีทางชีวภาพนั้นโดยปกติจะเกิดขึ้นน้อย และต้องใช้วิธีทางเคมี ได้แก่ การตกผลึก การตกตะกอน และการดูดซับ โดยสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัส ได้แก่ สารส้ม เหล็กของเหล็ก และปูนขาว (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545)

สำหรับการใช้โคโคซานเพื่อการตกตะกอนน้ำชะมูลฝอยนั้น พบว่า น้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้วจะเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเข้มเป็นสีเหมือนน้ำชาจีนใสๆ หรือเกือบใสเหมือนน้ำในแหล่งน้ำตามธรรมชาติถ้ามอง

ในด้านสิ่งแวดล้อมโคโคซานเป็นสารธรรมชาติและสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติซึ่งจะเหมาะต่อการรักษาสีสิ่งแวดล้อม แต่ในการใช้โคโคซานมีข้อจำกัดที่ความสามารถในการทำให้เกิดการตกตะกอนของสารแขวนลอยในน้ำเสียจะเกิดได้ดีที่ระดับพีเอช 4.0 ทำให้ต้องมีการใช้สารเคมีปรับสภาพของน้ำเสียให้อยู่ในสถานะที่โคโคซานสามารถทำงานได้ดี และเมื่อทำการตกตะกอนแล้วก็ต้องมีการปรับพีเอชให้มีความเป็นด่างโดยให้อยู่ในระดับค่ามาตรฐานน้ำจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ซึ่งกำหนดให้พีเอชของน้ำทิ้งมีค่าอยู่ในช่วง 5.5-9.0 (กรมควบคุมมลพิษ, 2543; กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545) ก่อนจึงจะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ และอีกประการหนึ่งคือโคโคซานที่ผลิตขายกันในท้องตลาดยังคงมีราคาแพง ดังนั้น ถ้านำมาใช้จริงอาจใช้สารตกตะกอนชนิดอื่นร่วมด้วยเพื่อเป็นการลดปริมาณโคโคซาน และเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนให้ดียิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนด้านงบประมาณ และขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลที่เอื้อเพื่อให้การสนับสนุนห้องปฏิบัติการและอำนวยความสะดวกทำให้การศึกษาวิจัยนี้สามารถดำเนินการจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2543). มาตรฐานคุณภาพน้ำและเกณฑ์ระดับคุณภาพน้ำในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. หน้า 8-9.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2545). ตำราระบบบำบัดมลพิษทางน้ำ. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. หน้า 597-598.

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2547). วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย. (เล่ม ที่ 4). กรุงเทพฯ: มิตรนราการพิมพ์. หน้า 568-577.
- ขวัญเนตร สมบัติสมภพ และ วลัยรัตน์ จันทรวงศ์. (2550). การบำบัดไนโตรเจนด้วยระบบเอสบิอาร์-ตัวกลางเคลื่อนที่. รายงานการวิจัย, ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ชาวลิต รัตนธรรมสกุล. (2545). การบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยระบบเอสบิอาร์ร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์. รายงานการวิจัย, สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- หุตาภัก เกษมโชติช่วง. (2547). การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยสิ่งแวดล้อมและลักษณะเฉพาะของโคโคซานต่อการจับตัวของโคโคซานกับสารแขวนลอยจุลินทรีย์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- บุญชู มหาล. (2547). การบำบัดน้ำล้างหัตถ์ดองเค็มโดยใช้เมมเบรนโคโคซาน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา), บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และ มันรัช ตัณฑุลเวศม์. (2547). เคมิวิทย์ของน้ำและน้ำเสีย. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 25/3-25/5.
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. (2545). คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. หน้า 140-177.
- สุทธทิรา บัวนาค. (2547). การกำจัดโครเมียม (เฮกซะวาเลนซ์) นิเกิล และตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยใช้เกลือโคโคซานจากเปลือกกุ้ง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา), บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์. (2550). เทคโนโลยีน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 135-136, 161-162.
- เอมอร วัฒนานนท์. (2544). การใช้จุลินทรีย์ร่วมกับโคโคซานในการบำบัดน้ำเสียจากแหล่งชุมชน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาจุลชีววิทยา, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- Bitton, G. (1999). Wastewater Microbiology. (2nd ed). New York: John Wiley & Sons, Inc. pp. 62-69.
- Black, J. G. (2005). Microbiology Principles and Explorations. (6th ed). New York: John Wiley & Sons, Inc. pp. 753-754
- Maier, R. M., Pepper, I. L. and Gerba, C. P. (2000). Environmental Microbiology. San Diego: Academic Press. pp. 332-340.
- Metcalf & Eddy, Inc. (2004). Wastewater Engineering : Treatment and Reuse. (4th ed). New York: McGraw-Hill, Inc. pp. 726-727.
- Sigee, D. C. (2005). Fresh Water Microbiology. Southern Gate: John Wiley & Sons, Inc. pp. 255-256.
- Singleton, P. (2004). Bacteria in Biology. (6th ed). London: John Wiley & Sons, Inc. pp. 15-16.
- Zeng, W., Peng, Y. and Wang, S. (2004). A Two-Stage SBR Process for Removal of Organic Substrate and Nitrogen via Nitrite-Type Nitrification-Denitrification. Journal of Environmental Science and Health. 39(8): 2229-2239.



ผลของอุณหภูมิซินเตอร์ต่อสมบัติของเซรามิก



Effects of Sintering Temperature on Properties of $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})_{0.5}\text{TiO}_3$ Ceramics

พรสุดา บ่มได้¹

บทคัดย่อ

ในการวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่ปราศจากตะกั่วในระบบ $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})_{0.5}\text{TiO}_3$ ด้วยวิธีการผสมออกไซด์แบบที่ใช้กันทั่วไปโดยทำการศึกษอิทธิพลของอุณหภูมิซินเตอร์ต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})_{0.5}\text{TiO}_3$ ที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ พบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ มีผลต่อค่าความหนาแน่น ขนาดและรูปร่างของเกรน สมบัติทางไดอิเล็กทริก และสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก อย่างไรก็ตามไม่ส่งผลต่อโครงสร้างผลึกแบบรอมโบอีดรอล โดยค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มสูงขึ้นและเกรนมีขนาดเล็กลงเมื่ออุณหภูมิในการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นถึง 1100 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) รูปร่างของเกรนจะเปลี่ยนจากทรงกลมเป็นสี่เหลี่ยม และมีการจัดเรียงตัวแน่นขึ้น ส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มสูงขึ้นและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกลดลง โดยชิ้นงานเซรามิกที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่ 1100°C จะมีค่าความหนาแน่นสูงที่สุด เท่ากับ $5.860 \pm 0.011 \text{ g/cm}^3$ มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (วัดที่ความถี่ 1 kHz) เท่ากับ 792 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำ เท่ากับ 0.043 และค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) มากที่สุด เท่ากับ 89 pC/N เมื่อพิจารณาสมบัติไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิพบว่า ที่อุณหภูมิประมาณ 150°C จะมีการเปลี่ยนเฟสจาก เฟอร์โรอิเล็กทริก กลายเป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก (T_d) และที่อุณหภูมิมากกว่า 500°C จะมีการเปลี่ยนเฟสจาก แอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกกลายเป็นพาราอิเล็กทริก (T_c)

Abstract

In this research, the $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})_{0.5}\text{TiO}_3$ lead-free piezoelectric ceramics were prepared using conventional mixed oxide method. The effect of sintering temperature on physical and electrical properties of perovskite $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})_{0.5}\text{TiO}_3$ was investigated. It was found that sintering temperature affected to density, grain size and shape, dielectric and piezoelectric properties, however it did not lead to change of the

¹ ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

crystal structure of rhombohedral phase. The density trended to increase and grain size decreased when sintering temperature increased up to 1100°C. Grain shape changed from a round shape to dense - cubic shape, resulting to increasing dielectric constant and decreasing of dissipation factor. Samples sintered at 1100°C showed the highest density, dielectric constant and d_{33} - piezoelectric coefficient of 5.86 ± 0.011 g/cm³, 792 and 96 pC/N respectively, with the lowest dissipation factor of 0.043 (at 1 kHz). For temperature dependence of dielectric property, it was found that the samples showed the depolarization temperature at $\sim 150^\circ\text{C}$ and the Curie temperature (T_c) at $> 500^\circ\text{C}$.

คำสำคัญ : บิสมัทโซเดียมไททาเนต วัสดุไร้สารตะกั่ว อุณหภูมิซินเตอร์ สมบัติไดอิเล็กตริกและเพียโซอิเล็กตริก

Keywords : Bismuth sodium titanate, Lead-free materials, Sintering temperature, Dielectric and piezoelectric properties

บทนำ

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กตริก (วัสดุที่มีโพลาริเซชันทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และสามารถเปลี่ยนทิศทางได้เมื่อได้รับสนามไฟฟ้าจากภายนอก) ในกลุ่มของเลดเซอร์โคเนตไททาเนต ($\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$, PZT) ถูกนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวางทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีสมบัติทางเพียโซอิเล็กตริกและไดอิเล็กตริกที่ดีโดยจะมีค่าสูงในบริเวณรอยต่อเฟสที่มีสัญญาณร่วมกัน (Morphotropic Phase Boundary, MPB) ซึ่งเป็นบริเวณที่เฟสเตตระโกนอลและเฟสโรมบิอิครอลอยู่ร่วมกันอย่างสมดุล (Zuo et al., 2007) แต่อย่างไรก็ตามวัสดุเพียโซอิเล็กตริกชนิดนี้จะมีประมาณตะกั่วผสมอยู่มากกว่า 60% โดยน้ำหนัก ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและร่างกายของมนุษย์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องค้นหาสารเพียโซอิเล็กตริกที่ปราศจากตะกั่วที่มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีและสามารถนำมาใช้แทน PZT ได้

Smolenskii และคณะ (1961) ได้ค้นพบสารเฟอร์โรอิเล็กตริกที่ชื่อว่า บิสมัทโซเดียมไททาเนต ($(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3$, BNT) ที่มีโครงสร้างทั่วไปเป็นแบบเพอโรฟสไกต์ (Perovskite) มีอุณหภูมิคูรี (curie temperature, T_c) มากกว่า 320°C และ ค่าโพลาริเซชันคงค้าง (remanence polarization) เท่ากับ $38 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ แต่อย่างไรก็ตาม จุดด้อยในเซรามิกชนิดนี้ คือ การ

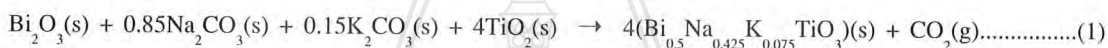
เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กตริกไปเป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กตริก (วัสดุที่มีโพลาริเซชันทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่นเดียวกับเฟอร์โรอิเล็กตริก แต่ไดโพลที่อยู่ติดกันจัดเรียงตัวในทิศตรงกันข้าม) ที่อุณหภูมิ (depolarization temperature, T_d) ต่ำ เท่ากับ 200°C และมีค่าสนามลบถ้าง (coecieve field, E_c) สูง เท่ากับ $73 \text{ kV}/\text{cm}$ (Yoo et al., 2006) ดังนั้น จึงมีการปรับปรุงสมบัติเพียโซอิเล็กตริกของเซรามิก BNT โดยการเติมสารประกอบอื่น เช่น BaTiO_3 , CeO_2 , Bi_2O_3 , xScO_2 และ La_2O_3 เป็นต้น (Yoo et al., 2004; Takenaka et al., 1991; Nagata et al., 1997; Herabut et al., 1997) นอกจากนี้ยังพบว่าเซรามิกบิสมัทโซเดียมไททาเนตที่เจือด้วยโพแทสเซียมในระบบ $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{1-x}\text{K}_{x0.5})\text{TiO}_3$ จะเกิดบริเวณรอยต่อเฟสที่ประกอบด้วยเฟสเตตระโกนอลและเฟสโรมบิอิครอล ที่ $x = 0.16-0.2$ (Sasaki et al., 1999) ส่งผลให้ค่า d_{33} และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามจะส่งผลให้ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียทางไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นด้วยในบริเวณรอยต่อเฟสซึ่งคล้ายกับ PZT (Gao et al., 2006) ดังนั้น วัสดุชนิดนี้จึงเป็นทางเลือกของวัสดุเพียโซอิเล็กตริกที่ปราศจากตะกั่วเป็นองค์ประกอบ อย่างไรก็ตามสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริกส่วนใหญ่ เช่น ค่าความหนาแน่น โครงสร้างจุลภาค สมบัติไดอิเล็กตริกและสมบัติเพียโซอิเล็กตริกจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ใน

การเผาซินเตอร์ (Liu and Fan, 2006) ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเผาซินเตอร์ต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกในระบบ $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})_{0.5}\text{TiO}_3$

วิธีการทดลอง

การเตรียมสารตัวอย่าง

สำหรับการเตรียมเซรามิก $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})_{0.5}\text{TiO}_3$ (BNKT) ด้วยการสังเคราะห์โดยวิธีการผสมออกไซด์แบบที่ใช้กันทั่วไป (conventional mixed



2. นำสารตั้งต้นใส่ในขวดพลาสติกที่มีลูกบดอะลูมิเนียมอยู่และผสมด้วยเอทานอล ($\geq 99.9\%$) จากนั้นนำไปบดผสมด้วยเครื่องบดผสม (ball mill) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. นำสารตัวอย่างมาระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 120°C และบดละเอียดด้วยครกบดสาร

4. นำผงผสมที่ได้ไปเผาแคลไซน์ในถ้วยครุชีเบิลที่ทำด้วยอะลูมินาที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

5. นำสารประกอบ $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})_{0.5}\text{TiO}_3$ ที่ได้มาบดด้วยเครื่องบดผสม เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 120°C และบดละเอียดอีกครั้งหนึ่ง

6. อัดและขึ้นรูปชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 มิลลิเมตร โดยใช้แรงอัด 1.5 ตัน เป็นเวลา 3 นาที และใช้ PVA 3 wt% เป็นสารยึดเหนี่ยว

7. นำชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปมาเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1000 1050 และ 1100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยเผาแบบกลับชิ้นงานด้วยผงอะลูมินา และใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ $5^\circ\text{C}/\text{นาที}$

oxide) มีวิธีการเตรียมดังต่อไปนี้

1. นำสารตั้งต้นโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) (99.8-100.2 %) โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) (99.9%) บิสมัทออกไซด์ (Bi_2O_3) (99.0%) และไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) (99.0%) มาชั่งน้ำหนักตามที่คำนวณได้ดังสมการที่ 1 จากนั้นนำสารเคมีแต่ละชนิดมาผสมกัน และเติม Bi_2O_3 ส่วนเกินเพิ่มปริมาณ 2 wt% เพื่อชดเชยการสูญเสียของ Bi_2O_3 ในระหว่างกระบวนการเผาซินเตอร์

การตรวจวิเคราะห์สารตัวอย่าง

1. นำชิ้นงานเซรามิกที่ได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy (SEM); Jeol: JSM-5800LV)

2. ชิ้นงานเซรามิกที่ผ่านการขัดผิวหน้ามาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ ดังนี้

2.1 โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray powder diffraction (XRD); Philips X'Pert MPD, Ni-filtered CuK_α radiation)

2.2 ค่าความหนาแน่นโดยการแทนที่น้ำตามวิธีของอาร์คิมิดีส

2.3 นำชิ้นงานเซรามิกมาทำขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการฉาบด้วยไอระเหยของอะลูมิเนียม (evaporation) แล้วจึงนำไปทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าดังนี้

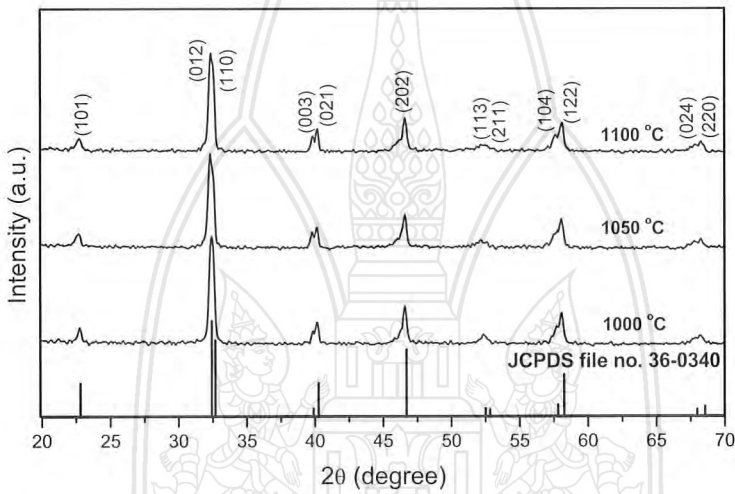
2.3.1 สมบัติไดอิเล็กตริก โดยการวัดค่าความสามารถในการเก็บประจุ (C) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (Dissipation factor, D) เทียบกับความถี่ (0.10 -100 kHz) และเทียบกับอุณหภูมิ (อุณหภูมิห้อง- 500°C) ด้วยเครื่อง LCR Meter รุ่น HP 4263B (Hewlett Packard) และ รุ่น 821 (Gw INSTECK) ตามลำดับ

2.3.2 สมบัติเพียโซอิเล็กทริก โดยนำชิ้นงานมาผ่านกระบวนการโพลโดยแช่ชิ้นงานในน้ำมันซิลิโคนที่อุณหภูมิ 120 °C และป้อนสนามไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงประมาณ 4 kV/mm เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้เกิดการจัดเรียงขั้วในชิ้นงาน แล้วปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องและนำไปวัดค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก(d₃₃) ด้วยเครื่อง Piezo d₃₃ tester รุ่น YE2730A (APC International, Ltd.)

ผลและการวิเคราะห์ผล

การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง

การเกิดเฟสของเซรามิก Bi_{0.5}(Na_{0.85}K_{0.15})_{0.5}TiO₃ เมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างกันถูกตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่า มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบรอมโบฮีดรอล ซึ่งสอดคล้องกับฐานข้อมูล JCPDS file หมายเลข 36-0340 และงานวิจัยของ Yoo et al. (2004) พบว่า เมื่ออุณหภูมิซินเตอร์สูงขึ้นจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึก ซึ่งสามารถ



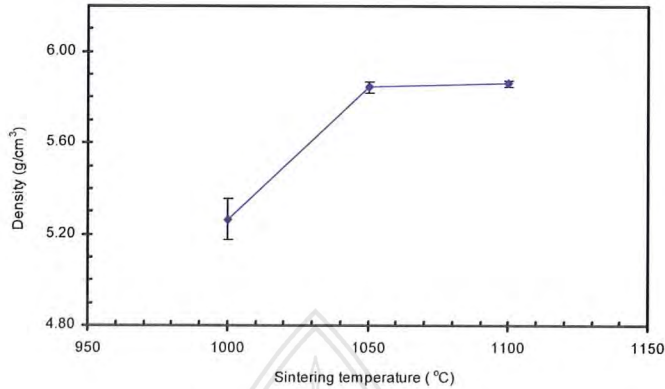
รูปที่ 1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก Bi_{0.5}(Na_{0.85}K_{0.15})_{0.5}TiO₃ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง

สรุปได้ว่า สารเชื้อ K₂CO₃ ที่เติมลงไปและอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกแต่อย่างใด เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัดของพีคหลักของ BNT

การตรวจสอบค่าความหนาแน่น

จากที่ทราบกันดีว่าการแน่นตัวของเซรามิกมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในซินเตอร์จากรูปที่ 2 แสดงค่าความหนาแน่นของชิ้นงานเซรามิกที่ผ่าน

การเผาซินเตอร์อุณหภูมิต่างกัน คือ 1000 °C 1050 °C และ 1100 °C พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์จะมีผลทำให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานเซรามิกมีค่าสูงขึ้นโดยมีค่าประมาณ 5.265±0.091 5.844±0.024 และ 5.860±0.011 g/cm³ ตามลำดับ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้อนุภาคแพร่เข้าหากันมากขึ้นทำให้เกิดการฟอร์มตัวที่แน่นขึ้นส่งผลทำให้มีรูพรุนภายในเนื้อสารลดลงน้อยลง

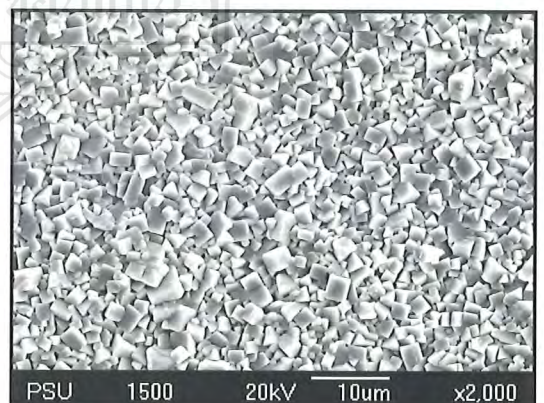
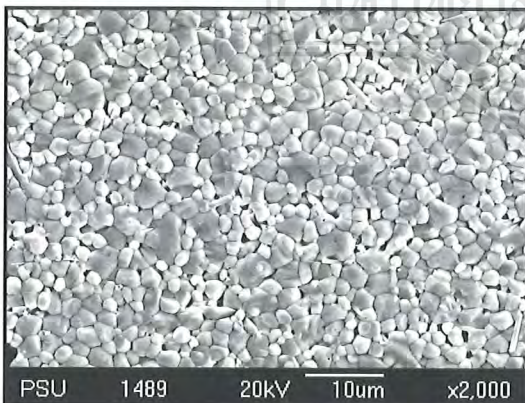


รูปที่ 2 ความหนาแน่นของชิ้นงานเซรามิก $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})_{0.5}\text{TiO}_3$ ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1000 °C 1050 °C และ 1100 °C เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

สมบัติของเซรามิกจะมีค่าขึ้นอยู่กับ โครงสร้างจุลภาคเป็นอย่างมาก โดยส่วนใหญ่ต้องการเกรนที่มีขนาดเล็ก และสม่ำเสมอ (Rahaman, 1995) ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมโครงสร้างจุลภาคเพื่อที่จะให้ได้สมบัติต่างๆ ที่ดีตามที่ต้องการ จากรูปที่ 3 แสดงภาพถ่าย SEM ของเซรามิก $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})_{0.5}\text{TiO}_3$ ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1000 °C และ 1100 °C พบว่าเมื่อนำชิ้นงานมาเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่ำ (1000 °C) โครงสร้างและรูปร่างของเกรนส่วนใหญ่มีลักษณะกลม ไม่แน่นอน มีขนาดหลายขนาดไม่สม่ำเสมอโดยขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่าประมาณ $2.8 \pm 1.2 \mu\text{m}$ มีรูพรุนเกิดใน

ชิ้นงานเป็นจำนวนมากซึ่งจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าต่ำดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2 และเมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น (1100 °C) พบว่า โครงสร้างและรูปร่างของเกรนเปลี่ยนไปเป็นทรงสี่เหลี่ยม ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สถานะสมดุล (equilibrium shape) เพื่อลดพลังงานพื้นผิวของระบบให้ต่ำลง ซึ่งมีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่กระจายปะปนกันอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น โดยเกรนที่มีขนาดเล็กจะอัดตัวอยู่ระหว่างเกรนที่มีขนาดใหญ่กว่า และมีการเรียงตัวซ้อนทับกันอย่างหนาแน่น จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าสูง โดยขนาดเกรนมีค่าประมาณ $2.6 \pm 0.9 \mu\text{m}$

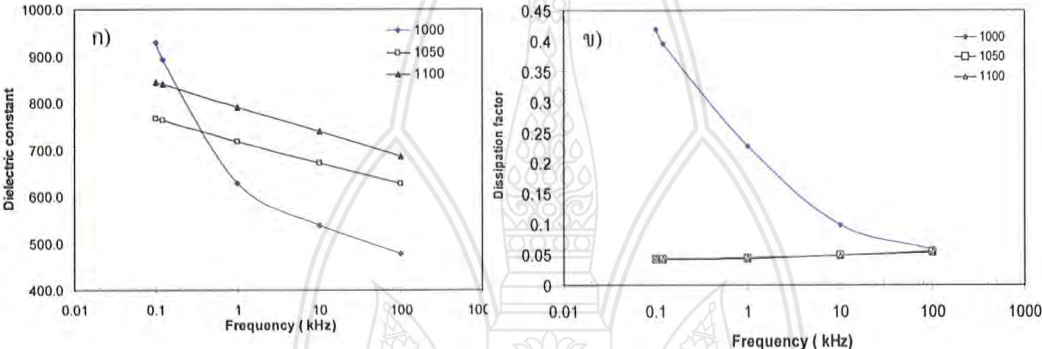


รูปที่ 3 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงาน $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})_{0.5}\text{TiO}_3$ ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างกัน (ก) 1000 °C และ (ข) 1100 °C

การศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริก

สมบัติไดอิเล็กตริกในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กตริกสามารถพัฒนาให้ดีขึ้นโดยอาศัยปัจจัยจากภายนอกเช่น สนามไฟฟ้า อุณหภูมิ และองค์ประกอบที่บริเวณรอยต่อเฟส (MPB) (Klein et al., 2007) เมื่อศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริกของสารตัวอย่าง $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})_{0.5}\text{TiO}_3$ เทียบกับความถี่ในช่วง 0.1 - 100 kHz (รูปที่ 4) พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant, K) และแฟกเตอร์การสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (dissipation factor, tanδ) มีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Li และคณะ (2007) เมื่อพิจารณา

อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ที่ต่างกัน พบว่าเซรามิกที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 °C จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงสุด คือ 792 (ความถี่ 1 kHz) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นที่ได้สูงสุด ส่วนค่าแฟกเตอร์การสูญเสียทางไดอิเล็กตริกของชิ้นงานที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C และ 1100 °C จะมีค่าน้อยและใกล้เคียงกันมากในช่วงความถี่ 0.1-100 kHz เนื่องจากชิ้นงานทั้งสองมีค่าความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกันจึงส่งผลให้ได้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกที่ต่ำ



รูปที่ 4 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ก) และค่าแฟกเตอร์การสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (ข) เมื่อวัดที่ความถี่ 0.1 - 100 kHz ของเซรามิก $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})_{0.5}\text{TiO}_3$ และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาสมบัติไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิของเซรามิก $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})_{0.5}\text{TiO}_3$ ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างกัน (รูปที่ 5) พบว่าในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนจะเกิดพีคขึ้น 2 พีค เนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กตริกกลายเป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กตริกในพีคแรกเรียกอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนนี้ว่าอุณหภูมิดีโพลาริเซชัน (depolarization temperature, T_d) ส่วนพีคที่สองจะเกิดจากการเปลี่ยนจากแอนติเฟอร์โรอิเล็กตริกกลายเป็นพาราอิเล็กตริก ซึ่งจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงสุด จึงเรียกอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนนี้ว่าอุณหภูมิสูงสุด (maximum temperature, T_m) หรืออาจจะเรียกว่า อุณหภูมิคูรี (curie temperature, T_c) เพราะ T_c จะเกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนจากแอนติเฟอร์โรอิเล็ก-

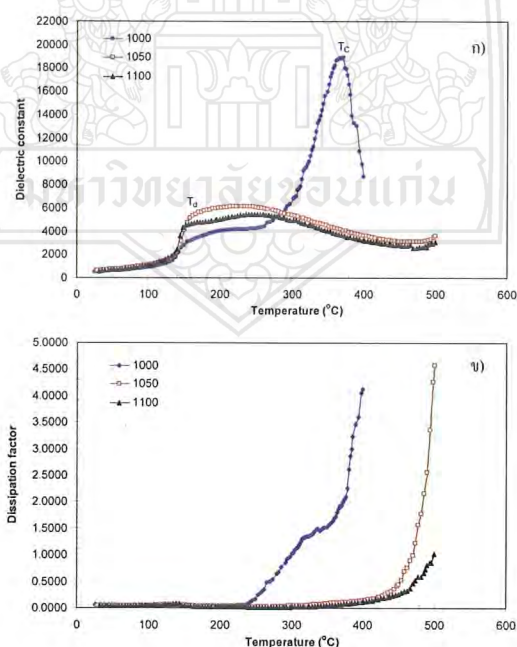
ตริกกลายเป็นพาราอิเล็กตริก (Li et al., 2007) จากรูปที่ 5 (ก) พบว่า อุณหภูมิดีโพลาริเซชันอยู่ที่อุณหภูมิช่วงเดียวกัน คือ ~ 150 -154 °C เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1000 °C 1050 °C และ 1100 °C ซึ่งจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4056 6130 และ 5443 ตามลำดับหลังจากนั้นจะพบว่าชิ้นงานเซรามิกที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1000 °C นั้นจะปรากฏ T_c ที่อุณหภูมิ 372 °C ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 18893 แต่ชิ้นงานเซรามิกที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C และ 1100 °C จะไม่ปรากฏ T_c ขึ้น เนื่องจากในการทดลองสามารถเพิ่มอุณหภูมิได้สูงสุดเพียง 500 °C เท่านั้น และคาดว่า T_c จะปรากฏที่อุณหภูมิที่มากกว่า 500 °C ขึ้นไป โดย T_c ของสารตัวอย่างในงานวิจัยนี้มี

ค่าสูงกว่างานวิจัยที่ได้รายงานมาก่อนหน้านี้ซึ่งส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วง $300 - 350^{\circ}\text{C}$ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณสารเจือและเงื่อนไขที่ใช้ในการเตรียม (Li et al., 2005; Yang et al. 2008)

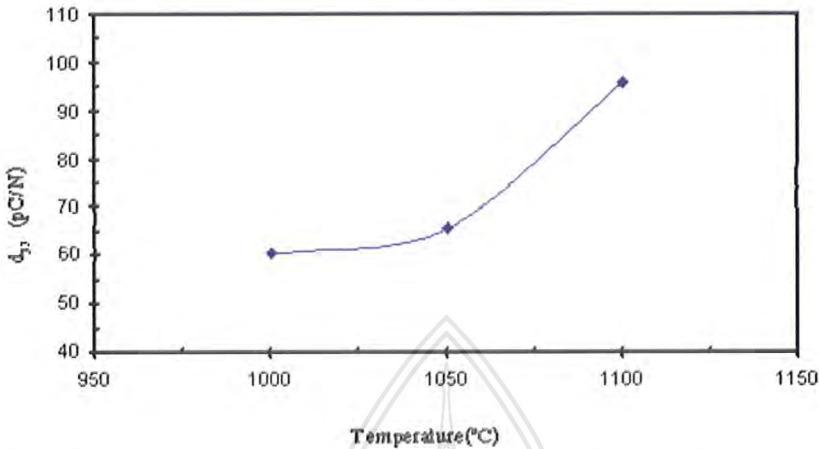
จากรูปที่ 5 (ข) แสดงค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกของเซรามิก จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกจะมีแนวโน้มที่ค่อนข้างที่จะคงที่ จนถึงอุณหภูมิหนึ่ง ($\sim 250^{\circ}\text{C}$) จะทำให้ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และนอกจากนี้พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการเผาขึ้นเตอรืเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกที่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยจะสังเกตได้จากเส้นกราฟเลื่อนไปยังอุณหภูมิที่สูงกว่า ($\sim 400^{\circ}\text{C}$) ทั้งนี้ขึ้นงานเซรามิกที่ผ่านการเผาขึ้นเตอรืที่อุณหภูมิ 1050°C และ 1100°C จะให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นที่สูง และโครงสร้างทางจุลภาคที่แน่นและสม่ำเสมอ

การศึกษาสมบัติเพียโซอิเล็กตริก

สมบัติเพียโซอิเล็กตริกในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กตริกสามารถพัฒนาให้ดีขึ้นโดยอาศัยปัจจัยจากภายนอก เช่นเดียวกับสมบัติไดอิเล็กตริก (Klein et al., 2007) สำหรับสมบัติเพียโซอิเล็กตริกได้ทำการศึกษาค่าคงที่เพียโซอิเล็กตริก (d_{33}) ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าเซรามิก $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})_{0.5}\text{TiO}_3$ ที่ผ่านการเผาขึ้นเตอรืที่อุณหภูมิแตกต่างกัน คือ 1000°C 1050°C และ 1100°C จะมีค่าคงที่เพียโซอิเล็กตริก (d_{33}) เท่ากับ 60.2 65.4 และ 96 pC/N ตามลำดับ นั่นคือ เซรามิกที่เผาขึ้นเตอรืที่อุณหภูมิ 1100°C มีค่า d_{33} สูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากขึ้นงานมีการจัดเรียงตัวของเกรนที่สม่ำเสมอจะส่งผลให้โพล (pole) ขึ้นงานได้ดียิ่งขึ้นจึงส่งผลให้ค่า d_{33} มาก ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นและโครงสร้างทางจุลภาคดังที่ได้มาแล้ว อย่างไรก็ตาม ค่า d_{33} ของเซรามิกในระบบนี้จะสามารถเพิ่มค่าได้ถ้ามีการสารเจืออื่นๆ ลงไปในระบบนี้ เช่น $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.425}\text{K}_{0.075})\text{TiO}_3$ ที่เจือด้วย CeO_2 (Li et al., 2007) และ $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.84}\text{K}_{0.16})\text{TiO}_3$ ที่เจือด้วย Sr (Yoo et al., 2004) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 132 และ 185 pC/N ตามลำดับ



รูปที่ 5 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และ (ข) ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียทางไดอิเล็กตริกของเซรามิก $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})_{0.5}\text{TiO}_3$ ที่ผ่านการเผาขึ้นเตอรืที่อุณหภูมิ 1000°C 1050°C และ 1100°C เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง



รูปที่ 6 ค่าคงที่พีโซอิเล็กตริก (d_{33}) ของเซรามิก $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})_{0.5}\text{TiO}_3$ ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1000°C 1050°C และ 1100°C เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง

สรุปผลการทดลอง

การเตรียมเซรามิก $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})_{0.5}\text{TiO}_3$ โดยใช้อุณหภูมิซินเตอร์ที่ต่างกัน ส่งผลต่อค่าความหนาแน่น โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่โครงสร้างผลึกไม่เปลี่ยนแปลง ดังนี้

1. เซรามิกมีโครงสร้างผลึกแบบรอมโบอีดอล และเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง

2. ค่าความหนาแน่นของเซรามิกจะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น โดยชิ้นงานที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100°C จะมีค่าความหนาแน่นที่สูงที่สุดคือ $5.860 \pm 0.011 \text{ g/cm}^3$ เนื่องจากเกรนส่วนใหญ่มีลักษณะรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม โดยขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่า $2.6 \pm 0.9 \text{ }\mu\text{m}$ และมีการจัดเรียงตัวที่แน่นและสม่ำเสมอมากที่สุด

3. สำหรับสมบัติไดอิเล็กตริกพบว่าเมื่อเพิ่มความถี่จะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาที่ความถี่ 1 kHz จะพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเซรามิกที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100°C จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงที่สุด คือ 792

4. เมื่อพิจารณาสมบัติไดอิเล็กตริกที่เทียบกับอุณหภูมิสำหรับชิ้นงานเซรามิกที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่ 1000°C 1050°C และ 1100°C พบว่าอุณหภูมิซินเตอร์ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนจากเฟสโรอิเล็กตริกกลายเป็นแอนติเฟสโรอิเล็กตริก (T_c) ($\sim 150 - 154^\circ\text{C}$) ในขณะที่อุณหภูมิที่เปลี่ยนจากแอนติเฟสโรอิเล็กตริกกลายเป็นพาราอิเล็กตริก (T_c) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิซินเตอร์

5. ค่า d_{33} มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิซินเตอร์เช่นเดียวกับ T_c โดยชิ้นงานเซรามิกที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100°C จะมีค่า d_{33} ที่มากที่สุด คือ 96 pC/N

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ผ่านทุนงบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2549 และผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณคุณนิรชา เดิมเล็ม และ คุณชนกนตร สงสุรินทร์ สำหรับการเตรียมตัวอย่างและวัดสมบัติทางไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

- Gao, F., Zhang, C. -S., Wang, W. -M., Zhao, M. and Tian, C. -S. (2006). Microstructure and piezoelectric properties of $(\text{Na,K})_{0.5} \text{Bi}_{0.5} \text{TiO}_3$ lead-free ceramics. *Cailiao Gongcheng/Journal of Materials Engineering*. 10: 43-47.
- Herabut, A. and Safari, A. (1997). Processing and electromechanical properties of $(\text{Bi}_{0.5} \text{Na}_{0.5})_{1-1.5x} \text{La}_x \text{TiO}_3$ ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*. 80: 2954-2958.
- Klein, N., Hollenstein, E., Damjanovic, D., Trodahl, H. J., Setter, N. and Kuball, M. (2007). *Journal of Applied Physics*. 102: 014112.
- Li, Y., Chen, W., Xu, Q., Zhou, J., Wang, Y. and Sun, H. (2007). Piezoelectric and dielectric properties of CeO_2 doped $\text{Bi}_{0.5} \text{Na}_{0.44} \text{K}_{0.06} \text{TiO}_3$ lead-free ceramics. *Ceramics International*. 33: 95-99.
- Li, Y., Chen, W., Zhou, J., Xu, Q., Sun, H. and Liao, M. (2005) Dielectric and ferroelectric properties of lead-free $\text{Na}_{0.5} \text{Bi}_{0.5} \text{TiO}_3$ - $\text{K}_{0.5} \text{Bi}_{0.5} \text{TiO}_3$ ferroelectric ceramics. *Ceramics International*. 31: 139 - 142.
- Liu, L. and Fan, H. (2006). Influence of sintering temperatures on the electrical property of bismuth sodium titanate based piezoelectric ceramics. *Journal of Electroceramic*. 16: 293-296.
- Nagata, H. and Takenaka, T. (1997). Lead-free piezoelectric ceramics of $(\text{Bi}_{1/2} \text{Na}_{1/2})\text{TiO}_3$ - $1/2(\text{Bi}_2\text{O}_3 \bullet \text{Sc}_2\text{O}_3)$ system. *Japanese Journal of Applied Physics*. 36: 6055 - 6057.
- Powder Diffraction File No. 36-0340, International Centre for Diffraction Data, Newton Squire, PA, 2001.
- Rahaman, M. N. (1995). Ceramic processing and sintering. New York: Marcel Dekker, Inc. p. 445.
- Sasaki, A., Chiba, T., Mamiya, Y. and Otsuki, E. (1999). Dielectric and piezoelectric properties of $(\text{Bi}_{0.5} \text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3$ - $(\text{Bi}_{0.5} \text{K}_{0.5})\text{TiO}_3$ systems. *Japanese Journal of Applied Physics*. 38: 5564-5567.
- Smolenskii, G. A., Isupove, V. A., Agranovskaya, A.I. and Krainink, N. N. (1961). New ferroelectrics of complex composition. *Physics of the Solid State*. 2: 2651-2654.
- Takenaka, T., Maruyama, K. and Sakata, K. (1991). $(\text{Bi}_{1/2} \text{Na}_{1/2})\text{TiO}_3$ - BaTiO_3 system for lead-free piezoelectric ceramics. *Japanese Journal of Applied Physics*. 30: 2236-2239.
- Yang, Z., Liu, B., Wei, L. and Hou, Y. (2008) Structure and electrical properties of $(1-x) \text{Bi}_{0.5} \text{Na}_{0.5} \text{TiO}_3$ - $x \text{Bi}_{0.5} \text{K}_{0.5} \text{TiO}_3$ ceramics near morphotropic phase boundary. *Materials Research Bulletin*. 43: 81 -89.
- Yoo, J., Oh, D., Jeong, Y., Hong, J. and Jung, M. (2004). Dielectric and piezoelectric characteristics of lead-free $\text{Bi}_{0.5} (\text{Na}_{0.84} \text{K}_{0.16})_{0.5} \text{TiO}_3$ ceramics substituted with Sr. *Materials Letters*. 58: 3831-3835.
- Yoo, J., Hongb, J., Lee, H., Jeong, Y. and Lee, J. (2006). Piezoelectric and dielectric properties of La_2O_3 added $\text{Bi}(\text{Na}, \text{K})\text{TiO}_3$ - SrTiO_3 ceramics for pressure sensor application. *Sensors and Actuators A*. 126: 41-47.
- Zuo, R., Fang, X., Ye, C. and Li, L. (2007) Phase transitional behavior and piezoelectric properties of lead-free $(\text{Na}_{0.5} \text{K}_{0.5})\text{NbO}_3$ - $(\text{Bi}_{0.5} \text{K}_{0.5})\text{TiO}_3$ ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*. 90(8): 2424-2428.



การคำนวณสัมประสิทธิ์สภาพขุ่นมัวของบรรยากาศ จากข้อมูลทัศนวิสัยในจังหวัดขอนแก่น A Determination of Atmospheric Turbidity Coefficient from Visibility Data in Khon Kaen Province

สายันต์ โพธิ์เกิด¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสัมประสิทธิ์สภาพขุ่นมัวของบรรยากาศในจังหวัดขอนแก่น (16.43 °N และ 102.83 °E) และเพื่อศึกษาการแปรค่าของสภาพขุ่นมัวในบรรยากาศและหาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพขุ่นมัวกับทัศนวิสัยในจังหวัดขอนแก่น การหาสภาพขุ่นมัวของบรรยากาศจะหาในรูปของ สัมประสิทธิ์สภาพขุ่นมัวของแองสตรอม (Ångström's turbidity coefficient, β) โดยใช้ข้อมูลความเข้มรังสีตรงของดวงอาทิตย์ในวันที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ (cloudless skies) แล้วนำไปหาความสัมพันธ์กับข้อมูลโอโซน ปริมาณไอน้ำกลั่นตัวได้ และทัศนวิสัยซึ่งเป็นข้อมูลที่จังหวัดขอนแก่น ผลที่ได้พบว่า β มีค่าเฉลี่ยต่อปีเท่ากับ 0.152 ± 0.008 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ของบรรยากาศที่เริ่มมีความขุ่นมัว จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่าง β กับข้อมูลทัศนวิสัยซึ่งเป็นค่ารายวันเฉลี่ยต่อเดือน ผลที่ได้พบว่ามีความสัมพันธ์ที่เชื่อถือได้ค่อนข้างสูง เมื่อศึกษาการแปรค่าตามเวลาในรอบปีพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สภาพขุ่นมัวของแองสตรอมมีค่ามากในช่วง ฤดูแล้ง (ธันวาคม – มีนาคม) และมีค่าลดลงในช่วงฤดูฝน (เมษายน – พฤศจิกายน)

Abstract

This research determined the Ångström's turbidity coefficient in Khon Kaen province (16.43 °N and 102.83 °E) and studied the variation of atmospheric turbidity to find out relation between turbidity and

¹ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000

visibility in Khon Kaen province. The quantity of atmospheric turbidity was shown in Ångström's turbidity coefficient (β). Values of the β were determined from direct irradiance calculation, ozone data, precipitable water vapor data, and visibility data at the same station in clear skies. The result showed that the average amount of β was 0.152 ± 0.008 . This indicated the beginning of turbidity. The relation between β and the monthly average visibility was relatively high. Moreover, the values of the Ångström's turbidity coefficient were relatively high in the dry season (December – March) but were likely to decrease in the wet season (April – November).

บทนำ

สภาพบรรยากาศที่มีสิ่งเจือปนอยู่ในองค์ประกอบของบรรยากาศเป็นจำนวนมากทำให้ทัศนวิสัยในการมองเห็นลดลง เมื่อรังสีดวงอาทิตย์ผ่านบรรยากาศมายังพื้นโลกจะถูกดูดกลืนและกระเจิงโดยองค์ประกอบต่าง ๆ ของบรรยากาศทำให้ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกลงบนพื้นผิวโลกมีค่าลดลง ฝุ่นละออง (aerosol) นับเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่มีผลทางตรงและทางอ้อมต่อความเข้มรังสีดวงอาทิตย์และทำให้เกิดสภาพพุน้ำของบรรยากาศฝุ่นละอองในบรรยากาศ สามารถทำให้เกิดการสึกกร่อนของผิวโลหะ ทำลายผิวหน้าของสิ่งก่อสร้าง นอกจากนี้ฝุ่นละอองยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนเนื่องจากมีขนาดเล็กพอที่จะเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนล่างและถูกดลปอดของมนุษย์ได้ทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจรวมทั้งโรคภูมิแพ้ หากได้รับในปริมาณมากและเป็นเวลานานจะเกิดการสะสมทำให้เกิดพังผืดและเป็นแผลในปอดได้

ในการหาค่าสภาพพุน้ำของบรรยากาศสามารถทำได้หลายวิธีที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับข้อมูลพื้นฐานที่มีอยู่ของแต่ละสถานีวัด โดยส่วนใหญ่จะหาจากข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ซึ่งต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก งานวิจัยนี้จะหาค่าสัมประสิทธิ์สภาพพุน้ำของบรรยากาศ (β) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับข้อมูลทัศนวิสัย จากความสัมพันธ์นี้สามารถหาค่า β จากข้อมูลทัศนวิสัยและนำไปใช้ประโยชน์ในงานการสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายสภาวะภูมิอากาศ (climate model) งานด้านการสำรวจข้อมูลระยะไกลโดยใช้ดาวเทียม (satellite remote sensing) เช่น การหาการกระจายของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก (solar radiation mapping) จากภาพถ่ายดาวเทียม และงานต่างๆที่เกี่ยวข้องต่อไป

วิธีการวิจัย

การหาค่าสัมประสิทธิ์สภาพพุน้ำของบรรยากาศ ในงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ซึ่งเป็นรังสีตรง (direct solar radiation) โดยใช้เครื่องมือ ไพร์เฮลิโอมิเตอร์ (Pyreheliometer) วัดที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยรายวัน (daily mean) ของปี พ.ศ. 2550 จากนั้นหาวันที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ (cloudless skies) และข้อมูลอุณหภูมิตามอากาศพื้นดินของสถานีตรวจอากาศจังหวัดขอนแก่นในช่วงเวลาเดียวกัน ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งจะนำมาหาค่าปริมาณไอน้ำกลับตัวได้

(Garrison, 1992) รวมทั้งข้อมูลโอโซนมาประกอบในการหาค่าสัมประสิทธิ์สภาพพุ่มไม้ของบรรยากาศ แล้วนำค่า β มาหาความสัมพันธ์กับข้อมูลทัศนวิสัย (visibility) จะได้ความสัมพันธ์ที่สามารถทำนายสภาพพุ่มไม้ของบรรยากาศจากข้อมูลทัศนวิสัยได้ และนำค่าที่ได้ไปศึกษาการแปรค่าตามเวลาในรอบปี

ค่า β จะแสดงปริมาณของฝุ่นละอองในแนวตั้ง (vertical direction) มีค่าอยู่ในช่วง 0.0 - 0.5 หรือมากกว่า หาได้จากข้อมูลความเข้มรังสีตรงของดวงอาทิตย์ร่วมกับข้อมูลภูมิอากาศ โดยแทนค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ ขององค์ประกอบต่างๆในบรรยากาศ ลงในสมการของ Louche และคณะ (1987) จะได้ดังสมการที่ (1)

$$\beta = \frac{1}{m_a D} \ln \left(\frac{C}{A - B} \right)$$

(1)

โดยที่

$$A = \frac{I_n}{0.9751 E_o I_{sc} \tau_r \tau_w \tau_o \tau_g}$$

(2)

$$B = 0.1244 \alpha - 0.0162$$

(3)

$$C = 1.003 - 0.125 \alpha$$

(4)

$$D = 1.089 \alpha + 0.5123$$

(5)

- เมื่อ
- I_n

เป็นความเข้มรังสีตรงของดวงอาทิตย์ (W/m^2)
- E_o

เป็นตัวแก้ค่าผิดพลาดเนื่องจากวงโคจรของโลก (decimal)
- I_{sc}

เป็นค่าคงที่รังสีดวงอาทิตย์ (solar constant) เท่ากับ $1,367 \text{ W/m}^2$
- m_a

เป็นมวลอากาศ (air mass) ที่สถานีตรวจอากาศใดๆ
- τ_r

เป็นสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์โดยการกระเจิงของโมเลกุลอากาศ
- τ_w

เป็นสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์โดยไอน้ำในอากาศ
- τ_o

เป็นสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์โดยโอโซน
- τ_g

เป็นสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์โดยก๊าซในอากาศ

โดยที่ α เป็นค่าตัวชี้วัดขนาดของอนุภาคที่เป็นองค์ประกอบของบรรยากาศเทียบกับความยาวคลื่นในทฤษฎีการกระเจิงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไปในการคำนวณจะใช้ค่า $\alpha = 1.3$ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยสำหรับบรรยากาศปกติโดยส่วนใหญ่ที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็ก (Janjai et al., 2002)

τ_r , τ_w , τ_o และ τ_g เป็นสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ ขององค์ประกอบต่างๆในบรรยากาศ หาได้จากสมการที่ (6) - (9) โดยการวิเคราะห์ข้อมูลอุตุณิมวิทยาย้อนหลัง 18 ปี (พ.ศ. 2531-พ.ศ. 2549) เพื่อให้มีความเชื่อมั่นทางสถิติ จากนั้นนำมาแทนค่าในสมการที่ (1) จะได้ค่า β ดังรายละเอียดต่อไปนี้

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์โดยการกระเจิงของโมเลกุลอากาศ (transmittance by Rayleigh scattering, τ_r) หาได้จากสมการ (Louche et al., 1987)

$$\tau_r = \exp[-0.0903m_a^{0.84}(1+m_a-m_a^{1.01})] \tag{6}$$

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์โดยโอโซน (transmittance by ozone , τ_o) หาได้จากแบบจำลองของ Lacis และ Hensen (1974) ดังนี้

$$\tau_o = 1 - \left\{ \frac{0.02118 \ell m_r}{1 + 0.0429 \ell m_r + 0.000323 (\ell m_r)^2} + \frac{1.082 \ell m_r}{(1 + 178.6 \ell m_r)^{0.805}} + \frac{0.0658 \ell m_r}{1 + (103.6 \ell m_r)^3} \right\} \tag{7}$$

เมื่อ ℓ เป็นความหนาของชั้น โอโซน (vertical ozone layer thickness) ในหน่วยเซนติเมตร
 m_r เป็นมวลอากาศมาตรฐาน

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์โดยก๊าซในอากาศ (transmittance by uniformly mixed gases, τ_g) ก๊าซส่วนใหญ่ในบรรยากาศ สามารถดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ได้ทำให้รังสีดวงอาทิตย์ผ่านเข้ามายังพื้นโลกลดลงตามความสัมพันธ์ (Iqbal , 1983)

$$\tau_g = \exp(-0.0127 m_a^{0.26}) \tag{8}$$

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์โดยไอน้ำในอากาศ (transmittance by water vapor , τ_w) ปริมาณของไอน้ำในบรรยากาศเป็นความสูงของคอลัมน์ของน้ำโดยสมมติว่าถ้าไอน้ำในคอลัมน์ที่ตั้งฉากกับผิวโลกกลั่นตัวเป็นน้ำหมด ซึ่งเรียกว่าปริมาณไอน้ำกลั่นตัวได้ (precipitable water vapor) สัมประสิทธิ์การส่งผ่านหาได้จาก Lacis และ Hensen (1974)

$$\tau_w = 1 - 2.4959 w m_r [(1 + 79.034 w m_r)^{0.6828} + 6.385 w m_r]^{-1} \tag{9}$$

เมื่อ w เป็นปริมาณไอน้ำกลั่นตัวได้ ในหน่วยเซนติเมตร (Leckner,1978)

มวลอากาศ (air mass) คือ สัดส่วนของความหนาของบรรยากาศที่รังสีตรงส่องผ่าน ต่อความหนาของบรรยากาศเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ที่ตำแหน่งเหนือศีรษะ คำนวณได้จาก (Iqbal, 1983)

$$m_a = m_r \left(\frac{P}{P_0} \right) \tag{10}$$

เมื่อ

$$m_r = [\cos \theta_z + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253}]^{-1} \tag{11}$$

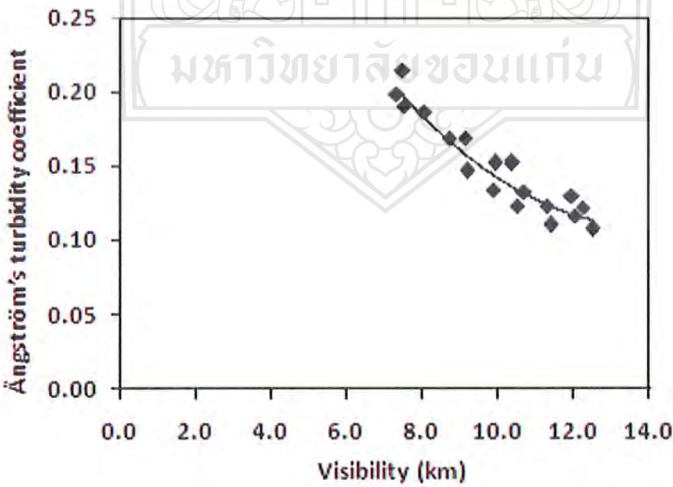
- โดยที่ m_u เป็นมวลอากาศที่สถานีตรวจอากาศใด ๆ
- m_r เป็นมวลอากาศมาตรฐาน
- P เป็นความดันบรรยากาศ ณ ตำแหน่งใด ๆ (mbar)
- P_0 เป็นความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเล เท่ากับ 1013.25 mbar
- θ_z เป็นมุมซินิท (zenith angle)

ผลการวิจัย

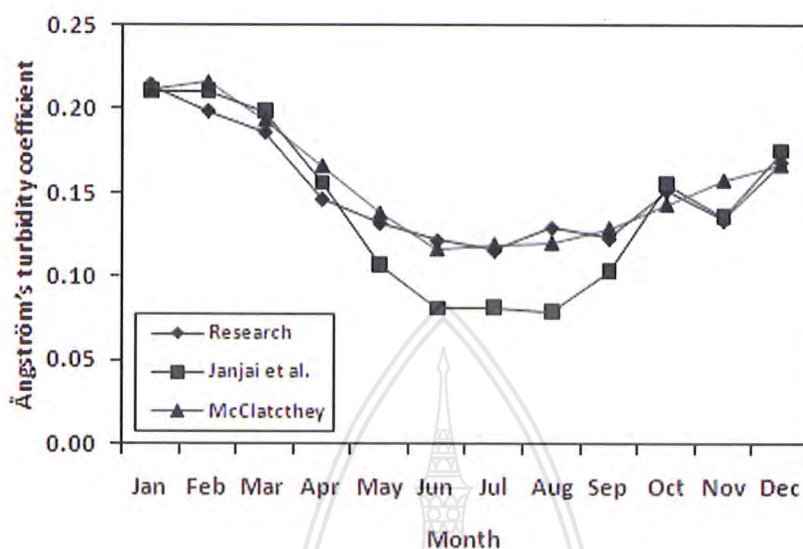
จากการสำรวจวันที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆโดยใช้ข้อมูลเมฆของปี พ.ศ. 2550 ที่จังหวัดขอนแก่น พบว่าตลอดทั้งปีมี 18 วัน รวมกับข้อมูลความเข้มรังสีตรงของดวงอาทิตย์ ปริมาณไอน้ำกลั่นตัวได้ และความหนาของชั้นโอโซน ซึ่งเป็นข้อมูลในช่วงเวลาเดียวกัน นำมาหาค่าสัมประสิทธิ์สภาพพุน้ำของบรรยากาศตามวิธีวิจัยที่กล่าวมา เมื่อนำค่า β ที่คำนวณได้มาหาความสัมพันธ์กับค่าทัศนวิสัยเฉลี่ยรายวัน จะได้ว่าค่า β ลดลงเมื่อค่าทัศนวิสัยมากขึ้น นั่นคือ ค่าทัศนวิสัยน้อย β จะมีค่ามากแสดงว่าปริมาณความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ผ่านบรรยากาศลงมายังพื้นดินมีค่าน้อยลง ดังนั้นจะเห็นว่าแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สภาพพุน้ำของบรรยากาศมีความสัมพันธ์กับทัศนวิสัย ดังรูปที่ 1 โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปแบบสมการ empirical ดังนี้

$$\beta = 0.0022(vis)^2 - 0.06(vis) + 0.5259 \tag{12}$$

- เมื่อ β เป็นค่าสัมประสิทธิ์สภาพพุน้ำของแสงสตรอม
- vis เป็นค่าทัศนวิสัยรายวันเฉลี่ยในช่วงเวลากลางวัน ในหน่วยกิโลเมตร



รูปที่ 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สภาพพุน้ำของแสงสตรอมกับข้อมูลทัศนวิสัยของจังหวัดขอนแก่นซึ่งเป็นข้อมูลในวันที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ ปี พ.ศ. 2550



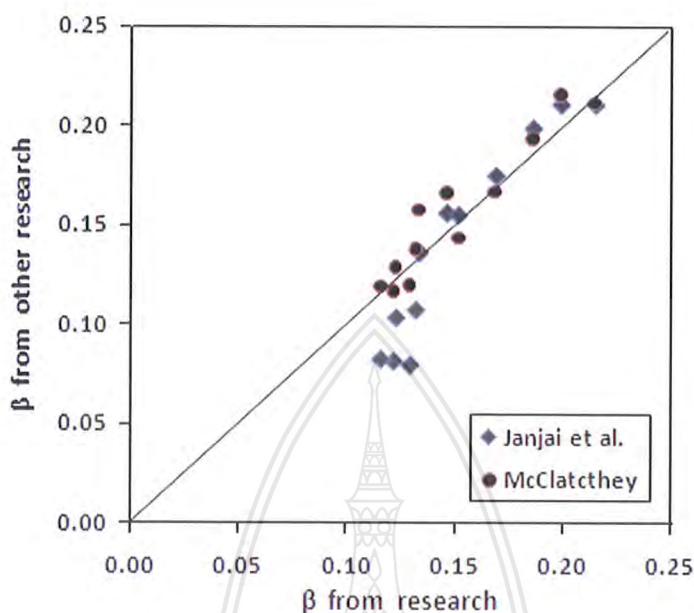
รูปที่ 2 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์สภาพขุ่นมัวของแองสตรอม กับเวลาในรอบปี พ.ศ.2550 ของจังหวัดขอนแก่น จากข้อมูลของงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Janjai และคณะ (2002) และงานวิจัยของ McClatchey (Iqbal , 1983)

จากรูปที่ 2 เมื่อนำความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการที่ (12) มาหาค่า β จากข้อมูลทัศนวิสัยซึ่งเป็นค่ารายวันเฉลี่ยต่อเดือน จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์สภาพขุ่นมัวของบรรยากาศมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรอบปี โดยจะมีค่ามากในช่วงเดือนมกราคมถึงมีนาคมและจะลดลงในช่วงเดือนเมษายนถึงกันยายนซึ่งจะมีค่าต่ำสุดในเดือนกรกฎาคมจากนั้นจะเริ่มเพิ่มขึ้น จากการเปรียบเทียบการแปรค่าตามเวลาในรอบปีในงานวิจัยนี้เทียบกับงานวิจัยของ Janjai และคณะ (2002) และ งานวิจัยของ McClatchey (Iqbal, 1983) โดยใช้ข้อมูลที่จังหวัดขอนแก่นในช่วงเวลาเดียวกัน ผลที่ได้จากงานวิจัยมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรอบปีสอดคล้องกันจากตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์สภาพขุ่นมัวของแองสตรอมที่ได้จากงานวิจัยนี้ มีความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย (Standard Error of the Mean) เท่ากับ 0.0043 ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำในการวิเคราะห์ นั่นคือช่วงของค่า β ที่มีโอกาสเป็นไปได้โดยมีระดับความน่าเชื่อถือ (95% confidence level) ของค่าเฉลี่ยคือเท่ากับ 0.152 ± 0.008

ตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สภาพุ่นน้ำของแองสตรอมที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (12) โดยใช้ข้อมูลของ จังหวัดขอนแก่นปี พ.ศ. 2550

เดือน	ความเข้มรังสีตรง (W/m ²)	ทัศนวิสัย (km)	Ångström's turbidity coefficient (β)	Standard error of the mean	Confidence limit
มกราคม	433.33	7.47	0.214	0.0075	± 0.014
กุมภาพันธ์	450.00	7.32	0.199	0.0073	± 0.014
มีนาคม	433.89	8.05	0.186	0.0064	± 0.012
เมษายน	396.11	9.17	0.146	0.0035	± 0.006
พฤษภาคม	346.39	10.69	0.132	0.0040	± 0.007
มิถุนายน	324.72	12.23	0.122	0.0036	± 0.007
กรกฎาคม	277.78	12.01	0.116	0.0029	± 0.005
สิงหาคม	255.56	11.95	0.129	0.0032	± 0.006
กันยายน	265.00	11.28	0.123	0.0044	± 0.008
ตุลาคม	342.22	10.36	0.152	0.0023	± 0.004
พฤศจิกายน	402.78	9.57	0.134	0.0040	± 0.007
ธันวาคม	435.00	9.13	0.169	0.0030	± 0.005
เฉลี่ย	363.56	9.93	0.152	0.0043	± 0.008

จากรูปที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบค่า β พบว่าค่าที่ได้จากงานวิจัยของ McClatchey (Iqbal, 1983) มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากงานวิจัยนี้ซึ่งมีความแตกต่างในรูปของ Root Mean Square Error (RMSE) เท่ากับ 0.0116 และ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Janjai และคณะ (2002) พบว่ามีความสอดคล้องใกล้เคียงกันเมื่อ β มีค่ามาก โดยมีความแตกต่างในรูปของ RMSE เท่ากับ 0.0239



รูปที่ 3 เปรียบเทียบค่า β ที่ได้จากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ McClatchey และ Janjai และคณะ. (2002)

โดยใช้ข้อมูล ทศวรรษของจังหวัดขอนแก่น ปี พ.ศ.2550

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาพบว่าสภาพฝุ่นมวลของบรรยากาศในจังหวัดขอนแก่นมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรอบปีโดยจะมีค่ามากในช่วงเดือนธันวาคมถึงมีนาคมแสดงให้เห็นว่าบรรยากาศเริ่มจะมีความขุ่นมัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเดือนมกราคม ค่า β เท่ากับ 0.214 ± 0.014 มีค่าเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดเล็กน้อยคือ 0.200 (Iqbal, 1983) ซึ่งในช่วงนี้เป็นฤดูหนาวอากาศแห้งจึงมีฝุ่นละอองที่เกิดจากยานพาหนะและการก่อสร้างฟุ้งกระจายไปทั่วบริเวณ และจะลดลงในช่วงเดือนเมษายนถึงกันยายนซึ่งจะมีค่าต่ำสุดในเดือนกรกฎาคมเท่ากับ 0.116 ± 0.005 ซึ่งเป็นฤดูฝนอากาศมีความขุ่นมัวน้อย น้ำฝนจะชะล้างฝุ่นละอองในอากาศทำให้ท้องฟ้าแจ่มใส จากนั้นจะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยต่อปีเท่ากับ 0.152 ± 0.008 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ของบรรยากาศเริ่มที่จะขุ่นมัว ค่าสัมประสิทธิ์สภาพฝุ่นมวลของบรรยากาศจะมีความสัมพันธ์กับทัศนวิสัย นั่นคือ ค่า β จะลดลงเมื่อทัศนวิสัยมากขึ้น และที่ทัศนวิสัยน้อยค่า β จะมีค่ามาก แสดงให้เห็นว่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ผ่านบรรยากาศ ลงมายังพื้นโลกมีค่าน้อยทำให้ระยะการมองเห็นลดลงอันเป็นผลมาจากสภาพฝุ่นมวลของบรรยากาศ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำค่า β ไปทำนายสภาพฝุ่นมวลของบรรยากาศได้ นั่นคือ บรรยากาศที่มีสภาพฝุ่นมวลมากจะทำให้ระยะการมองเห็นลดลง และสามารถทำนายสภาพฝุ่นมวลของบรรยากาศในสถานที่ต่างๆ ได้ถ้าทราบค่าทัศนวิสัยของสถานที่นั้นๆ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในงานออกแบบทางด้านพลังงานแสงอาทิตย์และงานที่เกี่ยวข้องต่อไป

ในการหาค่า β นั้นผู้วิจัยได้พบข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนของผลที่ได้ สาเหตุที่สำคัญคือ ข้อมูลวันที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ มีจำนวนน้อย อีกทั้งเป็นการยากที่จะคัดเลือกวันที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆจริง และไม่ได้คำนึงถึงฤดูกาลซึ่งจะมีผลต่อปริมาณความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ระดับพื้นดิน นอกจากนี้ ข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ จากการวัดอาจผิดพลาดได้ถ้าอุปกรณ์ไม่ได้มาตรฐาน ดังนั้นในงานวิจัยต่อไปจึงเสนอแนะให้ทำการคัดเลือกวันที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆโดยพิจารณาพร้อมกับข้อมูลดาวเทียมจะทำให้ได้วันที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆถูกต้องมากขึ้น รวมทั้งคำนึงถึงสภาพภูมิประเทศและฤดูกาลจะทำให้ได้ข้อมูลที่มีความผิดพลาดน้อยจะสามารถทำนายปริมาณของฝุ่นละอองได้ถูกต้องมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Garrison, J. D. (1992). Estimation of atmospheric precipitable water over Australia for application to the division of solar radiation into its direct and diffuse components. *Solar Energy*. 48: 89-96.
- Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*. New York: Academic Press.
- Janjai, S., Kumharn, W. and Laksanaboonsong, J. (2002). Determination of Ångström's turbidity coefficient over Thailand. *Renewable Energy*. 28: 1685-1700.
- Lacis, A. A. and Hansen, J. E. (1974). Parameterization : for the absorption of solar radiation in the Earth's Atmosphere. *Journal Atmospheric Science*. 19: 118-132.
- Leckner, B. (1978). The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface elements of a Model. *Solar Energy*. 20: 143-150.
- Louche, A., Maurel, M., Simonnot, G., Peri, G. and Iqbal, M. (1987). Determination of Ångström's Turbidity coefficient from direct total solar irradiance measurements. *Solar Energy*. 38: 89-96.



ระเบียบวิธีสมาชิกตามขอบ โดยใช้วิธีสมาชิกกำลังสอง ใน 2 มิติกับโปรแกรมแมทแลบ

The Boundary Element Method using Quadratic Element for Two – Dimensional with MATLAB

จักรี ภาษา¹ และ วัฒนา เถาว์ทิพย์^{1*}

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อศึกษาการประยุกต์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่เรียกว่า วิธีสมาชิกกำลังสอง ในระเบียบวิธีสมาชิกตามขอบใน 2 มิติ กับสมการลาปลาซ ผลการศึกษาพบว่า ผลเฉลยที่ได้จากวิธีสมาชิกกำลังสองที่คำนวณด้วยโปรแกรมแมทแลบกับปัญหาค้างกล่าวเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับวิธีสมาชิกเชิงเส้นที่คำนวณด้วยโปรแกรมแมทแลบ และผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหา ถือว่าอยู่ในระดับยอมรับได้ นอกจากนี้แล้ว โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาแมทแลบดังกล่าวยังได้ถูกประดิษฐ์เพื่อการคำนวณและเพื่ออำนวยความสะดวกในการศึกษาของนักวิจัยรุ่นต่อไป

Abstract

The purpose of this study is to apply a numerical technique, called the quadratic boundary element method in two-dimensional Laplace equation. The numerical results using the method with MATLAB are compared well with those from reference solutions using linear boundary element method with MATLAB and exact solutions. The MATLAB code is also convenient for new researchers to study and develop.

คำสำคัญ: ระเบียบวิธีสมาชิกตามขอบ วิธีสมาชิกกำลังสอง สมการลาปลาซ แมทแลบ

Keywords: Boundary element method, Quadratic element, Laplace equation, Matlab

¹ ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002,

* Corresponding Author E-mail: wattou@kku.ac.th

บทนำ

ระเบียบวิธีสมาชิกตามขอบ (Boundary Element Method: BEM) มีความสำคัญในกระบวนการแก้ปัญหาในด้านวิทยาศาสตร์ประยุกต์และวิศวกรรมศาสตร์ โดยมีจุดกำเนิดจากการเปรียบเทียบระเบียบวิธีผลต่างจำกัด (Finite Difference Method: FDM) และระเบียบวิธีสมาชิกจำกัด (Finite Element Method: FEM)

จากงานวิจัยของ Toutip (2001) ได้นำวิธีสมาชิกเชิงเส้นในระเบียบวิธีสมาชิกตามขอบใน 2 มิติ สำหรับปัญหาที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ในงานวิจัยของ Kaennakham (2004) ได้นำวิธีสมาชิกเชิงเส้นในระเบียบวิธีสมาชิกตามขอบสำหรับการเบรเกอร์ ใน 2 มิติ โดยใช้โปรแกรมเมทแลบในการคำนวณ และในงานวิจัยของ อรชัย จันทารา (2549) ได้นำวิธีสมาชิกเชิงเส้นในระเบียบวิธีสมาชิกตามขอบใน 2 มิติ สำหรับสมการไบฮามอนิก ใน 2 มิติ โดยใช้โปรแกรมเมทแลบในการคำนวณ

ผู้วิจัยได้นำวิธีสมาชิกกำลังสองในระเบียบวิธีสมาชิกตามขอบมาคำนวณด้วยโปรแกรมเมทแลบ เพื่อแก้ปัญหาค่าของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสองที่อยู่ในลักษณะของสมการลาปลาซ แล้วนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับวิธีสมาชิกเชิงเส้นที่คำนวณด้วยโปรแกรมเมทแลบจากงานวิจัยของ Kaennakham (2004) และผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหาดังกล่าว

ระเบียบวิธีสมาชิกตามขอบ

1. ระเบียบวิธีสมาชิกตามขอบสำหรับปัญหาศักย์

ระเบียบวิธีสมาชิกตามขอบสำหรับปัญหาศักย์ (potential problem) u ในโดเมน Ω บนขอบ Γ มีสมการอินทิเกรตพื้นฐาน ที่รู้จักกันดีคือ

$$Cu + \oint_{\Gamma} u q^* ds = \oint_{\Gamma} u^* q ds \tag{1}$$

เมื่อ C คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดในโดเมน

$$q = \frac{\partial u}{\partial n}$$

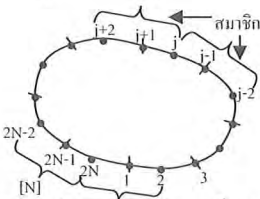
เมื่อ n เป็นเวกเตอร์ปรกติขนาดหนึ่งหน่วยบนผิวขอบ

u^* คือ ผลเฉลยมูลฐานของสมการลาปลาซ

$$q^* = \frac{\partial u^*}{\partial n}$$

จากสมการ (1) ในระเบียบวิธีสมาชิกกำลังสองจะการแบ่งขอบ Γ เป็น N สมาชิก และมีจำนวนจุดขอบเท่ากับ $2N$ ดังภาพที่ 1 และแทนเส้นโค้ง Γ ด้วย Γ_N จะได้ว่าการอินทิเกรตบนขอบถูกประยุกต์โดย

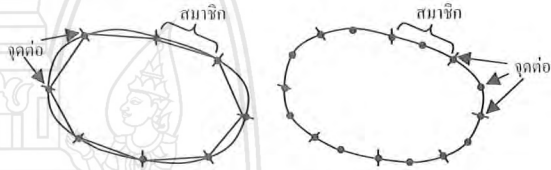
$$Cu + \oint_{\Gamma_N} u q^* ds = \oint_{\Gamma_N} u^* q ds \tag{2}$$



รูปที่ 1 การแบ่งส่วนของขอบออกเป็น N สมาชิก

2. วิธีสมาชิกกำลังสอง

พิจารณาสมาชิกตามขอบวิธีสมาชิกเชิงเส้น และวิธีสมาชิกกำลังสอง



(1) สมาชิกเชิงเส้น (2) สมาชิกกำลังสอง

รูปที่ 2 การกำหนดสมาชิกตามขอบ

สมาชิกกำลังสองเราใช้การประมาณค่าฟังก์ชัน ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 และมักเรียกว่าฟังก์ชันพื้นฐาน (shape function) ดังนั้นจะได้ว่าค่า u และ q สามารถเขียนในรูปของ

$$\begin{aligned} u(\xi) &= \phi_1 U_{j-1} + \phi_2 U_j + \phi_3 U_{j+1} \\ &= [\phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3] [U_{j-1} \ U_j \ U_{j+1}]^T \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} q(\xi) &= \phi_1 Q_{j-1} + \phi_2 Q_j + \phi_3 Q_{j+1} \\ &= [\phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3] [Q_{j-1} \ Q_j \ Q_{j+1}]^T \end{aligned} \tag{7}$$

ถ้า $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ เป็นพิกัดของจุดเส้นโค้งที่กำหนดจุดทั้งสามสามารถบรรยายได้ด้วยฟังก์ชันต่อไปนี้

$$x = \phi_1 x_1 + \phi_2 x_2 + \phi_3 x_3 \tag{8}$$

$$y = \phi_1 y_1 + \phi_2 y_2 + \phi_3 y_3 \tag{9}$$

เมื่อ

$$\phi_1 = \frac{1}{2}(\xi^2 - \xi), \phi_2 = (1 - \xi)^2, \phi_3 = \frac{1}{2}(\xi^2 + \xi) \quad (10)$$

แทนสมการ (10) ในสมการ (8) และ (9) จะได้

$$x = 0.5\xi^2(x_1 - 2x_2 + x_3) + 0.5\xi(x_3 - x_1) + x_2 \quad (11)$$

$$y = 0.5\xi^2(y_1 - 2y_2 + y_3) + 0.5\xi(y_3 - y_1) + y_2 \quad (12)$$

ซึ่งใช้ จาคอบีเยน

$$J(\xi) = \frac{ds}{d\xi} = \sqrt{\left(\frac{dx}{d\xi}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\xi}\right)^2} \quad (13)$$

$$ds = \sqrt{\left(\frac{dx}{d\xi}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\xi}\right)^2} d\xi = J(\xi) d\xi \quad (14)$$

ซึ่งหา $\frac{dx}{d\xi}$ และ $\frac{dy}{d\xi}$ จากสมการที่ 11 และ 12

$$\frac{dx}{d\xi} = 0.5(x_3 - x_1) + (x_1 - 2x_2 + x_3)\xi \quad (15)$$

$$\frac{dy}{d\xi} = 0.5(y_3 - y_1) + (y_1 - 2y_2 + y_3)\xi \quad (16)$$

$$J(\xi) = \{[\xi(x_1 - 2x_2 + x_3) + 0.5(x_3 - x_1)]^2 + [\xi(y_1 - 2y_2 + y_3) + 0.5(y_3 - y_1)]^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

เมื่อแทนสมการ (6) และ (14) ลงในสมการ (5) และค่า

อินทิกรัลบนสมาชิก [j] ทางด้านซ้ายของสมการ คือ

$$\int_{\Gamma_N} \sum_{j=1}^N w_j(s) U_j q^* ds = \sum_{j=1}^N \int_{\Gamma_j} [\phi_1 \phi_2 \phi_3] J^* J(\xi) d\xi \begin{bmatrix} U_{j-1} \\ U_j \\ U_{j+1} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$= \sum_{j=1}^N [h_{j1} \ h_{j2} \ h_{j3}] \begin{bmatrix} U_{j-1} \\ U_j \\ U_{j+1} \end{bmatrix} \quad (19)$$

เมื่อ $h_{jk} = \int_{\Gamma_j} \phi_k q^* J(\xi) d\xi, k=1,2,3$

ดังนั้นจากสมการ (19) สำหรับ $i=1,2,3,\dots,N$ จะได้

$$\sum_{j=1}^N [h_{j1} \ h_{j2} \ h_{j3}] \begin{bmatrix} U_{j-1} \\ U_j \\ U_{j+1} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^N (\hat{H}_{ij}) U_j \quad (20)$$

เมื่อ $\hat{H}_{ij} = h_{(j+1)1} + h_{j2} + h_{(j-1)3}$ (21)

ทำนองเดียวกันเมื่อแทนสมการ (6) และ (14) ลงในสมการ

(5) และค่าอินทิกรัลบนสมาชิก [j] ทางด้านขวาของ

สมการ คือ

$$\int_{\Gamma_N} \sum_{j=1}^N w_j(s) Q_j u^* ds = \sum_{j=1}^N \int_{\Gamma_j} [\phi_1 \phi_2 \phi_3] u^* J(\xi) d\xi \begin{bmatrix} Q_{j-1} \\ Q_j \\ Q_{j+1} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$= \sum_{j=1}^N [g_{j1} \ g_{j2} \ g_{j3}] \begin{bmatrix} Q_{j-1} \\ Q_j \\ Q_{j+1} \end{bmatrix} \quad (23)$$

เมื่อ $g_{jk} = \int_{\Gamma_j} \phi_k u^* J(\xi) d\xi, k=1,2,3$ (24)

ดังนั้นจากสมการ (23) สำหรับ $i=1,2,3,\dots,N$ จะได้

$$\sum_{j=1}^N [g_{j1} \ g_{j2} \ g_{j3}] \begin{bmatrix} Q_{j-1} \\ Q_j \\ Q_{j+1} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^N (G_{ij}) Q_j \quad (25)$$

เมื่อ $G_{ij} = g_{(j+1)1} + g_{j2} + g_{(j-1)3}$ (26)

และการพัฒนาระบบวิธีสมาชิกตามขอบจะได้ว่า

$$C_i u_i + \sum_{j=1}^N \hat{H}_{ij} U_j = \sum_{j=1}^N G_{ij} Q_j \quad (27)$$

กำหนดให้ $H_{ij} = \hat{H}_{ij}$ สำหรับ $i \neq j$ (28)

$H_{ij} = \hat{H}_{ij} + C$ สำหรับ $i = j$ (29)

แทนค่าสมการ (28) สมการ (29) ลงในสมการ (27) จะได้ว่า

$$\sum_{j=1}^N H_{ij} U_j = \sum_{j=1}^N G_{ij} Q_j \quad (30)$$

นั่นคือเขียนในรูปสมการเชิงเส้นในระบบเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$HU = GQ \quad (31)$$

ดังนั้นจากสมการ (31) และแทนค่าเงื่อนไขขอบที่กำหนด

ไว้จะได้ระบบสมการเมตริกซ์ดังนี้

$$[H_1, H_2] \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = [G_1, G_2] \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} \quad (32)$$

เมื่อ U_1 และ Q_2 คือตัวที่ทราบค่าบนขอบ และ U_2

และ Q_1 คือตัวไม่ทราบค่าบนขอบ แล้วทำการจัดรูป

สมการให้อยู่ในรูประบบ

$$Ax = y \quad (33)$$

เมื่อ $A = [-G_1 H_2], x = \begin{bmatrix} Q_1 \\ U_2 \end{bmatrix}, y = [G_2 Q_2 - H_1 U_1]$

ทำการคำนวณหาคำตอบของระบบสมการคือ U_2

และ Q_1 ซึ่งเป็นค่าบนจุดบนขอบ

พิจารณา u_k ของจุดภายในดังนี้

$$u_k = \sum_{j=1}^N \bar{G}_{kj} Q_j - \sum_{j=1}^N \bar{H}_{kj} U_j \quad (34)$$

เมื่อ $\bar{G}_{kj}$ และ $\bar{H}_{kj}$ กระจ่ายในลักษณะเดียวกันกับ

G_{kj} และ H_{kj}

3. การคำนวณเมตริกซ์ H_{ij} และ G_{ij}

ในการคำนวณเมตริกซ์ H_{ij} และ G_{ij} เราจะใช้วิธี
สมาชิกกำลังสองในการคำนวณ

3.1 การอินทิเกรต H_{ij}

3.1.1 กรณี $i \neq j$ จากสมการ (25)

$$\hat{H}_{ij} = h_{(j+1)i} + h_{j2} + h_{(j-1)3}$$

$$\hat{H}_{ij} = \int_{[j+1]} \phi_1 q^* J(\xi)_{(j+1)} d\xi + \int_{[j]} \phi_2 q^* J(\xi)_{(j)} d\xi$$

$$+ \int_{[j-1]} \phi_3 q^* J(\xi)_{(j-1)} d\xi \quad (35)$$

$$\text{เมื่อ } q^* = \frac{-1}{2\pi R^2} ((x_i - x)n_x + (y_i - y)n_y) \quad (36)$$

$$R_{ij} = \sqrt{(x_i - (x_j)_g)^2 + (y_i - (y_j)_g)^2} \quad (37)$$

$$n_x = \frac{dy/d\xi}{J(\xi)}, \quad n_y = \frac{-dx/d\xi}{J(\xi)} \quad (38)$$

แทนสมการ (10) (11) (12) (14) (15) (16) (27) (36) และ
(38) ในสมการ (35) แล้วใช้การอินทิเกรตแบบเกาส์

$$\begin{aligned} \hat{H}_{ij} = & \sum_{g=1}^{10} w_g \{0.5(\xi_g^2 - \xi_g) \frac{-1}{2\pi R_{i(j+1)}^2} [(x_i - (0.5\xi_g^2(x_{j+1} - 2x_{j+2} + x_{j+3}) + 0.5\xi_g(x_{j+3} - x_{j+1}) + x_{j+2}) \\ & (-0.5(y_{j+3} - y_{j+1}) + (y_{j+1} - 2y_{j+2} + y_{j+3})\xi_g)) + (y_i - (0.5\xi_g^2(y_{j+1} - 2y_{j+2} + y_{j+3}) + \\ & 0.5\xi_g(y_{j+3} - y_{j+1}) + y_{j+2}) \frac{(0.5(x_{j+3} - x_{j+1}) + (x_{j+1} - 2x_{j+2} + x_{j+3})\xi_g)}{J(\xi_g)_{(j+1)}}] \} J(\xi_g)_{(j+1)} \\ & + \sum_{g=1}^{10} w_g \{ (1 - \xi_g^2) \frac{-1}{2\pi R_{i(j)}^2} [(x_i - (0.5\xi_g^2(x_j - 2x_{j+1} + x_{j+2}) + 0.5\xi_g(x_{j+2} - x_j) + x_{j+1}) \\ & (-0.5(y_{j+2} - y_j) + (y_j - 2y_{j+1} + y_{j+2})\xi_g)) + (y_i - (0.5\xi_g^2(y_j - 2y_{j+1} + y_{j+2}) + \\ & 0.5\xi_g(y_{j+2} - y_j) + y_{j+1}) \frac{(0.5(x_{j+2} - x_j) + (x_j - 2x_{j+1} + x_{j+2})\xi_g)}{J(\xi_g)_{(j)}}] \} J(\xi_g)_{(j)} \\ & + \sum_{g=1}^{10} w_g \{ 0.5(\xi_g^2 + \xi_g) \frac{-1}{2\pi R_{i(j-1)}^2} [(x_i - (0.5\xi_g^2(x_{j-1} - 2x_j + x_{j+1}) + 0.5\xi_g(x_{j+1} - x_{j-1}) + x_j) \\ & (-0.5(y_{j+1} - y_{j-1}) + (y_{j-1} - 2y_j + y_{j+1})\xi_g)) + (y_i - (0.5\xi_g^2(y_{j-1} - 2y_j + y_{j+1}) + \\ & 0.5\xi_g(y_{j+1} - y_{j-1}) + y_j) \frac{(0.5(x_{j+1} - x_{j-1}) + (x_{j-1} - 2x_j + x_{j+1})\xi_g)}{J(\xi_g)_{(j-1)}}] \} J(\xi_g)_{(j-1)} \end{aligned} \quad (39)$$

3.1.2 กรณี $i = j$ จากสมการ (27)

$$C_i u_i + \sum_{j=1}^N \hat{H}_{ij} U_j = \sum_{j=1}^N G_{ij} Q_j$$

ซึ่งสอดคล้องกับฟังก์ชันฮาร์โมนิก เนื่องจาก $u = 1$

, $q = \frac{\partial u}{\partial n} = 0$ เป็นฟังก์ชันฮาร์โมนิก จึงได้ว่า

$$C_i + \sum_{j=1}^N \hat{H}_{ij} = 0 \quad \text{หรือ} \quad C_i = -\sum_{j=1}^N \hat{H}_{ij}$$

แทนเข้าไปในสมการ (29) จะได้

$$H_{ii} = \hat{H}_{ii} - \sum_{j=1}^N \hat{H}_{ij} = -\sum_{j=1, j \neq i}^N \hat{H}_{ij} = -\sum_{j=1, j \neq i}^N H_{ij} \quad (40)$$

3.2 การอินทิเกรต G_{ij}

3.2.1 กรณี $i \neq j$ จากสมการ

$$G_{ij} = \int_{[j+1]} \phi_1 u^* ds + \int_{[j]} \phi_2 u^* ds + \int_{[j-1]} \phi_3 u^* ds \quad (41)$$

$$\text{เมื่อ } u^* = \frac{-1}{2\pi} (\ln R) \quad (42)$$

แทนสมการ (10) (14) และ (42) ในสมการ (41) จะได้

$$\begin{aligned}
 G_{ij} = & \int_{[j+1]} \left(\frac{\xi^2 - \xi}{2} \right) \left(\frac{-1}{2\pi} \right) \ln(R_{i(j+1)}) J(\xi)_{(j+1)} d\xi \\
 & + \int_{[j]} \left(\frac{1 - \xi^2}{2} \right) \left(\frac{-1}{2\pi} \right) \ln(R_{i(j)}) J(\xi)_{(j)} d\xi + \\
 & \int_{[j-1]} \left(\frac{\xi^2 + \xi}{2} \right) \left(\frac{-1}{2\pi} \right) \ln(R_{i(j-1)}) J(\xi)_{(j-1)} d\xi \\
 G_{ij} = & \sum_{g=1}^{10} w_g \frac{(\xi_g^2 - \xi_g)}{2} \left(\frac{-1}{2\pi} \right) \ln(R_{i(j+1)})_g (J(\xi)_{(j+1)})_g \\
 & + \sum_{g=1}^{10} w_g \frac{(1 - \xi_g^2)}{2} \left(\frac{-1}{2\pi} \right) \ln(R_{i(j)})_g (J(\xi)_{(j)})_g \\
 & + \sum_{g=1}^{10} w_g \frac{(\xi_g^2 + \xi_g)}{2} \left(\frac{-1}{2\pi} \right) \ln(R_{i(j-1)})_g (J(\xi)_{(j-1)})_g \quad (43)
 \end{aligned}$$

3.2.2 กรณี $i = j$

การอินทิเกรตแบ่งออกเป็นสามกรณี คือ

กรณีที่ 1 ถ้าจุด i อยู่ตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งที่ 1

กำหนดให้ $\eta = 0.5(1 + \xi)$

$$\xi = 2\eta - 1$$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น} \int_{-1}^1 f(\xi) d\xi &= \int_0^1 f(\eta) 2d\eta \\
 &= \int_0^1 2f_0 \ln \eta d\eta + \int_0^1 (f(\eta) - f_0 \ln \eta) 2d\eta \\
 &= -2f_0 + \int_{-1}^1 \left[f(\xi) - f_0 \ln \left(\frac{1+\xi}{2} \right) \right] d\xi \quad (44)
 \end{aligned}$$

เมื่อ $f_0 = \lim_{\eta \rightarrow 0} \left[\frac{f(\eta)}{\ln(\eta)} \right]$ เป็นค่าคงที่ นั่นคือ

$$f_0 = \frac{-\sqrt{(-1.5x_1 + 2x_2 - 0.5x_3)^2 + (-1.5y_1 + 2y_2 - 0.5y_3)^2}}{2\pi}$$

กรณีที่ 2 ถ้าจุด i อยู่ตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งที่ 2

กำหนดให้ $\eta = \xi$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น} \int_{-1}^1 f(\xi) d\xi &= \int_{-1}^1 f(\eta) d\eta \\
 &= \int_{-1}^1 f_0 \ln |\eta| d\eta + \int_{-1}^1 (f(\eta) - f_0 \ln |\eta|) d\eta \\
 &= -2f_0 + \int_{-1}^1 [f(\xi) - f_0 \ln |\xi|] d\xi \quad (45)
 \end{aligned}$$

เมื่อ $f_0 = \lim_{\eta \rightarrow 0} \left[\frac{f(\eta)}{\ln(\eta)} \right]$ เป็นค่าคงที่ นั่นคือ

$$f_0 = \frac{-0.5\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2}}{2\pi}$$

กรณีที่ 3 ถ้าจุด i อยู่ตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งที่ 3

กำหนดให้ $\eta = 0.5(1 - \xi)$, $\xi = 1 - 2\eta$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น} \int_{-1}^1 f(\xi) d\xi &= \int_0^1 f(\eta) 2d\eta \\
 &= \int_0^1 2f_0 \ln \eta d\eta + \int_0^1 (f(\eta) - f_0 \ln \eta) 2d\eta \\
 &= -2f_0 + \int_{-1}^1 \left[f(\xi) - f_0 \ln \left(\frac{1-\xi}{2} \right) \right] d\xi \quad (46)
 \end{aligned}$$

เมื่อ $f_0 = \lim_{\eta \rightarrow 0} \left[\frac{f(\eta)}{\ln(\eta)} \right]$ เป็นค่าคงที่ นั่นคือ

$$f_0 = \frac{-\sqrt{(0.5x_1 - 2x_2 + 1.5x_3)^2 + (0.5y_1 - 2y_2 + 1.5y_3)^2}}{2\pi}$$

พจน์ที่สองทางด้านขวาของสมการ (44) (45) และ (46) สามารถหาค่าได้โดยการอินทิเกรตแบบเกาส์ได้

4. เปรียบเทียบวิธีสมาชิกตามขอบกับโปรแกรมเมทแลบ

ในส่วนนี้จะคำนวณหาเมตริกซ์ H และเมตริกซ์ G โดยใช้ระเบียบวิธีสมาชิกกำลังสอง ซึ่งคำนวณโดยใช้โปรแกรมเมทแลบ

4.1 การอินทิเกรตแบบเกาส์เซียน

การอินทิเกรตในแต่ละส่วนของสมาชิกต้องใช้การอินทิเกรตแบบเกาส์เซียน ซึ่งเราเลือกใช้เกาส์เซียน 10 จุดจากสมการ (8) (9) และ (10) การประมาณค่าในสมาชิก [j]

```

for g=1:10
    F1(g)=0.5*( (ep(g))^2-ep(g) );
    F2(g)=1-(ep(g))^2;
    F3(g)=0.5*( (ep(g))^2+ep(g) );
    x1(g)=X(j)*F1(g)+X(j+1)*F2(g)
        +X(j+2)*F3(g);
    y1(g)=Y(j)*F1(g)+Y(j+1)*F2(g)
        +Y(j+2)*F3(g);
End

```

ดังนั้นสำหรับระยะจากจุดที่ i ไปสมาชิก [j] คือ

$$(R_{ij})_g = \sqrt{(x_i - (x_j)_g)^2 + (y_i - (y_j)_g)^2}$$

4.2 การคำนวณเมตริกซ์ H

4.2.1 กรณี $i \neq j$ แบ่งการคำนวณโดยกำหนดให้ $j = 1, j = 2, j = 3, 4, \dots, n-2, j = n-1$ และ $j = n$ จากสมการ (39) เขียนในรูปโปรแกรมเมทแลบได้ดังนี้

```

for i=1:n
    for j=1
    % *** first consider for (i,j+1)*****
        for g=1:10
            A=X(j)-2*X(j+1)+X(j+2);
            B=0.5*(X(j+2)-X(j));
            C=Y(j)-2*Y(j+1)+Y(j+2);
            D=0.5*(Y(j+2)-Y(j));

```

```

Jco(g)=sqrt((A*ep(g)+B)^2+
(C*ep(g)+D)^2);
x1(g)=X(j)*F1(g)+X(j+1)*
F2(g)+X(j+2)*F3(g);
y1(g)=Y(j)*F1(g)+Y(j+1)*
F2(g)+Y(j+2)*F3(g);
R2ij1(g)=(X(i)-x1(g))^2+
(Y(i)-y1(g))^2;
dxds(g)=A*ep(g)+B;
dyds(g)=C*ep(g)+D;
nx(g)=(dyds(g))/Jco(g);
ny(g)=-(dxds(g))/Jco(g);
dudx(g)=x1(g)-X(i);
dudy(g)=y1(g)-Y(i);
func(g)=nx(g)*dudx(g)+
ny(g)*dudy(g);
S1(g)=(0.5*func(g)*Jco(g)*
w(g)*F1(g))/R2ij1(g);
end
ssl=sum(S1);
% **** next consider for (i,j) *****
for g=1:10
A=X(n)-2*X(j)+X(j+1);
B=0.5*(X(j+1)-X(n));
C=Y(n)-2*Y(j)+Y(j+1);
D=0.5*(Y(j+1)-Y(n));
Jco(g)=sqrt((A*ep(g)+B)^2
+(C*ep(g)+D)^2);
x1(g)=X(n)*F1(g)+X(j)*
F2(g)+X(j+1)*F3(g);
y1(g)=Y(n)*F1(g)+Y(j)*
F2(g)+Y(j+1)*F3(g);
R2ij1(g)=(X(i)-x1(g))^2+
(Y(i)-y1(g))^2;
dxds(g)=A*ep(g)+B;
dyds(g)=C*ep(g)+D;
nx(g)=(dyds(g))/Jco(g);
ny(g)=-(dxds(g))/Jco(g);
dudx(g)=x1(g)-X(i);
dudy(g)=y1(g)-Y(i);
func(g)=nx(g)*dudx(g)+
ny(g)*dudy(g);
S2(g)=(0.5*func(g)*Jco(g)*
w(g)*F2(g))/R2ij1(g);
end
ss2=sum(S2);
% **** next consider for (i,j-1)*****
for g=1:10
A=X(n-1)-2*X(n)+X(j);
B=0.5*(X(j)-X(n-1));
C=Y(n-1)-2*Y(n)+Y(j);
D=0.5*(Y(j)-Y(n-1));
Jco(g)=sqrt((A*ep(g)+B)^2
+(C*ep(g)+D)^2);
x1(g)=X(n-1)*F1(g)+X(n)*
F2(g)+X(j)*F3(g);
y1(g)=Y(n-1)*F1(g)+Y(n)*
F2(g)+Y(j)*F3(g);
R2ij1(g)=(X(i)-x1(g))^2+
(Y(i)-y1(g))^2;
dxds(g)=A*ep(g)+B;
dyds(g)=C*ep(g)+D;
nx(g)=(dyds(g))/Jco(g);
ny(g)=-(dxds(g))/Jco(g);
dudx(g)=x1(g)-X(i);
dudy(g)=y1(g)-Y(i);
func(g)=nx(g)*dudx(g)+
ny(g)*dudy(g);
S3(g)=(0.5*func(g)*Jco(g)*
w(g)*F3(g))/R2ij1(g);

```

```

end
ss3=sum(S3);
% ****
Hhat(i,j)=-0.5*(ss1+ss2+ss3)/pi;
end
end

```

ในกรณีของ $j = 2, j = 3, 4, \dots, n-2, j = n-1$

และ $j = n$ ทำในทำนองเดียวกัน

4.2.2 กรณี $i = j$ จากสมการ (40) เขียนในรูป

โปรแกรมแมทแลบได้ดังนี้

```

% Next we consider Hhat's values when i=j
for i=1:n
Hhat(i,i)=0;
end
Hhat1=sum(Hhat');
for i=1:n
Hhat(i,i)=-Hhat1(1,i);
end

```

4.4 การคำนวณเมตริกซ์ G

ในการคำนวณเมตริกซ์ G กรณี $i \neq j$ และ $i = j$ จะเขียนไว้ด้วยกัน แบ่งการคำนวณโดยกำหนดให้ $j = 1, j = 2, j = 3, 4, \dots, n-2, j = n-1$ และ $j = n$

จากสมการ (43) (44) (45) และ (46) เขียนในรูปโปรแกรมแมทแลบได้ดังนี้

```

for i=1:n
for j=1
% **** first consider for(i,j+1) ****
for g=1:10
A=X(j)-2*X(j+1)+X(j+2);
B=0.5*(X(j+2)-X(j));
C=Y(j)-2*Y(j+1)+Y(j+2);
D=0.5*(Y(j+2)-Y(j));
Jco(g)=sqrt((A*ep(g)+B)^2+
(C*ep(g)+D)^2);
x1(g)=X(j)*F1(g)+X(j+1)*
F2(g)+X(j+2)*F3(g);
y1(g)=Y(j)*F1(g)+Y(j+1)*
F2(g)+Y(j+2)*F3(g);
R2ij1(g)=sqrt((X(i)-x1(g))^2+
(Y(i)-y1(g))^2);
if i==j
S1(g)=(-0.5*Jco(g)*w(g)*F1(g)
*log(R2ij1(g)))/pi;
SS1=0;
else
dxds=-0.5*(3*X(j)-4*X(j+1)+X(j+2));
dyds=-0.5*(3*Y(j)-4*Y(j+1)+Y(j+2));
jacobl=sqrt((dxds)^2+(dyds)^2);
SS1=(jacobl)/pi;
red(g)=0.5*(1+ep(g));
SS2(g)=0.5*w(g)*log(red(g))
*(jacobl)/pi;
P1(g)=(-0.5*Jco(g)*w(g)*F1(g)
*log(R2ij1(g)))/pi;
S1(g)=P1(g)-SS2(g);
end
end
ss1=sum(S1)+SS1;
% **** next consider for (i,j)*****
for g=1:10

```

```

A=X(n)-2*X(j)+X(j+1);
B=0.5*(X(j+1)-X(n));
C=Y(n)-2*Y(j)+Y(j+1);
D=0.5*(Y(j+1)-Y(n));
Jco(g)=sqrt((A*ep(g)+B)^2+
(C*ep(g)+D)^2);
x1(g)=X(n)*F1(g)+X(j)*F2(g)+
X(j+1)*F3(g);
y1(g)=Y(n)*F1(g)+Y(j)*F2(g)+
Y(j+1)*F3(g);
R2ij1(g)=sqrt((X(i)-x1(g))^2+
(Y(i)-y1(g))^2);
if i~=j
    S2(g)=(-0.5*Jco(g)*w(g)*F2(g)*
    log(R2ij1(g)))/pi;
    SS1=0;
else
    dxds=0.5*(X(j+1)-X(n));
    dyds=0.5*(Y(j+1)-Y(n));
    jacob1=sqrt((dxds)^2+(dyds)^2);
    SS1=(jacob1)/pi;
    red(g)=abs(ep(g));
    SS2(g)=-0.5*w(g)*log(red(g))
    *(jacob1)/pi;
    P2(g)=-0.5*Jco(g)*w(g)*F2(g)
    *log(R2ij1(g))/pi;
    S2(g)=P2(g)-SS2(g);
end
end
ss2=sum(S2)+SS1;
%**** next consider for (i,j-1)****
for g=1:10
    A=X(n-1)-2*X(n)+X(j);
    B=0.5*(X(j)-X(n-1));
    C=Y(n-1)-2*Y(n)+Y(j);
    D=0.5*(Y(j)-Y(n-1));
    Jco(g)=sqrt((A*ep(g)+B)^2
    +(C*ep(g)+D)^2);
    x1(g)=X(n-1)*F1(g)+X(n)*F2(g)
    +X(j)*F3(g);
    y1(g)=Y(n-1)*F1(g)+Y(n)*F2(g)
    +Y(j)*F3(g);
    R2ij1(g)=sqrt((X(i)-x1(g))^2
    +(Y(i)-y1(g))^2);
    if i~=j
        S3(g)=-0.5*Jco(g)*w(g)*F3(g)
        *log(R2ij1(g))/pi;
        SS1=0;
    else
        dxds=0.5*(X(n-1)-4*X(n)+3*X(j));
        dyds=0.5*(Y(n-1)-4*Y(n)+3*Y(j));
        jacob1=sqrt((dxds)^2+(dyds)^2);
        SS1=(jacob1)/pi;
        red(g)=0.5*(1-ep(g));
        SS3(g)=-0.5*w(g)*log(red(g))
        *(jacob1)/pi;
        P3(g)=-0.5*Jco(g)*w(g)*F3(g)
        *log(R2ij1(g))/pi;
        S3(g)=P3(g)-SS3(g);
    end
end
ss3=sum(S3)+SS1;
%*****
G(i,j)=0.5*(ss1+ss2+ss3);
end
end

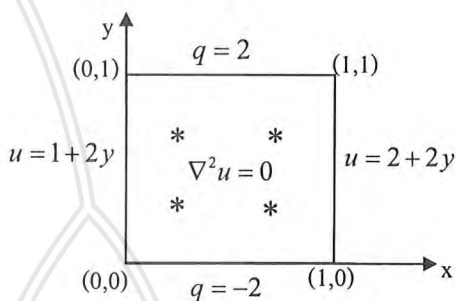
```

ในกรณีของ $j = 2, j = 3: n-2, j = n-1$ และ
 $j = n$ ทำในทำนองเดียวกัน

ผลเฉลยเชิงตัวเลข

ในส่วนนี้จะนำเสนอผลเฉลยเชิงตัวเลขสำหรับปัญหา
 ศักย์ของสมการลาปลาซ โดยใช้ระเบียบวิธีสมาชิกกำลัง
 สอง ที่ใช้โปรแกรมแมทแลบในการคำนวณ(MQBEM)
 เปรียบเทียบกับการใช้ระเบียบวิธีสมาชิกเชิงเส้นที่ใช้
 โปรแกรมแมทแลบในการคำนวณ (MLBEM) และผล
 เฉลยแม่นยำตรง

ตัวอย่างที่ 1 พิจารณาปัญหาศักย์มีเงื่อนไขขอบดังรูปที่ 3
 ผลเฉลยแม่นยำตรงคือ $u = 1 + x + 2y$

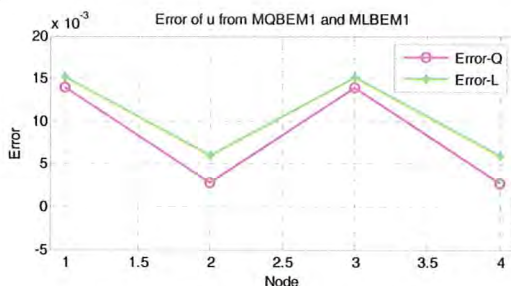


รูปที่ 3 การประมาณค่าจุดภายใน 4 จุด

เมื่อ *เป็นตำแหน่งจุดภายใน

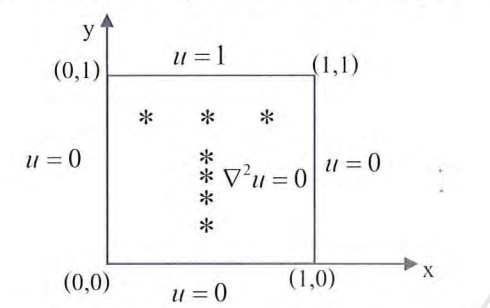
ในการคำนวณจะใช้จุดขอบ 16 จุดและจุดภายใน 4 จุด
 ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบผลเฉลยภายในจากตัวอย่างที่ 1

จุดภายใน	ML BEM1	MQ BEM1	ผลเฉลย แม่นยำ ตรง	ความคลาด เคลื่อน MLBEM1	ความคลาด เคลื่อน QLBEM1
(0.25,0.25)	1.7348	1.7360	1.7500	0.0152	0.0140
(0.75,0.25)	2.2559	2.2527	2.2500	0.0059	0.0027
(0.75,0.75)	3.2652	3.2640	3.2500	0.0152	0.0140
(0.25,0.75)	2.7441	2.7473	2.7500	0.0059	0.0027



รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่าคลาดเคลื่อนสมบูรณ
 จากตัวอย่างที่ 1

ตัวอย่างที่ 2 พิจารณาปัญหาศักย์ โดยมีเงื่อนไขซีรีเคลออยู่
ในลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัส และมีเงื่อนไขขอบตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 การประมาณค่าจุดภายใน 7 จุด ของปัญหาศักย์
เมื่อ * เป็นตำแหน่งจุดภายใน

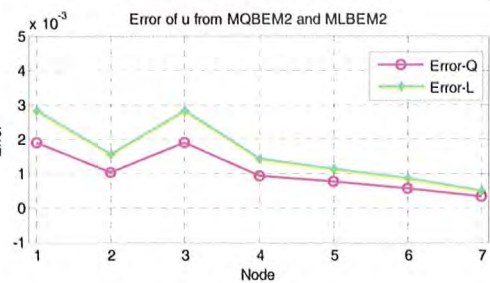
ผลเฉลยแน่นอนตรง คือ

$$u(x,y)=\frac{2}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(1-(-1)^n)(\sin(n\pi x))\sinh(n\pi y)}{n(\sinh(n\pi y))}$$

โดยกำหนดจุดขอบ 64 จุด และจุดภายใน 7 จุด ดังรูปที่ 5

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลเฉลยภายในจากตัวอย่างที่ 2

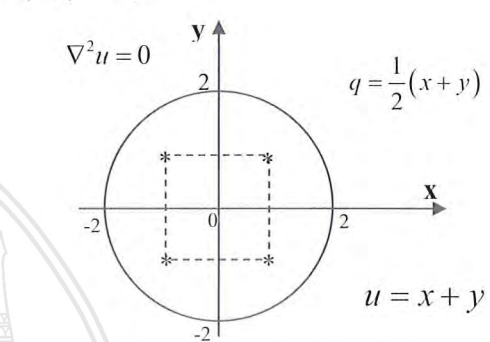
จุดภายใน	ML BEM2	MQ BEM2	ผลเฉลย แน่นอน ตรง	ความคลาด เคลื่อน MLBEM2	ความคลาด เคลื่อน QLBEM2
(0.25,0.75)	0.4292	0.4302	0.4320	0.0028	0.0019
(0.50,0.75)	0.5390	0.5395	0.5405	0.0016	0.0010
0.75,0.75)	0.4292	0.4302	0.4320	0.0028	0.0019
(0.50,0.60)	0.3439	0.3444	0.3453	0.0014	0.0009
(0.50,0.50)	0.2489	0.2493	0.2500	0.0011	0.0007
(0.50,0.40)	0.1757	0.1760	0.1765	0.0008	0.0006
(0.50,0.25)	0.0949	0.0951	0.0954	0.0005	0.0003



รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบค่าคลาดเคลื่อนสมบูรณ์
จากตัวอย่างที่ 2

ตัวอย่างที่ 3 พิจารณาปัญหาศักย์ ที่เป็นรูปวงกลม และมี
เงื่อนไขขอบตามรูปที่ 7 ผลเฉลยแน่นอนตรง คือ

$$u(x,y)=x+y.$$

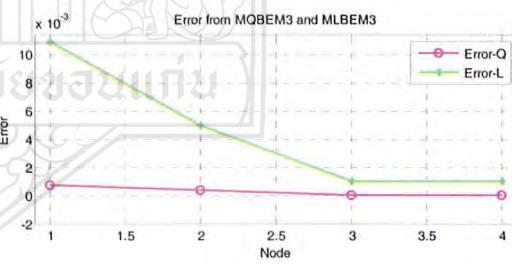


รูปที่ 7 การประมาณค่าจุดภายใน 4 จุด
เมื่อ * เป็นตำแหน่งจุดภายใน

โดยกำหนดจุดขอบ 16 จุด และจุดภายใน 4 จุด

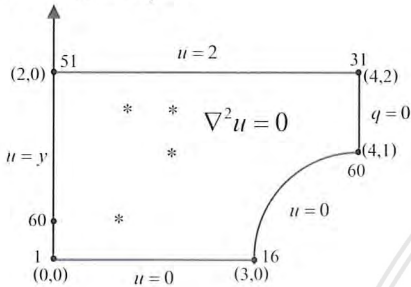
ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบผลเฉลยภายในจากตัวอย่างที่ 3

จุด ภายใน	ML BEM3	MQ BEM3	ผลเฉลย แน่นอนตรง	ความคลาด เคลื่อน MLBEM3	ความคลาด เคลื่อน QLBEM3
(1,1)	1.9890	1.9993	2.0000	0.0110	0.0007
(-1,1)	-0.0050	-0.0004	0.0000	0.0050	0.0004
(-1,-1)	-1.9989	-2.0000	-2.000	0.0011	0.0000
(1,-1)	-0.0011	-0.0001	0.0000	0.0011	0.0001



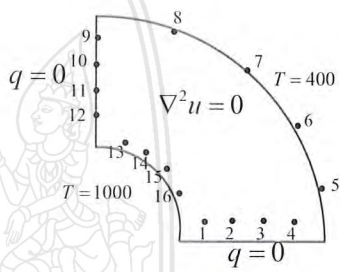
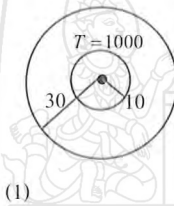
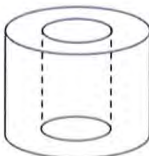
รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบค่าคลาดเคลื่อนสมบูรณ์
จากตัวอย่างที่ 3

ตัวอย่างที่ 4 พิจารณาปัญหาคัลล์ ที่ข้อมมีลักษณะ 2 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่เป็นสี่เหลี่ยม และส่วนที่เป็นเส้นโค้ง วงกลมเงื่อนไขขอบตามรูปที่ 9

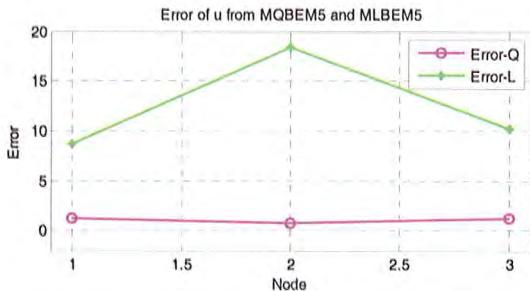


รูปที่ 9 การประมาณค่าจุดภายใน 4 จุด เมื่อ • เป็นตำแหน่ง จุดขอบ และ * เป็นตำแหน่งจุดภายใน

เนื่องจากเราไม่มีผลเฉลยแม่นยำตรง ดังนั้นในการหาผล เฉลยของจุดภายใน ใช้การคำนวณ MQBEM4 เปรียบเทียบ กับ MLBEM4 และระเบียบวิธีสมาชิกเชิงเส้นที่ได้รับการ ยอมรับมาแล้ว LINBEM (Toutip, 2001)



รูปที่ 10 การคำนวณจะใช้จุดขอบจำนวน 16 จุด และจุดภายในจำนวน 3 จุด ผลเฉลยแม่นยำตรงที่ตำแหน่งรัศมี 20 คือ $T(20) = 621.1442$



รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบค่าคลาดเคลื่อนสมบูรณ จากตัวอย่างที่ 5

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบผลเฉลยภายในจากตัวอย่างที่ 4

จุดภายใน	ML BEM4	MQ BEM4	LINBEM
(0.75,0.25)	0.2450	0.2458	0.2457
(0.75,1.75)	1.7399	1.7459	1.7457
(2.25,0.25)	0.1979	0.1959	0.1960
(2.25,1.00)	0.8786	0.8748	0.8750

ตัวอย่างที่ 5 พิจารณาปัญหาคัลล์ ในรูปแบบการส่งความร้อนเข้าไปในรูของทรงกระบอกที่รัศมี 10 และ 30 ดังรูปที่ 10 (1) และมีเงื่อนไขขอบตามรูปที่ 10 (2)

สรุปผลและอภิปรายผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการแก้ปัญหา คักข์ของสมการลาปลาซ ซึ่งนำระเบียบวิธีสมาชิก ตามขอบ ที่ใช้วิธีสมาชิกกำลังสองในสองมิติ โดยใช้ โปรแกรมเมทแลบในการคำนวณแก้ปัญหา ในการ ศึกษาการวิจัยได้สร้างเครื่องมือขึ้นนั่นคือ เขียน โปรแกรมภาษาเมทแลบที่คำนวณโดยวิธีสมาชิก กำลังสองในสองมิติเพื่อหาผลเฉลยของปัญหา และ ใช้เปรียบเทียบกับวิธีสมาชิกเชิงเส้นที่คำนวณโดยใช้ โปรแกรมเมทแลบ และผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหา

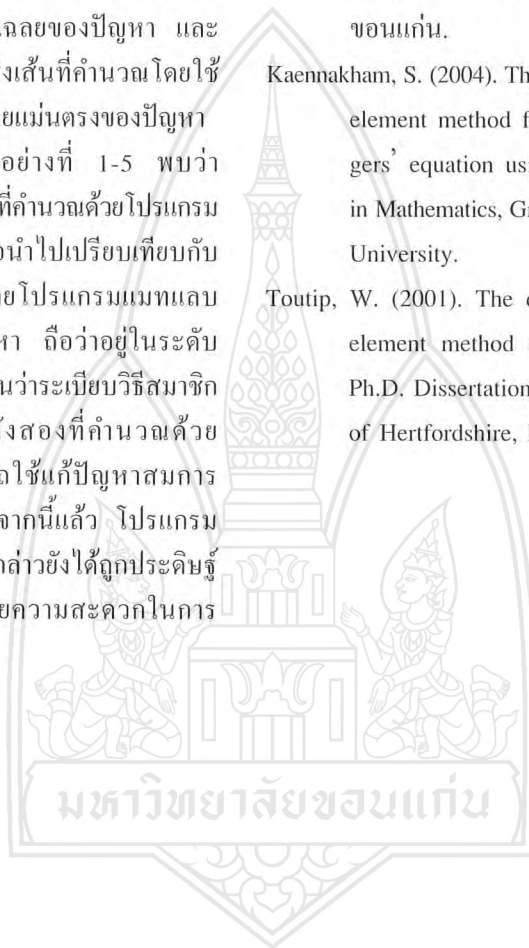
ผลการวิจัยแสดงตัวอย่างที่ 1-5 พบว่า ผลเฉลยที่ได้วิธีสมาชิกกำลังสองที่คำนวณด้วยโปรแกรม เมทแลบกับปัญหาดังกล่าวเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ วิธีสมาชิกเชิงเส้นที่คำนวณด้วยโปรแกรมเมทแลบ และผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหา ถือว่าอยู่ในระดับ ยอมรับได้ จึงเป็นเครื่องยืนยันว่าระเบียบวิธีสมาชิก ตามขอบที่ใช้วิธีสมาชิกกำลังสองที่คำนวณด้วย โปรแกรมเมทแลบ สามารถใช้แก้ปัญหสมการ ลาปลาซใน 2 มิติได้ นอกจากนี้แล้ว โปรแกรม คอมพิวเตอร์ภาษาเมทแลบดังกล่าวยังได้ถูกประดิษฐ์ เพื่อการคำนวณและเพื่ออำนวยความสะดวกในการ ศึกษาของนักวิจัยรุ่นใหม่ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

อรัชย์ จันทวารา. (2549). วิธีดวลเรซิโปรซิตีในระเบียบ วิธีสมาชิกตามขอบ สำหรับสมการไบฮาร์- มอนิก ใน 2 มิติ สำหรับโดเมนแบบไม่ปกติ โดยใช้โปรแกรมเมทแลบ. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา คณิตศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย ขอนแก่น.

Kaennakham, S. (2004). The dual reciprocity boundary element method for two- dimensional Bur- gers' equation using Matlab. Master thesis in Mathematics, Graduate School, Khon Kaen University.

Toutip, W. (2001). The dual reciprocity boundary element method for linear and nonlinear. Ph.D. Dissertation, Mathematics, University of Hertfordshire, England.





**การจำลองการไหลคงตัวใน 2 มิติของของไหล
แบบมีความหนืดที่อัดตัวไม่ได้ โดยใช้โปรแกรม FlexPDE
student version 5.1.0s
2D-Flow Simulation of Iscous Incompressible Fluid
using FlexPDE Student Version 5.1.0s**

อัครพงศ์ วงศ์พัฒน์¹ และ สุพจน์ ไวทย่างกูร^{1*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแบบจำลองการไหลใน 2 มิติ ของของไหลแบบมีความหนืดที่อัดตัวไม่ได้ และ มีสิ่งกีดขวางการไหล โดยระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) ศึกษาด้วยโปรแกรม FlexPDE student version 5.1.0s ผลจากการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนค่าความหนืด มีผลทำให้ความเร็วและความดันเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่วนบริเวณรอบๆ สิ่งกีดขวางความเร็วและความดันมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าบริเวณอื่น

Abstract

A 2D-Flow Model of viscous incompressible fluid is formulated under a barrier of flowing in steady state system condition. This paper proposes FlexPDE student program version 5.1.0s to solve this model. The experimental results show that the change of viscosity has influenced to velocity and pressure especially around this barrier.

คำสำคัญ : สมาชิกจำกัด ของไหลแบบมีความหนืดที่ไม่อัดตัว

Keywords : Finite element, Viscous incompressible fluid

¹ ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

* Corresponding Author. E-Mail: Supot_wa@kku.ac.th

บทนำ

ปัญหาการไหลแบบหนืดที่ไม่อัดตัว (incompressible flow) คือการไหลที่มีความหนืด (viscosity, μ) และของไหลมีปริมาตรคงที่เมื่อความดันเปลี่ยนไป การไหลของของไหลที่ศึกษาที่มีความเร็วต่ำ อธิบายพฤติกรรมของการไหลด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial differential equations) นาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equations) วิธีการหาผลเฉลยของสมการมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งวิธีหนึ่งที่นิยมใช้แก้ปัญหา คือระเบียบวิธีสมาชิกจำกัด (finite element methods) มีงานวิจัยที่นำวิธีนี้ไปใช้ในการแก้ปัญหา เช่น การใช้ในทางการแพทย์เกี่ยวกับการไหลของเลือดในเส้นเลือด (Sheu et al., 1999) การวิเคราะห์เนื้อเยื่อโดยใช้ biphasic finite element method (Unnikrishnan et al., 2009) การใช้วิธีสมาชิกจำกัด และสมาชิกขอบ (boundary element methods) ในการแก้ปัญหการไหล (Jaroslav, 1999) การปรับขนาดของสมาชิก เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่ความถูกต้องยิ่งขึ้น (พัชร ชีระเอก, 2547) เป็นต้น นอกจากนี้ปัญหาเกี่ยวกับการไหลยังสามารถใช้ระเบียบวิธีสมาชิกผลต่าง (finite difference methods) แก้ปัญหการไหลได้เช่นกัน (Shen and Lot, 1996) นอกจากนี้ยังการพัฒนาแบบการหาคำตอบของระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ โดยใช้ฟังก์ชันสสาร (stream function) และฟังก์ชันวอร์ทิสิตี (vorticity function) ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงความก้าวหน้า และประสิทธิภาพของการหาผลเฉลยที่พัฒนาขึ้นอีกรูปแบบหนึ่ง (Ghadi et al., 2008) และปัญหาของสมการนาเวียร์-สโตกส์ ยังมีการเปรียบเทียบผลเฉลยระหว่างวิธีของออยเลอร์ (Euler Implicit) และวิธีของเครง-นิโคลสัน (Crank-Nicolson, 1986)

การวิเคราะห์ปัญหาด้วยการใช้โปรแกรมสมาชิกจำกัดได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน ทำให้ผู้วิเคราะห์ทราบถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นโดยละเอียดและยังก่อให้เกิดแนวคิดในการแก้ไขปรับปรุงรูปร่างลักษณะของต้นแบบอันจะนำไปสู่รูปแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น (ปราโมทย์ เเดชอำไพ และ

สุทธิศักดิ์ พงษ์ธนาพาณิชย์, 2548)

การแก้ปัญหาด้านกลศาสตร์ของไหลนั้น ขึ้นอยู่กับ 3 องค์ประกอบ ได้แก่

1. ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial differential equations) ซึ่งประกอบด้วย

- สมการอนุรักษ์มวล (conservation of mass)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

- สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (conservation of momentums) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\rho}{\mu} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

$$\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\rho}{\mu} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

โดยที่ u แทนความเร็วในแนวแกน x (m/s)

v แทนความเร็วในแนวแกน y (m/s)

p แทนความดัน (N/m^2)

μ แทนความหนืด ($N \cdot s/m^2$)

ρ แทนความหนาแน่น (Kg/m^3)

- สมการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy) แต่ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาพลังงานในระบบ จึงไม่ใช้สมการอนุรักษ์พลังงาน

2. เงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) สำหรับปัญหาที่ทำการศึกษา ในกระบวนการแก้ปัญหาระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนั้นเงื่อนไขขอบเขตเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอันจะก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่แตกต่างกันไป

3. ลักษณะรูปร่าง (geometry) ของปัญหารูปแบบของปัญหาด้านกลศาสตร์ของไหลโดยทั่วไปในงานวิศวกรรม และวิทยาศาสตร์ล้วนมีรูปร่างที่ซับซ้อน หากรูปร่างมีการเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้การไหลที่เกิดขึ้นนั้นเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน ถึงแม้ว่า

โดยที่ Γ_0 คือ บริเวณขอบของโดเมน ใช้เงื่อนไข

$$u = 0, v = 0, \frac{\partial p}{\partial n} = 0$$

Γ_1 คือ สิ่งกีดขวางการไหล ใช้เงื่อนไข

$$u = 0, v = 0, \frac{\partial p}{\partial n} = 0$$

Γ_{in}^x คือ ทางเข้าของของไหลในแนวแกน x ใช้เงื่อนไข

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0, v = 0, p = p_0$$

Γ_{in}^y คือ ทางเข้าของของไหลในแนวแกน y ใช้เงื่อนไข

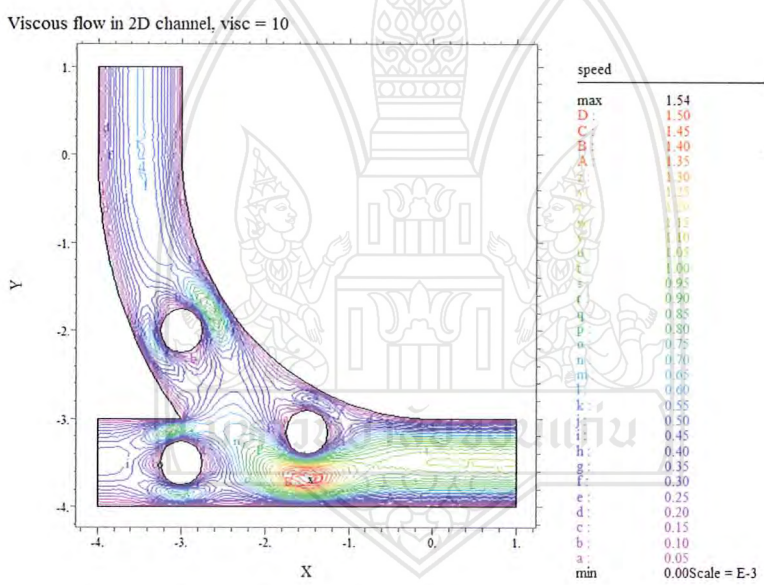
$$u = 0, \frac{\partial v}{\partial n} = 0, p = p_0$$

Γ_{out}^x คือ ทางไหลออกของของไหลในแนวแกน x ใช้เงื่อนไข

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0, v = 0, p = 0$$

ผลการวิจัย

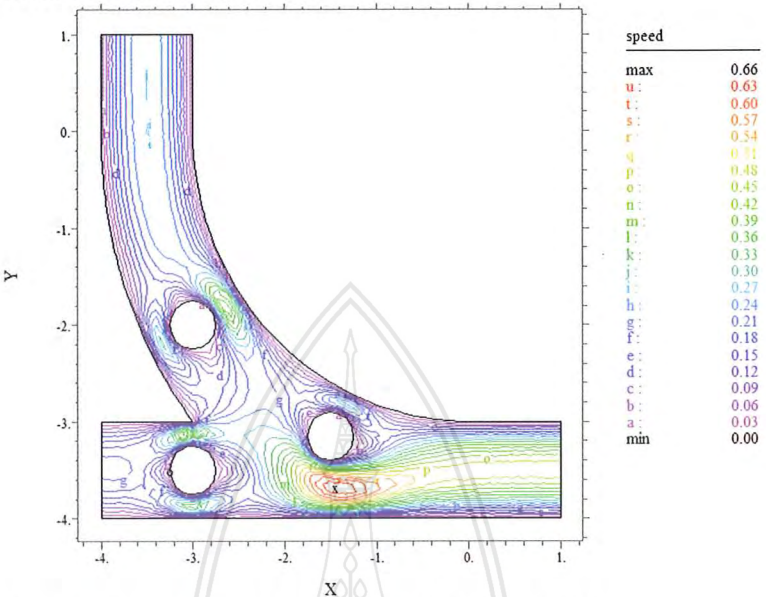
ในการวิจัยนี้เราจะวิเคราะห์ความเร็วและความดันในระบบเมื่อความหนืดเปลี่ยนไป โดยรูปด้านล่างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความหนืดที่เปลี่ยนไปของตัวอย่างโดเมน a ซึ่งทิศทางการไหลเข้าคือ ด้านบน และด้านซ้ายมือ ส่วนด้านขวามือ คือทิศทางการไหลออก โดยกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น $\mu = 1, v = 1$ และ ความดันเริ่มต้น $p_0 = 1$



Exaple1, visc=10: Grid#2 p2 Nodes=803 Cells=361 RMS Err= 0.0548
Integral= 4.778470e-3

รูปที่ 2 กราฟแสดงความเร็วของการไหลเมื่อ $\mu = 10$

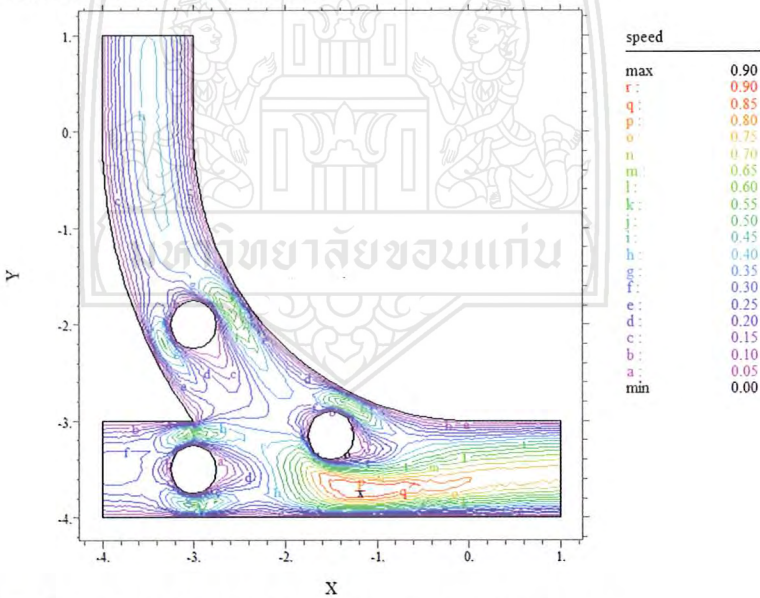
Viscous flow in 2D channel, visc = 0.02



Exaple1, visc=0.02: Grid#2 p2 Nodes=801 Cells=361 RMS Err= 0.4417
Integral= 2.121071

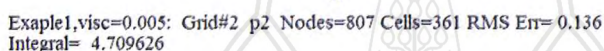
รูปที่ 3 กราฟแสดงความเร็วของการไหลเมื่อ $\mu = 0.02$

Viscous flow in 2D channel, visc = 0.01

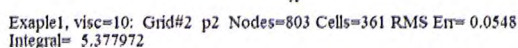


Exaple1, visc=0.01: Grid#2 p2 Nodes=803 Cells=361 RMS Err= 1.1161
Integral= 3.210704

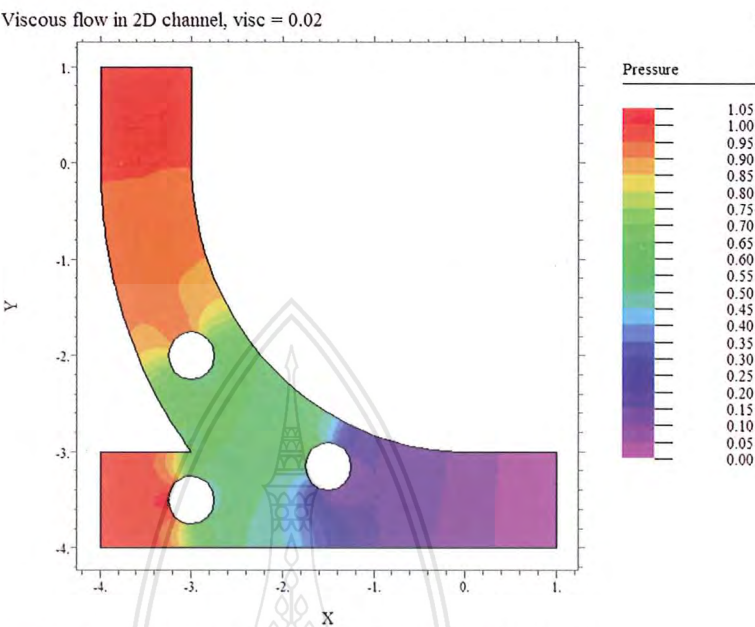
รูปที่ 4 กราฟแสดงความเร็วของการไหลเมื่อ $\mu = 0.01$



รูปที่ 2-5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความหนืดลดลง ต่อไปเป็นรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง
ส่งผลให้ความเร็วของของไหลมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะ ความดันกับความหนืดที่เปลี่ยนไป
บริเวณที่มีสิ่งกีดขวาง ความเร็วจะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน

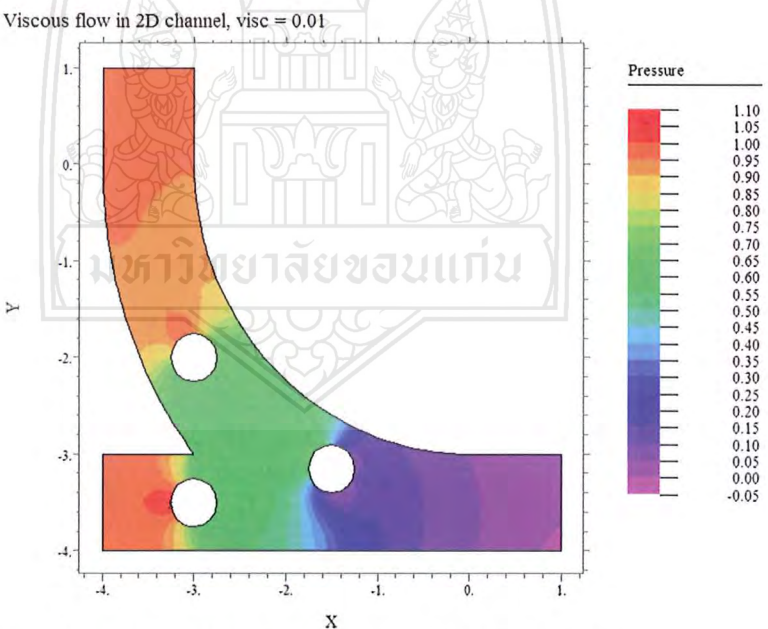


รูปที่ 6 กราฟแสดงความดันของการไหลเมื่อ $\mu = 10$



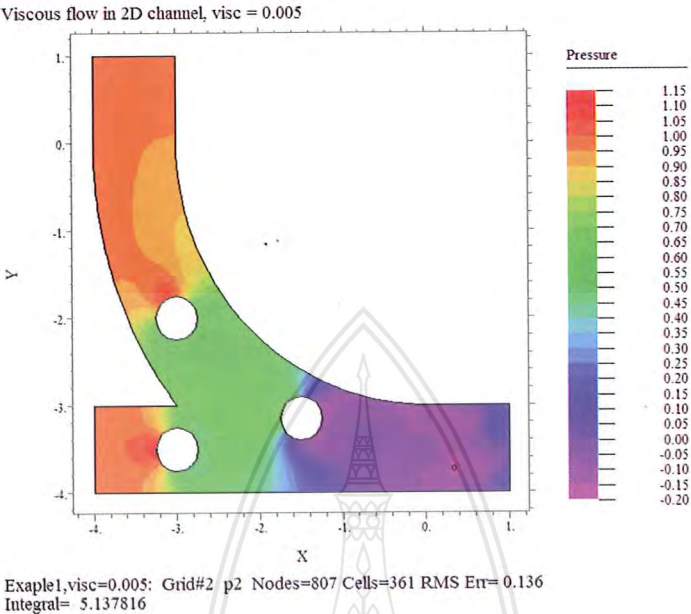
Exaple1, visc=0.02: Grid#2 p2 Nodes=801 Cells=361 RMS Err= 0.4417
Integral= 5.463863

รูปที่ 7 กราฟแสดงความดันของการไหลเมื่อ $\mu = 0.02$



Exaple1, visc=0.01: Grid#2 p2 Nodes=803 Cells=361 RMS Err= 1.1161
Integral= 5.648700

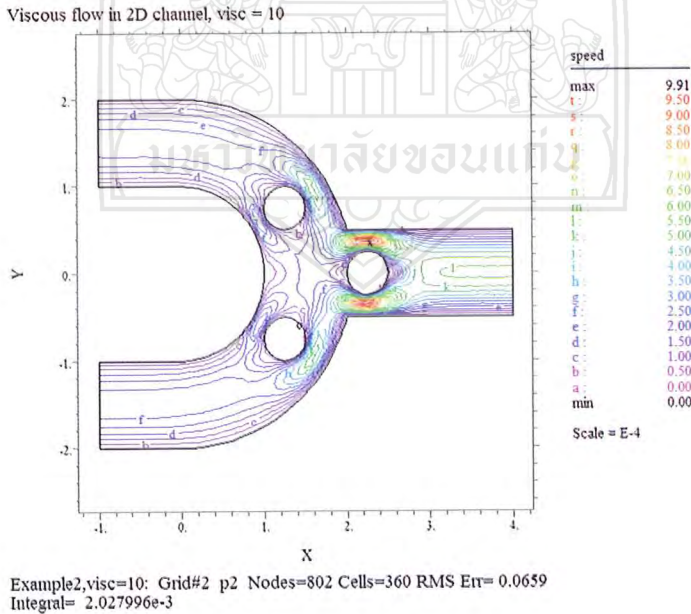
รูปที่ 8 กราฟแสดงความดันของการไหลเมื่อ $\mu = 0.01$



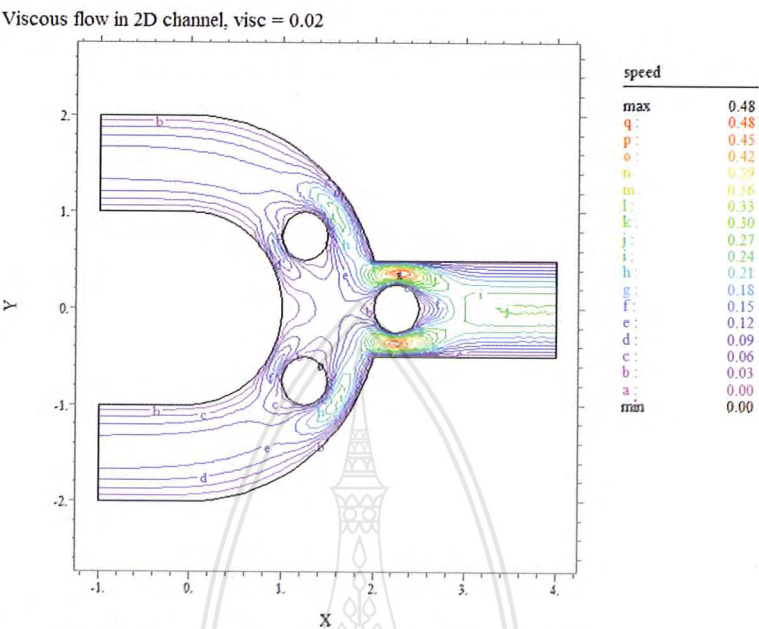
รูปที่ 9 กราฟแสดงความดันของการไหลเมื่อ $\mu = 0.005$

รูปที่ 6-9 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความหนืดลดลง จะทำให้ช่วงของการเปลี่ยนแปลงความดันกว้างขึ้น ยังพบอีกว่าความดันบริเวณเสื่งกิดขวางมีค่าที่ต่างกันมากเมื่อพิจารณาจากแถบสีที่ปรากฏ

ต่อไปเป็นตัวอย่างของโดเมน b ที่ผู้วิจัยใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความหนืดที่เปลี่ยนไป ซึ่งทิศทางการไหลเข้า คือ ทางด้านขวามือ และทิศทางการไหลออกทางด้านซ้ายมือ เมื่อกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น และความดันเริ่มต้น

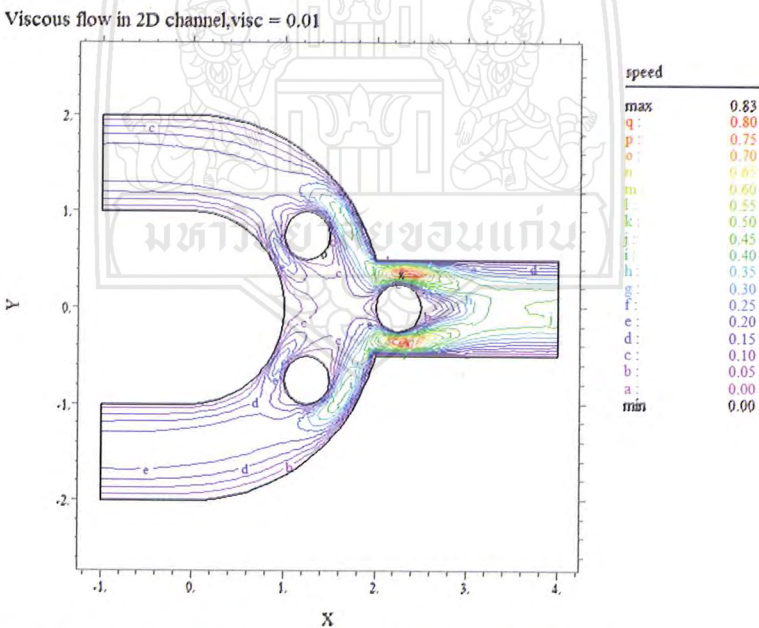


รูปที่ 10 กราฟแสดงความเร็วของการไหล เมื่อ $\mu = 10$



Example2,visc=0.02: Grid#2 p2 Nodes=802 Cells=360 RMS Err= 0.2115
Integral= 0.979159

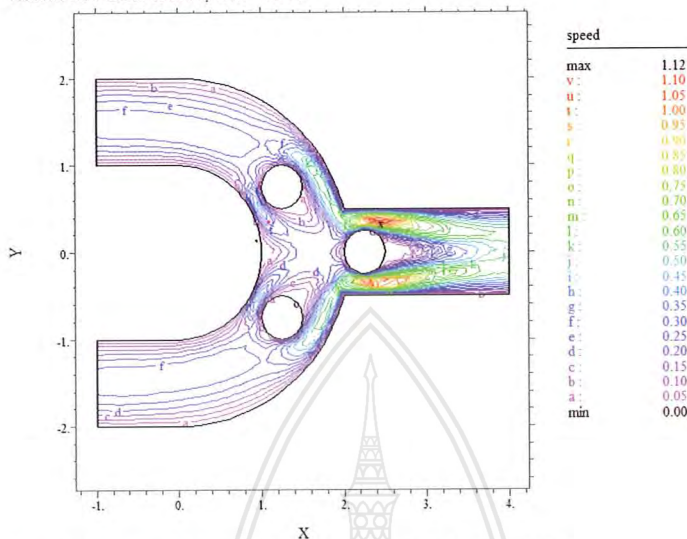
รูปที่ 11 กราฟแสดงความเร็วของการไหลเมื่อ $\mu = 0.02$



Example2,visc=0.01: Grid#2 p2 Nodes=801 Cells=357 RMS Err= 0.1121
Integral= 1.686189

รูปที่ 12 กราฟแสดงความเร็วของการไหลเมื่อ $\mu = 0.01$

Viscous flow in 2D channel, visc = 0.005



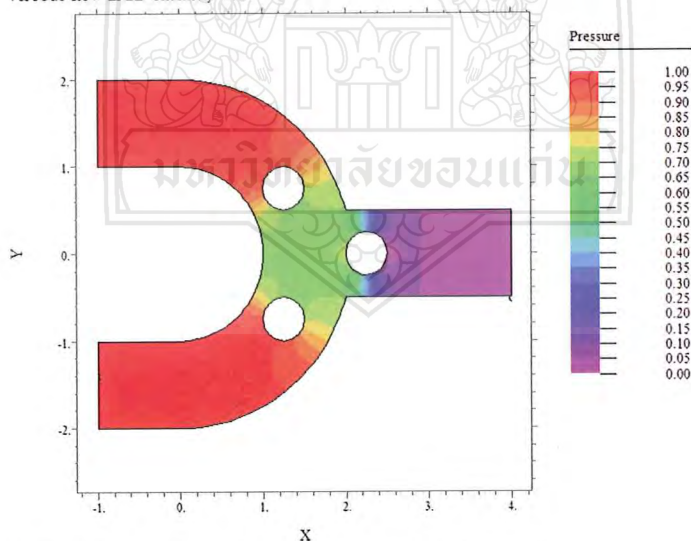
Example2, visc=0.005: Grid#2 p2 Nodes=802 Cells=356 RMS Err= 0.2777
Integral= 2.380041

รูปที่ 13 กราฟแสดงความเร็วของการไหลเมื่อ $\mu = 0.005$

รูปที่ 10-13 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความหนืดลดลงความเร็วของการไหลมีค่าเพิ่มบริเวณที่มีสิ่งกีดขวางการความเร็วมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งสังเกตว่าได้ผลเหมือนตัวอย่างโดเมน a

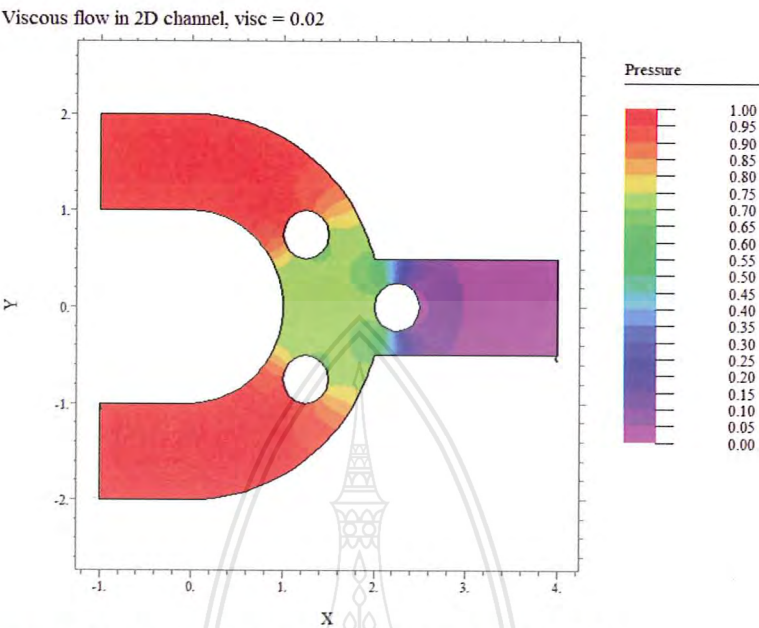
ต่อไปจะวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความหนืดที่เปลี่ยนไปของตัวอย่างโดเมน b

Viscous flow in 2D channel, visc = 10



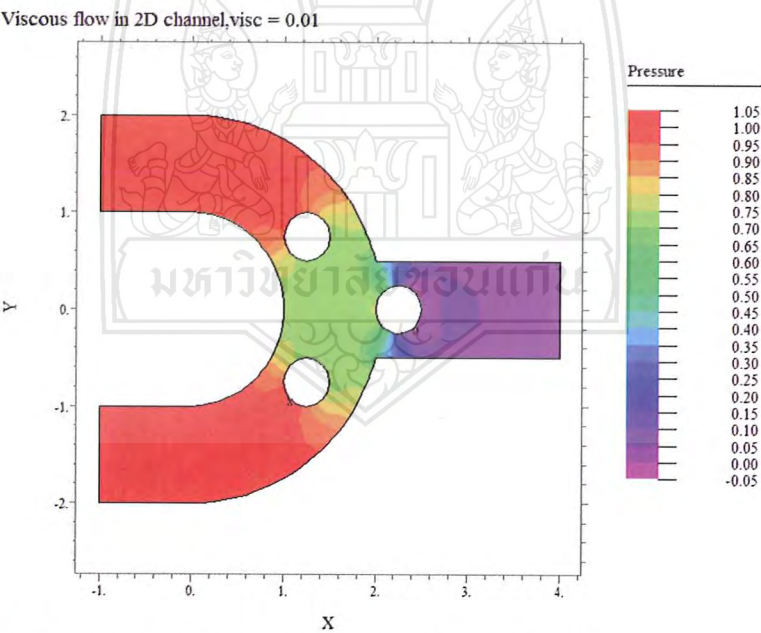
Example2, visc=10: Grid#2 p2 Nodes=802 Cells=360 RMS Err= 0.0659
Integral= 6.055957

รูปที่ 14 กราฟแสดงความดันของการไหลเมื่อ $\mu = 10$



Example2,visc=0.02: Grid#2 p2 Nodes=802 Cells=360 RMS Err= 0.2115
Integral= 6.056704

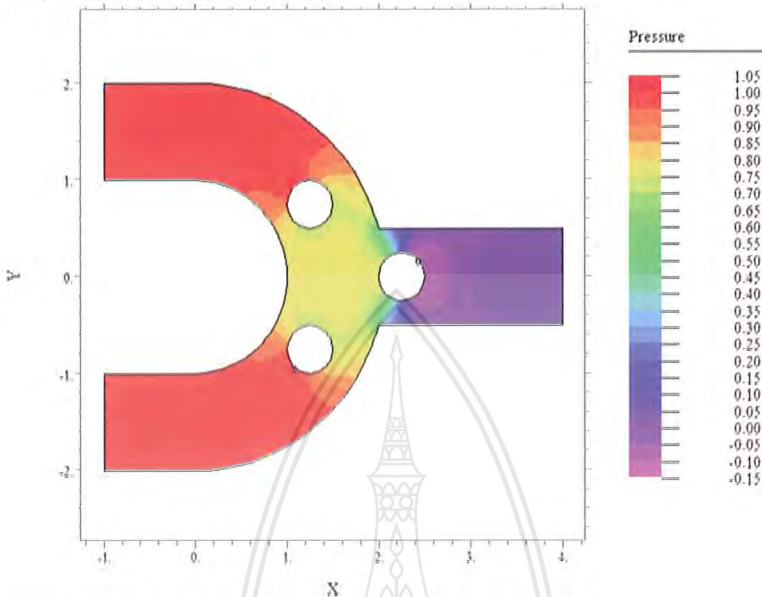
รูปที่ 15 กราฟแสดงความดันของการไหลเมื่อ $\mu = 0.02$



Example2,visc=0.01: Grid#2 p2 Nodes=801 Cells=357 RMS Err= 0.1121
Integral= 6.071519

รูปที่ 16 กราฟแสดงความดันของการไหลเมื่อ $\mu = 0.01$

Viscous flow in 2D channel, visc = 0.005



Example2, visc=0.005: Grid#2 p2 Nodes=802 Cells=356 RMS Err= 0.2777
Integral= 6.054807

รูปที่ 17 กราฟแสดงความดันของการไหลเมื่อ $\mu = 0.005$

รูปที่ 14-17 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความหนืดลดลง กิตติกรรมประกาศ

ลงเรื่อยๆ พบว่าความดันมีช่วงของการเปลี่ยนแปลงกว้างขึ้น และความดันบริเวณสี่เหลี่ยมมีค่าต่างกัน เมื่อพิจารณาจากแถบสีที่ปรากฏ ซึ่งผลได้เหมือนกับ ตัวอย่างโดเมน a

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นทุกท่านที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

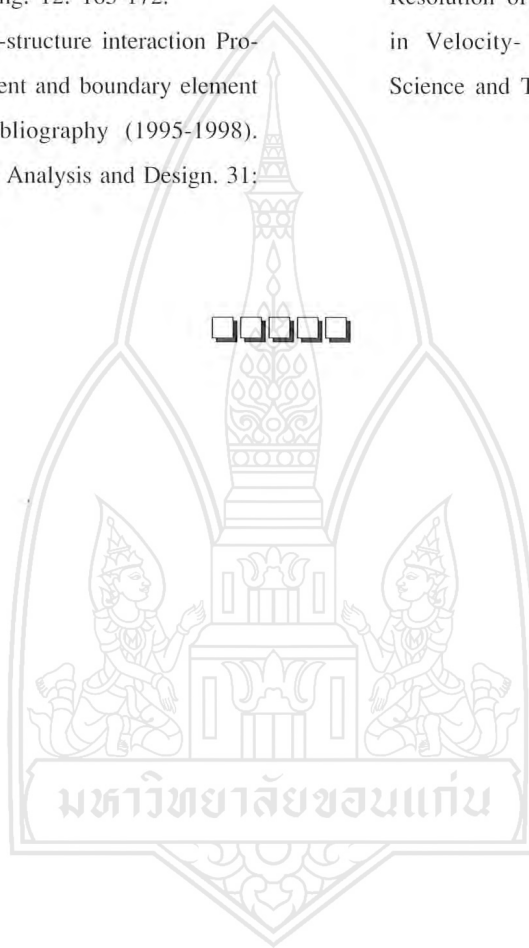
สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

จากกราฟแสดงการไหลของของไหลใน 2 มิติแบบมีความหนืดที่ไม่อัดตัว พบว่า ความหนืดมีผลต่อความเร็วและความดันของของไหล โดยเมื่อลดค่าความหนืดลง ความเร็วของของไหลมีค่าเพิ่มขึ้น และช่วงของการเปลี่ยนแปลงความดันจะกว้างขึ้น บริเวณสี่เหลี่ยมของการไหลความเร็วรอบๆ สี่เหลี่ยมจะมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดในการไหลจึงทำให้ของไหลมีความเร็วเพิ่มขึ้น ส่วนความดันรอบๆ บริเวณสี่เหลี่ยม พบว่า บริเวณที่ใกล้เคียงกันแต่ความดันมีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

ปราโมทย์ เดชะอำไพ และสุทธศักดิ์ พงษ์ธนาพาณิช, (2548). ไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างง่าย, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: หน้า 235-237.
พัชร ธีระเอก. (2547). การวิเคราะห์การไหลแบบหนืดแต่ไม่อัดตัวโดยระเบียบวิธีการแยกด้วยคุณลักษณะและเอลิเมนต์ที่ปรับขนาดได้. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย : หน้า 7-14.

Ghadi, F., Ruas, V. and Wakri, M. (2008). Numerical solution of the time-dependent incompressible Navier-stokes equations by piecewise linear finite elements. Journal of

- Computational and Applied Mathematics. 215(2): 429-437.
- Unnikrishnan, G. U., Unnikrishnan, V. U. and Reddy, J. N. (2009). Tissue-fluid interface analysis using biphasic finite element method. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 12: 165-172.
- Jaroslav, M. (1999). Fluid-structure interaction Problems. finite element and boundary element approaches A bibliography (1995-1998). *Finite Elements in Analysis and Design*. 31: 231-240.
- Shue, T. W. H., Tsai, S. F., Hwang, W. S. and Chang, T. M. (1999). A finite element study of the blood flow in total cavopulmonary connection. *Computer & Fluids*. 28: 19-39.
- Shen, W. -Z. and Lot, T. -P. (1996). A coupling Finite Difference/Particle Method for the Resolution of 2D Navier-Stokes Equations in Velocity- Vorticity Form. *Aerospace Science and Technology*. 1: 97-109.





ตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยกของค่าเฉลี่ยประชากร ในการชักตัวอย่างอย่างง่ายแบบแบ่งเป็นชั้นภูมิ

Separate Ratio Estimator of the Population Mean in Stratified Random Sampling

นิวัตร สุวรรณะ^{1*} พชร วงษ์เกษม¹ และ คณินทร์ ชีรภาพโอฬาร¹

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษาในครั้งนี้ คือ นำเสนอตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยกของค่าเฉลี่ยประชากรในการชักตัวอย่างอย่างง่ายแบบแบ่งเป็นชั้นภูมิ ซึ่งได้มาโดยการประยุกต์ใช้วิธีประมาณค่าของ Kadilar และ Cingi (2005) โดยการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (mean square error) ของตัวประมาณค่าที่นำเสนอและตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยกของค่าเฉลี่ยประชากรแบบดั้งเดิม (ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด) เราพบว่าตัวประมาณค่าที่นำเสนอมีประสิทธิภาพดีกว่าตัวประมาณค่าแบบดั้งเดิม

ABSTRACT

The objective of this study is to propose a separate ratio estimator of the population mean in stratified random sampling, which is obtained by applying the method of estimation of Kadilar and Cingi (2005). By comparing mean square errors of the proposed estimator and the classical separate ratio estimator, under the specific condition, it indicates that the proposed estimator is more efficient than the classical separate ratio estimator.

คำสำคัญ : ตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยก ค่าเฉลี่ยประชากร การชักตัวอย่างอย่างง่ายแบบแบ่งเป็นชั้นภูมิ

Keywords : Separate ratio estimator, Population mean, Stratified random sampling

¹ ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี 20131

* Corresponding Author: E-mail: niwat_su@yahoo.com

บทนำ

ปัจจุบันงานวิจัยต่างๆ ได้นำวิธีการทางสถิติไปประยุกต์ใช้ในหลายขั้นตอน ไม่ว่าจะเป็นการสำรวจตัวอย่าง การวางแผนในการเก็บรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูลและการสรุปผล ซึ่งการสำรวจตัวอย่างเพื่อสรุปในระดับประชากรนั้นเป็นการศึกษาคุณลักษณะต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างและเชื่อว่าคุณลักษณะต่างๆ นั้นได้ถ่ายทอดมาจากประชากร หากประชากรมีคุณลักษณะอย่างไรตัวอย่างที่ชักมานั้นก็น่าจะมีคุณลักษณะดังกล่าวเช่นกัน

การสำรวจตัวอย่างเพื่อนำข้อสรุปไปอ้างอิงในประชากรนั้น เราต้องใช้การอนุมานทางสถิติ คือ การประมาณค่าพารามิเตอร์ และการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ ในการศึกษาครั้งนี้เราจะกล่าวเฉพาะในส่วนของการประมาณค่าพารามิเตอร์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสร้างฟังก์ชันของตัวแปรสุ่มที่เรียกว่า ตัวประมาณค่า (estimator) และพารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีการประมาณค่า ได้แก่ ค่าเฉลี่ยประชากร ($\bar{Y}$) ยอดรวมประชากร (Y) และสัดส่วนประชากร (P)

พิจารณาการชักตัวอย่างขนาด n จากประชากรขนาด N ด้วยวิธีการชักตัวอย่างอย่างง่ายแบบแบ่งเป็นชั้นภูมิ (stratified random sampling) และตัวประมาณค่าเฉลี่ยของประชากร $\bar{Y}$ ในกรณีนี้ คือ

$$\bar{y}_{st} = \sum_{h=1}^L W_h \bar{y}_h \quad (1)$$

ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวประมาณค่าที่ไม่เอนเอียง (unbiased estimator) และมีความแปรปรวน (Cochran, 1977) เท่ากับ

$$Var(\bar{y}_{st}) = \sum_{h=1}^L W_h^2 \frac{(1-f_h)}{n_h} S_h^2 \quad (2)$$

ถ้าเราทราบสารสนเทศ (information) ของตัวแปรช่วย (auxiliary variable) X ในแต่ละชั้นภูมิ เช่นทราบค่าเฉลี่ย ($\bar{X}_h$) หรือยอดรวมของประชากร (X_h) เพื่อให้การประมาณค่ามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เราสามารถใช้สารสนเทศเหล่านี้มาประกอบในการประมาณค่า $\bar{Y}_h$ หรือ Y_h สำหรับตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยกของค่าเฉลี่ยประชากรแบบดั้งเดิม (classical separate ratio estimator) ภายใต้การชักตัวอย่างอย่างง่ายแบบแบ่งเป็นชั้นภูมิ L ชั้นภูมิแทนด้วย $\bar{y}_{rs}$ สามารถหาได้จากสมการ

$$\bar{y}_{rs} = \sum_{h=1}^L W_h \hat{R}_h \bar{X}_h \quad (3)$$

โดยที่

$$\hat{R}_h = \frac{\bar{y}_h}{\bar{x}_h} \quad (4)$$

ความแปรปรวนของ $\bar{y}_{rs}$ (สุรินทร์ นิยมางกูร, 2546) คือ

$$Var(\bar{y}_{rs}) \cong \sum_{h=1}^L W_h^2 \frac{(1-f_h)}{n_h} (R_h^2 S_{xh}^2 - 2R_h S_{xyh} + S_{yh}^2) \quad (5)$$

- เมื่อ S_X^2 คือ ความแปรปรวนของตัวแปร X
 S_Y^2 คือ ความแปรปรวนของตัวแปร Y
 S_{XY} คือ ความแปรปรวนร่วมของตัวแปร X และ Y
 W_h คือ น้ำหนักของชั้นภูมิที่ h มีค่า $W_h = N_h/N$
 f_h คือ อัตราส่วนการชักตัวอย่างของชั้นภูมิที่ h มีค่าเท่ากับ n_h/N_h
 R_h คือ อัตราส่วนระหว่าง $\bar{Y}_h$ และ $\bar{X}_h$ ของชั้นภูมิที่ h
 N_h คือ จำนวนหน่วยตัวอย่างของประชากรในชั้นภูมิที่ h
 n_h คือ จำนวนหน่วยตัวอย่างของตัวอย่างในชั้นภูมิที่ h
 $\bar{y}_h$ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวอย่างในชั้นภูมิที่ h ของตัวแปรที่สนใจศึกษามีค่าเท่ากับ $(1/n_h) \sum_{i=1}^{n_h} y_{hi}$
 $\bar{x}_h$ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวอย่างในชั้นภูมิที่ h ของตัวแปรช่วยมีค่าเท่ากับ $(1/n_h) \sum_{i=1}^{n_h} x_{hi}$
 y_{hi} คือ ค่าของหน่วยตัวอย่างที่ i ในชั้นภูมิที่ h ของตัวแปรที่สนใจศึกษา
 x_{hi} คือ ค่าของหน่วยตัวอย่างที่ i ในชั้นภูมิที่ h ของตัวแปรช่วย
 $\bar{x}_{st}$ คือ ตัวประมาณค่าที่ไม่เอนเอียงของ $\bar{X}$ มีค่าเท่ากับ $\sum_{h=1}^L W_h \bar{x}_h$

และความเอนเอียง (bias) ของตัวประมาณค่า $\bar{y}_{RS}$ (Singh and Mangat, 1996) คือ

$$b(\bar{y}_{RS}) \cong \sum_{h=1}^L W_h \frac{(1-f_h)}{n_h \bar{X}_h} (R_h S_{Xh}^2 - S_{XYh}) \tag{6}$$

ในการศึกษาเกี่ยวกับตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยกของค่าเฉลี่ยประชากรในการชักตัวอย่างอย่างง่ายแบบแบ่งเป็นชั้นภูมินั้น Kadilar และ Cingi (2005) ได้เสนอตัวประมาณค่าอัตราส่วน $\bar{y}_{sp}$ ดังนี้

$$\bar{y}_{sp} = K^* \bar{y}_{RC} \tag{7}$$

เมื่อ $K^* = \frac{\bar{Y}^2}{\bar{Y}^2 + \sum_{h=1}^L W_h^2 \frac{(1-f_h)}{n_h} (R^2 S_{Xh}^2 - 2RS_{XYh} + S_{Yh}^2)}$ และ $0 < K^* < 1$

และความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของ $\bar{y}_{sp}$ คือ

$$MSE(\bar{y}_{sp}) \cong (K^*)^2 \sum_{h=1}^L W_h^2 \frac{(1-f_h)}{n_h} (R^2 S_{Xh}^2 - 2RS_{XYh} + S_{Yh}^2) + \bar{Y}^2 (K^* - 1)^2 \tag{8}$$

ซึ่งเราพบว่า $\bar{y}_{sp}$ มีประสิทธิภาพสูงกว่า $\bar{y}_{RC}$ ก็ต่อเมื่อ $K^* > \frac{\bar{Y}^2 - \nu}{\bar{Y}^2 + \nu}$ โดยที่

$$\nu = \sum_{h=1}^L W_h^2 \frac{(1-f_h)}{n_h} (R^2 S_{Xh}^2 - 2RS_{XYh} + S_{Yh}^2)$$

จากการศึกษางานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับตัวประมาณค่าอัตราส่วน เรายังไม่พบว่ามีการวิจัยใดที่ทำการศึกษเกี่ยวกับตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยก (separate ratio estimator) ภายใต้การชักตัวอย่างอย่างง่ายแบบแบ่งเป็นชั้นภูมิ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้เราจึงสนใจศึกษาตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยกของค่าเฉลี่ยประชากร โดยการประยุกต์ใช้วิธีการหาตัวประมาณค่าของ Kadilar และ Cingi (2005)

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อเสนอตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยกของค่าเฉลี่ยประชากรภายใต้การชักตัวอย่างอย่างง่ายแบบแบ่งเป็นชั้นภูมิ

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวประมาณค่าที่นำเสนอกับตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยกของค่าเฉลี่ยประชากรแบบดั้งเดิม

วิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยมีขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษางานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยเรามีความสนใจปรับตัวประมาณค่าอัตราส่วนเดิมให้เป็นตัวประมาณค่าอัตราส่วนใหม่ ให้ $\bar{y}_{RS.new}$ แทนตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยกของค่าเฉลี่ยประชากรแบบใหม่ซึ่งกำหนดดังนี้

$$\bar{y}_{RS.new} = k\bar{y}_{RS} \quad (9)$$

เมื่อ $\bar{y}_{RS}$ คือ ตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยกของค่าเฉลี่ยประชากรแบบดั้งเดิม และ k คือ ค่าคงตัวที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของ $\bar{y}_{RS.new}$ มีค่าต่ำสุด

2. หาค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของตัวประมาณค่าอัตราส่วนที่นำเสนอ

3. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวประมาณค่าที่เสนอกับตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยกดั้งเดิม ($\bar{y}_{RS}$) โดยใช้ความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ซึ่งเราจะกล่าวว่าตัวประมาณค่า $\hat{\theta}_1$ เป็นตัวประมาณค่าที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า $\hat{\theta}_2$ ก็ต่อเมื่อ $MSE(\hat{\theta}_1) < MSE(\hat{\theta}_2)$

4. แสดงตัวอย่างเชิงตัวเลขเพื่อสนับสนุนผลการศึกษาในเชิงทฤษฎี

ผลการวิจัย

ผลการวิจัยที่เราต้องการสำหรับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ คือ ตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยกของค่าเฉลี่ยประชากรภายใต้การชักตัวอย่างอย่างง่ายแบบแบ่งเป็นชั้นภูมิ และเงื่อนไขที่ทำให้ประสิทธิภาพของตัวประมาณค่าที่เสนอดีกว่าตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยกของค่าเฉลี่ยประชากรแบบดั้งเดิม ซึ่งเราจะนำเสนอเป็นลำดับดังนี้

1. ตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยกของค่าเฉลี่ยประชากรภายใต้การชักตัวอย่างอย่างง่ายแบบแบ่งเป็นชั้นภูมิ

พิจารณาความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของตัวประมาณค่า $\bar{y}_{RS.new}$ นั่นคือ

$$\begin{aligned} MSE(\bar{y}_{RS.new}) &= E(\bar{y}_{RS.new} - \bar{Y})^2 \\ &= E(\bar{y}_{RS.new}^2 - 2\bar{y}_{RS.new}\bar{Y} + \bar{Y}^2) \\ &= E(k^2\bar{y}_{RS}^2 - 2k\bar{y}_{RS}\bar{Y} + \bar{Y}^2) \\ &= k^2E(\bar{y}_{RS}^2) - 2k\bar{Y}E(\bar{y}_{RS}) + \bar{Y}^2 \\ &= k^2E(\bar{y}_{RS}^2) - 2k\bar{Y}E(\bar{y}_{RS}) + \bar{Y}^2 + k^2[E(\bar{y}_{RS})]^2 - k^2[E(\bar{y}_{RS})]^2 \\ &= k^2[E(\bar{y}_{RS}^2) - (E(\bar{y}_{RS}))^2] + [kE(\bar{y}_{RS}) - \bar{Y}]^2 \end{aligned}$$

จากความเอนเอียงของตัวประมาณค่า $\bar{y}_{RS}$ คือ $b(\bar{y}_{RS}) = E(\bar{y}_{RS}) - \bar{Y}$ หรือ $E(\bar{y}_{RS}) = \bar{Y} + b(\bar{y}_{RS})$ ดังนั้นเราจะได้

$$\begin{aligned} MSE(\bar{y}_{RS.new}) &= k^2Var(\bar{y}_{RS}) + [k(\bar{Y} + b(\bar{y}_{RS})) - \bar{Y}]^2 \\ &= k^2Var(\bar{y}_{RS}) + \bar{Y}^2(k-1)^2 + 2k\bar{Y}b(\bar{y}_{RS})(k-1) + k^2b^2(\bar{y}_{RS}) \\ &= k^2MSE(\bar{y}_{RS}) + \bar{Y}^2(k-1)^2 + 2k\bar{Y}b(\bar{y}_{RS})(k-1) \\ &= k^2MSE(\bar{y}_{RS}) + \bar{Y}(k-1)[\bar{Y}(k-1) + 2kb(\bar{y}_{RS})] \end{aligned} \quad (10)$$

โดยที่

$$MSE(\bar{y}_{RS}) \cong \sum_{h=1}^L W_h^2 \frac{(1-f_h)}{n_h} (R_h^2 S_{Xh}^2 - 2R_h S_{XYh} + S_{Yh}^2) + \left[\sum_{h=1}^L W_h \frac{(1-f_h)}{n_h \bar{X}_h} (R_h S_{Xh}^2 - S_{XYh}) \right]^2$$

ซึ่งได้มาจาก (5) และ (6) และความเอนเอียงของตัวประมาณค่า $\bar{y}_{RS.new}$ หาได้จาก

$$\begin{aligned} b(\bar{y}_{RS.new}) &= E(k\bar{y}_{RS}) - \bar{Y} \\ &= \sum_{h=1}^L W_h E(k\hat{R}_h \bar{X}_h - \bar{Y}_h) \\ &= \sum_{h=1}^L W_h E\left(\frac{k\bar{y}_h \bar{X}_h - R_h \bar{x}_h \bar{X}_h}{\bar{X}_h}\right) \\ &= \sum_{h=1}^L W_h E\left(\frac{\bar{X}_h (k\bar{y}_h - R_h \bar{x}_h)}{\bar{X}_h}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

และโดยการกระจายเทย์เลอร์ (Taylor's expansion) ของ $\frac{1}{\bar{X}_h}$ รอบค่า $\bar{X}_h$ เราจะได้

$$\frac{1}{\bar{x}_h} = \frac{1}{\bar{X}_h} - \frac{(\bar{x}_h - \bar{X}_h)}{\bar{X}_h^2} + \frac{(\bar{x}_h - \bar{X}_h)^2}{\bar{X}_h^3} - \frac{(\bar{x}_h - \bar{X}_h)^3}{\bar{X}_h^4} + \dots \quad (12)$$

สมมติว่าเทอม $\frac{(\bar{x}_h - \bar{X}_h)^2}{\bar{X}_h^3} - \frac{(\bar{x}_h - \bar{X}_h)^3}{\bar{X}_h^4} + \dots$ มีค่าน้อยใกล้ศูนย์ ดังนั้น เราอาจประมาณ $\frac{1}{\bar{x}_h}$ ด้วยสองเทอมแรกของสมการ (12) นั่นคือ

$$\frac{1}{\bar{x}_h} \cong \frac{1}{\bar{X}_h} \left(1 - \frac{\bar{x}_h - \bar{X}_h}{\bar{X}_h} \right) \quad (13)$$

นำ (13) ไปแทนลงในสมการ (11) จะได้

$$\begin{aligned} b(\bar{y}_{RS, new}) &\cong \sum_{h=1}^L W_h E \left\{ (k\bar{y}_h - R_h \bar{x}_h) \left(1 - \frac{\bar{x}_h - \bar{X}_h}{\bar{X}_h} \right) \right\} \\ &= \sum_{h=1}^L W_h \left\{ E(k\bar{y}_h - R_h \bar{x}_h) - \frac{1}{\bar{X}_h} E[k\bar{y}_h (\bar{x}_h - \bar{X}_h)] + \frac{R_h}{\bar{X}_h} E[\bar{x}_h (\bar{x}_h - \bar{X}_h)] \right\} \\ &= \sum_{h=1}^L W_h \left\{ (k-1)\bar{Y}_h + \frac{R_h}{\bar{X}_h} E[(\bar{x}_h - \bar{X}_h)^2] - \frac{k}{\bar{X}_h} E[(\bar{y}_h - \bar{Y}_h)(\bar{x}_h - \bar{X}_h)] \right\} \\ &= (k-1)\bar{Y} + \sum_{h=1}^L W_h \frac{(1-f_h)}{n_h \bar{X}_h} (R_h S_{Xh}^2 - k S_{XYh}) \end{aligned} \quad (14)$$

ต่อไปเราจะหาค่า k ที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของ $\bar{y}_{RS, new}$ มีค่าต่ำสุดด้วยเงื่อนไขที่จำเป็น (necessary condition) คือ

$$\begin{aligned} \frac{\partial MSE(\bar{y}_{RS, new})}{\partial k} &= \frac{\partial}{\partial k} \{ k^2 MSE(\bar{y}_{RS}) + \bar{Y}(k-1)[\bar{Y}(k-1) + 2kb(\bar{y}_{RS})] \} \\ &= 2kMSE(\bar{y}_{RS}) + 2\bar{Y}^2(k-1) + 4k\bar{Y}b(\bar{y}_{RS}) - 2\bar{Y}b(\bar{y}_{RS}) \\ &= 0 \end{aligned}$$

ซึ่งทำให้ได้

$$\begin{aligned} k &= \frac{\bar{Y}[\bar{Y} + b(\bar{y}_{RS})]}{MSE(\bar{y}_{RS}) + \bar{Y}[\bar{Y} + 2b(\bar{y}_{RS})]} \\ &= \frac{\bar{Y}[\bar{Y} + b(\bar{y}_{RS})]}{Var(\bar{y}_{RS}) + [\bar{Y} + b(\bar{y}_{RS})]^2} \\ &= \frac{R\bar{X}[R\bar{X} + b(\bar{y}_{RS})]}{Var(\bar{y}_{RS}) + [R\bar{X} + b(\bar{y}_{RS})]^2} \end{aligned} \quad (15)$$

และเงื่อนไขที่เพียงพอ (sufficient condition) ที่ทำให้ $MSE(\bar{y}_{RS, new})$ มีค่าต่ำสุดเมื่อ

$$k = \frac{R\bar{X}[R\bar{X} + b(\bar{y}_{RS})]}{Var(\bar{y}_{RS}) + [R\bar{X} + b(\bar{y}_{RS})]^2} \text{ คือ}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 MSE(\bar{y}_{RS.new})}{\partial k^2} &= \frac{\partial}{\partial k} [2kMSE(\bar{y}_{RS}) + 2\bar{Y}^2k - 2\bar{Y}^2 + 4k\bar{Y}b(\bar{y}_{RS}) - 2\bar{Y}b(\bar{y}_{RS})] \\
 &= 2MSE(\bar{y}_{RS}) + 2\bar{Y}^2 + 4\bar{Y}b(\bar{y}_{RS}) \\
 &= 2\{Var(\bar{y}_{RS}) + (b(\bar{y}_{RS}))^2\} + 2\bar{Y}^2 + 4\bar{Y}b(\bar{y}_{RS}) \\
 &= 2Var(\bar{y}_{RS}) + 2[\bar{Y} + b(\bar{y}_{RS})]^2 \\
 &> 0
 \end{aligned} \tag{16}$$

เป็นจริงเสมอสำหรับทุกค่าของ k และ $b(\bar{y}_{RS})$

ดังนั้นตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยกของค่าเฉลี่ยประชากรภายใต้การชักตัวอย่างอย่างง่ายแบบแบ่งเป็นชั้นภูมิหรือ

$$\bar{y}_{RS.new} = k\bar{y}_{RS}$$

จะมีค่า $MSE(\bar{y}_{RS.new})$ ต่ำสุดก็ต่อเมื่อค่า k ได้มาจากสมการ (15)

2. เงื่อนไขที่ทำให้ประสิทธิภาพของ $\bar{y}_{RS.new}$ ดีกว่า $\bar{y}_{RS}$ สามารถพิจารณาได้ดังนี้
จากสมการ (13) เราจะได้

$$\begin{aligned}
 MSE(\bar{y}_{RS.new}) - MSE(\bar{y}_{RS}) &= (k^2 - 1)MSE(\bar{y}_{RS}) + \bar{Y}(k-1)[\bar{Y}(k-1) + 2kb(\bar{y}_{RS})] \\
 &= (k-1)\{(k+1)MSE(\bar{y}_{RS}) + \bar{Y}[\bar{Y}(k-1) + 2kb(\bar{y}_{RS})]\} \\
 &= (k-1)\{MSE(\bar{y}_{RS}) - \bar{Y}^2 + k[MSE(\bar{y}_{RS}) + \bar{Y}^2 + 2\bar{Y}b(\bar{y}_{RS})]\} \\
 &= (k-1)\{MSE(\bar{y}_{RS}) - \bar{Y}^2 + k[Var(\bar{y}_{RS}) + (b(\bar{y}_{RS}))^2 + \bar{Y}^2 + 2\bar{Y}b(\bar{y}_{RS})]\} \\
 &= (k-1)\{MSE(\bar{y}_{RS}) - \bar{Y}^2 + k[Var(\bar{y}_{RS}) + (\bar{Y} + b(\bar{y}_{RS}))^2]\}
 \end{aligned}$$

ซึ่ง $MSE(\bar{y}_{RS.new}) - MSE(\bar{y}_{RS}) < 0$ ก็ต่อเมื่อ

$$(k-1)\{MSE(\bar{y}_{RS}) - \bar{Y}^2 + k[Var(\bar{y}_{RS}) + (\bar{Y} + b(\bar{y}_{RS}))^2]\} < 0$$

หรือ

$$(k-1)\{MSE(\bar{y}_{RS}) - R^2\bar{X}^2 + k[Var(\bar{y}_{RS}) + (R\bar{X} + b(\bar{y}_{RS}))^2]\} < 0 \tag{17}$$

ต่อไปเราจะหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของค่า k ที่ทำให้ประสิทธิภาพของ $\bar{y}_{RS.new}$ ดีกว่า $\bar{y}_{RS}$ โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็นสองกรณีดังนี้

กรณีที่ 1 ถ้า $k < 1$

จากสมการ (17) หาค่าตลอดด้วย $(k-1)$ เราจะได้ว่า

$$MSE(\bar{y}_{RS}) - R^2 \bar{X}^2 + k \left[Var(\bar{y}_{RS}) + (R\bar{X} + b(\bar{y}_{RS}))^2 \right] > 0 \Leftrightarrow 1 > k > \frac{R^2 \bar{X}^2 - MSE(\bar{y}_{RS})}{Var(\bar{y}_{RS}) + [R\bar{X} + b(\bar{y}_{RS})]^2}$$

ในกรณีนี้เงื่อนไขที่เหมาะสมของค่า k คือ

$$\frac{R^2 \bar{X}^2 - MSE(\bar{y}_{RS})}{Var(\bar{y}_{RS}) + [R\bar{X} + b(\bar{y}_{RS})]^2} < k < 1 \quad (18)$$

กรณีที่ 2 ถ้า $k > 1$

จากสมการ (17) หาค่าตลอดด้วย $(k-1)$ เราจะได้ว่า

$$MSE(\bar{y}_{RS}) - R^2 \bar{X}^2 + k \left[Var(\bar{y}_{RS}) + (R\bar{X} + b(\bar{y}_{RS}))^2 \right] < 0 \Leftrightarrow 1 < k < \frac{R^2 \bar{X}^2 - MSE(\bar{y}_{RS})}{Var(\bar{y}_{RS}) + [R\bar{X} + b(\bar{y}_{RS})]^2}$$

ในกรณีนี้เงื่อนไขที่เหมาะสมของค่า k คือ

$$1 < k < \frac{R^2 \bar{X}^2 - MSE(\bar{y}_{RS})}{Var(\bar{y}_{RS}) + [R\bar{X} + b(\bar{y}_{RS})]^2} \quad (19)$$

ดังนั้นจากทั้งสองกรณี $MSE(\bar{y}_{RS.new})$ มีค่าน้อยกว่า $MSE(\bar{y}_{RS})$ หรือ $\bar{y}_{RS.new}$ มีประสิทธิภาพดีกว่า $\bar{y}_{RS}$ ก็ต่อเมื่อค่า k สอดคล้องกับสมการเงื่อนไข (18) หรือ (19)

ข้อสังเกต

1. เราจะเห็นว่าค่า k ที่ทำให้ประสิทธิภาพของ $\bar{y}_{RS.new}$ ดีกว่า $\bar{y}_{RS}$ มีได้มากมายหลายค่า แต่ค่า k ที่ทำให้ $\bar{y}_{RS.new}$ มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ ค่า k ที่ได้มาจากสมการ (15)

2. พิจารณาค่า k ในสมการ (15) และค่า $\frac{R^2 \bar{X}^2 - MSE(\bar{y}_{RS})}{Var(\bar{y}_{RS}) + [R\bar{X} + b(\bar{y}_{RS})]^2}$ ในสมการ (18) และ (19)

เราจะเห็นว่า k และ $\frac{R^2 \bar{X}^2 - MSE(\bar{y}_{RS})}{Var(\bar{y}_{RS}) + [R\bar{X} + b(\bar{y}_{RS})]^2}$ จะมีค่าน้อยกว่าหนึ่งก็ต่อเมื่อ $b(\bar{y}_{RS}) > \frac{-MSE(\bar{y}_{RS})}{R\bar{X}}$

และในทางกลับกัน k และ $\frac{R^2 \bar{X}^2 - MSE(\bar{y}_{RS})}{Var(\bar{y}_{RS}) + [R\bar{X} + b(\bar{y}_{RS})]^2}$ จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง ก็ต่อเมื่อ

$b(\bar{y}_{RS}) < \frac{-MSE(\bar{y}_{RS})}{R\bar{X}}$ ในกรณีนี้ค่าของ $b(\bar{y}_{RS})$ ต้องมีค่าน้อยกว่าศูนย์อย่างแน่นอน

ตัวอย่างเชิงตัวเลข

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาหรือทดสอบว่าผลลัพธ์เชิงตัวเลขจะมีความสอดคล้องกับผลลัพธ์ในเชิงทฤษฎีหรือไม่ ดังนั้นเรจึงนำเสนอตัวอย่างเชิงตัวเลขเพื่อแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์เชิงตัวเลขสนับสนุนผลการศึกษาในเชิงทฤษฎีที่ได้ในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งตัวอย่างที่เรานำมาเสนอในงานวิจัยนี้มีสองตัวอย่าง โดยตัวอย่างแรกเรานำข้อมูลมาจากการงานวิจัยของ Kadilar และ Cingi (2005) และตัวอย่างที่สองเป็นข้อมูลที่มาจากการงานวิจัยของ Koyuncu และ Kadilar (2009)

ตัวอย่างที่ 4.1 ข้อมูลประชากรดังตารางข้างล่างนำจากการงานวิจัยของ Kadilar และ Cingi (2005) ซึ่งเกี่ยวกับปริมาณผลผลิตของแอปเปิ้ลและจำนวนคันแอปเปิ้ลของ 854 หมู่บ้านในประเทศตุรกี ปี 1999 โดยใช้ขนาดตัวอย่างเท่ากับ 140 และใช้วิธีกำหนดขนาดตัวอย่างในแต่ละชั้นภูมิแบบเนย์แมน (Neyman Allocation) ดังนี้

$$n_h = \frac{nN_hS_h}{\sum_{h=1}^L N_hS_h}$$
(20)

ตารางที่ 1 ข้อมูลประชากรในงานวิจัยของ Kadilar และ Cingi (2005)

$N = 854$	$n = 140$	$\bar{X} = 37600$	$\bar{Y} = 2930$	$S_x = 144794$	$S_y = 17106$	$\rho = 0.92$
$N_1 = 106$	$n_1 = 9$	$\bar{X}_1 = 24375$	$\bar{Y}_1 = 1536$	$S_{x1} = 49189$	$S_{y1} = 6425$	$\rho_1 = 0.82$
$N_2 = 106$	$n_2 = 17$	$\bar{X}_2 = 27421$	$\bar{Y}_2 = 2212$	$S_{x2} = 57461$	$S_{y2} = 11552$	$\rho_2 = 0.86$
$N_3 = 94$	$n_3 = 38$	$\bar{X}_3 = 72409$	$\bar{Y}_3 = 9384$	$S_{x3} = 160757$	$S_{y3} = 29907$	$\rho_3 = 0.90$
$N_4 = 171$	$n_4 = 67$	$\bar{X}_4 = 74365$	$\bar{Y}_4 = 5588$	$S_{x4} = 285603$	$S_{y4} = 28643$	$\rho_4 = 0.99$
$N_5 = 204$	$n_5 = 7$	$\bar{X}_5 = 26441$	$\bar{Y}_5 = 967$	$S_{x5} = 45403$	$S_{y5} = 2390$	$\rho_5 = 0.71$
$N_6 = 173$	$n_6 = 2$	$\bar{X}_6 = 9844$	$\bar{Y}_6 = 404$	$S_{x6} = 18794$	$S_{y6} = 946$	$\rho_6 = 0.89$

ตารางที่ 2 แสดงค่าความเอนเอียงและความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของ $\bar{y}_{RS}$ และ $\bar{y}_{RS,new}$ ในตัวอย่างที่ 4.1

ตัวประมาณค่า	ความเอนเอียง	MSE
$\bar{y}_{RS}$	-194.82	197,102.00
$\bar{y}_{RS,new}$	-95.00	188,128.00

จากตารางที่ 2 เราจะเห็นว่า $MSE(\bar{y}_{RS,new})$ มีค่าน้อยกว่า $MSE(\bar{y}_{RS})$ และเมื่อพิจารณา k ที่คำนวณได้จากสมการ (15) เราพบว่า $\frac{R^2\bar{X}^2 - MSE(\bar{y}_{RS})}{Var(\bar{y}_{RS}) + [R\bar{X} + b(\bar{y}_{RS})]^2} = 1.098$ มีค่ามากกว่าค่า $k = 1.049$ ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าค่า k ที่คำนวณได้สอดคล้องกับสมการเงื่อนไข (19) ดังนั้น จึงทำให้

ค่า $MSE(\bar{y}_{RS,new})$ ที่คำนวณได้ในตารางมีค่าน้อยกว่า $MSE(\bar{y}_{RS})$ และเราจะสังเกตได้ว่า $b(\bar{y}_{RS}) = -194.82$ มีค่าน้อยกว่า $\frac{-MSE(\bar{y}_{RS})}{R\bar{X}} = -67.27$ ซึ่งสอดคล้องกับข้อสังเกตข้อ 2

ตัวอย่างที่ 4.2 ข้อมูลประชากรดังตารางข้างล่างนำมาจากงานวิจัยของ Koyuncu and Kadilar (2009) เป็นข้อมูลของอาจารย์ผู้สอนและจำนวนนักเรียนของ 923 โรงเรียน โดยแบ่งเป็น 6 เขต ในประเทศตุรกี ปี 2007 โดยใช้ขนาดตัวอย่างเท่ากับ 100 และใช้วิธีกำหนดขนาดตัวอย่างในแต่ละชั้นภูมิแบบเนย์แมนดังสมการข้างต้น

ตารางที่ 3 ข้อมูลประชากรในงานวิจัยของ Koyuncu และ Kadilar (2009)

$N = 923$	$n = 100$	$\bar{X} = 11440.49$	$\bar{Y} = 436.8$			
$N_1 = 127$	$n_1 = 17$	$\bar{X}_1 = 20804.59$	$\bar{Y}_1 = 703.74$	$S_{x1} = 30486.75$	$S_{y1} = 883.84$	$\rho_1 = 0.94$
$N_2 = 117$	$n_2 = 11$	$\bar{X}_2 = 9211.79$	$\bar{Y}_2 = 413$	$S_{x2} = 15180.77$	$S_{y2} = 644.92$	$\rho_2 = 0.99$
$N_3 = 103$	$n_3 = 16$	$\bar{X}_3 = 14309.30$	$\bar{Y}_3 = 573.17$	$S_{x3} = 27549.69$	$S_{y3} = 1033.47$	$\rho_3 = 0.99$
$N_4 = 170$	$n_4 = 21$	$\bar{X}_4 = 9478.85$	$\bar{Y}_4 = 424.66$	$S_{x4} = 18218.93$	$S_{y4} = 810.59$	$\rho_4 = 0.98$
$N_5 = 205$	$n_5 = 13$	$\bar{X}_5 = 5569.95$	$\bar{Y}_5 = 267.03$	$S_{x5} = 8497.78$	$S_{y5} = 403.65$	$\rho_5 = 0.99$
$N_6 = 201$	$n_6 = 22$	$\bar{X}_6 = 12997.59$	$\bar{Y}_6 = 393.84$	$S_{x6} = 23094.14$	$S_{y6} = 711.72$	$\rho_6 = 0.97$

ตารางที่ 4 แสดงค่าความเอนเอียงและความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของ $\bar{y}_{RS}$ และ $\bar{y}_{RS,new}$ ในตัวอย่างที่ 4.2

ตัวประมาณค่า	ความเอนเอียง	MSE
$\bar{y}_{RS}$	4.366	1032.039
$\bar{y}_{RS,new}$	-0.191	987.915

เช่นเดียวกับตัวอย่างเชิงตัวเลขในตัวอย่างที่ 4.1 เราจะเห็นว่า ค่า $MSE(\bar{y}_{RS,new})$ ในตารางที่ 4 มีค่าน้อยกว่า $MSE(\bar{y}_{RS})$ และจากค่า k ที่คำนวณได้จากสมการ (15) เราพบว่า $\frac{R^2 \bar{X}^2 - MSE(\bar{y}_{RS})}{Var(\bar{y}_{RS}) + [R\bar{X} + b(\bar{y}_{RS})]^2} = 0.970$ มีค่าน้อยกว่าค่า $k = 0.985$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าค่า k ที่ได้สอดคล้องกับสมการเงื่อนไข (18) จึงทำให้ค่า $MSE(\bar{y}_{RS,new})$ ที่คำนวณได้ในตารางมีค่าน้อยกว่า $MSE(\bar{y}_{RS})$ นอกจากนี้เราจะเห็นได้ชัดว่า $b(\bar{y}_{RS}) = 4.336$ มีค่ามากกว่า $\frac{-MSE(\bar{y}_{RS})}{R\bar{X}} = -2.363$ ซึ่งเป็นไปตามข้อสังเกตข้อ 2 เช่นเดียวกัน

สรุปผลการวิจัย

ตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยกของค่าเฉลี่ยประชากรภายใต้การชักตัวอย่างอย่างง่ายแบบแบ่งเป็นชั้นภูมิที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ เราได้ประยุกต์ใช้วิธีการหาตัวประมาณค่าของ Kadilar และ Cingi (2005) ในการปรับตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยกของค่าเฉลี่ยประชากรแบบดั้งเดิม ($\bar{y}_{RS}$) ให้เป็นตัวประมาณค่าตัวใหม่ ($\bar{y}_{RS.new}$) และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวประมาณค่าตัวใหม่ที่นำเสนอกับตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยกของค่าเฉลี่ยประชากรแบบดั้งเดิม (เปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยใช้ความคลาดเคลื่อนกำลังเฉลี่ย) พบว่าตัวประมาณค่า $\bar{y}_{RS.new}$ มีประสิทธิภาพดีกว่าตัวประมาณค่า $\bar{y}_{RS}$ ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด (ค่า k ในสมการ (15) ต้องสอดคล้องกับสมการเงื่อนไข (18) หรือ (19)) นอกจากนี้ ผลลัพธ์เชิงตัวเลขที่ได้นำเสนอทั้งสองตัวอย่างยังสนับสนุนผลการศึกษาในเชิงทฤษฎีข้างต้นได้เป็นอย่างดี

ข้อเสนอแนะ

พิจารณาค่า k ในสมการ (15) หรือค่า $\frac{R^2 \bar{X}^2 - MSE(\bar{y}_{RS})}{Var(\bar{y}_{RS}) + [R\bar{X} + b(\bar{y}_{RS})]^2}$ ในสมการ (18) และ (19)

พบว่า ค่าเหล่านี้ประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องหลายตัว และในทางปฏิบัติเราอาจไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้ ดังนั้น ในการนำไปประยุกต์ใช้หรือในทางปฏิบัติเราจำเป็นต้องประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องที่ไม่ทราบค่าทั้งหมด นอกจากนี้เราทราบว่าตัวประมาณค่าสำหรับพารามิเตอร์แต่ละตัวอาจมีหลายตัว และในการเลือกตัวประมาณค่าสำหรับพารามิเตอร์เหล่านี้เราควรคำนึงถึงความเหมาะสม แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของผู้ที่จะนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

สุรินทร์ นิยมางกูร. (2546). เทคนิคการสุ่มตัวอย่าง. พิมพ์

ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์.

Cochran, W. G. (1977). Sampling Techniques.
(3rd ed.). New York: John Wiley and Sons.

Kadilar, C. and Cingi, H. (2005). A new ratio esti-
mator in stratified random sampling.

Communications in Statistics-Theory and
Methods. 34: 597-602.

Koyuncu, N. and Kadilar, C. (2009). Ratio and pro-
duct estimators in stratified random sampling.
Journal of Statistical Planning and Inference.
139: 2552 - 2558.

Singh, R. and Mangat, N. S. (1996). Elements of
survey sampling. New York: Springer-Verlag.



ดัชนีวารสารวิทยาศาสตร์ มข.
(เรียงตามชื่อผู้เขียน)
ปีที่ 37 (พ.ศ. 2552)

ผู้เขียน	ชื่อเรื่อง	ฉบับที่	หน้า
กาญจนา สิริกุลรัตน์ นรินทร์ สิริกุลรัตน์	สมบัติไดอิเล็กทริกของข้าวเปลือกเหนียว (<i>Oryza sativa</i> Linn) (Dielectric Properties of Glutinous Rice Paddy (<i>Oryza sativa</i> Linn))	2	192-201
กิตติมา อมรรักษา กิตติรัฐ รุจนพจน์ เกรียงไกร สีตะพันธุ์	ไนเตรชันของไดเบนซอลอะซิโตน (Nitration of Dibenzalacetone) ความหลากหลายของโครโมโซมในปลาน้ำจืดของประเทศไทย (Chromosomal Diversification of Freshwater Fishes in Thailand)	1	83-91 1-12
ฉณินทร์ ชีรภาพโอฬาร	ขอบเขตล่างและบนของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ระหว่างฟังก์ชัน การแจกแจงสะสมของตัวแปรสุ่มทวินามนิเสธและตัวแปรสุ่มปัวซอง (Lower aUpper Bounds of the Relative Error Between the Negative Binomial and Poisson Cumulative Distribution Functions)	1	92-101
จตุภัทร เมฆพ่ายัพ	แผนภูมิควบคุมคุณภาพหลายตัวแปรด้วยข่ายงานระบบประสาท สำหรับการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (Multivariate Quality Control Charts by Neural Networks for Statistical Process Control)	4	386-397
จริยา สิงห์คำ สมใจ จิตพิทักษ์ จักรี ภาษา	มัธมิลลอการิทึม (Logarithmic Mean) ระเบียบวิธีสมาชิกตามขอบ โดยใช้วิธีสมาชิกกำลังสอง ใน 2 มิติกับโปรแกรมเมทแลบ (The Boundary Element Method using Quadratic Element for Two - Dimensional with MATLAB)	1 4	42-48 472-481
จันทพร ทองเอกแก้ว	คุณค่าทางโภชนาการของเห็ดกระด้าง <i>Lentinus polychrous</i> Lev. (Nutritive Value of Hed Kradang (<i>Lentinus polychrous</i> Lev.))	3	314-319

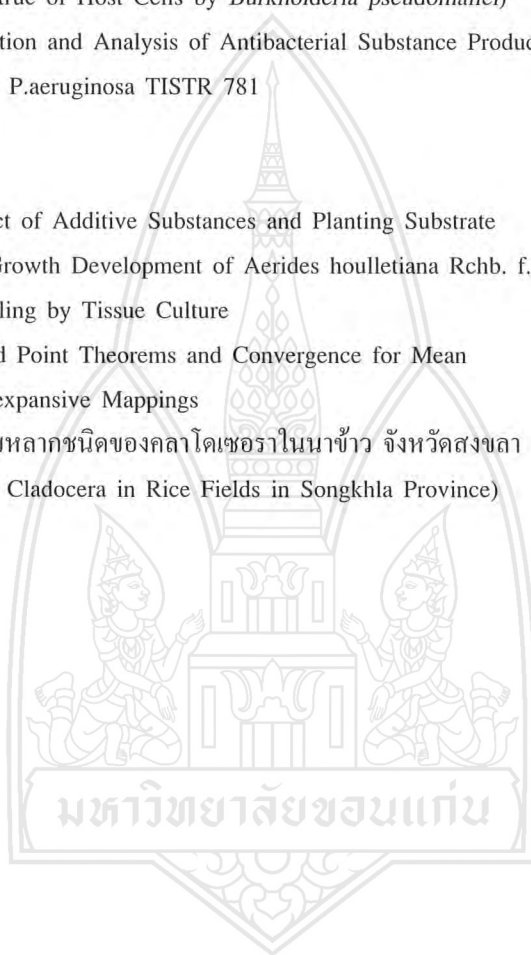
ผู้เขียน	ชื่อเรื่อง	ฉบับที่	หน้า
จุฑาพร แสงแก้ว	การพัฒนากลิ่นหอมของไวน์ (Development of wine aroma)	4	357-365
เฉลิมพล ธนอมวงศ์	ผลของเจลาตินและกรดซิตริกต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัส ของกัมมี่เยลลีสต๊ะไคร้ (Effect of Gelatin and Citric Acid on Sensory Quality of Lemongrass Flavored Gummy Jelly)	3	325-332
เจลิยว กุวงศ์คดิก เสนห์ จิตต์กลาง	ศัตรูธรรมชาติและสิ่งมีชีวิตที่อาศัยร่วมกับแมลงวันดำ (Natural Enemies and Symbionts of Black Flies)	1	13-27
ชวณิ สุภรัตน์ บุญอ้อม โคมที	ประสิทธิภาพของสถิติทดสอบสำหรับแผนแบบแฟคทอเรียล กรณีที่มีตัวแปรร่วม (Efficiency of Statistical Test for Factorial Designs with Covariate)	1	102-111
จิตติมา รุจิราลัย	โพลาร์ออร์แกนิกเคมีคัลอินทิเกรทีฟแซมเพลอร์ สำหรับ สารอินทรีย์ในตัวอย่างน้ำ (Polar Organic Chemical Integrative Sampler for Organic Compounds in Aqueous Samples)	2	137-146
ธนเศรษฐ์ โรจน์ศิริพิศาล	การประยุกต์แบบจำลองเชิงตัวเลขที่มีการนำเข้าข้อมูลใหม่ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงในมหาสมุทร (Applications of Numerical Model with Data-Assimilation to Study Ocean Variations)	4	398-406
ธัญธิดา แสงปัญญา นภา ตั้งเตรียมจิตมั่น	การวิเคราะห์ปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำประปาหมู่บ้าน จากอำเภอสันติสุข จังหวัดน่าน ด้วยฟลูออไรด์ไอออนซีเล็คทีฟอิเล็กโทรด (Determination of Fluoride in Deep Well Pipe Water from Suntisuk District, Nan Province by Fluoride Ion Selective Electrode)	1	65-73
ธิปไตยนทร์ ดีอันทอง พัฒนา เทศทับ ศิริรัตน์ หลีกคำ ศักดิ์ดา คาควง สมปอง ธรรมศิริรักษ์	การแยกโอวัลบูมินและไลโซไซม์จากไข่ขาวของไข่ไก่ โดยการตกตะกอนด้วยเอทานอลร่วมกับวิธีโครมาโตกราฟี (Purification of Ovalbumin and Lysozyme from Hen Egg White by Ethanol Precipitation and Chromatography)	3	294-304
นพคุณ ภักดีณรงค์ ปิยะเนตร จันทร์ถิระติกุล อาณัติ จันทร์ถิระติกุล	อาหารธรรมชาติของปูนา <i>Esanthelphusa dugasti</i> Rathbun, 1902 ในฤดูฝน (Natural Diet of the Rice-Field Crab, <i>Esanthelphusa dugasti</i> Rathbun, 1902 in rainy season)	1	49-55
นริศรา ม่วงศรีจันทร์ เวณิกา เบ็ญจพงษ์ วีรยา การพานิช ปราณี พัฒนกุลอนันต์	การปนเปื้อนของอะฟลาทอกซินในเครื่องแกงเผ็ดแดง ที่จำหน่ายในตลาดสด (Aflatoxin Contamination in Commercial Red Curry Paste Sold in Fresh Markets)	2	221-230

ผู้เขียน	ชื่อเรื่อง	ฉบับที่	หน้า
นพพรชัย ทวีบท อำพา เหลืองภิรมย์	ผลของยาเตตราไซคลินต่อความเป็นพิษของตับ และการสร้างสเปิร์มในหนูเมาส์ (Effect of Tetracycline on Hepatotoxicity and Spermatogenesis in Mice (<i>Mus musculus</i> Linn.))	1	56-64
น้อย เนียมสา มังกร ศรีสะอาด ยอดธง ไบมาก	การใช้ประโยชน์ฟิล์มไคโตซานเป็นระบบนำส่งยา แบบควบคุมการปลดปล่อย (Utilization of Chitosan Film as Controlled Release Drug Delivery Systems)	2	147-156
นันทวัน เอื้อวงศ์กุล ศักดิ์ดา คางดวง	พิษแมงป่อง : น่ากลัว หรือ น่าใช้ (Scorpion Toxin : Dreadful or Applicable)	2	157-162
นิวัตร สุวรรณะ พัชรีย์ วงษ์เกษม	ตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยกของค่าเฉลี่ยประชากร ในการชักตัวอย่างอย่างง่ายแบบแบ่งเป็นชั้นภูมิ	4	495-505
คณิตฤทธิ์ ชีรภาพโอพา	(Separate Ratio Estimator of The Population Mean in Stratified Random Sampling)		
ปิยมาศ นานอก พรพิมล พงษ์อ่อน อภิญญา แก้วใส	การเดินรำเพื่อสื่อสารบอกทิศทางแหล่งอาหารของผึ้งมัม (<i>Apis florea</i> Fabricius, 1787) (Dance communication on food resources of dwarf honey bee (<i>Apis florea</i> Fabricius, 1787))	4	417-425
ปิยะเนตร จันทร์ถิระติกุล	การวิเคราะห์สเปกตรัมของสารประกอบซีลีเนียม (Speciation of Selenium Compounds)	4	376-385
ปิยะรัตน์ บุญแสวง	ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตพอลิไฮดรอกซีอัลคานอยด์จากจุลินทรีย์ (Factors Affecting the Production of Microbial Polyhydroxyalkanoate)	3	256-267
ศุภสดี พรหมประสิทธิ์ อมรรัตน์ ประจักษ์สูตร	ความหลากหลายของพืชวงศ์ทานตะวันในอุทยานแห่งชาติน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์	4	426-434
พิมพ์วิดี พรพงษ์รุ่งเรือง	(Diversity of Asteraceae in Nam Nao National Park, Phetchabun Province)		
พงศศักดิ์ รัตนชัยกุลโสภณ	แบคทีเรียโอซิน: สารยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ผลิตโดยแบคทีเรีย (Bacteriocins: Antimicrobial Substances Produced by Bacteria)	3	231-243
พรสุดา บ่มไต้	ผลของอุณหภูมิซินเตอร์ต่อสมบัติของเซรามิก $Bi_{0.5}(Na_{0.85}K_{0.15})TiO_3$ (Effects of Sintering Temperature on Properties of $Bi_{0.5}(Na_{0.85}K_{0.15})TiO_3$ Ceramics)	4	454-462
พวงทิพย์ แก้วทับทิม ธวัช ชิตตระการ ไทรภพ ผ่องสุวรรณ ภัทร อัยรักษ์	การหาดัชนีการเก็บเกี่ยวผลขององุ่นโดยการวัดสีผิวผลขององุ่น ด้วยผลของเครื่องวัดสี (Determining the Harvesting Index of Longkong Fruit by Skin Color Analysis with Longkong Color Meter)	2	202-212

ผู้เขียน	ชื่อเรื่อง	ฉบับที่	หน้า
มัทนา จงกา ดวงกมล แม้นศิริ สุรพล แสนสุข	ยื่น <i>matK</i> และ <i>trnH-psbA</i> intergenic spacer ในการนำมาใช้เป็น DNA barcode: การประเมินเบื้องต้นโดยการตรวจสอบความผันแปรภายใน <i>Alpinia galanga</i> (L.) Wild (<i>matK</i> Versus <i>trnH-psbA</i> Intergenic Spacer to be used as DNA Barcodes; Preliminary Evaluation by the Assessment of Intraspecific Sequence Variation in <i>Alpinia galanga</i> (L.) Wild	2	173-182
รณสรณ์ ชินรัมย์	ความสัมพันธ์กรีนและความเป็นปกติของกึ่งกรุปการแปลงเต็มวงนัยทั่วไป (Greens Relations and Regularity of Generalized Full Transformation Semigroups)	3	348-356
รัตนภรณ์ ลีสิงห์	การผลิตลิพิดจากสาหร่ายสีเขียวขนาดเล็กภายใต้สภาวะเฮเทโรโทรฟิก (Lipid Production from the Green Microalgae under Heterotrophic Cultivation)	3	284-293
รัตนา มหาชัย ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง ชุติมา คูคุ้มพร นาถ ภูวงศ์ผา ชาญเขาว์ พรหมราษฎร์	การกำจัดโลหะหนักที่มีพิษในน้ำทิ้งด้วยถังบำบัดแบบอยู่กับที่ (Removal of toxic heavy metals from wastewater by onsite treatment plant)	4	435-443
รัตนภรณ์ ศรีภากรณ์	ควอซี-ไอดีลวงนัยทั่วไปของกึ่งกรุป (Generalized Quasi-Ideals of Semigroup)	2	213-220
รุตินี โตเกีเล	ความคงตัวของเอนไซม์เซลลูเลสจากจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1 (The Stability of Cellulase Produced by Compost Microorganisms for Industrial Application)	4	407-416
ชนวนดี เตชะภัทวรกุล เบญจมาศ เขียวศรีศิลป์	สุสาโรจน์ เพื่อการประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรม (The Stability of Cellulase Produced by Compost Microorganisms for Industrial Application)		
วันนิดา ชินผา	การเตรียมเยื่อแผ่นจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ (Preparation of Synthetic Polymer Membranes)	3	275-283
วัฒนา ดันมิ่ง	ความหลากหลายของพืชสกุลไทร (<i>Ficus</i> L.)	1	112-120
ประนอม จันทรโณทัย	ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ		
ศิริรัตน์ ศิริพรวิศาล	วิถีชีวสังเคราะห์พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตในแบคทีเรีย (Biosynthetic Pathway for Polyhydroxyalkanoate in bacteria)	3	244-255
ศุภาพร หวังศิริเจริญ วสุ ปฐมอารีย์	การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ปนเปื้อนในก๊าซชีวภาพโดยจุลินทรีย์ (Hydrogen Sulfide Removal from Biogas by Microorganisms)	2	130-136

ผู้เขียน	ชื่อเรื่อง	ฉบับที่	หน้า
สายันต์ โพธิ์เกตุ	การคำนวณสัมประสิทธิ์สภาพุ่นมัวของบรรยากาศจากข้อมูลทัศนวิสัยในจังหวัดขอนแก่น (A determination of atmospheric turbidity coefficient from visibility data in Khon Kaen province)	4	463-471
สิทธิศักดิ์ คำผา สมมาศ อีฐรัตน์ อุทัย โคตรटक กรุง วิลาชัย ภูมิสิทธิ์ วรรณขารี เมธา วรรณพัฒน์	ผลของการเสริมมันเส้นหมักยีสต์ทดแทนอาหารชั้นต่อนิวสวิตา ในกระเพาะหมักและการเจริญเติบโตในโคนมสาว (Effects of Supplementation of Yeast Fermented Cassava Chip as a Replacement Concentrate on Rumen Ecology and Growth in Heifer)	3	333-341
สีหนาท ประสงค์สุข	การผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพพุลูลันและการประยุกต์ใช้ (Production of Pullulan Biopolymer and its Applications)	3	268-274
ศุภยา ฤทธิสร จุไรรัตน์ ดวงเดือน อรวรรณ ชื่นคุ้ม	การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยระบบเอสบีอาร์และไคโตซาน (Study on Efficiency of Leachate Treatment by SBR system and Chitosan)	4	444-453
สุดาทิพย์ จูตะโกภา	พรีไบโอติก (Prebiotic)	4	366-375
สุเมธา สุวรรณบุรณ์	ผลของสารประกอบเชิงซ้อนต่อลักษณะทางสัญญาณและความต้านทานการกัดกร่อนของผิวเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส (Effect of Complexing Agent on Morphology and Corrosion Resistance of Electroless Ni-P Coating)	1	74-82
เสาวรัตน์ จันทะโร	กลไกตอบสนองของไซยาโนแบคทีเรียต้านภาวะเครียดจากแสงที่มีความเข้มสูง (Responsive Mechanisms of Cyanobacteria against Intense Light Stress)	2	121-129
อักรพงศ์ วงศ์พัฒน์ สุพจน์ ไวย่างกูร	การจำลองการไหลคงตัวใน 2 มิติของของไหลแบบมีความหนืดที่อัดตัวไม่ได้โดยใช้โปรแกรม FlexPDE student version 5.1.0s (2D-Flow Simulation of viscous incompressible fluid using FlexPDE student version 5.1.0s)	4	482-494
อาคม เกสร	นิติวิทยาศาสตร์กับกระบวนการยุติธรรม (Forensic Science and Justice Process)	1	36-41

ผู้เขียน	ชื่อเรื่อง	ฉบับที่	หน้า
อำมร อินทร์สังข์ จรงศักดิ์ พุมนวน	ผลของน้ำมันหอมระเหยจากพืชต่อไรฝุ่น <i>Dermatophagoides pteronyssinus</i> (Trouessart) (Acaricidal Activity of Essential Oil of Medicinal Plants against House Dust Mite, <i>Dermatophagoides pteronyssinus</i> (Trouessart))	2	183-191
อิชญา มุ่งสันติสุข	การทำลายเซลล์เจ้าบ้านของเชื้อ <i>Burkholderia pseudomallei</i> (Destruc of Host Cells by <i>Burkholderia pseudomallei</i>)	1	28-35
Kanda Saosoong Wirach Wongphathanakul Chanokporn Poasiri Chalerm Ruangviriyachai	Isolation and Analysis of Antibacterial Substance Produced from <i>P.aeruginosa</i> TISTR 781	2	163-172
Somporn Prasertsongskun Rosemina Awaesuemae	Effect of Additive Substances and Planting Substrate on Growth Development of <i>Aerides houlletiana</i> Rchb. f. Seedling by Tissue Culture	3	320-324
Sukanya Somprom Satit Saejung	Fixed Point Theorems and Convergence for Mean Nonexpansive Mappings	3	342-347
Supianit Maiphae Phurichaya Janpriang	ความหลากหลายของคลาโดเซอราในนาข้าว จังหวัดสงขลา (The Cladocera in Rice Fields in Songkhla Province)	3	305-313



ดัชนีวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

(เรียงตามชื่อเรื่อง)

ปีที่ 37 (พ.ศ. 2552)

ชื่อเรื่อง	ผู้เขียน	ฉบับที่	หน้า
กลไกตอบสนองของไซยาโนแบคทีเรียต้านภาวะเครียด จากแสงที่มีความเข้มสูง (Responsive Mechanisms of Cyanobacteria against Intense Light Stress)	เสาวรัตน์ จันทะโร	2	121-129
การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ปนเปื้อน ในก๊าซชีวภาพโดยจุลินทรีย์ (Hydrogen Sulfide Removal from Biogas by Microorganisms)	ศุภาพร หวังศิริเจริญ วสุ ปฐมอารีย์	2	130-136
การกำจัดโลหะหนักที่มีพิษในน้ำทิ้งด้วยถังบำบัด แบบอยู่กับที่ (Removal of toxic heavy metals from wastewater by onsite treatment plant)	รัตนา มหาชัย ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง ชุตติมา กุคู่สมุทร นาถ ภูวงศ์ผา ชาญเชาว์ พรหมราษฎร์ สาธิต โพธิ์เกตุ	4	435-443
การคำนวณสัมประสิทธิ์สภาพุ่นมัวของบรรยากาศ จากข้อมูลทัศนวิสัยในจังหวัดขอนแก่น (A determination of atmospheric turbidity coefficient from visibility data in Khon Kaen province)		4	463-471
การจำลองการไหลคงตัวใน 2 มิติของของไหล แบบมีความหนืดที่อัดตัวไม่ได้โดยใช้โปรแกรม FlexPDE student version 5.1.0s (2D-Flow Simulation of viscous incompressible fluid using FlexPDE student version 5.1.0s)	อัครพงศ์ วงศ์พัฒน์ สุพจน์ ไวทัยกร	4	482-494
การใช้ประโยชน์ฟิล์มไคโตซานเป็นระบบนำส่งยา แบบควบคุมการปลดปล่อย (Utilization of Chitosan Film as Controlled Release Drug Delivery Systems)	น้อย เนียมสา มังกร ศรีสะอาด ยอดธง ไบมาก	2	147-156

ชื่อเรื่อง	ผู้เขียน	ฉบับที่	หน้า
การเดินรำเพื่อสื่อสารบอกทิศทางแหล่งอาหารของผึ้งมิม <i>Apis florea</i> Fabricius, 1787) (Dance communication on food resources of dwarf honey bee (<i>Apis florea</i> Fabricius, 1787))	ปิยมาศ นานอก พรพิมล พงษ์อ่อน อภิญญา แก้วใส	4	417-425
การเตรียมเยื่อแผ่นจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ (Preparation of Synthetic Polymer Membranes)	วัชนิดา ชินผา	3	275-283
การทำลายเซลล์เจ้าบ้านของเชื้อ <i>Burkholderia pseudomallei</i> (Destruct of Host Cells by <i>Burkholderia pseudomallei</i>)	อิษฏา มุ่งสันติสุข	1	28-35
การปนเปื้อนของอะฟลาทอกซินในเครื่องแกงเผ็ดแดง ที่จำหน่ายในตลาดสด (Aflatoxin Contamination in Commercial Red Curry Paste Sold in Fresh Markets)	นริศรา ม่วงศรีจันทร์ เวณิกา เบ็ญพงษ์ วีรยา การพานิช ปราณี พัฒนกุลอนันต์ ธเนศร์ โรจน์ศิริพิศาล	2	221-230
การประยุกต์แบบจำลองเชิงตัวเลขที่มีการนำเข้า ข้อมูลใหม่เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงในมหาสมุทร (Applications of Numerical Model with Data-Assimilation to Study Ocean Variations)	ธีรนาถ ประสงค์สุข	4	398-406
การผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพพอลูลูแลนและการประยุกต์ใช้ (Production of Pullulan Biopolymer and its Applications)	สัทนาท ประสงค์สุข	3	268-274
การผลิตลิปิดจากสาหร่ายสีเขียวขนาดเล็กภายใต้ สภาวะเฮเทอโรโทรฟิก (Lipid Production from the Green Microalgae under Heterotrophic Cultivation)	รัตนภรณ์ ลิ้มสิงห์	3	284-293
การพัฒนากลิ่นหอมของไวน์ (Development of wine aroma)	จุฑาพร แสงแก้ว	4	357-365
การแยกโอวัลบูมินและไลโซไซม์จากไข่ขาวของไข่ไก่ โดยการตกตะกอนด้วยเอทานอลร่วมกับวิธีโครมาโตกราฟี (Purification of Ovalbumin and Lysozyme from Hen Egg White by Ethanol Precipitation and Chromatography)	ธิปดินทร์ คีอังกอง พัฒนา เทศทับ ศิริรัตน์ หลีกคำ ศักดา ดาดวง สมปอง ธรรมศิริรักษ์	3	294-304
การวิเคราะห์ปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำประปาหมู่บ้าน จากอำเภอสันติสุข จังหวัดน่าน ด้วยฟลูออไรด์ ไอออนซีล็คทีฟอิเล็กโทรด (Determination of Fluoride in Deep Well Pipe Water from Suntisuk District, Nan Province by Fluoride Ion Selective Electrode)	ธัญรดา แสนปัญญา นภา ตั้งเตรียมจิตมัน	1	65-73

ชื่อเรื่อง	ผู้เขียน	ฉบับที่	หน้า
การวิเคราะห์สปีชีส์ของสารประกอบซีลีเนียม (Speciation of Selenium Compounds)	ปิยะเนตร จันทร์ถิระติกุล	4	376-385
การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอย ด้วยระบบเอสบิโอาร์และไคโตซาน (Study on Efficiency of Leachate Treatment by SBR system and Chitosan)	ศุภยา ฤทธิศร จุไรรัตน์ ควงเดือน อรรวรรณ ชื่นคุ้ม	4	444-453
การหาดัชนีการเก็บเกี่ยวผลองกองโดยการวัดสีผิว ผลองกองด้วยผลองกองคัลเลอริมิเตอร์ (Determining the Harvesting Index of Longkong Fruit by Skin Color Analysis with Longkong Color Meter)	พวงทิพย์ แก้วทับทิม ธวัช ชิตตระการ ไทรภพ ผ่องสุวรรณ ภัทร อัยรักษ์	2	202-212
ขอบเขตล่างและบนของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ ระหว่างฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของตัวแปร สุ่มทวินามนิเสธและตัวแปรสุ่มปัวซอง (Lower aUpper Bounds of the Relative Error Between the Negative Binomial and Poisson Cumulative Distribution Functions)	คลินิกทร์ ชีรภาพโอพาร	1	92-101
ควอซี-ไอดีลวงนัยทั่วไปของกึ่งกรุป (Generalized Quasi-Ideals of Semigroup)	รัตนภรณ์ ศรีภรณ์ รณสรณ์ ชินรัมย์	2	213-220
ความคงตัวของเอนไซม์เซลลูเลสจากจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1 เพื่อการประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรม (The Stability of Cellulase Produced by Compost Microorganisms for Industrial Application)	รุสนี โตะทีเล ธันวดี เตชะภัททวรกุล สุขสาโรจน์ เบญจมาศ เขียวศิริลป	4	407-416
ความสัมพันธ์กรีนและความเป็นปกติของกึ่งกรุป การแปลงเต็มวงนัยทั่วไป (Green's Relations and Regularity of Generalized Full Transformation Semigroups)	รณสรณ์ ชินรัมย์	3	348-356
ความหลากหลายของคลาโดเซอร่าในนาข้าว จังหวัดสงขลา (The Cladocera in Rice Fields in Songkhla Province)	Supiyani Maiphae Phurichaya Janpriang	3	305-313
ความหลากหลายของโครโมโซมในปลาน้ำจืด ของประเทศไทย (Chromosomal Diversification of Freshwater Fishes in Thailand)	เกรียงไกร สีตะพันธุ์	1	1-12
ความหลากหลายของพืชวงศ์ทานตะวันในอุทยาน แห่งชาติน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์ (Diversity of Asteraceae in Nam Nao National Park, Phetchabun Province)	ศุสดี พรหมประสิทธิ์อมรรัตน์ ประจักษ์สูตรพิมพ์ดี พรพงศ์รุ่งเรือง	4	426-434

ชื่อเรื่อง	ผู้เขียน	ฉบับที่	หน้า
ความหลากหลายของพืชสกุลไทร (<i>Ficus</i> L.) ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	วัฒนา ต้นมิ่ง	1	112-120
คุณค่าทางโภชนาการของเห็ดกระด้าง <i>Lentinus polychrous</i> Lev. (Nutritive Value of Hed Kradang (<i>Lentinus polychrous</i> Lev.))	ประนอม จันทรโณทัย จันทรพร ทองเอกแก้ว	3	314-319
ตัวประมาณค่าอัตราส่วนแบบแยกของค่าเฉลี่ยประชากร ในการชักตัวอย่างอย่างง่ายแบบแบ่งเป็นชั้นภูมิ (Separate Ratio Estimator of The Population Mean in Stratified Random Sampling)	นิวัตร สุวรรณะ พัชร วงษ์เกษม คลินิกทร์ ธีรภาพโอพาร	4	495-505
นิติวิทยาศาสตร์กับกระบวนการยุติธรรม (Forensic Science and Justice Process)	อาคม เกสร	1	36-41
ไนเตรชันของไดเบนซอลอะซิโตน (Nitration of Dibenzalacetone)	กิตติมา อมรรักษา กิตติรัฐ รุจนพจน์	1	83-91
แบคทีริโอซิน: สารยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ ที่ผลิตโดยแบคทีเรีย (Bacteriocins: Antimicrobial Substances Produced by Bacteria)	พงศ์ศักดิ์ รัตนชัยกุลโสภณ	3	231-243
ประสิทธิภาพของสถิติทดสอบสำหรับแผน แบบแฟกทอเรียล กรณีที่มีตัวแปรร่วม (Efficiency of Statistical Test for Factorial Designs with Covariate)	ชวณี สุภรัตน บุญอ้อม โลมทิ	1	102-111
ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต จากจุลินทรีย์ (Factors Affecting the Production of Microbial Polyhydroxyalkanoate)	ปิยะรัตน์ บุญแสวง	3	256-267
ผลของการเสริมมันเส้นหมักยีสต์ทดแทนอาหารข้น ต่อนิวควิทยาในกระเพาะหมักและการเจริญเติบโต ในโคนมสาว (Effects of Supplementation of Yeast Fermented Cassava Chip as a Replacement Concentrate on Rumen Ecology and Growth in Heifer)	สิทธิศักดิ์ คำหา สมมาศ อีสุรัตน์ อุทัย โคตรดก กรุง วิลาชัย ภูมิสิทธิ์ วรรณขารี เมธา วรรณพัฒน์	3	333-341
ผลของเจลาตินและกรดซิตริกต่อคุณภาพทาง ประสาทสัมผัสของกัมมี่เคลือบรสตะไคร้ (Effect of Gelatin and Citric Acid on Sensory Quality of Lemongrass Flavored Gummy Jelly)	เฉลิมพล ถนอมวงศ์	3	325-332

ชื่อเรื่อง	ผู้เขียน	ฉบับที่	หน้า
ผลของน้ำมันหอมระเหยจากพืชต่อไรฝุ่น <i>Dermatophagoides pteronyssinus</i> (Trouessart) (Acaricidal Activity of Essential Oil of Medicinal Plants against House Dust Mite, <i>Dermatophagoides pteronyssinus</i> (Trouessart))	อำมร อินทร์สังข์ จรงค์ศักดิ์ พุ่มนวน	2	183-191
ผลของยาเตตราไซคลินต่อความเป็นพิษของตับ และการสร้างสเปิร์มในหนูเมาส์ (Effect of Tetracycline on Hepatotoxicity and Spermatogenesis in Mice (<i>Mus musculus</i> Linn.))	นวพรชัย ทวีบท อำพา เหลืองภิรมย์	1	56-64
ผลของสารประกอบเชิงซ้อนต่อลักษณะทางสัณฐาน และความต้านทานการกัดกร่อนของผิวเคลือบโลหะ ผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส (Effect of Complexing Agent on Morphology and Corrosion Resistance of Electroless Ni-P Coating)	สุเมธา สุวรรณบุรณ์	1	74-82
ผลของอุณหภูมิซินเตอร์ต่อสมบัติของเซรามิก $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})_{0.5}\text{TiO}_3$ (Effects of Sintering Temperature on Properties of $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})_{0.5}\text{TiO}_3$ Ceramics)	พรสุดา บ่มไต้	4	454-462
แผนภูมิควบคุมคุณภาพหลายตัวแปรด้วยข่ายงาน ระบบประสาทสำหรับการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (Multivariate Quality Control Charts by Neural Networks for Statistical Process Control)	จตุภัทร เมฆพ่ายัพ	4	386-397
พรีไบโอติก (Prebiotic)	สุดาทิพย์ จูตะโกคา	4	366-375
พิษแมงป่อง : น่ากลัว หรือ น่าใช้ (Scorpion Toxin : Dreadful or Applicable)	นันทวัน เอื้อวงศ์กุล ศักดิ์ดา ดาแดง	2	157-162
โพลาร์ออร์แกนิกเคมีคัลอินทิเกรทีฟแซมเพลอร์ สำหรับสารอินทรีย์ในตัวอย่างน้ำ (Polar Organic Chemical Integrative Sampler for Organic Compounds in Aqueous Samples)	จิตติมา รุจิราลัย	2	137-146
มัธยิมลอการิทึม (Logarithmic Mean)	จริยา สิงห์ดำ สมใจ จิตพิทักษ์	1	42-48

ชื่อเรื่อง	ผู้เขียน	ฉบับที่	หน้า
ขึ้น <i>matK</i> และ <i>trnH-psbA</i> intergenic spacer ในการนำมาใช้เป็น DNA barcode: การประเมินเบื้องต้นโดยการตรวจสอบความผันแปรภายใน <i>Alpinia galanga</i> (L.) Wild (<i>matK</i> Versus <i>trnH-psbA</i> Intergenic Spacer to be used as DNA Barcodes; Preliminary Evaluation by the Assessment of Intraspecific Sequence Variation in <i>Alpinia galanga</i> (L.) Wild	มัทนา จงกา ดวงกมล แม่นศิริ สุรพล แสนสุข	2	173-182
ระเบียบวิธีสมาชิกตามขอบ โดยใช้วิธีสมาชิกกำลังสองใน 2 มิติกับโปรแกรมแมทแล็บ (The Boundary Element Method using Quadratic Element for Two - Dimensional with MATLAB)	จักรี ภาชา	4	472-481
วิถีชีวสังเคราะห์พอลิไฮดรอกซีอัลคานอยด์ในแบคทีเรีย (Biosynthetic Pathway for Polyhydroxyalkanoate in bacteria)	ศิริรัตน์ ศิริพรวิศาล	3	244-255
ศัตรูธรรมชาติและสิ่งมีชีวิตที่อาศัยร่วมกับแมลงวันดำ (Natural Enemies and Symbionts of Black Flies)	เฉลียว กุวัจนะคิลก เสน่ห์ จิตต์กลาง	1	13-27
สมบัติไดอิเล็กทริกของข้าวเปลือกเหนียว (<i>Oryza sativa</i> Linn) (Dielectric Properties of Glutinous Rice Paddy (<i>Oryza sativa</i> Linn))	กาญจนา สิริกุลรัตน์ นรินทร์ สิริกุลรัตน์	2	192-201
อาหารธรรมชาติของปูนา <i>Esanthelphusa dugasti</i> Rathbun, 1902 ในฤดูฝน (Natural Diet of the Rice-Field Crab, <i>Esanthelphusa dugasti</i> Rathbun, 1902 in rainy season)	นพคุณ ภักดิ์ผดุงรังค์ ปิยะเนตร จันทร์ถิระติกุล อาณัติ จันทร์ถิระติกุล	1	49-55
Effect of Additive Substances and Planting Substrate on Growth Development of <i>Aerides houlletiana</i> Rchb. f. Seedling by Tissue Culture	Somporn Prasertsongskun Rosemina Awaesuemae	3	320-324
Fixed Point Theorems and Convergence for Mean Nonexpansive Mappings	Sukanya Somprom Satit Saejung	3	342-347
Isolation and Analysis of Antibacterial Substance Produced from <i>P.aeruginosa</i> TISTR 781	Kanda Saosoong Wirach Wongphathanakul Chanokporn Poasiri Chalerm Ruangviriyachai	2	163-172

ข้อแนะนำในการเขียนบทความลงวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ประเภทของเรื่องที่จะตีพิมพ์

1. รายงานผลการวิจัยและค้นคว้าหรือการสำรวจที่ยังไม่เคยตีพิมพ์ในวารสารหรือหนังสืออื่นมาก่อน
2. บทความปริทัศน์ ได้แก่ งานเขียนที่รวบรวมหรือเรียบเรียงจากเอกสารหรือหนังสือต่าง ๆ เพื่อเผยแพร่และฟื้นฟูงานด้านวิชาการระดับต่าง ๆ
3. บทความแสดงข้อคิดเห็นหรือข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในด้านวิชาการ เรื่องแปล ข่าววิชาการ ข้อความจากงานวิจัยหรือหนังสือใหม่ที่น่าสนใจ

รูปแบบของการเขียนและเตรียมต้นฉบับ

1. ต้นฉบับ ต้องเป็นตัวพิมพ์ Angsana New
 - 1.1 ชื่อเรื่อง ขนาดตัวอักษร 20 ตัวเข้ม ตำแหน่งตรงกลาง มีทั้งชื่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
 - 1.2 ชื่อผู้เขียน ขนาดตัวอักษร 16 เอน ตำแหน่งขวาสุด และใส่หมายเลขไว้ท้ายนามสกุล เพื่อการระบุที่อยู่ด้านล่าง
 - 1.3 หัวข้อใหญ่ในแต่ละส่วน ขนาดตัวอักษร 16 ตัวเข้ม ตำแหน่งซ้ายสุด ยกเว้น บทคัดย่อ และ Abstract อยู่ตรงกลาง หัวข้อย่อยตามความเหมาะสม
 - 1.4 เนื้อความ ขนาดตัวอักษร 14
 - 1.5 คำว่า รูปที่ x และตารางที่ x ขนาดตัวอักษร 14 ตัวเข้ม ส่วนข้อความบรรยายต่อท้ายตัวปกติ
 - 1.6 ที่อยู่ ขนาดอักษร 12
 - 1.7 ช่องว่างระหว่างบรรทัดตามมาตรฐาน
 - 1.8 พิมพ์ลงในกระดาษขาว A4 (โรเนียวสัน) โดยใช้กระดาษหน้าเดียว ความยาวไม่เกิน 10 หน้า ส่งต้นฉบับ 2 ชุด (ไม่ต้องส่งแผ่นดิสก์ หรือแผ่นซีดีในขั้นตอนนี้ เมื่อได้รับแจ้งว่าได้ลงพิมพ์แล้ว ผู้เขียนส่งฉบับแก้ไข 1 ชุด พร้อมแผ่นดิสก์ หรือแผ่นซีดี)
2. ต้นฉบับ จะถูกพิจารณาโดยกองบรรณาธิการ และจะตอบรับการได้รับบทความโดยไม่ส่งต้นฉบับคืน ผู้เขียนควรจะต้องสำเนาเก็บไว้เป็นหลักฐานของตัวเอง 1 ฉบับ
3. ต้นฉบับ จะต้องมีความถูกต้องทั้งในด้านเนื้อหา และการใช้ภาษา รวมทั้งมีความสมบูรณ์ในรูปแบบพร้อมที่จะนำลงตีพิมพ์ได้
 4. ชื่อเรื่อง ให้ใช้ภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ไม่ยาวเกินไป และหลีกเลี่ยงการใช้คำย่อโดยไม่จำเป็น
 5. ชื่อผู้เขียน เขียนชื่อภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษพร้อมทั้งบอกสถานที่ทำงานให้ชัดเจน
 6. เนื้อเรื่อง ใช้ได้ทั้งภาษาไทยล้วนและภาษาอังกฤษล้วน ถ้าใช้ภาษาไทย ภาษาอังกฤษที่ใช้ปนกับภาษาไทยนั้นให้พยายามแปลเป็นไทยเท่าที่จะทำได้ และให้เขียนคำเดิมกำกับในวงเล็บ การทับศัพท์ภาษาอังกฤษตลอดทั้งการเขียนตัวสะกด การันต์ ในภาษาไทยให้ใช้ตามแบบราชบัณฑิตยสถาน

ข้อแนะนำในการเขียนบทความลงวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

7. ในกรณีของบทความวิจัย ต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ และแบ่งเนื้อหาของบทความเป็นบทนำ วิธีดำเนินงาน ผลการวิเคราะห์ บทสรุปและวิจารณ์

8. เฉียงอรรถ (footnote) ใช้เฉพาะที่จำเป็นเพื่อขยายหรือให้รายละเอียดเพิ่มเติมแก่ใจความเฉพาะตอนในบทความ

9. ตารางและภาพประกอบ คำบรรยายประกอบตารางหรือภาพประกอบควรจะสั้นและชัดเจน ถ้าเป็นภาพถ่ายให้ใช้ภาพขาว-ดำ ขนาดโปสเตอร์ ภาพเขียนลายเส้นควรเขียนด้วยหมึกดำ ภาพที่เขียนต้องชัดเจนและมีขนาดที่เหมาะสม

10. เอกสารอ้างอิง หรือบรรณานุกรม แนะนำให้เขียนตามแบบที่ทางวารสารกำหนด

11. หากไม่ปฏิบัติตามข้อแนะนำในการเขียนบทความ บทความของท่านอาจไม่ได้รับการตีพิมพ์หรือตีพิมพ์ล่าช้า

ส่งต้นฉบับมาที่

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

E-mail: kku_scijournal@kku.ac.th

อนินันทนาการสำหรับผู้เขียน

เรื่องที่ได้รับการตีพิมพ์ ผู้เขียนจะได้รับวารสารฉบับนั้น 1 เล่ม

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ตัวอย่าง

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันและกรดไขมันของจิ้งหรีดทองลาย (*Gryllus* sp.) ที่เลี้ยงเพื่อการค้า

บรรจง เชื้อเมืองพาน¹ วิรัช ว่องพัฒน์กุล² และ ปวีณา พงษ์คนตรี^{1*}

บทคัดย่อ

XX
XX

บทนำ

XX
XX
XX

วิธีการ

XX
XX
XX

รูปที่ 1 XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

ตารางที่ 1 XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

¹ ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

² ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

* Corresponding Author, E-mail:

การเขียนเอกสารอ้างอิงในวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

เอกสารอ้างอิง (Reference) หมายถึง เอกสารหรือส่วนหนึ่งของเอกสารที่อ้างอิงถึงหรือแปลมาโดยตรง การเขียนเอกสารอ้างอิงในเนื้อหานี้ ให้ใช้ระบบชื่อและปี เช่น Williams (2001) รายงานว่า... หรือ... (Williams, 2001) การเขียนเอกสารอ้างอิงในตอนท้ายบทความนั้น ให้ใส่เฉพาะเล่มที่มีการอ้างอิงไว้แล้ว ในเนื้อหาเท่านั้น หากอ้างอิงจากเล่มภาษาไทย ต้องเขียนทั้งชื่อและนามสกุล

บรรณานุกรม (Bibliography) หมายถึง เอกสารที่ใช้อ้างอิงในลักษณะที่สรุปเป็นหลักการหรือทฤษฎีโดยมิได้อ้างอิงหรือแปลมาโดยตรง

การเขียนเอกสารอ้างอิง หรือบรรณานุกรม มีแนวทางการเขียนดังนี้

1. หนังสือ

ก. ภาษาไทย

ชื่อตัว นามสกุลของผู้แต่ง. (เลขปี พ.ศ.) ชื่อหนังสือ. (เล่มที่). (พิมพ์ครั้งที่). เมืองที่พิมพ์: โรงพิมพ์ หรือสำนักพิมพ์. เลขหน้าเริ่มต้น-เลขหน้าสุดท้ายที่อ้างอิง.

ข. ภาษาอังกฤษ

ชื่อสกุล, อักษรย่อชื่อต้น, อักษรย่อชื่อรอง. (เลขปี ค.ศ.). ชื่อหนังสือ. (เล่มที่). (พิมพ์ครั้งที่). เมืองที่พิมพ์: โรงพิมพ์หรือสำนักพิมพ์. เลขหน้าเริ่มต้น-เลขหน้าสุดท้ายที่อ้างอิง.

2. เอกสารราชการ

ชื่อหน่วยราชการ. (เลขปี พ.ศ. หรือ ค.ศ.). ชื่อเรื่อง. ชื่อหนังสือ. เมืองที่พิมพ์: โรงพิมพ์ หรือสำนักพิมพ์.

3. วารสาร

ก. ภาษาไทย

ชื่อตัว นามสกุลของผู้แต่ง. (เลขปี พ.ศ.). ชื่อบทความ. ชื่อวารสาร. เล่มที่ (ฉบับที่): เลขหน้าเริ่มต้น-เลขหน้าสุดท้าย.

ข. ภาษาอังกฤษ

ชื่อสกุล, อักษรย่อชื่อต้น, อักษรย่อชื่อรอง. (เลขปี ค.ศ.). ชื่อบทความ. ชื่อวารสาร. เล่มที่ (ฉบับที่): เลขหน้าเริ่มต้น-เลขหน้าสุดท้าย.

หมายเหตุ

- กรณีที่เป็นเอกสารอ้างอิงจากแหล่งอื่น ๆ นอกเหนือจากที่กำหนดข้างต้น เช่น จุลสาร หนังสือพิมพ์ ฯลฯ ให้ยึดหลักการเขียนตามแบบข้างต้นโดยอนุโลม
- กรณีที่มีผู้เขียน 2 คน ให้เขียนตามแบบของผู้เขียนคนแรก แต่ให้เติมคำว่า “และ” หรือ “and” หน้าชื่อสุดท้ายในกรณีของภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษตามลำดับ
- กรณีที่มีผู้เขียนมากกว่า 2 คนขึ้นไป ให้ใส่เฉพาะผู้แต่งชื่อแรกและใส่คำว่า “และคณะ” หรือ “et al.” ในกรณีของภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษตามลำดับ (เฉพาะในเนื้อหาเท่านั้น)
- ถ้าเอกสารที่ถูกอ้างอิงอยู่ในระหว่างตีพิมพ์ ให้บอกรายละเอียดมากที่สุดและใช้คำว่า “ระหว่างตีพิมพ์” หรือ “in press” ในกรณีของภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษตามลำดับ โดยวงเล็บต่อท้ายเอกสารอ้างอิงนั้น



หนังสือในโครงการผลิตตำรา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



สถิติพื้นฐาน

พร้อมตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม

MINITAB SPSS และ SAS

รองศาสตราจารย์ ชัชวาลย์ เรืองประพันธ์

พิมพ์ครั้งที่ 5 2543 • 510 หน้า

ISBN 974-675-666-4

ราคา 180 บาท



สมการเชิงอนุพันธ์สามัญ

Ordinary Differential Equations

รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ ไวกัยงกูร

2550 • 470 หน้า

ISBN 978-974-7707-55-7

ราคา 240 บาท



การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม

SPSS for Windows

รองศาสตราจารย์ ชัชวาลย์ เรืองประพันธ์

2544 • 620 หน้า

ISBN 974-654-608-2

ราคา 300 บาท



เคมีเฮเทอโรไซคลิกแอโรแมติก

Aromatic Heterocyclic Chemistry

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ หาญวงวงศ์

2550 • 122 หน้า

ISBN 978-974-7707-71-7

ราคา 90 บาท



การวิเคราะห์พันธุศาสตร์โมเลกุล

รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ ไวกัยงกูร

2547 • 344 หน้า

ISBN 974-367-958-8

ราคา 200 บาท



หลักการของพันธุวิศวกรรมในโพรแคริโอต

Principles of Genetic Engineering in Prokaryotes

รองศาสตราจารย์ ดร.นิรันดร์ สัตยาคัย

2551 • 164 หน้า

ISBN 978-974-10-2673-9

ราคา 120 บาท



แมงป่องข้าง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ ดาดวง

นางสาวนันท์วัน เอื้อวงศ์กุล

2547 • 64 หน้า

ISBN 974-435-571-9

ราคา 160 บาท



พอลิเมอร์ และชีวโมเลกุล ในสารประกอบอินทรีย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พัฒนา ชีวพรชัยสิทธิ์

ISBN 978-616-7183-57-2

2553 • 112 หน้า

ราคา 80 บาท



สเปกโทรสโกปี ในการพิสูจน์ โครงสร้างของสารอินทรีย์

รองศาสตราจารย์ ดร.สมเดช กนกเมฆากุล

2547 • 238 หน้า

ISBN 974-435-348-1

ราคา 150 บาท

ท่านที่สนใจหนังสือในโครงการผลิตตำรา ติดต่อสั่งซื้อได้ที่... รองศาสตราจารย์ ชัชวาลย์ เรืองประพันธ์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002 โทรศัพท์/โทรสาร 0 4320-2375 E-mail: chatchav@kku.ac.th

