



ลักษณะการเกิดยอดของข้าวพันธุ G.S. No. 00621 บนอาหาร MS ที่เติมไคนิตินความเข้มข้นต่างกัน



พันดา (*Cleistanthus denudatus*);



KKU SCIENCE JOURNAL



วารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ปีที่ 39 ฉบับที่ 4 (ค.ศ. - พ.ศ. 54) Vol. 39 No. 4 (Oct. - Dec. 2011)

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
(ผศ.ดร.เกียรติ แสงอรุณ)

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

(รักษาการแทน) บรรณาธิการ

รศ.ดร.ศักดิ์ คาคว

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

กองบรรณาธิการ

ศ.ดร.ม.ร.ว.ชัยยุทธ สวัสดิ์วัฒน์	มหาวิทยาลัยมหิดล
ศ.ดร.สุพจน์ หารหนองบัว	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.ดร.ชัชชนก เหลือสินทรัพย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศ.ดร.อารันต์ พัฒโนทัย	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ชุติมา หาญฉาย	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.สาสตรา วงศ์ธนสุ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ศุภลักษณ์ ศรีจารนัย	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.สมเดช กนกเมธากุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.สุจิตรา ยังมี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.กิตติ เอกอำพน	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.สุพรรณิ อึ้งปัญสดวงค์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.อานวย มณีศรีวงศ์กุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.กิตติกร นาคประสิทธิ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.งามนิช อาจอินทร์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.วิไลลักษณ์ ศิริพรอดุลศิลป์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.ศรีประจักษ์ ครองสุข	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.อจลราภรณ์ ภักดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ดร.กัลยา กองเงิน	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ดร.เกียรติสุดา นาคประสิทธิ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ดร.นงลักษณ์ มีทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ดร.พรพิมล เกษระนัยปรีเปรม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ดร.พลสันห์ มหาพันธ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ดร.วินา ภักธมานนท์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ดร.วิจารณ์ สุดศิริ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ฝ่ายศิลป์และภาพ

นายกเลน ดิณนรเศรษฐ์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ฝ่ายจัดการและเลขานุการ

นางสาวสุภาพร พิมพ์วารี
นางสาวพิกุล ราชพลแสน
นางสาวจิราภรณ์ พิมพ์ภูมิ
นางสาวจรูญลักษณ์ สุพร
นายศักดิ์สิทธิ์ สุวรรณ

มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**“ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงาน
คณะกรรมการการอุดมศึกษา”**

บทความหรือข้อคิดเห็นใด ๆ ในวารสารนี้เป็นของผู้เขียน ไม่จำเป็นต้องสอดคล้องกับทัศนะของกองบรรณาธิการ



KKU SCIENCE JOURNAL

วารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ปีที่ 38 ฉบับที่ 4 (ต.ค. - ธ.ค. 54) Vol. 38 No. 4 (Oct. - Dec. 2011)

ISSN 0125 - 2364

บรรณาธิการแสดง

บทความ

- ❑ แลคติกแอซิดแบคทีเรีย : หัวเชื้อและการ
ถูกทำลายโดยแบคทีเรียโอเฟจ
Lactic Acid Bacteria : Starter Culture
and Bacteriophage Infection
ปาริชาติ พุ่มขจร
พงศ์ศักดิ์ รัตนชัยกุลโสภณ..... 525
- ❑ กลไกการควบคุมน้ำและไอออนในปลาน้ำจืด
และน้ำเค็ม
Osmoregulation and Ionoregulation of
Freshwater and Seawater Fishes
ละเอียด นาคกระแสน์..... 540
- ❑ บทบาทของรีซิสตินกับโรคอ้วนและโรคเบาหวาน
Association of Resistin Role's with Obesity
and Diabetes Mellitus
จิตรารัตน์ สมดี..... 550
- ❑ การตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงด้วยวิธีการทางเคมี
และแสง
The Detection of Latent Fingerprints by
Chemical and Optical Methods
อารีย์ ชูดำ
วรวิทย์ วงศ์นิรมัยกุล..... 559



KKU SCIENCE JOURNAL

วารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ปีที่ 39 ฉบับที่ 4 (ต.ค. - ธ.ค. 54) Vol. 39 No. 4 (Oct. - Dec, 2011)

ISSN 0125 - 2364

บทความ

- นาโนเทคโนโลยี กับ ไบโอเซนเซอร์
Nanotechnology and Biosensor
ศิริวรรณ ตัญญา.....

□ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้
พอลิเอนิลีนเป็นขั้วเคาน์เตอร์
Dye-Sensitized Solar Cell based on
Polyaniline Films as Counter Electrode
สมศักดิ์ พิมานแพง.....

□ แบตเตอรี่ชนิดใหม่เพื่ออนาคต: แบตเตอรี่ชนิด
โซเดียมไอออน
New Rechargeable Battery for The Future:
Sodium-Ion Batteries
นงลักษณ์ มีทอง.....

□ วัสดุกักเก็บไฮโดรเจน
Hydrogen Storage Materials
พรจักร ศรีพิชราวุธ.....

□ การขยายพันธุ์ข้าวเหนียวดำในหลอดทดลอง
In Vitro Regeneration of Purple Glutinous Rice
(Oryza sativa L.)
อรรพรรณ พิมพ์จันทร์
หนูเดือน เมืองแสน.....

575

587

598

608

621

KKU SCIENCE JOURNAL



วารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ปีที่ 39 ฉบับที่ 4 (ต.ค. - ธ.ค. 64) Vol. 39 No. 4 (Oct. - Dec. 2011)

ISSN 0125 - 2364

งานวิจัย

- ❑ ผลของภาชนะบรรจุและการเก็บรักษาต่อคุณค่าทางโภชนาการของน้ำเมาผสมน้ำสับปะรด
Effects of Package and Storage on Nutritive Values of Mao and Pineapple Juices

พรประภา ชุนถนอม

สุกัญญา สายธิ.....

631

- ❑ พรรณไม้อันดับ Malpighiales ในป่านายูง-น้ำโสม อุทยานแห่งชาตินายูง-น้ำโสม จังหวัดอุดรธานี
Malpighiales in Na Yung-Nam Som Forest, Na Yung-Nam Som National Park, Udon Thani Province

ศรชัย พุทธชัย

พิมพ์ดี พรพงศ์รุ่งเรือง

อมรรัตน์ มีสวัสดิ์.....

640

- ❑ Application of Mike 11 for Water Quality Assessment at U-Tapao Canal, Southern of Thailand

Piyakarn Teartisup

Prapeut kerdsub.....

649



KKU SCIENCE JOURNAL

วารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ปีที่ 39 ฉบับที่ 4 (ท.ค. - ธ.ค. 54) Vol. 39 No. 4 (Oct. - Dec. 2011)

ISSN 0125 - 2364

งานวิจัย

- ❑ การสังเคราะห์ สมบัติเชิงความร้อน และสัณฐานวิทยา
ของพอลิ (เอปไซลอน-คาโพรแลคโตน)
พอลิ (แอล-แลคติกแอซิด) และพอลิเมอร์ผสม
Synthesis, Thermal Properties and Morphology
of Poly(ϵ -caprolactone) Poly(L-lactic acid)
and Blends
ชนกานต์ ป่าณะวงศ์
ปวีณา หารไสว.....

664
- ❑ ระบบสร้างชุดข้อสอบโดยใช้การค้นหาแบบตาบ
Examination Paper Generation System Using
Tabu search
พยอม เหล่าชุมพล
พฤษดี ศิริแสงตระกูล.....

675
- ❑ Equitable Defective Colorings of Some Classes
of Graphs
Sukanda Cummuang
Keaitsuda Nakprasit.....

688
- ❑ The Number of General Triangles with
Longest Side Less Than or Equal to n
Niroot Meekoed.....

696



KKU SCIENCE JOURNAL

วารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ปีที่ 39 ฉบับที่ 4 (ต.ค. - ธ.ค. 54) Vol. 39 No. 4 (Oct. - Dec. 2011)

ISSN 0125 - 2364

งานวิจัย

- ☐ Simple Proofs for Determining All
Nonisomorphic Bands of Order 3 and
Nonisomorphic Bands of Order 4 Which
Have an Identity Element

Somchit Chotchaisthit.....

701

มหาวิทยาลัยขอนแก่น



KKU SCIENCE JOURNAL

วารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ปีที่ 39 ฉบับที่ 4 (ก.ค. - ส.ค. 64) Vol. 39 No. 4 (Oct. - Dec. 2011)

ISSN 0125 - 2364

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

Advisory Committee

Dean, Faculty of Science, Khon Kaen University
(Assist. Prof. Dr. Kiat Sangaroon)

Act for Editor

Assoc. Prof. Dr. Sakda Daduang Khon Kaen University

Editorial Board

Prof. Dr. M.R. Jisnusun Svasti	Mahidol University
Prof. Dr. Supot Hannongbua	Chulalongkorn University
Prof. Dr. Chidchanok Lursinsap	Chulalongkorn University
Prof. Dr. Sukit Limpijumnong	Suranaree University of Technology
Prof. Dr. Arun Puttanonthai	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Chutima Hanjavanit	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Sartra Wongthanavasu	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Supalax Srijaranai	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Somdej Kanokmedhakul	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Sujitra Youngme	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Kitti Akamphon	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Supunnee Ungpansattawong	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Amnuay Maneesriwongkul	Khon Kaen University
Assist. Prof. Dr. Kittikorn Nakprasit	Khon Kaen University
Assist. Prof. Dr. Ngamnit Art-In	Khon Kaen University
Assist. Prof. Dr. Wilailak Siripomadulsil	Khon Kaen University
Assist. Prof. Dr. Sripajak Kongsuk	Khon Kaen University
Assist. Prof. Dr. Adcharaporn Pagdee	Khon Kaen University
Dr. Kanlaya Kong-ngern	Khon Kaen University
Dr. Keaitsuda Nakprasit	Khon Kaen University
Dr. Nonglak Meethong	Khon Kaen University
Dr. Pornpimol Jieranaipreeprem	Khon Kaen University
Dr. Polson Mahakhan	Khon Kaen University
Dr. Rina Pattaramanon	Khon Kaen University
Dr. Wijarn Sodsiri	Khon Kaen University

Artists

Mr.Kilen Timnoraset Khon Kaen University

Managing Staff and Secretary

Miss Suphaporn Phimwapi	Khon Kaen University
Miss Phikun Ratphonsan	Khon Kaen University
Miss Jiraporn Pimphumee	Khon Kaen University
Miss Jaroonluk Suporn	Khon Kaen University
Mr.Saksit Suwan	Khon Kaen University

**“ 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.

บรรณารักษาร **แฉก**

เรียน ท่านผู้อ่านที่เคารพรักทุกท่าน

ฉบับนี้ออกจะล่าช้าไปสักนิด แต่ก็เต็มเปี่ยมไปด้วยเนื้อหาสาระครบถ้วนในแทบทุกสาขา ตัวผมเองก็ดำรงตำแหน่งรักษารบรรณารักษารมาจนครบ 1 ขวบปีแล้ว ก็ได้เห็นพัฒนาการของงานวิจัย และบทความที่นำมาลงตีพิมพ์ในวารสารของเรา มีความก้าวหน้าไปชนิดที่เรียกว่าก้าวกระโดด วารสารของเราได้รับการยอมรับทั้งจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ให้เป็นวารสาร ทางวิชาการที่นักศึกษานำมาลงตีพิมพ์แล้วสามารถสำเร็จการศึกษาได้ และเป็นที่ยอมรับของ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ให้วารสารของเราฉบับนี้ ได้เป็นหนึ่งในฐานข้อมูลของ ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thailand citation index หรือ TCI) ทำให้มันดูดี สง่าขำยิ่ง เราอย่างล้นหลาม ชนิดที่ทีมงานรับงานไม่ไหวอดไม่ไหวเลยทีเดียว

อย่างไรก็ตาม ทั้งนี้ทั้งนั้น ความก้าวหน้าดังกล่าว ก็เนื่องด้วยความกรุณาของท่าน ด้วย บทความที่เปี่ยมล้นไปด้วยคุณภาพของเจ้าของงานวิจัยและบทความของทุกท่าน และด้วยความ กรุณาของผู้ประเมิน ที่เรียกได้ว่า ประเมินกันเข้มข้น ล้วนช่วยให้วารสารของเราได้รับการยอมรับ ดังกล่าว ซึ่งในฉบับท้ายปีเล่มนี้ ก็ต้องขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องด้วยความเคารพอย่างสูง ขอขอบคุณครับ และพบกันใหม่ฉบับหน้า ฉบับที่ 40 ปี พ.ศ. 2555

รศ.ดร.ศักดิ์ ดาดวง

รองคณบดีฝ่ายวิจัยและวิเทศสัมพันธ์
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รักษารบรรณารักษาร

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข. ขอกราบขอบพระคุณท่านผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้เกียรติพิจารณาบทความวิจัยและบทความปริทัศน์ เพื่อลงวารสาร ฉบับปีที่ 39 (ปี พ.ศ. 2554) ดังรายนามต่อไปนี้ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับความกรุณาจากท่านตลอดไป

ศ.ดร. ชิดชนก เหลือสินทรัพย์
 รศ.ดร. จิตติ หนูแก้ว
 รศ.ดร. ชุตินพัส อรรถแสง
 รศ.ดร. ชุตินา หาญจวนิช
 รศ.ดร. ชุตินันท์ จรัสกุลชัย
 รศ.ดร. ณสรณ์ ผลิต
 รศ.ดร. นิวุฒิ หวังชัย
 รศ.ดร. บวรศักดิ์ ลีนานนท์
 รศ.ดร. ปิยะดา ธีรกุลพิสุทธ
 รศ.ดร. ปิยะพงศ์ เนียมทรัพย์
 รศ.ดร. เล็ก สีคง
 รศ.ดร. วราภรณ์ ตันรัตนกุล
 รศ.ดร. วินิช พรหมอารักษ์
 รศ.ดร. วิภา สุจินต์
 รศ.ดร. วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา
 รศ.ดร. ศุภจิตรา ชัชวาล
 รศ.ดร. ศุภยงค์ วรวิมลชัย
 รศ.ดร. สมเดช กนกเมธากุล
 รศ.ดร. สมพงษ์ คูชัยจินดาชบาพร
 รศ.ดร. สรศักดิ์ ลีรัตนาวลี
 รศ.ดร. สะอาด นิวิศพงษ์
 รศ.ดร. สายพิน ไซชนันท์
 รศ.ดร. สุคนธ์ชน ศรีงาม
 รศ.ดร. สุบันจิต นิมรัตน์
 รศ.ดร. สุวิษ วรรณไกรโรจน์
 รศ.ดร. อลิศรา เรืองแสง
 รศ.ดร. อุทัย ลีรัตน์
 รศ. ประวิตร พุทธานนท์
 รศ. พชรินทร์ เหมโชติ
 รศ. สุพรรณิ อังปัญญตังค์
 รศ.พญ. ขวัญชนก ยิ้มแต่
 ศศ.ดร. กรรณิการ์ สหกะโร
 ศศ.ดร. จุฑามาส จิตต์เจริญ
 ศศ.ดร. ชูติ ขมภักดี
 ศศ.ดร. เทวัญ เริ่มสูงเนิน
 ศศ.ดร. ธนาทิพย์ แผลมคม

ศศ.ดร. ธีระชัย บงการณ
 ศศ.ดร. นันทกานต์ วงศ์เกษม
 ศศ.ดร. นิตานาถ ไตรผล
 ศศ.ดร. บังอร แฉวโนนจิว
 ศศ.ดร. บุกรินทร์ เหมะปะบุตร
 ศศ.ดร. ประสาร สวัสดิ์ชิตัง
 ศศ.ดร. ปวีณา น้อยทัพ
 ศศ.ดร. เผ่าไทย วงศ์เหลา
 ศศ.ดร. มารินา เกตุทัต คาร์นส์
 ศศ.ดร. ยอดธง ไบมาก
 ศศ.ดร. รัชฎา ตั้งวงศ์ไชย
 ศศ.ดร. วราภรณ์ แสงทอง
 ศศ.ดร. วิทยา เงินแท้
 ศศ.ดร. วิสาตรี กงเจริญสุนทร
 ศศ.ดร. ศิววรรณ พูลพันธุ์
 ศศ.ดร. เสรมฐวัชร น้าศาสตร์
 ศศ.ดร. สมทรง ณ นคร
 ศศ.ดร. สภาวิตร ตระกูลนำเลื่อมใส
 ศศ.ดร. สุกานดา เกียรติศรีสมบุรณ์
 ศศ.ดร. สุพร นุชดำรงค์
 ศศ.ดร. สุวรรณิ จรรยาพูน
 ศศ.ดร. สุวดี โลวีกรณ
 ศศ.ดร. เสาวนิต ทองพิมพ์
 ศศ.ดร. อนุเทพ ภาสุระ
 ศศ.ดร. อนุพันธ์ กงบังเกิด
 ศศ.ดร. อภิรัตน์ เล่าห์บุตร
 ศศ.ดร. อัมพร ทองภูเกียรติกุล
 ศศ.ดร. เอกวัล ลือพร้อมชัย
 ศศ. ธิติ เขียวชาญวิทย์
 ศศ. ธีระพงษ์ สว่างปัญญางกูร
 ศศ. นนทกร สอดิตานนท์
 ศศ. พนมกร ขวาชอง
 ศศ. พวงชมพู พงษ์ชัย
 ศศ. มารศรี แนวจำปา
 ศศ. ศิริมา ธีรสุกุลชล
 ศศ. สุดสายชล หอมทอง

ศศ. สุนทรี ขุนทอง
 ร้อยโทหญิง ดร. สายศิริ มีระเสน
 ดร. กนกพร ช่างทอง
 ดร. เกียรติสุดา นาคประสิทธิ์
 ดร. ชาญวิทย์ จิตยุทธการ
 ดร. ทิพย์สุดา ตั้งตระกูล
 ดร. ธนัช กนกเทศ
 ดร. นงลักษณ์ มีทอง
 ดร. บัญชา ทองมี
 ดร. เปื้อง สุวรรณเมธี
 ดร. พลสัมพันธ์ มหาจันทร์
 ดร. มรกต พุทธกาล
 ดร. ลักณา วัฒนะชีวะกุล
 ดร. วภากร ศิริวงศ์
 ดร. วิเชียร ยงมานิตชัย
 ดร. ศศิธร หล่อเรืองศิลป์
 ดร. ศิริสาส เอื้อใจ
 ดร. สมักร พิมานแพง
 ดร. สราวุธ เฉชะปัญญา
 ดร. สิริพัชร สุธีรภัทรานนท์
 ดร. เสกสรร สุขะเสนา
 ดร. อนุศิษฎ์ ทองนำ
 ดร. อภิญา นวคุณ
 ดร. เอนก เจริญภักดี
 ดร. รัตนภรณ์ สีสิงห์
 ดร. จุฑามาส นิลวัฒน์
 ดร. วิวัฒน์ บัณฑิตย์
 อ. กนิษฐา เอื้องสวัสดิ์
 อ. จารุณี มณีโต
 อ. ไซยพงษ์ เรืองสุวรรณ
 อ. บุรินทร์ ช่างน้อย
 อ. ประชิด กงรัตน์
 อ. วีระศักดิ์ ปรีกษา
 อ. สราวุธ พงษ์ลีรัตน์

บรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข.



แลคติกแอซิดแบคทีเรีย : หัวเชื้อและการถูกทำลาย

โดยแบคทีเรียโอเฟจ

Lactic Acid Bacteria : Starter Culture and Bacteriophage Infection

ปาริชาติ พุ่มขจร¹ และ พงศ์ศักดิ์ รัตนชัยกุลโสภณ^{1*}

บทนำ

แลคติกแอซิดแบคทีเรียและอาหารหมัก

แลคติกแอซิดแบคทีเรีย (lactic acid bacteria; LAB) เป็นแบคทีเรียที่จัดอยู่ใน family Lactobacillaceae ติดสีแกรมบวก (Gram-positive) ไม่สร้างเอนโดสปอร์ (non-endospore forming) ไม่สร้างเอนไซม์คะตะเลส (catalase) เจริญได้ดีในที่ที่มีออกซิเจนเพียงเล็กน้อย (microaerophile) สามารถหมัก (ferment) น้ำตาลแล้วให้ผลผลิตหลักคือ กรดแลคติก มีรูปร่างทั้งแบบกลม (ได้แก่ *Aerococcus*, *Alloiococcus*, *Enterococcus*, *Lactococcus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus*, *Streptococcus*, *Tetragenococcus*, *Vagococcus*) และแบบแท่ง (ได้แก่ *Lactobacillus*, *Carnobacterium*, *Bifidobacterium*) (De Vuyst and Vandamme, 1993)

แลคติกแอซิดแบคทีเรียสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยอาศัยผลผลิตสุดท้ายที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการหมักน้ำตาลกลูโคส (รูปที่ 1) คือ (1) homofermentative lactic acid bacteria หมายถึง แลคติกแอซิดแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติกเป็น

ผลผลิตหลัก (ประมาณร้อยละ 85-90) และ (2) heterofermentative lactic acid bacteria หมายถึง แลคติกแอซิดแบคทีเรียที่นอกจากผลิตกรดแลคติก (ประมาณร้อยละ 50) แล้วยังผลิตสารอื่น ๆ ด้วย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ และเอทานอล เป็นต้น (De Vuyst and Vandamme, 1993; Axelsson, 1998)

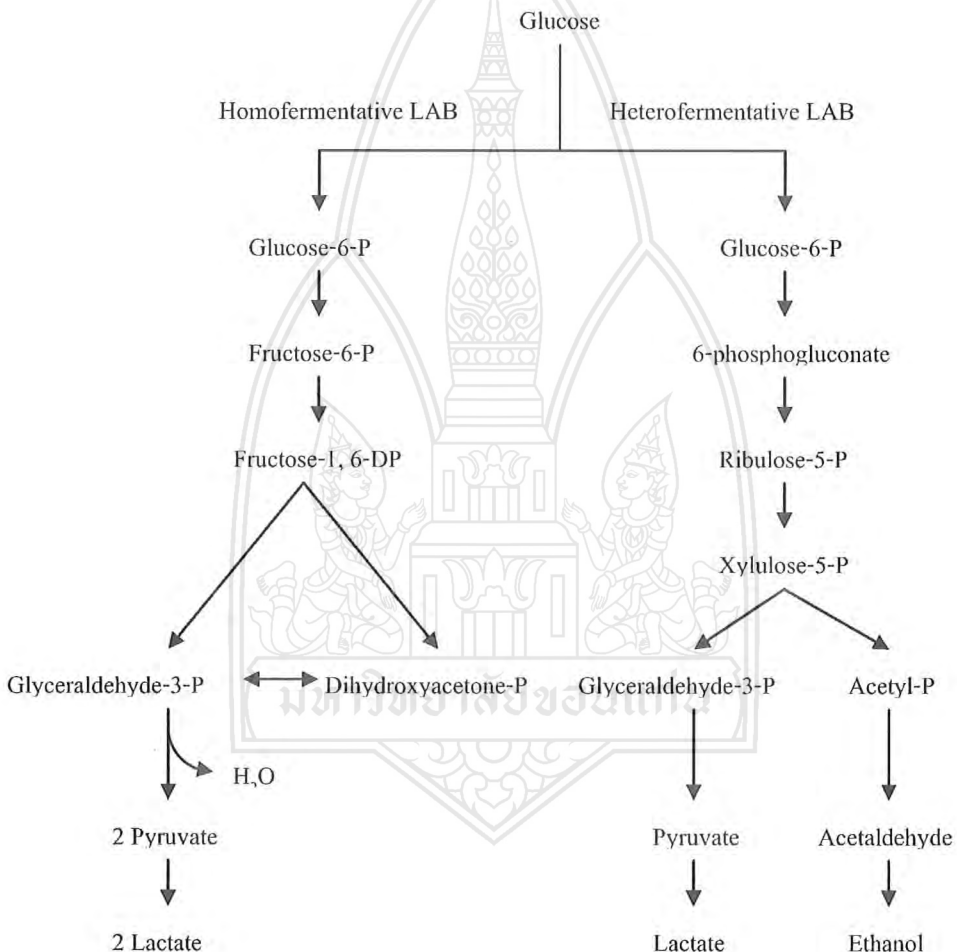
ในอดีตการผลิตอาหารหมัก (fermented food) มักเกิดจากการสังเกตและความบังเอิญโดยอาศัย แลคติกแอซิดแบคทีเรียที่มีอยู่ตามธรรมชาติในอาหาร เป็นตัวการทำให้เกิดกระบวนการหมัก และมักเป็นเพียงอุตสาหกรรมในครัวเรือน กระบวนการหมักอาหารแบบนี้จึงเรียกว่า spontaneous fermentation หรือ natural fermentation ซึ่งเป็นกระบวนการหมักอาหารที่ผู้ผลิตไม่สามารถควบคุมคุณภาพของอาหารหมักได้ ต่อมาความรู้และเทคโนโลยีทางการหมักได้มีการพัฒนา ทำให้อาหารหมักและอาหารแปรรูปกลายเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่และมีหลากหลายชนิด จนบางครั้งผู้บริโภคแทบจะไม่วัดว่าอาหารที่บริโภคอยู่นั้นเป็นผลิตภัณฑ์ได้จากกระบวนการหมัก

¹ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

* Corresponding Author, E-mail: scpongna@ubu.ac.th

อุตสาหกรรมการผลิตอาหารหมักในปัจจุบันมีการใช้แลคติกแอซิดแบคทีเรียเป็นเชื้อเริ่มต้นหรือหัวเชื้อ (starter culture) ในการหมักอาหารหลายชนิด (ตารางที่ 1) และเรียกการหมักแบบนี้ว่า starter fermentation สารต่าง ๆ ที่สร้างโดยแลคติกแอซิดแบคทีเรีย ได้แก่ กรดอินทรีย์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แบคเทอริโอซิน (bacteriocin) และไดอะซิติก (diacetyl) เป็นต้น ล้วนมี

ส่วนช่วยในการปรุงแต่งกลิ่น สี เนื้อสัมผัส และรสชาติของอาหารให้ดียิ่งขึ้น อีกทั้งยังช่วยยับยั้งหรือทำลายจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย (food-spoilage microorganisms) และจุลินทรีย์ก่อโรค (pathogenic microorganisms) หลายชนิด (Caplice and Fitzgerald, 1999)



รูปที่ 1 การหมักน้ำตาลกลูโคสของแลคติกแอซิดแบคทีเรียชนิด homofermentative lactic acid bacteria และ heterofermentative lactic acid bacteria (ที่มา : Caplice and Fitzgerald, 1999)

ตารางที่ 1 ตัวอย่างอาหารหมักและหัวเชื้อแลคติกแอซิดแบคทีเรีย (ที่มา: Leroy and De Vuyst, 2004)

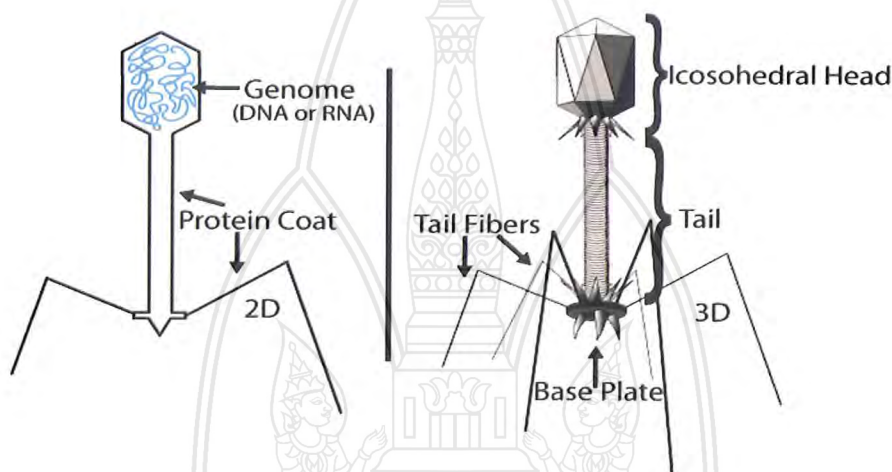
อาหารหมัก	หัวเชื้อแลคติกแอซิดแบคทีเรีย
ผักดอง	
- Sauerkraut	<i>Leuc. mesenteroides</i> , <i>Lb. plantarum</i> , <i>P. acidilactici</i>
- Pickles	<i>Leuc. mesenteroides</i> , <i>P. cerevisiae</i> , <i>Lb. brevis</i> , <i>Lb. plantarum</i>
- Fermented olives	<i>Leuc. mesenteroides</i> , <i>Lb. pentosus</i> , <i>Lb. plantarum</i>
- Fermented vegetables	<i>P. acidilactici</i> , <i>P. pentosaceus</i> , <i>Lb. plantarum</i> , <i>Lb. fermentum</i>
เนื้อสัตว์หมัก	
- Fermented sausage (Europe)	<i>Lb. sake</i> , <i>Lb. curvatus</i>
- Fermented sausage (USA)	<i>P. acidilactici</i> , <i>P. pentosaceus</i>
ปลาหมัก	<i>Lb. alimentarius</i> , <i>C. piscicola</i>
เครื่องดื่มหมัก	
- Wine (malolactic fermentation)	<i>O. oeni</i>
- Rice wine	<i>Lb. sake</i>
นมและผลิตภัณฑ์จากนม	
- Hard cheeses without eyes	<i>L. lactis</i> subsp. <i>lactis</i> , <i>L. lactis</i> subsp. <i>cremoris</i>
- Cheeses with small eyes	<i>L. lactis</i> subsp. <i>lactis</i> , <i>L. lactis</i> subsp. <i>lactis</i> var. <i>diacetylactis</i> , <i>L. lactis</i> subsp. <i>cremoris</i> , <i>Leuc. mesenteroides</i> subsp. <i>cremoris</i>
- Swiss-and Italian-type cheeses	<i>Lb. delbrueckii</i> subsp. <i>lactis</i> , <i>Lb. helveticus</i> , <i>Lb. casei</i> , <i>Lb. delbrueckii</i> subsp. <i>bulgaricus</i> , <i>S. thermophilus</i>
- Butter and buttermilk	<i>L. lactis</i> subsp. <i>lactis</i> , <i>L. lactis</i> subsp. <i>lactis</i> var. <i>diacetylactis</i> , <i>L. lactis</i> subsp. <i>cremoris</i> , <i>Leuc. mesenteroides</i> subsp. <i>cremoris</i>
- Yoghurt	<i>Lb. delbrueckii</i> subsp. <i>bulgaricus</i> , <i>S. thermophilus</i>
- Fermented, probiotic milk	<i>Lb. casei</i> , <i>Lb. acidophilus</i> , <i>Lb. rhamnosus</i> , <i>Lb. johnsonii</i> , <i>B. lactis</i> , <i>B. bifidum</i> , <i>B. brevis</i>
- Kefir	<i>Lb. kefir</i> , <i>Lb. kefiranoformis</i> , <i>Lb. brevis</i>
แป้งหมัก	
- Sourdough	<i>Lb. sanfransicensis</i> , <i>Lb. farciminis</i> , <i>Lb. fermentum</i> , <i>Lb. brevis</i> , <i>Lb. plantarum</i> , <i>Lb. amylovorus</i> , <i>Lb. reuteri</i> , <i>Lb. pontis</i>
ปลาหมัก	<i>Lb. alimentarius</i> , <i>C. piscicola</i>
ซอสถั่วเหลือง	<i>T. halophilus</i>

B.=Bifidobacterium, *C.=Carnobacterium*, *L.=Lactococcus*, *Lb.=Lactobacillus*, *Leuc.=Leuconostoc*, *O.=Oenococcus*, *P.=Pediococcus*, *S.=Streptococcus*, *T.=Tetragenococcus*, *W.=Weissella*

แบคทีริโอเฟจ

แบคทีริโอเฟจ (bacteriophage) เป็นไวรัสของแบคทีเรีย มีโครงสร้างหรือส่วนประกอบสำคัญคือ สารพันธุกรรมหรือนิวคลีอิกแอซิด (nucleic acid) และโปรตีนห่อหุ้มสารพันธุกรรมเรียกว่า แคปซิด (capsid) ซึ่งอาจมีรูปร่างเป็นรูปหลายเหลี่ยม เช่น icosahedral เป็นต้น สารพันธุกรรมของแบคทีริโอเฟจอาจเป็น DNA หรือ RNA อย่างใดอย่างหนึ่ง และอาจมีรูปร่างเป็นเส้น (linear) เป็นวง (circular) หรือแบ่ง

เป็นหลายอัน (segmented) ก็ได้ สารพันธุกรรมที่ถูกห่อหุ้มด้วยแคปซิดนี้บางทีอาจเรียกว่า ส่วนหัว (head) แบคทีริโอเฟจบางชนิดอาจมีส่วนประกอบเพิ่มเติมคือ มีส่วนซึ่งมีลักษณะเป็นท่อยาวต่อจากส่วนหัวเรียกว่า ส่วนหาง (tail) และบริเวณส่วนหางนี้อาจพบโครงสร้างอื่น ๆ ได้ด้วย เช่น base plate, tail fiber เป็นต้น (รูปที่ 2) การมีหรือไม่มีส่วนหาง และการยึด-หลุดได้ของส่วนหางนี้ยังสามารถใช้ในการจำแนกชนิดของแบคทีริโอเฟจได้ด้วย (Ackermann, 2003)



รูปที่ 2 ตัวอย่างรูปร่างและส่วนประกอบสำคัญของแบคทีริโอเฟจ (ที่มา <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Tevenphage.svg>)

แบคทีริโอเฟจถูกค้นพบครั้งแรกโดยนักวิทยาศาสตร์สองท่านในช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกันคือ ในปี ค.ศ.1915 Dr. Frederick William Twort นักพยาธิวิทยาชาวอังกฤษได้ทำการวิจัยพบไวรัสที่สามารถทำให้แบคทีเรีย *Micrococcus* กลายพันธุ์ และในปี ค.ศ.1917 Dr. Felix Hubert d'Herelle นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสค้นพบไวรัสที่สามารถทำให้เซลล์แบคทีเรีย *Shigella* เกิดการแตกสลาย (lysis) อีกทั้ง Dr. d'Herelle ยังเป็นบุคคลแรกที่ใช้คำว่า "bacteriophage" ในการเรียกไวรัสที่สามารถบุกรุก (infect) หรือทำลายเซลล์แบคทีเรีย

การดำรงชีวิตของแบคทีริโอเฟจ

โดยทั่วไปการบุกรุก (infection) ของแบคทีริโอเฟจเข้าสู่โฮสต์เซลล์มักมีความจำเพาะสูงมาก (highly specific) กล่าวอีกนัยหนึ่งคือแบคทีริโอเฟจชนิดใดชนิดหนึ่งก็มักจะทำลายแบคทีเรียเพียงชนิดใดชนิดหนึ่งเท่านั้น ความจำเพาะระหว่างแบคทีริโอเฟจกับแบคทีเรียที่เป็นโฮสต์เซลล์นั้น เกิดขึ้นโดยอาศัยการจับกันระหว่างตำแหน่งที่อยู่บนอนุภาคของแบคทีริโอเฟจ เรียกว่า attachment site กับตำแหน่งที่อยู่บนผิวเซลล์ของแบคทีเรีย ซึ่งเรียกว่า receptor site จากนั้นสารพันธุกรรมของ

แบคทีเรียโอเฟจก็จะถูกนำเข้าสู่เซลล์แบคทีเรียและเริ่มต้นสู่กระบวนการเพิ่มจำนวน (replication) ของแบคทีเรียโอเฟจต่อไป

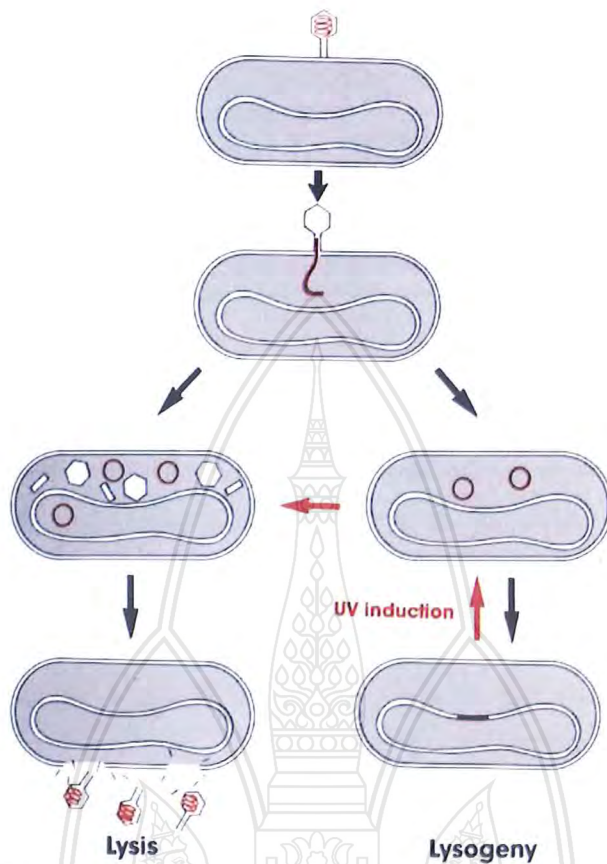
การเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียโอเฟจภายในเซลล์แบคทีเรียสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ แบบ lysis (lytic cycle) และแบบ lysogeny (lysogenic cycle) (รูปที่ 3) การเพิ่มจำนวนแบบ lysis เมื่อสารพันธุกรรมถูกนำเข้ามาภายในเซลล์แล้ว กลไกต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการดำรงชีวิตของแบคทีเรียโดยปกติจะหยุดชะงักลง เนื่องจากแบคทีเรียโอเฟจจะเข้าไปควบคุมและใช้กลไกต่างๆ เหล่านั้นเพื่อเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียโอเฟจเท่านั้น โดยเริ่มจากสร้างโปรตีนหรือเอนไซม์สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการจำลองสารพันธุกรรม แล้วจึงสร้างโปรตีนหรือส่วนประกอบของแคปซิดและโครงสร้างอื่นๆ จากนั้นส่วนประกอบต่างๆ ที่ถูกสร้างขึ้นมาเป็นจำนวนมากนี้จึงมารวมกัน (assembly) กลายเป็น แบคทีเรียโอเฟจสมบูรณ์จำนวนมากเกิดขึ้นภายในเซลล์ แบคทีเรียโอเฟจที่เกิดขึ้นใหม่นี้เรียกว่า progeny bacteriophage โดยระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่แบคทีเรียโอเฟจบุกรุกเข้าสู่เซลล์และเกิด progeny bacteriophage อาจใช้เวลาเพียงเล็กน้อย เช่น 1-2 ชั่วโมงเท่านั้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียโอเฟจ และในที่สุดแบคทีเรียโอเฟจก็จะสร้างสารบางอย่างออกมาทำลายผนังเซลล์ของแบคทีเรีย จนผนังเซลล์เกิดการแตกสลายและปล่อย progeny bacteriophage จำนวนมากเหล่านั้นออกมานอกเซลล์ จากนั้น progeny bacteriophage ซึ่งมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับแบคทีเรียโอเฟจเริ่มแรกที่เข้าสู่เซลล์ ก็พร้อมที่จะเข้าสู่เซลล์แบคทีเรียเซลล์ใหม่ที่อยู่ข้างเคียงต่อไป (Medigan et al., 1997) การบุกรุกหรือทำลายเซลล์แบคทีเรียของแบคทีเรียโอเฟจแบบ lysis นี้ ในที่สุดจะทำให้แบคทีเรียหมดไปจากบริเวณที่มีแบคทีเรียโอเฟจชนิดนั้นอยู่ ส่วนการเพิ่มจำนวนแบบ lysogeny แบคทีเรียโอเฟจที่สามารถเพิ่มจำนวนแบบนี้ได้เรียกว่า temperate phage เมื่อสารพันธุกรรมถูกนำเข้ามาภายในเซลล์แล้ว แบคทีเรียโอเฟจจะนำสาร

พันธุกรรมนั้นเข้าไปแทรกอยู่ในโครโมโซมของแบคทีเรีย สารพันธุกรรมของแบคทีเรียโอเฟจที่แทรกอยู่ในโครโมโซมนี้นี้เรียกว่า prophage และเมื่อแบคทีเรียแบ่งตัวเพิ่มจำนวน สารพันธุกรรมของแบคทีเรียโอเฟจก็จะมีการจำลองตัวเองไปพร้อมกัน และยังคงแทรกอยู่ในโครโมโซมเช่นเดิม โดยไม่ทำให้เกิด progeny bacteriophage ดังนั้นการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียโอเฟจแบบ lysogeny จึงไม่ทำให้เกิดการแตกสลายหรือการตายของแบคทีเรีย (Vegge et al., 2005) แต่อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพันธุกรรมหรือการกลายพันธุ์ (mutation) ของแบคทีเรียได้ ในบางสภาวะ prophage อาจหลุดออกจากโครโมโซมของแบคทีเรียและสามารถกลับเข้าสู่การเพิ่มจำนวนแบบ lysis ได้ เรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า induction โดยสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิด induction ได้แก่ การกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลต หรือสารเคมีบางชนิด เป็นต้น

การจัดจำแนกชนิดของแบคทีเรียโอเฟจ

ในอดีตเคยมีการจัดจำแนกแบคทีเรียโอเฟจหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็มีเกณฑ์ในการจำแนกที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับบุคคลที่เป็นผู้คิดเกณฑ์ในการจำแนกนั้น เช่น ในปี ค.ศ. 1967 Bradley ได้จำแนกแบคทีเรียโอเฟจออกเป็นกลุ่มตามลักษณะรูปร่างและสารพันธุกรรมได้เป็น 6 กลุ่ม (group) คือ A, B, C, D, E และ F โดยแบคทีเรียโอเฟจกลุ่ม A, B และ C มีสารพันธุกรรมเป็น double-stranded DNA แบคทีเรียโอเฟจกลุ่ม D และ F มีสารพันธุกรรมเป็น single-stranded DNA และแบคทีเรียโอเฟจกลุ่ม E มีสารพันธุกรรมเป็น single-stranded RNA เป็นต้น

ปัจจุบันการจัดจำแนกแบคทีเรียโอเฟจเริ่มเป็นระบบและมีเกณฑ์มาตรฐานมากขึ้นกว่าในอดีต เนื่องจากมีหน่วยงานที่ทำหน้าที่กำหนดเกณฑ์การจัดจำแนกไวรัสซึ่งเป็นที่นิยมร่วมกันโดยทั่วไป คือ International Committee for Taxonomy of Viruses หรือ ICTV โดยได้จัดจำแนกไวรัสออกเป็น 3 order 61 family และ 241 genus การตั้งชื่อไวรัสโดยทั่วไป



รูปที่ 3 การเพิ่มจำนวนของแบคทีริโอเฟจ (ที่มา : <http://www.mun.ac/biochem/course/4103/figures/ptashne/Chapter1/F>)

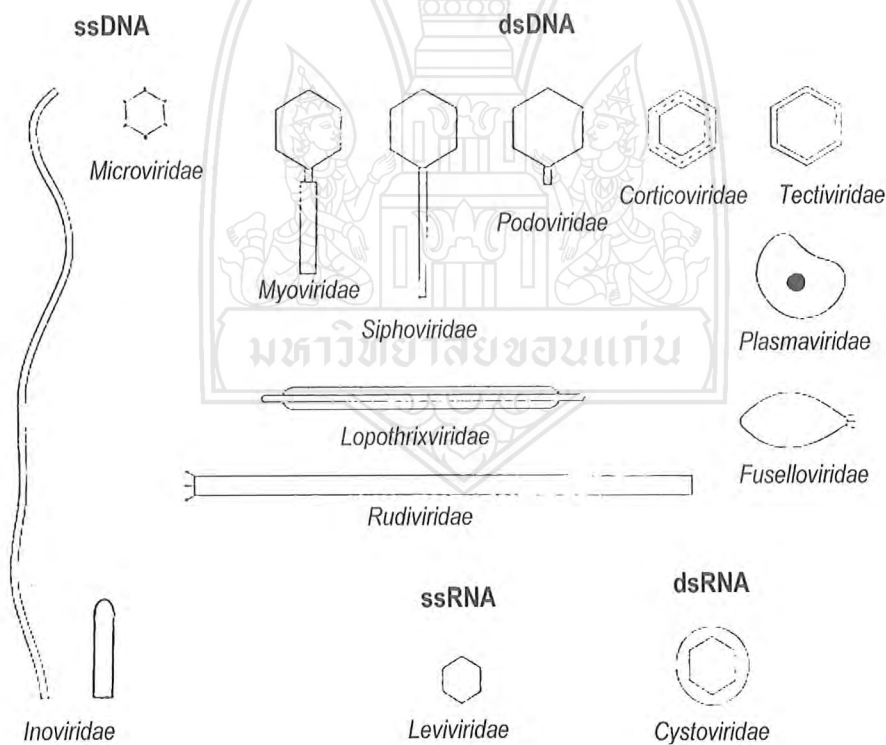
จะใช้ภาษาละตินหรือกรีก ชื่อ order จะลงท้ายด้วย -virales ชื่อ family จะลงท้ายด้วย -viridae และชื่อ genus จะลงท้ายด้วย -virus (Ackermann, 2003) แบคทีริโอเฟจทุกชนิดถูกจัดอยู่ใน order เดียวกัน คือ Caudovirales โดยแบ่งออกเป็น 13 family และ 30 genus (ตารางที่ 2) เมื่อพิจารณารูปร่างของแบคทีริโอเฟจ พบว่าสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ ดังนี้ (1) Tailed phages คือแบคทีริโอเฟจที่มีหาง (2) Polyhedral phages คือแบคทีริโอเฟจที่หัวมีรูปร่างหลายเหลี่ยม (3) Filamentous phages คือ แบคทีริโอเฟจที่มีลักษณะคล้ายเส้นใย จึงไม่มีการแบ่งเป็นส่วนหัวหรือหาง และ (4) Pleomorphic

phages คือ แบคทีริโอเฟจที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (ตารางที่ 2 และรูปที่ 4) แบคทีริโอเฟจส่วนใหญ่มีสารพันธุกรรมเป็น double-stranded DNA มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่มีสารพันธุกรรมเป็น single-stranded DNA, single-stranded RNA หรือ double-stranded RNA แบคทีริโอเฟจที่ค้นพบแล้วส่วนใหญ่เป็นพวก tailed phage ซึ่งเท่าที่มีรายงานอยู่ในขณะนี้มียู่ประมาณ 4950 ชนิด (Ackermann, 2003) นอกจากนี้ยังมีแบคทีริโอเฟจบางชนิดที่มีเอนVELOPE (envelope) ซึ่งเป็นสารจำพวกไขมันห่อหุ้มแคปซิดไว้อีกชั้นหนึ่ง แต่แบคทีริโอเฟจแบบนี้พบน้อยมาก

ตารางที่ 2 การจัดจำแนกชนิดและคุณสมบัติทั่วไปของแบคทีริโอเฟจ (ที่มา : Ackermann, 2003)

Shape	Nucleic acid	Families	Genera	Examples	Members	Characteristics
Tailed	DNA, ds, L	<i>Myoviridae</i>	6	T4	1243	Tail contractile
	DNA, ds, L	<i>Siphoviridae</i>	6	λ	3011	Tail long, noncontractile
	DNA, ds, L	<i>Podoviridae</i>	3	T7	696	Tail short
Polyhedral	DNA, ss, C	<i>Microviridae</i>	4	ϕ X174	40	-
	DNA, ds, C, T	<i>Corticoviridae</i>	1	PM2	3	Complex capsid, lipids
	DNA, ds, L	<i>Tectiviridae</i>	1	PRD1	18	Internal lipoprotein vesicle
	RNA, ss, L	<i>Leviviridae</i>	2	MS2	39	-
	RNA, ds, L, S	<i>Cystoviridae</i>	1	ϕ 6	1	Envelope, lipids
Filamentous	DNA, ss, C	<i>Inoviridae</i>	2	Fd	57	Filaments or rods
	DNA, ds, L	<i>Lipothrixviridae</i>	1	TTV1	6	Envelope, lipids
	DNA, ds, L	<i>Rudiviridae</i>	1	SIRV1	2	Resembles TMV
Pleomorphic	DNA, ds, C, T	<i>Plasmaviridae</i>	1	L2	6	Envelope, lipids, no capsid
	DNA, ds, C, T	<i>Fuselloviridae</i>	1	SSV1	8	Spindle-shaped, no capsid

C = circular; L = linear; S = segmented; T = superhelical; ss = single-stranded; ds = double-stranded



รูปที่ 4 การจัดจำแนกแบคทีริโอเฟจ (ที่มา : <http://www.smj.ejnal.com/e-journal/word/picture/article/smj/302/pic1.JPG>)

การทำลายหัวเชื้อแลคติกแอซิดแบคทีเรีย โดยแบคทีเรียโอเฟจ

ปัญหาหนึ่งที่พบบ่อยเมื่อมีการนำแลคติกแอซิดแบคทีเรียมาใช้เป็นหัวเชื้อของการหมัก คือ การที่แลคติกแอซิดแบคทีเรียถูกทำลายโดยแบคทีเรียโอเฟจ (Coffey et al., 1998; Deutsch et al., 2002; Lu et al., 2003) ปัญหาดังกล่าวนำไปสู่การล้มเหลวของกระบวนการหมัก หรือทำให้อาหารหมักที่ได้มีคุณภาพไม่ตรงตามที่ต้องการ การทำลายแลคติกแอซิดแบคทีเรียที่เป็นหัวเชื้อของการหมักโดยแบคทีเรียโอเฟจ ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Whitehead and Cox (1935) ซึ่งทำการศึกษากับ *Lactococcus lactis* หลังจากนั้นได้มีการค้นพบแบคทีเรียโอเฟจที่ทำลายแลคติกแอซิดแบคทีเรียอีกหลายชนิด (ตารางที่ 3) การทำลายหัวเชื้อแลคติกแอซิดแบคทีเรียโดยแบคทีเรียโอเฟจนับเป็นปัญหาสำคัญที่นำมาซึ่งความสูญเสียทางเศรษฐกิจ

อุตสาหกรรมการหมักที่พบบ่อยว่าประสบปัญหาเกี่ยวกับการทำลายหัวเชื้อแลคติกแอซิดแบคทีเรียโดยแบคทีเรียโอเฟจ คือ อุตสาหกรรมการหมักผลิตภัณฑ์จากนม (dairy industry) เช่น Cheddar cheeses เป็นต้น ในระยะแรกของการศึกษาเกี่ยวกับแบคทีเรียโอเฟจในแลคติกแอซิดแบคทีเรียส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นการค้นหาแบคทีเรียโอเฟจที่เป็นปัญหา การศึกษาเกี่ยวกับรูปร่างของแบคทีเรียโอเฟจภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน การศึกษาคุณสมบัติทาง serology และ สรีรวิทยาของแบคทีเรียโอเฟจ เป็นต้น ต่อมาเมื่อมีการค้นพบแบคทีเรียโอเฟจมากขึ้น การศึกษาเกี่ยวกับแบคทีเรียโอเฟจก็เริ่มลงลึกถึงระดับชีวโมเลกุลของแบคทีเรียโอเฟจ เช่น รูปแบบของสารพันธุกรรม (genome organization) โปรตีนโครงสร้างหลักของแบคทีเรียโอเฟจ (structural protein profiles) และ เปรียบเทียบสารพันธุกรรมระหว่างแบคทีเรียโอเฟจ (comparative DNA studies) เป็นต้น

ตารางที่ 3 ตัวอย่างแบคทีเรียโอเฟจที่ทำลายแลคติกแอซิดแบคทีเรีย (ที่มา : Forde and Fitzgerald, 1999)

แบคทีเรียโอเฟจ	แลคติกแอซิดแบคทีเรีย
bIL67 (lytic)	<i>L. lactis</i>
c2 (lytic)	<i>L. lactis</i>
sk1 (lytic)	<i>L. lactis</i>
φbIL70 (lytic)	<i>L. lactis</i>
r1t (temperate)	<i>L. lactis</i>
Tuc2009 (temperate)	<i>L. lactis</i>
Tp-901-1 (temperate)	<i>L. lactis</i>
φLL-H (lytic)	<i>Lb. delbrueckii</i> spp. <i>lactis</i>
φgle (temperate)	<i>Lactobacillus</i>
φ01205 (temperate)	<i>S. thermophilus</i>
φ7201 (temperate)	<i>S. thermophilus</i>
φDT1 (temperate)	<i>S. thermophilus</i>
BK5-T (temperate)	<i>L. lactis</i>
φvML3 (lytic)	<i>L. lactis</i>
F4-1 (lytic)	<i>L. lactis</i>

ตารางที่ 3 ตัวอย่างแบคทีเรียโอเฟจที่ทำลายแลคติกแอซิดแบคทีเรีย (ที่มา : Forde and Fitzgerald, 1999)

แบคทีเรียโอเฟจ	แลคติกแอซิดแบคทีเรีย
φ7-9 (lytic)	<i>L. lactis</i>
φ50 (lytic)	<i>L. lactis</i>
φLC3 (temperate)	<i>L. lactis</i>
φUS3 (lytic)	<i>L. lactis</i>
φ197 (lytic)	<i>L. lactis</i>
bIL66 (lytic)	<i>L. lactis</i>
bIL41 (lytic)	<i>L. lactis</i>
φ31 (lytic)	<i>L. lactis</i>
φadh (temperate)	<i>Lb. gasseri</i>
mv4 (temperate)	<i>Lb. delbrueckii</i> spp. <i>lactis</i>
φSfi21 (temperate)	<i>S. thermophilus</i>

จุดเริ่มต้นของการติดเชื้อแบคทีเรียโอเฟจของแลคติกแอซิดแบคทีเรียไม่แตกต่างจากการบุกรุกแบคทีเรียชนิดอื่น โดยมีขั้นตอนสำคัญ คือ phage adsorption ขั้นตอนนี้มีการศึกษากันมากในแบคทีเรียโอเฟจของแบคทีเรียกลุ่ม lactococci (หรือเรียกว่า lactococcal phage) โดยมีรายงานว่า receptor site สำหรับ lactococcal phage อาจอยู่ที่ผนังเซลล์ (cell wall) หรือเยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) ของแบคทีเรียก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียและแบคทีเรียโอเฟจ นอกจากนี้ lactococcal phage บางชนิดสามารถบุกรุกแบคทีเรียได้เพียงบางสายพันธุ์เท่านั้น แต่บางชนิดก็สามารถบุกรุกแบคทีเรียได้หลายสายพันธุ์ เช่น แบคทีเรียโอเฟจบางชนิดสามารถบุกรุก *L. lactis*, *L. lactis* subsp. *cremoris* และ *L. lactis* bivarient *diacetylactis* เป็นต้น อย่างไรก็ตามขั้นตอน phage adsorption แม้ว่าจะเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญของการติดเชื้อแบคทีเรียโอเฟจ แต่ก็มีได้หมายความว่าเมื่อเกิดขั้นตอนนี้แล้ว แบคทีเรียจะต้องถูกทำลายด้วยแบคทีเรียโอเฟจเสมอไป เนื่องจากแบคทีเรียที่มี receptor site สำหรับแบคทีเรียโอเฟจ ก็สามารถต่อต้านการติดเชื้อ (phage resistant) ได้โดยอาศัยกลไกอื่นในการต้านทาน

การติดเชื้อ ได้แก่ อาศัยกลไก lysogenic immunity คือ การที่แบคทีเรียโอเฟจที่บุกรุกเข้าสู่เซลล์สามารถเข้าไปมีชีวิตร่วมอยู่ในโฮสต์เซลล์แบบ lysogeny โดยอยู่ในระยะ prophage ซึ่งมีผลทำให้แบคทีเรียดังกล่าวจะไม่ถูกบุกรุกด้วยแบคทีเรียโอเฟจชนิดเดียวกันนั้นอีก ซึ่งคล้ายกับการมีภูมิคุ้มกันต่อแบคทีเรียโอเฟจ หรือ อาศัยกลไก modification/restriction (M/R) system คือการสร้าง restriction endonuclease มาทำลายแบคทีเรียโอเฟจที่บุกรุกเข้าสู่เซลล์ เป็นต้น

ในขั้นตอน phage adsorption ปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญ คือ ประจุที่ผิวภายนอกของแลคติกแอซิดแบคทีเรียและแบคทีเรียโอเฟจ ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมการเกิด phage adsorption การเติมสารเคมีบางชนิด (ได้แก่ CaCl_2 และ MgCl_2 เป็นต้น) ที่เมื่อละลายน้ำแล้วแตกตัวให้อิออนที่มีประจุลงไปในสิ่งแวดล้อมที่แบคทีเรียและแบคทีเรียโอเฟจอาศัยอยู่ร่วมกัน มีส่วนช่วยสนับสนุนการเกิด phage adsorption โดยเชื่อว่าอิออนที่มีประจุบวกที่เติมลงไปนั้น จะมีส่วนช่วยลบล้าง (neutralize) ประจุลบที่ปรากฏอยู่ทั้งบนผิวเซลล์ของแบคทีเรียและโครงสร้างภายนอกของแบคทีเรียโอเฟจ ดังนั้นสารเคมีเหล่านี้จึงส่งเสริม

ให้เกิดขั้นตอน phage adsorption ได้ง่ายหรือดียิ่งขึ้น (Huang and Starr, 1973) ด้วยเหตุนี้ในการเพาะเลี้ยงหรือเพิ่มจำนวนแบคทีเรียโอเฟจในโฮสต์เซลล์จึงนิยมเติมสารเหล่านี้ลงไปด้วย สำหรับแคลเซียมไอออนนั้นเคยมีรายงานว่ามีความจำเป็นต่อการเพิ่มจำนวนของ lactococcal phage หลายชนิด แต่อย่างไรก็ตามยังมีแบคทีเรียโอเฟจบางชนิดที่ไม่จำเป็นต้องอาศัยไอออนเหล่านี้ในการเพิ่มจำนวน การทราบว่าแบคทีเรียโอเฟจต้องอาศัยแคลเซียมไอออนเพื่อการเพิ่มจำนวน สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาสูตรอาหารเลี้ยงเชื้อแลคติกแอซิดแบคทีเรียให้ปราศจากแคลเซียมซึ่งสามารถช่วยป้องกันหัวเชื้อไม่ให้ถูกบุกรุกด้วยแบคทีเรียโอเฟจได้ในระดับหนึ่ง

วิธีการในการนำสารพันธุกรรมของแบคทีเรียโอเฟจ หรือ DNA เข้าสู่เซลล์แลคติกแอซิดแบคทีเรียยังไม่มีที่ทราบแน่ชัดนัก แต่จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถมองเห็นแบคทีเรียโอเฟจที่ปราศจาก DNA ในส่วนหัวขณะที่กำลังยึดติดหรือเกาะ (attach) อยู่กับผนังเซลล์ของแบคทีเรีย จึงทำให้เชื่อว่า สารพันธุกรรมของแบคทีเรียโอเฟจน่าจะถูกส่งผ่านมาตามท่อกลางภายในของส่วนหาง (channel in the phage tail) และเรียกกระบวนการนำ DNA เข้าสู่เซลล์ในลักษณะเช่นนี้ว่า DNA injection อย่างไรก็ตามการเรียกเช่นนี้อาจไม่ถูกต้องนักสำหรับแบคทีเรียโอเฟจทุกชนิดเนื่องจากแบคทีเรียโอเฟจหลายชนิดของแลคติกแอซิดแบคทีเรีย เป็นชนิดที่ไม่มีหางที่ยึดหดได้ (non-contractile tail) ด้วยเหตุนี้กระบวนการนำ DNA เข้าสู่เซลล์ของแลคติกแอซิดแบคทีเรียจึงน่าจะเล็งไปใช้คำว่า DNA introduction แทนซึ่งน่าจะเหมาะสมมากกว่า

เนื่องจากแลคติกแอซิดแบคทีเรียเป็นแบคทีเรียแกรมบวก จึงมีผนังเซลล์ที่ค่อนข้างหนาเมื่อเทียบกับแบคทีเรียแกรมลบ โดยทั่วไปผนังเซลล์ของแบคทีเรีย lactococci มีความหนาประมาณ 20 นาโนเมตร ดังนั้นผนังเซลล์จึงเปรียบเสมือนเป็นโครงสร้างที่ช่วย

ป้องกันมิให้แบคทีเรียถูกบุกรุกด้วยแบคทีเรียโอเฟจในระดับหนึ่ง และน่าจะมีส่วนทำให้แบคทีเรียโอเฟจสามารถบุกรุกเข้าสู่เซลล์แบคทีเรียแกรมบวกได้ยากกว่าแบคทีเรียแกรมลบด้วย การบุกรุกเข้าสู่เซลล์แบคทีเรียของแบคทีเรียโอเฟจหรือการนำ DNA เข้าสู่โฮสต์เซลล์มีการศึกษากันมากในแบคทีเรียแกรมลบ โดยพบว่าแบคทีเรียโอเฟจหลายชนิด (เช่น T4, T7 และ PRD1) มีเอนไซม์ที่อยู่ตรงบริเวณหางทำหน้าที่ในการเจาะผนังเซลล์แบคทีเรียให้เป็นรูเพื่อให้ DNA จากแบคทีเรียโอเฟจสามารถเคลื่อนที่เข้าไปยังเซลล์แบคทีเรียได้ จึงนับเป็นจุดเริ่มต้นของการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียโอเฟจภายในเซลล์ เรียกเอนไซม์เหล่านั้นว่า tail-based lytic enzymes ต่อมาในราวปี ค.ศ. 2004 Kenny et al. พบว่าไลซิน (lysin) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่สร้างจากแบคทีเรียโอเฟจ Tuc2009 ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการบุกรุกเข้าสู่เซลล์ *L. lactis* UC509.9 จากการค้นพบดังกล่าวทำให้นักวิจัยมีการวิพากษ์กันอย่างกว้างขวางเกี่ยวกับวิธีการบุกรุกเข้าสู่โฮสต์เซลล์แลคติกแอซิดแบคทีเรียของแบคทีเรียโอเฟจบางคนเชื่อว่าแบคทีเรียโอเฟจทุกชนิดของแลคติกแอซิดแบคทีเรียน่าจะใช้ไลซินในการบุกรุกเข้าสู่เซลล์ แต่บางคนก็เชื่อว่าน่าจะยังมีกลไกอื่นที่แบคทีเรียโอเฟจกลุ่มนี้ใช้ในการบุกรุกเข้าสู่โฮสต์เซลล์

การเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียโอเฟจภายในเซลล์แลคติกแอซิดแบคทีเรียยังไม่ค่อยเป็นที่เข้าใจมากนักแต่สิ่งหนึ่งที่น่าจะเหมือนกันกับแบคทีเรียโอเฟจของแบคทีเรียชนิดอื่นๆ คือ หลังจากที่แบคทีเรียโอเฟจบุกรุกเข้าสู่โฮสต์เซลล์แล้ว น่าจะมีผลทำให้สารพันธุกรรมของโฮสต์เซลล์แบคทีเรียถูกทำลายและกลไกการทำงานภายในเซลล์แบคทีเรียตามปกติถูกรบกวนหรือหยุดชะงักลง สารพันธุกรรมของแบคทีเรียโอเฟจจะเข้าไปทำหน้าที่ควบคุมกลไกการสังเคราะห์สารชีวโมเลกุลชนิดต่างๆ ภายในเซลล์แทน โดยเริ่มจากการสร้าง mRNA สร้างโปรตีนหรือเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มจำนวนสารพันธุกรรมแบคทีเรียโอเฟจ และสร้างโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับ

โครงสร้างของแบคทีเรียโอเฟจ ตลอดจนโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการทำให้โฮสต์เซลล์แตก เพื่อแบคทีเรียโอเฟจที่ถูกสร้างขึ้นใหม่เป็นจำนวนมากภายในโฮสต์เซลล์นั้นจะได้ออกจากเซลล์และบุกรุกเซลล์ใหม่ต่อไป การศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียโอเฟจที่นิยมทำกันอย่างแพร่หลาย คือ one-step growth experiment ซึ่งคิดค้นโดย Ellis and Delbruck (1939) การทดลองนี้ให้ข้อมูลของแบคทีเรียโอเฟจเกี่ยวกับระยะเวลาที่ใช้ในการเพิ่มจำนวนภายในเซลล์ ได้แก่ latent period ซึ่งหมายถึง ช่วงเวลาดังแต่แบคทีเรียโอเฟจเข้าสู่เซลล์จนกระทั่งเริ่มปล่อย progeny bacteriophage ออกสู่นอกเซลล์ และ burst size ซึ่งหมายถึง ค่าเฉลี่ยของ progeny bacteriophage ที่ถูกสร้างต่อหนึ่งเซลล์แบคทีเรียที่ติดเชื้อ (plaque-forming unit/infected cell) ในปี ค.ศ. 1973 Keogh รายงานว่าอุณหภูมิมีผลต่อ latent period และ burst size ของ lactococcal phage คือ เมื่อเลี้ยง lactococcal phage ในอาหาร skim milk ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะมี latent period อยู่ในช่วง 32-56 นาที และมี burst size 2-105 อนุภาคต่อหนึ่งเซลล์ที่ติดเชื้อ แต่เมื่อเลี้ยงแบคทีเรียโอเฟจดังกล่าวในอาหารชนิดเดียวกันที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส จะมี latent period อยู่ในช่วง 32-44 นาที มี burst size ตั้งแต่ 0-77 อนุภาคต่อหนึ่งเซลล์ที่ติดเชื้อ

อุณหภูมินี้มีความสำคัญต่อการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียโอเฟจ เช่น แบคทีเรียโอเฟจบางชนิดไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส แต่กลับสามารถเพิ่มจำนวนได้ที่อุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส แบคทีเรียโอเฟจบางชนิดไม่เพิ่มจำนวนเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 34 องศาเซลเซียส แต่บางชนิดเพิ่มจำนวนได้ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสแต่ไม่เพิ่มจำนวนเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่านี้ เป็นต้น อย่างไรก็ตามแบคทีเรียโอเฟจบางชนิดก็สามารถเพิ่มจำนวนได้ในทุกอุณหภูมิที่โฮสต์สามารถเจริญได้ โดยทั่วไปอุณหภูมินิยมใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับการนับจำนวนแบคทีเรียโอเฟจ คือ 30 องศาเซลเซียส แต่สำหรับ

การแยกแบคทีเรียโอเฟจจากกระบวนการหมักนั้น อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับสภาวะที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการหมักน่าจะเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการแยกและตรวจหาแบคทีเรียโอเฟจ

แบคทีเรียโอเฟจของแลคติกแอซิดแบคทีเรียบางชนิดอาจเป็น temperate phage และดำรงชีวิตแบบ lysogeny ซึ่งการดำรงชีวิตของ temperate phage จะแตกต่างไปจาก lytic phage คือ ไม่ทำให้โฮสต์เซลล์แตก แต่ DNA ของแบคทีเรียโอเฟจจะเข้าไปแทรกอยู่ในโครโมโซมของแบคทีเรีย และเมื่อแบคทีเรียแบ่งเซลล์ DNA ของแบคทีเรียโอเฟจก็ยังคงแทรกอยู่ในแบคทีเรียเซลล์ใหม่ทุกเซลล์ที่เกิดขึ้นตามที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างแบคทีเรียโอเฟจและแบคทีเรียในลักษณะเช่นนี้นับว่ามีความคงตัว (stable) ค่อนข้างสูง ดังนั้นการไม่ทราบที่มาของแบคทีเรียโอเฟจที่จำเพาะต่อหัวเชื้อแลคติกแอซิดแบคทีเรียหลายๆ ชนิดทำให้เกิดข้อสันนิษฐานอันหนึ่งที่น่าจะเป็นไปได้ คือ หัวเชื้อแลคติกแอซิดแบคทีเรียอาจติดเชื้อแบคทีเรียโอเฟจอยู่ก่อนแล้ว แต่แบคทีเรียโอเฟจอยู่ในระยะ lysogeny (Petersen et al., 1999) ปัจจุบันมีข้อมูลที่น่าเชื่อถือมากขึ้นเรื่อยๆ ว่าหัวเชื้อแลคติกแอซิดแบคทีเรียที่ติดเชื้อ temperate phage นั้นเองคือแหล่งที่มาของแบคทีเรียโอเฟจโดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานผลิต cheeses และหัวเชื้อดังกล่าวก็เป็นต้นเหตุของการแพร่กระจายแบคทีเรียโอเฟจเข้าสู่กระบวนการหมักในครั้งต่อไป โดยแลคติกแอซิดแบคทีเรียที่ติดเชื้อแบคทีเรียโอเฟจเหล่านี้จะมาจากน้ำนมดิบที่ใช้เป็นวัตถุดิบของการหมัก

การศึกษาความทนทานของแบคทีเรียโอเฟจต่อสภาวะแวดล้อมนิยมศึกษาเกี่ยวกับการทนความร้อน การทนต่อความเป็นกรด-ด่าง (pH) และการทนต่อน้ำยาฆ่าเชื้อ (disinfectant) (Sakaki and Oshima, 1975; Quiberoni et al., 2003; Capra et al., 2006) แบคทีเรียโอเฟจของแลคติกแอซิดแบคทีเรียส่วนใหญ่สามารถมีชีวิตรอดได้แม้ว่าจะผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อแบบ HTST (high temperature for a short time)

pasteurization โดยทั่วไปการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที สามารถกำจัด lactococcal phage ได้ แต่ก็ยังมีแบคทีเรียโอเฟจบางชนิดเมื่ออยู่ในสภาพแห้ง (dried phage particle) สามารถทนอุณหภูมิสูงถึง 90-95 องศาเซลเซียสได้นาน 2 ชั่วโมง ดังนั้นในการใช้ความร้อนเพื่อควบคุมการปนเปื้อนของแบคทีเรียโอเฟจในภาชนะที่ใช้ในการหมักหรือถึงหมักก็ควรคำนึงถึงเรื่องนี้ด้วย โดยทั่วไปแบคทีเรียโอเฟจของแลคติกแอซิดแบคทีเรียสามารถทนต่อ pH ช่วงกว้าง Hunter and Whitehead (1940) รายงานว่าที่อุณหภูมิห้องเมื่อ pH ต่ำกว่า 2.5 และสูงกว่า 11.8 แบคทีเรียโอเฟจจะไม่สามารถมีชีวิตรอดหรือไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้ และการเติมกรดแลคติก 2.5% (v/v) ลงไปในน้ำนมที่ใช้เป็นวัตถุดิบของการหมักและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาทีสามารถช่วยลดการปนเปื้อนของแบคทีเรียโอเฟจได้ อย่างไรก็ตามจากการศึกษาของนักวิทยาศาสตร์คนอื่นๆ เกี่ยวกับความทนทานต่อ pH ของแบคทีเรียโอเฟจพบว่า ที่อุณหภูมิห้องแบคทีเรียโอเฟจส่วนใหญ่จะเสียชีวิตอย่างรวดเร็วเมื่อ pH ต่ำกว่า 5 จากการศึกษที่ผ่านมาพบว่าไฮโปคลอไรต์ (hypochlorite) มีประสิทธิภาพในการควบคุมไวรัสรวมถึงแบคทีเรียโอเฟจได้ค่อนข้างดี แม้ว่าฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde) จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียโอเฟจได้แต่ก็ต้องใช้ในความเข้มข้นสูง ส่วน 70% แอลกอฮอล์มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ การฟุ้งกระจายของแบคทีเรียโอเฟจในอากาศ (aerosol) นับว่าเป็นปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่ง โดยเฉพาะในโรงงานผลิต cheeses แม้ว่าไฮโปคลอไรต์จะสามารถนำไปใช้ได้ผลดีในการควบคุม lactococcal phage ที่ฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศด้วยก็ตาม แต่ก็ส่งผลทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการสีกร่อนของภาชนะที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้น ปัจจุบันการควบคุมการฟุ้งกระจายของแบคทีเรียโอเฟจในอากาศจึงนิยมเปลี่ยนไปใช้ไดคลอโรไอโซไซยานูริกแอซิด (dichloroisocyanuric acid) แทน เพราะให้

ประสิทธิภาพในการควบคุมแบคทีเรียโอเฟจได้ดีใกล้เคียงกับไฮโปคลอไรต์ แต่ลดปัญหาการสีกร่อนได้มาก

แบคทีเรียโอเฟจของแลคติกแอซิดแบคทีเรียสามารถพบได้ทั่วไปทั้งในสิ่งแวดล้อมและในอาหาร เช่น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากนม ผักดองชนิดต่างๆ เป็นต้น จากอดีตจนถึงปัจจุบันสามารถคัดแยกแบคทีเรียโอเฟจของแลคติกแอซิดได้จากอาหารหลากหลายชนิดในที่นี้จะขอยกตัวอย่างพอสังเขปของงานวิจัยที่ตรวจพบแบคทีเรียโอเฟจซึ่งสามารถทำลายแลคติกแอซิดแบคทีเรียในอาหาร ดังนี้ Watanabe et al. (1970) ตรวจพบแบคทีเรียโอเฟจ 2 สายพันธุ์ในยาคุลต์ (yakult) คือ PL-1 และ J1 ซึ่งสามารถทำลาย *Lactobacillus casei* Yoon et al. (1997) ตรวจพบแบคทีเรียโอเฟจ SC921 ในกิมจิ (kimchi) ซึ่งสามารถทำลาย *Lactobacillus plantarum* Barrangou et al. (2002) ตรวจพบแบคทีเรียโอเฟจหลายสายพันธุ์ คือ R01, R03, R05, R09, R12 และ R19 ในกระบวนการหมักกะหล่ำปลีดองในระดับอุตสาหกรรม (industrial sauerkraut fermentation) ซึ่งแบคทีเรียโอเฟจเหล่านี้สามารถทำลาย *Leuconostoc fallax* Lu et al. (2003) ตรวจพบแบคทีเรียโอเฟจ ϕ JL-1 ในแตงกวาดอง (cucumber fermentation) ซึ่งสามารถทำลาย *Lactobacillus plantarum*, Quiberoni et al. (2004) ตรวจพบแบคทีเรียโอเฟจหลายสายพันธุ์ คือ BYM, YAB และ Ib3 ในโยเกิร์ต (yogurt) ซึ่งแบคทีเรียโอเฟจเหล่านี้สามารถทำลาย *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*, และ Greer et al. (2007) ตรวจพบแบคทีเรียโอเฟจ gggg ในผลิตภัณฑ์เนื้อหมูบรรจุแบบสุญญากาศ (vacuum-packaged pork loins) ซึ่งสามารถทำลาย *Leuconostoc gelidum* เป็นต้น สำหรับ lactococcal phage ก็มีรายงานว่าสามารถตรวจพบได้ในอาหารหลายชนิด เช่น cheeses, buttermilk และ sour cream (Moineau et al., 1996) อย่างไรก็ตามการตรวจพบแบคทีเรียโอเฟจในอาหารหมักของไทยยังไม่มีรายงาน lactococcal phage ที่พบส่วนใหญ่มี

สารพันธุกรรมเป็น double-stranded DNA มีหางแบบ non-contractile tail และ family ที่พบบ่อยคือ *Siphoviridae* มีบ้างที่พบว่าอยู่ใน family *Podoviridae* ส่วน family *Myoviridae* พบได้น้อยมาก (Deveau et al., 2006)

ปัญหาเกี่ยวกับแบคทีเรียโอเฟโกไปทำลายหัวเชื้อนำมาซึ่งการค้นหากลยุทธ์ในการป้องกันแบคทีเรียโอเฟโกในเบื้องต้น ได้แก่ การหมักภายใต้แรงดัน (pressurised fermentation) หรือการเลี้ยงหัวเชื้อในอาหารที่มีฟอสเฟตสูง เป็นต้น แต่ก็ยังไม่สามารถแก้ปัญหาให้หมดไปได้ ต่อมาได้มีผู้พยายามหาวิธีการในการควบคุมแบคทีเรียโอเฟโกโดยวิธีอื่นๆ เช่น การคัดเลือกหัวเชื้อที่เหมาะสม หรือมีศักยภาพในการต้านทานต่อการถูกบุกรุกด้วยแบคทีเรียโอเฟโกจากแบคทีเรียที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติ (naturally occurring bacteria) หรือโดยการใช้แบคทีเรียที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงพันธุ์ (genetic engineering bacteria) เพื่อให้มีความทนทานต่อการบุกรุกของแบคทีเรียโอเฟโก ซึ่งการค้นหแบคทีเรียที่มีศักยภาพในการต้านทานต่อแบคทีเรียโอเฟโก สิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรก คือ แบคทีเรียดังกล่าวยังต้องรักษาคุณภาพการหมักเพื่อให้ได้ผลผลิตหรืออาหารหมักที่มีคุณสมบัติแบบเดิมไว้ได้

จากกลไกการเข้าทำลายหัวเชื้อของแบคทีเรียโอเฟโก หากต้องการค้นหาหรือพัฒนาสายพันธุ์แบคทีเรียให้ต้านทานต่อแบคทีเรียโอเฟโก แนวทางที่ควรนำมาพิจารณาแบ่งออกได้เป็น 4 ประเด็น คือ (1) ยับยั้งขั้นตอน phage adsorption หรือการยึดเกาะระหว่างแบคทีเรียโอเฟโกกับโครงสร้างหรือส่วนประกอบภายนอกของแบคทีเรีย (2) ขัดขวางการปล่อย DNA ของแบคทีเรียโอเฟโกเข้าไปภายในเซลล์ของแบคทีเรีย (3) เปลี่ยนแปลง restriction/modification (R/M) system ของแบคทีเรียเพื่อให้มีความสามารถในการผลิต restriction endonuclease ที่สามารถทำลายแบคทีเรียโอเฟโกที่เป็นปัญหาได้ และ (4) ทำให้เกิด abortive infection คือ แม้ว่าแบคทีเรียโอเฟโกจะ

บุกรุกเข้าสู่เซลล์ แต่ก็ไม่สามารถเพิ่มจำนวนหรือทำให้เกิด progeny bacteriophages เกิดขึ้นภายในเซลล์แบคทีเรียได้ (Forde and Fitzgerald, 1999) อย่างไรก็ตามถ้ามองในมุมของแบคทีเรียโอเฟโกแบคทีเรียโอเฟโกเองก็สามารถพัฒนาตัวเองหรือมีการปรับตัวอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้ยังคงสภาพการมีชีวิตโดยการติดต่อกระบวนการหรือกลไกต่างๆ ที่เกิดจากการปรับตัวของแบคทีเรียเองหรือเกิดจากน้ำมือมนุษย์ตามแนวทางที่กล่าวมา และยังสามารถบุกรุกเข้าสู่เซลล์แบคทีเรียที่เป็นโฮสต์ได้ ดังนั้นงานเกี่ยวกับการค้นหาแบคทีเรียที่ติดต่อแบคทีเรียโอเฟโก หรือปรับปรุงสายพันธุ์แบคทีเรียให้ต้านทานต่อแบคทีเรียโอเฟโก จึงยังคงต้องดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (รหัสนักสัญญาทุน MRG5280133)

เอกสารอ้างอิง

- Ackermann, H. W. (2003). Bacteriophage observations and evolution. *Research in Microbiology*. 154: 245-251.
- Axelsson, L. (1998). Lactic acid bacteria: Classification and physiology. In: *Lactic Acid Bacteria: Microbiology and Functional Aspects*. S. Salminen and A. von Wright (Eds.), 2nd ed, New York: Marcel Dekker Inc. pp. 1-72.
- Barrangou, R., Yoon, S.S., Breidt, F., Fleming, H. P. and Klaenhammer, T. R. (2002). Characterization of six *Leuconostoc fallax* bacteriophages isolated from an industrial sauerkraut fermentation. *Applied and Environmental Microbiology*. 68: 5452-5458.

- Caplice, E. and Fitzgerald, G. F. (1999). Food fermentations: role of microorganisms in food production and preservation. *International Journal of Food Microbiology*. 50: 131-149.
- Capra, M. L., Quiberoni, A., Ackerman, H. W., Moineau, S. and Reinheimer, J. A. (2006). Characterization of new virulent phage (MLC-A) of *Lactococcus paracasei*. *Journal of Dairy Science*. 89: 2414-2423.
- Coffey, A., Coakley, M., McGarry, A., Fitzgerald, G. F. and Ross, R. P. (1998). Increasing phage resistance of cheese starters: a case study using *Lactococcus lactis* DPC4268. *Letters in Applied Microbiology*. 26: 51-55.
- Deutsch, S-M., Ferain, T., Delcour, J. and Lortal, S. (2002). Lysis of lysogenic strains of *Lactobacillus helveticus* in Swiss cheeses and first evidence of concomitant *Streptococcus thermophilus* lysis. *International Dairy Journal*. 12: 591-600.
- Deveau, H., Labrie, S. J., Chopin, M. C. and Moineau, S. (2006). Biodiversity and classification of lactococcal phages. *Applied and Environmental Microbiology*. 72: 4338-4346.
- De Vuyst, L. and Vandamme, E. J. (1993). Lactic acid bacteria and bacteriocin: their practical importance. In: *Bacteriocins of Lactic Acid Bacteria*. L. De Vuyst and E.J. Vandamme (Eds.) California: Blackie Academic & Professional, pp. 1-12.
- Ellis, E. L. and Delbruck, M. (1939). The growth of bacteriophage. *Journal of General Physiology*. 22: 365-384.
- Forde, A. and Fitzgerald, F. G. (1999). Bacteriophage defence systems in lactic acid bacteria. *Antonie van Leeuwenhoek*. 76: 89-113.
- Greer, G. G., Diltz, B. D. and Ackermann, H. W. (2007). Characterization of a *Leuconostoc gelidum* bacteriophage from pork. *International Journal of Food Microbiology*. 114: 370-375.
- Huang, J. C. and Starr, M. P. (1973). Effect of calcium and magnesium ions and host viability on growth of bdellovibrios. *Antonie van Leeuwenhoek*. 39: 151-167.
- Hunter, G. J. E. and Whitehead, H. R. (1940). The action of chemical disinfectants on bacteriophages for the lactic streptococci. *Journal of Dairy Research*. 11: 62-66.
- Kenny, J. G., McGrath, S., Fitzgerald, G. F. and van Sinderen, D. (2004). Bacteriophage Tuc2009 encodes a tail-associated cell wall-degrading activity. *Journal of Bacteriology*. 186: 3480-3491.
- Keogh, B. P. (1973). Adsorption, latent period and burst size of phages of some strains of lactic streptococci. *Journal of Dairy Research*. 40: 303-309.
- Leroy, F. and De Vuyst, L. (2004). Lactic acid bacteria as functional starter cultures for the food fermentation industry. *Trends in Food Science & Technology*. 15: 67-78.
- Lu, Z., Breidt, Jr. F., Fleming, H. P., Altermann, E. and Klaenhammer, T. R. (2003). Isolation and characterization of a *Lactobacillus plantarum* bacteriophage, (JL-1, from a cucumber fermentation. *International Journal of Food Microbiology*. 84: 225-235.
- Medigan, M. T., Martinko, J. M. and Parker, J. (1997). *Brock Biology of Microorganisms*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.

- Moineau, S., Borkaev, M., Holler, B. J., Walker, S.A., Kondo, J. K., Vedamuthu, E.R. and Vandenberg, P.A. (1996). Isolation and characterization of lactococcal bacteriophages from cultured buttermilk plants in the United States. *Journal of Dairy Science*. 79: 2104-2111.
- Petersen, A., Josephsen, J. and Johnsen, M. G. (1999). TPW22, a lactococcal temperate phage with a site-specific integrase closely related to *Streptococcus thermophilus* phage integrases. *Journal of Bacteriology*. 181: 7034-7042.
- Quiberoni, A., Guglielmotti, D. M. and Reinheimer, J. A. (2003). Inactivation of *Lactobacillus delbrueckii* bacteriophages by heat and biocides. *International Journal of Food Microbiology*. 84: 51-62.
- Quiberoni, A., Guglielmotti, D. M., Binetti, A. and Reinheimer, J. A. (2004). Characterization of three *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* phages and the physicochemical analysis of phage adsorption. *Journal of Applied Microbiology*. 96: 340-351.
- Sakaki, Y. and Oshima, T. (1975). Isolation and characterization of a bacteriophage infectious to an extreme thermophile, *Thermus thermophilus* HB8. *Journal of Virology*. 15: 1449-1453.
- Vegge, C. S., Brondsted, L., Neve, H., Mc Grath, S., van Sinderen, D. and Vogensen, F.K. (2005). Structural characterization and assembly of the distal tail structure of the temperate lactococcal bacteriophage TP901-1. *Journal of Bacteriology*. 187: 4187-4197.
- Watanabe, K., Takesue, S., Jin-Nai, K. and Yoshikawa, T. (1970). Bacteriophage active against the lactic acid beverage-producing bacterium *Lactobacillus casei*. *Applied Microbiology*. 20: 409-415.
- Whitehead, H. R. and Cox, G. A. (1935). The occurrence of bacteriophage in cultures of lactic streptococci. *New Zealand Journal of Dairy Science and Technology*. 16: 319-320.
- Yoon, S. S., Shin, Y.J., Her, S., Oh, D. H. (1997). Isolation and characterization of the *Lactobacillus plantarum* bacteriophage SC921. *Korean Journal of Applied Microbiology and Biotechnology*. 25: 96-101.
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Tevenphage.svg>. Retrived December 5, 2010.
- <http://www.mun.ac/biochem/course/4103/figures/ptashne/Chapter1/F>. Retrived December 7, 2010.
- <http://www.smj.ejnal.com/e-journal/word/picture/article/smj/302/pic1.JPG>. Retrived December 8, 2010.





กลไกการควบคุมน้ำและไอออนในปลาน้ำจืดและน้ำเค็ม

Osmoregulation and Ionoregulation of Freshwater and Seawater Fishes

ละอียด นาคกระแสร¹

บทนำ

ปลากระดูกแข็ง (teleosts) เป็นกลุ่มสัตว์มีกระดูกสันหลังที่มีวิวัฒนาการสามารถอาศัยอยู่ในแหล่งน้ำที่มีเกลือและไอออนละลายอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน เช่น แม่น้ำ ทะเลสาบ และมหาสมุทร เป็นต้น ปลากระดูกแข็งจึงต้องมีกลไกในการปรับตัวเพื่อช่วยรักษาความเข้มข้นของสารในร่างกายให้สมดุลกับภายนอกร่างกายเพื่อให้เซลล์ในร่างกายสามารถทำงานได้อย่างปกติ ปัจจัยที่เป็นตัวบ่งถึงความสมดุลของสารน้ำภายในร่างกายและภายนอกของปลากระดูกแข็ง คือ ความดันออสโมติก (osmotic pressure) ค่านี้เกิดจากมีปริมาณน้ำระหว่าง 2 บริเวณไม่เท่ากัน ทำให้เกิดแรงดันน้ำไหลจากด้านที่มีน้ำมากไปหาด้านที่มีน้ำน้อย ยกตัวอย่างเช่น ปลาทะเลมีปริมาณน้ำภายในตัวปลามากกว่าน้ำที่อาบอยู่รอบตัวปลา ทำให้น้ำจากภายในร่างกายซึมออกจากตัวปลา ส่วนปลาน้ำจืดกลับตรงกันข้าม น้ำภายในตัวปลาปริมาณน้อยกว่าภายนอกตัว ทำให้น้ำซึมเข้าสู่ตัวปลา ถ้าทั้งปลาทะเลและปลาน้ำจืดไม่มีการรักษาสมดุลของน้ำภายในร่างกายจะทำให้ปลาทะเลเกิดการสูญเสียน้ำและปลาน้ำจืดได้รับ

น้ำเกิน ทำให้เซลล์ในร่างกายเกิดพยาธิสภาพ สัตว์ก็จะตายอีกปัจจัยหนึ่งที่เป็นตัวบ่งความสมดุลของสารน้ำระหว่างภายในร่างกายของปลากระดูกแข็งและสิ่งแวดล้อม คือ ความเข้มข้นของสารละลาย สารจะแพร่จากบริเวณที่มีลาดความเข้มข้น (concentration gradient) มากไปหาบริเวณที่มีลาดความเข้มข้นน้อยกว่า เช่น ปลาทะเล สารและเกลือแร่จากน้ำทะเลที่มีความเข้มข้นมากกว่าจะไหลเข้าตัวปลา ส่วนในปลาน้ำจืดสารและเกลือแร่ภายในร่างกายมีลาดความเข้มข้นมากกว่าจะไหลออกจากร่างกายสู่น้ำที่อาบรอบร่างกายซึ่งมีลาดความเข้มข้นต่ำกว่านั่นเอง เนื่องจากสารตัวถูกละลายในสารละลายมีทั้งชนิดที่ไม่แตกตัว (nonelectrolyte) และชนิดที่แตกตัวได้ (electrolyte) ซึ่งสารจำพวกที่แตกตัวเป็นไอออนได้จะมีอีกค่าหนึ่งมาเกี่ยวข้อง คือ ค่าศักย์ไฟฟ้า (electrical gradient) ยกตัวอย่าง เช่น NaCl เป็นสารประกอบอิเล็กโทรไลต์หลักของร่างกาย เมื่อ NaCl ละลายน้ำ จะเกิดการแตกตัวเป็น Na^+ และ Cl^- เพราะฉะนั้นนอกจากสารดังกล่าวจะไหลตามลาดความเข้มข้นของสารแล้ว ต้องคำนึงถึงค่าความต่างศักย์ของไอออนระหว่างตัวปลา กับ

¹ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

สิ่งแวดล้อมด้วย ดังนั้นจากปัจจัยข้างต้นจึงต้องมีกลไกที่จะรักษาแรงดันของสารละลายและความดันออสโมติกให้มีความสมดุลระหว่างภายในตัวปลากับสิ่งแวดล้อมภายนอก ดังนั้นในการรักษาสมดุลของไอออนและน้ำในร่างกายของปลากระดูกแข็งที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำที่มีสารและไอออนละลายอยู่ในปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ปลาจะต้องมีกลไกในการรักษาความสมดุลดังกล่าวที่มีประสิทธิภาพเพื่อการดำรงอยู่ได้ในสิ่งแวดล้อม

การปรับตัวของปลาน้ำจืดและปลาน้ำเค็ม

นักวิทยาศาสตร์เชื่อว่าช่วงแรกของการเกิดโลกเมื่อโลกเย็นตัวลง ฝนเริ่มตกอย่างต่อเนื่องน้ำถูกเติมลงสู่มหาสมุทร ฝนที่ตกลงมาจะระเหยคืนที่มีแร่ธาตุและเกลือแร่ต่างๆ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม และแคลเซียมลงสู่มหาสมุทร กลุ่มสัตว์ที่มีกระดูกสันหลัง เช่น ปลานก สัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก สัตว์เลื้อยคลาน และสัตว์เลื้อยลูกด้วยนม มีปริมาณเกลือแร่ในเลือดเท่ากันคือ ประมาณ 9 กรัมต่อเลือด 1 ลิตร โดยปริมาณเกลือประมาณร้อยละ 77 เป็นโซเดียม และคลอไรด์ ส่วนที่เหลือเป็น ไบคาร์บอเนต โพแทสเซียม และแคลเซียม โดยที่โซเดียม โพแทสเซียม และแคลเซียมมีความสำคัญต่อการทำงานของระบบประสาท หัวใจ และกล้ามเนื้อ

ความเข้มข้นของเกลือในเลือดของปลามีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นของเกลือในมหาสมุทรที่ถูกเจือจางลงประมาณ 1 ใน 4 ของความเข้มข้นของน้ำในมหาสมุทร สัตว์ที่จะมีชีวิตรอดในมหาสมุทรได้ต้องมีกลไกในการปรับตัว ส่วนสัตว์ที่มีกระดูกสันหลังหลายชนิดที่ไม่สามารถปรับตัวได้ เช่น นก สัตว์เลื้อยลูกด้วยนม สัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก สัตว์เลื้อยคลาน จะมีการอพยพจากมหาสมุทรสู่พื้นดิน โดยมีความเข้มข้นของเลือดเท่าเดิม สัตว์กลุ่มนี้จะมีกลไกในการรักษาความเข้มข้นของเลือดโดยการดื่มน้ำจืดและดูดซึมเกลือจากอาหาร แต่ปลาชนิดที่อาศัยในน้ำที่ ต้องมีการปรับตัวเพื่อคงชีวิตรอดในน้ำที่มีความเค็มสูง

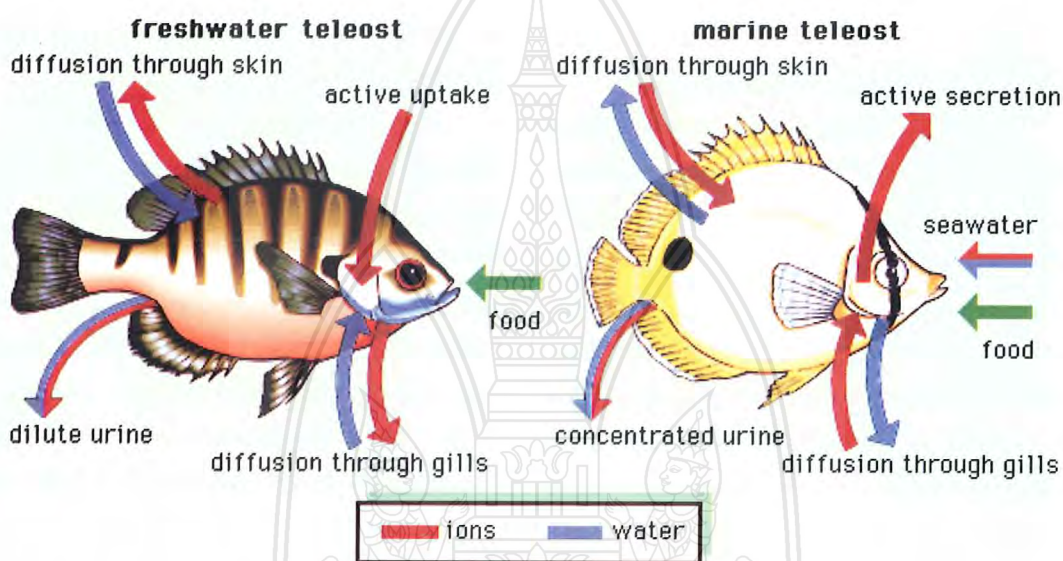
เช่น แหล่งน้ำเค็ม จะต้องมีการปรับกลไกให้สามารถทดแทนน้ำจากการออสโมซิสออกจากตัว และกำจัดเกลือส่วนเกิน ในกรณีที่มีความเค็มลดลงปลาจะต้องมีการปรับกลไกให้สามารถดูดซึมเกลือเพื่อทดแทนการสูญเสียเกลือจากการแพร่ออกจากร่างกายและกำจัดน้ำส่วนเกินออกจากตัว การทำงานของไตจะต้องมีการทำงานสอดคล้องกับแหล่งน้ำที่อยู่ของปลา เพื่อให้ปลาไม่ชีวิตรอดในแหล่งน้ำเหล่านี้ นอกจากนี้เหงือกปลาที่มีกลไกปรับการทำงานโดยการทำงานเป็นแบบดูดซึมหรือขับเกลือออกจากตัวปลา ขึ้นอยู่กับปริมาณเกลือในสิ่งแวดล้อมที่ปลาอาศัยอยู่

การเกิดวิวัฒนาการให้ปลาชนิดต่างๆ สามารถปรับตัวอาศัยในทะเล มหาสมุทร แม่น้ำ ลำธาร และบริเวณน้ำไหลได้นั้น ต้องใช้เวลานานเป็นล้านๆ ปี ปริมาณเกลือหรือความเค็มของแหล่งน้ำข้างต้นมีปริมาณและความเค็มแตกต่างกัน ทำให้สามารถจัดกลุ่มปลาตามความสามารถทนเค็มได้เป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกเป็นชนิดที่ทนเค็มได้ในช่วงแคบ (stenohaline fish) ปลาในกลุ่มนี้จะตายเมื่ออาศัยในแหล่งน้ำที่มีความเค็มแตกต่างจากความเค็มปกติที่เคยอาศัย เช่น ปลาน้ำจืด ได้แก่ ปลาทอง ปลาน้ำเค็ม ได้แก่ ปลาพุน้ำ เป็นต้น ปลาในกลุ่มที่ 2 คือ กลุ่มปลาที่ทนเค็มได้ในช่วงกว้าง (euryhaline fish) ปลาในกลุ่มนี้จะมีบางชนิดที่มีช่วงชีวิตที่อาศัยในน้ำจืดหรือน้ำเค็ม และมีการอพยพไปสู่แหล่งน้ำที่มีความเค็มตรงข้าม ปลาในกลุ่มนี้ได้แก่ ปลาแซลมอน ปลาไหล (eels) ปลา red drum ปลา striped bass และ ปลา flounder เป็นต้น ปลาในกลุ่มนี้สามารถอาศัยในน้ำที่มีช่วงความเค็มกว้าง ตั้งแต่ น้ำกร่อยจนกระทั่งน้ำเค็ม กลุ่มปลา euryhaline ต้องการช่วงเวลาในการค่อยๆ ปรับตัวหรือปรับสภาพให้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความเค็มของแหล่งน้ำ

ดังรูปที่ 1 เป็นรูปที่แสดงการไหลเข้าออกของไอออนและน้ำระหว่างตัวปลาและสิ่งแวดล้อมรอบตัวของปลาน้ำจืดและปลาน้ำเค็ม ในปลาน้ำจืด ปริมาณสารและไอออนภายในตัวปลาจะมีความเข้มข้นมากกว่าภายนอก ทำให้สารและไอออนแพร่ออกจาก

ตัวปลา ปลาน้ำจืดจะขจัดเขยการสูญเสียสารและไอออนโดยมีเหงือกช่วยดูดซึมสารและไอออนกลับเข้าสู่ตัวปลา ส่วนน้ำภายนอกตัวปลามีความดันออสโมติกมากกว่าภายในก็จะเกิดการออสโมซิสเข้าสู่ตัวปลาผ่านทางด้านผิวหนังและทางเหงือก เพื่อลดการได้รับน้ำเพิ่มจากการออสโมซิสของน้ำเข้าสู่ตัวปลาตลอดเวลา ปลาที่อาศัยอยู่ในน้ำจืดจะไม่ดื่มน้ำหรือดื่มน้ำน้อยมาก และไตจะช่วยกำจัดน้ำโดยขับออกทาง

ปัสสาวะอีกทางหนึ่ง ในปลาทะเลปริมาณสารและไอออนภายนอกตัวปลามีความเข้มข้นสูงมากกว่าภายในตัวปลา ทำให้สารและไอออนแพร่เข้าสู่ตัวปลา ส่วนความดันออสโมติกภายในตัวปลามีค่ามากกว่าภายนอก น้ำจึงออสโมซิสออกนอกตัวปลา ปลาที่อาศัยอยู่ในน้ำเค็มจึงทดแทนการสูญเสียน้ำจากการออสโมซิสออกจากร่างกายโดยการดื่มน้ำเค็มและขับสารและไอออนส่วนเกินออกทางเหงือกและทางไต



รูปที่ 1 แสดงทิศทางการออสโมซิสของน้ำและการแพร่ของไอออนเข้าออกตัวปลาทั้งในปลาน้ำจืดและปลาทะเล (ดัดแปลงจาก <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/66191/biosphere>)

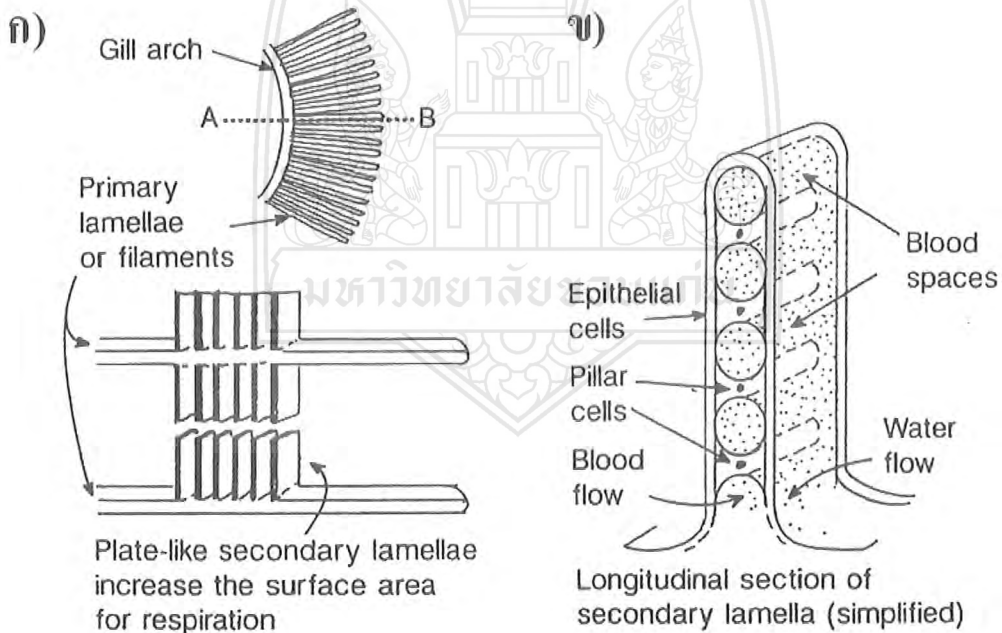
ปริมาณสารละลายหรือไอออนที่ละลายอยู่ในเลือดปลาทะเลจะมีค่าต่ำกว่าที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล โดยมีปริมาณของ NaCl น้อยกว่าน้ำทะเลประมาณร้อยละ 60 ต่อลิตร และปลาน้ำจืดจะมีปริมาณไอออนละลายอยู่ในเลือดสูงกว่าน้ำจืดรอบตัว (ค่าออสโมลาริตีของน้ำเลือด เท่ากับ 300 mOsm/L ค่าออสโมลาริตีของน้ำจืด 1 mOsm/L) (Evans et al., 2005) จากที่ได้กล่าวไปข้างต้นว่าปลาทะเลจะมีการสูญเสียและได้รับสารและไอออนเข้าตัวตลอดเวลา ส่วนปลาน้ำจืดจะตรงกันข้ามคือได้รับน้ำแต่สูญเสียสารและ

ไอออน ดังนั้น ปลาน้ำจืดจะมีการดูด NaCl จากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ตัวเพื่อให้รักษาสสมดุลของสารและไอออนในร่างกาย พบว่าการดูดซึม Cl^- ผ่านทางเหงือกไม่ขึ้นอยู่กับ Na^+ เมื่อทำการศึกษการดูดซึมของ Cl^- ของเกลือต่อไปนี้ คือ NaCl , KCl , NH_4Cl และ CaCl_2 พบว่าการดูดซึมของ Cl^- ไม่มีผลแตกต่างกัน (Krogh, 1937) แสดงว่าประจุบวกของเกลือข้างต้นนั้นไม่มีผลต่อการดูดซึมของ Cl^- และนอกจากนี้ยังมีการค้นพบว่าการดูดซึมของ Na^+ ไม่ขึ้นอยู่กับ Cl^- เช่นเดียวกัน โดยทำการทดลองกับสารดังต่อไปนี้ คือ NaCl , NaBr ,

NaHCO_3 และ NaNO_3 พบว่า ผลการดูดซึมของ Na^+ ไม่แตกต่างกัน (Perry, 1997)

ในการรักษาสมดุลของปริมาณเกลือในปลา ทะเลจะแตกต่างจากปลาน้ำจืด โดยปลาน้ำจืดจะปรับให้มีกลไกดูดเกลือเข้าสู่ร่างกายเพื่อทดแทนการสูญเสียเกลือจากการแพร่ แต่กลไกการรักษาสมดุลของปริมาณเกลือในปลาทะเลจะตรงกันข้าม คือ ปลาทะเลจะได้รับเกลือเกินจาก 2 เส้นทางหลัก คือ การแพร่ผ่านทางผิวหนังและทางเหงือก และอีกทางหนึ่ง คือ ปลาทะเลต้องดื่มน้ำทะเลเพื่อทดแทนปริมาณน้ำที่สูญเสียไปจากการออสโมซิสออกจากร่างกาย เพราะฉะนั้นปลาทะเลจะได้รับปริมาณเกลือเพิ่มจากทางนี้ด้วยเช่นกัน มีการศึกษากลไกการขับเกลือออกจากร่างกายของปลาทะเล โดยทำการวัดอัตราการดื่มน้ำโดยผสมฟีนอลเรดลงในน้ำและทำการทดสอบของเหลวภายในลำไส้และไต วัดอัตราการกรองในปลาไหล (*Anguilla rostrata*) พบว่า ปริมาณไอออน

ทั้งหมดและปริมาณของเหลวภายในลำไส้ลดลงประมาณร้อยละ 90 และ 70 ตามลำดับ โดยไอออนชนิด Na^+ และ Cl^- ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ปริมาณของ Mg^{2+} และ SO_4^{2-} เพิ่มขึ้น 2 และ 4 เท่าตามลำดับ (Butler, 1999) แสดงให้เห็นว่า เกลือ NaCl ถูกดูดซึมผ่านทางลำไส้เข้าสู่ตัวปลา การกำจัด NaCl ส่วนเกินออกจากร่างกาย พบว่า ปริมาณของ Na^+ และ Cl^- ในปัสสาวะมีค่าต่ำ คือ มีค่าความเข้มข้นเท่ากับปริมาณในน้ำเลือด (isoosmotic) แต่ปริมาณของ Mg^{2+} และ SO_4^{2-} ในปัสสาวะสูงกว่า 3-6 เท่า สรุปว่า Na^+ และ Cl^- ไม่ได้ถูกขับออกโดยไตและเรคตัม แต่ไตจะกำจัดไอออนที่เป็นชนิดเวเลนซ์สอง (divalent) เพราะฉะนั้นต้องมีอวัยวะอื่นที่นอกเหนือจากไตที่ช่วยในการขับ NaCl ซึ่งต่อมาก็ได้มีการศึกษาพบว่า เหงือกเป็นอวัยวะหลักที่ช่วยในการขับเกลือในปลาทะเลที่เป็นชนิดปลากระดูกแข็ง



รูปที่ 2 โครงสร้างของเหงือกปลา ก) รูปบนแสดงซี่เหงือก (primary lamellae หรือ filament) เรียงอยู่บนกระดูกยี่ซี่เหงือก (gill arch) รูปล่างแสดงซี่เหงือกย่อย (secondary lamellae) ข) ภาพตัดขวางของซี่เหงือกย่อย (ดัดแปลงจาก <http://www.fao.org/docrep/009/t1623e/T1623E02.htm>)

โครงสร้างของเหงือกปลา

ดังรูปที่ 2ก แสดงโครงสร้างของเหงือกปลา เหงือกปลาประกอบด้วยแกนกระดูกที่เรียกว่า กระดูกยึดซี่เหงือก (gill arch) ที่ช่วยเป็นแกนยึดซี่เหงือก (primary lamellae หรือ filament) แต่ละอันให้อยู่ติดกัน ซึ่งซี่เหงือกแต่ละอันประกอบด้วยซี่เหงือกย่อย (secondary lamellae) ลักษณะของซี่เหงือกย่อย เป็นแผ่นคล้ายซี่จันทาให้ช่วยเพิ่มพื้นผิวในการแลกเปลี่ยนแก๊สและไอออนต่างๆ รูปที่ 2ข แสดงภาพวาดโครงสร้างตัดตามยาวของซี่เหงือกย่อยแสดงหลอดเลือดที่มีเลือดบรรจุอยู่ภายใน (blood space) ทิศทางการไหลของเลือดภายในเส้นเลือดจะไหลสวนทางกับน้ำ (countercurrent flow) ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนแก๊ส O_2 และ CO_2 เกิดขึ้นบริเวณเนื้อเยื่อบุผิว (epithelium) ของซี่เหงือกย่อยและเป็นบริเวณที่มีการไหลเข้าออกของสารและไอออนระหว่างสิ่งแวดล้อมและในเหงือกของปลา

เนื้อเยื่อบุผิวของเหงือกที่ปกคลุมทั้งซี่เหงือกและซี่เหงือกย่อย ทำหน้าที่เป็นแผ่นกั้นระหว่างสิ่งแวดล้อมกับของเหลวภายในตัวปลา (extracellular fluid) และยังมีบทบาทในการทำงานด้านสรีรวิทยาของเหงือกปลาอีกด้วย เนื้อเยื่อบุผิวของเหงือกประกอบด้วยเซลล์ 3 ชนิด คือ pavement cell (PVC) mitochondrion-rich cell (MRC) และ accessory cell (AC) โดยมีปริมาณ PVC มากถึงร้อยละ 90 ของเซลล์เนื้อเยื่อบุผิวของเหงือก ซึ่งเซลล์เหล่านี้ส่วนใหญ่จะเป็นเซลล์ที่มีลักษณะแบนบาง (squamous cell) หรืออาจมีลักษณะเป็นเซลล์รูปแท่ง (columnar cell) ภายในเซลล์จะมีปริมาณของไมโทคอนเดรีย กอลจิโบดี้ และเอนโดพลาสมิกเรติคูลัม จำนวนมาก (Laurent and Dunel, 1980) แสดงให้เห็นถึงการมีกิจกรรมที่เกิดขึ้นภายในเซลล์สูงมากนั่นเอง ระหว่าง PVC ที่อยู่ข้างๆ กันจะถูกเชื่อมติดด้วย tight junction อย่างแน่นหนา โดยมีสายโปรตีนที่มาเชื่อมติดกันหลายสาย (Sardet et al., 1979)

MRC มีจำนวน mitochondria จำนวนมาก ซึ่งเป็นที่มาของการตั้งชื่อเซลล์ชนิดนี้ (Laurent and Dunel,

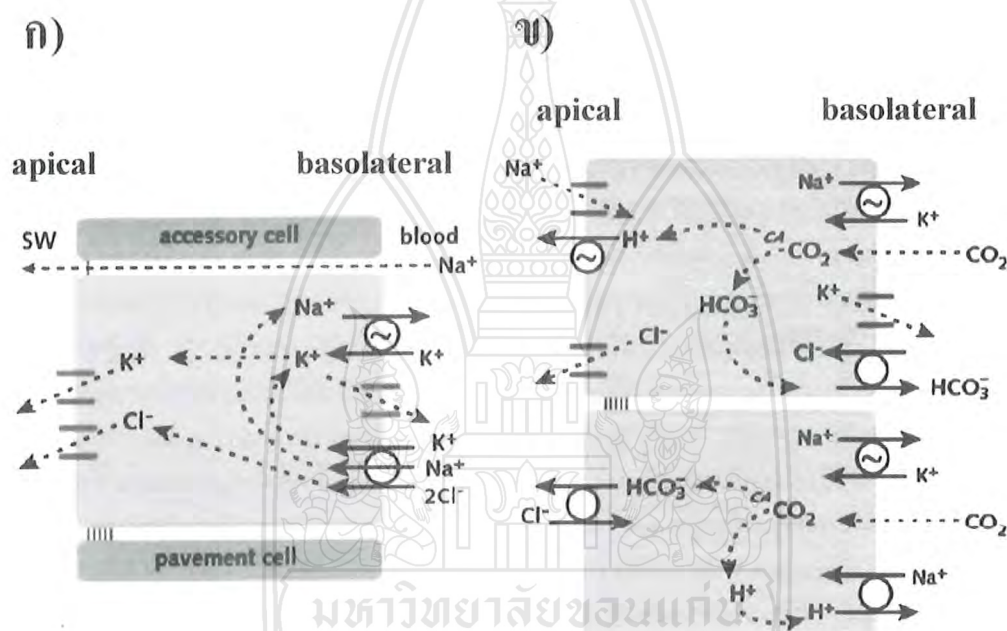
1980) เรียก MRC อีกอย่างหนึ่งว่า chloride cell เป็นเซลล์หลักที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการขนส่งสารและไอออนต่างๆ ซึ่งจะพบกระจายอยู่กับ PVC เซลล์ชนิดนี้ไม่ได้พบกระจายอยู่ที่เนื้อเยื่อบุผิวของเหงือกเท่านั้น แต่ยังพบในเนื้อเยื่อบุผิวด้านในของแผ่นปิดเหงือก (operculum) ของปลาบางชนิด เช่น ปลา Killifish (*Fundus heteroclitus*) (Degnan et al., 1977) และ ปลา tilapia (*Oreochromis mossambicus*) (Foskett et al., 1981) นอกจากนี้ยังพบในผิวหนังบริเวณกรามของปลา Goby (*Gillichthys mirabilis*) (Marshall and Nishioka, 1980) เมื่อเปรียบเทียบการเกิดเมแทบอลิซึมภายใน MRC จะเกิดสูงกว่า PVC (Perry and Walsh, 1989) ลักษณะของ MRC ภายในเซลล์จะมีถุง vesicle กระจายอยู่ด้าน apical (ด้านที่เนื้อเยื่อบุผิวของเหงือกสัมผัสกับด้านน้ำ) ส่วนด้าน basolateral (ด้านเนื้อเยื่อบุผิวที่สัมผัสกับด้านเลือด) จะมีการม้วนพับเข้าไปด้านในเพื่อช่วยเพิ่มพื้นผิวให้กับเซลล์ tight junction ที่เชื่อม MRC และ PVC จะมีลักษณะค่อนข้างหนาแน่น (Sardet et al., 1979) เซลล์ชนิดที่สามของเนื้อเยื่อบุผิวของเหงือก คือ AC จะเชื่อมติดกับ MRC ด้วย tight junction แบบหลวมๆ ซึ่งทำให้เนื้อเยื่อบุผิวของเหงือกมีคุณสมบัติที่ยอมให้สารหรือไอออนผ่านได้ดี (leaky epithelium) พบมากในปลาที่อาศัยในน้ำเค็ม ถึงแม้ว่า AC จะพบเฉพาะในปลาทะเลแต่ยังพบในกลุ่มของปลา euryhaline เช่น ปลากลุ่มแซลมอน (Pisam et al., 1989) และ tilapia อีกสองชนิด (Cioni et al., 1991) มีการเสนอว่า AC เป็นเพียงเซลล์ระยะต้นของ MRC เนื่องจากมีโครงสร้างของไซโทพลาซึมคล้ายกัน (Wendelaar Bonga and van der Meij, 1989) แต่หน้าที่ยังไม่ทราบแน่ชัด

กลไกการขนส่งไอออนผ่านเหงือก

เนื่องจากเนื้อเยื่อบุผิวของเหงือกค่อนข้างจะมีความซับซ้อน ไม่สามารถศึกษากลไกการขนส่งสารโดยใช้วิธีเดียวกันกับการวัดการขนส่งสารในผิวหนังหรือในกระเพาะปัสสาวะได้ Karnaky et al. (1976)

ค้นพบว่าเนื้อเยื่อของแผ่นปิดเหงือกของปลาบางชนิดมีปริมาณ chloride cell มากถึงประมาณร้อยละ 60 ซึ่งเหงือกมีเพียงร้อยละ 10 เท่านั้น จึงทำการศึกษากลไกการขนส่งสารและไอออนของ chloride cell โดยใช้เนื้อเยื่อของแผ่นปิดเหงือก โดยศึกษาการขนส่ง Cl^- และ Na^+ เข้าออกเซลล์ ด้วยการวัด short circuit current พบว่ามีการขับ Cl^- ออก แต่ในสภาวะนี้ ไม่มีการขนส่ง Na^+ (Karnaky et al., 1976) ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการตั้งชื่อเซลล์ว่า chloride cell การศึกษาต่อมาพบว่า การส่งออกของ Cl^- ขึ้นอยู่กับ

ภาวะที่มีออกซิเจน และปริมาณของ Cl^- และ Na^+ ทางด้านเลือด และจะลดลงเมื่อถูกยับยั้งด้วย ouabain ซึ่งเป็นสารยับยั้งโปรตีนขนส่ง Na^+/K^+ -ATPase และ furosemide สารยับยั้งโปรตีนขนส่ง Cl^- การศึกษาในช่วงเดียวกัน โดยการฉีด ouabain เข้าไปในเหงือกของปลาไหล (*Anguilla rostrata*) พบว่ายับยั้งการขนส่งทั้ง Cl^- และ Na^+ (Silva et al., 1977) ซึ่งให้เห็นการขนส่งของ Cl^- อาจะเกี่ยวข้องกับการขนส่งร่วมกันของ Na^+/Cl^- cotransporter ดังนั้น กลไกการขับ Cl^- ใน chloride cell แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงกลไกการดูดซึมและขับเกลือในเซลล์ของเหงือกปลา ก) เซลล์เหงือกปลาทะเล ข) เซลล์เหงือกปลาน้ำจืด (ดัดแปลงจาก Evans et al., 1999)

การขับเกลือ NaCl ในปลาน้ำเค็ม

เนื้อเยื่อของเหงือกปลาทะเลมีการแสดงออกของโปรตีนขนส่งชนิด Na^+/K^+ -ATPase (ดังรูปที่ 3ก) ซึ่งระดับการแสดงออกแปรผันตรงกับระดับความเค็มของแหล่งน้ำที่ปลาอาศัยอยู่ แต่มีข้อยกเว้นในปลาบางชนิด (McCormick, 1995) จาก

การศึกษาดำเนินการแสดงออกของโปรตีนนี้พบว่าอยู่ด้าน basolateral ของ MRC (Karnaky et al., 1976) การขนส่งของ Na^+ ด้วยโปรตีนขนส่ง Na^+/K^+ -ATPase จากด้านในเซลล์ออกสู่ด้านเลือด จะทำให้เกิดทางลาดความเข้มข้นและความต่างศักย์ไฟฟ้า (electrochemical gradient) ของ Na^+ ระหว่างน้ำเลือดและภายในเซลล์

ของ MRC ทำให้สิ่งทั้ง Cl^- และ Na^+ เข้าสู่เซลล์ผ่านทางด้าน basolateral ผ่านโปรตีนขนส่งชนิด $\text{Na}^+/\text{K}^+/\text{2Cl}^-$ cotransporter (รูปที่ 3ก) ซึ่งผลนี้ได้จากการทดลองในแผ่นเนื้อเยื่อผิวของแผ่นปิดเหงือกของ killifish น้ำทะเลมีสภาวะเป็นไฮเปอร์ออสโมติก (hyperosmotic) ต่อของเหลวภายในตัวปลา เพราะฉะนั้นสารหรือไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำทะเลจะแพร่เข้าสู่ตัวปลา และน้ำภายในตัวปลาจะออสโมซิสออกสู่ข้างนอก ปลาทะเลจะมีการลดการสูญเสียน้ำโดยการดื่มน้ำเพื่อทดแทนการสูญเสียน้ำ เนื่องจากน้ำที่ปลาดื่มเข้าไปเป็นน้ำเค็ม ซึ่งมีค่าความดันออสโมติกต่ำ น้ำจึงไม่สามารถดูดซึมโดยการออสโมซิสผ่านเซลล์ของลำไส้ได้ เพราะฉะนั้นลำไส้ต้องมีการดูดซึมเกลือเพื่อช่วยเพิ่มแรงดันน้ำให้น้ำสามารถออสโมซิสผ่านเข้าสู่ลำไส้เล็กได้ เป็นผลทำให้กลไกการดูดน้ำของลำไส้ได้รับปริมาณเกลือเข้าสู่กระแสเลือดด้วย ทำให้ค่าออสโมลาริตีในเลือดของปลาทะเลสูงขึ้น ปลาทะเลกำจัดเกลือ โดยที่ไตของปลาทะเลจะมีการดูดกลับของเกลือน้อยมาก ทำให้ปัสสาวะมีความเข้มข้นสูง แต่ปริมาณเกลือที่ยังคงสูงในร่างกายจำเป็นต้องมีกลไกอื่นช่วยในการกำจัดออกไป โดยเหงือกจะเป็นอวัยวะหลักที่ช่วยขับเกลือส่วนเกินออกไป Na^+ และ Cl^- จะถูกขนส่งเข้าสู่เซลล์จากด้านเลือดโดยโปรตีนขนส่ง $\text{Na}^+/\text{K}^+/\text{2Cl}^-$ cotransporter ต่อจากนั้น Cl^- จะถูกขนส่งออกทางด้าน apical สู่อานนอกตัวปลาด้วยโปรตีนขนส่งคลอไรด์ไอออน (Behnke et al., 1996) การที่ Cl^- ถูกขับออกทางด้าน apical นั้นทำให้ด้านเลือดมีความต่างศักย์ของไฟฟ้าเป็นบวก มีผลให้ Na^+ ถูกผลักให้ไหลออกจากด้านเลือดสู่ข้างนอกตัวปลาซึ่งเป็นด้านที่มีความต่างศักย์เป็นลบกว่า ผ่านทางช่องระหว่างเซลล์ (paracellular pathway) (รูปที่ 3ก) สรุปแล้วทั้ง Na^+ และ Cl^- ส่วนเกินจะถูกขนส่งออกจากร่างกายของปลาทะเล (Evans et al., 2005) ดังกลไกดังกล่าวเพื่อรักษาค่าออสโมลาริตีของเลือดให้สมดุล

การดูดเกลือ NaCl ในปลาน้ำจืด

หน้าที่หลักของเหงือกในปลาน้ำจืดที่เกี่ยวข้องกับการรักษาสมดุลของความดันออสโมติก คือ ดูดซึมเกลือหรือไอออนต่างๆ เพื่อทดแทนเกลือและไอออนที่สูญเสียจากการแพร่ออกจากตัวปลา แต่เนื่องจากความแตกต่างทางศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นของสารและไอออนระหว่างน้ำเลือดและสิ่งแวดล้อมมีความแตกต่างกันสูงมาก เพราะฉะนั้นปลาน้ำจืดจะต้องมีกลไกในการที่จะดูดสารและไอออนที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าในน้ำเข้าสู่ตัวปลาซึ่งมีความเข้มข้นมากกว่าเป็นกระบวนการขนส่งที่ด้านความต่างศักย์ไฟฟ้าและทางลาดความเข้มข้น กลไกในการดูดเกลือและไอออนในปลาน้ำจืดจะแตกต่างจากกลไกการขับสารและไอออนในปลาทะเล โดย Na^+ จะผ่านเข้าสู่เซลล์ผ่านทางด้าน apical โดยโปรตีนขนส่งโซเดียมไอออนตามศักย์ไฟฟ้า (electrical gradient) ซึ่งได้จากการปั๊มเอา H^+ ออกนอกเซลล์โดยโปรตีนขนส่ง H^+ -ATPase กระบวนการที่ขับ H^+ ออกด้วยโปรตีนขนส่ง H^+ -ATPase จะนำไปสู่การดูดซึม Na^+ เข้าสู่เซลล์กลไกนี้ยังพบที่เนื้อเยื่อผิวที่มีลักษณะแน่นหนา (tight epithelium) เช่น ผิวหนังกบ (Ehrenfeld et al., 1985) และเหงือกของปลาน้ำจืด เนื่องจาก tight junction ที่เชื่อมระหว่าง PVC และ MRC มีลักษณะที่แน่นหนา ค่าความต้านทานของเซลล์เพาะเลี้ยงที่ได้จากเหงือกปลาน้ำจืด ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเซลล์ชนิด PVC พบว่ามีค่าสูงถึง 3.5 กิโลโอมห์ต่อตารางเซนติเมตร (Wood and Pärt, 1997) ซึ่งมีความต้านทานที่สูงมากเมื่อเทียบกับเนื้อเยื่อที่มีความแน่นหนาในกลุ่มเดียวกัน แสดงว่าเนื้อเยื่อผิวของเหงือกปลาน้ำจืดจะยอมให้สารและไอออนรั่วผ่านได้น้อยมาก การที่สารหรือไอออนจะผ่านเข้าออกได้นั้นต้องผ่านกลไกที่ต้องใช้โปรตีนขนส่งบนเยื่อหุ้มเซลล์ ส่วนการขนส่ง Na^+ ออกสู่นอกเซลล์เพื่อเข้าสู่ด้านเลือดทาง basolateral ผ่านโปรตีนขนส่ง $\text{Na}^+/\text{K}^+/\text{ATPase}$ ซึ่งพบใน MRC ของเหงือกปลาน้ำจืด (Witters et al., 1996) (รูปที่ 3ข)

การดูด Cl^- ของปลาน้ำจืดพบว่า มีการแลกเปลี่ยนกับ HCO_3^- โดยโปรตีนขนส่ง $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ exchanger ซึ่งมีการแสดงออกบนเนื้อเยื่อหุ้มเซลล์ทั้งด้าน apical และ basolateral (รูปที่ 3ข) พบว่า ถ้าใช้สารยับยั้งการทำงานของโปรตีนตัวนี้จะสามารถยับยั้งการดูดซึมของ Cl^- และทำให้เกิดภาวะเลือดมีค่าความเป็นเบสสูง (metabolic alkalosis) (Goss et al., 1998) ในเซลล์ของเหงือกปลาน้ำจืดจะมีการผลิต H^+ และ HCO_3^- โดยการทำงานของเอนไซม์ carbonic anhydrase (CA) มีการศึกษาพบว่า CA มีการแสดงออกในเซลล์ MRC ของเนื้อเยื่อของแผ่นปิดเหงือกของปลา killifish (Lacy, 1983) และเมื่อมีการยับยั้งการทำงานของ CA ด้วย acetazolamide จะลดการขับของ H^+ ในเหงือกของปลา trout (Lin and Randall, 1991) ซึ่งเป็นผลนำไปสู่การลดการดูดซึมของ Na^+ ตามมานั่นเองสรุปแล้วทั้ง Na^+ และ Cl^- จะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายในปลาน้ำจืดดังกล่าวข้างต้น เพื่อรักษาค่าออสโมลาริตีของเลือดให้สมดุล

บทสรุป

ปลาที่อาศัยในแหล่งน้ำจืดและน้ำเค็มจะต้องมีการปรับกลไกในการรักษาความสมดุลของความเข้มข้นของสารและไอออนในเลือดให้สมดุลกับภายนอกร่างกายเพื่อให้เซลล์ในร่างกายสามารถทำงานได้อย่างปกติ ซึ่ง osmoregulation และ ionoregulation ของปลาทะเล คือ ปลาทะเลดื่มน้ำเพื่อชดเชยการสูญเสีย น้ำจากการออสโมซิสออกจากตัวปลา ถ้าได้มีการดูดซึม NaCl เพื่อเพิ่มความดันออสโมติกให้กับน้ำในการช่วยให้ น้ำสามารถถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ ส่วนไตทำหน้าที่ขับไอออนชนิดแวนเดอวาลี และเหงือกทำหน้าที่หลักในการขับ NaCl ส่วนเกินออกจากร่างกายในกรณีของปลาน้ำจืด น้ำจะออสโมซิสเข้าตัวตลอดเวลา ปลาน้ำจืดจะไม่มีการดื่มน้ำเพิ่มหรือได้รับน้ำเพิ่มน้อยมากจากอาหารที่กินเข้าไป ท่อของหน่วยไตจะสั้นมากทำให้มีการดูดกลับของน้ำน้อยมากปัสสาวะจึงมีปริมาณน้ำมาก เข้มข้นต่ำ ส่วนเหงือกจะช่วยในการ

รักษาระดับความเข้มข้นของสารและไอออนในร่างกาย โดยสารและไอออนในร่างกายจะแพร่ออกจากตัวปลาตลอดเวลา เหงือกจะทำหน้าที่ดูดไอออนกลับเข้าสู่ตัวปลา เพราะฉะนั้นถ้าจะพิจารณาถึงกลไกในการปรับตัวของสิ่งมีชีวิตเพื่อให้ดำรงอยู่ได้ในสิ่งแวดล้อมที่มีหลากหลาย ก็ต้องพิจารณากลไกการทำงานในระดับย่อยก็คือ ระดับเซลล์ ซึ่งเซลล์หลายๆ เซลล์รวมตัวกันทำงานกลายเป็นการทำงานของระบบอวัยวะ แม้ว่าป็นอวัยวะเดียวกัน ในกรณีคือ เหงือก เมื่อต้องทำงานในสภาวะที่ต่างกัน เซลล์ของเหงือกก็จะมีการปรับส่วนประกอบภายในเซลล์เพื่อให้เหมาะสมกับการทำงานในสภาวะนั้นๆ

เอกสารอ้างอิง

- Behnke, R., Brill, S., Rao, M. and Forbush, B. I. (1996). Upregulation of the Na-K-Cl cotransporter protein in saltwater adaptation of the rainbow trout, *Salmo gairdneri*. Bull Mt Desert Isl Biol Lab. 35: 24-25.
- Butler, D. G. (1999). Osmoregulation in North American eels (*Anguilla rostrata* LeSueur) on land and in freshwater: effects of the corpuscles of Stannius. J Comp Physiol B. 169: 139-147.
- Cioni, C., De Merich, D., Cataldi, E. and Sataudella, S. (1991). Fine structure of chloride cells in freshwater-and seawater-adapted *Oreochromis niloticus* (Linnaeus) and *Oreochromis mossambicus* (Peters). J Fish Biol. 39: 197-209.
- Degnan, K. J., Karnaky, K. J. J. and Zadunaisky, J. (1977). Active chloride transport in the in vitro opercular skin of a teleost (*Fundulus heteroclitus*), a gill-like epithelium rich in chloride cells. J Physiol. 271: 155-191.

- Ehrenfeld, J., Garcia-Romeu, F. and Harvey, B. (1985). Electrogenic active proton pump in the *Rana esculenta* skin and its role in sodium ion transport. *J. Physiol Lond.* 359: 331-355.
- Evans, D. H., Piermarini, P. M. and Choe, K. (2005). The multifunctional fish gill: dominant site of gas exchange, osmoregulation, acid-base, and excretion on nitrogenous waste. *Physiol Rev.* 85: 97-177.
- Foskett, J. K., Logsdon, C. D., Turner, T., Machen, T. E. and Bern, H. A. (1981). Differentiation of the chloride extrusion mechanisms during seawater adaptation of a teleost fish, the cichlid *Sarotherodon mossambicus*. *J Exp Biol.* 93: 209-224.
- Goss, G., Perry, S., Fryer, J. and Laurent, P. (1998). Gill morphology and acid-base regulation in freshwater fishes. *Comp Biochem Physiol.* 119A: 107-115.
- Karnaky, K. J., Kinter, L. B., Kinter, W. B. and Stirling, C. E. (1976). Teleost chloride cell. II. Autoradiographic localization of gill Na,K-ATPase in killifish *Fundulus heteroclitus* adapted to low and high salinity environments. *J Cell Biol.* 70: 157-177.
- Krogh, A. (1937). The active absorption of ions in some freshwater animals. *J Comp Physiol A.* 25: 335-350.
- Lacy, E. R. (1983). Histochemical and biochemical studies of carbonic anhydrase activity in the opercular epithelium of the euryhaline teleost, *Fundulus heteroclitus*. *Am J Anat.* 166: 19-39.
- Laurent, P. and Dunel, S. (1980). Morphology of gill epithelia in fish. *Am J Physiol. Regul Physiol.* 238: R147-159.
- Lin, H. and Randall, D. (1991). Evidence for the presence of an electrogenic proton pump on the trout gill epithelium. *J Exp Biol. Bull.* 161: 119-134.
- Marshall, W. S. and Nishioka, R. S. (1980). Relation of mitochondria-rich chloride cells to active chloride transport in the skin of a marine teleost. *J Exp Zool.* 214: 147-156.
- McCormick, S. D. (1995). Hormonal control of gill Na^+ , K^+ -ATPase and chloride cell function. In: Wood CM, Shuttleworth TJ, editors. Cellular and molecular approaches to fish ionic regulation. San Diego: Academic Press. 14: 285-315.
- Perry, S. F. (1997). The chloride cell: Structure and function in the gills of freshwater fishes. *Annu. Rev. Physiol.* 59: 325-347.
- Perry, S. F. and Walsh, P. J. (1989). Metabolism of isolated fish gill cells: contribution of epithelial chloride cells. *J. Exp Biol.* 144: 507-520.
- Pisam, M., Prunet, P. and Rambourg, A. (1989). Accessory cells in the gill epithelium of the freshwater rainbow trout *Salmo gairdneri*. *Am J Anat.* 184: 311-320.
- Sardet, C., Pisam, M. and Maetz, J. (1979). The surface epithelium of teleostean fish gills. Cellular and junctional adaptations of the chloride cell in relation to salt adaptation. *J Cell Biol.* 80: 96-117.
- Silva, P., Solomon, R., Spokes, K. and Epstein, F. (1977). Ouabain inhibition of gill Na/K/ATPase: relationship to active chloride transport. *J Exp Zool.* 199: 419-26.

- Wendelaar Bonga, S. and van der Meij, C. J .M. (1989). Degeneration and death, by apoptosis and necrosis, of the pavement and chloride cells in the gills of the teleost *Oreochromis mossambicus*. Cell Tiss Res. 255: 235-243.
- Witters, H., Berckmans, P. and Vangenechten, C. (1996). Immunolocalization of Na⁺, K⁺-ATPase in the gill epithelium of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. Cell Tissue Res. 283: 461-468.
- Wood, C. M. and P_r_t, P. (1997). Cultured branchial epithelia from freshwater fish gills. J Exp Biol. 200: 1047-1059.
- <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/66191/biosphere>
- <http://www.fao.org/docrep/009/t1623e/T1623E02.htm>





บทบาทของรีซิสตินกับโรคอ้วนและโรคเบาหวาน

Association of Resistin Role's with Obesity and Diabetes Mellitus

ธิดารัตน์ สมดี¹

บทนำ

โรคอ้วนและโรคเบาหวาน เป็นปัญหาที่พบมากขึ้น และระบาดไปทั่วโลก องค์การอนามัยโลก ระบุให้ทศวรรษที่ 21 เป็นทศวรรษแห่งการระบาดของโรคอ้วนและโรคเบาหวาน (WHO, 2004) Zimmet และคณะ (2001) ได้เน้นย้ำความสัมพันธ์ของโรคทั้งสองนี้ว่า “Diabesity” ซึ่งหมายถึง “เบาหวานอ้วน” โดยจากการศึกษาจำนวนมากพบว่าฮอร์โมนและสารที่สร้างจากเซลล์ไขมัน (จำพวกอะดิโพไซโตไคน์ (adipocytokine) หรือ อะดิโพไคน์ (adipokine)) มีบทบาทเชื่อมโยงกับความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดโรคอ้วนและโรคเบาหวาน ซึ่งก็คือ ฮอร์โมนรีซิสติน (resistin)

ปัจจุบันปัญหาโรคอ้วนมีแนวโน้มที่ความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น โดยสาเหตุหลักเกิดจากหลายปัจจัย เช่น พันธุกรรมและสิ่งแวดล้อม โดยปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ คือ อาหาร โดยอาหารที่มีปริมาณไขมันและคาร์โบไฮเดรตสูง ทำให้น้ำหนักตัวเพิ่มเร็วกว่าอาหารปกติทั่วไปและจะทำให้ระดับอินซูลินสูงขึ้น

เช่น คนอ้วนปานกลาง (ค่าดัชนีมวลกาย ระหว่าง 25.0 - 29.9 กิโลกรัม/เมตร²) มักจะบริโภคอาหารที่มีไขมันและคาร์โบไฮเดรตสูง จะมีระดับอินซูลินสูงกว่าปกติ และมีการสร้างเซลล์ไขมันเพิ่มขึ้นพร้อมทั้งมีน้ำหนักตัวมากขึ้น ส่วนคนที่อ้วนมาก (ค่าดัชนีมวลกายมากกว่า 30 กิโลกรัม/เมตร²) พบว่า ทั้งๆ ที่ไม่ได้กินอาหารที่มีไขมันและคาร์โบไฮเดรตสูง แต่ก็มีระดับอินซูลินในเลือดสูงได้ซึ่งอาจเกิดจากภาวะดื้อต่ออินซูลิน (insulin resistance) โดยพบว่า คนที่ยิ่งอ้วนมากเท่าไรก็จะมีภาวะดื้อต่ออินซูลินเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น ทั้งนี้เพราะเซลล์ไขมันมีการสร้างฮอร์โมน โดยเฉพาอย่างยิ่งรีซิสติน จะไปยับยั้งการทำงานของอินซูลิน ทำให้เกิดภาวะดื้อต่ออินซูลิน และพัฒนาเป็นโรคเบาหวานชนิดที่ไม่พึ่งอินซูลิน (non insulin dependent diabetes mellitus) ซึ่งการทำงานของรีซิสตินยังไม่ทราบกลไกที่แน่ชัด ดังนั้น การทราบบทบาทของรีซิสตินกับการเกิดโรคอ้วนและโรคเบาหวาน จึงเป็นสิ่งที่สำคัญที่จะช่วยเป็นแนวทางในการป้องกันการเกิดโรคเบาหวานต่อไป

¹ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ค.ชาวมเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

โรคเบาหวาน

โรคเบาหวานเป็นความผิดปกติของร่างกาย ในภาวะที่มีน้ำตาลในเลือดสูงกว่าปกติ เกิดจากการขาดฮอร์โมนอินซูลิน หรือเกิดจากการดื้อต่ออินซูลิน ทำให้ร่างกายไม่สามารถลดระดับน้ำตาลในเลือดให้อยู่ในสภาวะที่ปกติ น้ำตาลในเลือดที่สูงเป็นระยะเวลานาน ทำให้เกิดโรคแทรกซ้อนของอวัยวะต่างๆ ซึ่งกลไกการเกิดโรคเบาหวานเกิดขึ้นได้หลายสาเหตุ เช่น เกิดจากปฏิกิริยาภูมิคุ้มกันต่อเนื้อเยื่อตนเอง เกิดจากการทำลายเซลล์ของตับอ่อนซึ่งส่งผลทำให้เกิดภาวะการขาดอินซูลิน เกิดจากการออกฤทธิ์ของอินซูลินที่ผิดปกติ และเกิดจากเซลล์เป้าหมายที่เป็นตำแหน่งการออกฤทธิ์ของอินซูลินเกิดความบกพร่อง โรคเบาหวานที่พบบ่อย มี 2 ชนิด ได้แก่ โรคเบาหวานชนิดที่ 1 คือ โรคเบาหวานชนิดที่ต้องพึ่งอินซูลิน และโรคเบาหวานชนิดที่ 2 คือ โรคเบาหวานชนิดไม่พึ่งอินซูลิน โดยโรคเบาหวานชนิดที่ 1 (Diabetes Mellitus type1: DM type1) พบได้ร้อยละ 5-10 (American Diabetes Association, 2003) เกิดจากพยาธิสภาพที่เซลล์ไอส์เลตออฟแลงเกอร์ฮานส์ (Islet cell of langerhans) ของตับอ่อนที่ผิดปกติ ทำให้ไม่สามารถสร้างอินซูลินได้ตั้งแต่กำเนิด ซึ่งยังไม่ทราบสาเหตุที่แน่นอน หรืออาจเป็นไปได้ว่าเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาภูมิคุ้มกันต่อเนื้อเยื่อตนเอง ทำให้เบต้าเซลล์ของตับอ่อนที่เป็นตำแหน่งในการสร้างฮอร์โมนอินซูลินถูกทำลาย โดยอัตราของการทำลายรวดเร็วในเด็ก ในขณะที่จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ในผู้ใหญ่ (วารณวงศ์ถาวรวัฒน์ และวิทยา ศรีมาดา, 2549) ส่วนโรคเบาหวาน ชนิดที่ 2 ชนิดไม่พึ่งอินซูลิน พบได้ร้อยละ 90-95 (American Diabetes Association, 2003) เกิดจากหลายสาเหตุ เช่น กรรมพันธุ์ ความบกพร่องของเบต้าเซลล์ที่ตับอ่อน ภาวะดื้อต่ออินซูลิน และความบกพร่องในการออกฤทธิ์ของอินซูลิน โดยพบว่า ผู้ป่วยที่มีระดับอินซูลินสูงกว่าปกติเนื่องมาจากระดับน้ำตาลในเลือดสูง จะกระตุ้นตับอ่อนให้มีการหลั่งอินซูลินสูงมากขึ้น นอกจากนี้ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการ

ดื้อต่ออินซูลิน ได้แก่ อายุที่มากขึ้น การขาดการออกกำลังกาย และที่สำคัญคือความอ้วน (วารณวงศ์ถาวรวัฒน์ และวิทยา ศรีมาดา, 2549)

โรคอ้วน

โรคอ้วนเป็นโรคเรื้อรังชนิดหนึ่ง (WHO, 2004) เกิดจากการที่มีปริมาณไขมันในร่างกายมากกว่าปกติจนมีผลกระทบต่อสุขภาพ ทำให้เกิดโรคเรื้อรังอื่นๆ ตามมา ความอ้วนอาจอธิบายถึงภาวะที่ร่างกายมีการสะสมของไขมันมาก จนอาจทำให้มีผลเสียต่อสุขภาพ การที่มีการสะสมไขมันมากขึ้น อาจเนื่องจากร่างกายได้รับพลังงานมากเกินไปที่ร่างกายต้องการใช้ในการดำรงชีวิตตามภาวะปกติ จึงมีการสะสมพลังงานที่เกินเอาไว้ในรูปของไขมันตามอวัยวะต่างๆ โดยเฉพาะได้ผิวหนัง เป็นผลให้มีน้ำหนักตัวเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐาน อย่างไรก็ตามการสะสมไขมันในร่างกายจำเป็นต้องพิจารณาถึงบริเวณของการสะสมไขมันด้วย โดยปัจจัยเสี่ยงของการเกิดโรคต่างๆ จะขึ้นอยู่กับบริเวณของการสะสมไขมันในร่างกาย เช่น การสะสมไขมันบริเวณหน้าท้องที่เรียกว่า อ้วนลงพุง (android obesity) มีอัตราเสี่ยงต่อการเกิดโรคความดันโลหิตสูง โรคหัวใจ และที่สำคัญคือ โรคเบาหวาน (รังสรรค์ ตั้งตรงจิตร, 2550) โรคอ้วนมีความสัมพันธ์ในทางบวกกับอุบัติการณ์ของการเกิดโรคเบาหวานชนิดไม่พึ่งอินซูลิน จากการศึกษาผู้หญิงที่มีอายุระหว่าง 30 - 55 ปี ที่มีน้ำหนักเกินมาตรฐานและอ้วนมีโอกาสที่จะเป็นโรคเบาหวานชนิดไม่พึ่งอินซูลินได้สูงถึง 40 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับผู้ที่มีน้ำหนักปกติ และจะมีอุบัติการณ์ลดลงเมื่อน้ำหนักตัวลดลง (Holanda et al., 2006; Kubo and Corley, 2006; McKeigue et al., 1992; Tsigos et al., 2002) ซึ่งสาเหตุของการเกิดโรคเบาหวานชนิดไม่พึ่งอินซูลินหรือภาวะดื้อต่ออินซูลิน เกิดจากเซลล์ไขมัน (adipocyte) ไปยับยั้งการนำส่งสัญญาณของฮอร์โมนอินซูลินที่มีอยู่ในกระแสเลือด เนื่องจากเซลล์ไขมันผลิตสารจำพวกอะดิโปไซโตไคน์ หรืออะดิโปไคน์ ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการใช้พลังงานใน

ร่างกาย การเก็บและการขนส่งไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) ในเซลล์ไขมัน และควบคุมการทำงานของอินซูลินในกระบวนการเมตาบอลิซึมของไขมันและกลูโคส โดยสารอะดิโพคัยน์ ที่หลั่งออกมามีหลายชนิด ได้แก่ ทูเมอร์ นิโครซิส แฟกเตอร์-อัลฟา (tumor necrosis factor-alpha (TNF- α) อินเตอร์ลิวคิน-6 (interleukin-6) เลปติน (leptin) อะดิโพเนคติน (adiponectin) และ รีซิสติน (resistin) (Kusminski et al., 2005) ตัวที่มีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง แต่ยังไม่ทราบกลไกที่ชัดเจน คือ รีซิสติน

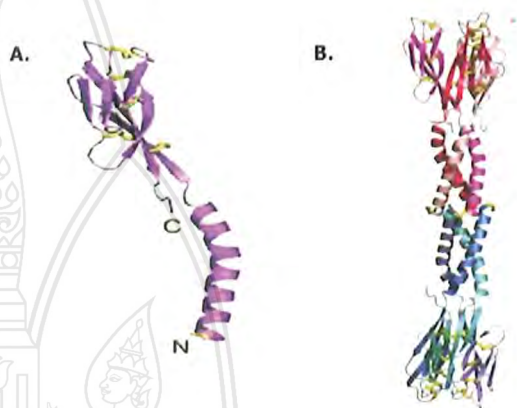
รีซิสติน

เป็นฮอร์โมนโปรตีนที่สร้างจากเซลล์ไขมัน โดยทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยงระหว่างเซลล์ไขมันกับการเกิดโรคเบาหวานชนิดไม่พึ่งอินซูลิน (Steppan et al., 2001a) รีซิสตินถูกค้นพบครั้งแรกโดย Steppan และคณะในปี 2001 (2001a) โดยฮอร์โมนชนิดนี้มีผลรบกวนการทำงานของอินซูลินเมื่อศึกษาในหนูถีบจักรที่กระตุ้นให้เป็นโรคเบาหวาน พบว่าระดับฮอร์โมนนี้มีปริมาณสูงมาก และส่งผลให้เซลล์ต่างๆ ในร่างกายหนูเกิดภาวะดื้อต่ออินซูลิน จึงตั้งชื่อฮอร์โมนชนิดนี้ว่า รีซิสติน (resistin) ซึ่งย่อมาจากการดื้อต่ออินซูลิน (resistance to insulin)

โครงสร้างของฮอร์โมนรีซิสติน

รีซิสติน เป็นเปปไทด์ชนิดหนึ่งที่อยู่ในกลุ่มโปรตีนที่มีลักษณะคล้ายรีซิสติน (resistin like molecules family) สังเคราะห์จากยีน resistin (Retn) ได้โปรตีนที่ประกอบด้วยกรดอะมิโนจำนวน 114 ตัว มีขนาดประมาณ 12.5 กิโลดาลตัน (Steppan et al., 2001b) รีซิสตินจะปลดปล่อยมาภายนอกเซลล์ไขมัน จึงพบได้ในกระแสโลหิต โครงสร้างของรีซิสตินประกอบไปด้วยกรดอะมิโนซิสเตอีน (cysteine) เป็นองค์ประกอบหลัก (cysteine rich protein) จำนวน 11 ตัว ภายในโมเลกุลของรีซิสตินประกอบด้วยสายพอลิเปปไทด์ซึ่งเชื่อมกันเป็นสายคู่ (dimer) เนื่องจากการสร้างพันธะไดซัลไฟด์ระหว่างโครงสร้างทั้งสอง

ของสายพอลิเปปไทด์ ส่วนลักษณะโครงสร้างสามมิติของรีซิสตินนั้นประกอบไปด้วยหน่วยย่อย จำนวน 6 หน่วย (complex hexameric structure) ดังรูปที่ 1 ฮอร์โมนรีซิสตินที่พบในกระแสเลือดโดยทั่วไปมีได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ มวลโมเลกุลสูงที่มี 6 หน่วยย่อย (high-molecular-mass hexamer) ซึ่งพบได้ทั่วไปในร่างกาย และมวลโมเลกุลต่ำเชิงซ้อน (low-molecular-mass complex) เป็นรูปแบบที่สามารถจับกับตัวรับ (receptor) ภายในเซลล์ของร่างกายและขัดขวางการนำส่งสัญญาณของอินซูลิน



รูปที่ 1 โครงสร้างของฮอร์โมนรีซิสติน

A) โครงสร้างเดี่ยวของรีซิสติน

B) โครงสร้าง 6 หน่วยย่อยของรีซิสติน

(ที่มา: Patel et al., 2004)

ความสัมพันธ์ระหว่างรีซิสตินกับโรคอ้วนและโรคเบาหวาน

การศึกษาวัยถึงบทบาทของรีซิสติน และความสัมพันธ์กับการเกิดโรคเบาหวานในคนที่มีน้ำหนักเกินและอ้วน อาทิ ในหนู พบว่า เนื้อเยื่อไขมันจะมีการหลั่งรีซิสตินเข้าสู่กระแสเลือดอย่างสม่ำเสมอ ในภาวะอดอาหารหนูจะมีระดับรีซิสตินลดลงและกลับคืนสู่ภาวะปกติเมื่อได้รับอาหารอีกครั้ง (Steppan et al., 2001a) และการทดลองในยากลุ่ม thiazolidinediones (TZDs) ซึ่งเป็นยาเพิ่มความไวของเซลล์ต่อระดับ

ฮอร์โมนอินซูลิน และกระตุ้นการตอบสนองต่ออินซูลิน ในเนื้อเยื่อของร่างกายแก่หนู พบว่า ยาสามารถลดการ แสดงออกของยีนรีซิสติน และระดับของรีซิสตินใน เลือดก็ลดต่ำลงด้วย จึงเป็นที่น่าสังเกตว่า รีซิสตินอาจ จะมีผลต่อการจัดวางการทำงานของอินซูลินใน ร่างกาย ดังนั้น จึงได้ให้หนูได้รับอาหารที่มีไขมันสูง เพื่อเพิ่มน้ำหนักตัวและเพิ่มปริมาณไขมันในร่างกาย จะพบว่าหนูในกลุ่มดังกล่าวมีระดับรีซิสตินเพิ่มสูงขึ้น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนั้นหนูในกลุ่มนี้ ยังเกิดภาวะดื้อต่ออินซูลินและมีระดับน้ำตาลในเลือด สูงขึ้นกว่าหนูกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้รับอาหารที่มีไขมันสูง จึงคาดว่ากรณีที่เนื้อเยื่อไขมันสูงจะมีบทบาทไปเพิ่ม ระดับรีซิสติน และรีซิสตินจะยับยั้งการทำงานของ อินซูลิน (รูปที่ 2) ซึ่งน่าจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง รีซิสตินและภาวะดื้อต่ออินซูลินในหนูที่มีน้ำหนักตัว มาก และมีการศึกษาอีกมากที่สนับสนุนเกี่ยวกับเรื่องนี้ ส่วนกลไกโดยละเอียดของการเพิ่มขนาดของก้อนไขมัน (fat mass) และการลดความไวต่อฮอร์โมนอินซูลิน ยังไม่กระจ่างชัด

รีซิสตินกับโรคอ้วน

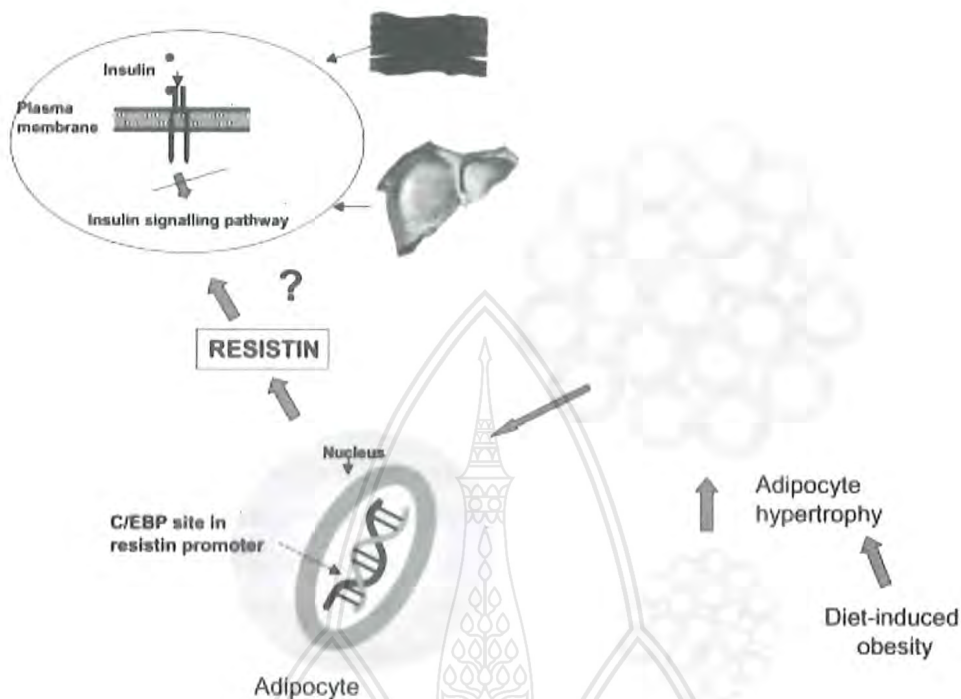
ในระยะแรกของการศึกษาเกี่ยวกับรีซิสติน ได้ ศึกษาในหนูทดลองที่มีภาวะอ้วนและมีภาวะดื้อต่อ อินซูลิน ส่วนการศึกษาในมนุษย์ พบว่าเนื้อเยื่อไขมัน เป็นที่เก็บและสร้างของรีซิสติน โดยเฉพาะไขมัน บริเวณหน้าท้อง ซึ่งพบทั้งความสัมพันธ์เชิงบวก ระหว่างระดับรีซิสตินกับปริมาณเนื้อเยื่อไขมันในร่างกาย (Zhang et al., 2002) และไม่พบความสัมพันธ์ดังกล่าว มากนักในหนู (Fukui and Motojima, 2002) อย่างไรก็ตามระดับของรีซิสตินมีความสัมพันธ์กับความอ้วน โดยมีบทบาทกระตุ้นให้ระดับอินซูลิน กลูโคสและ ไขมันสูงขึ้น (Rajala et al., 2004) ดังนั้น จึงช่วย สนับสนุนการเพิ่มขึ้นของเซลล์ไขมันอันจะส่งผลให้ ระดับรีซิสตินเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (Haugen et al., 2001) นอกจากนี้ การกระตุ้นการทำงานของรีซิสตินจะยับยั้ง การทำงานอินซูลินและเป็นผลให้มีการแบ่งตัวของเซลล์

ไขมันเพิ่มขึ้นและในทางกลับกันการเพิ่มของเซลล์ไขมัน อาจจะมีผลทำให้มีการเพิ่มขึ้นของรีซิสตินด้วย (Haugen et al., 2001) ส่วนการศึกษารีซิสตินในคนมีผลการ เปรียบเทียบระหว่างคนอ้วนและคนผอม พบว่า คนอ้วนจะมีระดับของรีซิสตินสูงกว่าคนผอม (Vendrell et al., 2004; Degawa et al., 2003) นอกจากนั้น รีซิสตินยังมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่าดัชนีมวลกาย (Body Mass Index; BMI) ปริมาณไขมันภายในร่างกาย (visceral fat) (Azuma et al., 2003; Vozarova et al., 2004) และความเข้มข้นของรีซิสตินมีความสัมพันธ์ กับค่าดัชนีมวลกาย ปริมาณเนื้อเยื่อไขมันใต้ผิวหนัง บริเวณต้นแขนส่วนหน้า (bicep skinfold thickness) และ ปริมาณเนื้อเยื่อไขมันใต้ผิวหนังบริเวณต้นแขน ส่วนหลัง (tricep skinfold thickness) (Somdee et al., 2009) นอกจากนั้นยังมีการศึกษาในผู้ป่วยเบาหวานชนิด ไม่พึ่งอินซูลินในประเทศชูดานที่ทำการศึกษแบบ cohort ซึ่งให้เห็นว่า รีซิสตินอาจจะมีผลความเกี่ยวข้อง กับการบวมอักเสบโดยไม่แสดงอาการและมีผลต่อ กลูโคสเมตาบอลิซึม ซึ่งจะชักทำให้เกิดโรคเบาหวาน ชนิดไม่พึ่งอินซูลินได้ (Al-Daghri et al., 2005)

ระดับของรีซิสตินมีผลต่อกระบวนการ เมตาบอลิซึมและตัวชี้วัดสัดส่วนต่างๆ ของร่างกาย (anthropometric parameters) (Norata et al., 2007) นอกจากนั้นระดับรีซิสตินยังมีความสัมพันธ์กับการ เกิดโรคทางเมตาบอลิซึม (metabolism syndrome) โดยเฉพาะในเพศหญิงเป็นส่วนมาก ซึ่งระดับของ รีซิสติน มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการเกิดโรคทาง เมตาบอลิซึม โดยรีซิสตินเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดโรค เบาหวานชนิดไม่พึ่งอินซูลิน (Osawa et al., 2002)

รีซิสตินกับโรคเบาหวานชนิดที่ 2

เซลล์ในร่างกายของผู้ป่วยโรคเบาหวานชนิด ที่ 2 หรือชนิดไม่พึ่งอินซูลินมักจะไม่ตอบสนองต่อการ กระตุ้นโดยฮอร์โมนอินซูลินถึงแม้ว่าจะมีฮอร์โมนชนิดนี้ อยู่ในกระแสเลือดก็ตาม เรียกภาวะดังกล่าวนี้ว่า การ ดื้อต่ออินซูลิน (insulin resistance) ทำให้เซลล์ต่างๆ



รูปที่ 2 กลไกการขัดขวางการทำงานของฮอร์โมนอินซูลิน โดยรีซิสตินที่ปลดปล่อยมาจากเซลล์ไขมัน (ที่มา: Olavi, 2002)

ไม่สามารถนำกลูโคสจากกระแสเลือดเข้าสู่เซลล์เพื่อใช้เป็นพลังงานได้ ส่งผลทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดสูง และพบว่าระดับไขมันในร่างกายจะทำให้เซลล์ต่างๆ มีการดื้อต่ออินซูลิน แต่ด้วยกลไกใดนั้นยังคงต้องมีการศึกษาต่อไป แม้ว่าการศึกษาพบตัวเชื่อมระหว่างเซลล์ไขมันกับการเกิดโรคเบาหวาน นั่นคือ ฮอร์โมนรีซิสตินที่หลั่งจากเนื้อเยื่อไขมันที่ส่งผลให้เซลล์ต่างๆ มีการดื้อต่ออินซูลินด้วย (Steppan et al., 2001a)

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรีซิสตินกับภาวะดื้อต่ออินซูลิน และโรคเบาหวานชนิดไม่พึ่งอินซูลินในมนุษย์ มีข้อสรุปที่แตกต่างกันในประชากรหลายกลุ่ม โดยส่วนใหญ่ พบว่าระดับรีซิสตินมีความสัมพันธ์กับภาวะดื้อต่ออินซูลิน ซึ่งระดับของรีซิสตินมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการเพิ่มขึ้นของฮอร์โมนอินซูลิน กลูโคส และไขมัน เมื่อทำการทดลองในหนูทดลอง *Lep ob/ob* (Rajala et al., 2004) และ

พบว่าการลดลงของเนื้อเยื่อไขมันจะมีผลเพิ่มการตอบสนองต่อการทำงานของอินซูลิน และจะช่วยลดระดับของรีซิสตินในหนูทดลอง (Hirosumi et al., 2002) รวมทั้งระดับรีซิสตินในผู้ป่วยโรคเบาหวานชนิดไม่พึ่งอินซูลิน นอกจากนั้นพบว่าระดับรีซิสตินมีความสัมพันธ์กับการเกิดโรคเบาหวาน (McTernan et al., 2003) โดยระดับรีซิสตินจะมีค่าสูงในผู้ป่วยเบาหวาน (Gharibeh et al., 2010)

ในประเทศไทยมีการศึกษาระดับของรีซิสตินในคน 4 กลุ่ม คือ กลุ่มคนอ้วนที่เป็นโรคเบาหวาน กลุ่มคนอ้วนที่ไม่เป็นโรคเบาหวาน กลุ่มคนที่ไม่อ้วนเป็นโรคเบาหวาน และกลุ่มควบคุม คือ คนที่ไม่อ้วนและไม่เป็นโรคเบาหวาน พบว่า รีซิสตินมีระดับสูงในคนอ้วนสองกลุ่ม คือ กลุ่มคนอ้วนที่เป็นโรคเบาหวานและไม่เป็นเบาหวาน เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มคนที่ไม่อ้วน และพบว่าระดับของรีซิสตินมีระดับสูงขึ้น

ในคนที่ เป็นโรคเบาหวาน ดังนั้นรีซิสตินจึงมีความสัมพันธ์กับคนที่อ้วนและคนที่ เป็นเบาหวาน (Chanchay et al., 2006)

แต่อย่างไรก็ตามพบว่ามีผลการศึกษาที่ขัดแย้ง รายงานว่าระดับของรีซิสตินมิใช่ตัวชี้วัดการเกิดภาวะคือ ต่อดินซูลินในผู้ป่วยโรคเบาหวานชนิดไม่พึ่งอินซูลิน (Lee et al., 2003) และการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของระดับรีซิสตินในผู้ป่วยโรคเบาหวานไม่มีความสัมพันธ์กับระดับ Homoeostasis model assessment for insulin resistance (HOMA-IR ซึ่งเป็นการวัดภาวะคือ ต่อดินซูลิน) เส้นรอบเอว ค่าดัชนีมวลกาย และปริมาณของโคเลสเตอรอล (Youn et al., 2004)

รีซิสตินเป็นตัวบ่งชี้ทางโลหิต

หลายงานวิจัยพยายามค้นหาหระดับรีซิสตินในคนปกติที่สุขภาพดี ซึ่งปัจจุบันยังไม่รายงานที่ระบุค่าที่แน่นอนได้ อย่างไรก็ตามพบว่า ระดับรีซิสตินในคนปกติเฉลี่ย มีค่าระหว่าง 2 - 40 นาโนกรัม/มิลลิลิตร (Baker et al., 2006; Yannakoulia et al., 2003) และระดับรีซิสตินในพลาสมาจะมีความคงตัวมาก (Reilly et al., 2005) การทำงานของรีซิสตินไม่ได้ถูกควบคุมด้วยการบริโภคอาหาร หรือการอดอาหาร แม้จะอดอยากนานถึง 48 ชั่วโมง ก็ไม่มีผลต่อระดับรีซิสติน นอกจากนั้นระดับรีซิสตินไม่มีความสัมพันธ์กับระดับพลังงานรวมทั้งหมดในร่างกาย และเพศมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับระดับรีซิสติน โดยเพศหญิงจะมีระดับรีซิสตินมากกว่าเพศชาย เนื่องจากฮอร์โมนเพศหญิงมีผลต่อระดับรีซิสติน โดยที่ระดับของรีซิสตินจะเพิ่มขึ้นในช่วงวัยรุ่น ซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของฮอร์โมนเพศโทสเทอโรน (testosterone) และเอสโตรเจน (estrogen) (Gerber et al., 2005) ซึ่งสัมพันธ์กับการศึกษาหาหระดับรีซิสตินของเด็กอ้วนในจังหวัดมหาสารคาม พบว่าเด็กหญิง มีระดับรีซิสตินเฉลี่ยเท่ากับ 6.00 ± 0.87 นาโนกรัม/มิลลิลิตร ซึ่งสูงกว่าเด็กชายที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.29 ± 0.92 นาโนกรัม/มิลลิลิตร (Somdee et al., 2009) เช่นเดียวกับระดับ

รีซิสตินของผู้ใหญ่เพศหญิงก็มีค่าสูงกว่าผู้ใหญ่เพศชาย นอกจากนี้ภาวะการหมดประจำเดือน ก็มีผลต่อระดับพลาสมารีซิสตินด้วย (Kapoor et al., 2007; Kunnari et al., 2008)

สรุป

โรคอ้วนและโรคเบาหวานเป็นโรคที่มีการเกิดสัมพันธ์กัน และปัจจัยของความสัมพันธ์มาจากอะดิโพไซโตคัยด์ คือ รีซิสติน ซึ่งยังไม่ทราบกลไกการเกิดที่ชัดเจน แต่สิ่งสำคัญ คือ คนอ้วนที่มีปริมาณไขมันมากก็จะมีระดับของรีซิสตินสูง ส่งผลทำให้เกิดภาวะคือ ต่อดินซูลิน และอาจทำให้เกิดโรคเบาหวานได้ ดังนั้นการควบคุมการบริโภคอาหารโดยเฉพาะอาหารประเภทไขมันและการบริโภคไฮเดรตให้น้อยลง ร่วมกับการควบคุมน้ำหนัก อาจเป็นวิธีที่จะช่วยลดการสร้างรีซิสตินจากเซลล์ไขมันได้ เนื่องจากอาหารดังกล่าวจะสามารถเพิ่มปริมาณเซลล์ไขมัน และจะส่งผลต่อการผลิตรีซิสติน และมีความพยายามหาหระดับของรีซิสตินที่จะใช้เป็นตัวบ่งชี้ภาวะโรคอ้วนและโรคเบาหวาน แต่ยังไม่สามารถระบุระดับของรีซิสตินได้อย่างชัดเจน ซึ่งยังคงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต เหตุผลหนึ่งก็อาจเป็นไปได้เนื่องจากการศึกษาในประชากรเฉพาะกลุ่มเล็กๆ และในจำนวนประชากรที่น้อย ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาในหลายกลุ่ม และเพิ่มขนาดตัวอย่าง (sample size) ให้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ได้ระดับของรีซิสตินที่ชัดเจนขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- รังสรรค์ ดังตรงจิตร. (2550). โรคอ้วน การเปลี่ยนแปลงทางด้านโภชนาการและชีวเคมี. กรุงเทพฯ: เจริญดีมั่นคงการพิมพ์. 54-154.
- วราภณ วงศ์ถาวรวัฒน์ และวิทยา ศรีมาดา. (2549). การวินิจฉัยและการแบ่งประเภทเบาหวาน. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 23-56.

- Al-Daghri N, Chetty R, McTernan PG, Al-Rubean K, Al-Attas O, Jones AF, et al. (2005). Serum resistin is associated with C-reactive protein and LDL cholesterol in type 2 diabetes and coronary artery disease in a Saudi population. *Cardiovasc Diabetol*. 14(10):1-6
- American Diabetes Association. (2003). Diagnosis and classification of diabetes mellitus. [online] Available: http://care.diabetesjournal.org/content/29/suppl_1/s43.full
- Azuma K, Katsukawa F, Oguchi S. (2003). Correlation between serum resistin level and adiposity in obese individuals. *Obes Res*. 8(11): 997-1001.
- Baker AR, Silva NFD, Quinn DW, Harte AL, Pagano D, Bonser RS, et al. (2006). Human epicardial adipose tissue expresses a pathogenic profile of adipocytokines in patients with cardiovascular disease. *Cardiovasc Diabetol*. 5(1): 1-7.
- Chanchay S, Tungtrongchitr R, Harnroongroj T, Phonrat B, Rungseesakorn O, Paksanont S, et al. (2006). Plasma resistin, insulin concentration in non-diabetes and diabetes overweight/obese. *Thai Int J Vit Nutr Res*. 76(3): 125-131.
- Degawa-Y M, Bovenkerk JE, Juliar BE. (2003). Serum resistin (FIZZ3) protein is increased in obese humans. *J Clin Endocrinol Metab*. 88(11): 5452-5455.
- Fukui Y, Motojima K. (2002). Expression of resistin in the adipose tissue is modulated by various factors including peroxisome proliferator-activated receptor. *Diabetes Obes Metab*. 4(5): 342-345.
- Haugen F, Jorgensen A, Drevon CA, Trayhurn P. (2001). Inhibition by insulin of resistin gene expression in 3T3-L1 adipocytes. *FEBS Lett*. 507(1): 105-108.
- Hirosumi J, Tuncman G, Chang L. (2002). A central role for JNK in obesity and insulin resistance. *Nature (London)*. (420): 333-336.
- Holanda MM, Filizola RG, Costa MJ, Andrade EM, Silva JA. (2006). Anthropometric evaluation in diabetic patients with ischemic stroke. *Arq Neuropsiquiatr*. 64(1): 14-19.
- Gerber M, Boettner A, Seidel B, Lammert A, Schuster E, et al. (2005). Serum resistin levels of obese and lean children and adolescents: biochemical analysis and clinical relevance. *J Clin Endocrinol Metab*. 90(8): 4503-4509.
- Gharibeh MY, Al Tawallbeh GM, Abboud MM, Radaideh A, Alhader AA, Khabour OF. (2010). Correlation of plasma resistin with obesity and insulin resistance in type 2 diabetic patients. *Diabetes Metab*. 36(1): 443-449.
- Kapoor D, Clarke S, Stanworth R, Channer KS, Jones TH. (2007). The effect of testosterone replacement therapy on adipocytokines and C-reactive protein in hypogonadal men with type 2 diabetes. *Eur J Endocrinol*. 156: 595-602.
- Kubo A, Corley DA. (2006). Body mass index and adenocarcinoma of the esophagus or gastric cardia: a systematic review and meta-analysis. *Cancer Epidemiol. Bio-markers Rev*. 15(5): 872-878.
- Kunnari A, Santaniemi M, Jokela M, Karjalainen AH, Heikkinen J, Ukkola O, et al. (2008). Estrogen replacement therapy decreases

- plasma adiponectin but not resistin in postmenopausal women. *Metabolism*. 57(11): 1509-1515.
- Kusminski CM, McTernan PG, Kumar S. (2005). Role of resistin in obesity, insulin resistance and Type II diabetes. *Clin Sci*. 109: 243-256.
- Lee JH, Chan JL, Yiannakouris N. (2003). Circulating resistin levels are not associated with obesity or insulin resistance in humans and are not regulated by fasting or leptin administration: cross-sectional and interventional studies in normal, insulin-resistant, and diabetic subjects. *J Clin Endocrinol Metab*. 88(10): 4848-4856.
- Marshall JA, Hamman RF, Baxter J, Mayer EJ, Fulton DL, Orleans M. (1993). Ethnic differences in risk factors associated with the prevalence of non-insulin-dependent diabetes mellitus. The San Luis Valley Diabetes Study. *Am J Epidemiol*. 137(7): 706-718.
- McKeigue PM, Pierpoint T, Ferrie JE, Marmot MG. (1992). Relationship of glucose intolerance and hyperinsulinemia to body fat pattern in south Asians and Europeans. *Diabetologia*. 35(8): 785-791.
- McTernan PG, Fisher FM, Valsamakis G. (2003). Resistin and type 2 diabetes: regulation of resistin expression by insulin and rosiglitazone and the effects of recombinant resistin on lipid and glucose metabolism in human differentiated adipocytes. *J Clin Endocrinol Metab*. 88(12): 6098-6106.
- Norata GD, Ongari M, Garlaschelli K, Raselli S, Grigore L, Catapano AL. (2007). Observations that argue against a major role for resistin in obesity. *Eur J Endocrinol*. 156(12): 279-284.
- Olavi Uk (2002). Resistin - a mediator of obesity-associated insulin resistance or an innocent bystander? *European Journal of Endocrinology*. 147(1): 571-574.
- Osawa H, Onuma H, Murakami A, Ochi M, Nishimiya T, Kato K, et al. (2002). Systematic search for single nucleotide polymorphisms in the resistin gene: the absence of evidence for the association of three identified single nucleotide polymorphisms with Japanese type 2 diabetes. *Diabetes* 51(3): 863-866.
- Patel SD, Rajala MW, Rossetti L, Scherer PE, Shapiro L. (2004). Disulfide-dependent multimeric assembly of resistin family hormones. *Sci*. 304(5674): 1154-1158.
- Reilly MP, Lehrke M, Wolfe ML, Rohatgi A, Lazar MA, Rader DJ. (2005). Resistin is an inflammatory marker of atherosclerosis in humans. *Circulation*. 111(1): 932-939.
- Rajala MW, Qi Y, Patel HR, Takahashi N, Banerjee R, Pajvani UB, et al. (2004). Regulation of resistin expression and circulating levels in obesity, diabetes, and fasting. *Diabetes*. 53(7): 1671-1679.
- Steppan CM, Bailey ST, Bhat S, Brown EJ, Banerjee RR, Wright CM, et al. (2001a) The hormone resistin links obesity to diabetes. *Nature*. 409(6818): 307-312.
- Steppan CM, Brown EJ, Wright CM, Bhat S, Banerjee RR, Dai CY, et al. (2001b) A family of tissue-specific resistin-like molecules. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 98(2): 502-506.

- Somdee T, Mahaweerawat U, Sungkamanee S. (2009) The relationship of serum resistin concentration and Body Mass Index in obese children (aged 13-15). *KKU Res J.* 14(5): 450-459.
- Tsigos C, Kyrou I, Raptis SA. (2002). Monogenic forms of obesity and diabetes mellitus. *J Pediatr Endocrinol Metab.* 15(3): 241-253.
- Vendrell J, Broch M, Vilarrasa N. (2004). Resistin, adiponectin, ghrelin, leptin, and proinflammatory cytokines: relationships in obesity. *Obes Res.* 12(6): 962-971.
- Vozarova de Courten B, Degawa-Yamauchi M, Considine RV, Tataranni PA, Volarova de Courten B. (2004). High serum resistin is associated with an increase in adiposity but not a worsening of insulin resistance in Pima Indians. *Diabetes.* 53(5): 1279-1284.
- World Health Organization. (2004) Obesity and Overweight. Facts. Geneva: World Health Organization, Available at: <http://www.who.int/dietphysicalactivity/media/en/gsf Obesity.pdf>. Accessed 16 November 2004.
- Yannakoulia M, Yiannakouris N, Matalas A, Klimis-Zacas D, Mantzoros CS. (2003) Body fat mass and macronutrient intake in relation to circulating soluble leptin receptor, free leptin index, adiponectin, and resistin concentrations in healthy humans. *J Clin Endocrinol Metab.* 88(4): 1730-1736.
- Youn BS, Yu KY, Park HJ. (2004) Plasma resistin concentrations measured by enzymelinked immunosorbent assay using a newly developed monoclonal antibody are elevated in individuals with type 2 diabetes mellitus. *J Clin Endocrinol Metab.* 89(1): 150-156.
- Zimmet P, Alberti KG, Shaw J. (2001). Global and societal implications of the diabetes epidemic. *Nature.* 414: 782-787.
- Zhang J, Qin Y, Zheng X. (2002). The relationship between human serum resistin level and body fat content, plasma glucose as well as blood pressure. *Zhonghua Yi Xue Za Zhi.* 10(23): 1609-1612.



การตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงด้วยวิธีการทางเคมีและแสง

The Detection of Latent Fingerprints by Chemical and Optical Methods

อารีย์ ชูคำ ^{1,2*} และ วรวิทย์ วงศ์นิรมัยกุล ^{2,3}

บทนำ

การตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงด้วยวิธีการทางเคมีอาศัยพื้นฐานของปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารเคมีที่อยู่บนรอยประทับลายนิ้วมือกับสารเคมีที่เพิ่มเติมเข้าไปในสภาวะที่เหมาะสม เกิดเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าหรือสามารถตรวจวัดด้วยเครื่องมืออื่นๆ ได้ วิธีการมาตรฐานที่ใช้กันทั่วไปคือ การใช้สารนินไฮดรินและสารที่มีโครงสร้างคล้ายคลึง ได้แก่ สาร 1,8-diazafluoren-9-one (DFO) และ 1,2-indanedione เป็นต้น ปฏิกิริยาทางเคมีของสารนินไฮดรินกับกรดอะมิโนบนรอยประทับลายนิ้วมือจะเกิดช้า จึงมักมีการเร่งโดยการให้ความร้อนซึ่งต้องใช้ความร้อนระดับสูงเพราะอาจทำให้เกิดการรบกวนจากองค์ประกอบอื่นๆ บนวัสดุได้ และหากใช้เกลือของโลหะทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสารนินไฮดริน จะทำให้สารประกอบเชิงซ้อนที่ได้มีความเข้มของการลูมิเนสเซนส์ดีกว่าและมีความเสถียรมากกว่าด้วย ทำให้สามารถเพิ่มความไวของการวิเคราะห์ได้ การเปรียบเทียบการใช้สารนินไฮดริน DFO และ

1,2-indanedione พบว่า ผลิตภัณฑ์ของนินไฮดรินจะมีสีเข้มกว่าผลิตภัณฑ์ของ 1,2-indanedione และ DFO จึงให้รอยลายนิ้วมือที่คมชัดกว่าเมื่อมองด้วยตาเปล่า แต่หากพิจารณาการลูมิเนสเซนส์ทั้ง DFO และ 1,2-indanedione จะมีความไววิเคราะห์สูงกว่าผลิตภัณฑ์จากนินไฮดริน

นอกจากนี้ปัจจุบันมีการนำสารที่มีความเป็นพิษน้อย เช่น สารอินทรีย์จากธรรมชาติ ได้แก่ สาร ginipin และ lawsone มาใช้ เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีอันตราย เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม รวมทั้งมีการพัฒนาอุปกรณ์ทางแสงเพื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงภาคสนามและมีการนำเทคโนโลยีภาพมาใช้ร่วมกับสเปกโทรสโกปีเชิงโมเลกุลทำให้ผลการวิเคราะห์ทั้งข้อมูลทางแสงและข้อมูลภาพ

ลายนิ้วมือ

ลายนิ้วมือเป็นหนึ่งในพยานหลักฐานที่ดีที่สุดของแต่ละบุคคลที่สามารถพิสูจน์เอกลักษณ์บุคคลได้แก่ผู้กระทำความผิดและผู้เกี่ยวข้องกับคดีได้ เพราะลายนิ้วมือ

¹ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

² สถานวิจัยการวิเคราะห์สารปริมาณน้อยและไบโอเซนเซอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

³ คณะเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตภูเก็ต จ.ภูเก็ต 83120

* Corresponding Author, E-mail: aree.c@psu.ac.th

มีรูปแบบเฉพาะ และไม่เปลี่ยนแปลง (Saferstein, 2004; Seah et al., 2005) ดังนั้นงานวิจัยทางนิติวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดลายนิ้วมือจึงได้รับความสนใจอย่างยิ่ง โดยเฉพาะการตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงซึ่งเป็นลายนิ้วมือที่ตรวจพบในสถานที่เกิดเหตุบ่อยที่สุดและตรวจสอบได้ยากที่สุด (Jelly et al., 2009; Lennard, 2001; Wang et al., 2009) เพราะเป็นลายนิ้วมือที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าหรือมองเห็นได้ไม่ชัดเจน จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการเพิ่มเติมเพื่อให้ลายนิ้วมือสามารถมองเห็นและตรวจสอบได้

เนื่องจากการตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ วิธีการทางกายภาพ เช่น การใช้ผงฝุ่น การใช้สารแขวนลอยของอนุภาคนาโนเล็ก การใช้โลหะเกาะกับพื้นผิวในสถานะสุญญากาศ (vacuum metal deposition) เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดของการตรวจวัดลายนิ้วมือแฝงด้วยวิธีทางกายภาพนี้ ได้รวบรวมไว้ในบทความในส่วนแรกแล้ว ดังนั้นในบทความส่วนที่สองนี้จึงได้รวบรวมรายละเอียดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้วิธีทางเคมีในการตรวจสอบลายนิ้วมือแฝง รวมทั้งมีการนำเสนอข้อมูลเกี่ยวกับการใช้วิธีการทางแสง (optical methods) ที่มีรายงานการวิจัยในปัจจุบันอีกด้วย

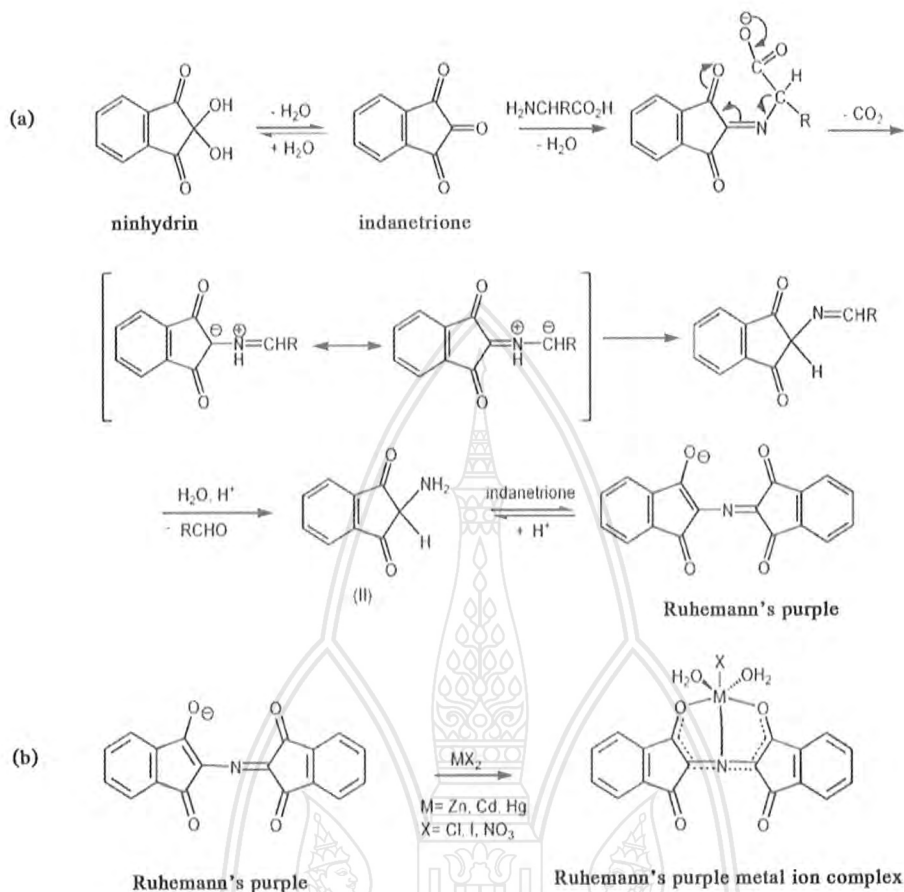
การตรวจสอบทางเคมี

การตรวจสอบลายนิ้วมือด้วยวิธีทางเคมีอาศัยพื้นฐานของปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารเคมีที่อยู่บนรอยประทับลายนิ้วมือ ได้แก่ กรดอะมิโนหรือกรดไขมัน เป็นต้น กับสารเคมีที่เพิ่มเติมเข้าไปในสถานะที่เหมาะสม โดยผลิตภัณฑ์สุดท้ายสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า เช่น เกิดสี หรือสามารถตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ทางแสงได้ เช่น เกิดผลิตภัณฑ์ที่ลูมิเนสเซนส์ได้ เป็นต้น วิธีการตรวจสอบทางเคมี ได้แก่ การใช้สารนินไฮดริน (ninhydrin) และสารที่มีสูตรโครงสร้างคล้ายคลึง เช่น สาร 1,8-diazafluoren-9-one (DFO) และ 1,2-indanedione เป็นต้น การใช้สารอินทรีจักษ์ธรรมชาติ เช่น สาร ginipin และ lawsone

การใช้สารนินไฮดริน (Ninhydrin)

ปฏิกิริยาทางเคมีที่นิยมนำมาใช้ในการตรวจสอบลายนิ้วมือมากที่สุด คือ ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างกรดอะมิโนกับสารนินไฮดริน ปรากฏเป็นลายนิ้วมือสีม่วง (รูปที่ 1a) (Almog et al., 2000; Friedman, 2004; Friedman and Williams, 1974; Hansen and Joullie, 2005; Kobus et al., 2002) โดยมีสภาวะที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นของนินไฮดริน 0.5% (w/v) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ถึง 48 ชั่วโมง ในสภาวะที่ความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 50 ถึง 80 (Lennard et al., 1987)

เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้าจึงมักมีการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ความร้อน ซึ่งอาจทำให้นินไฮดรินทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ที่ปนเปื้อนอยู่บนพื้นผิว ทำให้ความคมชัดของลายนิ้วมือนลดลงและอาจทำลายตัวอย่างลายนิ้วมือได้ นอกจากนี้วิธีนี้ยังมีข้อจำกัดเรื่องความคมชัดและความไวของสารวิเคราะห์ จึงมีการนำเกลือของโลหะ เช่น zinc chloride มาทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์จากสารนินไฮดริน (รูปที่ 1b) เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่สามารถฟลูออเรสเซนส์ภายใต้แสงเลเซอร์จากอาร์กอนและลูมิเนสเซนส์ได้เมื่อกระตุ้นด้วยแหล่งกำเนิดแสงสีนئون (xenon arc lamp) ซึ่งสามารถเพิ่มความไววิเคราะห์และทำให้ผลิตภัณฑ์เสถียรขึ้นอีกด้วย (Conn et al., 2001; Davies et al., 1995a; Davies et al., 1995b) หากนำไปในโครเจนเหลวมาหล่อเย็น พบว่า ความเข้มของการลูมิเนสเซนส์จะเพิ่มมากขึ้น ทำให้สามารถตรวจวัดลายนิ้วมือที่มีสารเคมีจากรอยประทับต่างๆ ได้ (Almog et al., 2007; Herod and Menzel, 1982) จากการศึกษาพบว่า สภาวะแวดล้อมชนิดของพื้นผิว แรงกดและระยะเวลาที่เกิดรอยประทับจะส่งผลต่อความคมชัดของลายนิ้วมือที่ตรวจสอบได้ โดยแรงกดและเวลาของการสัมผัสจะแปรผันตรงกับคุณภาพของลายนิ้วมือ (Jasuja et al., 2009)

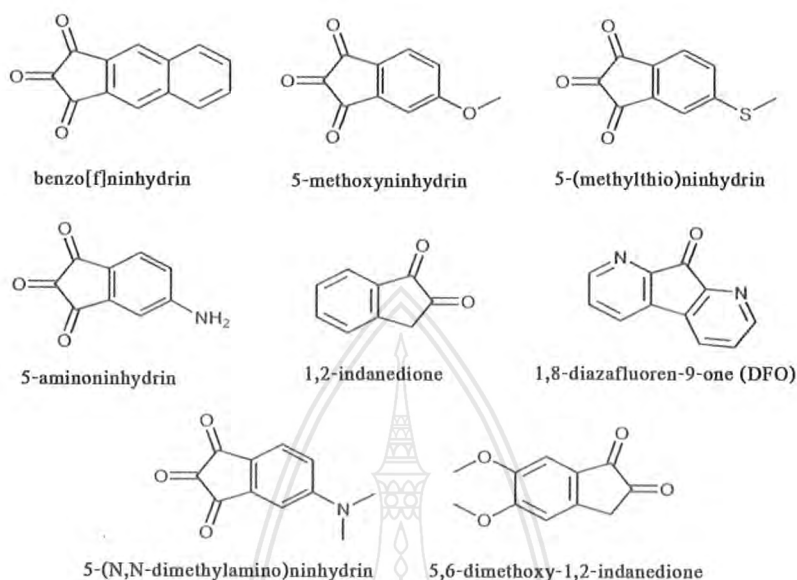


รูปที่ 1 (a) ปฏิกิริยาระหว่างกรดอะมิโนจากลายนิ้วมือและนินไฮดรินให้ผลิตภัณฑ์สีม่วง (b) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยากับเกลือของโลหะ โดยให้ผลิตภัณฑ์สีม่วงเช่นเดียวกัน แต่มีความเสถียรและความไววิเคราะห์มากขึ้น (Almog et al., 2000; Friedman, 2004; Friedman and Williams, 1974; Hansen and Joullie, 2005; Jelly et al., 2009; Kobus et al., 2002)

การใช้สารที่มีสูตรโครงสร้างคล้ายคลึงกับนินไฮดริน (Ninhydrin analogues)

นอกจากสารนินไฮดรินแล้วยังมีการใช้สารเคมีที่มีสูตรโครงสร้างคล้ายคลึงกับสารนินไฮดริน ได้แก่ 1,8-diazafluoren-9-one (DFO), 1,2-indanedione,

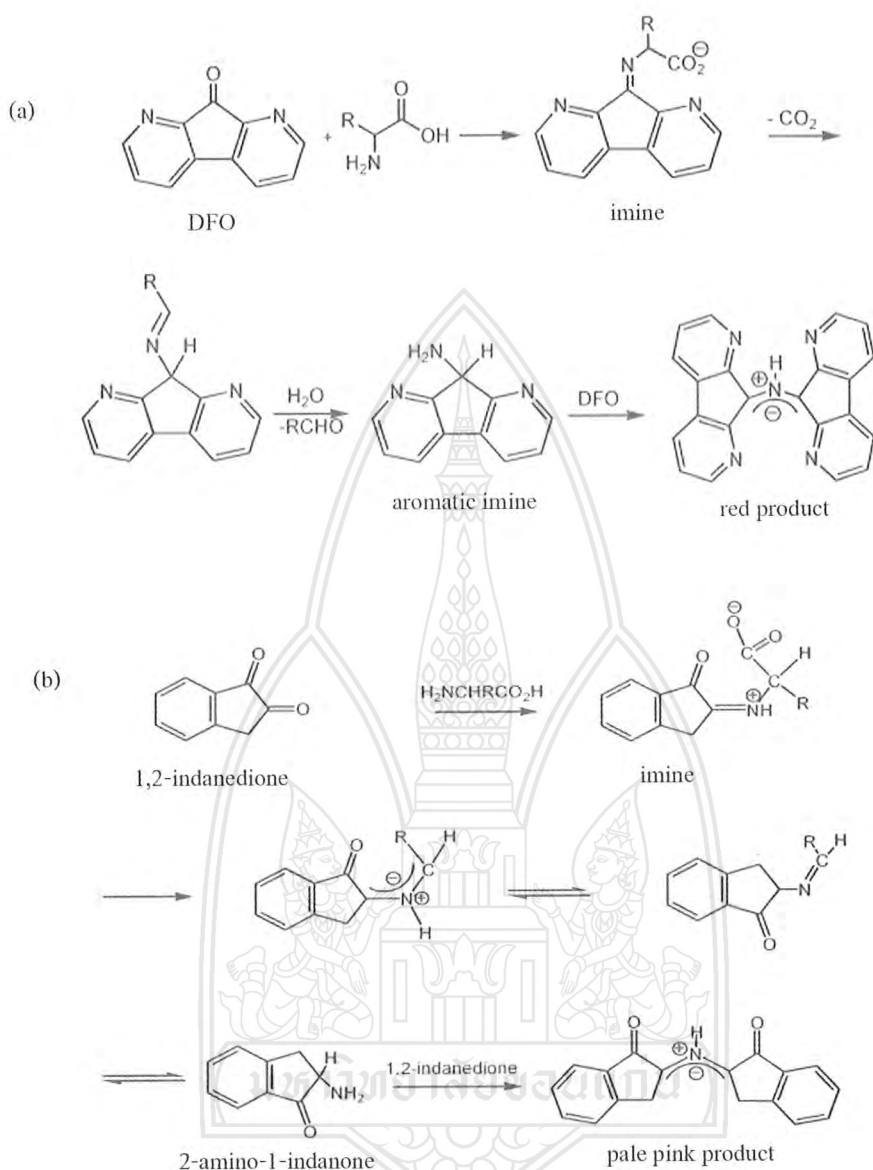
benzo[f]ninhydrin, 5-methoxyninhydrin, 5-(methylthio)ninhydrin, 5-aminoninhydrin, 5-(N,N-dimethylamino)ninhydrin, 5,6-dimethoxy-1,2-indanedione (รูปที่ 2) (Almog et al., 2008; Hansen and Joullie, 2005; Hauze et al., 1998)



รูปที่ 2 สารเคมีที่มีสูตรโครงสร้างคล้ายคลึงกับสารนินไฮดริน (Almog et al., 2008; Hansen and Joullie, 2005; Hauze et al., 1998; Jelly et al., 2009)

โดยเฉพาะอย่างยิ่ง 1,8-diazafluoren-9-one (DFO) และ 1,2-indanedione ซึ่งได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก กลไกการเกิดปฏิกิริยาของ DFO และ 1,2-indanedione แสดงดังรูปที่ 3 (Alaoui et al., 2005; Grigg et al., 1990; Petrovskaia et al., 2001; Pounds et al., 1990; Taylor and Joullie, 1998; Wilkinson, 2000) โดยปฏิกิริยาของ DFO ให้ผลิตภัณฑ์สีแดงอ่อนกว่าผลิตภัณฑ์ของนินไฮดริน ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวสามารถลูมิเนสเซนส์ได้ (λ_{ex} 430-580 nm, λ_{em} 560-620 nm) (Masters et al., 1991; Stoilovic, 1993) โดยมีความเข้มลูมิเนสเซนส์ดีกว่าผลิตภัณฑ์ของนินไฮดริน (Grigg et al., 1990; Pounds et al., 1990; Stoilovic, 1993) การนำเกลือของโลหะมาใช้เพื่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก DFO ไม่มีผลต่อการเพิ่มความเข้มของการลูมิเนสเซนส์ (Conn et al., 2001) ปฏิกิริยาของ DFO จำเป็นต้องใช้ความร้อน (100 องศาเซลเซียส 10 นาที หรือ 180 องศาเซลเซียส 10 วินาที) แต่ต้องไม่มากเกินไปเพราะสามารถทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการลูมิเนสเซนส์น้อยลงได้ (Masters

et al., 1991; Stoilovic, 1993) ในขณะที่สารเคมีที่ละลาย DFO มีความสำคัญต่อความเสถียรของผลิตภัณฑ์ โดยส่วนใหญ่ต้องใช้สารเคมีผสม เช่น เมทานอล กรดอะซิติก และ CFC 113 (Pounds et al., 1990) โดยจำเป็นต้องมีตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น เมทานอล เพื่อทำให้เกิด hemiketal ที่พร้อมจะทำปฏิกิริยา (Wilkinson, 2000) แต่ต้องไม่เกินร้อยละ 10 เพื่อหลีกเลี่ยงการละลายของสารอื่นๆ บนวัตถุพยาน เช่น หมึก เป็นต้น (Stoilovic, 1993) เนื่องจาก CFC 113 เป็นตัวทำละลายที่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม จึงมีการนำตัวทำละลาย HFE 7100 มาใช้ ซึ่งพบว่า ให้ลายนิ้วมือที่มีคุณภาพเทียบเท่าหรือมากกว่า CFC 113 (Didierjean et al., 1999) ในขณะที่ท้องครตำรวจของประเทศออสเตรเลีย (Australian Federal Police) ได้แนะนำส่วนผสมของ DFO ได้แก่ DFO 0.72 g L⁻¹ ใน 9% ตัวทำละลายมีขั้ว (ไดคลอโรมีเทน เมทานอลและกรดอะซิติก) ใน HFE 4310 mee (1,1,1,2,3,4,4,5,5,5-decafluoropentane) (Stoilovic and Lennard, 2006)



รูปที่ 3 ปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างกรดอะมิโนจากถั่วเหลืองกับ (a) 1,8-diazafluoren-9-one (DFO) ให้ผลิตภัณฑ์สีแดง (b) 1,2-indanedione ให้ผลิตภัณฑ์สีชมพูอ่อน (Alaoui et al., 2005; Grigg et al., 1990; Jelly et al., 2009; Petrovskaja et al., 2001; Pounds et al., 1990; Taylor and Joullie, 1998; Wilkinson, 2000)

อย่างไรก็ตามทั้งวิธีการนินไฮดรินและการใช้ DFO มีปัญหาที่ทราบกันโดยทั่วไป คือ การประยุกต์ใช้งานกับกระดาษไวความร้อน (thermal paper) เช่น กระดาษสำหรับแฟกซ์และบิลเงินสด จะทำให้กระดาษด้านที่ไวต่อความร้อนกลายเป็นสีดำ (เนื่องมาจากการใช้ตัวทำละลายที่มีขั้วและการใช้อุณหภูมิ) สัญญาณพื้นหลังจึงเข้มเกินไป ทำให้ปรากฏลายนิ้วมือไม่ชัดเจน (Schwarz, 2003; Schwarz and Klenke, 2007) ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของหลักฐาน ปัญหาดังกล่าวนี้สามารถแก้ไขได้โดยการล้างด้วยอะซิโตน แต่ลายนิ้วมือที่ปรากฏจะจางกว่าปกติ (Schwarz and Klenke, 2007) หรือการจุ่มกระดาษไวความร้อนลงในเอทานอลก่อนการใช้สารนินไฮดรินหรือ DFO (Home Office Scientific Development Branch, 2006) หรือการใช้ตัวทำละลายเฮปเทน (heptane) ซึ่งทำให้ความเสียหายของกระดาษลดลง แต่อาจทำให้มีหมึกหลุดออกมาได้ แต่หากใช้ HFE 7100 จะทำให้ความเสียหายเกิดขึ้นน้อยและสีของผิวกระดาษเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด (Stimac, 2003) นอกจากนี้ Schwarz และ Klenke (2007) ได้รายงานการใช้สารละลาย G3 ซึ่งมีสารประกอบกลุ่ม pyrrolidone ประกอบอยู่ด้วยทำให้สามารถลดการเกิดสีด้านบนกระดาษไวความร้อนได้ โดยไม่จำเป็นต้องเอาชั้นของกระดาษที่ไวต่อความร้อนออกไป และได้ลายนิ้วมือที่คมชัด ราคาไม่แพง

ในขณะที่ 1,2-indanedione จะให้ผลิตภัณฑ์สีชมพูอ่อนซึ่งสามารถลูมินสเซนส์ได้ที่อุณหภูมิห้อง (Hauze et al., 1998; Ramotowski et al., 1997; Taylor and Joullie, 1998) และเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเกลือของโลหะ ให้ผลิตภัณฑ์สีชมพูเข้มขึ้น มีความเข้มของการลูมินสเซนส์สูงขึ้นและเก็บได้นานขึ้น (Hauze et al., 1998; Payne et al., 2005; Ramotowski et al., 1997; Wallace-Kunkel et al., 2007) โดยสามารถผสมเกลือของโลหะลงในสารละลาย 1,2-indanedione ได้โดยตรง แต่จะทำให้สารละลายมีอายุการใช้งานสั้นลง (Hauze et al., 1998)

จากการศึกษาพบว่า หากนำลายนิ้วมือที่ทำปฏิกิริยากับ 1,2-indanedione ไปปรับแสงแดดเป็นเวลา 28 วัน ความเข้มของการลูมินสเซนส์จะลดลงจากเดิมร้อยละ 20 ในขณะที่ตัวอย่างที่ไม่ได้รับแสงแดดจะอยู่ได้นานขึ้น และหากมีการก่อสารประกอบเชิงซ้อนกับเกลือของโลหะ การสลายตัวไม่ได้ช้าลง ซึ่งให้เห็นว่าการสลายตัวของผลิตภัณฑ์เกิดจากปฏิกิริยา photolysis ของผลิตภัณฑ์เอง (Gardner and Hewlett, 2003)

สำหรับส่วนผสมของสารละลาย 1,2-indanedione มีการรายงานการใช้กรดอะซิติกที่ขัดแย้งกัน โดย Wiesner และคณะ (2001) พบว่า การใช้ 1,2-indanedione ที่ปราศจากกรดอะซิติกให้ความคมชัดของลายนิ้วมื้อมากกว่าการใช้กรดอะซิติก ในขณะที่กลุ่มวิจัยส่วนใหญ่ยังใช้กรดอะซิติกอยู่ ผลการทดลองที่ขัดแย้งกันอาจเกิดจากความแตกต่างของความชื้นสัมพัทธ์และปริมาณความชื้นของวัสดุซึ่งมีอิทธิพลต่อความคมชัดของลายนิ้วมือ (Russell et al., 2008; Stoilovic et al., 2007; Wallace-Kunkel et al., 2007) และหากใช้สารละลาย 1,2-indanedione กับกระดาษแบบไวความร้อน พบว่า การใช้ เอทิลอะซิเตต (ethyl acetate) และ HFE 7100 จะให้ประสิทธิภาพคงที่กับกระดาษไวความร้อนหลายชนิด (Stimac, 2003; Wiesner et al., 2001)

ปฏิกิริยาของ 1,2-indanedione เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 24 ถึง 48 ชั่วโมง แต่สามารถเร่งให้เกิดเร็วขึ้นได้โดยใช้ความร้อน โดยพบว่าความร้อนจะให้ความเข้มของการลูมินสเซนส์ของผลิตภัณฑ์ดีกว่าการอบ (Roux et al., 2000; Wallace-Kunkel et al., 2007) โดยสภาวะที่แนะนำคือ รีดที่อุณหภูมิ 160 ถึง 165 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 วินาที (Stoilovic and Lennard, 2006)

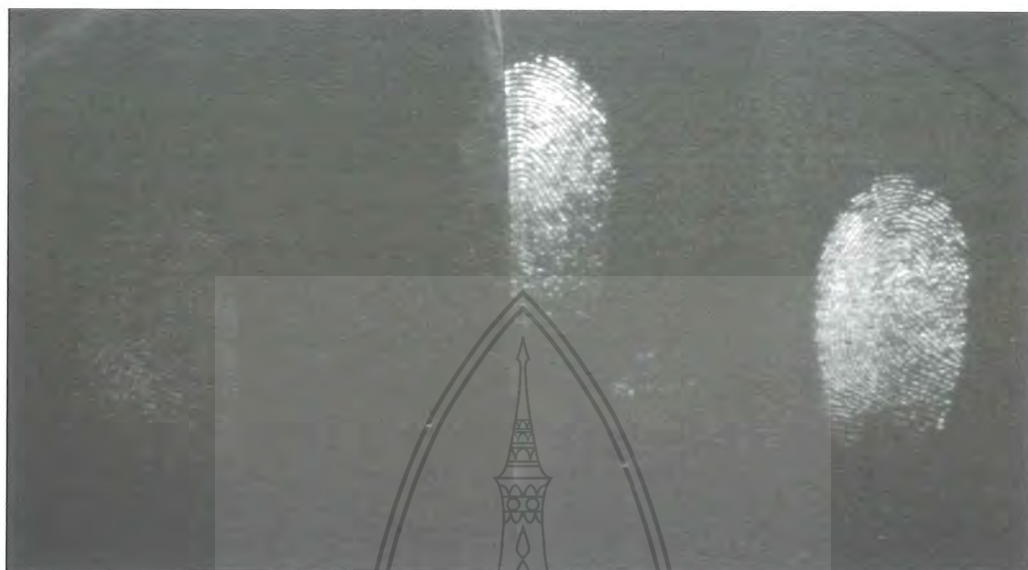
เมื่อเปรียบเทียบการใช้นินไฮดริน DFO และ 1,2-indanedione พบว่า ผลิตภัณฑ์ของนินไฮดรินมีสีเข้มกว่า 1,2-indanedione และ DFO ดังนั้นเมื่อมองด้วยตาเปล่า ลายนิ้วมือที่ปรากฏจากผลิตภัณฑ์ของนินไฮดรินจึงให้ลายนิ้วมือที่คมชัดกว่า แต่หาก

พิจารณาการลูมิเนสเซนซ์ พบว่า ทั้ง DFO และ 1,2-indanedione จะมีความไววิเคราะห์สูงกว่าผลิตภัณฑ์จากนินไฮดริน (รูปที่ 4) แต่หากเปรียบเทียบระหว่าง DFO และ 1,2-indanedione พบว่า มีความขัดแย้งกันมาก เช่น Bicknell และ Ramotowski (2008) พบว่า การใช้ 1,2-indanedione ร่วมกับเกลือของโลหะ (ความเข้มข้น 7.4% v/v) โดยมีปิโตรเลียมอีเทอร์ เป็นตัวทำละลาย จะให้ความเข้มของลูมิเนสเซนซ์สูงกว่าการใช้ DFO ถึง 4 เท่า สอดคล้องกับ Wallace-Kunkel และคณะ (2007) ซึ่งพบว่า การใช้ 1,2-indanedione ให้การลูมิเนสเซนซ์ที่เข้มกว่า DFO (รูปที่ 5) ในขณะที่

ที่ Wilkinson et al. (2003) พบว่า DFO ให้ผลการวิเคราะห์ดีกว่าความขัดแย้งเรื่องผลของการทดลองนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของส่วนผสมของสารละลายและสภาวะที่ใช้ เช่น การใช้เกลือของโลหะ ความเข้มข้นของสารละลาย วิธีการให้ความร้อน เป็นต้น รวมทั้งสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณความชื้นบนวัสดุ เป็นต้น โดยการใช้นินไฮดรินต้องการสารเคมีจากรอยประทับอย่างน้อย 100 ถึง 200 ng ในขณะที่หากใช้สาร DFO ร่วมกับเทคนิคลูมิเนสเซนซ์จะต้องการสารเคมีจากรอยประทับเพียง 1 ถึง 10 ng เท่านั้น (Lennard, 2001)



รูปที่ 4 การตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงที่มีอายุ 3 เดือน โดยใช้ 1,2-indanedione (ซ้าย) และนินไฮดรินร่วมกับเกลือของสังกะสี (Zinc chloride) (ขวา) ภายใต้การฟลูออเรสเซนซ์ (Wallace-Kunkel et al., 2007)



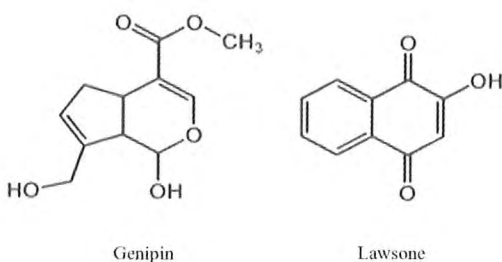
รูปที่ 5 การตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงโดยใช้วิธี DFO (ซ้าย) 1,2-indanedione (ขวา) ภายใต้การฟลูออเรสเซนซ์ (λ_{ex} 440-480 nm, λ_{em} 610 nm) (Wallace-Kunkel et al., 2007)

การใช้สารอินทรีย์ธรรมชาติ

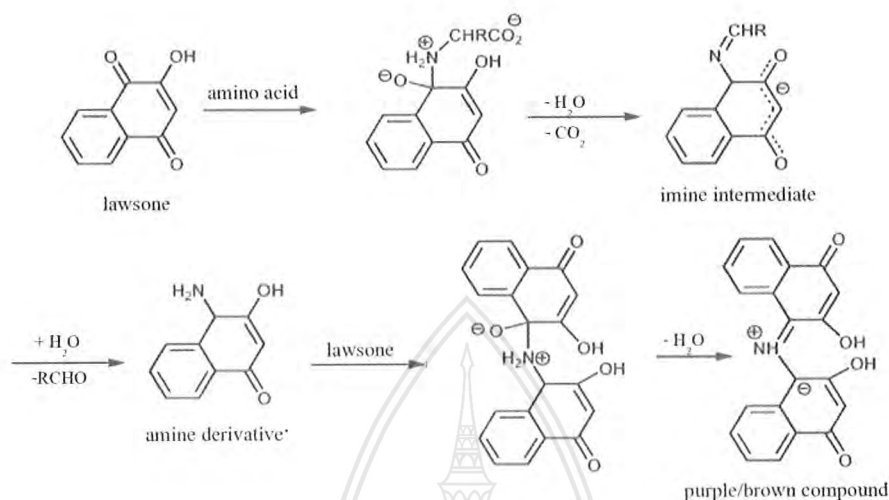
สารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีรายงานการใช้สำหรับตรวจสอบลายนิ้วมือแฝง ได้แก่ genipin และ lawsone (รูปที่ 6) (Jelly et al., 2008; Jelly et al., 2009)

Genipin เป็นสารสกัดจากพืชกลุ่ม *Gardenia jasminoides* Ellis (พุดซ้อน) และ *Genipa Americana* เป็นสารไม่มีสี แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดอะมิโนจะเกิดผลิตภัณฑ์สีน้ำเงินที่สามารถลูมินิสเซนส์ได้ (λ_{ex} 590 nm, λ_{em} 620 nm) แต่ยังไม่มีการสรุปกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่แน่ชัด (Almog et al., 2004; Levinton-

Shamuilov et al., 2005) ในขณะที่ lawsone (2-hydroxy-1,4-naphthoquinone) จากใบของ *Lawsonia inermis* (เทียนกิ่งแดง) จะให้ผลิตภัณฑ์น้ำตาลม่วงซึ่งจะลูมินิสเซนส์ได้เช่นเดียวกัน (λ_{ex} 590 nm, λ_{em} 640 nm) โดยทั้ง genipin และ lawsone เกิดการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่นสูง ทำให้ผลของสัญญาณพื้นหลังน้อย จึงสามารถตรวจวัดได้ที่ปริมาณต่ำลงได้ กลไกการเกิดปฏิกิริยาของ lawsone คาดว่าจะคล้ายคลึงกับนินไฮดรินดังแสดงในรูปที่ 7 แต่ไม่จำเป็นต้องมีการใช้เกลือของโลหะเพิ่มเติม (Jelly et al., 2008)



รูปที่ 6 สารอินทรีย์ธรรมชาติที่สามารถนำมาตรวจสอบลายนิ้วมือได้ (Jelly et al., 2008; Jelly et al., 2009)



รูปที่ 7 ปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างกรดอะมิโนจากลายนิ้วมือกับสารจากธรรมชาติ lawsone ให้ผลิตภัณฑ์สีน้ำตาลม่วง (Jelly et al., 2008; Jelly et al., 2009)

นอกจากนี้แล้วปัจจุบันมีการศึกษาวิจัย การใช้สารเคมีอื่นๆ ที่มีสูตรโครงสร้างแตกต่างจาก นิโคตินในการตรวจสอบลายนิ้วมือ เช่น fluorescamine, o-phthalaldehyde, 7-chloro-4-nitrobenzo-2-oxa-1,3-diazole (Lee and Gaensslen, 2001; Stoilovic et al., 1984)

การตรวจสอบทางแสง

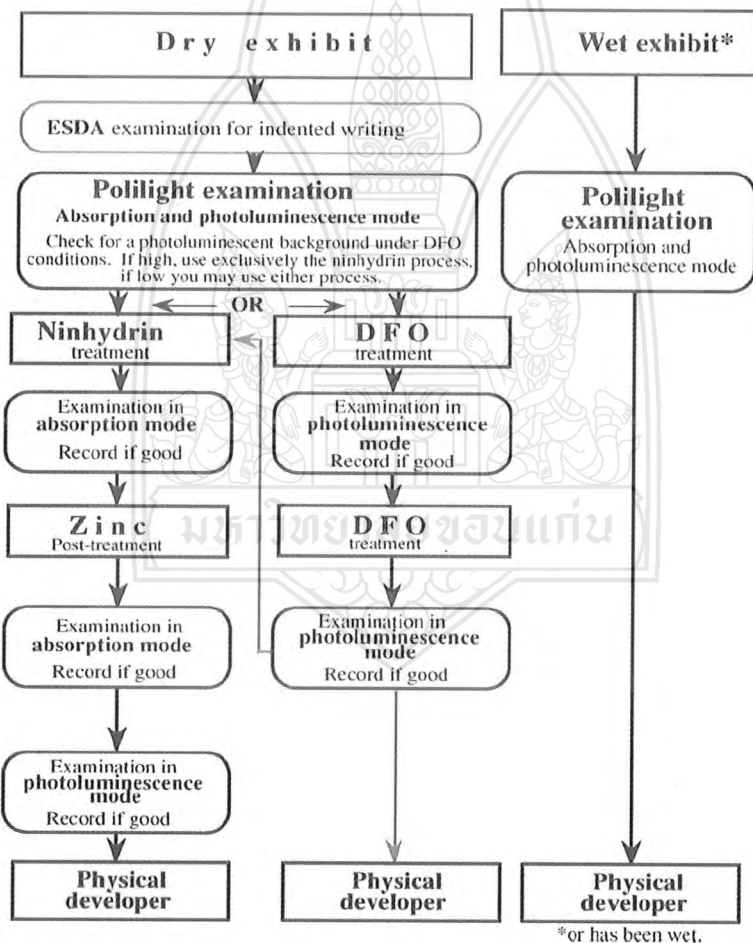
การตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงด้วยวิธีการทางแสงเป็นวิธีที่ง่าย รวดเร็ว และไม่ทำลายตัวอย่าง ดังนั้นวิธีนี้จึงมักเป็นวิธีการแรกที่ถูกนำมาใช้ หลังจากนั้นจึงอาจมีการนำเทคนิคทางกายภาพหรือทางเคมีมาใช้ เพื่อเพิ่มรายละเอียดหรือความชัดเจนของลายนิ้วมือที่ถูกตรวจพบหรือเพิ่มความไวในการวิเคราะห์ให้สูงขึ้น การลูมิเนสเซนส์เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดเนื่องจากมีความไวในการวิเคราะห์สูง วิธีนี้ต้องการแหล่งกำเนิดแสงความเข้มสูงซึ่งในอดีตจะมีขนาดใหญ่ และราคาแพง ปัจจุบันแหล่งกำเนิดแสงดังกล่าวได้รับการพัฒนาเพื่อให้มีราคาถูกลงมาก เช่น

องค์การตำรวจของประเทศออสเตรเลีย (Australia Federal Police: AFP) ได้พัฒนาแสงโพลีไลท์ (Polilight) แบบพกพาและให้ความเข้มของแสงสูงครอบคลุมช่วง ยูวีถึงอินฟราเรด โดยสามารถกำจัดช่วงแสงรบกวนได้ (Lennard, 2001) (รูปที่ 8)

ปัจจุบันเครื่องนี้มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยมักใช้ร่วมกับวิธีการทางเคมีและกายภาพ ดังนั้นขั้นตอนการทำงานขององค์การตำรวจของประเทศ ออสเตรเลีย (Australia Federal Police: AFP) (รูปที่ 9) ซึ่งหลังจากการตรวจสอบพื้นผิวหรือวัสดุว่าเปียกหรือไม่ จะตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงโดยใช้วิธีการทางแสง โดยหากวัสดุเป็นพื้นผิวเปียกหรือเคยผ่านการเปียกมาก่อน หลังการใช้วิธีการทางแสงต้องใช้วิธีการทางกายภาพ หากพื้นผิวไม่เปียกต้องตรวจสอบความเข้มของสัญญาณพื้นหลังโดยใช้วิธีการทางแสงร่วมกับการใช้ DFO หลังจากนั้นจึงใช้วิธีการทางเคมี โดยหากสัญญาณพื้นหลังสูงจะใช้วิธีนิโคตินแต่หากมีสัญญาณพื้นหลังต่ำก็สามารถเลือกใช้วิธีนิโคตินหรือวิธี DFO ก็ได้



รูปที่ 8 อุปกรณ์ Polilight (a) แหล่งกำเนิดแสง (b) อุปกรณ์เสริมอื่นๆ (www.google.com)



รูปที่ 9 ขั้นตอนการตรวจวัดลายนิ้วมือบนพื้นผิวที่มีรูพรุนขององค์กรตำรวจของประเทศออสเตรเลีย (Australia Federal Police: AFP) (Stoilovic and Lennard, 2000)

นอกจากนี้แล้วปัจจุบันมีการประยุกต์วิธีการทางสเปกโทรสโกปีเชิงโมเลกุล (molecule spectroscopy) หลายวิธี เช่น อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (infrared spectroscopy) รามาน สเปกโทรสโกปี (raman spectroscopy) ฟูเรียร์ ทรานส์ฟอร์ม สเปกโทรสโกปี (fourier transform spectroscopy) ร่วมกับเทคนิคทางภาพ (digital imaging) ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่เป็นทั้งข้อมูลทางแสง (เช่น สเปกตรัม) และข้อมูลภาพพร้อมกัน มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงมากขึ้น (Akiba et al., 2007; Crane et al., 2007; Payne et al., 2005; Seah et al., 2004; Tahtouh et al., 2007; Worley et al., 2006) อย่างไรก็ตามมีรายงานการนำวัสดุที่มีรอยประทับลายนิ้วมือสัมผัสกับไอรอน (300 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 10 ถึง 20 วินาที ก่อนการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางแสง พบว่า สามารถตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงได้เทียบเท่ากับการใช้วิธีการตรวจสอบทางเคมีร่วมด้วย โดยพบว่าการสัมผัสกับไอรอนให้ผลดีกว่าการให้ความร้อนโดยตรง เช่น การรีด กดหรือการวางบนวัสดุร้อน เช่น แผ่นให้ความร้อน (hot plate) (Brown et al., 2009)

บทสรุป

วิธีการทางเคมีเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงได้ โดยอาศัยพื้นฐานของปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารเคมีที่อยู่บนรอยประทับลายนิ้วมือกับสารเคมีที่เพิ่มเติมเข้าไปในสถานะที่เหมาะสม เกิดเป็น

ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าหรือสามารถตรวจวัดด้วยเครื่องมืออื่นๆ ทำให้ลายนิ้วมือแฝงซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ปรากฏขึ้น วิธีการมาตรฐานที่ใช้กันทั่วไป คือ การใช้สารนินไฮดริน ทำให้ลายนิ้วมือปรากฏเป็นสีม่วง นอกจากนี้ยังมีการใช้สารที่มีโครงสร้างคล้ายคลึงกับนินไฮดริน เช่น สาร 1,8-diazafluoren-9-one (DFO) และ 1,2-indanedione การเปรียบเทียบการใช้นินไฮดริน DFO และ 1,2-indanedione พบว่า ผลิตภัณฑ์ของสารนินไฮดรินจะมีสีเข้มกว่าผลิตภัณฑ์ของ 1,2-indanedione และ DFO จึงให้ลายนิ้วมือที่คมชัดกว่าเมื่อมองด้วยตาเปล่า แต่หากพิจารณาการดูมิเนสเซนส์ทั้ง DFO และ 1,2-indanedione จะมีความไววิเคราะห์สูงกว่าผลิตภัณฑ์จากนินไฮดริน

ปัจจุบันมีการนำสารที่มีความเป็นพิษน้อย เช่น สารอินทรีย์จากธรรมชาติ เช่น สาร giniopin และ lawsonie มาใช้เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีอันตราย เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม รวมทั้งมีการพัฒนาอุปกรณ์ทางแสงเพื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงภาคสนามและมีการนำเทคโนโลยีภาพมาใช้ร่วมกับสเปกโทรสโกปีเชิงโมเลกุลทำให้ผลการวิเคราะห์มีทั้งข้อมูลทางแสงและข้อมูลภาพ โดยแต่ละวิธีให้ประสิทธิภาพแตกต่างกันขึ้นกับธรรมชาติของพื้นผิว องค์ประกอบทางเคมีของรอยประทับลายนิ้วมือ สิ่งปนเปื้อน ระยะเวลาและอื่นๆ และมีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกัน ดังสรุปในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบวิธีการต่างๆ ในการตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงด้วยวิธีทางเคมีและแสง

วิธีการ	พื้นผิว	ข้อดี	ข้อเสีย
การใช้นินไฮดริน	พื้นผิวไม่เปียก สีอ่อน	- ง่าย - เป็นที่ยอมรับ - ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีม่วงเข้ม เหมาะกับพื้นผิวสีอ่อน	- หากพื้นผิวมีสีเข้มจะบดบัง ผลิตภัณฑ์สีม่วง - ปฏิกริยาเกิดขึ้นช้า อาจต้องเร่ง ด้วยการใช้ความร้อน - มีความคมชัดและความไวจำกัด อาจต้องใช้เกลือเพื่อเพิ่มความ ไวซึ่งจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์ เสถียรขึ้นด้วย - ไม่เหมาะกับกระดาษไวความร้อน
การใช้สารที่มีสูตรโครงสร้าง เหมือนนินไฮดริน	พื้นผิวไม่เปียก	- ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้ม ของการลูมิเนสเซนส์สูงกว่า นินไฮดริน - สารบางชนิด เช่น 1,2- indanedione ให้ผลิตภัณฑ์ที่มี สีได้ที่อุณหภูมิห้อง	- ไม่เหมาะกับกระดาษไวความร้อน - ให้ผลิตภัณฑ์สีอ่อนกว่านินไฮดริน เมื่อมองด้วยตาเปล่า
การใช้สารอินทรีย์ธรรมชาติ	พื้นผิวไม่เปียก สีอ่อน	- มีผลจากสัญญาณพื้นหลัง น้อยเนื่องจากลูมิเนสเซนส์ที่ ความยาวคลื่นสูง - ตรวจวัดลายนิ้วมือได้ตั้งแต่ จะมีสารตกค้างปริมาณน้อย - ไม่เป็นพิษ	- ต้องสกัดสารจากธรรมชาติ เช่น พืช
การตรวจสอบทางแสง	พื้นผิวเปียกและไม่ เปียก	- ง่าย - รวดเร็ว - ไม่ทำลายตัวอย่าง	- ต้องการแหล่งกำเนิดแสง - ราคาสูงกว่าวิธีทางเคมี - ให้รายละเอียดหรือความชัดเจน ไม่สูงมาก

เอกสารอ้างอิง

- Akiba, N., Saitoh, N. and Kuroki, K. (2007). Fluorescence spectra and images of latent fingerprints excited with a tunable laser in the ultraviolet region. *Journal of Forensic Sciences*. 52: 1103-1106.
- Alaoui, I. M., Menzel, E. R., Farag, M., Cheng, K. H. and Murdock, R. H. (2005). Mass spectra and time-resolved fluorescence spectroscopy of the reaction product of glycine with 1,2-indanedione in methanol. *Forensic Science International*. 152: 215-219.
- Almog, J., Cohen, Y., Azoury, M. and Hahn, T. R. (2004). Genipin, A novel fingerprint reagent with colorimetric and fluorogenic activity. *Journal of Forensic Sciences*. 49: 255-257.
- Almog, J., Klein, A., Davidi, I., Cohen, Y., Azoury, M. and Levin-Elad, M. (2008). Dual fingerprint reagents with enhanced sensitivity: 5-methoxy- and 5-methylthioninhydrin. *Journal of Forensic Sciences*. 53(2): 364-368.
- Almog, J., Levinton-Shamuilov, G., Cohen, Y. and Azoury, M. (2007). Fingerprint reagents with dual action: color and fluorescence. *Journal of Forensic Sciences*. 52: 330-334.
- Almog, J., Sears, V. G., Springer, E., Hewlett, D. F., Walker, S., Wiesner, S., et al. (2000). Reagents for the chemical development of latent fingerprints: scope and limitations of benzo[f]ninhdrin in comparison to ninhydrin. *Journal of Forensic Sciences*. 45: 538-544.
- Bicknell, D. E. and Ramotowski, R. S. (2008). Use of an optimized 1,2-indanedione process for the development of latent prints. *Journal of Forensic Sciences*. 53: 1108-1116.
- Brown, A. G., Sommerville, D., Reedy, B., J., Shimon, R. G. and Tahtouh, M. (2009). Revisiting the thermal development of latent fingerprints on porous surfaces: new aspects and refinements. *Journal of Forensic Sciences*. 54(1): 114-121.
- Conn, C., Ramsay, G., Roux, C. and Lennard, C. (2001). The effect of metal salt treatment on the photoluminescence of DFO-treated fingerprints. *Forensic Science International*. 116: 117-123.
- Crane, N. J., Bartick, E. G., Perlman, R. S. and Huffman, S. (2007). Infrared spectroscopic imaging for noninvasive detection of latent fingerprints. *Journal of Forensic Sciences*. 52: 48-53.
- Davies, P. J., Kobus, H. J., Taylor, M. R. and Wainwright, K. P. (1995a). Synthesis and structure of the zinc(II) and cadmium(II) complexes produced in the photoluminescent enhancement of ninhydrin developed fingerprints using group 12 metal salts. *Journal of Forensic Sciences*. 40: 565-569.
- Davies, P. J., Taylor, M. R., Wainwright, K. P. and Kobus, H. J. (1995b). Zinc(II) Chloride-methanol complex of 2-[(1,3-dihydro-1,3-dioxo-2H-inden-2-ylidene)amino]-1H-indene-1,3(2H)-dione(1-) sodium salt: a complex of ruhemann's purple. *Acta Crystallographica Section C*. 51: 1802-1805.
- Didierjean, C., Debart, M.-H. and Crispino, F. (1999). New formulation of DFO in HFE7100. *The Print*. 15: 6-8.
- Friedman, M. (2004). Applications of the ninhydrin reaction for analysis of amino acids,

- peptides, and proteins to agricultural and biomedical sciences. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 52: 385-406.
- Friedman, M. and Williams, L. D. (1974). Stoichiometry of formation of Ruhemann's purple in the ninhydrin reaction. *Bioorganic Chemistry*. 3: 267-280.
- Gardner, S. J. and Hewlett, D. F. (2003). Optimization and initial evaluation of 1,2-indandione as a Reagent for fingerprint detection. *Journal of Forensic Sciences*. 48: 1288-1292.
- Grigg, R., Mongkolaussavaratana, T., Pounds, C. A. and Sivagnanam, S. (1990). 1,8-Diazafluoren-9-one and related compounds. A new reagent for the detection of α -amino acids and latent fingerprints *Tetrahedron Letter*. 31(49): 7215-7218.
- Hansen, D. B. and Joullie, M. M. (2005). The development of novel ninhydrin analogues. *Chemical Society Reviews*. 34: 408-417.
- Hauze, D. B., Petrovskaja, O., Taylor, B., Joullie, M. M., Ramotowski, R. and Cantu, A. A. (1998). 1,2-Indanediones: new reagents for visualizing the amino acid components of latent prints *Journal of Forensic Sciences*. 43: 744-747.
- Herod, D. W. and Menzel, E. R. (1982). Laser detection of latent fingerprints: ninhydrin followed by zinc chloride. *Journal of Forensic Sciences*. 27: 513-518.
- Home Office Scientific Development Branch. (2006). Use of DMAC on thermal papers, fingerprint and footwear forensics newsletter. Retrieved July 22, 2009. from http://scienceandresearch.homeoffice.gov.uk/hosdb/publications/fingerprint-publications/58-06-Fingerprint_and_Footw1.pdf?view=Binary.
- Jasuja, O. P., Toofany, M. A., Singh, G. and Sodhi, G. S. (2009). Dynamics of latent fingerprints: The effect of physical factors on quality of ninhydrin developed prints - A preliminary study. *Science & Justice*. 49: 8-11.
- Jelly, R., Lewis, S. W., Lennard, C., Lim, K. F. & Almog, J. (2008). A novel reagent for the detection of latent fingermarks on paper surfaces. *Chemical Communication (Cambridge)*. 3513-3515.
- Jelly, R., Patton, E. L. T., Lennard, C., Lewis, S. W. and Lim, K. F. (2009). The detection of latent fingermarks on porous surfaces using amino acid sensitive reagents: A review. *Analytica Chimica Acta*. 652(1-2): 128-142.
- Kobus, H. J., Pigou, P. E., Jahangiri, S. and Taylor, B. (2002). Evaluation of some oxygen, sulfur, and selenium substituted ninhydrin analogues, nitrophenylninhydrin and benzo[f]furoninhydrin *Journal of Forensic Sciences*. 47: 254-259.
- Lee, H. C. and Gaensslen, R. E. (2001). *Methods of latent fingerprint development*, Boca Raton: CRC Press.
- Lennard, C. (2001). The detection and enhancement of latent fingerprints. The 13th INTERPOL Forensic Science Symposium. Lyon, France.
- Lennard, C. J., Margot, P. A., Sterns, M. and Warrenner, R. N. (1987). Photoluminescent enhancement of ninhydrin developed fingerprints by metal complexation: Structural studies of complexes formed between Ruhemann's purple and group IIb

- metal salts. *Journal of Forensic Sciences*. 32: 597-605.
- Levinton-Shamulov, G., Cohen, Y., Azoury, M., Chaikovsky, A. and Almog, J. (2005). Genipin, a novel fingerprint reagent with colorimetric and fluorogenic activity, Part II: Optimization, scope and limitations. *Journal of Forensic Sciences*. 50: 1367-1371.
- Masters, N., Morgan, R. and Shipp, E. (1991). DFO: its usage and results. *Journal of Forensic Identification*. 41: 3-10.
- Payne, G., Reedy, B., Lennard, C., Comber, B., Exline, D. and Roux, C. (2005). A further study to investigate the detection and enhancement of latent fingerprints using visible absorption and luminescence chemical imaging. *Forensic Science International*. 150(1): 33-51.
- Petrovskaja, O., Taylor, B. M., Hauze, D. B., Carroll, P. J. and Joulle, M. M. (2001). Investigations of the reaction mechanisms of 1,2-indanediones with amino acids. *Journal of Organic Chemistry*. 66: 7666-7675.
- Pounds, C. A., Phil, M., Grigg, R. and Mongkolaussavaratana, T. (1990). The use of 1,8-diazafluoren-9-one (DFO) for the fluorescent detection of latent fingerprints on paper. A preliminary evaluation. *Journal of Forensic Sciences*. 35: 169-175.
- Ramotowski, R., Cantu, A. A., Joulle, M. M. and Petrovskaja, O. (1997). 1,2-Indanediones: A preliminary evaluation of a new class of amino acid visualizing compounds. *FingerprintWorld*. 23: 131-140.
- Roux, C., Jones, N., Lennard, C. and Stoilovic, M. (2000). Evaluation of 1,2-indanedione for the detection of latent fingerprints on porous surfaces. *Journal of Forensic Sciences*. 45: 761-769.
- Russell, S. E., John, G. L. and Naccarato, S. L. (2008). Modifications to the 1,2-indanedione/zinc chloride formula for latent print development. *Journal of Forensic Identification*. 58: 182-192.
- Saferstein, R. (2004). *Fingerprints. criminalistics: An introduction to forensic Science*. (8th ed.). New Jersey: Pearson Prentice Hall. 406-429.
- Schwarz, L. (2003). Spurensicherung auf thermopapier. *Kriminalistik*. 57: 246-249.
- Schwarz, L. and Klenke, I. (2007). Enhancement of ninhydrin- or DFO-treated latent fingerprints on thermal paper. *Journal of Forensic Sciences*. 52: 649-655.
- Seah, L. K., Dinish, U. S., Ong, S. K., Chao, Z. X. and Murukeshan, V. M. (2004). Time-resolved imaging of latent fingerprints with nanosecond resolution. *Optics & Laser Technology*. 36(5): 371-376.
- Seah, L. K., Dinish, U. S., Phang, W. F., Chao, Z. X. and Murukeshan, V. M. (2005). Fluorescence optimisation and lifetime studies of fingerprints treated with magnetic powders. *Forensic Science International*. 152(2-3): 249-257.
- Stimac, J. T. (2003). Thermal and carbonless papers: a fundamental understanding for latent friction ridge development. *Journal of Forensic Identification*. 53: 185-197.
- Stimac, J. T. (2003). Thermal paper: latent friction ridge development via 1, 2-indanedione. *Journal of Forensic Identification*. 53: 265-271.

- Stoilovic, M. (1993). Improved method for DFO development of latent fingerprints. *Forensic Science International*. 60(3): 141-153.
- Stoilovic, M. and Lennard, C. (2000). The application of light in forensic science and a modern approach to fingerprint detection and enhancement. Australian Federal Police Workshop Manual.
- Stoilovic, M. and Lennard, C. (2006). AFP workshop manual: fingerprint detection & enhancement. Forensic Services, Australian Federal Police, Canberra.
- Stoilovic, M., Lennard, C., Wallace-Kunkel, C. and Roux, C. (2007). Evaluation of a 1,2-indanedione formulation containing zinc chloride for improved fingermark detection on paper. *Journal of Forensic Identification*. 57: 4-18.
- Stoilovic, M., Warrenner, R. N. and Kobus, H. J. (1984). An evaluation of the reagent NBD chloride for the production of luminescent fingerprints on paper: II. A comparison with ninhydrin. *Forensic Science International*. 24: 279-284.
- Tahtouh, M., Despland, P., Shimon, R., Kalman, J. R. and Reedy, B. J. (2007). The application of infrared chemical imaging to the detection and enhancement of latent fingerprints: Method optimization and further findings. *Journal of Forensic Sciences*. 52(5): 1089-1096.
- Taylor, B. M. and Joullie, M. M. (1998). Reaction of 1,2-indanedione with 3,5-dimethoxyaniline. *Tetrahedron*. 54: 15121-15126.
- Wallace-Kunkel, C., Lennard, C., Stoilovic, M. and Roux, C. (2007). Optimisation and evaluation of 1,2-indanedione for use as a fingermark reagent and its application to real samples. *Forensic Science International*. 168(1): 14-26.
- Wang, Y. F., Yang, R. Q., Wang, Y. J., Shi, Z. X. and Liu, J. J. (2009). Application of CdSe nanoparticle suspension for developing latent fingerprints on the sticky side of adhesives. *Forensic Science International*. 185: 96-99.
- Wiesner, S., Springer, E., Sasson, Y. and Almog, J. (2001). Chemical development of latent fingerprints: 1,2-indanedione has come of age. *Journal of Forensic Sciences*. 46: 1082-1084.
- Wilkinson, D. (2000). Study of the reaction mechanism of 1,8-diazafuoren-9-one with the amino acid, alanine. *Forensic Science International*. 109(2): 87-103.
- Wilkinson, D., Mackenzie, E., Leech, C., Mayowski, D., Bertrand, S. and Walker, T. (2003). The results from a Canadian National. Identification Canada Canadian Police Research Center. 26: 8-18.
- Worley, C. G., Wiltshire, S. S., Miller, T. C., Havrilla, G. J. and Majidi, V. (2006). Detection of visible and latent fingerprints using micro-X-ray fluorescence elemental imaging. *Journal of Forensic Sciences*. 51: 57-63.





นาโนเทคโนโลยี กับ ไบโอเซนเซอร์ Nanotechnology and Biosensor

ศิริวรรณ ตี๋ภู'

บทนำ

ปัจจุบันคำว่า นาโนเทคโนโลยี (nanotechnology) ได้เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เนื่องจากประชาชนทั่วไปได้รับทราบข่าวสารจากสื่อต่างๆ ผ่านการโฆษณา เช่น โทรทัศน์ หนังสือพิมพ์ หรืออินเทอร์เน็ต ในการนำเอานาโนเทคโนโลยีมาประยุกต์ในกระบวนการผลิตเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมเสื้อผ้า ในการผลิตชุดชั้นใน โดยใช้อิออนภาคนาโนเคลือบที่เส้นใยผ้าช่วยให้สวมใส่สบายขึ้น เนื่องจากตัวอนุภาคจะช่วยดูดความชื้น หรือแม้กระทั่งในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางได้ผสมนาโนแอนติแบคทีเรีย เพื่อยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย ล่าสุดศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ได้ค้นคว้าวิจัยจนประสบความสำเร็จในการผลิตมุ้งนาโนได้ขึ้นเป็นครั้งแรก โดยใช้กระบวนการนาโนเทคโนโลยีในการผลิตเส้นใยมุ้งที่มีสารกำจัดยุงให้ตายฉับพลัน จากตัวอย่างข้างต้นเป็นผลผลิตที่ได้จากการนำความรู้ทางนาโนเทคโนโลยีมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น เรามารู้จักประวัติของนาโนเทคโนโลยีกันก่อน

การกำเนิดนาโนเทคโนโลยีเริ่มต้นตั้งแต่เมื่อประมาณ 50 ปีที่แล้ว โดย ศาสตราจารย์ริชาร์ด ฟายน์แมน (Richard Feynman) ดังรูปที่ 1 ผู้ที่เปิดโฉมหน้าประวัติศาสตร์ของนาโนเทคโนโลยี ต่อมาเขาได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1965 ซึ่งให้ความหวังว่าสักวันหนึ่งมนุษย์จะสามารถจัดเรียงอะตอมได้ จากคำพูดนี้ทำให้เป็นจุดเริ่มต้นให้นักวิทยาศาสตร์ศึกษาค้นคว้านาโนเทคโนโลยีเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน



รูปที่ 1

ศาสตราจารย์ ริชาร์ด ฟายน์แมน (ที่มา: www.atomicarchive.com/Bios/FeynmanPhoto.shtml)

' ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

ความหมายของนาโนเทคโนโลยี

คำว่า “นาโน (nano)” เป็นคำอุปสรรค (prefix) มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก คำว่า “Nanos” แปลว่า “คนแคระ” จึงหมายถึง สิ่งที่เล็กมาก (www.crmtothai.com/index.php?option=com_content&task=view&id=2005&Itemid=87) ดังนั้นจึงให้นิยามของนาโนว่า เศษหนึ่งส่วนหนึ่งพันล้าน ($1/1,000,000,000 = 10^{-9}$) (Jianrong et al., 2004) เมื่อนำคำว่า “นาโน” ไปใช้ในหน่วยวัด จึงหมายถึง สิ่งของที่มีความยาวเท่ากับ 1 นาโนเมตร (1×10^{-9} m) ดังนั้นนาโนเทคโนโลยี จึงหมายถึง เทคโนโลยีในการประกอบและสร้างวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ ขึ้นมาจากการจัดเรียงของอะตอมหรือโมเลกุลเข้าด้วยกันในระดับนาโนเมตร ยุคแรกของนาโนเทคโนโลยีเป็น สิ่งของที่มีโครงสร้างขนาดนาโน แล้วนำมาสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้นๆ เช่น สเปรย์ ทำให้ละอองมีขนาดอนุภาคเล็กระดับนาโนเมตร เพื่อให้กระจายตัวได้ดีและมีพื้นที่ผิวมากในยุคต่อมา ได้นำเอานาโนเทคโนโลยีไปประยุกต์กับศาสตร์ต่างๆ หนึ่งในนั้นคือการนำเอานาโนเทคโนโลยีไปใช้ร่วมกับเทคนิคไบโอเซนเซอร์

ไบโอเซนเซอร์ คืออะไร ?

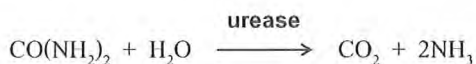
ในปัจจุบันเซนเซอร์ (sensor) ได้เข้ามามีบทบาทในงานเคมีวิเคราะห์หลายๆ ด้าน ตัวอย่างเช่น เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) เป็นเซนเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิหรือความร้อน เซนเซอร์แปลงสัญญาณทางกายภาพจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า นั่นคือเซนเซอร์หมายถึงอุปกรณ์ตรวจวัดที่วัดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะถูกแปลงเป็นสัญญาณที่สามารถอ่านค่าได้ด้วยเครื่องมือวัดที่เหมาะสมกับชนิดและรูปของสัญญาณนั้น สามารถแบ่งเซนเซอร์ออกเป็น 2 ประเภทหลักคือ เคมีคัลเซนเซอร์ (chemical sensor) และไบโอเซนเซอร์ (biosensor) (Ram and Bhethanabotla, 2010) เคมีคัลเซนเซอร์เป็นเซนเซอร์ที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี ส่วนไบโอเซนเซอร์เป็นเซนเซอร์ที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากปฏิกิริยาของสิ่งมีชีวิต (biological) ไบโอเซนเซอร์ (Eggins, 1996) เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดที่อาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างวัสดุชีวภาพ (biological element) กับตัวตรวจวัด (transducer) โดยนิยมตรึงวัสดุชีวภาพไว้บนตัวตรวจวัด สารที่ต้องการ



รูปที่ 2 หลักการของไบโอเซนเซอร์

ตรวจวัด (analyze) จะทำปฏิกิริยาหรือจับกับวัสดุชีวภาพอย่างจำเพาะเจาะจง ผลจากการทำปฏิกิริยาหรือการจับกันระหว่างสารที่ต้องการตรวจวัดกับวัสดุชีวภาพเกิดเป็นผลิตภัณฑ์หรือสัญญาณขึ้น (indicated signal) เช่น อิเล็กตรอน ความร้อน แสง เป็นต้น และสัญญาณเหล่านี้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยตัวตรวจวัดที่เหมาะสม สัญญาณไฟฟ้านี้เป็นส่วนโดยตรงกับปริมาณสารที่ต้องการวัด ดังรูปที่ 2

ไบโอเซนเซอร์เกิดขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1962 โดย ลีแลนด์ คลาร์ก (Leland C. Clark) นักวิทยาศาสตร์สาขาชีวเคมี ชาวสหรัฐอเมริกา เป็นเอนไซม์เซนเซอร์ที่ใช้เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส (Glucose oxidase; GOD) เป็นวัสดุชีวภาพตรึงบนขั้วออกซิเจน หรือที่เรียกว่าขั้วออกซิเจนของคลาร์ก สำหรับตรวจวัดปริมาณน้ำตาลกลูโคสในเลือดมนุษย์ได้เป็นครั้งแรกในการตรวจวัดนี้ เอนไซม์กลูโคสออกซิเดสจะทำปฏิกิริยาอย่างจำเพาะเจาะจงกับน้ำตาลกลูโคส และมีการใช้ออกซิเจนปริมาณหนึ่งในปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์เป็นกรดกลูโคนิก (gluconic acid) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ปริมาณออกซิเจนที่เหลือจากปฏิกิริยาจะถูกตรวจวัดด้วยขั้วออกซิเจนซึ่งจะสัมพันธ์กับปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไบโอเซนเซอร์แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามชนิดของวัสดุชีวภาพที่ใช้ ได้แก่ คะตาไลติกไบโอเซนเซอร์ (catalytic biosensor) และ แอฟฟินิตีไบโอเซนเซอร์ (affinity biosensor) หลักการทำงานของกะตาไลติกไบโอเซนเซอร์ ใช้เอนไซม์เป็นวัสดุชีวภาพ โดยเอนไซม์จะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสับสเตรท (สารที่ต้องการตรวจวัด) อย่างจำเพาะเจาะจง ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถถูกตรวจวัดด้วยตัวตรวจวัดที่เหมาะสม เช่น การวิเคราะห์หาปริมาณยูเรียโดยใช้เอนไซม์ยูรีเอส (urease) เป็นวัสดุชีวภาพเพื่อเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของยูเรียได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนียดังปฏิกิริยา



ผลจากปฏิกิริยาเกิดแอมโมเนียขึ้น วัดแอมโมเนียที่ได้โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่จำเพาะต่อแอมโมเนีย (ammonium ion-selective electrode) เป็นตัวตรวจวัดความเข้มข้นของยูเรียแปรผันโดยตรงกับแอมโมเนียที่เกิดขึ้น ทำให้สามารถหาความเข้มข้นของยูเรียได้ นิยมใช้ยูเรียไบโอเซนเซอร์ในทางการแพทย์เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณยูเรียในเลือดของผู้ป่วยที่เป็นโรคไต ปัจจุบันกะตาไลติกไบโอเซนเซอร์ได้ผลออกมาในเชิงพาณิชย์ เช่น ชุดตรวจสอบน้ำตาลกลูโคส ไบโอเซนเซอร์ในเลือดแบบพกพา ผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวานสามารถตรวจวัดได้เอง โดยให้ผลการวัดที่ถูกต้องและรวดเร็วภายในเวลา 10 วินาที ส่วนไบโอเซนเซอร์อีกประเภทหนึ่งคือแอฟฟินิตีไบโอเซนเซอร์ อาศัยการจับกันระหว่างคู่สารอย่างจำเพาะเจาะจง เช่น การจับกันระหว่างแอนติบอดีกับแอนติเจน หรือการจับกันของคู่สายดีเอ็นเอเมื่อสารคู่แอฟฟินิตีจับกันทำให้สมบัติทางกายภาพเปลี่ยนไป วัดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวโดยใช้ตัวตรวจวัดที่เหมาะสม ตัวอย่างแอฟฟินิตีไบโอเซนเซอร์ เช่น การวิเคราะห์หาแอนติเจน α -fetoprotein (AFP) (Ding et al., 2007) ซึ่งเป็นสารบ่งชี้มะเร็ง โดยใช้คู่แอฟฟินิตีคือแอนติบอดีของ α -fetoprotein (anti-AFP) ตรึงไว้บนตัวตรวจวัด ถ้ามี AFP ในตัวอย่างเลือด AFP จะจับกับ anti-AFP ที่ถูกตรึงอยู่บนตัวตรวจวัด ทำให้สมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป เช่น สมบัติทางมวล เมื่อมีการจับกันระหว่างคู่แอนติบอดีและแอนติเจน ทำให้มีมวลเพิ่มขึ้น สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่อง quartz crystal microbalance แอฟฟินิตีไบโอเซนเซอร์ที่ได้พัฒนาในเชิงการค้าในปัจจุบันเช่น ชุดตรวจสอบการตั้งครรภ์ โดยให้ความถูกต้องสูงและสามารถรู้ผลได้ทันที ถึงแม้ว่าที่ผ่านมาไบโอเซนเซอร์สามารถประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณสารได้หลากหลายชนิด ประสิทธิภาพดีเป็นอย่างดีในเชิงการค้า แต่เนื่องจากการตรวจวัดสารบางอย่าง เช่น สารพิษหรือเชื้อโรคต่างๆ วิธีการตรวจวัดต้องมีความไว (sensitivity) ในการตรวจวัดสูง นั่นคือต้องสามารถวิเคราะห์หาสารที่

มีความเข้มข้นต่ำได้ เพราะสารเหล่านี้ปนเปื้อนในตัวอย่างในปริมาณต่ำแต่มีความเป็นพิษสูง เช่น Botulinum toxin (Dutton et al., 1996) เป็นสารพิษที่เกิดจากแบคทีเรีย *Clostridium botulinum* เมื่อร่างกายได้รับสารพิษนี้เข้าไป สารพิษนี้เข้าไปทำลายระบบประสาทส่วนต่างๆ ในร่างกาย ทำให้เสียชีวิตได้ทันที นอกจากนี้ Botulinum toxin ยังถูกจัดเป็นอาวุธชีวภาพร้ายแรงอีกด้วย ดังนั้นการตรวจหาสารพิษเหล่านี้จะต้องการอุปกรณ์ตรวจวัดที่ให้ความไวในการตรวจวัดสูง ความถูกต้องสูงและให้ผลรวดเร็ว เพราะฉะนั้นการปรับปรุงประสิทธิภาพของไบโอเซนเซอร์ให้มีความไวในการตรวจวัดสูง จะสามารถวิเคราะห์สารในปริมาณความเข้มข้นต่ำๆ ได้ ซึ่งถือว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่ของไบโอเซนเซอร์โดยการประยุกต์เอาเทคโนโลยีมาใช้ร่วมกับไบโอเซนเซอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจหาสารที่มีความเข้มข้นต่ำ ใช้สารเคมีน้อย และให้ผลการวิเคราะห์รวดเร็วและถูกต้องสูง

นาโนเทคโนโลยี กับ ไบโอเซนเซอร์

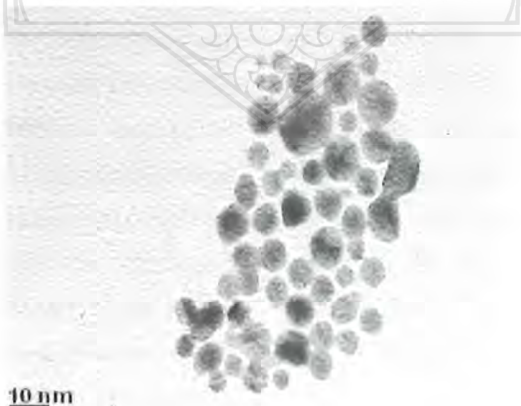
นาโนเทคโนโลยีเป็นสหสาขาวิชาที่ต้องอาศัยความรู้ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจากหลากหลายสาขารวมเข้าด้วยกัน ทั้งเคมี ฟิสิกส์ ชีววิทยา อิเล็กทรอนิกส์ และอื่นๆ จากการผสมผสาน

ความรู้หลายแขนงเข้าด้วยกัน ทำให้ศาสตร์หลายๆ แขนงได้นำเอาเทคโนโลยีไปประยุกต์ร่วมด้วยไบโอเซนเซอร์ก็เช่นกัน นาโนเทคโนโลยีได้เข้ามามีบทบาทสำคัญเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ต่อการพัฒนาไบโอเซนเซอร์ เริ่มต้นของการพัฒนาไบโอเซนเซอร์ด้วยนาโนเทคโนโลยี คือ การนำเอาเทคโนโลยีในยุคแรกมาประยุกต์ใช้กับไบโอเซนเซอร์ ซึ่งเป็นการสร้างพื้นฐานองค์ความรู้เพื่อให้ได้มาซึ่งวัสดุนาโน เช่น อนุภาคนาโน ท่อนาโนคาร์บอน หรือลวดนาโน มาประยุกต์ใช้ร่วมกับไบโอเซนเซอร์ วัสดุนาโนที่นำมาใช้ในไบโอเซนเซอร์ส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างสองหรือสามมิติ เช่น อนุภาคนาโน ท่อนาโนคาร์บอน ลวดนาโน โลโบโซม เป็นต้น

อนุภาคนาโน (nanoparticles)

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของสารหนึ่งให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 100 นาโนเมตร จะทำให้เกิดคุณสมบัติใหม่ๆ หรือเพิ่มระดับความสามารถจากเดิม เช่น อนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ เงิน แพลตินัม หรือทอง รูปที่ 3 แสดงอนุภาคนาโนทองที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้ปฏิกิริยารีดักชันของ chloroauric acid และใช้ sodium citrate เป็นตัวรีดิวซ์ ได้ขนาดอนุภาคนาโนทอง 8 ± 2 นาโนเมตร (Li et al., 2009)

มหาวิทยาลัยขอนแก่น



รูปที่ 3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดทะลุผ่าน (Transmission electron microscopy) ของอนุภาคนาโนทอง (ที่มา: Li et al., 2009)

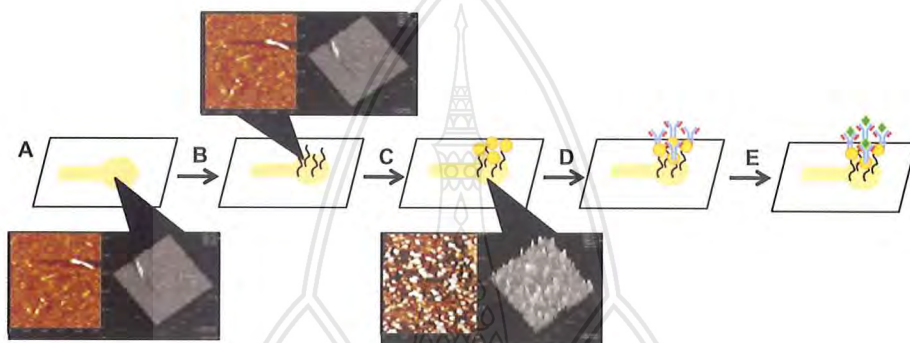
ได้มีการนำอนุภาคนาโนทองไปใช้ในไบโอเซนเซอร์มากกว่าอนุภาคของสารอื่นๆ ทั้งนี้เพราะอนุภาคนาโนทองมีข้อดีหลายประการ เช่น เป็นโลหะที่เฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม ไม่เป็นพิษต่อวัสดุชีวภาพ และสารที่มีหมู่ฟังก์ชัน NH_2 , CN และ SH สามารถจับบนทองได้ด้วยตัวเอง (self assemble) ด้วยพันธะโควาเลนต์บนอนุภาคนาโนทอง ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง จึงนิยมนำอนุภาคนาโนทองมาใช้ในไบโอเซนเซอร์เพื่อตรวจวัดชีวภาพ (โปรตีน มีหุ้มอะมิโนเป็นองค์ประกอบหลัก) วัฏบนผิวของอนุภาคนาโนทองด้วยพันธะโควาเลนต์ การประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนในไบโอเซนเซอร์ทำให้ประสิทธิภาพของไบโอเซนเซอร์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะอนุภาคนาโนมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเด่น ได้แก่ เพิ่มพื้นที่ผิว เช่น อิมมูโนเซนเซอร์ที่ใช้อนุภาคนาโนทองในการวิเคราะห์หา cholera toxin ในน้ำ (Loyprasert et al., 2010) โดยตรึงอนุภาคนาโนทองบนขั้วไฟฟ้าทองที่โมดิฟายด์ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทองด้วยฟิล์มบางชั้นเดียวของ polytyramine อนุภาคนาโนทองถูกดูดซับทางเคมีด้วยพันธะโควาเลนต์ระหว่างอนุภาคนาโนทองกับหมู่เอมีนของฟิล์ม polytyramine สำหรับตรึงสารแอนติบอดี anti- cholera toxin (รูปที่ 4) การใช้อนุภาคนาโนทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ยืนยันได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscopy) ในรูปที่ 4C เปรียบเทียบกับรูปที่ 4A และ 4B จะเห็นได้ว่ารูปที่ 4C ผิวหน้ามีความขรุขระที่เกิดจากการเกาะติดของอนุภาคนาโนทองมีโครงสร้างเป็นสามมิติจึงทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีปริมาณ anti-cholera toxin ที่ถูกตรึงอยู่บนขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้น cholera toxin ในตัวอย่าง จะไปจับกับ anti-cholera toxin ที่ถูกตรึงอยู่บนอนุภาคนาโนทอง การจับกันระหว่างแอนติเจนกับแอนติบอดี ทำให้ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ลดลง ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงจะแปรผันกับความเข้มข้นของ cholera toxin นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาการตรึงสารแอนติบอดี anti-cholera toxin บนขั้วไฟฟ้าทอง โดยอาศัยสาร

กลูตารัลดีไฮด์ (glutaraldehyde) ทำหน้าที่เชื่อมไขว้สารแอนติบอดีบน polytyramine เปรียบเทียบกับเซนเซอร์ที่อาศัยการตรึงแอนติบอดีบนอนุภาคนาโนทองพบว่าอิมมูโนเซนเซอร์ที่ใช้อนุภาคนาโนทองให้ความไวในการตรวจวัดดีกว่าอิมมูโนเซนเซอร์ที่ไม่ใช้อนุภาคนาโนทองถึง 1.6 เท่า และสามารถตรวจวัดปริมาณ cholera toxin ระดับความเข้มข้นต่ำถึง 9×10^{-20} M (0.09 aM) รูปที่ 5 แสดงการใช้อนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ขยายสัญญาณในการ stranded DNA ที่ตรึงอยู่บนแผ่นทอง ผลจากการเกิดไฮบริไดเซชัน ทำให้มีมวลเพิ่มขึ้นแต่พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของมวลหลังเกิดไฮบริไดเซชันน้อย ดังนั้นจึงต้องขยายสัญญาณโดยใช้อนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ที่ติดฉลาก (label) กับ streptavidin ซึ่ง streptavidin ที่เกาะอยู่บนวิเคราะห์หา *Escherichia coli* O157:H7 (*E.coli*) ใช้ตัวตรวจวัด คือ quartz crystal microbalance (Mao et al., 2006) ซึ่งตรึง thiolated single-stranded DNA ที่มีคู่เบสเจาะจง (specific) ต่อ DNA ของ *E.coli* วัฏบนแผ่นทองของ quartz crystal microbalance กำจัดที่ว่างบนแผ่นทองด้วยโปรตีน bovine serum albumin (BSA) จากนั้นใส่ biotinylated target DNA (DNA ของ *E.coli*) ลงไปทำให้เกิดไฮบริไดเซชัน (hybridization) ระหว่าง biotinylated target DNA กับ thiolated single-อนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์จะไปจับกับ biotinylated target DNA อย่างจำเพาะเจาะจง พบว่าการใช้อนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์สามารถขยายสัญญาณได้มากกว่าไม่ใช้อนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ถึง 4 เท่า เซนเซอร์นี้ให้ขีดจำกัดการตรวจวัด *E.coli* ความเข้มข้น 2.67×10^4 CFU/ml

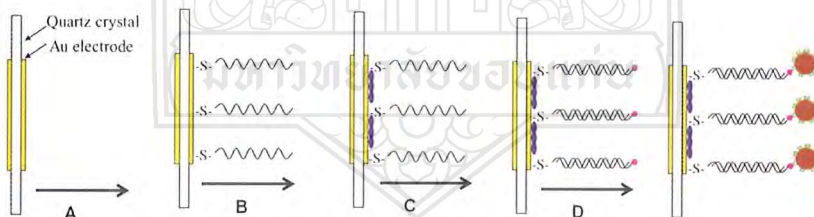
นอกจากนี้อนุภาคนาโนยังมีประโยชน์ในการช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนซึ่งมีประโยชน์กับไบโอเซนเซอร์ที่ใช้ตัวตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า เช่น ใช้อนุภาคนาโนทองสำหรับตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสในการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลกลูโคส ด้วยการตรวจวัดทางไฟฟ้า (Xiao et al., 2003) โดยการตรึงอนุภาคนาโนทองบนขั้วไฟฟ้าทองที่เคลือบด้วยชั้นของ dithiol

monolayer อนุภาคนาโนทองจะถูกดูดซับทางเคมีบนฟิล์มโพลิเมอร์ด้วยพันธะระหว่างอนุภาคนาโนทองกับหมู่ thiol หลังจากนั้นตรึงกลูโคสออกซิเดสและโคเอนไซม์ flavin adenine dinucleotide ไว้บนอนุภาคนาโนทอง เอนไซม์กลูโคสออกซิเดสจะเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำตาลกลูโคส ได้กรดกลูโคนิกและ

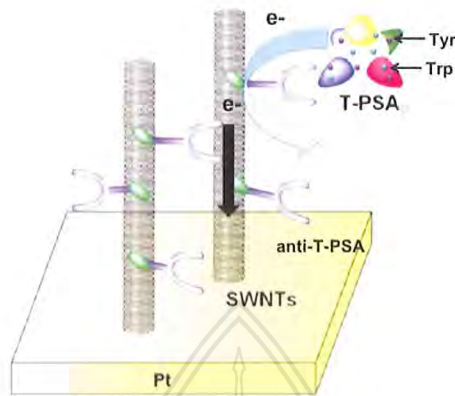
อิเล็กตรอน อนุภาคนาโนทองเป็นตัวช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาไปยังขั้วไฟฟ้าทอง ถ้าไม่มีอนุภาคนาโนทองอัตราการส่งผ่านอิเล็กตรอนเป็น 700 ต่อวินาที แต่พบว่าเมื่อมีอนุภาคนาโนทองอัตราการส่งผ่านอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเป็น 5,000 ต่อวินาที ทำให้มีความไวในการตรวจวัดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4 ขั้นตอนการตรวจหา cholera toxin โดยตรึง anti-cholera toxin บนขั้วไฟฟ้าทอง: (A) ขั้วไฟฟ้าทอง; (B) ตรึงพอลิเมอร์บน ขั้วไฟฟ้า (—); (C) ตรึงอนุภาคนาโนทองบนพอลิเมอร์ (●); (D) ตรึงแอนติบอดีบนอนุภาคนาโนทอง (—); (E) การจับกันระหว่างแอนติบอดีกับแอนติเจน (◆) (ที่มา: คัดแปลงจาก Loyprasert et al.,2010)



รูปที่ 5 ขั้นตอนการใช้อนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ขยายสัญญาณเพื่อวิเคราะห์หา *E.coli*: (A) ขั้วไฟฟ้าทอง; ตรึง thiolated DNA บนขั้วไฟฟ้า (SH—); (B) กำจัดที่ว่างด้วย BSA (●); (C) เกิดไฮบริดเซชันกับ biotinylated target DNA (—); (D) ขยายสัญญาณด้วย streptavidin labeled nanoparticle (●) (ที่มา: คัดแปลงจาก Mao et al., 2006)

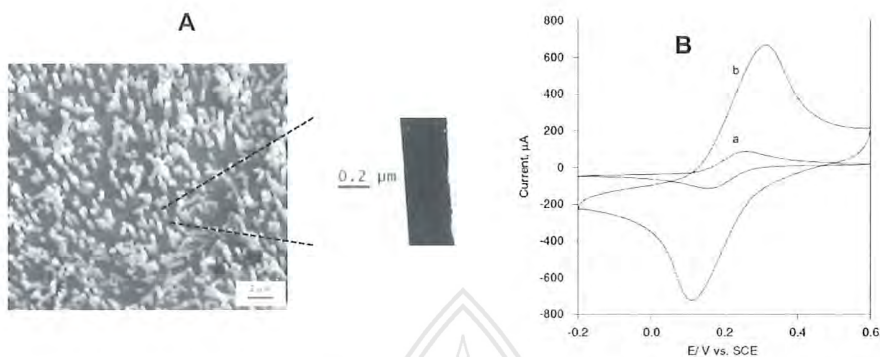


รูปที่ 6 การวิเคราะห์หา total prostate-specific โดยอาศัยท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังท่อชั้นเดียว (ที่มา: ดัดแปลงจาก Okuno et al., 2007)

นอกจากที่กล่าวมาอนุภาคนาโนแพลตินัมก็มีการนำมาประยุกต์ใช้ในไบโอเซนเซอร์เช่นกัน โดยใช้ในการติดตามการจับกันอย่างจำเพาะเจาะจงของวัสดุชีวภาพที่ถูกตรึงอยู่บนอนุภาคนาโนแพลตินัมกับสารที่ต้องการตรวจวัด ด้วยการวัดปฏิกิริยารีดักชันทางไฟฟ้าของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดจากการเร่งปฏิกิริยาของอนุภาคนาโนแพลตินัม (Polsky et al., 2006) หรือการใช้อนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์มาสร้างเซนเซอร์ที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (reuse) เช่น การตรวจหาปริมาณสารบ่งชี้มะเร็งในเลือด โดยการตรึงแอนติบอดีของสารบ่งชี้มะเร็งไว้บนอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ด้วยพันธะโควาเลนต์ เมื่อเสร็จสิ้นในการวิเคราะห์แต่ละครั้ง สามารถนำเอาอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ที่ถูกตรึงด้วยแอนติบอดีกลับมาใช้ในการวิเคราะห์หาสารบ่งชี้มะเร็งใหม่ในครั้งต่อไปได้ โดยการใช้แท่งแม่เหล็กดูดเอาอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ที่มีแอนติบอดีตรึงอยู่ออกจากสารละลาย (waste) จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นบริสุทธิ์สูง เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนออก ยังคงเหลือเฉพาะอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ที่มีแอนติบอดีตรึงอยู่ พร้อมที่จะวิเคราะห์หาปริมาณสารบ่งชี้มะเร็งใหม่ในครั้งต่อไป ทำให้ได้เซนเซอร์ที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ซ้ำได้หลายครั้ง ประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาในการวิเคราะห์ (Fu et al., 2008)

ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes)

นักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นชื่อ Sumio Iijima ได้สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนขึ้นเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2534 ท่อนาโนคาร์บอนประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนที่ก่อรูปขึ้นมาเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายท่อ โดยอะตอมคาร์บอนมีการจัดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยมเชื่อมต่อกันจนเป็นท่อกลวงรูปทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร และความยาวของท่อระดับไมโครเมตร ตามลักษณะโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนสามารถแบ่งประเภทของท่อนาโนคาร์บอนได้ 2 ประเภท คือ ผนังท่อชั้นเดียว (single-walled carbon nanotubes; SWCNTs) และผนังท่อหลายชั้น (multi-walled carbon nanotubes; MNCNTs) เนื่องจากการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนเป็นแบบคาร์บอนหกเหลี่ยม ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีสมบัติเด่นนำไฟฟ้าได้ดี จึงนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในไบโอเซนเซอร์ ที่ใช้ตัวตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า ทั้งนี้เพราะสามารถช่วยในการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดี ดังรูปที่ 6 เป็นการวิเคราะห์หา total prostate specific antigen (T-PSA) เป็นสารบ่งชี้มะเร็งต่อมลูกหมาก (Okuno et al., 2007) ใช้ตัวตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าด้วยวิธี differential pulse voltammetry โดยตรึง SWCNTs ไว้บนขั้วไฟฟ้าทำงานแพลตินัม ตรึง anti-T-PSA บน SWCNTs ด้วยพันธะโควาเลนต์



รูปที่ 7 (A) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscopy) ของ ขั้วไฟฟ้านาโนแพลตินัม ; (B) ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้านาโนแพลตินัม (a) และขั้วไฟฟ้าแพลตินัมทั่วไป (b) ในสารละลาย 20 mM $K_3Fe(CN)_6$ ที่มี 0.2 M KCl (ที่มา: ดัดแปลงจาก Yang et al., 2006)

T-PSA ที่ต้องการตรวจวัดจะไปจับกับ anti-T-PSA ที่ถูกตรึงอยู่บน SWCNTs เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า +0.5 V แก่ขั้วไฟฟ้าทำงาน ทำให้ tyrosine (Tyr) และ tryptophan (Trp) ซึ่งเป็น electro-active amino acid ที่มีอยู่ใน T-PSA เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ได้อิเล็กตรอน จากนั้น SWCNT ทำหน้าที่ช่วยส่งอิเล็กตรอนที่ได้ไปยังขั้วไฟฟ้าทำงาน ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ปริมาณกระแสที่ได้สัมพันธ์กับปริมาณของ T-PSA พบว่าจากการใช้ SWCNTs เพื่อช่วยในการส่งผ่านอิเล็กตรอน ทำให้สามารถวัด T-PSA ได้ความเข้มข้นต่ำสุดที่ 0.25 ng/mL ดังที่กล่าวมาแล้วด้วยสมบัติเด่นของ CNT ในด้านการนำไฟฟ้าที่ดี จึงทำให้ส่วนใหญ่นำ CNT มาใช้ประโยชน์ในไบโอเซนเซอร์เพื่อช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอน โดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าต่างๆ เป็นตัวตรวจวัด เช่น เทคนิค chronoamperometry (Rahman et al., 2009) conductimetry (Kim et al., 2008) หรือ square wave voltammetry (Sheng et al., 2009)

ลวดนาโน (nanowires)

ลวดนาโนเป็นเส้นลวดเกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคนาโนต่างๆ เช่น ทอง ซิลิกอน เงิน และแพลตินัม เป็นต้น ลวดนาโนมีขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางอยู่ในช่วงนาโนเมตร และความยาวอยู่ในหน่วยไมโครเมตร ลวดนาโนมีโครงสร้างแบบสามมิติเนื่องจากลวดนาโนส่วนใหญ่สังเคราะห์มาจากโลหะต่างๆ จึงทำให้นิยมนำลวดนาโนมาใช้ในไบโอเซนเซอร์เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน เรียกว่า ขั้วไฟฟ้านาโน (nanoelectrode) แทนขั้วไฟฟ้าที่ใช้อยู่ทั่วไป เช่น ลวดนาโนแพลตินัม (platinum nanowire) นำมาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าลวดนาโนแพลตินัม และเมื่อนำขั้วไฟฟ้าลวดนาโนแพลตินัม จุ่มในสารละลาย $K_3Fe(CN)_6$ ที่มี 0.2 M KCl เป็นส่วนผสม โดยให้ศักย์ไฟฟ้าจาก +0.3 ถึง 0.085 โวลต์ ทำให้เกิดปฏิกิริยรีดอกซ์ (redox reaction) ของสารละลาย $K_3Fe(CN)_6$ ขึ้นทำให้ได้กระแสไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ขั้วไฟฟ้าแพลตินัมที่นิยมใช้ทั่วไป (conventional platinum) พบว่าขั้วไฟฟ้าลวดนาโนแพลตินัม (รูปที่ 7A) ให้ค่ากระแสไฟฟ้ามากกว่าขั้วไฟฟ้าแพลตินัม ที่ใช้ทั่วไปถึง 6 เท่า (รูปที่ 7B) และนอกจากนี้งานวิจัยยังได้นำขั้วไฟฟ้าลวดนาโนแพลตินัมไปประยุกต์ในไบโอเซนเซอร์เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลกลูโคส โดยทำการตรึงกลูโคสออกซิเดสไว้บนลวดนาโนแพลตินัม ด้วยการดูดซับทางกายภาพ (physical absorption) ลวดนาโนแพลตินัมมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้สามารถตรึงเอนไซม์ไว้

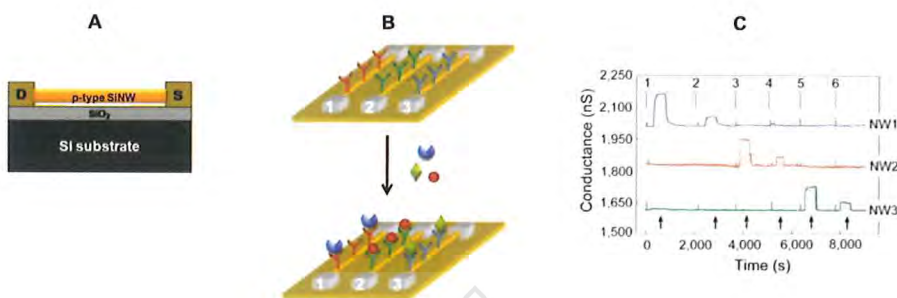
บนลวดนาโนแพลตตินัมได้มาก ส่งผลให้ความไวในการตรวจวัดเพิ่มขึ้น ทำให้มีขีดจำกัดการตรวจวัดน้ำตาลกลูโคสต่ำถึงความเข้มข้น 5×10^{-7} M

นอกจากใช้ลวดนาโนเป็นขั้วไฟฟ้าแล้ว ลวดนาโนยังสามารถนำมาสร้างเป็น field-effect sensor (FES) (Zheng et al., 2005) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ อาศัยสนามไฟฟ้ามาควบคุมการไหลของกระแสรูปที่ 8A แสดง nanowire field-effect sensor ชนิด p-type โดยใช้ลวดนาโนซิลิกอนเชื่อมต่อระหว่าง metal source (S) กับ drain electrode (D) เพื่อวิเคราะห์หาสารบ่งชี้มะเร็ง 3 ชนิดคือ prostate specific antigen (PSA) carcinoembryonic antigen (CEA) และ mucin-1 โดยตรึงแอนติบอดีของสารแต่ละชนิด คือ anti-PSA, anti-CEA และ anti-mucin-1 ไว้บนลวดนาโนซิลิกอนเส้นที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ (รูปที่ 8B) โปรตีนมีประจุได้ทั้งบวกและลบขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-เบสของสารละลาย (pH) ส่งผลให้ค่านำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนไปด้วยการเปลี่ยนแปลงของค่านำไฟฟ้าดังกล่าวแปรผันกับความเข้มข้นของแอนติเจนแต่ละชนิด (รูปที่ 8C) พบว่าไบโอเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นนี้มีจุดเด่นหลายอย่างเช่น มีขนาดเล็ก สะดวก สามารถ วิเคราะห์สารพร้อมกันได้หลายชนิด ใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อยและสามารถวิเคราะห์สารบ่งชี้มะเร็งได้ในระดับความเข้มข้นต่ำถึง 0.1 pg/ml

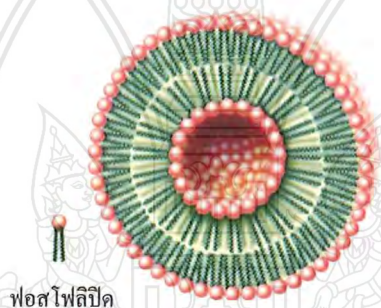
ไลโปโซม (liposomes)

ไลโปโซม คือ อนุภาครูปทรงกลมขนาดเล็กระดับนาโนเมตร ประกอบด้วยชั้นไขมันเรียงซ้อนกันสองชั้นสลับกับชั้นของน้ำดังรูปที่ 9 การประยุกต์ใช้ไลโปโซมในไบโอเซนเซอร์ส่วนใหญ่นำมาใช้เป็นสารติดฉลากเพื่อขยายสัญญาณ เพราะผิวหน้าของไลโปโซมมีหมู่อะมิโนสามารถเกิดพันธะโควาเลนต์กับโปรตีนได้ เช่น ใช้ไลโปโซมเป็นตัวหุ้มสารต่างๆ เอาไว้แล้วจึงนำไลโปโซมนี้ไปใช้เป็นสารติดฉลากต่อไป ตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์หา PSA (Zheng et al., 2008) โดยตรึงแอนติบอดีตัวที่หนึ่ง (primary antibody) ไว้

บนภาชนะ และเมื่อมี PSA ในตัวอย่าง PSA จะไปจับกับแอนติบอดี หลังจากนั้นเติมไลโปโซมที่มีแอนติบอดีตัวที่สอง (secondary antibody) ตรึงอยู่รอบๆ ไลโปโซม โดยภายในไลโปโซมมีเอนไซม์ horseradish peroxidase (HRP) แอนติบอดีตัวที่สองที่เกาะอยู่บนไลโปโซมจะไปจับกับ PSA อีกครั้งหนึ่ง เรียกวิธีนี้ว่า sandwich immunoassay PSA ที่มีในตัวอย่าง เมื่อเติมสารละลาย Triton X-100 ลงไป สารนี้ทำให้ไลโปโซมแตก แล้วปล่อยเอนไซม์ HRP ออกมา ถ้าในสารละลายมี luminol และ hydrogen peroxide เอนไซม์ HRP และ hydrogen peroxide เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของ luminol ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถเปล่งแสงได้ (luminescence) ดังนั้นความเข้มของแสงที่ได้จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของ PSA ที่มีในตัวอย่าง พบว่าวิธีนี้มีขีดจำกัดการตรวจวัดที่ความเข้มข้น 0.7 pg/ml และมีความจำเพาะเจาะจงสูง นอกจากนี้แล้วยังใช้ไลโปโซมเป็นสารติดฉลากสำหรับสร้างแผ่นตรวจ (test strip) สำหรับวิเคราะห์หา cholera toxin (Ahn-Yoon et al., 2003) ด้วยวิธี sandwich immunoassay และใช้ไลโปโซมที่ตรึงด้วย secondary anti-cholera toxin เป็นสารติดฉลาก โดยภายในไลโปโซมบรรจุสาร sulforhodamine B (SRB) ซึ่งเป็นสารฟลูออเรสเซนต์สีแดงโดยตรึง primary anti-cholera toxin ไว้บนแผ่นเมมเบรนไนโตรเซลลูโลส เมื่อจุ่มแผ่นเมมเบรนนี้ลงในสารละลายตัวอย่างที่มี cholera toxin และไลโปโซมที่มี secondary anti-cholera toxin เกาะอยู่รอบๆ สารละลายผสมดังกล่าวจะแพร่เข้าไปในแผ่นเมมเบรน ในบริเวณที่มี anti-cholera toxin สารที่ต้องการวิเคราะห์ cholera toxin จะไปจับกับ primary anti-cholera toxin ที่ถูกตรึงอยู่บนแผ่นเมมเบรน และ secondary anti-cholera toxin ที่ติดฉลากด้วยไลโปโซมจะแพร่เข้าจับกับ cholera toxin ที่อยู่บนแผ่นเมมเบรน ผลจากการจับกันทำให้เห็นเป็นแถบสีแดงที่เกิดจากสาร SRB (รูปที่ 10) ความเข้มของแถบสีจะสัมพันธ์กับปริมาณ cholera toxin ที่มีในตัวอย่าง พบว่าแผ่นตรวจสอบนี้ง่ายต่อการวิเคราะห์



รูปที่ 8 (A) การสร้าง multi-NWFES; (B) ขั้นตอนการวิเคราะห์สารบ่งชี้มะเร็ง 3 ชนิดพร้อมกัน โดยตรง anti-PSA anti-CEA anti- mucin-1 บนลวดนาโน NW1 NW2 และ NW3 ตามลำดับ ซึ่งจะจับกับ คู่แอนติเจนของ PSA CEA และ mucin-1 ตามลำดับ; (C) การเปลี่ยนแปลงของค่าการนำไฟฟ้าเมื่อเติม (1) 0.9 ng/ml PSA (2) 1.4 pg/ml PSA (3) 0.2 ng/ml CEA (4) 2 pg/ml CEA (5) 0.5 ng/ml mucin-1 และ (6) 5 pg/ml mucin-1 (ที่มา: ดัดแปลงจาก Zheng et al., 2005)



รูปที่ 9 รูปร่างของไลโปโซม (ที่มา: www.coudremode.com/my-current-fabric-obsession)

ให้ขีดจำกัดการตรวจวัด 0.1 pg/ml และให้ผลวิเคราะห์รวดเร็ว

บทสรุป

ตั้งแต่ 40 กว่าปีที่ผ่านมานับตั้งแต่เริ่มต้นกำเนิดไบโอเซนเซอร์จากการคิดค้นของลีแลนด์ คลาค ได้มีการวิจัยและพัฒนาไบโอเซนเซอร์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ผลจากงานวิจัยได้นำไปต่อยอดองค์ความรู้จนได้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดสารต่างๆ อยู่ในรูปผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายในปัจจุบัน เช่น แผ่นตรวจสอบการตั้งครรภ์ นาโน

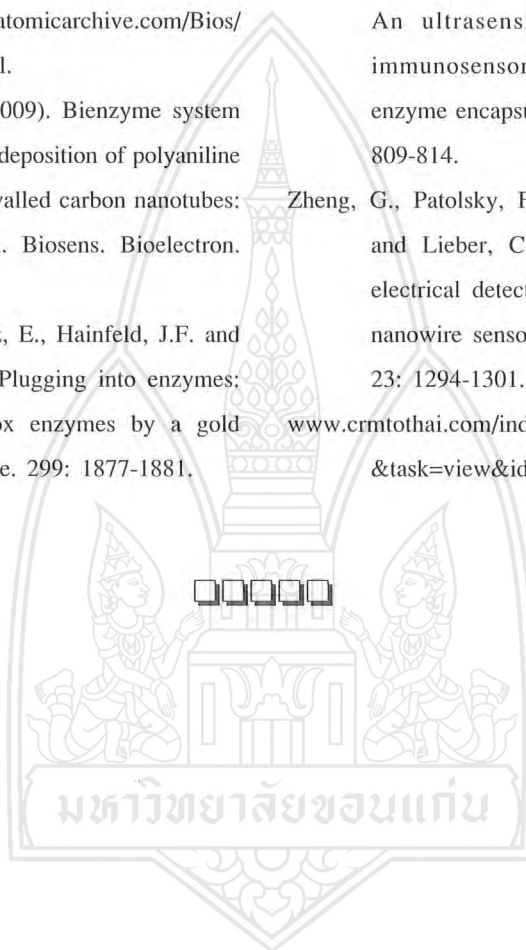
เทคโนโลยีเป็นกุญแจสำคัญหนึ่งที่จะช่วยส่งเสริมให้ไบโอเซนเซอร์ประสบความสำเร็จ มีประสิทธิภาพสูง การพัฒนาตลอดทศวรรษที่แล้วได้นำเอาวัสดุนาโน ซึ่งอยู่ในช่วงยุคที่สองของวิวัฒนาการของนาโนเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ในไบโอเซนเซอร์ ได้แก่ อนุภาคนาโน ท่อนาโนคาร์บอน ลวดนาโน และไลโปโซม อนาคตการพัฒนาของไบโอเซนเซอร์มีแนวโน้มพัฒนาไปตามวิวัฒนาการของนาโนเทคโนโลยีที่เข้าสู่ยุคที่สาม คือการทำโครงสร้างหรืออุปกรณ์ให้มีขนาดเล็กระดับนาโน โดยพยายามย่อส่วนอุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆ ใน

ระบบไบโอเซนเซอร์ให้มีขนาดเล็กลง หรือที่เรียกว่า ปฏิบัติการบนชิพ (lab-on-a-chip) ประกอบด้วย ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง การเกิดปฏิกิริยา และการตรวจวัด รวมทั้งทุกอย่างไว้บนแผ่นชิพที่มีขนาดเพียงไม่กี่เซนติเมตร และยังมีศักยภาพมากขึ้นเรื่อยๆ เพื่อที่จะสร้างไบโอเซนเซอร์ให้มีขนาดเล็กยิ่งขึ้น เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูง ใช้สารเคมีและสารตัวอย่างน้อย สะดวกต่อการใช้งานและพกพาได้ง่าย

เอกสารอ้างอิง

- Ahn-Yoon, S., DeCory, T. R., Baeumner, A. J. and Durst R. A. (2003). Ganglioside-liposome immunoassay for the ultrasensitive detection of cholera toxin. *Anal. Chem.* 75: 2256-2261.
- Ding, Y., Liu, J., Wang, H., Shen, G. and Yu, R. (2007). A piezoelectric immunosensor for the detection of α -fetoprotein using an interface of gold/hydroxyapatite hybrid nanomaterial. *Biomaterials*, 28: 2147-2154.
- Dutton, J. J. (1996). Botulinum-A-toxin in the treatment of craniocervical muscle spasms: Short-in and long-term, local and systemic effects. Review Article. *Surv. Ophthalmol.* 41: 51-65.
- Eggins, B. R. (1996). *Biosensors: an Introduction*. New York: John Wiley & Son. 1-30.
- Fu, X. H. (2008). Magnetic-controlled non-competitive enzyme-linked voltammetric immunoassay for carcinoembryonic antigen. *Biochem. Eng. J.* 39: 267-275.
- Jianrong, C., Yuqing, M., Nongyue, H., Xiaohua, W. and Li, S. (2004). Nanotechnology and biosensors. *Biotechnol. Adv.* 22: 505-518.
- Kim, J. P., Lee, B. Y., Hong, S. and Sim, S. J. (2008). Ultrasensitive carbon nanotube-based biosensors using antibody-binding fragments. *Anal. Biochem.* 381: 193-198.
- Li, M., Huang, S., Zhu, P., Kong, L., Peng, B. and Gao, H. (2009). A novel DNA biosensor based on ssDNA/Cytc/L-Cys/GNPs/Chits/GCE. *Electrochim. Acta.* 54: 2284-2289.
- Liposome in Encyclopedia Britannica. Retrieved October27, (2010), from www.britannica.com/EBchecked/topic/342910/liposome.
- Loyprasert, S., Hedstrom, M., Thavarungkul, P., Kanatharana, P. and Mattiasson, B. (2010). Sub-attomolar detection of cholera toxin using a label-free capacitive immunosensor. *Biosens. Bioelectron.* 25: 1977-1983.
- Mao, X., Yang, L., Su, X.L. and Li, Y. (2006). A nanoparticle amplification based quartz crystal microbalance DNA sensor for detection of *Escherichia coli* O157:H7. *Biosens. Bioelectron.* 21: 1178-1185.
- Okuno, J., Maehashi, K., Kerman, K., Takamura, Y., Matsumoto, K and Tamiya, E. (2007). Label-free immunosensor for prostate-specific antigen based on single-walled carbon nanotube array-modified microelectrodes. *Biosens. Bioelectron.* 22: 2377-2381.
- Polsky, R., Gill, R., Kaganovsky, L. and Willner, I. (2006). Nucleic Acid-Functionalized Pt Nanoparticles: Catalytic Labels for the Amplified Electrochemical Detection of Biomolecules. *Anal. Chem.* 78: 2268-2271.
- Rahman, M. M., Umar, A. and Sawada, K. (2009). Development of amperometric glucose biosensor based on glucose oxidase co-immobilized with multi-walled carbon nanotubes at low potential. *Sensor. Actuat.*

- B. 137: 327-333.
- Ram, M. K. and Bhethanabotla, V. R. (2010). *Sensors for Chemical and Biological Applications*. New York: CRC Press. 135-171.
- Richard Feynman Photograph. Retrieved October 30, (2010), from www.atomicarchive.com/Bios/FeynmanPhoto.shtml.
- Sheng, Q. and Zheng, J. (2009). Bienzyme system for the biocatalyzed deposition of polyaniline templated by multiwalled carbon nanotubes: A biosensor design. *Biosens. Bioelectron.* 24: 1621-1628.
- Xiao, Y., Patolsky, F., Katz, E., Hainfeld, J.F. and Willner, I. (2003). Plugging into enzymes: nanowiring of redox enzymes by a gold nanoparticle. *Science*. 299: 1877-1881.
- Yang, M., Qu, F., Lu, Y., He, Y., Shen, G. and Yu, R. (2006). Platinum nanowire nanoelectrode array for the fabrication of biosensors. *Biomaterials*. 27: 5944-5950.
- Zheng, Y., Chen, H., Liu, X. P., Jiang, J. H., Luo, Y., Shen, G. L. and Yu, R. Q. (2008). An ultrasensitive chemiluminescence immunosensor for PSA based on the enzyme encapsulated liposome. *Talanta*. 77: 809-814.
- Zheng, G., Patolsky, F., Cui, Y., Wang, W. U. and Lieber, C. M. (2005). Multiplexed electrical detection of cancer markers with nanowire sensor arrays. *Nature Biotechnol.* 23: 1294-1301.
- www.crmtotai.com/index.php?option=com_content&task=view&id=2005&Itemid=87





เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสงที่ใช้พอลิแอนิไลน์ เป็นขั้วเคาน์เตอร์

Dye-Sensitized Solar Cell based on Polyaniline Films as Counter Electrode

สมักร์ พิมานแพง¹

บทนำ

ในปัจจุบันด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี และเศรษฐกิจที่พัฒนาอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็วตามไปด้วย แหล่งพลังงานหลักที่ใช้ในปัจจุบันคือ น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ และถ่านหิน แต่ปริมาณพลังงานธรรมชาติเหล่านี้มีอยู่อย่างจำกัดและมีปริมาณลดลงไปเรื่อยๆ จึงจำเป็นต้องหาพลังงานด้านอื่นมาทดแทน ตัวอย่างเช่น พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานนิวเคลียร์ และพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น สำหรับพลังงานน้ำแม้จะใช้อย่างมากในประเทศไทยเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า แต่ก็ยังให้พลังงานไม่เพียงพอกับความต้องการของผู้ใช้ การที่จะสร้างเขื่อนเพิ่มจะส่งผลกระทบต่อหลายด้าน ทั้งต่อธรรมชาติ พื้นที่ทำกินและที่อยู่อาศัยของชาวบ้านจึงเป็นวิธีการแก้ปัญหาที่ไม่เหมาะสม ส่วนพลังงานนิวเคลียร์ถึงจะให้ปริมาณพลังงานมากเพียงพอสำหรับความต้องการ แต่ด้วยผลข้างเคียงที่ค่อนข้างรุนแรงและมีระยะเวลายาวนานทำให้ประชาชนไม่มีความมั่นใจ

จึงยังไม่มีการนำมาใช้เป็นแหล่งผลิตพลังงานในประเทศไทย พลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่สะอาดและไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ด้วยประเทศไทยมีอัตราเร็วลมที่ต่ำ ทำให้ได้พลังงานน้อยจึงไม่ได้รับความสนใจมากเท่าพลังงานแสงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่มีอยู่ตามธรรมชาติและไม่มีจำกัด พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวโลกต่อวันประมาณ 10^5 Tetra watt (TW) ซึ่งพืชนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงเพียงประมาณ 100 TW ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 1 ของพลังงานที่ตกกระทบผิวโลก (Nissfolk, 2009) ดังนั้นถ้าสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมดที่ตกกระทบโลกในหนึ่งวันให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้หมด เราจะมีพลังงานเพียงพอกับความต้องการของมนุษย์ทั้งโลกตลอดทั้งปี แต่ว่าที่ยังไม่มีการใช้เซลล์แสงอาทิตย์แพร่หลายเพราะราคาของเซลล์แสงอาทิตย์สูงมากเมื่อเทียบกับการใช้พลังงานจากน้ำมันหรือแก๊สธรรมชาติ

¹ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

เหตุที่เซลล์แสงอาทิตย์มีราคานั้นเพราะว่าสารที่ใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์เป็นสารที่หายาก หรือมีกระบวนการเตรียมที่ยุ่งยากและซับซ้อน เช่น แกลเลียม (Ga) ซีลีเนียม (Se) หรือ ซิลิคอน (Si) ดังนั้นเพื่อลดต้นทุนการผลิตสารที่นำมาใช้ควรมีปริมาณมากตามธรรมชาติและมีกระบวนการเตรียมที่ง่ายสำหรับทำเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ถูกค้นพบครั้งแรกโดย A. E. Becquerel ใน ค.ศ. 1839 (Becquerel, 1839) โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนมีการนำออกมาวางจำหน่ายครั้งแรก ในปี ค.ศ. 1950 และมีการศึกษาพัฒนาเรื่อยมาจากการคำนวณเชิงทฤษฎีพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนสามารถให้ประสิทธิภาพสูงสุดถึงร้อยละ 30 แต่จนถึงปัจจุบันก็ยังไม่มียี่ห้อใดสามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนที่มีราคาถูกและให้ประสิทธิภาพสูงเท่ากับที่ประมาณการไว้ จึงได้มีความสนใจศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางเพื่อจะลดต้นทุนการผลิต ตัวอย่างเช่น CdTe solar cell (Mathew, et al., 2004), Amorphous silicon solar cell (Muthmann, et al., 2011) หรือ Cu(In,Ga)Se_2 solar cell (Ramanathan, et al., 2005) แต่ว่าราคาก็ยังค่อนข้างสูงเพราะต้องใช้ระบบการผลิตที่ซับซ้อน

ในปี ค.ศ. 1991 ได้มีการค้นพบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่โดย Grätzer นักวิทยาศาสตร์ชาวสวิสเซอร์แลนด์ เรียกเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่นี้ว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (dye-sensitized solar cell) หรือ Grätzer's cell (O'Regan et al., 1991) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากจากนักวิทยาศาสตร์และนักธุรกิจทั่วโลก เพราะว่ามีต้นทุนการผลิตต่ำและให้ประสิทธิภาพอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพึงพอใจ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงสูงที่สุดที่ทำได้ในปัจจุบันประมาณร้อยละ 10 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ขั้วทำงาน (working electrode) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) และ ขั้วเคาน์เตอร์ (counter electrode) โดยทั่วไปขั้วเคาน์เตอร์

จะใช้ฟิล์มแพลตตินัม (Platinum, Pt) แต่ว่าแพลตตินัมเป็นสารที่มีราคาแพงและหายาก จึงได้มีการนำสารอื่นมาแทนแพลตตินัม เช่น ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) คาร์บอนแบล็ค (carbon black) กราฟีน (graphene) หรือพอลิเมอร์นำไฟฟ้า สำหรับบทความนี้จะกล่าวถึงการนำพอลิเมอร์ชนิดพอลิแอนิลีน (polyaniline) มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งกล่าวถึงผลของความหนา ลักษณะโครงสร้างของฟิล์มพอลิแอนิลีนต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

องค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 1(a)

1. ขั้วทำงาน (Working electrode)

ขั้วทำงานเป็นส่วนที่ไว้รับแสงจะประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ (metal oxide semiconductor) ที่ย้อมด้วยสีย้อมไวแสง (dye molecules) และเคลือบบนวัสดุออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสง (transparent conducting oxide, TCO)

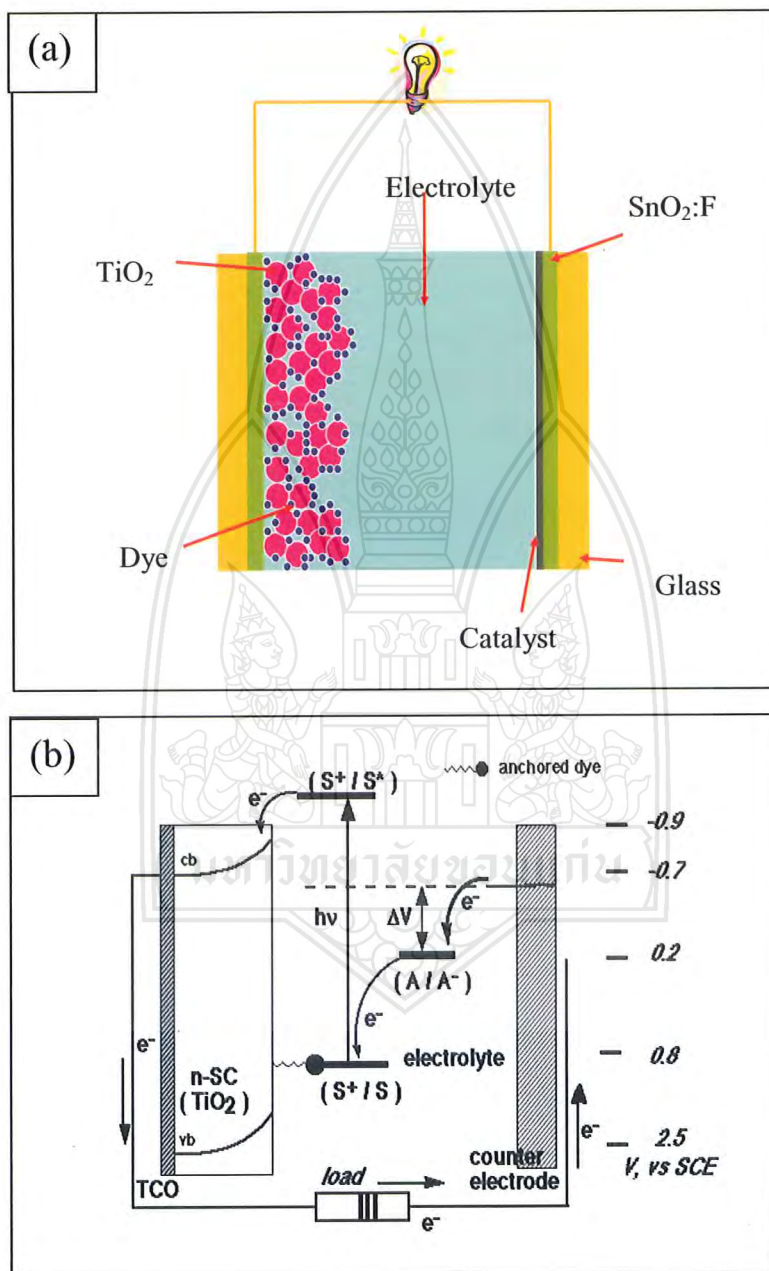
1.1 สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ (metal oxide semiconductor)

สารกึ่งตัวนำเป็นสารที่มีช่องว่าง (gap) ระหว่างแถบการนำ (conduction band) กับแถบเวเลนซ์ (valence band) ที่กว้าง สารที่นิยมใช้เตรียมขั้วทำงานคือ TiO_2 เพราะว่าเป็นสารที่มีวิธีการเตรียมที่ง่าย มีความเสถียรสูง ทนต่อความร้อน ไม่เป็นพิษ และมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูง (high diffusion coefficient) จึงได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าโลหะออกไซด์ชนิดอื่นๆ ขนาดอนุภาคของ TiO_2 ที่ใช้มีขนาดระดับนาโนเมตร เพราะจะช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสเป็นผลให้เม็ดสีย้อมปริมาณมากมาเกาะบนขั้ว และลักษณะของฟิล์มควรมีความเป็นรูพรุนที่สูง (high porosity) เพื่อให้สารอิเล็กโทรไลต์ไหลเข้าออกได้สะดวก

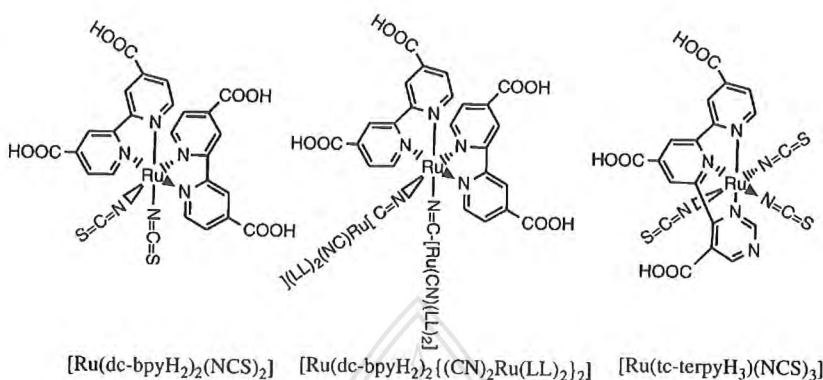
1.2 เม็ดสีย้อม (dye sensitizer)

เม็ดสีย้อมจะเคลือบบนผิวสารกึ่งตัวนำ และทำหน้าที่ในการดูดกลืนแสงอาทิตย์ เม็ดสีย้อมที่ใช้ควรจะมีช่วงการดูดกลืนแสงที่กว้างตั้งแต่แสงที่

ตามองเห็น (visible) ถึงใกล้อินฟราเรด (near infrared) มีสมบัติประสิทธิภาพการดูดกลืนและแสงสูง มีความเสถียรสูงในทุกสภาวะ (ทั้งสภาวะพื้นและสภาวะกระตุ้น) โดยทั่วไปมักจะใช้โมเลกุลของสารประกอบเชิงซ้อน



รูปที่ 1 (a) องค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง และ (b) วัฏจักรการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเมื่อมีแสงตกกระทบ (ภาพ (b) ดัดแปลงจาก Kalyanasundaram et al., 1998)



รูปที่ 2 ตัวอย่างสูตรโครงสร้างโมเลกุลของเม็ดสีย้อมที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียม (Ru) ชนิดต่างๆ (ที่มา: Kalyanasundaram et al., 1998)

โลหะรูทีเนียม (Ru) กับลิแกนด์ (ligand) ที่อยู่ในกลุ่มพอลิไพรีดีน (polypyridine) เป็นเม็ดสีย้อม ตัวอย่างสูตรโครงสร้างโมเลกุลของเม็ดสีย้อมแสดงในรูปที่ 2

1.3 วัสดุออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสง (transparent conducting oxide, TCO)

วัสดุออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสง คือ สารที่มีสมบัติในการนำไฟฟ้าและในขณะเดียวกันก็ยอมให้แสงในช่วงที่ตามองเห็นส่องผ่าน โดยทั่วไปแล้วสารที่นำมาทำเป็นออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสง คือ 1) สารอินเดียมออกไซด์ผสมดีบุก (Indium tin oxide, ITO) (Pasquier, et al., 2009) แต่ว่า ITO ไม่ค่อยเสถียรที่อุณหภูมิสูง และ 2) สารทินออกไซด์ผสมฟลูออไรด์ ($\text{SnO}_2:\text{F}$, FTO) จะมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า ITO

2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte)

สารละลายอิเล็กโทรไลต์มีหน้าที่ในการรับและส่งอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดมายังขั้วทำงาน เพื่อปรับสถานะของเม็ดสีย้อมที่อยู่ในสถานะกระตุ้นให้กลับสู่สถานะพื้นโดยกระบวนการรีดอกซ์ (redox reaction) เม็ดสีย้อมเมื่อกลับมาอยู่ในสถานะพื้นจะสามารถรับแสงและให้อิเล็กตรอนกับแถบการนำได้อีกครั้ง สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่นิยมใช้ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม คือ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มี $\text{I}^- / \text{I}_3^-$ เป็นองค์ประกอบหลัก ปฏิกิริยาที่ I_3^- รับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดเรียกว่าปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ดังแสดงในสมการ (1) และปฏิกิริยาที่ I^- ให้อิเล็กตรอนกับเม็ดสีย้อมเรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ดังแสดงในสมการ (2)



3. ขั้วแคโทด (counter electrode)

ขั้วแคโทดมีหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่มาจากขั้วทำงานและไหลผ่านโหลด (load) กลับคืนสารอิเล็กโทรไลต์ด้วยปฏิกิริยารีดักชันดังแสดงในสมการ (1) โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) เป็นตัว

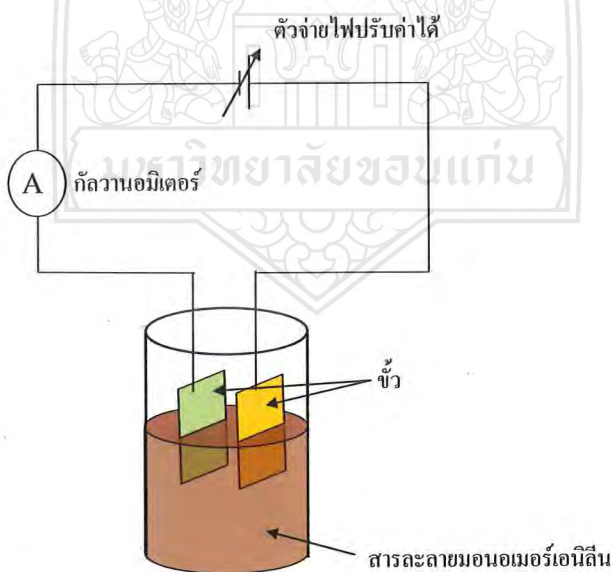
ช่วยกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา ถ้าขาดสารเร่งปฏิกิริยาเคลือบบนผิวขั้วแคโทดจะทำให้ปฏิกิริยารีดักชันเกิดได้ยาก ส่งผลให้ระบบขาด I^- ที่จะไปลดสถานะกระตุ้นของเม็ดสีย้อมคืนสู่สถานะพื้น เป็นผลให้เม็ดสีย้อมไม่สามารถให้อิเล็กตรอนและระบบจะไม่มี

กระแสไหลในที่สุด กระบวนการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงสรุปได้ดังรูปที่ 1(b) ในบทความนี้จะสรุปงานที่เกี่ยวกับการนำพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดพอลิเอนิลีนมาประยุกต์ใช้เป็นขั้วแคโทด

การประยุกต์ใช้พอลิเอนิลีนเป็นขั้วแคโทดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

พอลิเอนิลีนถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในหลายด้าน เช่น ทำเป็นตัวเก็บประจุความจุสูง (supercapacitor) (Hu et al., 2004; Peng et al., 2008) กระจกปรับแสงได้ (electrochromic glass) (Zhao et al., 2009) หรือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Senadeera et al., 2004) พอลิเอนิลีนได้รับความสนใจใช้เป็นขั้วแคโทดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง เพราะว่าเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์สูงกับ I/I_3^- มีกระบวนการเตรียมที่ง่าย และนำไฟฟ้าค่อนข้างดี ฟิล์มพอลิเอนิลีนสามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่น Plasma-assisted Chemical deposition (Ameen et al., 2009), Chemical polymerization (Li et al., 2008) หรือ Electrochemical deposition

(Li et al. 2009; Qin et al., 2010; Zhang et al., 2010) ด้วยกระบวนการเตรียมแต่ละแบบจะได้ฟิล์มที่มีโครงสร้างและคุณสมบัติที่แตกต่างกัน กระบวนการเตรียมด้วย Plasma-assisted chemical deposition จำเป็นต้องทำในระบบความดันต่ำ (vacuum chamber) และมีตัวกำเนิดพลาสมา (plasma generator) เป็นตัวช่วยเร่งการเกิดฟิล์มจึงเป็นวิธีที่ยังต้องลงทุนสูง ส่วนการเตรียมด้วยกระบวนการ Chemical polymerization เป็นกระบวนการที่ต้องใช้สารรีดิวซ์ (reducing agent) ช่วยกระตุ้นการเกิดพอลิเมอร์ แต่การควบคุมการเกิดฟิล์มของกระบวนการนี้ค่อนข้างยาก หลายกลุ่มวิจัยจึงได้ทำการศึกษาการเตรียมพอลิเอนิลีนด้วยวิธีการสังเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical deposition) ซึ่งใช้ไฟฟ้ากระแสตรงหรือกระแสสลับเพื่อทำให้เกิดพอลิเอนิลีน อุปกรณ์สำหรับเตรียมฟิล์มแบบง่ายๆ ประกอบด้วยตัวจ่ายไฟฟ้าปรับค่าได้ต่อกับขั้วที่แช่อยู่ในสารละลายเอนิลีนดังแสดงในรูปที่ 3 โดยความหนาของฟิล์มสามารถควบคุมได้จากระยะเวลาการเคลือบหรือความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้

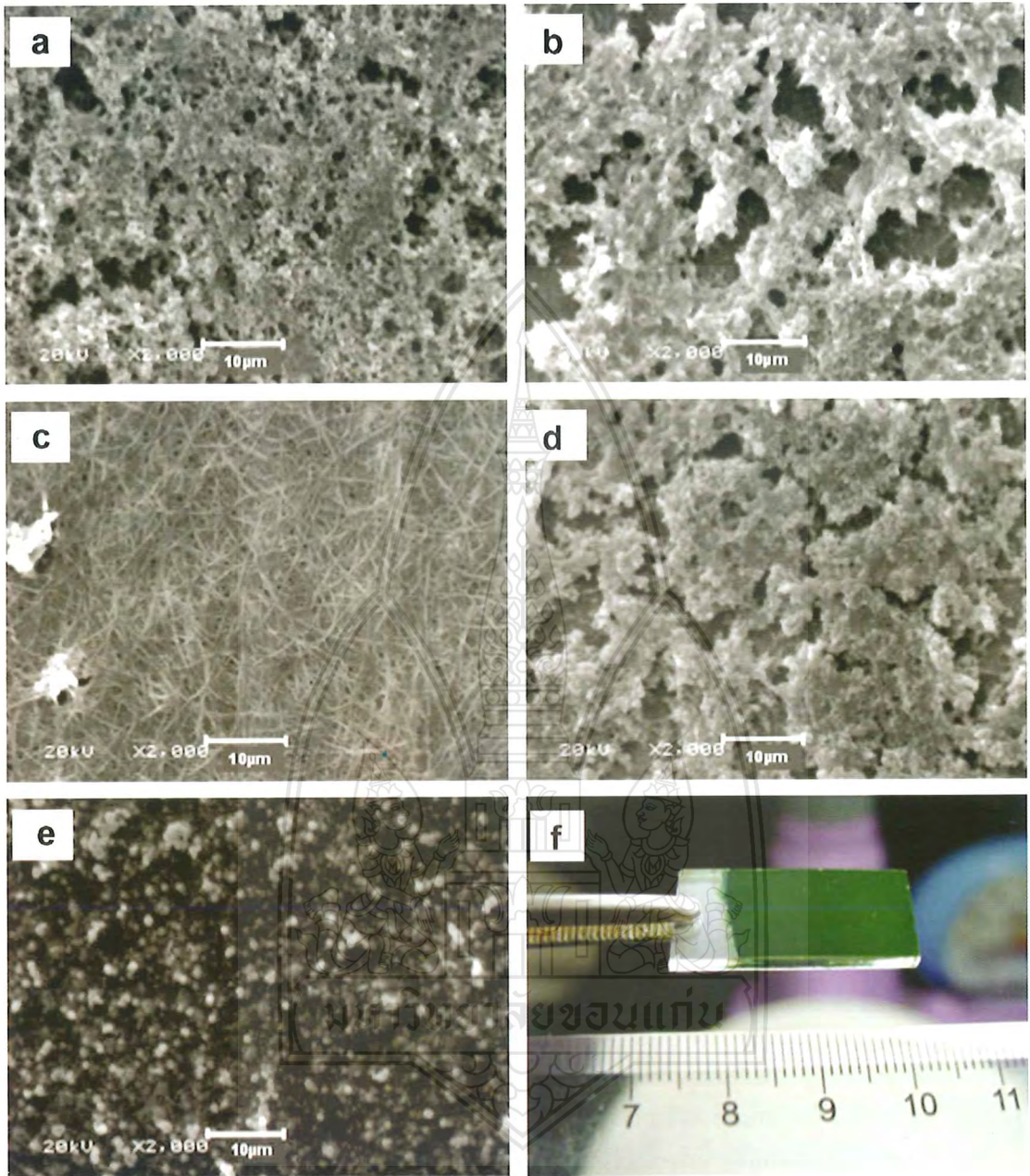


รูปที่ 3 อุปกรณ์อย่างง่ายสำหรับเคลือบฟิล์มพอลิเอนิลีนด้วยกระบวนการสังเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical deposition)

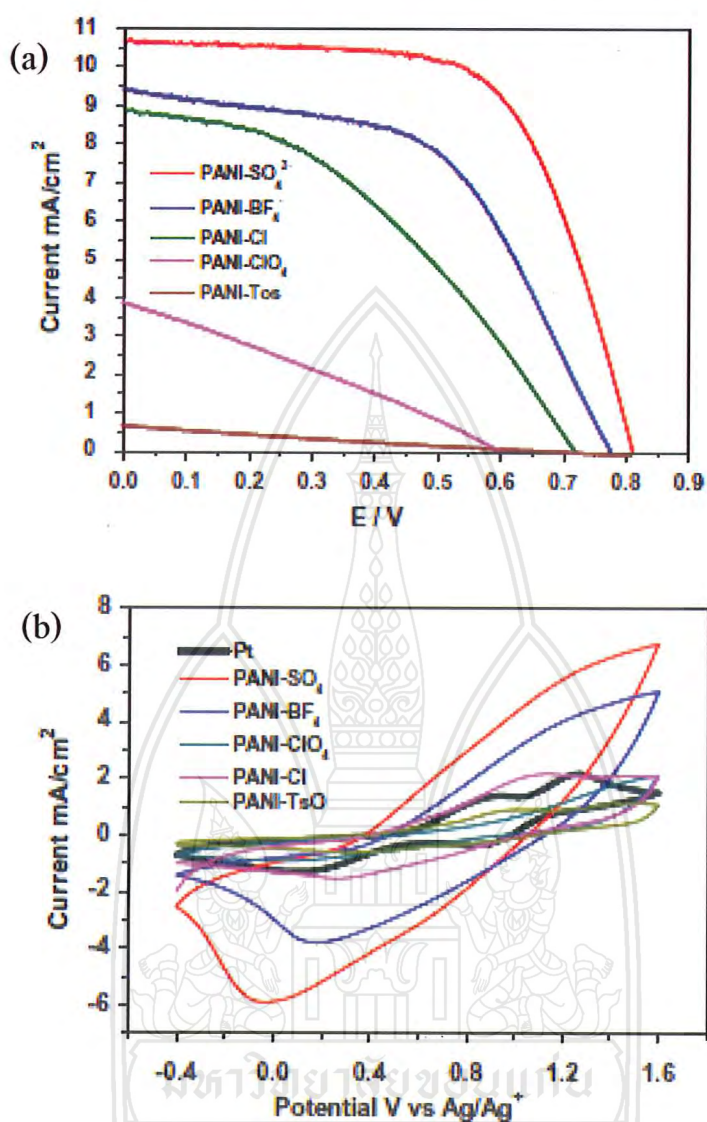
พอลิเอนิลีนที่เตรียมโดยวิธีการสังเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมีมีหลายลักษณะ ทั้งแบบเส้นใยขนาดนาโนเมตรหรือแบบฟิล์มต่อเนื่อง Li และคณะ (Li et al., 2009) เตรียมฟิล์มพอลิเอนิลีนโดยใช้กรด H_2SO_4 , HBF_4 , $HClO_4$, HCl และ p-toluenesulfonic acid เป็นตัวทำละลายเอนิลีน ผลพบว่าฟิล์มที่ได้มีลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4 สารละลายกรด H_2SO_4 และ $HClO_4$ จะให้รูปร่างเป็นเส้นใยนาโน แต่สารละลายกรด p-toluenesulfonic acid จะได้พอลิเอนิลีนมีลักษณะเป็นฟิล์ม ผลการวัดค่าความหนาแน่นกระแส (J) และความต่างศักย์ (V) ของแต่ละเซลล์แสดงในรูปที่ 5 จากรูปจะเห็นว่ากราฟความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์เปลี่ยนแปลงตามรูปร่างของพอลิเอนิลีน ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์คำนวณจากกราฟความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์เตรียมจากสารละลาย H_2SO_4 (PANI-SO₄), HBF_4 (PANI-BF₄), $HClO_4$ (PANI-ClO₄), HCl (PANI-Cl) และ p-toluenesulfonic acid (PANI-TsO) เท่ากับร้อยละ 5.6 3.9 2.6 น้อยกว่า 1 และน้อยกว่า 1 ตามลำดับ การที่ฟิล์มพอลิเอนิลีนแต่ละแบบให้ประสิทธิภาพต่างกัมนั้นน่าจะเนื่องจากความแตกต่างของโครงสร้างและการเกิดปฏิกิริยารีดักชันปฏิกิริยาเคมีของฟิล์มพอลิเมอร์ถูกวิเคราะห์ด้วยกระบวนการไซคลิกโวลแทมเมทรี (cyclic voltamogram, CV) ผลแสดงดังรูปที่ 5(b) จากรูปไซคลิกโวลแทมเมทรีจะเห็นว่าฟิล์มที่เตรียมจากสารละลาย H_2SO_4 (PANI-SO₄) มีค่าความหนาแน่นกระแสสูงสุดซึ่งหมายถึงการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่สูงเป็นผลให้ได้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่สูงที่สุด

Qin และคณะ (Qin et al., 2010) เตรียมฟิล์มพอลิเอนิลีนบนแผ่นสแตนเลสโดยวิธีการสังเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ความต่างศักย์

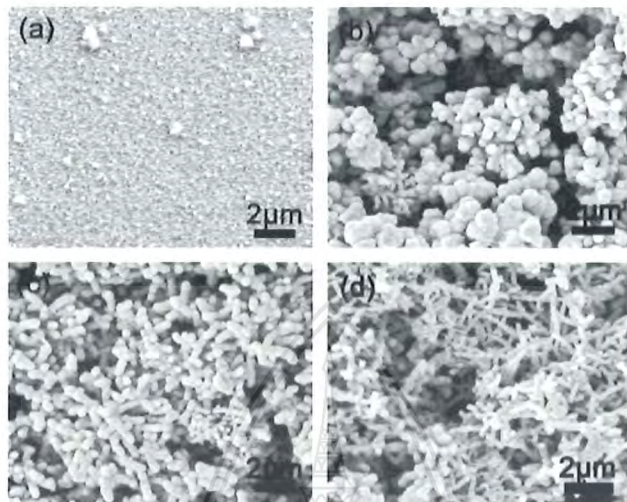
ไฟฟ้า 0.9 โวลต์ 1.0 โวลต์ 1.1 โวลต์ และ 1.2 โวลต์ เป็นระยะเวลา 4000 วินาที ลักษณะของฟิล์มพอลิเมอร์มีโครงสร้างดังรูปที่ 6 จะเห็นว่าความต่างศักย์ที่ใช้มีอิทธิพลอย่างมากต่อรูปร่างของพอลิเมอร์ ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.9 โวลต์ ไม่มีฟิล์มพอลิเอนิลีนเกิดขึ้นบนกระจก อาจจะเป็นเพราะว่าศักย์ไฟฟ้าไม่สูงพอที่จะกระตุ้นการเกิดเป็นพอลิเมอร์ แต่ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าอื่นๆ มีฟิล์มพอลิเมอร์เคลือบบนวัสดุออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสงเมื่อนำฟิล์มพอลิเมอร์นี้มาทำเป็นขั้วแคโทดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ ผลความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์แสดงดังรูปที่ 7(a) ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอลิเอนิลีนเตรียมที่ 1.0 โวลต์ (PANI1.0V), 1.1 โวลต์ (PANI1.1V), 1.2 โวลต์ (PANI1.2V) และแพลทินัม (Pt/FTO) คือร้อยละ 7.00 5.53 4.75 และ 4.56 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (impedance Spectroscopy) พบว่าค่าความต้านทานเชิงซ้อน (impedance, Z) ของขั้วแคโทดแตกต่างกันอย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 7(b) ค่าความต้านทานเชิงซ้อนของ PANI 1.0 โวลต์ น้อยที่สุดซึ่งบ่งบอกว่าค่าความต้านทานของขั้วแคโทดต่ำและสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพที่สูงที่สุด นอกจากนี้ยังมีอีกหลายกลุ่มที่เตรียมฟิล์มพอลิเอนิลีนด้วยวิธีการสังเคราะห์ทางไฟฟ้าและศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นกระแสและโครงสร้างของฟิล์มพอลิเอนิลีนต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น กลุ่ม Zhang (Zhang et al., 2010) เตรียมพอลิเอนิลีนด้วยกระบวนการไฟฟ้ากระแสสลับที่จำนวนรอบการเคลือบต่างๆ ผลการทดลองพบว่าความหนาแน่นของฟิล์มพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบการเคลือบ และสามารถเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ได้ประสิทธิภาพสูงสุดประมาณร้อยละ 4.95



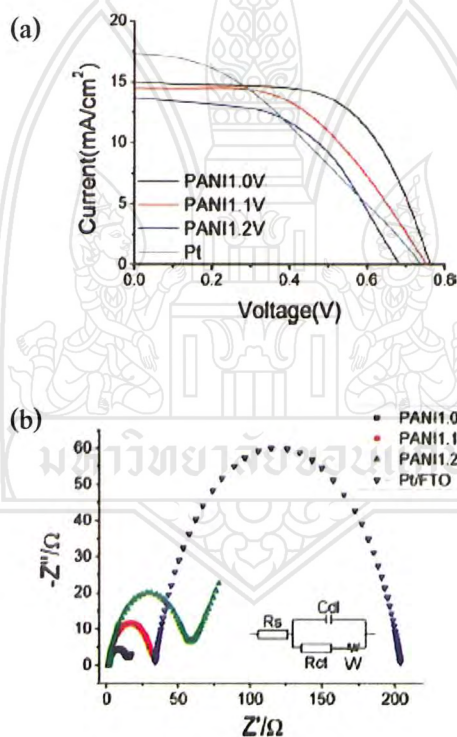
รูปที่ 4 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มพอลิเอทิลีนที่ใช้สาร (a) H_2SO_4 , (b) HBF_4 , (c) HClO_4 , (d) HCl (e) p-toluenesulfonic acid เป็นตัวทำละลาย ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ (f) ภาพถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลของฟิล์ม (a) (ที่มา: Li et al., 2009)



รูปที่ 5 (a) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ฟิล์มพอลิเอนิลีนเป็นขั้วแคโทด และ (b) ผลการวัดไซคลิกโวลแทมเมทรี (cyclic voltamogram, CV) ของฟิล์มพอลิเอนิลีน ในสาร 10 mM LiI, 1 mM I₂ และ 0.1 M LiClO₄ ในตัวทำละลายอะซิโตนไทรล์ (acetonitrile) (ดัดแปลงจาก Li et al., 2009)



รูปที่ 6 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มพอลิเอินิลินที่เตรียมด้วยไฟฟ้ากระแสตรงที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า (a) 0.9 V, (b) 1.0 V, (c) 1.1 V และ (d) 1.2 V (ที่มา: Qin et al., 2010)



รูปที่ 7 (a) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากฟิล์มพอลิเอินิลิน เตรียมด้วยไฟฟ้ากระแสตรง และ (b) ผลการวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อน (impedance, Z) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ฟิล์มพอลิเอินิลินเป็นขั้วแคโทด เมื่อ R_s คือ Series resistance, C_{dl} คือ $\text{TiO}_2/\text{electrolyte}$ interface capacitance, R_{ct} คือ Charge transfer resistance และ W คือ Electrolyte diffusion (ดัดแปลงจาก Qin et al., 2010)

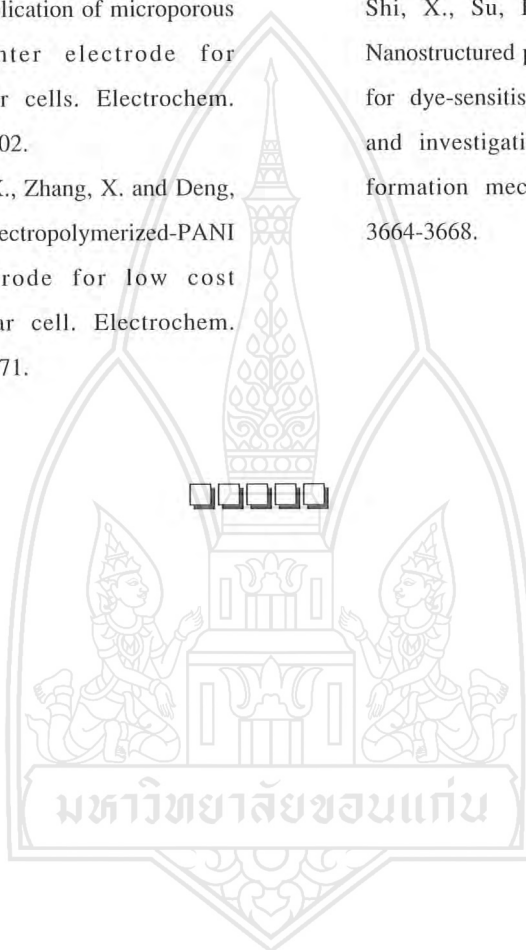
บทสรุป

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่นๆ และให้ประสิทธิภาพอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพึงพอใจ ในปัจจุบันได้มีการพยายามที่จะลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยการใช้สารเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาถูกและเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่สูงแทนสารแพลทตินัม พอลิเอนิลีนเป็นตัวเลือกหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมากเพราะว่าสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับ I_3^- ได้ดี มีกระบวนการผลิตที่ง่าย และราคาถูก ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ฟิล์มพอลิเอนิลีนเตรียมด้วยวิธีการสกรีนทางไฟฟ้า สูงประมาณ 7.00% และจากงานวิจัยของหลายกลุ่มสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอลิเอนิลีนเป็นขั้วแคโทดจะขึ้นอยู่กับความหนา โครงสร้าง ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีและความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มพอลิเมอร์

เอกสารอ้างอิง

- Nissfolk, J. (2009). Charge transport process in mesoporous photoelectrochemical system, Doctoral thesis in chemistry, KTH Ventenskap Och Konst, 2.
- Mathew, X., Enriquez, J.P., Romeo, A. and Tiwari, A.N. (2004). CdTe/CdS solar cells on flexible substrates, *Sol. Energy*. 77: 831-838.
- Muthmann S. and Gordijn A. (2011). Amorphous silicon solar cells deposited with non-constant silane concentration, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 95: 573-578.
- Ramanathan, K., Teeter, G., Keane, J.C. and Noufi R. (2005). Properties of high-efficiency CuInGaSe₂ thin film solar cells, *Thin Solid Films*. 480-481: 499- 502.
- Becquerel, A. E. (1839). Memoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires. *Compt. Rend. Acad. Sci*. 9: 561.
- O'Regan, B. and Grätzel, M. (1991). A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature* 353: 737-740.
- Kalyanasundaram, K. and Grätzel, M. (1998). Applications of functionalized transition metal complexes in photonic and optoelectronic Devices. *Coord. Chem. Reviews*. 77: 347-414.
- Pasquier, A.D., Stewart, M., Spitler, T. and Coleman, M., (2009). Aqueous coating of efficient flexible TiO₂ dye solar cell photoanodes, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 93: 528-535.
- Hu, C.-C., Li, W.-Y. and Lin, J.-Y. (2004). The capacitive characteristics of supercapacitors consisting of activated carbon fabric-polyaniline composites in NaNO₃. *J. Power. Sources*. 137: 152-157.
- Peng, C., Zhang, S., Jewell D. and Chen, G. Z., (2008). Carbon nanotube and conducting polymer composites for supercapacitors. *Prog. Nat. Sci*. 18: 777-788.
- Zhao, L., Zhao, L., Xu, Y., Qiu, T., Zhi, L. and Shi, G. (2009). Polyaniline electrochromic devices with transparent graphene electrodes. *Elect. Acta*. 55: 491-497.
- Senadeera, G.K.R., Kitamura, T., Wadab, Y. and Yanagida, S. (2004). Deposition of polyaniline via molecular self-assembly on TiO₂ and its uses as a sensitizer in solid-state solar cells. *J. Pho. Photobiol. A. Chem*. 164: 61-66.

- Ameen, S., Akhtar M. S., Kim, G.-S., Kim Young Soon, Yang, O.-B. and Shin H.-S. (2009). Plasma-enhanced polymerized aniline/TiO₂ dye-sensitized solar cells. *J. Alloys. Comp.* 487: 382-386.
- Li, Q., Wu, J., Tang, Q., Lan, Z., Li, P., Lin, J. and Fan, L. (2008). Application of microporous polyaniline counter electrode for dye-sensitized solar cells. *Electrochem. Comm.* 10: 1299-1302.
- Li, Z., Ye, B., Hu, X., Ma, X., Zhang, X. and Deng, Y. (2009). Facile electropolymerized-PANI as counter electrode for low cost dye-sensitized solar cell. *Electrochem. Comm.* 11: 1768-1771.
- Qin, Q., Tao, J. and Yang, Y. (2010). Preparation and characterization of polyaniline film on stainless steel by electrochemical polymerization as a counter electrode of DSSC. *Synth. Metals.* 160: 1167-1172.
- Zhang, J., Hreid, T., Li, X., Guo, W., Wang, L., Shi, X., Su, H. and Yuan, Z. (2010). Nanostructured polyaniline counter electrode for dye-sensitized solar cells: Fabrication and investigation of its electrochemical formation mechanism. *Elect. Acta.* 55: 3664-3668.





แบตเตอรี่ชนิดใหม่เพื่ออนาคต: แบตเตอรี่ ชนิดโซเดียมไอออน

A New Rechargeable Battery For The Future: Sodium-Ion Batteries

นงลักษณ์ มีทอง¹

บทนำ

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนถูกนำมาใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1990 โดยบริษัทโซนี่ (Nagaura and Tozawa, 1990) และได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเพื่อใช้เป็นตัวเก็บพลังงานไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พกพาต่างๆ เช่น โทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์ และกล้องถ่ายรูป และในขณะนี้ บริษัทผลิตรถยนต์รายใหญ่ๆ ของโลกยังได้หันมาลงทุนผลิตรถยนต์ไฮบริด (hybrid electric cars) รถปลั๊กอินไฮบริด (plug-in hybrid cars) และรถยนต์ไฟฟ้า (electric cars) กันมากขึ้น เพื่อสนองความต้องการการลดใช้พลังงานจากแหล่งสิ้นเปลืองและปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูง เช่น น้ำมัน และหันมาใช้พลังงานไฟฟ้า โดยเฉพาะพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งหมุนเวียนและสะอาด เช่น พลังงานจากลม และพลังงานจากแสงอาทิตย์ ทำให้ความต้องการใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนมีมากขึ้นเป็นทวีคูณ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวัตถุดิบหลักที่นำมาใช้ผลิตแบตเตอรี่ชนิดนี้ คือ สารประกอบของลิเทียม มีปริมาณที่จำกัดและมีอยู่ในบางประเทศเท่านั้น ขั้วยัง

มีราคาสูงขึ้นอย่างมากในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ทำให้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนนี้มีราคาสูงมากตามไปด้วย จึงทำให้นักวิทยาศาสตร์จากหลายประเทศทั่วโลกพยายามศึกษาความเป็นไปได้ที่จะหาวัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ทดแทนลิเทียมได้ โดยหนึ่งในแร่ธาตุที่ได้รับความสนใจมาก คือ โซเดียม โดยมีแนวโน้มที่จะนำโซเดียมมาผลิตเป็นแบตเตอรี่ชนิดใหม่ หรือแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออนที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งคาดการณ์กันว่าแบตเตอรี่ชนิดนี้จะสามารถนำมาใช้งานได้เหมือนแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน แต่มีความทนทานกว่าและมีราคาถูกกว่ามากอีกด้วย

สำหรับบทความนี้จะกล่าวถึงแนวคิดที่น่าสนใจในการนำเอาโซเดียมมาผลิตแบตเตอรี่ชนิดใหม่ ทดแทนแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน ส่วนประกอบและหลักการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดใหม่ ลักษณะที่ดีของวัสดุที่สามารถนำมาใช้ทำขั้วไฟฟ้าได้ และความก้าวหน้าในการพัฒนาวัสดุสำหรับทำขั้วไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ชนิดใหม่นี้

¹ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

แนวคิดสำคัญในการนำโซเดียมมาใช้ทดแทน ลิเทียมสำหรับแบตเตอรี่ชนิดใหม่

ดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้น แบตเตอรี่ชนิด ลิเทียมไอออนถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันเพื่อ เป็นตัวเก็บพลังงานไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์พกพาต่างๆ เพราะแบตเตอรี่ชนิดนี้มีความสามารถในการเก็บ พลังงานไฟฟ้าต่อปริมาตรและต่อน้ำหนักสูงกว่า แบตเตอรี่ชนิดอื่นหลายเท่าตัว (Tarascon and Armand, 2001) ทำให้อุปกรณ์พกพามีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา พกพาสะดวก รวมถึงมีระยะเวลาใช้งานก่อนจะประจุไฟ ใหม่ยาวนานขึ้นมาก และหลังจากที่บริษัทรถยนต์ราย ใหญ่ทั่วโลกหันมาพัฒนาและผลิตรถยนต์ขับเคลื่อน ด้วยพลังงานไฟฟ้าอย่างจริงจังเพื่อแก้ปัญหา วิกฤตการณ์ด้านพลังงานของโลก โดยมีการคาดการณ์ ว่าภายในสิ้นปี ค.ศ. 2020 จะมีรถยนต์ขับเคลื่อนด้วย พลังงานไฟฟ้าราว 30 ล้านคัน (J.D. Power and Associates, 2010) ทั่วโลก ส่งผลให้เกิดการแข่งขัน สูงมากในการค้นคว้า วิจัย และพัฒนาเทคโนโลยีที่ เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่ โดยเฉพาะแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม ไอออน จนทำให้มูลค่าทางเศรษฐกิจของเทคโนโลยีนี้ มีมูลค่ามหาศาลราว 1 ล้านล้านดอลลาร์สหรัฐ (The Boston Consulting Group, 2010) อย่างไรก็ตาม เป็น เรื่องที่ปฏิเสธไม่ได้ว่าราคาต่อหน่วยของแบตเตอรี่ ชนิดลิเทียมไอออนนี้ยังสูงมาก เนื่องจากวัตถุดิบหลัก ในการผลิต คือ สารประกอบของลิเทียม มีราคาสูง นั้นเอง

ลิเทียม ถือเป็นธาตุที่มีแหล่งปริมาณสำรองแ ร่ไม่มากและมีแหล่งแร่ที่กระจุกตัวอยู่เฉพาะในบาง ประเทศ เช่น ประเทศโบลิเวีย ชิลี อาร์เจนตินา และ จีน จึงทำให้นักเศรษฐศาสตร์มองว่า ความต้องการ แร่ธาตุลิเทียมเพื่อนำมาผลิตแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม ไอออนที่เพิ่มสูงขึ้น จะทำให้โลกต้องเผชิญกับ วิกฤตการณ์ขาดแคลนแร่ธาตุชนิดนี้เหมือนกับที่กำลัง เผชิญกับปัญหาขาดแคลนน้ำมันอยู่ในขณะนี้ และ ประเทศที่มีแหล่งปริมาณสำรองแร่ธาตุสูงอย่างชิลี และ โบลิเวียก็อาจกลายเป็นประเทศที่เป็นตัวแปร

สำคัญทางการค้าไม่ต่างไปจากประเทศผู้ค้าน้ำมันใน ประเทศแถบตะวันออกกลาง ทำให้นักวิทยาศาสตร์มี ความพยายามศึกษาและค้นคว้าหาแร่ธาตุที่มีความ สามารถใช้ทดแทนธาตุลิเทียม แต่มีปริมาณมากกว่า มีแหล่งแร่กระจายอยู่ทั่วทุกแห่งบนโลก และมีราคา ถูกกว่าลิเทียมมาใช้งาน โดยหนึ่งในแร่ธาตุที่ได้รับ ความสนใจมาก คือ โซเดียม เพราะนอกจากจะมี ปริมาณมากเกือบทุกแห่งทั่วโลก และราคาถูกแล้ว โซเดียมยังมีสมบัติทางไฟฟ้าเคมีและค่าความต่างศักย์ ใกล้เคียงกับลิเทียม ซึ่งจะส่งผลให้แบตเตอรี่ทั้งสองชนิด นี้มีประสิทธิภาพสำหรับใช้งานในด้านต่างๆ ทดแทน กันได้ดีอีกด้วย

ราคาของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนเมื่ออยู่ รูปแบบที่พร้อมใช้งาน จะขึ้นอยู่กับราคาของวัสดุ (materials cost) ที่ใช้ทำเป็นส่วนประกอบของ แบตเตอรี่ เช่น ขั้วไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ แผ่นกั้นขั้วไฟฟ้า ฉนวนหุ้ม และโลหะเชื่อมต่อภายใน วงจร เป็นต้น โดยราคาของวัสดุนี้คิดเป็นราวร้อยละ 75 ของราคาของแบตเตอรี่ และอีกราวร้อยละ 25 จะเป็น ค่าการผลิต (manufacturing cost) และอื่นๆ (Anderson, 2009) ในส่วนของราคาของวัสดุทั้งหมดนี้ราวร้อยละ 40 จะเป็นราคาของสารตั้งต้นที่มีลิเทียมเป็น องค์ประกอบ ซึ่งอยู่ในรูปของเกลือ LiPF₆ ที่ใช้ทำ สารละลายอิเล็กโทรไลต์และวัสดุสำหรับทำขั้วไฟฟ้า (Anderson, 2009) โดยส่วนประกอบที่มีราคาแพงที่สุด คือ วัสดุสำหรับทำขั้วไฟฟ้า ตารางที่ 1 แสดงการ เปรียบเทียบราคาของสารประกอบของลิเทียมและ สารประกอบของโซเดียมซึ่งสามารถนำมาใช้เป็น วัตถุดิบตั้งต้นสำหรับการผลิตเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับ แบตเตอรี่ได้ (หมายเหตุ: ราคาของสารมักจะขึ้นอยู่กับ ความบริสุทธิ์และปริมาณที่สั่งซื้อ บทความนี้ เปรียบเทียบราคาที่ปริมาณและเกรดเดียวกันของ วัตถุดิบแต่ละชนิด หากไม่มีปริมาณที่เท่ากันพอดี จะใช้ ราคาถูกที่สุดเป็นเกณฑ์) เราจะได้เห็นว่าสารประกอบ ของลิเทียมมีราคาสูงกว่าสารประกอบของโซเดียมราว 2-10 เท่า (Sigma-Aldrich Chemicals, Inc.) ขึ้นอยู่กับ

ชนิดของสารประกอบ ข้อมูลนี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า หากเราสามารถใส่สารประกอบของโซเดียมทดแทนสารประกอบของลิเทียมในการผลิตแบตเตอรี่ชนิดใหม่ได้ เราจะสามารถลดต้นทุนด้านวัตถุดิบได้มาก ซึ่งจะส่งผลให้แบตเตอรี่ชนิดใหม่นี้มีราคาถูกกว่าแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนมากตามไปได้

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบราคาของวัตถุดิบตั้งต้น (สารประกอบของลิเทียมและโซเดียม) สำหรับการผลิตแบตเตอรี่ (ข้อมูลจาก Sigma-Aldrich Chemicals, Inc.)

ชนิดของสารประกอบ	ราคา* (SGD/kg)	
	โซเดียม	ลิเทียม
คลอไรด์ (-Cl) (ความบริสุทธิ์ > 99%)	87	498
คาร์บอเนต (-CO ₃) (ความบริสุทธิ์ > 99%)	292	566
ไนเตรต (-NO ₃) (ความบริสุทธิ์ > 99%)	150	374
ไฮดรอกไซด์ (-OH) (ความบริสุทธิ์ > 99%)	226	583
ซัลเฟต (-SO ₄) (ความบริสุทธิ์ > 99%)	226	572
อะซิเตต (-O ₂ CH ₃) (ความบริสุทธิ์ > 99%)	188	1,178
-PF ₆ (สำหรับอิเล็กโทรไลต์)	6,900 (ความบริสุทธิ์ 98%)	22,120 (ความบริสุทธิ์ 99.99%)
-ClO ₄ (สำหรับอิเล็กโทรไลต์)	570 (ความบริสุทธิ์ 98%)	5,290 (ความบริสุทธิ์ 99.99%)

*เหรียญดอลลาร์สิงคโปร์ต่อกิโลกรัม

ส่วนประกอบและหลักการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออน

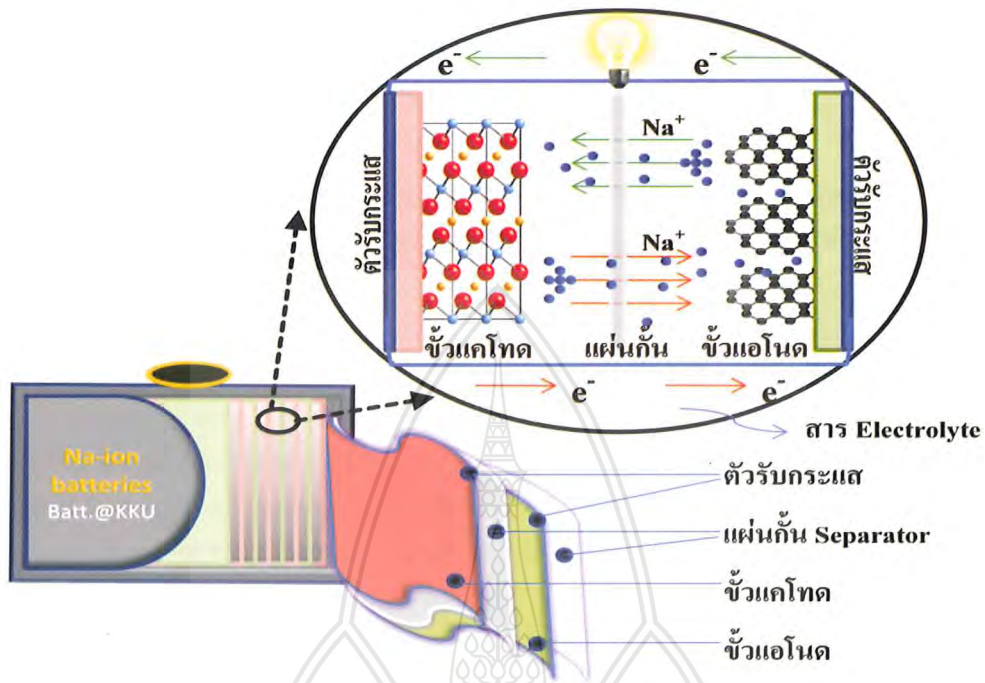
แบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออนที่นักวิทยาศาสตร์เสนอไว้ จะมีส่วนประกอบหลักที่เหมือนกันกับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบและหลักการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออน ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 4 ส่วน คือ

- (1) ขั้วไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย ขั้วแคโทด (cathode) และ ขั้วแอโนด (anode)
- (2) แผ่นกั้นในแบตเตอรี่ (separator) เป็นส่วนที่ป้องกันไม่ให้ขั้วแคโทดสัมผัสกับขั้วแอโนดจนเกิดการลัดวงจรของกระแส
- (3) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ซึ่งเป็นสารละลายที่มีเกลือของโซเดียมผสมอยู่ เป็นสารละลายที่ยอมให้ไอออนของโซเดียมไหลผ่านได้ดี แต่ไม่ยอมให้อิเล็กตรอนไหลผ่านดังนั้นจึงสามารถกล่าว

ได้ว่า สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นตัวนำไอออนิก (ionic conductor) ที่ดี แต่เป็นตัวนำอิเล็กตรอน (electronic conductor) ที่เลว ในรูปที่ 1 สารละลายอิเล็กโทรไลต์จะล้อมรอบส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีของแบตเตอรี่

(4) ตัวรับกระแส (current collector) หรือโลหะตัวนำที่ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนไหลผ่านออกสู่วงจรภายนอก และเกิดการนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้ประโยชน์ต่างๆ ได้

นอกจากนี้ หลักการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดใหม่นี้ยังคล้ายกันกับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้อยู่ในปัจจุบันด้วย (นงลักษณ์ มีทอง, 2553) กล่าวคือ ขณะที่เราทำการประจุไฟหรือขณะที่ใช้งาน ไอออนของลิเทียมหรือโซเดียมจะถูกบังคับให้ไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์และเคลื่อนที่ไปมาระหว่างขั้วไฟฟ้าแคโทดและแอโนดที่ถูกกั้นด้วยแผ่นกั้นได้ ในขณะที่อิเล็กตรอนจะถูกบังคับให้ไหลผ่านเข้าออก



รูปที่ 1 ส่วนประกอบหลัก และหลักการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออน (ปรับปรุงจาก นงลักษณ์ มีทอง, 2533)

แบตเตอรี่โดยผ่านตัวรับกระแสโลหะและส่ววงจรภายนอก หรือสู่อุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ เพื่อให้พลังงานไฟฟ้าได้

ลักษณะของวัสดุที่สามารถใช้ทำขั้วไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออน

เนื่องจากวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบหลักที่มีราคาแพงที่สุดในแบตเตอรี่ และมีตัวแปรหลายตัวที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างและความเสถียรทางเคมีของวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ ทำให้นักวิทยาศาสตร์ต้องคำนึงถึงลักษณะที่ดีเพื่อคัดเลือกวัสดุที่เหมาะสมที่สุด เพื่อนำมาทำขั้วไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออน ดังนี้

(1) วัสดุที่จะนำมาใช้จะต้องมีโครงสร้างอะตอมที่ยอมให้ไอออนของโซเดียมปริมาณมากสามารถแทรกตัว (intercalate) อยู่ได้ และถูกดึงออก

(de-intercalate) ได้สมบูรณ์โดยที่โครงสร้างยังมีความเสถียรอยู่ เช่น วัสดุที่จะนำมาใช้ควรมีความแตกต่างของปริมาตรขณะที่มีและไม่มีโซเดียมไอออนอยู่ในโครงสร้างไม่มากนัก เพราะหากมีความแตกต่างกันมาก จะส่งผลให้วัสดุชนิดนี้เกิดการแตกหักเสียหายภายในได้ง่ายเมื่อมีการอัดและคายประจุไฟฟ้าหลายๆ รอบ ซึ่งจะส่งผลให้แบตเตอรี่ที่ใช้วัสดุชนิดนี้ทำขั้วไฟฟ้ามีอายุการใช้งานที่สั้น

(2) วัสดุที่จะนำมาใช้จะต้องมีความเสถียรทางเคมี (chemical stability) สูง เพื่อความปลอดภัยระหว่างการประจุไฟและการใช้งานของแบตเตอรี่

(3) วัสดุที่จะนำมาใช้ควรมีปริมาตรจำเพาะ (specific volume) คือ มีปริมาตรต่อมวลต่ำ เพราะจะทำให้แบตเตอรี่ที่ใช้วัสดุชนิดนี้เป็นขั้วไฟฟ้า มีความสามารถในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าเชิงปริมาตร (volumetric energy density) สูง

(4) วัสดุที่จะนำมาใช้ควรมีโครงสร้างที่มีความสามารถในการให้และรับโซเดียมไอออนปริมาณมาก และมีมวลโมเลกุล (molecular weight) ต่ำ เพราะจะทำให้แบตเตอรี่ที่ใช้วัสดุชนิดนี้เป็นขั้วไฟฟ้ามีความจุไฟฟ้า หรือมีความสามารถในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าเชิงมวล (gravimetric energy density) สูง ตัวอย่างเช่น วัสดุ NaMn_2O_4 ซึ่งสามารถให้และรับโซเดียมไอออนมากที่สุด 1 ตัว และมีมวลโมเลกุล 196.863 กรัมต่อโมล จะมีค่าความจุไฟฟ้าต่อน้ำหนักทางทฤษฎีสูงสุดเท่ากับ 136 มิลลิแอมป์-ชั่วโมงต่อกรัม¹ (mAh/g) ซึ่งน้อยกว่าวัสดุ Na_2MnO_2 ซึ่งสามารถให้และรับโซเดียมไอออนมากที่สุด 2 ตัว และมีมวลโมเลกุล 132.916 กรัมต่อโมล ประมาณ 2.96 เท่า เป็นต้น

(5) วัสดุที่จะนำมาใช้ควรมีความนำไอออน (ionic conductivity) และความนำไฟฟ้า (electronic conductivity) สูง เพราะแบตเตอรี่ที่ทำจากวัสดุประเภทนี้ จะสามารถใช้งานที่ต้องให้กำลังไฟฟ้า (power) สูง เช่น รถยนต์ไฟฟ้าได้

(6) วัสดุที่จะนำมาใช้ควรมีราคาไม่แพง มีปริมาณมาก อยู่ทั่วไปและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

การพัฒนาวัสดุสำหรับใช้ทำขั้วไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออน

ถึงแม้ว่า ในขณะนี้ยังไม่มีการผลิตแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออนในเชิงอุตสาหกรรม แต่สำหรับนักวิทยาศาสตร์ได้มีความพยายามและได้ทำการศึกษาหาวัสดุที่มีคุณลักษณะเหมาะสมสำหรับทำขั้วไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออนเตรียมไว้ โดยคำนึงถึงลักษณะที่ดีของวัสดุที่สามารถใช้ทำขั้วไฟฟ้าได้ดังที่กล่าวแล้ว ดังนี้

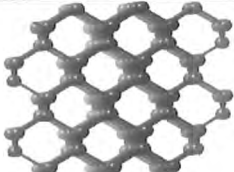
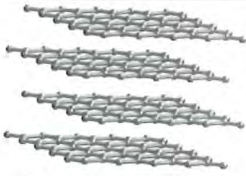
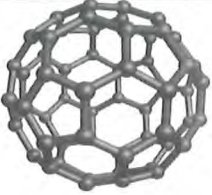
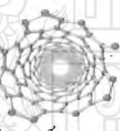
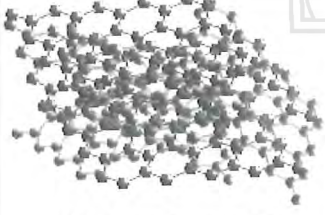
วัสดุสำหรับทำขั้วไฟฟ้าแอโนด

ในปัจจุบันนี้ เกือบ 100 % ของวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าแอโนดสำหรับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนคือ วัสดุประเภทคาร์บอน ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์ที่ต้องการค้นหาวัสดุสำหรับทำขั้วไฟฟ้าแอโนดสำหรับแบตเตอรี่ชนิดใหม่ จึงเริ่มศึกษาความสามารถในการให้และรับโซเดียมไอออนของวัสดุโดยเริ่มจากวัสดุประเภทคาร์บอนนี้ก่อน รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างอัญรูป (allotrope) แบบต่างๆ ของวัสดุคาร์บอนโดยจำลองโครงสร้างโดยใช้โปรแกรม CrystalMaker (Palmer, 2004) และตัวอย่างบางประเภทของวัสดุที่มีโครงสร้างหลักอยู่ในอัญรูปนั้นๆ (Bourrat, 2000) ในบรรดาวัสดุประเภทคาร์บอนนี้ แกรไฟต์ (graphite) ถูกนำมาใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนมากที่สุด เนื่องจากวัสดุชนิดนี้มีราคาถูก มีความนำไฟฟ้าสูง และสามารถให้และรับลิเทียมไอออนได้ดี อย่างไรก็ตาม นักวิทยาศาสตร์หลายกลุ่มพบว่าวัสดุโครงสร้างแบบแกรไฟต์หลายชนิด เช่น แกรไฟต์ธรรมชาติ (natural graphite) และเส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) ไม่มีความสามารถในการให้และรับโซเดียมไอออนปริมาณมากได้ จึงไม่เหมาะสมสำหรับทำเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดสำหรับแบตเตอรี่ชนิดใหม่ อย่างไรก็ตาม มีนักวิจัยกลุ่มหนึ่ง (Doeff et al., 1993) พบว่าถ่านปิโตรเลียมโค้ก (coke) สามารถประจุโซเดียมไอออนได้ราว 85 mAh/g และพบว่าวัสดุโครงสร้างแบบ amorphous carbon เช่น คาร์บอนแบล็ค (carbon black) สามารถประจุโซเดียมไอออนได้ราว 80-120 mAh/g ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัสดุ (Alcantara et al., 2001) ในขณะที่นักวิจัยอีกกลุ่มหนึ่ง (Stevens et al., 2003) แสดงว่า คาร์บอนแข็ง (hard carbon) ที่เกิดจากการเผาถ่านน้ำตาลที่

¹ หน่วย มิลลิแอมป์-ชั่วโมงต่อกรัม (mAh /g) เป็นหน่วยบอกค่าความจุไฟฟ้าต่อน้ำหนักของวัสดุ (specific capacity) ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการให้และรับไอออนของวัสดุนั้นๆ ด้วย โดยค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดทางทฤษฎี (theoretical capacity) จะคำนวณจากปริมาณไอออนที่วัสดุสามารถให้และรับได้ คูณกับค่าคงที่ (Faraday's constant) และหารด้วยมวลโมเลกุลของวัสดุนั้น

อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส สามารถให้และรับโซเดียมไอออนได้มากถึง 300 mAh/g ซึ่งเป็นค่าความจุไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกับค่าของแกรไฟต์ในแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน แต่จะต้องทำการประจุไฟอย่างช้าๆ เท่านั้น

นอกจากวัสดุประเภทคาร์บอนแล้ว ยังได้มีการศึกษาและพบว่า วัสดุประเภทโลหะทรานซิชันออกไซด์ เช่น NiCo_2O_4 มีความสามารถในการให้และรับโซเดียมไอออนปริมาณมากได้ โดยมีค่าความจุไฟฟ้าราว 200 mAh/g (Alcantara et al., 2002) แต่จะต้องทำการประจุไฟอย่างช้าๆ เท่านั้น

โครงสร้างอัญรูป (Allotrope)	ตัวอย่างของวัสดุ
 แบบ Cubic Diamond	วัสดุคล้ายเพชร (Diamond-like-Carbon)  เพชร
 แบบ Hexagonal Graphite	แกรไฟต์ธรรมชาติ (Natural graphite), แกรไฟต์, Polycrystalline graphite  กราฟีน (Graphene)  ไพโรคาร์บอน (Pyrocarbon)  เส้นใยคาร์บอน
 แบบ Fullerene	 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes)  หน่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanobud) 
 แบบ Amorphous carbon	ถ่าน, ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon), อะเซทิลีนแบล็ค (Acetylene black)  ถ่านโค้ก (Coke)  คาร์บอนแบล็ค (Carbon black)

รูปที่ 2 โครงสร้างอัญรูปแบบต่างๆของวัสดุคาร์บอน โครงสร้างบางรูปแบบสามารถใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดสำหรับแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออนได้ (Adapted from Bourrat, 2000)

วัสดุสำหรับทำขั้วไฟฟ้าแคโทด

หลังจากที่มีนักวิทยาศาสตร์ค้นพบว่า วัสดุบางประเภทสามารถใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่ชนิดโพลิเมอร์ไอออนได้ ความพยายามที่จะหาวัสดุสำหรับทำขั้วไฟฟ้าแคโทดสำหรับแบตเตอรี่ชนิดใหม่นี้จึงเริ่มเกิดขึ้น และมีแนวโน้มที่จะมีการแข่งขันในการวิจัยอย่างสูงในอนาคต เพราะวัสดุแคโทดมักจะเป็นส่วนประกอบของแบตเตอรี่ที่มีราคาแพงที่สุด สำหรับในช่วงเริ่มแรกของการค้นหาวัสดุเพื่อทำขั้วไฟฟ้าแคโทดสำหรับแบตเตอรี่ชนิดใหม่นี้ วัสดุที่ได้รับความสนใจส่วนมากเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างคล้ายคลึงกับวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าแคโทดในแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่เราใช้อยู่ในปัจจุบัน เช่น วัสดุโครงสร้างแบบ ABO_2 หรือ Layered Oxides (รูปที่ 3ก) วัสดุโครงสร้างแบบ AB_2O_4 หรือ Spinel (รูปที่ 3ข) และวัสดุโครงสร้างแบบ $ABPO_4$ หรือ Olivines (รูปที่ 3ค) เป็นต้น โดยมีการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของวัสดุโครงสร้างแบบ Layered Oxides เช่น $NaCoO_2$ (Doeff et al., 1993 and Berthelot et al., 2011) และ $NaMnO_2$ (Doeff et al., 2002) และค้นพบว่าวัสดุทั้งสองสามารถให้และรับโพลิเมอร์ไอออนได้ดีพอสมควร และอาจนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทดได้ แต่ยังประสบปัญหาเรื่องความไม่เสถียรของโครงสร้างซึ่งเป็นสาเหตุหลักในการลดลงของค่าความจุไฟฟ้า (capacity fading) เมื่อถูกนำมาประจุไฟใหม่ซ้ำหลายๆ รอบ และส่งผลให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นมาก การศึกษาขั้นต้นยังพบอีกว่า วัสดุโครงสร้างแบบ Olivine เช่น $NaFePO_4$ ซึ่งหากอยู่ในรูปของ $LiFePO_4$ ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร จะเป็นวัสดุสำหรับทำขั้วไฟฟ้าแคโทดในแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่มีความปลอดภัยสูง และเหมาะกับการนำมาใช้ในรถยนต์ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า กลับไม่สามารถให้และรับโพลิเมอร์ไอออนได้เลย

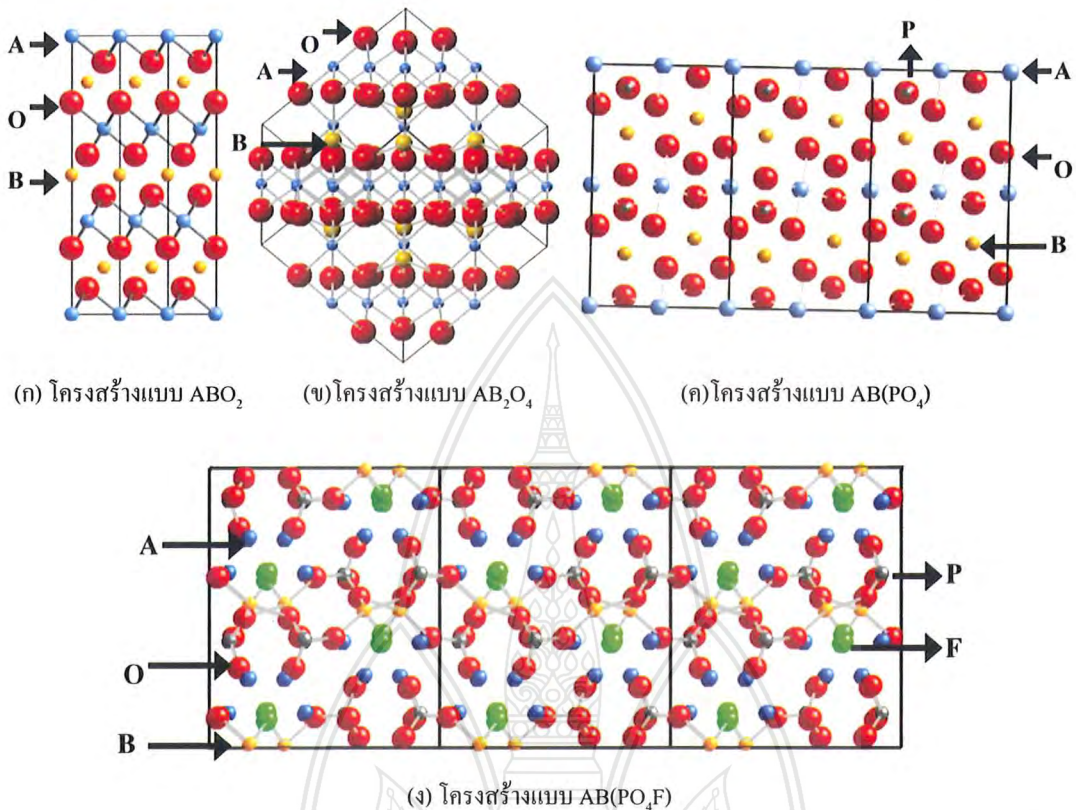
เมื่อไม่นานมานี้ มีการค้นพบว่า $NaVPO_4F$ (Barker et al., 2004) สามารถให้และรับโพลิเมอร์ไอออนได้ดีและมีค่าความต่างศักย์ใกล้เคียงกับแบตเตอรี่

ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้อยู่ปัจจุบันด้วย คือ ราว 3.7 โวลต์ แต่วัสดุชนิดนี้ก็ยังประสบปัญหาเรื่องความเสถียรของโครงสร้างซึ่งทำให้เกิดปัญหาการลดลงของค่าความจุไฟฟ้าอยู่ โดยความจุไฟฟ้าของวัสดุนี้นลดลงถึง 50 เปอร์เซ็นต์ หลังจากประจุไฟเพียง 30 รอบเท่านั้น อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการเจือ (dope) วัสดุ $NaVPO_4F$ ด้วยโครเมียม (Zhou et al., 2006) แล้ว พบว่าโครงสร้างมีความเสถียรขึ้นจนสามารถเก็บประจุได้ดีขึ้น และสามารถลดปัญหาการลดลงของค่าความจุไฟฟ้าได้ โดยหลังจากประจุไฟ 20 รอบ ค่าความจุไฟฟ้าลดลงราว 10 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ซึ่งอาจจะสามารถนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทดสำหรับแบตเตอรี่ชนิดโพลิเมอร์ไอออนได้ หากมีการพัฒนาหาปริมาณในการเจือสารโครเมียมที่เหมาะสมได้

นอกจากนี้ ได้มีการสังเคราะห์วัสดุที่มีโครงสร้างใหม่ เรียกว่า โครงสร้างแบบ $ABPO_4F$ หรือ Fluorophosphate (รูปที่ 3ง) เช่น Na_2FePO_4F (Ellis et al., 2007, 2010) และพบว่าวัสดุใหม่นี้สามารถให้และรับไอออนได้ดี โดยให้ค่าความจุไฟฟ้าราว 120 mAh/g และสามารถประจุไฟใหม่ได้มากกว่า 150 รอบ โดยที่ไม่มีการลดลงของค่าความจุไฟฟ้า นักวิจัยกลุ่มเดียวกันนี้ ยังพบอีกว่าสาร $NaFeSO_4F$ (Tripathi et al., 2010) ซึ่งมีโครงสร้างเหมือนกันกับแบบ Fluorophosphate เพียงแต่เปลี่ยนอะตอมของ P เป็นของ S ก็เป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่งที่สามารถสังเคราะห์ได้ และมีสมบัติทางไฟฟ้าเคมีที่ดี และอาจนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทดสำหรับแบตเตอรี่ชนิดโพลิเมอร์ไอออนในอนาคตได้

บทสรุป

การผลิตแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เพื่อตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า เป็นตัวการสำคัญที่ส่งผลให้แหล่งสำรองแร่ลิเทียมซึ่งมีจำกัดอยู่แล้วลดลงมาก และราคาของสารประกอบของลิเทียมสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จนทำให้มีความเป็นไปได้



รูปที่ 3 โครงสร้างแบบต่างๆของวัสดุที่สามารถใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทดสำหรับแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออนได้ (จำลองโครงสร้างโดยใช้โปรแกรม CrystalMaker – (Palmer, 2004) (ก) โครงสร้างแบบ ABO_2 (ข) โครงสร้างแบบ AB_2O_4 (ค) โครงสร้างแบบ $AB(PO_4)$ และ (ง) โครงสร้างแบบ $AB(PO_4F)$ โดยที่สัญลักษณ์วงกลมสีฟ้า (●) แสดงตำแหน่งของ A หรือ โซเดียม วงกลมสีส้ม (●) แสดงตำแหน่งของ B หรือ โลหะทรานซิชัน วงกลมสีแดง (●) แสดงตำแหน่งของออกซิเจน วงกลมสีเทา (●) แสดงตำแหน่งของฟอสฟอรัส และวงกลมสีเขียว (●) แสดงตำแหน่งของฟลูออรีน

ได้ว่าเราอาจต้องประสบปัญหาขาดแคลนแร่ธาตุสำหรับผลิตอุปกรณ์สำคัญนี้ในไม่ช้า ความจำเป็นที่จะต้องหาแบตเตอรี่ชนิดใหม่ที่สามารถใช้ทดแทนแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน แต่ใช้วัตถุดิบราคาถูกไม่แพงและมีปริมาณมาก เช่น แบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออน จึงเป็นเรื่องที่หลีกเลี่ยงไม่ได้

นอกจากจะให้ความรู้เกี่ยวกับแนวคิดและความเป็นไปได้ในการนำเอาโซเดียมมาใช้ทดแทนลิเทียมเพื่อผลิตแบตเตอรี่ชนิดใหม่ ส่วนประกอบและ

หลักการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดนี้ ลักษณะที่ดีของวัสดุที่สามารถนำมาใช้ทำขั้วไฟฟ้าได้ และการพัฒนาวัสดุสำหรับทำขั้วไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออนนี้แล้ว บทความนี้ยังแสดงให้เห็นว่า เมื่อเทียบกับงานวิจัยเกี่ยวกับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน ยังมีงานวิจัยจำนวนไม่มากนักที่ทำการศึกษาวิจัยอย่างจริงจังเพื่อค้นหาวัดสำหรับทำเป็นขั้วไฟฟ้าในแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออน ซึ่งจะเป็นการเปิดโอกาสสำหรับนักวิจัยรุ่นใหม่ให้สามารถสร้างผลงาน และเป็นส่วน

สำคัญในการผลักดันให้มีพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับแบตเตอรี่ชนิดใหม่นี้ให้เป็นจริง เพื่อสามารถผลิตเป็นแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออนในเชิงอุตสาหกรรมได้ในอนาคตอันใกล้

เอกสารอ้างอิง

นงลักษณ์ มีทอง. (2553). วัสดุสำหรับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน. วารสารเทคโนโลยีวัสดุ. 60: p. 52-60.

Alcantra, R., Metaeos, J. M. J., Lavela, P., and Tirado J. L. (2001). Carbon black: a promising electrode material for sodium-ion batteries. *Electrochem. Commun.* 3: 639-642.

Alcántara, R., Jaraba, M., Lavela, P., and Tirado, J. L. (2002). NiCo_2O_4 Spinel: First report on a transition metal oxide for the negative electrode of Sodium-ion batteries. *Chem. Mater.* 14(7): 2847-2848.

Anderson, L. D., (2009). An evaluation of current and future costs for Lithium-ion batteries for use in electrified vehicle Power-trains. Master Thesis. The Nicholas School of the Environment of Duke University.

Barker, J., Saidi, M.Y., Swoyer, J.L. (2004). A comparative investigation of the Li insertion properties of the novel fluorophosphate phases, NaVPO_4F and LiVPO_4F . *J. Electrochem. Soc.* 151(10): A1670.

Berthelot, R., Carlier, D., and Delmas. C. (2011). Electrochemical investigation of the $\text{P2-Na}_x\text{CoO}_2$ phase diagram. *Nature Mater.* 10: 74-80.

Bourrat, X. (2000). *Sciences of Carbon Materials*. Alicante, Spain: Universidad de Alicante. 2-10.

Doeff, M. M., Ma, Y., Visco, S. J., and de Jonghe, L. C. (1993). Rechargeable $\text{Na}/\text{Na}_x\text{CoO}_2$ and $\text{Na}_{15}\text{Pb}_4/\text{Na}_x\text{CoO}_2$ polymer electrolyte cells. *J. Electrochem. Soc.* 140: 2726-2733.

Doeff, M. M., Richardson, T. J., Hollingsworth, J., Yuan, C.-W., and Gozales, M. Synthesis and characterization of a copper-substituted manganese oxide with the $\text{Na}_{0.44}\text{MnO}_2$ structure. *J. Power Sources* 112(2002) 294.

Ellis, B. L., Makahnouk, W. R. M., Yakimura, Y., Toghil, K., and Nazar, L. F. (2007). A multifunctional 3.5 V iron-based phosphate cathode for rechargeable batteries. *Nature Mater.* 6: 749-753.

Ellis, B. L., Makahnouk, W. R. M., Rowan-Weetaluktuk, W. N., Ryan, D. H., and Nazar, L. F. (2010). Crystal structure and electrochemical properties of $\text{A}_2\text{MPO}_4\text{F}$ fluorophosphates (A = Na, Li; M = Fe, Mn, Co, Ni). *Chem. Mater.* 22: 1059-1070.

J. D. Power and Associates, (2010). *Drive Green 2020: More Hope than Reality?*. The McGraw-Hill Companies, Inc.

Nagaura, T. and Tozawa, K. (1990). *Progress Batteries and Solar Cells*. 9: 209.

Palmer, D. C. (2004). *CrystalMaker: A Crystal Structures Program for Windows Computers*. CrystalMaker Software, UK.

Tarascon, J. M. and Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*. 414: 359-367.

The Boston Consulting Group (2010). *Batteries for electric cars: Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020*.

Tripathi, R., Ramesh, T. N., Ellis, B. L., Nazar, L. F. (2010). Scalable synthesis of favorable

- LiFeSO₄F and NaFeSO₄F cathode materials. *Angewandte Chemie - International Edition*. 49: 8738-8742.
- Stevens, D. A., and Dahn, J. R. (2000). High capacity anode materials for rechargeable Sodium-ion batteries. *J. Electrochem. Soc.* 147(4): 1271-1273.
- Zhou, H. T., Wang, X. Y., Tang, A. P., Liu, Z. M., Gamboa, S., and Sebastian, P. J. (2006). The preparation of NaV_{1-x}Cr_xPO₄F cathode materials for sodium-ion battery. *J. Power. Sources*. 160: 698-703.





วัสดุกักเก็บไฮโดรเจน Hydrogen Storage Materials

พรจักร ศรีพัชรารุช¹

บทนำ

ในปัจจุบัน พลังงานเป็นสิ่งที่มีมนุษย์ขาดไม่ได้ ทั้งนี้ก็เนื่องจากกิจกรรมทั้งหลายในแต่ละวันล้วนเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานทั้งสิ้น แต่ปริมาณของแหล่งพลังงานที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เช่น ถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ ได้ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะส่งผลให้เกิดวิกฤตพลังงานในอนาคตอันใกล้ เพื่อที่จะแก้ปัญหาวิกฤตพลังงาน พลังงานทดแทน เช่น พลังงานลม (wind energy) พลังงานความร้อนจากใต้พื้นพิภพ (geothermal energy) พลังงานแสงอาทิตย์ (solar energy) ฯลฯ ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญที่จะใช้เป็นแหล่งพลังงานในอนาคต นอกจากนี้แหล่งพลังงานดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นยังมีอีกหนึ่งแหล่งพลังงานทดแทนที่น่าสนใจที่จะใช้เป็นแหล่งพลังงานหลักในอนาคตก็คือ พลังงานไฮโดรเจน (hydrogen energy) ทั้งนี้เนื่องจากไฮโดรเจนมีปริมาณมากมหาศาลในโลกของเรา (โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของน้ำ) ที่น่าสนใจกว่านั้นก็คือความหนาแน่นเชิงมวล (mass energy density) ของไฮโดรเจนมีค่ามากกว่าประมาณสามเท่าเมื่อเทียบกับแหล่งพลังงานชนิดอื่นๆ ที่ใช้ในปัจจุบัน (รูปที่ 1a) กล่าวคือ หนึ่งกิโลกรัมของไฮโดรเจนสามารถให้พลังงานมากกว่าแหล่งพลังงานที่ใช้กันอยู่ใน

ปัจจุบันถึงสามเท่าแต่เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นเชิงปริมาตร (volumetric energy density) ระหว่างไฮโดรเจนกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ พบว่าไฮโดรเจนมีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรที่ต่ำมาก ดังแสดงในรูปที่ 1b ซึ่งหมายความว่าเราต้องใช้พื้นที่จำนวนมากเพื่อเก็บไฮโดรเจนไว้ในตัวกลาง ส่งผลให้เกิดปัญหาการกักเก็บไฮโดรเจน

ก่อนที่จะเขียนจะกล่าวถึงกระบวนการกักเก็บไฮโดรเจน ผู้เขียนขออธิบายเศรษฐกิจไฮโดรเจนอย่างคร่าวๆ เศรษฐกิจไฮโดรเจน (hydrogen economy) คือวิธีผลิตพลังงานโดยใช้ไฮโดรเจนเป็นพาหะในการนำพลังงาน ซึ่งประกอบด้วยส่วนหลักๆ สามส่วน คือ การสร้างไฮโดรเจน (hydrogen production) การเก็บไฮโดรเจน (hydrogen storage) และการนำไปใช้ในรูปของอุปกรณ์ที่เรียกว่าเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) ในส่วนของการสร้างไฮโดรเจน วิธีที่นิยมใช้ในการผลิตโดยทั่วไป คือ วิธีที่เรียกว่าสตรีมรีฟอร์มมิง (steam reforming) และพลาสมารีฟอร์มมิง (plasma reforming) โดยวิธีนี้ก๊าซไฮโดรเจนจะถูกผลิตจากแหล่งพลังงานดังต้นต่างๆ เช่น มีเทน โพรเพน ถ่านหิน ฯลฯ สำหรับข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ในปริมาณมาก แต่ข้อเสียที่สำคัญคือจะมีก๊าซ

¹ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

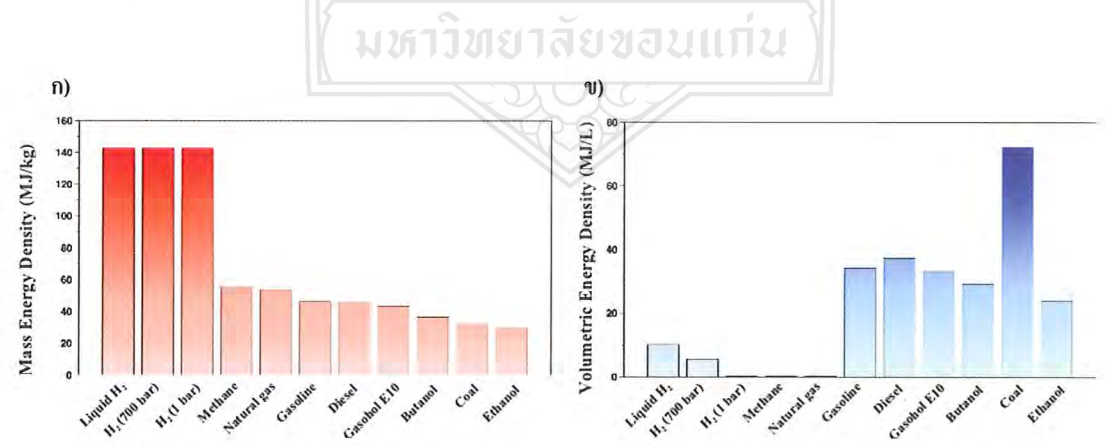
คาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต วิธีที่สองที่ใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนก็คือ วิธีแยกไฮโดรเจนจากน้ำ หรือ อิเล็กโทรไลซิส (electrolysis) สำหรับวิธีนี้ไม่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับวิธีแรก เมื่อได้ก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการผลิตแล้ว กระบวนการต่อไปเป็นการนำก๊าซไฮโดรเจนมากักเก็บไว้ในตัวกลางที่เหมาะสม (กระบวนการกักเก็บไฮโดรเจน) สำหรับการสร้างพลังงานจากก๊าซไฮโดรเจนสามารถทำได้โดยนำวัสดุที่กักเก็บไฮโดรเจนมาต่อเข้ากับเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงแบบ proton exchange membrane (PEMFC) เซลล์เชื้อเพลิงแบบ solid oxide (SOFC) เป็นต้น ในบทความนี้ผู้เขียนจะขอกล่าวถึงเฉพาะในส่วนของการกักเก็บไฮโดรเจนเท่านั้น

การกักเก็บไฮโดรเจน

จากรูปที่ 1x จะเห็นว่า ค่าความหนาแน่นพลังงานเชิงปริมาตรของไฮโดรเจนที่สถานะต่างๆ มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับแหล่งพลังงานอื่นๆ ที่ใช้ในปัจจุบัน กล่าวคือ ไฮโดรเจนใช้พื้นที่มากในการกักเก็บ ซึ่งถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญของแหล่งพลังงานชนิดนี้ กระทรวงพลังงานของสหรัฐอเมริกา

(Department of Energy, USA) ได้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่เหมาะสมสำหรับกักเก็บไฮโดรเจนโดยวัสดุดังกล่าวจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ (DOE requirements)

- 1) สามารถเก็บไฮโดรเจนได้ในปริมาณมาก และใช้พื้นที่น้อย (ข้อกำหนดสำหรับปี 2058 คือ 5.5% ไฮโดรเจนโดยน้ำหนัก และ 40 กิโลกรัมไฮโดรเจนต่อลูกบาศก์เมตร)
 - 2) สามารถรับ/ปล่อยไฮโดรเจนได้อย่างรวดเร็ว
 - 3) จะต้องรับ/ปล่อยไฮโดรเจนในช่วงอุณหภูมิ -40 ถึง 85 องศาเซลเซียส ที่ความดันปกติ
 - 4) สามารถรับ/ปล่อยไฮโดรเจนในจำนวนครั้งที่มาก
 - 5) ต้นทุนต่ำและมีความปลอดภัยสูง
- อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีสารประกอบหรือวัสดุใดๆ ที่มีคุณสมบัติครบทั้ง 5 ข้อข้างต้น ดังนั้นเพื่อที่จะทำเศรษฐกิจไฮโดรเจนให้สำเร็จ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องหาวัสดุที่เหมาะสมสำหรับกักเก็บไฮโดรเจนในปัจจุบันมีวิธีการกักเก็บไฮโดรเจนที่สำคัญอยู่สามแบบ คือ การกักเก็บไฮโดรเจนในรูปของก๊าซ และของเหลวในภาชนะกักเก็บ และการกักเก็บไฮโดรเจนในของแข็ง ดังจะได้กล่าวถึงต่อไป



รูปที่ 1 ความหนาแน่นพลังงานเชิงมวลและเชิงปริมาตรของแหล่งพลังงานชนิดต่างๆ (ที่มา: Hydrogen Properties, Energy density)

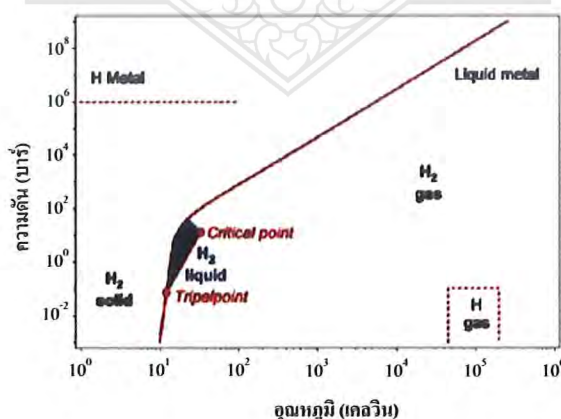
การกักเก็บไฮโดรเจนในรูปของก๊าซไฮโดรเจน ในภาชนะกักเก็บ (Gaseous storage)

ที่สภาวะปกติ (อุณหภูมิห้อง ความดัน 1 บรรยากาศ) ก๊าซไฮโดรเจนมีความหนาแน่น 0.089 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร กล่าวคือ ภาชนะที่มีปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตรสามารถเก็บก๊าซไฮโดรเจนได้เพียง 89 กรัม ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแหล่งพลังงานประเภทอื่นๆ ที่ใช้ในปัจุบัน วิธีการที่จะเพิ่มความสามารถในการเก็บก๊าซไฮโดรเจนให้มีปริมาณมากขึ้นและใช้พื้นที่น้อยลงสามารถทำได้โดยการเพิ่มความดันเพื่ออัดก๊าซในภาชนะให้มีปริมาตรลดลง (เหมือนกับการอัดก๊าซหุงต้มลงในถังก๊าซที่ใช้ในครัวเรือน) ดังนั้น ภาชนะที่ดีสำหรับใช้กักเก็บไฮโดรเจนจะต้องมีคุณสมบัติทั้งน้ำหนักเบาและทนความดันได้สูง (ประมาณ 800 บาร์ หรือ 80 MPa) ตัวอย่างของวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตภาชนะสำหรับกักเก็บไฮโดรเจนได้แก่ อลูมิเนียมของทองแดง (Cu) กับ อะลูมิเนียม (Al) และ เหล็กกล้าปลอดสนิม (stainless steel) เช่น AISI306 AISI304 (Züttel, 2003) อย่างไรก็ตามปัญหาหลักของการกักเก็บไฮโดรเจนโดยใช้ความดันสูงก็คือเรื่องของความปลอดภัย เนื่องจากไฮโดรเจนมีความไวไฟสูงสามารถติดไฟได้ง่าย ส่งผลให้การออกแบบวัสดุจะต้องทำอย่างระมัดระวังเพื่อที่จะป้องกันการรั่วไหลของก๊าซ ยิ่งไปกว่านั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงก็คือ ความแข็งแรงของภาชนะที่ใช้สำหรับกักเก็บเมื่อเกิดอุบัติเหตุ

กล่าวคือก๊าซจะต้องไม่รั่วไหลออกมาตอนที่เกิดอุบัติเหตุระหว่างการขนส่งโดยรถ (ในกรณีที่ใช้การกักเก็บแบบนี้แทนน้ำมัน) ด้วยข้อเสียดังกล่าวจึงมีความจำเป็นต้องหาวิธีการอื่นที่มีประสิทธิภาพดีกว่าและปลอดภัยกว่าสำหรับใช้กักเก็บไฮโดรเจน

การกักเก็บไฮโดรเจนในรูปของไฮโดรเจนเหลว (liquid storage)

วิธีที่สองที่ใช้กักเก็บไฮโดรเจน คือ การเปลี่ยนให้เป็นไฮโดรเจนเหลวแล้วเก็บไว้ในถังกักเก็บ โดยไฮโดรเจนเหลวมีความหนาแน่น 70.6 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรซึ่งสูงกว่าความหนาแน่นของก๊าซไฮโดรเจนเกือบ 800 เท่า ดังนั้นวิธีการเก็บไฮโดรเจนแบบนี้จึงน่าจะเป็นวิธีที่ดีกว่าการกักเก็บในรูปของก๊าซ แต่จากแผนภาพเฟสของไฮโดรเจนในรูปที่ 2 พบว่า ก๊าซไฮโดรเจนจะเป็นไฮโดรเจนเหลวในช่วงอุณหภูมิ 21-32 เคลวิน หรือ -252 - -242 องศาเซลเซียส ดังนั้นการกักเก็บไฮโดรเจนในรูปของเหลวไว้ในถังกักเก็บจึงเป็นเรื่องที่ยากมาก นอกจากนี้การระเหยของไฮโดรเจนเหลวก็เป็นหนึ่งในข้อเสียของวิธีนี้ โดยในหนึ่งวันไฮโดรเจนเหลวจะระเหยออกจากถังกักเก็บประมาณร้อยละ 2-3 ส่งผลให้การกักเก็บโดยวิธีนี้เสียค่าใช้จ่ายสูง ด้วยเหตุนี้ วิธีนี้จึงไม่ใช่วิธีการกักเก็บไฮโดรเจนที่เหมาะสม



รูปที่ 2 แผนภาพเฟสของไฮโดรเจน (ที่มา: Züttel, 2004)

การกักเก็บไฮโดรเจนในของแข็ง (solid-state storage)

จากสองวิธีที่กล่าวมาจะเห็นว่าแต่ละวิธีมีข้อดี-ข้อเสียที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามยังมีอีกหนึ่งวิธีที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก นั่นคือการกักเก็บไฮโดรเจนในของแข็ง ในเชิงอุตสาหกรรมและพาณิชย์ รถยนต์ส่วนบุคคลจำเป็นต้องมีตัวกลางที่สามารถบรรจุก๊าซไฮโดรเจนจำนวน 4 กิโลกรัมเพื่อที่จะใช้ในการเดินทางประมาณ 400 กิโลเมตร จากรูปที่ 3 พบว่า ถึงที่บรรจุก๊าซไฮโดรเจนและไฮโดรเจนเหลวมีขนาดใหญ่กว่าวัสดุที่กักเก็บไฮโดรเจนที่เป็นของแข็ง ด้วยเหตุนี้วัสดุที่กักเก็บไฮโดรเจนที่เป็นของแข็งจึงมีความน่าสนใจที่จะใช้สำหรับกักเก็บไฮโดรเจนได้ดีกว่าวิธีการกักเก็บก๊าซไฮโดรเจนและไฮโดรเจนเหลวในภาชนะ โดยของแข็งที่ใช้เป็นวัสดุที่กักเก็บไฮโดรเจนสามารถแบ่งออกเป็นสองชนิดตามลักษณะของวิธีการเก็บ คือ วัสดุดูดซับเชิงกายภาพ (physisorbed materials) และวัสดุดูดซับเชิงเคมี (chemisorbed materials) โดยกระบวนการเก็บไฮโดรเจนของวัสดุทั้งสองชนิดได้แสดงในรูปที่ 4

วัสดุดูดซับเชิงกายภาพ คือ วัสดุที่กักเก็บไฮโดรเจนด้วยกระบวนการดูดซับเชิงกายภาพ (physisorption) ที่สภาวะปกติไฮโดรเจนจะอยู่ในรูปของโมเลกุล กล่าวคือพลังงานของโมเลกุลไฮโดรเจน (H_2) ต่ำกว่าพลังงานของอะตอมไฮโดรเจน ($2H$) ดังแสดงในรูปที่ 4ก เมื่อโมเลกุลไฮโดรเจนเข้าใกล้กับพื้นผิวของวัสดุ โมเลกุลของไฮโดรเจนจะเกาะกับพื้นผิวของวัสดุด้วยแรงอ่อนแอ คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (โดยปกติพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างไฮโดรเจนกับวัสดุที่ใช้กักเก็บมีค่าน้อยกว่า 10 กิโลจูลต่อโมล) ตัวอย่างของวัสดุที่มีการดูดซับเชิงกายภาพได้แก่ วัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง (high surface area materials) เช่น แกรฟีน (graphene) (Patchkovskii et al., 2005) ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) (Liu et al., 1999) ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) (Jin et al., 2007) สารโลหะอินทรีย์ที่มีความเป็นรูพรุนสูง (metal-organic frameworks, MOFs) (Rosi et al., 2003; Eddaoudi et al., 2002)

ซีโอไลต์ (zeolite) (Dong et al., 2007) คลาเทรต (clathrate) (Struzhkin et al., 2007) ฯลฯ จุดเด่นของวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูงที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการกักเก็บไฮโดรเจน ได้แก่ มีบริเวณให้ไฮโดรเจนได้ยึดเกาะ (adsorption site) เป็นจำนวนมาก แต่มีข้อเสียคือพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างไฮโดรเจนกับวัสดุในกรณีนี้มีค่าค่อนข้างต่ำ ส่งผลให้โมเลกุลของไฮโดรเจนส่วนใหญ่หลุดออกจากวัสดุที่อุณหภูมิห้อง (27 องศาเซลเซียส) ดังนั้นเพื่อที่จะกักเก็บไฮโดรเจนได้เป็นปริมาณมาก จึงจำเป็นต้องกักเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำมาก (ประมาณ 77 เคลวิน หรือ -196 องศาเซลเซียส) หรือในทางกลับกันที่จะทำให้วัสดุสามารถกักเก็บไฮโดรเจนได้ในปริมาณมากที่อุณหภูมิห้องก็คือการเพิ่มค่าพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและวัสดุที่ใช้กักเก็บ โดยพลังงานยึดเหนี่ยวที่เหมาะสมควรมีค่าประมาณ 40 กิโลจูลต่อโมล (Lochan and Head-Gordon, 2006)

การเพิ่มพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและวัสดุที่ใช้กักเก็บ

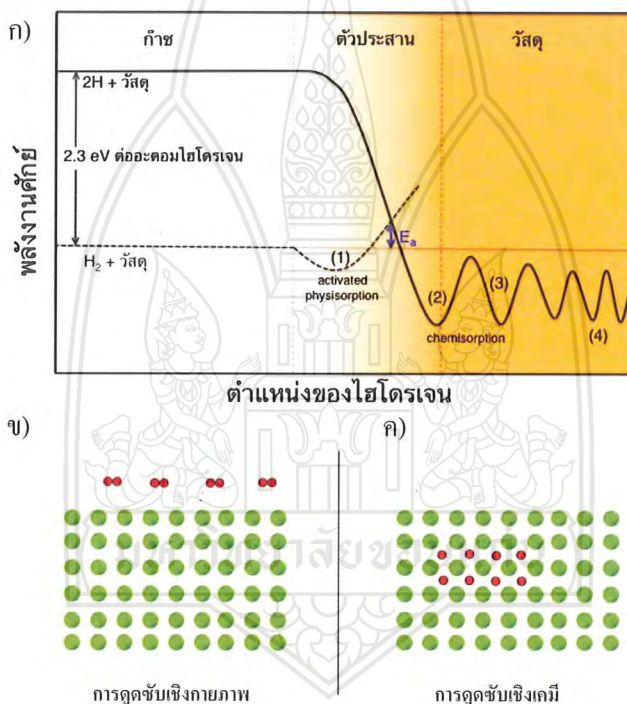
การเพิ่มความสามารถในการกักเก็บไฮโดรเจนในวัสดุดูดซับเชิงกายภาพทำได้โดยการเพิ่มบริเวณยึดเกาะหรือการเพิ่มพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของไฮโดรเจนและวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง การเพิ่มบริเวณยึดเกาะในวัสดุสามารถทำได้โดยการปรับแต่งโครงสร้างของวัสดุที่กักเก็บ ในบทความนี้ ผู้เขียนขอเสนอวิธีการเพิ่มความสามารถในการกักเก็บไฮโดรเจนในวัสดุดูดซับเชิงกายภาพ จำนวน 4 วิธี คือ

1. Exposed metal sites

เป็นที่ทราบกันว่า พลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของไฮโดรเจนและโลหะทรานซิชันมีค่าค่อนข้างสูง (ประมาณ 80-90 กิโลจูลต่อโมล) เช่น ใน $Mo(CO)_5H_2$ (Yang et al., 2007) ด้วยเหตุนี้การสังเคราะห์วัสดุที่มีโลหะทรานซิชันเป็นองค์ประกอบในปริมาณมากจึงเป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจเพื่อที่ให้ก๊าซไฮโดรเจนไปเกาะยึดกับโลหะเหล่านี้ ส่งผลให้



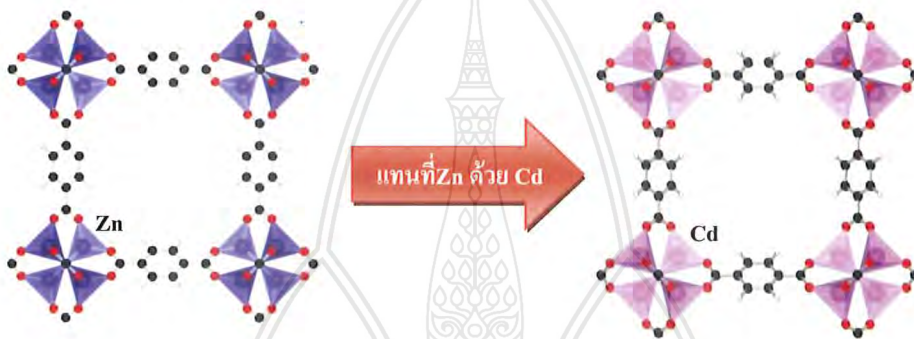
รูปที่ 3 ขนาดของภาชนะแบบต่างๆ ที่ใช้สำหรับบรรจุไฮโดรเจนปริมาณ 4 กิโลกรัมเมื่อเทียบกับขนาดของรถยนต์ (ที่มา: Schlapbach and Züttel, 2002)



รูปที่ 4 ก) กระบวนการเก็บไฮโดรเจนในวัสดุ เมื่อไฮโดรเจนอยู่ไกลจากพื้นผิวของวัสดุก็เก็บ ก๊าซไฮโดรเจนจะเป็นสถานะที่เสถียร เมื่อก๊าซไฮโดรเจนอยู่ใกล้กับพื้นผิวของวัสดุก็เก็บ (1) ก๊าซจะติดบนผิวของวัสดุด้วยแรงอ่อนๆ จนเมื่อได้รับพลังงานจากภายนอกมากกว่าพลังงานกระตุ้น (activation energy, E_a) ก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการเก็บไฮโดรเจนแบบการดูดซับเชิงเคมีซึ่งประกอบด้วย (2) โมเลกุลของไฮโดรเจนถูกแยกออกเป็นอะตอมของไฮโดรเจนที่พื้นผิวของวัสดุ (3) อะตอมดังกล่าวจะสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในผิวของวัสดุ (4) อะตอมของไฮโดรเจนยึดเกาะกับอะตอมต่างๆ ของวัสดุ (Bérubé et al., 2007)
 ข) การกักเก็บไฮโดรเจนด้วยกระบวนการดูดซับเชิงกายภาพและ ค) การกักเก็บไฮโดรเจนด้วยกระบวนการดูดซับเชิงเคมี อะตอมสี่เหลี่ยมและสี่แดงคืออะตอมของวัสดุที่กักเก็บและไฮโดรเจน ตามลำดับ

พลังงานยึดเหนี่ยวระหว่าง H_2 และวัสดุที่สังเคราะห์มีค่าสูงขึ้น (ปริมาณไฮโดรเจนโดยน้ำหนักเพิ่มขึ้น) ตัวอย่างเช่น Dinca และ Long (Dinca and Long, 2008) ได้ทำการสังเคราะห์ sodalite-type metal-organic framework โดยใช้ Cu^{2+} แทนที่ Mn^{2+} และพบว่าโมเลกุลของไฮโดรเจนสามารถเกาะติดรอบๆ โลหะทรานซิชันได้มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเจนโดยน้ำหนักเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Srepusharawoot และคณะ

(Srepusharawoot et al., 2008) ได้แทนที่ Zn^{2+} ด้วย Cd^{2+} ใน Metal Organic Framework-5 หรือ MOF-5 ดังรูปที่ 5 โดยพบว่าพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของไฮโดรเจนและ MOF-5 เพิ่มขึ้นร้อยละ 15 ด้วยคุณลักษณะดังกล่าว วิธีนี้จึงเป็นหนึ่งเทคนิคที่สามารถเพิ่มค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของไฮโดรเจนในวัสดุที่มีการดูดซับเชิงกายภาพ

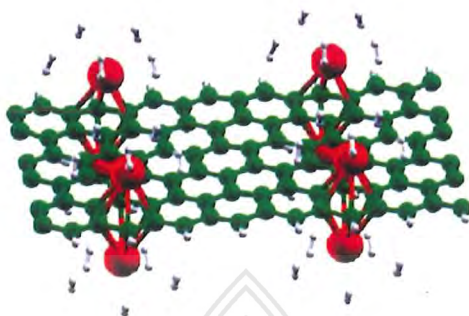


รูปที่ 5 การเพิ่มพลังงานยึดเหนี่ยวของไฮโดรเจนโมเลกุลโดยการแทนที่อะตอมของ Zn^{2+} ด้วย Cd^{2+} อะตอมสีน้ำเงิน ชมพู แดง ดำ และขาว คือ อะตอมของสังกะสี แคลเซียม ออกซิเจน คาร์บอน และไฮโดรเจนตามลำดับ

2. การเติมแต่งโลหะที่ดึงดูดไฮโดรเจน (decorated hydrogen attracting metals)

สำหรับวิธีการนี้เป็นการเติมแต่งโลหะที่สามารถดึงดูดไฮโดรเจนลงบนพื้นผิวของวัสดุที่นำมาใช้กักเก็บไฮโดรเจน เช่น ลิเทียม (Blomqvist et al., 2007), โซเดียม (Srepusharawoot et al., 2011; Vitillo et al., 2005), โพแทสเซียม (Srepusharawoot et al., 2011; Vitillo et al., 2005), แมกนีเซียม (Lochan and Head-Gordon, 2006), แคลเซียม (Ataca et al., 2009; Lee et al., 2010) รวมถึงโลหะทรานซิชัน (Yildirim and Ciraci, 2005; Wang et al., 2009) เมื่อก๊าซไฮโดรเจนมาติดบนผิวโลหะเหล่านี้ส่งผลให้พลังงานยึดเหนี่ยวของไฮโดรเจนมีค่าสูงขึ้น ในกรณีนี้โมเลกุลของไฮโดรเจนจะไม่เกาะกับพื้นผิวของวัสดุด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ แต่จะเกาะติดด้วยแรงทางไฟฟ้า

(electrostatic force) ทั้งนี้เนื่องจากว่าเมื่อโลหะเหล่านี้ไปเกาะติดบนพื้นผิวของวัสดุจะมีการถ่ายเทประจุ (charge transfer) จากโลหะไปยังวัสดุก็เกิดส่งผลให้โลหะมีสภาพเป็นไอออนบวก เช่น Li^+ และ Ca^{2+} เป็นต้น เมื่อไฮโดรเจนมาเกาะกับโลหะที่มีประจุเหล่านี้จึงเกิดแรงทางไฟฟ้า ส่งผลให้พลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างไฮโดรเจนและวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น จากการศึกษาของ Blomqvist และคณะ (Blomqvist et al., 2007) พบว่าการใส่ Li ลงบนพื้นผิวของ MOF-5 สามารถเพิ่มพลังงานยึดเหนี่ยวของไฮโดรเจนได้ประมาณ 3-4 เท่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ไฮโดรเจนเกาะบนพื้นผิวของวัสดุโดยตรง นอกจากนี้การใส่แคลเซียมลงบนพื้นผิวของแกรไฟน์ (รูปที่ 6) ก็เป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถทำให้พลังงานยึดเหนี่ยวของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นได้เช่นกัน (Lee et al., 2010)



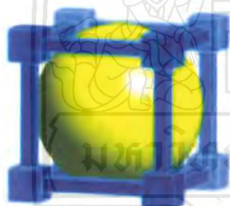
รูปที่ 6 การเพิ่มพลังงานยึดเหนี่ยวของไฮโดรเจน โดยการเติมแต่ง Ca อะตอมลงบนผิวแกรไฟีน อะตอมสีแดง เขียว และขาว คือ แคลเซียม คาร์บอน และ ไฮโดรเจน ตามลำดับ (ที่มา: Lee et al., 2010)

3. Catenation

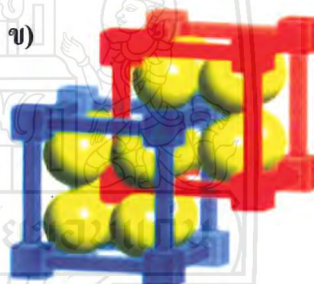
ในวัสดุคูดซับเชิงกายภาพบางชนิดมีโพรงที่กว้างมาก (ทรงกลมวงใหญ่ในรูปที่ 7ก) เพื่อที่จะทำให้เกิดประโยชน์สูงสุดกับพื้นที่ว่างเหล่านี้ การใส่วัสดุที่ดึงดูดไฮโดรเจนในโพรง (หรือการสานโครงสร้าง

เข้าด้วยกันโดยการใส่โครงสร้างอื่นๆ ไว้ในโพรง ดังแสดงในรูปที่ 7ข) ส่งผลทำให้จำนวนของบริเวณยึดเกาะเพิ่มขึ้น นั่นก็ทำให้วัสดุนี้สามารถกักเก็บไฮโดรเจนได้มากขึ้น

ก)



ข)



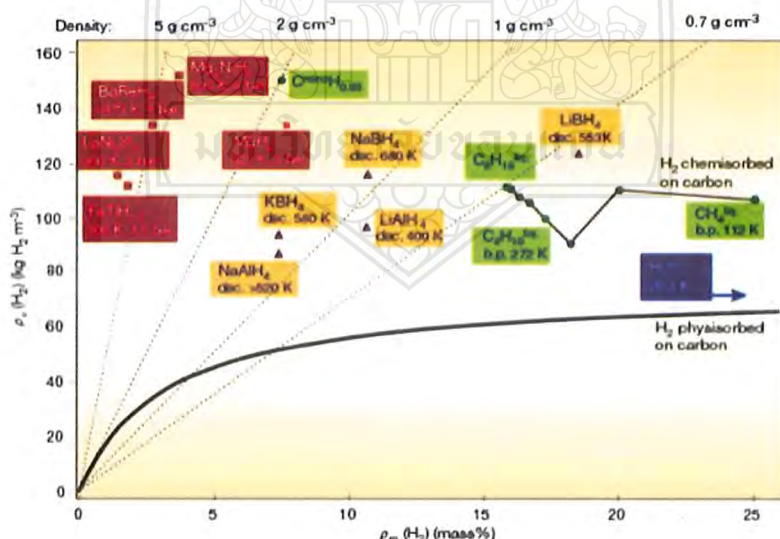
รูปที่ 7 การ catenation ในโพรงของวัสดุคูดซับเชิงกายภาพ ก) โครงสร้างของวัสดุคูดซับเชิงกายภาพก่อนการ catenation ข) การ catenation ของวัสดุคูดซับเชิงกายภาพชนิดเดียวกันซึ่งทำโดยการวางวัสดุอื่นที่สอง (สีแดง) ไว้กลางช่องว่างของวัสดุอันแรก (สีน้ำเงิน) ทรงกลมสีเหลืองวงใหญ่ทางซ้ายมือและขวามือ คือ ช่องว่างของวัสดุที่มีการคูดซับเชิงกายภาพก่อนและหลังทำ catenation ตามลำดับ (ที่มา: Rowsell and Yaghi, 2005)

4. Spillovers

เป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการแยก H_2 เป็นอะตอมของไฮโดรเจนบนพื้นผิวของโลหะ เช่น Pt/C (Wang and Yang, 2008) จากนั้นอะตอมเหล่านี้จึงสามารถเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณยึดเกาะในวัสดุกักเก็บไฮโดรเจน เช่น อะลูมินา (Somorjai, 1994) MOFs (Li and Yang, 2006) ท่อคาร์บอนนาโน (Yang et al., 2006) แกรไฟต์นาโนไฟเบอร์ (Lueking et al., 2004) และ ถ่านกัมมันต์ (Li and Yang, 2007) เป็นต้น ส่งผลให้พลังงานยึดเหนี่ยวมีค่าสูงกว่ากรณีการดูดซับเชิงกายภาพทั่วไป นอกจากนี้วิธีการนี้เป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ (reversible) ซึ่งสามารถทำได้โดยการลดความดันลง การลดความดันทำให้อะตอมไฮโดรเจนไหลกลับมารวมกันกลายเป็นก๊าซ H_2 วิธีดังกล่าวสามารถเพิ่มปริมาณการกักเก็บไฮโดรเจนในวัสดุได้ ตัวอย่างเช่น ปริมาณการกักเก็บไฮโดรเจนโดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 298 เคลวินและความดัน 10 เมกกาพาสคาลของ MOF-5 มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อทำ spillover กับสารประกอบชนิดเดียวกันพบว่าความสามารถในการกักเก็บไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นถึง 7.5 เท่า

(ประมาณเกือบร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก) (Li and Yang, 2006)

วัสดุดูดซับเชิงเคมี จากรูปที่ 4ก เมื่อพลังงานจากภายนอกมีค่ามากกว่าพลังงานกระตุ้น กระบวนการดูดซับเชิงเคมีก็จะเกิดขึ้น และเรียกวัสดุที่มีการกักเก็บไฮโดรเจนด้วยกระบวนการดูดซับเชิงเคมีว่าวัสดุดูดซับเชิงเคมี ตัวอย่างของวัสดุเหล่านี้ ได้แก่ สารจำพวกโลหะไฮไดรด์ (metal hydride) และสารคอมเพล็กซ์ไฮไดรด์ (complex hydride) ในรูปที่ 8 แสดงความสามารถในการกักเก็บไฮโดรเจนทั้งในเชิงมวลและเชิงปริมาตรของสารประกอบชนิดต่างๆ ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณไฮโดรเจนทั้งเชิงมวลและเชิงปริมาตรในวัสดุประเภทนี้มีค่าค่อนข้างสูง แต่ปัญหาหลักของวัสดุเหล่านี้ก็คือ ปัญหาการปลดปล่อยไฮโดรเจนให้ออกจากวัสดุ จากรูปที่ 4ค อะตอมของไฮโดรเจนเกาะด้วยพันธะเคมีในเนื้อของวัสดุ ส่งผลให้พลังงานยึดเหนี่ยวของไฮโดรเจนในกรณีนี้มีค่าสูง ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะดึงไฮโดรเจนออกมาจากวัสดุประเภทนี้ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องให้พลังงานในรูปของความร้อนที่สูงมากพอเพื่อที่จะทำลายพันธะเคมี



รูปที่ 8 ปริมาณไฮโดรเจนต่อมวล (แกน x) และต่อปริมาตร (แกน y) ในวัสดุที่มีการดูดซับเชิงเคมีชนิดต่างๆ (ที่มา: Schlapbach and Züttel, 2002)

ระหว่างอะตอมไฮโดรเจนกับวัสดุดังกล่าว ทำให้ อุณหภูมิที่ใช้ในการปลดปล่อยไฮโดรเจน (desorption temperature) มีค่าสูงมาก ในทางปฏิบัติเราต้องการ อุณหภูมิในการปลดปล่อยไฮโดรเจนให้ใกล้เคียงกับ อุณหภูมิห้องมากที่สุด เพื่อที่จะไม่ต้องใช้พลังงานมาก ในการปลดปล่อยไฮโดรเจน ในปัจจุบันนักวิจัยได้ทำ การศึกษาวิธีการที่จะทำให้อุณหภูมิของการปลดปล่อย ไฮโดรเจนมีค่าใกล้เคียงกับช่วงอุณหภูมิตามข้อ กำหนดสำหรับวัสดุกักเก็บไฮโดรเจน แต่ก็ยังไม่พบ สารประกอบใดที่สามารถปลดปล่อยไฮโดรเจนตามที่ ระบุในข้อกำหนดได้ ในบทความนี้ผู้เขียนจะขอ นำเสนอสามวิธีการในการลดอุณหภูมิการปลดปล่อย ไฮโดรเจน

1. การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

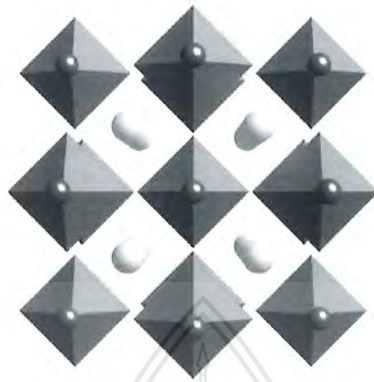
ในวัสดุที่มีการดูดซับเชิงเคมีการใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาเป็นหนึ่งวิธีที่มีความสำคัญที่สามารถลด อุณหภูมิการปลดปล่อยไฮโดรเจนได้ โดยตัวเร่ง ปฏิกิริยาที่นิยมใช้ ได้แก่ TiCl_3 (Bogdanovich and Schwickardi, 1997) โบรอน (Chen and Zhu, 2008) เป็นต้น ในสารประกอบ NaAlH_4 กระบวนการย้อนกลับ ในการรับ/ปล่อยไฮโดรเจนเกิดขึ้นได้ช้ามาก และการ ที่ให้ NaAlH_4 จะรับไฮโดรเจนกลับเข้าไปอีกครั้งนั้น แทบจะเป็นไปไม่ได้เลย ในปี 1997 Bogdanovic และ Schwickardi (Bogdanovich and Schwickardi, 1997) พบว่า การเติม 2 mol% ของ TiCl_3 ทำให้กระบวนการ รับ/ปลดปล่อยไฮโดรเจนใน NaAlH_4 ไม่ใช่ปัญหา อีกต่อไป นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณไฮโดรเจนที่ถูก ปลดปล่อยจาก NaAlH_4 สูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ทำการเจือ TiCl_3 ซึ่งคุณสมบัติที่ดีขึ้นนี้ Araujo และคณะ (Araujo et al., 2005) ได้ศึกษาเชิงทฤษฎี ของการเจือ Ti ใน NaAlH_4 และพบว่า เมื่อตำแหน่ง ของ Na ถูกแทนที่ด้วย Ti พลังงานพันธะระหว่าง Al และ H ใน AlH_4 จะลดลง ส่งผลให้อะตอมของ ไฮโดรเจนที่ AlH_4 มีพลังงานยึดเหนี่ยวที่น้อยกว่า กรณีที่ไม่ได้เจือ ด้วยเหตุนี้อุณหภูมิการปลดปล่อย ไฮโดรเจนในกรณีที่เจือ Ti จึงต่ำกว่ากรณีที่ไม่ได้เจือ Ti

2. การปรับแต่งคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์

โดยปกติวัสดุที่มีการดูดซับเชิงเคมีที่ได้รับความสนใจ ได้แก่ LiBH_4 , NaAlH_4 และ Na_3AlH_6 ฯลฯ ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ประกอบด้วย metal hydride complex anion เช่น BH_4^- , AlH_4^- , AlH_6^{3-} และ โลหะไอออนบวก ได้แก่ Li^+ , Na^+ , Mg^{2+} ในกรณี ของโลหะไอออนบวกบางตัวถูกแทนที่ด้วยโลหะ ไอออนบวกชนิดอื่นส่งผลให้คุณสมบัติทาง อุณหพลศาสตร์เปลี่ยนแปลงไป ตัวอย่างเช่น ในกรณี ของ hexahydroaluminates (M_3AlH_6) โดยตำแหน่ง อะตอมของโลหะที่มีประจุบวก (M) เรียงกันแบบ face-centered cubic (fcc) เมื่อทำการแทนโลหะ M บางตัวด้วยโลหะประจุบวกที่แตกต่างกัน (M') โครงสร้างนี้จะถูกเรียกว่า bialkali alanate ($\text{M}_2\text{M}'\text{AlH}_6$) ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งสารประกอบนี้จะแสดงคุณสมบัติ ทางอุณหพลศาสตร์ที่แตกต่างจากเดิม ในสารประกอบ Na_3AlH_6 เมื่ออะตอมของ Na ถูกแทนที่ด้วย Li ที่บาง ตำแหน่งกลายเป็น $\text{Na}_2\text{LiAlH}_6$ โดยที่สารประกอบชนิด ใหม่นี้สามารถทำให้ความดันของก๊าซไฮโดรเจนที่ สภาวะสมดุลมีค่าต่ำลงประมาณร้อยละ 50 (Graetz, 2008) ส่งผลให้เอนทัลปีของปฏิกิริยา (formation enthalpy) มีค่าลดลง (ดูสมการ Van't Hoff ใน Züttel, 2003) เป็นผลให้อุณหภูมิการปลดปล่อยไฮโดรเจน มีค่าลดลง

3. การลดขนาดของเกรน

ในการทดลอง การลดขนาดของเกรนสามารถ ทำได้โดยวิธี Ball milling โดยวิธีนี้จะทำได้โดยการ ใส่สารที่ต้องการศึกษาและวัสดุสำหรับบด เช่น ลูกบด ที่ทำจากเซรามิกหรือเหล็กกล้าปลอดสนิมลงในท่อ ทรงกระบอกที่จะใช้ทำการบดสาร เมื่อท่อดังกล่าว หมุนจะทำให้สารที่เราสนใจกระทบกับลูกบด ส่งผล ให้ขนาดของเกรนลดลง จากผลการทดลองในเส้น แมกนีเซียมนาโน (Li et al., 2007) พบว่า ปริมาณ การปล่อยก๊าซไฮโดรเจนแปรผกผันกับขนาดของเกรน นอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการปล่อยไฮโดรเจนของเกรน

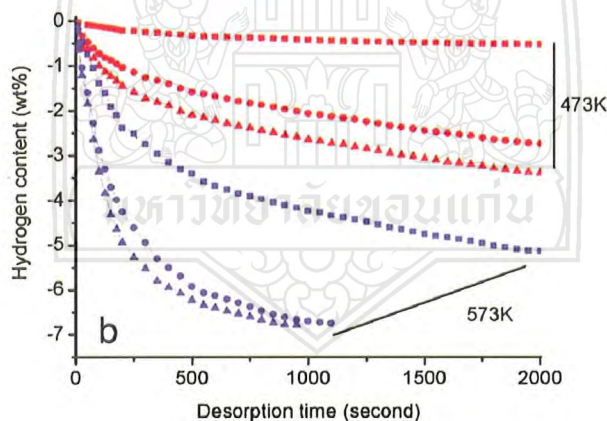


รูปที่ 9 โครงสร้างของ bialkali aluminohydride ($M_2M'AlH_6$) อะตอมขนาดเล็กและขนาดใหญ่คือ โลหะประจุบวก M และ M' ตามลำดับ และ AlH_6 complex anion แทนด้วยรูปทรงแปดเหลี่ยม (ที่มา: Graetz, 2008)

ขนาดเล็กจะมีค่าสั้นกว่าของเกรนขนาดใหญ่ ดังแสดง
ในรูปที่ 10

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่ายังไม่มีวัสดุ
หรือสารประกอบใดที่จะใช้เป็นวัสดุกักเก็บไฮโดรเจน
ที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ ดังนั้นการศึกษาเชิง

ทฤษฎีควบคู่กับการทดลองจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง
เพื่อที่จะหาวัสดุที่เหมาะสมสำหรับที่จะใช้เป็นวัสดุ
กักเก็บไฮโดรเจน ส่งผลให้เศรษฐกิจไฮโดรเจนมี
โอกาสเกิดขึ้นได้จริงมากขึ้น



รูปที่ 10 การปลดปล่อยไฮโดรเจนในเส้นแมกนีเซียมนาโนที่เกรนขนาดต่างๆ (สามเหลี่ยม: เส้นผ่าศูนย์กลาง 30-50 นาโนเมตร, วงกลม: เส้นผ่าศูนย์กลาง 80-100 นาโนเมตร, สี่เหลี่ยม: เส้นผ่าศูนย์กลาง 150-170 นาโนเมตร) จุดสีแดงและสีน้ำเงินแสดงอุณหภูมิของเส้นแมกนีเซียมนาโนเท่ากับ 473 และ 573 เคลวิน ตามลำดับ (ที่มา: Li et al., 2007)

บทสรุป

สืบเนื่องจากปัญหาวิกฤตของพลังงานในปัจจุบัน จึงได้มีการค้นคว้าพลังงานทดแทนรูปแบบต่างๆ มาใช้เป็นแหล่งพลังงานใหม่เพื่อที่จะช่วยลดสภาวะขาดแคลนพลังงานที่จะเกิดขึ้นในอนาคตอันใกล้ พลังงานทดแทนจากไฮโดรเจนจึงถือว่าเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจ ส่งผลให้เศรษฐกิจไฮโดรเจนมีบทบาทสำคัญ โดยเศรษฐกิจไฮโดรเจนมีองค์ประกอบที่สำคัญสามส่วน คือ การสร้างไฮโดรเจน การกักเก็บไฮโดรเจน และการนำไปใช้ในรูปของเซลล์เชื้อเพลิง แต่อุปสรรคสำคัญที่ทำให้เศรษฐกิจไฮโดรเจนเกิดขึ้นได้ยากก็คือ การขาดแหล่งกักเก็บไฮโดรเจนที่มีประสิทธิภาพ ในปัจจุบัน ไฮโดรเจนสามารถกักเก็บได้สามวิธี คือ การกักเก็บในรูปของก๊าซและของเหลวในสถานะกักเก็บ แต่ปัญหาหลักๆ ของการกักเก็บในรูปแบบนี้ก็คือเรื่องของขนาดปริมาตรภาชนะที่ใหญ่ ความปลอดภัยและต้นทุนที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นวิธีการกักเก็บไฮโดรเจนแบบที่สาม ซึ่งก็คือ การกักเก็บไฮโดรเจนในของแข็งจึงเป็นวิธีที่น่าสนใจอย่างยิ่ง โดยวัสดุที่ใช้สำหรับการกักเก็บไฮโดรเจนแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ วัสดุดูดซับเชิงกายภาพและเชิงเคมี ในวัสดุดูดซับเชิงกายภาพ ปริมาณพื้นผิวของบริเวณยึดเกาะมีเป็นจำนวนมากแต่พลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของไฮโดรเจนและวัสดุกักเก็บมีค่าต่ำ (น้อยกว่า 10 กิโลจูลต่อโมล) ส่งผลให้ไม่สามารถกักเก็บได้จึงจำเป็นต้องเพิ่มพลังงานยึดเหนี่ยวดังกล่าว เพื่อที่จะเพิ่มความสามารถในการกักเก็บไฮโดรเจนในวัสดุดังกล่าว ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี คือ (1) exposed metal sites (2) การเติมแต่งโลหะที่ดึงดูดไฮโดรเจน (3) catenation และ (4) spillovers ในส่วนของวัสดุที่มีการดูดซับเชิงเคมี ปริมาณของไฮโดรเจนต่อมวลและต่อปริมาตรมีค่าค่อนข้างสูง แต่จำนวนไฮโดรเจนที่ถูกปล่อยออกมาจากวัสดุก่อนข้างน้อยเนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะเคมีระหว่างอะตอมของไฮโดรเจนกับวัสดุมีค่าสูง จึงต้องมีการคิดค้นวิธีที่จะช่วยให้การปลดปล่อย

ไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงขึ้น เช่น (1) การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (2) การปรับแต่งทางอุณหภูมิศาสตร์ และ (3) การลดขนาดของเกรนให้เล็กลง

เอกสารอ้างอิง

- Araujo, C. M., Ahuja, R., Osorio Guillen, J. M. and Jena, P. (2005). Role of titanium in hydrogen desorption in crystalline sodium alanate. *Appl. Phys. Lett.* 86: 251913.
- Ataca, C., Akturk, E. and Ciraci, S. (2009). Hydrogen storage of calcium atoms adsorbed on graphene: First-principles plane wave calculations. *Phys. Rev. B.* 79: 041406(R).
- Bérubé, V., Radtke, G., Dresselhaus, M. and Chen, G. (2007). Size effects on the hydrogen storage properties of nanostructured metal hydrides: A review. *Int. J. Energy Res.* 39: 637-663.
- Blomqvist, A., Araujo, C. M., Srepusharawoot, P. and Ahuja, R. (2007). Li-decorated metal-organic framework 5: A route to achieving a suitable hydrogen storage medium. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 104: 20173-20176.
- Bogdanovich, B. and Schiwickardi, M. (1997). Ti-doped alkali metal aluminium hydrides as potential novel reversible hydrogen storage materials. *J. Alloys Compd.* 1: 253-254.
- Chen, P. and Zhu, M. (2008). Recent progress in hydrogen storage. *Materials Today.* 11: 36-43.
- Dinca, M. and Long, J. R. (2008). Hydrogen storage in microporous metal-organic frameworks with exposed metal sites. *Angew. Chem. Int. Ed.* 47: 6766-6779.

- DOE requirements. http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/storage_challenges.html
- Dong, J., Wang, X., Xu, H., Zhao, Q. and Li, J. (2007). Hydrogen storage in several microporous zeolites. *Int. J. Hydrogen Energy*. 32: 4998-5004.
- Eddaoudi, M., Kim, J., Rosi, N. L., Vodak, D., Wachter, J., O'Keeffe, M., et al. (2002). Systematic design of pore size and functionality in isorecticular MOFs and their application in methane storage. *Science*. 295: 469-472.
- Energy density. http://ie.jrc.ec.europa.eu/publications/scientific_publications/2003/P2003-181=EUR20995EN.pdf
- Graetz, J. (2008). New approaches to hydrogen storage. *Chem. Soc. Rev.* 38: 73-82.
- Hydrogen Properties. http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm01r0.pdf
- Jin, H., Lee, Y. S. and Hong, I. (2007). Hydrogen adsorption characteristics of activated carbon. *Catalysis Today*. 120: 399-406.
- Lee, H., Ihm, J., Cohen, M. L. and Louie, S. G. (2010). Calcium-decorated graphene-based nanostructures for hydrogen storage. *Nano Lett.* 10: 793-798.
- Li, W., Li, C., Ma, H. and Chen, J. (2007). Magnesium nanowires: enhanced kinetics for hydrogen absorption and desorption. *J. Am. Chem. Soc.* 129: 6710-6711.
- Li, Y. and Yang, R. T. (2006). Hydrogen storage in metal-organic frameworks by bridged hydrogen spillover. *J. Am. Chem. Soc.* 128: 8136-8137.
- Li, Y. and Yang, R. T. (2007). Hydrogen storage on platinum nanoparticles doped on superactivated carbon. *J. Phys. Chem. C*. 111: 11086-11094.
- Liu, C., Fan, Y. Y., Liu, M., Cong, H. T., Cheng, H. M. and Dresselhaus, M. S. (1999). Hydrogen storage in single-walled carbon nanotubes at room temperature. *Science*. 286: 1127-1129.
- Lochan, R. C. and Head-Gordon, M. (2006). Computational studies of molecular hydrogen binding affinities: The role of dispersion forces, electrostatics, and orbital interactions. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 8: 1357-1370.
- Lueking, A. D., Yang, R. T., Rodriguez, N. M. and Baker, R. T. (2004). Hydrogen storage in graphite nanofibers: effect of synthesis catalyst and pretreatment conditions. *Langmuir*. 20: 714-721.
- Patchkovskii, S., Tse, J. S., Yurchenko, S. N., Zhechkov, L., Heine, T. and Seifert, G. (2005). Graphene nanostructures as tunable storage media for molecular hydrogen. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A* 102: 10439-10444.
- Rosi, N. L., Eckert, J., Eddaoudi, M., Vodak, D., Kim, J., O'Keeffe, M., et al. (2003). Hydrogen storage in microporous metal-organic frameworks. *Science*. 300: 1127-1129.
- Rowsell, J. L. C. and Yaghi, O. M. (2005). Strategies for hydrogen storage in metal-organic frameworks. *Angew. Chem. Int. Ed.* 44: 4670 -4679.
- Schlapbach, L. and Züttel, A. (2002). Hydrogen-storage materials for mobile applications. *Nature*. 414: 353-358.

- Somorjai, G. A. (1994). The surface science of heterogeneous catalysis. *Surf. Sci.* 299-300: 849-866.
- Srepusharawoot, P., Araujo, C. M., Blomqvist, A., Scheicher, R. H. and Ahuja, R. (2008). A comparative investigation of H₂ adsorption strength in Cd- and Zn-based metal organic framework-5. *J. Chem. Phys.* 129: 164104.
- Srepusharawoot, P., Blomqvist, A., Araujo, C. M., Scheicher, R. H. and Ahuja, R. (2011). Hydrogen binding in alkali-decorated iso-reticular metal organic framework-16 based on Zn, Mg, and Ca. *Int. J. Hydrogen Energy.* 36: 555-562.
- Struzhkin, V. V., Militzer, B., Mao, W. L., Mao, H. K. and Hemley, R. J. (2007). Hydrogen storage in molecular clathrates. *Chem. Rev.* 107: 4133-4151.
- Vitillo, J. G., Damin, A., Zecchina, A. and Ricchiardi, G. (2005). Theoretical characterization of dihydrogen adducts with alkaline cations. *J. Chem. Phys.* 122: 114311.
- Wang, L. and Yang, R. T. (2008). New sorbents for hydrogen storage by hydrogen spillover - a review. *Energy Environ. Sci.* 1: 268-279.
- Wang, L., Lee, K., Sun, Y. Y., Lucking, M., Chen, Z., Zhao, J. J., et al. (2009). Graphene oxide as an ideal substrate for hydrogen storage. *ACS Nano.* 10: 2995-3000.
- Yang, C., Wang, X. and Omary, M. A. (2007). Fluorous metal-organic frameworks for high-density gas adsorption. *J. Am. Chem. Soc.* 129: 15454-15455.
- Yang, F. H., Lachawiec Jr., A. J. and Yang, R. T. (2006). Adsorption of spillover hydrogen atoms on single-wall carbon nanotubes. *J. Phys. Chem. B.* 110: 6236-6244.
- Yildirim, T. and Ciraci, S. (2005). Titanium-decorated carbon nanotubes as a potential high-capacity hydrogen storage medium. *Phys. Rev. Lett.* 94: 175501.
- Züttel, A. (2004). Hydrogen storage methods. *Naturwissenschaften.* 91: 157-172.
- Züttel, A. (2003). Materials for hydrogen storage. *Materials today.* 6: 24-33.



การขยายพันธุ์ข้าวเหนียวดำในหลอดทดลอง

In *Vitro* Regeneration of Purple Glutinous Rice (*Oryza sativa* L.)

อรรรรณ พิมพันธ์¹ และ นูเดือน เมืองแสน^{2*}

บทคัดย่อ

ข้าวเหนียวดำ (purple glutinous rice) หรือข้าวกำ เป็นข้าวที่มีการนำมาบริโภค เป็นส่วนผสมในเครื่องดื่ม และใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์เพราะมีสารต้านอนุมูลอิสระสูง ได้แก่ แอนโทไซยานิน และ แกมมาออไรซานอล การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะเหมาะสมในการชักนำเมล็ดของข้าวเหนียวดำสองพันธุ์ คือ G.S. No. 00621 และ G.S. No. 21629 ให้เกิดแคลลัสและต้น ในอาหารสูตร N6 และ MS ดัดแปลงที่เติม 2,4-D ความเข้มข้นต่างกัน พบว่า อาหารที่เหมาะสมในการชักนำเมล็ดข้าวเหนียวดำสองพันธุ์ให้เจริญเป็นแคลลัส คือ อาหารสูตร MS ดัดแปลงที่เติม 2,4-D ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัม/ลิตร และ 3 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และมีร้อยละการเกิดแคลลัสเท่ากับ 90.00 และ 73.33 ตามลำดับ และการศึกษาการชักนำแคลลัสให้เจริญเป็นต้นในอาหารสูตร MS ดัดแปลงที่เติม kinetin ความเข้มข้นต่างกัน พบว่า อาหารสูตร MS ดัดแปลงที่เติม kinetin 4 มิลลิกรัม/ลิตร ทำให้แคลลัสเจริญเป็นต้นได้สูงสุด โดยข้าวเหนียวดำพันธุ์ G.S. No. 00621 และ G.S. No. 21629 มีร้อยละการเจริญเป็นต้นเท่ากับ 36.66 และ 30.00 ตามลำดับ

Abstract

Purple glutinous rice or “Kaow Kum” has been used for food, beverage, and medical purposes because it is rich in anthocyanin antioxidants and gamma oryzanol. This study was undertaken to investigate callus induction and regeneration in two purple glutinous rice (*Oryza sativa* L.) varieties, G.S. No. 00621 and G.S. No. 21629, on modified N6 and MS medium supplemented with various concentrations of 2,4-D. The best results of callus induction for two rice varieties were achieved on the modified MS medium

¹ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

² สาขาวิชาชีววิทยา สำนักวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 30000

* Corresponding Author, E-mail: nooduan@sut.ac.th

added with 2,4-D 4 mg/l (90.00%) and 3 mg/l (73.33%), respectively. Regeneration was studied on MS medium containing different concentrations of kinetin. The modified MS medium supplemented with 4 mg/l kinetin showed best performance in shoot regeneration for G.S. No. 00621 (36.66%) and G.S. No. 21629 (30.00 %).

คำสำคัญ: เพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ แคลลัส ข้าวเหนียวดำ แอนโทไซยานิน

Keywords: Tissue culture, Callus, Purple glutinous rice, anthocyanin

บทนำ

ข้าวเป็นพืชที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ และเป็นอาหารหลักที่คนส่วนใหญ่นิยมบริโภค นอกจากข้าวเจ้าแล้ว ข้าวเหนียวดำ (purple glutinous rice) หรือ ข้าวดำ (Kaow Kum) เป็นอีกชนิดหนึ่งที่คนนิยมบริโภคกันมากขึ้น ในปัจจุบันพบว่ามีอาหารและผลิตภัณฑ์มากมายที่ทำมาจากข้าวเหนียวดำ เช่น อาหารขนม ไวน์ สีสผสมอาหาร และยังมีประโยชน์ด้านการแพทย์ด้วย เช่น ใช้รักษาโรคดกเลือดในสตรี โรคท้องร่วง โรคผิวหนัง นอกจากนี้ยังพบว่า ข้าวเหนียวดำช่วยต้านอนุมูลอิสระ และลดคอเลสเตอรอลได้ เนื่องจากมีสารสำคัญ 2 ชนิด คือ แกมมาออไรซานอล (gamma oryzanol) และแอนโทไซยานิน (anthocyanin)

สารแกมมาออไรซานอลพบในข้าวเหนียวดำสูงกว่าข้าวขาว (Xu and Godber, 1999) สารนี้จะช่วยต้านอนุมูลอิสระ ด้านมะเร็ง ลดคอเลสเตอรอล ยับยั้งการอักเสบในกระเพาะอาหาร และสามารถกระตุ้นให้ภูมิคุ้มกันเพิ่มขึ้นในหนูถีบจักร (ราชชัย แถวถำ, 2547; พันทิพา พงษ์เพียจันทร์, 2547; Cicero et al., 2001; Xu et al., 2001) ส่วนสารแอนโทไซยานิน มีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ (Ichkawa et al., 2001) และยังพบว่ามีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์มะเร็งและป้องกันโรคหัวใจ (พันทิพา พงษ์เพียจันทร์, 2551; Xiaodong et al., 2006)

ปัจจุบันมีการนำข้าวเหนียวดำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหารและยารักษาโรคกันมากขึ้น แต่การขยายพันธุ์ข้าวเหนียวดำหรือการเพาะปลูกมีจำกัด นอกจากนั้นคุณภาพและผลผลิตที่ได้ยังต่ำ ดังนั้นเทคโนโลยีการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อจึงเป็นเครื่องมืออย่าง

หนึ่งในการปรับปรุงพันธุ์พืชเพื่อจุดประสงค์ต่างๆ เช่น การสร้างพันธุ์ใหม่ การสร้างสารทุติยภูมิ การขยายพันธุ์ การสร้างพืชจีเอ็มโอ หรือเพื่อการปรับปรุงพันธุ์ข้าวให้มีผลผลิตสูงขึ้นหรือคุณภาพดีขึ้น มีรายงานการประสบความสำเร็จการขยายพันธุ์ข้าวไทยโดยการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อจำนวนมาก อย่างไรก็ตามงานส่วนใหญ่เป็นการขยายพันธุ์ข้าวขาว เช่น ข้าวขาวดอกมะลิ 105 นางมลเอส 4 และบาสมати 370 โดยใช้ส่วนต่างๆ ของพืช (สุรินทร์ ปิยะโชคณากุล และคณะ, 2537; ประภา ศรีพิจิตต์ และพรทิพย์ ชิวเศรษฐธรรม, 2537; ประดิษฐ์ พงศ์ทองคำ และคณะ, 2538; สุริยันตร์ ละอุม และคณะ, 2540; เสดิม ระติสุนทร และคณะ, 2532) มีรายงานการเพาะเลี้ยงของ พรรณี รอดแรงบุญ และ นาริรัตน์ มูลใจ (2540) โดยทดลองหาสูตรอาหารที่เหมาะสมในการชักนำเมล็ดของข้าวเหนียว 5 พันธุ์ให้เกิดแคลลัสและยอด แต่ยังไม่มีการขยายพันธุ์โดยการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ กับข้าวเหนียวดำ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสูตรอาหารที่เหมาะสมในการชักนำให้เกิดแคลลัสและชักนำแคลลัสให้เกิดยอดที่พัฒนาเป็นต้นอ่อนที่สมบูรณ์ โดยศึกษาในข้าวเหนียวดำที่มีปริมาณแอนโทไซยานินสูงสองสายพันธุ์

วิธีการทดลอง

1. ศึกษาเปรียบเทียบสูตรอาหาร MS และสูตร N6 ในการชักนำเมล็ดข้าวให้เจริญเป็นแคลลัส

นำเมล็ดข้าวเหนียวดำ 2 พันธุ์ คือ พันธุ์ G.S. No. 00621 และพันธุ์ G.S. No. 21629 มาแกะเปลือกออก แล้วล้างให้สะอาดด้วยผงซักฟอก จากนั้นล้าง

ด้วยน้ำสะอาดหลายๆ ครั้ง แล้วนำไปฟอกฆ่าเชื้อโดยแช่เมล็ดข้าวใน 70% แอลกอฮอล์ นาน 5 นาที ย้ายไปแช่ในสารละลายคลอโรกซ์ 15% ที่เติม Tween 20 จำนวน 3-4 หยด แช่เป็นครั้งคราวนาน 30 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นปลอดเชื้อ 3 ครั้ง นำเมล็ดข้าวที่ผ่านการฟอกฆ่าเชื้อแล้ว 30 เมล็ดต่อทริตเมนต์มาเพาะเลี้ยงในอาหารสูตร MS (Murashige and Skoog, 1962) และสูตร N6 (Chu et al., 1975) ดัดแปลงที่เติมน้ำตาลซูโครส 20 กรัม/ลิตร ผงวุ้น 8 กรัม/ลิตร และเติม 2,4-D ความเข้มข้นต่างกัน ได้แก่ 1 2 3 4 และ 5 มิลลิกรัม/ลิตร อาหารทุกสูตรปรับ pH เท่ากับ 5.8 จากนั้นนำมาเก็บไว้ในห้องเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อที่มีแสง 16 ชั่วโมง/วัน อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 สัปดาห์ บันทึกการเกิดแคลลัส น้ำหนัก ขนาดและลักษณะของแคลลัส

2. ศึกษาผลของไคนิตินในการชักแคลลัสให้เจริญเป็นต้น

แคลลัสข้าวเหนียวดำ 2 พันธุ์ คือ พันธุ์ G.S. No. 00621 และพันธุ์ G.S. No. 21629 ที่ได้จาก การเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตรชักนำแคลลัสที่เหมาะสม อายุ 3 สัปดาห์ มาเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS ดัดแปลงที่เติมน้ำตาลซูโครส 20 กรัม/ลิตร ผงวุ้น 8 กรัม/ลิตร และเติมไคนิติน (kinetin) ความเข้มข้นต่างกัน ได้แก่ 0 1 2 3 4 และ 5 มิลลิกรัม/ลิตร อาหารทุกสูตรปรับ pH เท่ากับ 5.8 จากนั้นนำมาเก็บไว้ในห้องเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อที่มีแสง 16 ชั่วโมง/วัน อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 สัปดาห์ บันทึกจำนวนยอดที่เกิดขึ้นและลักษณะการเกิดยอด

ผลการศึกษา

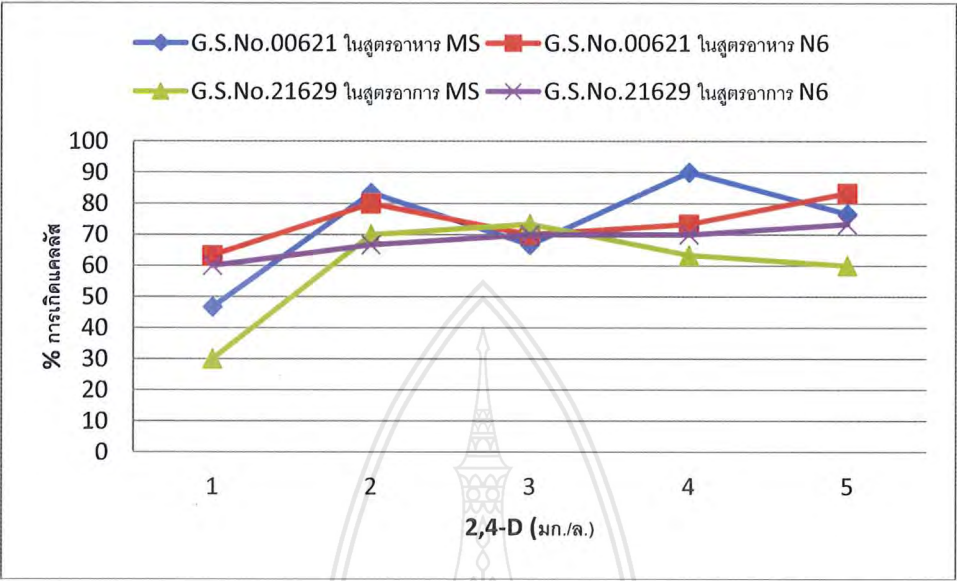
1. ศึกษาเปรียบเทียบสูตรอาหาร MS และสูตร N6 ในการชักนำเมล็ดข้าวให้เจริญเป็นแคลลัส

จากการเพาะเลี้ยงเมล็ดข้าวเหนียวดำพันธุ์ G.S. No. 00621 และพันธุ์ G.S. No. 21629 ในอาหารสังเคราะห์สูตร MS และสูตร N6 ดัดแปลงที่เติมสาร 2,4-D ที่ระดับความเข้มข้นต่างกันและเพาะเลี้ยง

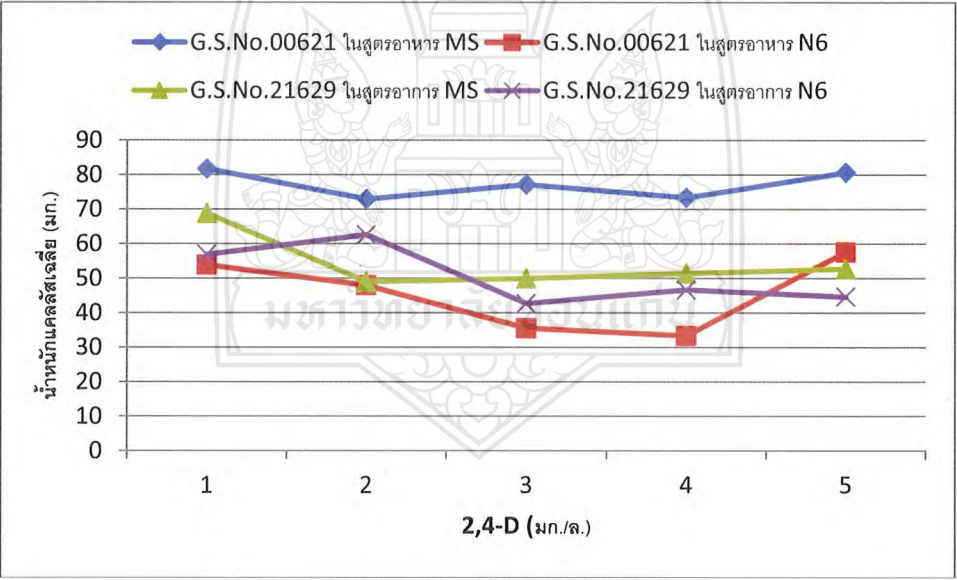
เป็นเวลา 3 สัปดาห์ พบว่า แคลลัสที่เกิดขึ้นมีทั้งลักษณะเกาะกันแน่น (compact callus) และที่เกาะกันหลวมๆ (friable callus) แคลลัสที่ได้มีสีเหลืองและมียอดอ่อนสีเขียวเจริญมาจากบริเวณส่วนของคัพภะ และพบว่าอาหารทุกสูตรที่มีการเติมสาร 2,4-D สามารถชักนำให้เมล็ดข้าวทั้ง 2 พันธุ์เจริญเป็นแคลลัสได้ โดยสูตรอาหารที่เหมาะสมในการชักนำให้เมล็ดข้าวเหนียวดำพันธุ์ G.S. No. 00621 เจริญเป็นแคลลัสได้ดีที่สุด คืออาหารสูตร MS ที่เติม 2,4-D 4 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมีร้อยละการเกิดแคลลัสเท่ากับ 90.00 มีน้ำหนักแคลลัสเฉลี่ยเท่ากับ 73.33 มิลลิกรัม และมีขนาดแคลลัสเฉลี่ยเท่ากับ 8.07 มิลลิเมตร (รูปที่ 1 2 และ 3) และสูตรอาหารที่เหมาะสมในการชักนำให้เมล็ดข้าวเหนียวดำพันธุ์ G.S. No. 21629 เจริญเป็นแคลลัสได้ดีที่สุด คือ อาหารสูตร MS ที่เติม 2,4-D 3 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมีร้อยละการเกิดแคลลัสเท่ากับ 73.33 มีน้ำหนักแคลลัสเฉลี่ยเท่ากับ 49.86 มิลลิกรัม และมีขนาดแคลลัสเฉลี่ยเท่ากับ 5.52 มิลลิเมตร (รูปที่ 1 2 และ 3)

2. ศึกษาผลของไคนิตินในการชักแคลลัสให้เจริญเป็นต้น

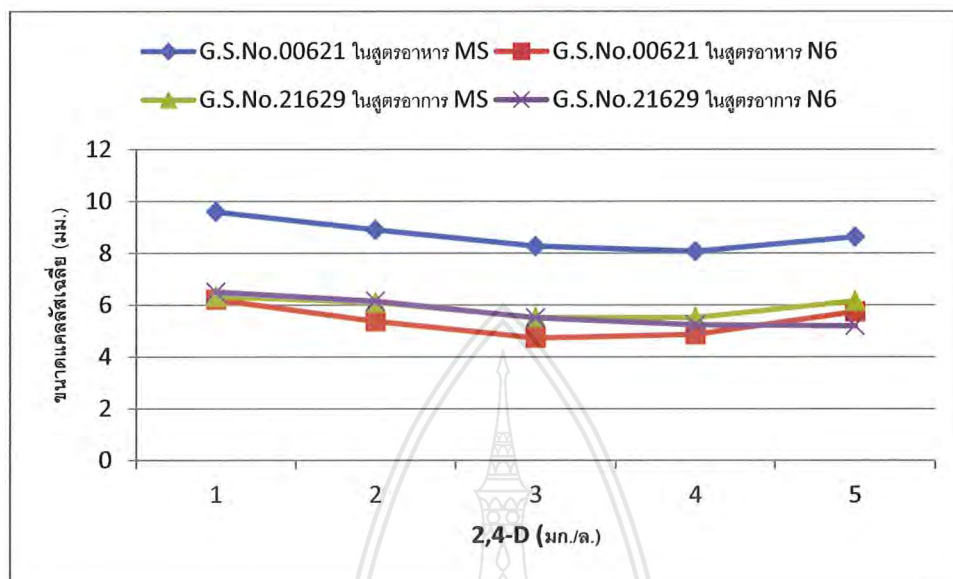
นำแคลลัสที่ได้จากการเพาะเลี้ยงในอาหารสูตร MS และสูตร N6 ที่เติมสาร 2,4-D ความเข้มข้นต่างๆ ที่เหมาะสมอายุ 3 สัปดาห์ไปเพาะเลี้ยงในอาหารสูตร MS ที่เติมสาร kinetin ความเข้มข้นต่างกัน พบว่า 1-2 สัปดาห์แรกแคลลัสเกิดบริเวณพื้นที่สีเขียวขึ้น และในช่วงสัปดาห์ที่ 3 และ 4 พบว่าบริเวณพื้นที่สีเขียวมีการพัฒนาเป็นยอด โดยแคลลัสแต่ละก้อนจะเกิดยอดจำนวนไม่เท่ากัน ซึ่งเกิดยอดตั้งแต่ 1-6 ยอดต่อแคลลัส แคลลัสที่เกิดยอดส่วนใหญ่จะมีรากเกิดขึ้นด้วย ทำให้ได้ต้นที่สมบูรณ์โดยไม่ต้องไปเพาะเลี้ยงในอาหารชักนำราก (รูปที่ 4 และ 5) นอกจากนี้ยังพบว่าบางแคลลัสมีการเจริญเฉพาะรากและบางแคลลัสมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างเดียว โดยไม่มีการเจริญของยอดและราก สำหรับแคลลัสที่เกิดยอดพบว่าบางยอดพัฒนาไม่สมบูรณ์ เช่น มีลำต้นสูง



รูปที่ 1 การเกิดแคลลัสของข้าวพันธุ์ G.S No. 00621 และ G.S. No.21629 ในอาหารสูตร MS และ N6



รูปที่ 2 น้ำหนักแคลลัสของข้าวพันธุ์ G.S No. 00621 และ G.S. No.21629 ในอาหารสูตร MS และ N6



รูปที่ 3 ขนาดแคลลัสของข้าวพันธุ์ G.S No. 00621 และ G.S. No.21629 ในอาหารสูตร MS และ N6

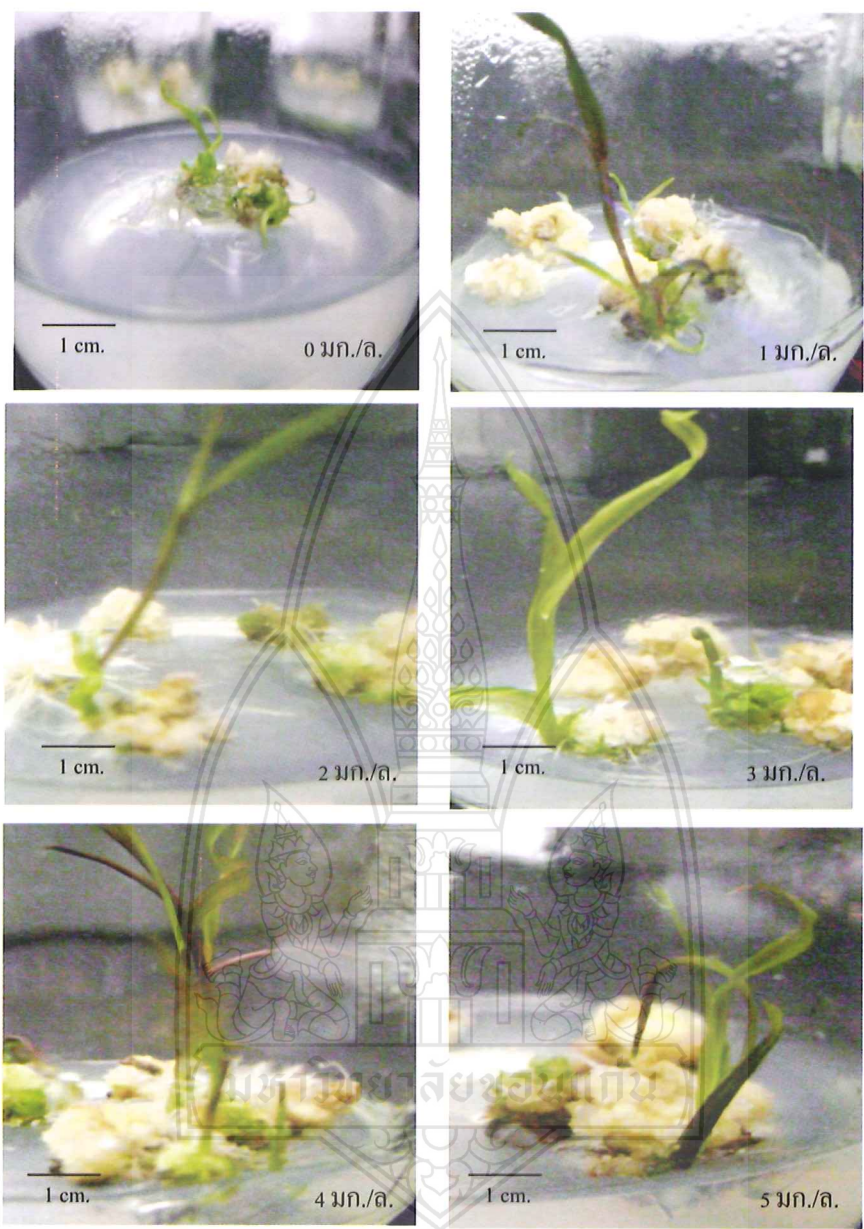
หึงงอ และไม่มีใบเกิดขึ้น และเมื่อทำการเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 6 สัปดาห์ พบว่า อาหารที่เหมาะสมในการชักนำให้แคลลัสข้าวพันธุ์ G.S. No. 00621 เจริญเป็นยอด คือ อาหารสูตร MS ดัดแปลงที่เติม kinetin ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัม/ลิตร โดยสามารถชักนำให้เกิดต้นได้ร้อยละ 36.66 (รูปที่ 6) และสูตรอาหารที่เหมาะสมในการชักนำให้แคลลัสข้าวพันธุ์ G.S. No. 21629 เจริญเป็นยอดได้ดี คือ อาหารสูตร MS ดัดแปลงที่เติม kinetin ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัม/ลิตร โดยสามารถชักนำให้เกิดต้นได้ร้อยละ 30 (รูปที่ 6)

สรุปและวิจารณ์ผล

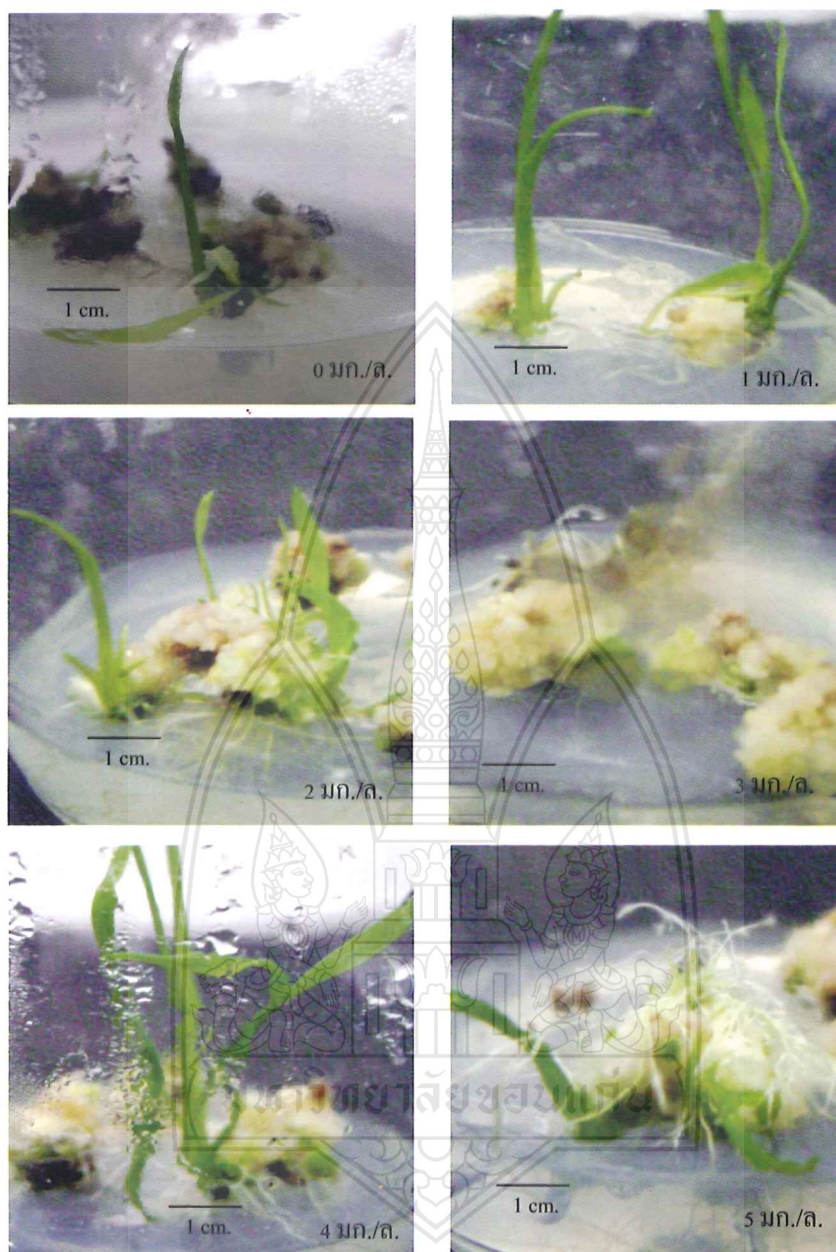
จากการเพาะเลี้ยงเมล็ดข้าวเหนียวดำพันธุ์ G.S. No. 00621 และพันธุ์ G.S. No. 21629 ในอาหารสูตร MS และสูตร N6 ดัดแปลงที่เติม 2,4-D ความเข้มข้นต่างกัน พบว่า อาหารที่สามารถชักนำให้เกิดแคลลัสได้ดีที่สุดสำหรับข้าวพันธุ์ G.S. No. 00621 คือ อาหารสูตร MS ที่เติม 2,4-D ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัม/ลิตร โดยสามารถชักนำให้เกิดแคลลัสได้ร้อยละ 90.00 โดยแคลลัสของข้าวเหนียวดำพันธุ์ G.S. No. 00621 ที่

เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอาหารทดลองทั้งหมด และสำหรับข้าวพันธุ์ G.S. No. 21629 คือ อาหารสูตร MS ที่เติม 2,4-D ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัม/ลิตร โดยสามารถชักนำให้เกิดแคลลัสได้ร้อยละ 73.33 ซึ่งแคลลัสเกิดขึ้นตรงบริเวณคัพพะใกล้ยอดอ่อน และแคลลัสที่ได้มีสีเหลือง ส่วนใหญ่มีลักษณะเกาะกันแน่น บางแคลลัสมีลักษณะเกาะกันอย่างหลวมๆ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของประภา ศรีพิจิตร และ พรทิพย์ ชิวเศรษฐธรรม (2537) ที่รายงานว่าแคลลัสข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เกิดขึ้นตรงบริเวณคัพพะใกล้กับส่วนฐานของยอด ตรงกลางของแคลลัสเซลล์จะเกาะกันแน่น

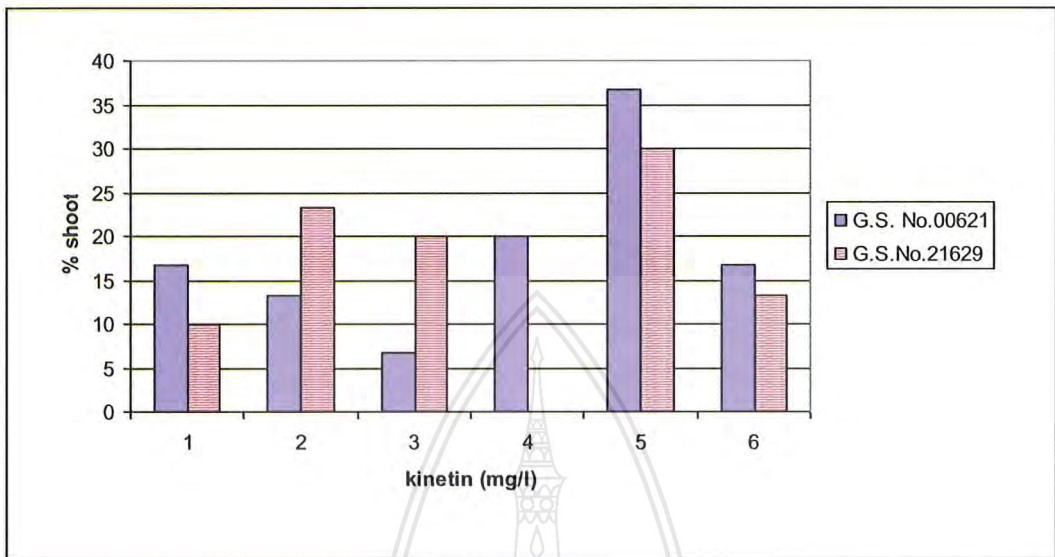
ฮอร์โมน 2,4-D เป็นฮอร์โมนในกลุ่มออกซินที่นิยมใช้และมีประสิทธิภาพสูงในการชักนำคัพพะข้าวให้สร้างแคลลัส มีคุณสมบัติในการยับยั้งการเกิดยอด มีผลในการกระตุ้นการสร้างโปรตีนกรดนิวคลีอิกเพื่อใช้ในการแบ่งเซลล์จำนวนมากและเซลล์สามารถขยายขนาดกลายเป็นก้อนแคลลัสได้ โดยความเข้มข้นของ 2,4-D ที่เหมาะสมต่อการชักนำคัพพะข้าวจะ



รูปที่ 4 ลักษณะการเกิดยอดของข้าวพันธุ์ G.S. No. 00621 บนอาหาร MS ที่เติมไคนิตินความเข้มข้นต่างกัน



รูปที่ 5 ลักษณะการเกิดยอดของข้าวพันธุ์ G.S. No. 21629 บนอาหาร MS ที่เติมไคนิตินความเข้มข้นต่างกัน



รูปที่ 6 ร้อยละการเกิดยอดข้าวเหนียวดำพันธุ์ G.S. No. 21629 และพันธุ์ G.S. No. 00621 ในอาหารสูตร MS

แตกต่างกันในข้าวแต่ละพันธุ์ และในการทดลองนี้พบว่าเมล็ดข้าวเหนียวดำพันธุ์ G.S. No. 00621 และพันธุ์ G.S. No. 21629 ที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS ที่เติม 2,4-D ความเข้มข้น 3-4 มิลลิกรัม/ลิตร มีการเกิดแคลลัสได้ร้อยละ 73- 90 ในขณะที่การทดลองของ พรณี รอดแรงบุญ และ นาริรัตน์ มุลใจ (2540) รายงานการเพาะเลี้ยงข้าวเหนียว 5 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ก้านตาล พันธุ์ข้าวดอก พันธุ์ดินเต่า พันธุ์นางคำ และพันธุ์อู๊ดี้ บนอาหาร MS ที่เติมฮอร์โมน 2,4-D ความเข้มข้น 2-4 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถชักนำให้เป็นแคลลัสได้ร้อยละ 51-83 และมีรายงานการเพาะเลี้ยงข้าวในอาหารที่เติม 2,4-D ความเข้มข้น 2-3 มิลลิกรัม/ลิตร เหมาะสมในการชักนำเมล็ดข้าวพันธุ์ต่างๆ ให้เกิดแคลลัสได้ เช่น พันธุ์นางมละส-4 ข้าวดอกมะลิ 105 ข้าวพันธุ์ Bg 94-1 (สุริยินทร์ ฉะอุ่ม และคณะ, 2540; ประภา ศรีพิจิตร และ พรทิพย์ ชิวเศรษฐธรรม, 2537; Darshan et al., 1991)

ในการทดลองชักนำให้แคลลัสพัฒนาเป็นต้นนั้น ได้ใช้แคลลัสที่มาจากอาหารที่เพาะเลี้ยงในอาหารสูตรชักนำแคลลัสที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 ของข้าว

พันธุ์ G.S. No. 00621 และพันธุ์ G.S. No. 21629 อายุ 3 สัปดาห์ มาเพาะเลี้ยงในอาหารสูตร MS คัดแปลงที่เติมไคนิติน โดยอาหารที่เติมไคนิติน ความเข้มข้นต่างๆ กันมีผลต่อการชักนำแคลลัสให้เกิดขึ้นที่ต่างกัน และอาหารที่สามารถชักนำให้แคลลัสข้าวพันธุ์ G.S. No. 00621 และพันธุ์ G.S. No. 21629 เจริญเป็นต้นได้ดีที่สุดในการทดลองนี้ คือ อาหารสูตร MS ที่เติมไคนิตินความเข้มข้น 4 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมีร้อยละการเกิดต้นเท่ากับ 36.66 และ 30.00 ตามลำดับ ฮอร์โมนไคนิตินเป็นฮอร์โมนในกลุ่มไซโตไคนินสังเคราะห์ ซึ่งฮอร์โมนกลุ่มนี้มีผลต่อการแบ่งเซลล์ ช่วยการเจริญของตาข้าง การเกิดและการเจริญของต้น การเติมไซโตไคนินลงไปในการเพาะเลี้ยงก็เพื่อช่วยให้กระตุ้นการแบ่งเซลล์และการเปลี่ยนแปลงไปเป็นหน่อเล็ก (adventitious shoot) จากส่วนของแคลลัสหรืออวัยวะที่เพาะเลี้ยง (บุญยืน กิจวิจารณ์, 2544) มีรายงานว่า ไซโตไคนินส่งเสริมการแบ่งเซลล์ในพืชเนื่องจากทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเซลล์จากระยะ G2 ไปสู่ระยะไมโทซิสเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มอัตราการสร้างโปรตีน (Fosket, 1977) และความเข้มข้นของ

โคไนตินที่เหมาะสมกับการชักนำแคลสตีไฟเจริญเป็นต้น คือ โคไนตินความเข้มข้น 4 มิลลิกรัม/ลิตร ในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ คือพันธุ์ G.S. No. 00621 และพันธุ์ G.S. No. 21629 โดยมีร้อยละการเกิดต้นเท่ากับ 36.66 และ 30.00 ตามลำดับ

พรรณี รอดแรงบุญ และ นารีรัตน์ มูลใจ (2540) รายงานการชักนำแคลสตีฟวเนียว 5 พันธุ์ ในอาหารสูตร MS ที่เติมโคไนตินความเข้มข้น 1-3 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมีร้อยละการเกิดต้นเท่ากับ 35-75 ส่วนข้าวพันธุ์ กข.15 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 เกิดต้นได้ดีในอาหารสูตร MS ที่เติมโคไนติน 2 มิลลิกรัม/ลิตร (เผด็จ ระติสุนทร, 2536; สุรินทร์ ปิยะโชคณากุล และคณะ, 2537) และจากการทดลองนี้ พบว่านอกจากชักนำให้แคลสตีฟพัฒนาเป็นต้นแล้วยังมีรากเกิดขึ้นอีกด้วย ทำให้ได้ต้นที่สมบูรณ์ขึ้น ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากในขั้นตอนการชักนำให้เกิดแคลสตีฟนั้น ได้ทำการเพาะเลี้ยงในอาหารที่เติมสารในกลุ่มออกซิน คือ 2,4-D ซึ่งสามารถชักนำให้เกิดรากได้ ทำให้ได้ต้นที่สมบูรณ์ และในการชักนำแคลสตีฟให้พัฒนาเป็นต้นนั้น พบว่ามีร้อยละการเกิดเป็นต้นต่ำ อาจเนื่องมาจากชนิดของฮอร์โมนหรือสัดส่วนของฮอร์โมนยังไม่เหมาะสมกับชนิดของข้าว ดังนั้นก่อนที่จะชักนำยอดควรที่จะเลี้ยงแคลสตีฟในอาหารที่ไม่มีฮอร์โมนก่อน เพื่อให้พืชปรับสมดุลของออกซินต่อไซโตไคนินที่เหมาะสมกับการเกิดยอด หรือเพิ่มกรดอะมิโนที่จำเป็นบางชนิด ได้แก่ L-proline, L-tryptophan (Chowdhry et al., 1993).

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช) ทุนอุดหนุนทั่วไป ปีงบประมาณ 2552 มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ปรเมศ บันเทิง สาขาวิชาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สำหรับเมล็ดพันธุ์ข้าวเหนียวดำ ขอขอบคุณภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และสาขาวิชาชีววิทยา สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

สุรนารีที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการทำวิจัยและผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในโครงการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- รัชชัย แฉวถาทำ. (2547). ผลของแกมมา-โอไรซานอลต่อการตอบสนองของภูมิคุ้มกันในหนูถีบจักรเพศผู้. วารสารเกษตรศาสตร์ มข 20(2): 103-109.
- บุญยืน กิจวิจารณ์. (2544). เทคโนโลยีการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช. ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 168 หน้า.
- ประดิษฐ์ พงศ์ทองคำ, รัตน์ดา เลิศวิชัย, สมศักดิ์ อภิสิทธิ์วานิช, สุรินทร์ ปิยะโชคณากุล, กาญจนา กล้าแจ้ง, ประภา ศรีพิจิตต์, ณรงค์ สิงห์บุระอุดม, สุพจน์ เพื่องฟูพงศ์ และ พิรศักดิ์ ศรีนิเวศน์. (2538). การเพาะเลี้ยงอับเรณูของข้าวลูกผสม (ขาวดอกมะลิ 105/สไลบอนเนท). วารสารเกษตรศาสตร์ (วิทย.) 29(2): 158-166.
- ประภา ศรีพิจิตต์ และ พรทิพย์ ชิวเศรษฐธรรม. (2537). การพัฒนาไปเป็นต้นของแคลสตีฟเจริญมาจากเอ็มบริโอของข้าวหอม (*Oryza sativa* L.) พันธุ์ขาวดอกมะลิ. วารสารเกษตร (วิทย.) 28: 27-37.
- เผด็จ ระติสุนทร, ประดิษฐ์ พงศ์ทองคำ, เสาวนีย์ สุพุทธิธาดา และ สุพรรณิ แก่นสาร. (2532). การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อข้าวพันธุ์ปทุมมา 370. วารสารเกษตรศาสตร์(วิทย.) 23(3): 205-215.
- พันทิพา พงษ์เพียจันทร์. (2547). ผลของแกมมาโอไรซานอลต่อการตอบสนองของภูมิคุ้มกันในหนูถีบจักรเพศผู้. วารสารเกษตร. 20 (2) : 103-110.
- พรรณี รอดแรงบุญ และ นารีรัตน์ มูลใจ. (2540). การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อข้าวเหนียวพันธุ์ต่างๆ ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

45 หน้า.

- สุรินทร์ ปิยะโชกนากุล, ประดิษฐ์ พงษ์ทองคำ, เพลิม ระติสุนทร, เสาวนีย์ สุพุทธิธาดา, เลิศลักษณ์ เงินศิริ และ พรณี รอดแรงบุญ. (2537). การเพาะเลี้ยงข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในสภาพปลอดเชื้อ. วารสารเกษตร (วิทย์.). 28: 92-98.
- สุริยันตร์ ละอุม, ศรีสม สุวัฒนนานนท์, กมลพรรณ นามวงศ์พรหม และ เกลิมชัย วงศ์วัฒน์. (2540). การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อข้าวพันธุ์นางมลเอส-4. วารสารเกษตรศาสตร์ (วิทย์.) 31(2): 116-174.
- Chowdhry, C.N., TYagi, A.K., Maheshwari, N. and Maheshwari SC. (1993). Effect of L- proline and L- tryptophan somatic embryogenesis and plantlet regeneration of rice (*O. sativa* L. cv. Pusa 169). Plant Cell Tissue and Organ Culture. 32: 357-361.
- Chu, C.C., Wang, C.C., Sun, C.S., Hsu, C., Yin, K.C., Chu, C.Y. and Bi, F.Y. (1975). Establishment of an high-frequency medium for anther culture of rice, through comparative experiments on the nitrogen sources. Scientia Sinica. 18: 659-66.
- Cicero, A.F.G. and Gaddi, A. (2001). Rice bran oil and γ -oryzanol in the treatment of hyperlipoproteinemias and other conditions. Phytotherapy Research. 15:277-289.
- Darshanie, P.R., Mendish, M.H. and Jayawaardene, S.D.G. (1991). Estapbishment of callus culture in Bg-94-1: a commercially cultivate rice in Sri LanKa. Journal of the National Science Council of Sri LanKa. 19: 163-170.
- Fosket. (1977). Cytokinin-induced mitosis in cultured explants of *Helianthus tuberosus* L. tuber tissue. Journal of Plant Physiology. 11(2): 1-6.
- Gu, D. and Xu, M. (1992). A study of special nutrient of purple black glutinous rice. Scientia Agricultural Sinica. 25: 36-41.
- Ichikawa, H., Ichianagi, T., Xu, B., Yoshii, Y., Nakajima, M. and Konishi, T. (2001). Antioxidant activity of anthocyanin extract from purple black rice. Journal of medicinal. 4(4): 211-218.
- Murashige, T. and Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bioassay with tobacco tissue culture. Physiology of Plant. 15: 474-497.
- Xiaodong, X., Wenhua, L., Jing, M., Min, X., Mengjun, H., Qing, W., Huilian, Z. and Zhihong, T. (2006). An anthocyanin-rich extract from black rice enhances atherosclerotic plaque stabilization in apolipoprotein E-deficient mice. Journal Nutrition. 36: 2220-2225.
- Xu, Z. and Godber, J.S. (1999). Purification and identification of components of gamma-oryzanol in rice bran oil. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 47: 2724-2728.
- Xu, Z., Hua, N. and Godber, J.S. (2001). Antioxidant activity of tocopherols, tocotrienols, and gamma-oryzanol components from rice bran against cholesterol oxidation accelerated by 2,2'-azobis (2-methylpropionamide) dihydrochloride. Journal of Agricultural and Food Chemistry. (4): 2077-81.





ผลของภาชนะบรรจุและการเก็บรักษาต่อคุณค่า ทางโภชนาการของน้ำเม่าผสมน้ำสับปะรด

Effects of Package and Storage on Nutritive Values of Mao and Pineapple Juices

พรประภา ชุนถนอม¹ และ สุกัญญา สายธิ^{1*}

บทคัดย่อ

การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบน้ำเม่าผสมน้ำสับปะรดในอัตรา 1:0, 1:1, 1:2, 1:4, 2:1 4:1 และ 0:1 มาวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัสเพื่อคัดเลือกสูตรที่เหมาะสมต่อการแปรรูปน้ำผลไม้พร้อมดื่มโดยใช้ผู้ทดสอบที่ฝึกฝนแล้ว จำนวน 15 คนทดสอบแบบเฮโดนิค (1-9 คะแนน) พบว่า อัตราส่วนน้ำเม่าต่อน้ำสับปะรด 1:2 เหมาะสมที่สุดเนื่องจากให้กลิ่นดีกว่าน้ำเม่า (อัตรา 1:0) และน้ำสับปะรด (อัตรา 0:1) อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ให้รสชาติและความชอบโดยรวมไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากน้ำเม่า ($p > 0.05$) เมื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการของน้ำเม่ากับน้ำเม่าผสมน้ำสับปะรดบรรจุในขวดแก้วใสขนาด 250 มิลลิลิตร พบว่า น้ำเม่าผสมน้ำสับปะรดให้พลังงาน คาร์โบไฮเดรต (รวมใยอาหาร) น้ำตาลและโซเดียมน้อยกว่าน้ำเม่า แต่มีปริมาณความชื้นมากกว่าน้ำเม่า เมื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์น้ำเม่าผสมน้ำสับปะรดบรรจุในขวดแก้วและกระป๋องขนาดเท่ากัน พบว่า ผลิตภัณฑ์บรรจุกระป๋องให้พลังงาน คาร์โบไฮเดรต น้ำตาล และวิตามินบี₂ มากกว่าขวดแก้ว โซเดียมและเหล็กมีปริมาณเท่ากัน เมื่อเก็บรักษาผลิตภัณฑ์บรรจุกระป๋องนาน 8 เดือนที่อุณหภูมิห้อง ไม่พบจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์-ราเกินเกณฑ์มาตรฐาน มผช.(486/2547) ตลอดอายุการเก็บรักษา และศึกษาคุณค่าทางโภชนาการเปรียบเทียบก่อนและหลังการเก็บรักษา พบว่า วิตามินบี₂ และความชื้นมีปริมาณลดลง แต่ไม่พบวิตามินซีในผลิตภัณฑ์ทุกตัวอย่าง

¹ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตคลองหลวง 47160

* Corresponding Author, E-mail: wongfthun@yahoo.com

Abstract

A study was aimed to mix Mao juice with 7 different pineapple juices at ratios: 1:0, 1:1, 1:2, 1:4, 2:1, 4:1 and 0:1 to evaluate an appropriate ratio for the further process. Fifteen trained-panelists were used for Hedonic scale (1-9 point) sensory evaluation. The best ratio of Mao juice to pineapple juice mixture was 1: 2. The odor of mixture product was better than Mao juice (1:0) and pineapple juice (0:1) ($p \leq 0.05$) but the taste, color and overall liking were not different from Mao juice ($p > 0.05$). Nutritive value evaluation compared between mixture juice and Mao juice in clear-glass bottle (250 ml.) including energy, carbohydrate content (including fiber), sugar, sodium, vitamin B₁, vitamin B₂, calcium, iron, ash and moisture content was studied. It was found that energy, carbohydrate, sugar and sodium content of mixture juice was less than Mao juice but moisture content was higher than Mao juice. The effect of packaging (clear glass-bottle and tin-can; 250 ml.) on nutritional value of mixture product was studied. It was found that energy, carbohydrate, sugar and vitamin B₂ content in canned product was higher than those in glass bottle. Sodium and iron content were similar. Based on microbiological quality, total plate count as well as yeasts and moulds count in mixture product was not present in all samples, which less than those recommended in the Thai Community Product Standard (486/2004). It was found that vitamin B₂ and moisture content of canned juice which is stored at room temperature for 8 months were lower than initial. However, vitamin C contents of all samples were disappeared.

คำสำคัญ: เม่า สับปะรด น้ำผลไม้ คุณค่าทางโภชนาการ การเก็บรักษา

Keywords : Mao, Pineapple, Juice, Nutritive value, Storage

คำนำ

น้ำผลไม้เป็นเครื่องดื่มที่ในปัจจุบันเป็นที่นิยมของผู้บริโภคทั่วไปและมีคุณค่าทางโภชนาการต่อร่างกาย เป็นแหล่งของแร่ธาตุและวิตามิน ประเทศไทยมีการปลูกพืชผลทางการเกษตรมากมายหมุนเวียนกันตลอดปี และมีพืชที่มีคุณสมบัติที่ดีในการผลิตเป็นน้ำผลไม้ น้ำผลไม้ที่จำหน่ายอยู่ในปัจจุบันส่วนมากจะเป็นน้ำผลไม้กระป๋องหรือน้ำผลไม้บรรจุกล่อง ซึ่งมีราคาแพงกว่าน้ำผลไม้บรรจุขวดพลาสติกพร้อมดื่ม การผลิตน้ำผลไม้ที่ใช้ความร้อนในการฆ่าเชื้อต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส จะทำลายแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรค (pathogenic microorganisms) และแบคทีเรียที่ไม่สร้างสปอร์และช่วยลดปริมาณแบคทีเรียอื่นที่ไม่ทนต่อความร้อน การผลิตน้ำผลไม้พร้อมดื่มเป็นธุรกิจที่

สามารถทำได้ในระดับครัวเรือนหรือระดับอุตสาหกรรม ขนาดย่อมไปจนถึงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ เครื่องมือและภาชนะบรรจุที่เหมาะสม

เม่า มะเม่า หมากเม่า หรือเม่าหลวง (*Antidesma bunius*) เป็นไม้ผลยืนต้นท้องถิ่นในตระกูลเม่า (*Stilaginaceae*) ผลอ่อนมีสีเขียว รสฝาดเปรี้ยว เมื่อสุกจะเปลี่ยนเป็นสีแดงและดำ มีรสเปรี้ยว ฝาดและหวาน น้ำคั้นที่ได้จากผลสุกเป็นสีม่วงแดงเข้ม ซึ่งเป็นสีของ anthocyanin เม่ามีความเหมาะสมต่อการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องดื่ม เช่น ไวน์เม่าและน้ำเม่าพร้อมดื่ม เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เม่าสุกประกอบด้วย ความชื้น 76.60 กรัม โปรตีน 0.63 กรัม ไขมัน 0.09 กรัม เส้นใย 0.79 กรัม เถ้า 0.93 กรัม คาร์โบไฮเดรต 17.96 กรัม พลังงาน 75.20 กิโลแคลอรี

แคลเซียม 13.30 มิลลิกรัม เหล็ก 0.44 มิลลิกรัม สังกะสี 0.26 มิลลิกรัม วิตามินบี₁ 4.50 ไมโครกรัม วิตามินบี₂ 0.03 ไมโครกรัม วิตามินอี 0.38 หน่วยสากลต่อ 100 กรัม (อร่าม คุ่มกลาง และ วินัย แสงแก้ว, 2542)

ปัจจุบันการผลิตน้ำเมาพร้อมดื่มมีการขยายตัวอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะในกลุ่มวิสาหกิจชุมชน แต่ต้นทุนการผลิตน้ำเมาพร้อมดื่มมีราคาสูงขึ้นเนื่องจากตลาดมีความต้องการเม่าในปริมาณมากขึ้น การนำผลไม้ชนิดอื่นที่หาได้ง่าย มีราคาถูกและมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เช่น สับปะรด มาผสมกับน้ำเม่า น่าจะเป็นทางเลือกใหม่ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำผลไม้ และเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มราคาผลิตผลที่มีราคาตกต่ำแก่เกษตรกร ก่อให้เกิดการเสถียรภาพของราคาผลิตผลทางการเกษตรที่มักจะประสบปัญหาการล้นตลาด และผู้บริโภคยังจะได้ประโยชน์จากสารอาหารจากธรรมชาติของน้ำผลไม้ที่มีคุณค่าทางโภชนาการที่ดีขึ้นอีกด้วย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมของผลิตภณัฒ์น้ำเม่าผสมน้ำสับปะรด ศึกษาเปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภณัฒ์บรรจุขวดแก้ว คัดเลือกภาชนะบรรจุและกระบวนการแปรรูปที่เหมาะสม และศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภณัฒ์

อุปกรณ์และวิธีการ

น้ำเม่าผสมน้ำสับปะรดพร้อมดื่มได้ดัดแปลงสูตรมาจากกรรมวิธีการผลิตน้ำผลไม้พร้อมดื่มของคณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร ซึ่งมีส่วนประกอบคือ น้ำผลไม้ ร้อยละ 25 ปริมาณกรดทั้งหมดร้อยละ 0.5 (เทียบกับกรดซิตริก) และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ 14 องศาบริกซ์ โดยมีกรรมวิธีการผลิตคือ นำผลไม้สุกคละปั่นรุ่มาล้างน้ำ คั้นน้ำเม่า กรองผ่านผ้าขาวบาง โดยน้ำเม่าสดที่ได้ต้องมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้มากกว่า 15 องศาบริกซ์ ส่วนน้ำสับปะรดเตรียมโดยนำสับปะรดสุกพันธุ์ปัตตาเวียล้างน้ำ ปอกเปลือก แกะตา สับเนื้อเป็นชิ้นเล็ก ปั่น

ให้ละเอียด คั้นน้ำ กรอง และนำสับปะรดสดที่ได้ต้องมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้มากกว่า 12 องศาบริกซ์ ผสมน้ำผลไม้ร้อยละ 25 ในน้ำสับปะรด ตรวจวัดปริมาณกรดและของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ปรับปริมาณกรดเป็นร้อยละ 0.5 ด้วยการเติมกรดซิตริก ปรับปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้เป็น 14 องศาบริกซ์ด้วยการเติมน้ำตาลทรายขาว คั้นที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที บรรจุในขวดแก้วขณะร้อน (hot filling) ปิดฝาจีบ กลับขวดแก้วทิ้งไว้ นาน 1 นาที ทำให้เย็น โดยได้ดัดแปลงมาจากวิธีการของดร.ินญา เสนากุล และคณะ (2547) ซึ่งดัดให้ ความร้อนแก่น้ำเม่าไม่เกิน 85 องศาเซลเซียส บรรจุขวดแก้ว ปิดฝา ทิ้งไว้ 10 นาที แล้วทำให้เย็น หรือหากบรรจุในกระป๋องให้ดื่มมาซื้อค่อที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และทำให้เย็นทันที โดยใช้กระป๋องเคลือบแลคเกอร์ประเภททนกรด

การวางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ นำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ความแปรปรวน Analysis of Variance (ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวอย่างด้วยวิธี Tukey's test โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab version 14

1. คัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมของน้ำเม่าผสมน้ำสับปะรด

โดยเตรียมน้ำเม่าผสมน้ำสับปะรดในอัตรา 1:0 1:1 1:2 1:4 2:1 4:1 และ 0:1 และผลิตตามกรรมวิธีการผลิตน้ำเม่าพร้อมดื่มของคณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร นำผลิตภณัฒ์บรรจุขวดแก้วขนาด 250 มิลลิลิตร ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสเพื่อคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสม

2. ศึกษาเปรียบเทียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภณัฒ์บรรจุขวดแก้ว

นำน้ำเม่าผสมน้ำสับปะรดที่ผ่านการคัดเลือกหาอัตราส่วนที่เหมาะสม และน้ำเม่า บรรจุในขวดแก้ว ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการ

3. คัดเลือกภาชนะบรรจุและกระบวนการแปรรูปที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์น้ำเม่าผสมน้ำสับปะรด นำน้ำเม่าผสมน้ำสับปะรดที่ผ่านการคัดเลือกหาอัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วมาบรรจุในขวดแก้วและกระป๋อง ขนาด 250 มิลลิลิตร ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการ

4. ศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์น้ำเม่าผสมน้ำสับปะรด

นำผลิตภัณฑ์บรรจุในภาชนะที่ผ่านการคัดเลือกแล้ว เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (20-35 องศาเซลเซียส) นาน 8 เดือน สุ่มตรวจสอบคุณภาพทางด้านจุลชีววิทยาทุกเดือน เดือนละ 2 ครั้ง จนกว่าน้ำผลไม้จะเสื่อมคุณภาพทางด้านจุลชีววิทยา หากผลิตภัณฑ์ยังคงคุณภาพทางด้านจุลชีววิทยาให้ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการ

การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส นำผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้พร้อมดื่มมาประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสแบบคะแนนความชอบ (hedonic score) (Meilgaard et al., 1990) ได้แก่ สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม ใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนแล้ว (trained panel) จำนวน 15 คน โดยให้คะแนนความชอบ 1-9 point scaling (1= ไม่ชอบมากที่สุด และ 9= ชอบมากที่สุด)

การประเมินคุณค่าทางโภชนาการ นำผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้พร้อมดื่มที่ผลิต จำนวน 3 ขวด สุ่มแบบไม่เจาะจง (random sampling) จำนวน 13 ตัวอย่าง เตรียมตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกัน รวมเป็น 1 ตัวอย่าง ประเมินคุณค่าทางโภชนาการต่ออาหาร 100 มิลลิลิตร ของน้ำผลไม้โดยสถาบันวิจัยโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล

การวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยา นำผลิตภัณฑ์มาวิเคราะห์คุณภาพทางจุลชีววิทยา ได้แก่ จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์และรา (AOAC, 2000) โดยผลิตภัณฑ์

ต้องมีปริมาณยีสต์และรำน้อยกว่า 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน น้ำมะเม่า (มพช. 48)

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. การคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำเม่าผสมน้ำสับปะรด

ผลการประเมินทางประสาทสัมผัสโดยให้คะแนนความชอบแบบ hedonic scale test ของผลิตภัณฑ์น้ำเม่าผสมน้ำสับปะรดชนิดพร้อมดื่มบรรจุขวดแก้ว ที่มีอัตราส่วนน้ำเม่าต่อน้ำสับปะรดเป็น 1:0 1:1 1:2 1:4 2:1 4:1 และ 0:1 (ตารางที่ 1) พบว่าน้ำเม่าได้คะแนนค่าสถิติที่สุด (7.80; ชอบปานกลาง-ชอบมาก) แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) กับน้ำเม่าผสมน้ำสับปะรดอัตราส่วน 1:1 1:2 2:1 และ 4:1 กลิ่นของน้ำเม่าผสมน้ำสับปะรดอัตราส่วน 1:2 ได้คะแนนดีที่สุด (7.30; ชอบปานกลาง-ชอบมาก) แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) กับอัตราส่วน 1:1 1:4 และ 4:1 รสชาติของน้ำเม่าและน้ำเม่าผสมน้ำสับปะรดอัตราส่วน 1:2 ได้คะแนนมากที่สุด (7.67 คะแนน และ 7.45 คะแนน ตามลำดับ; ชอบปานกลาง-ชอบมาก) แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) กับอัตราส่วน 1:4 2:1 4:1 และน้ำสับปะรดความชอบโดยรวมของน้ำเม่าได้คะแนนมากที่สุด (7.80 คะแนน; ชอบปานกลาง-ชอบมาก) แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) กับน้ำเม่าผสมน้ำสับปะรดอัตราส่วน 1:2

น้ำเม่าผสมน้ำสับปะรด 1:2 จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้กลิ่นดีกว่าน้ำเม่าและน้ำสับปะรด ให้รสชาติดีใกล้เคียงกับน้ำเม่าให้สีและความชอบโดยรวมไม่แตกต่างจากน้ำเม่า

2. การศึกษาเปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์บรรจุขวดแก้ว

นำน้ำเม่าผสมน้ำสับปะรดในอัตรา 1:2 และน้ำเม่ามาบรรจุในขวดแก้วขนาด 250 มิลลิลิตร

ตารางที่ 1 ผลการประเมินทางประสาทสัมผัสของน้ำแม่ผสมน้ำสับปะรดตามอัตราส่วนต่างกันบรรจุขวดแก้ว

น้ำผลไม้	ผลการประเมินทางประสาทสัมผัส			
	สี	กลิ่น	รสชาติ	ความชอบโดยรวม
น้ำแม่	7.80±0.42 ^a	6.47±0.04 ^b	7.67±0.24 ^a	7.80±0.14 ^a
น้ำแม่: น้ำสับปะรด 1:1	6.95±0.35 ^{ab}	6.80±0.14 ^{ab}	5.80±0.28 ^b	6.25±0.07 ^b
น้ำแม่: น้ำสับปะรด 1:2	7.15±0.21 ^{ab}	7.30±0.42 ^a	7.45±0.21 ^a	7.20±0.28 ^{ab}
น้ำแม่: น้ำสับปะรด 1:4	6.40±0.14 ^b	6.65±0.21 ^{ab}	6.70±0.57 ^{ab}	6.75±0.35 ^b
น้ำแม่: น้ำสับปะรด 2:1	7.05±0.21 ^{ab}	6.50±0.07 ^b	6.25±0.35 ^{ab}	6.40±0.42 ^b
น้ำแม่: น้ำสับปะรด 4:1	7.00±0.28 ^{ab}	6.85±0.07 ^{ab}	6.80±0.14 ^{ab}	6.90±0.14 ^b
น้ำสับปะรด	6.20±0.28 ^b	6.40±0.14 ^b	6.40±0.57 ^{ab}	6.53±0.04 ^b

ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean±SD) กำกับด้วยอักษรที่ต่างกันในแนวดิ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05)

ประเมินคุณค่าทางโภชนาการต่ออาหาร 100 มิลลิตร (ตารางที่ 2) พบว่า น้ำแม่ผสมน้ำสับปะรดอัตรา 1:2 ให้ปริมาณพลังงาน คาร์โบไฮเดรต (รวมใยอาหาร) น้ำตาลและโซเดียมน้อยกว่าน้ำแม่แต่มีปริมาณความชื้นมากกว่าน้ำแม่ ส่วนปริมาณวิตามินบี₁ (ไทอะมิน) แคลเซียม เหล็กและเถ้ามีปริมาณเท่ากัน น้ำแม่ผสมน้ำสับปะรดจึงน่าจะจัดเป็นเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพ เนื่องจากให้คุณค่าทางโภชนาการไม่แตกต่างจากน้ำแม่ แต่ตรวจไม่พบวิตามินบี₂ (ไรโบฟลาวิน) และวิตามินซีในผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิด ความร้อนจากขั้นตอนการฆ่าเชื้อมีผลทำลายวิตามินซี และเกิดการเสื่อมสลายเนื่องจากการใช้ความร้อนสูงเป็นระยะเวลานาน ซึ่ง Fellow (1997) กล่าวว่าวิตามินซีถูกทำลายได้ด้วยอากาศหรือออกซิเจน เอนไซม์ แสง ทองแดง เหล็กและความร้อน ส่วนวิตามินบี₂ ถูกทำลายด้วยแสง (Ball, 2006) เนื่องจากผลิตภัณฑ์บรรจุในขวดแก้วใส

ตารางที่ 2 ผลการประเมินคุณค่าทางโภชนาการของน้ำแม่และน้ำแม่ผสมน้ำสับปะรดบรรจุขวดแก้ว

คุณค่าอาหารต่อ 100 มิลลิตร	หน่วย	น้ำแม่ผสมน้ำสับปะรด 1:2	น้ำแม่
พลังงาน	กิโลแคลอรี	61	67
คาร์โบไฮเดรต (รวมใยอาหาร)	กรัม	15.4	16.9
น้ำตาล	กรัม	14.8	15.3
โซเดียม	มิลลิกรัม	2	6
วิตามินบี ₁	มิลลิกรัม	0.11	0.11
วิตามินบี ₂	มิลลิกรัม	ตรวจไม่พบ	ตรวจไม่พบ
แคลเซียม	มิลลิกรัม	4	4
เหล็ก	มิลลิกรัม	0.1	0.1
วิตามินซี	มิลลิกรัม	ตรวจไม่พบ	ตรวจไม่พบ
เถ้า	กรัม	0.2	0.2
ความชื้น	กรัม	91.3	89.6

3. การคัดเลือกภาชนะบรรจุและกระบวนการแปรรูปที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์น้ำเฝ้าผสมน้ำสับปะรด

เมื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการของน้ำเฝ้าผสมน้ำสับปะรดอัตรา 1: 2 บรรจุในขวดแก้วและกระป๋อง เพื่อศึกษาชนิดภาชนะบรรจุและกระบวนการแปรรูปที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ ได้ผลดังตารางที่ 3 พบว่า ปริมาณพลังงานคาร์โบไฮเดรต น้ำตาล และวิตามินบี₂ ของผลิตภัณฑ์บรรจุขวดแก้วมีปริมาณน้อยกว่าบรรจุกระป๋อง แม้ว่าปริมาณโซเดียมและเหล็กมีปริมาณเท่ากันในผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิด แต่วิตามินบี₁ แคลเซียม เถ้า และความชื้นของผลิตภัณฑ์บรรจุในขวดแก้วจะสูงกว่าที่บรรจุในกระป๋อง และตรวจไม่พบวิตามินซีในผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิด ผลิตภัณฑ์บรรจุกระป๋องมีการให้ความร้อนนานมากกว่าขวดแก้ว กล่าวคือให้ความร้อนก่อนการบรรจุ ไล่อากาศก่อนปิดฝาและฆ่าเชื้อหลังบรรจุ ส่วนขวดแก้วมีการต้มให้ความร้อนแล้วบรรจุลงขวดแก้วขณะร้อนทันที จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในกระป๋องมีพลังงานคาร์โบไฮเดรตและน้ำตาลมากกว่า และมีความชื้นน้อยกว่าในขวดแก้ว เนื่องจากให้ความร้อนนานกว่าจึงทำให้ความชื้นลดลงและน้ำตาลมีความเข้มข้นมากขึ้น แล้วทำให้คาร์โบไฮเดรตและพลังงานมากขึ้นด้วย จากการศึกษาพบว่า โซเดียมและเหล็กมีความคงตัวต่อความร้อน สอดคล้องกับ อรอนงค์ นัยวิกุล และ กมลทิพย์ มั่นภักดี (2538) ซึ่งกล่าวว่าแร่ธาตุต่างๆ มักจะมีความคงทนต่อสภาพการแปรรูปได้ดีกว่าสารอาหารอื่นๆ เนื่องจากในการศึกษานี้ไม่พบความแตกต่างระหว่างผลิตภัณฑ์ที่ให้ความร้อนต่างกัน แต่พบว่า แคลเซียมในผลิตภัณฑ์บรรจุขวดแก้วสูงกว่าในกระป๋อง ซึ่งแคลเซียมอาจไม่คงตัวต่อการให้ความร้อนสูงเป็นระยะเวลานาน วิไล รังสาทอง (2543) กล่าวว่า การให้ความร้อนที่รุนแรงก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางโภชนาการ และไม่พบวิตามินซีในผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิด การให้ความร้อนในกระป๋องยาวนานกว่าในขวดแก้วจึงทำให้ปริมาณ

วิตามินบี₁ ลดลงมากกว่า สอดคล้องกับ อรอนงค์ นัยวิกุล และ กมลทิพย์ มั่นภักดี (2538) ที่ได้กล่าวว่า ผลิตภัณฑ์เมื่อผ่านความร้อนจะทำให้ปริมาณวิตามินซีและวิตามินบี₁ ลดลง ส่วนปริมาณวิตามินบี₂ ของผลิตภัณฑ์บรรจุกระป๋องมีปริมาณมากกว่าบรรจุขวดแก้ว ซึ่งมีปริมาณน้อยมากจนตรวจไม่พบ เนื่องจากวิตามินบี₂ เสื่อมสลายง่ายด้วยแสง (Ball, 2006) การบรรจุด้วยกระป๋องที่บีบแสงจึงป้องกันการสูญเสียได้ดีกว่าขวดแก้วใส ซึ่งการสูญเสียสารอาหารระหว่างการแปรรูปนี้จะแปรผันตามวิธีการแปรรูป สภาพะในการแปรรูปและอุปกรณ์ที่ใช้ (นิธิยา รัตนพานนท์, 2544) ดังนั้นผลิตภัณฑ์บรรจุในกระป๋องจึงเหมาะสมกว่าขวดแก้ว เนื่องจากให้คุณค่าทางโภชนาการครบมากกว่าบรรจุขวดแก้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งการบรรจุในกระป๋องสามารถรักษาปริมาณวิตามินบี₂ ได้ดีกว่าการบรรจุในขวดแก้ว แม้ว่าการบรรจุกระป๋องจะมีกระบวนการให้ความร้อนนานมากกว่าก็ตาม

4. การศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์น้ำเฝ้าผสมน้ำสับปะรด

การศึกษอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์บรรจุในบรรจุกระป๋อง เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (20-35 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลานาน 8 เดือน ซึ่งเป็นระยะเวลาที่น้ำเฝ้าส่วนใหญ่จำหน่ายหมด ตรวจสอบคุณภาพทางด้านจุลชีววิทยา และศึกษาคุณค่าทางโภชนาการเปรียบเทียบก่อนและหลังการเก็บรักษา

4.1 การเปลี่ยนแปลงทางด้านจุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์

การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิห้อง ไม่พบจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์-ราเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำเฝ้า (มพข. 486/2547) ตลอดอายุการเก็บรักษา สอดคล้องกับครินญา เสนากุล (2547) ซึ่งได้รายงานว่าน้ำเฝ้าเก็บบรรจุขวดแก้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง นาน 90 วัน ไม่พบปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด โคลิฟอร์มแบคทีเรีย *E. coli* และยีสต์-รา

ตารางที่ 3 ผลการประเมินคุณค่าทางโภชนาการของน้ำเฝ้าผสมน้ำสับประคบบรรจุขวดแก้วและกระป๋อง

คุณค่าอาหารต่อ 100 มิลลิลิตร	หน่วย	ลักษณะบรรจุ	
		ขวดแก้ว	กระป๋อง
พลังงาน	กิโลแคลอรี	61	68
คาร์โบไฮเดรต (รวมใยอาหาร)	กรัม	15.4	17.1
น้ำตาล	กรัม	14.8	16.8
โซเดียม	มิลลิกรัม	2	2
วิตามินบี ₁	มิลลิกรัม	0.11	0.06
วิตามินบี ₂	มิลลิกรัม	ตรวจไม่พบ	0.004
แคลเซียม	มิลลิกรัม	4	2
เหล็ก	มิลลิกรัม	0.1	0.1
วิตามินซี	มิลลิกรัม	ตรวจไม่พบ	ตรวจไม่พบ
ถั่ว	กรัม	0.2	0.1
ความชื้น	กรัม	91.3	89.8

4.2 การเปลี่ยนแปลงทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์

เมื่อเปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังการเก็บรักษานาน 8 เดือน (ตารางที่ 4) พบว่าปริมาณพลังงาน คาร์โบไฮเดรต น้ำตาล วิตามินบี₁ และเหล็กของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มสูงกว่าตอนก่อนเก็บรักษา (0 เดือน) แต่ปริมาณความชื้นและวิตามินบี₂ มีแนวโน้มลดลง การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลานาน อาจทำให้ความชื้นระเหยออกไปทางผิวกระป๋อง Rickman et al. (2007) ได้รายงานว่าน้ำหนักอาหารกระป๋องลดลงเนื่องจากความชื้นมีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษา จึงทำให้น้ำตาลมีความเข้มข้นมากขึ้น พลังงานและคาร์โบไฮเดรตจึงเพิ่มขึ้นด้วย วิตามินบี₁ ในผลิตภัณฑ์อาหารกระป๋องส่วนใหญ่มักจะลดลงระหว่างการเก็บรักษา แต่ถั่วดินเตากระป๋องมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก (Rickman et al., 2007) ในการศึกษาปริมาณวิตามินบี₁ และเหล็กเพิ่มขึ้นหลังการเก็บนั้นยังไม่ทราบสาเหตุแน่ชัด แต่วิตามินบี₂ ถูกทำลายมากขึ้นเนื่องจากเก็บที่อุณหภูมิห้องและถูกแสง (Ball, 2006) เป็นเวลานาน และการสูญเสียจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มแสงและอุณหภูมิการเก็บรักษา (Singh et. al., 1975) ดังนั้นการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์บรรจุกระป๋องนาน 8 เดือนที่อุณหภูมิห้อง ทำให้คุณค่าทางโภชนาการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

ตารางที่ 4 ผลการประเมินคุณค่าทางโภชนาการของน้ำเฝ้าผสมน้ำสับปะรดบรรจุกระป๋องที่ระยะเวลาต่างกัน

คุณค่าอาหารต่อ 100 มิลลิตร	หน่วย	ระยะเวลาการเก็บรักษา	
		เดือนที่ 0	เดือนที่ 8
พลังงาน	กิโลแคลอรี	68	74
คาร์โบไฮเดรต (รวมใยอาหาร)	กรัม	17.1	18.4
น้ำตาล	กรัม	16.8	18.4
โซเดียม	มิลลิกรัม	2	2
วิตามินบี ₁	มิลลิกรัม	0.06	0.18
วิตามินบี ₂	มิลลิกรัม	0.004	ตรวจไม่พบ
แคลเซียม	มิลลิกรัม	2	2
เหล็ก	มิลลิกรัม	0.1	0.2
วิตามินซี	มิลลิกรัม	ตรวจไม่พบ	ตรวจไม่พบ
เถ้า	กรัม	0.1	0.1
ความชื้น	กรัม	89.8	89.1

สรุป

การศึกษาเพื่อคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์น้ำเฝ้าผสมน้ำสับปะรดพร้อมดื่ม โดยการทดสอบแบบเฮโดนิค พบว่าอัตราส่วนน้ำเฝ้าต่อน้ำสับปะรด 1:2 เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้กลิ่นดีกว่าน้ำเฝ้าและน้ำสับปะรด ให้รสชาติดีใกล้เคียงกับน้ำเฝ้า ให้สีและความชอบโดยรวมไม่แตกต่างจากน้ำเฝ้า เมื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการต่ออาหาร 100 มิลลิตรของน้ำเฝ้ากับน้ำเฝ้าผสมน้ำสับปะรดบรรจุในขวดแก้ว พบว่า น้ำเฝ้าผสมน้ำสับปะรดให้พลังงาน คาร์โบไฮเดรต น้ำตาลและโซเดียมน้อยกว่าน้ำเฝ้า แต่มีปริมาณความชื้นมากกว่าน้ำเฝ้า และปริมาณวิตามินบี₁ แคลเซียม เหล็กและเถ้าเท่ากัน ไม่พบวิตามินบี₂ และวิตามินซีในผลิตภัณฑ์เมื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการของน้ำเฝ้าผสมน้ำสับปะรดอัตรา 1: 2 บรรจุในขวดแก้วและกระป๋อง พบว่า พลังงาน คาร์โบไฮเดรต น้ำตาล และวิตามินบี₁ ของผลิตภัณฑ์บรรจุขวดแก้วมีปริมาณ

น้อยกว่าบรรจุกระป๋อง แต่โซเดียมและเหล็กมีปริมาณเท่ากัน แต่วิตามินบี₁ แคลเซียม เถ้าและความชื้นของผลิตภัณฑ์บรรจุในขวดแก้วมีปริมาณสูงกว่าที่บรรจุในกระป๋อง และไม่พบวิตามินซีในผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิดผลิตภัณฑ์บรรจุในกระป๋องจึงเหมาะสมต่อการผลิตเนื่องจากให้คุณค่าทางโภชนาการครบมากกว่าบรรจุขวดแก้ว ผลิตภัณฑ์บรรจุกระป๋องเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องนาน 8 เดือน ตรวจสอบคุณภาพทางด้านจุลชีววิทยาแล้วไม่พบจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์-ราเกินเกณฑ์มาตรฐานตลอดอายุการเก็บรักษา ผลการศึกษาคุณค่าทางโภชนาการเปรียบเทียบก่อนและหลังการเก็บรักษา พบว่าปริมาณพลังงาน คาร์โบไฮเดรต น้ำตาล วิตามินบี₁ และเหล็กมีแนวโน้มสูงกว่าตอนก่อนเก็บรักษา แต่ปริมาณความชื้นและวิตามินบี₂ มีแนวโน้มลดลง ดังนั้นการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์บรรจุกระป๋องที่อุณหภูมิห้องอาจจะมีอายุการเก็บได้นานมากกว่า 8 เดือน

เอกสารอ้างอิง

- ครินญา เสนากุล ธนอมรัตน์ หลวงยศ สกุนธร
บวรสมบัติ และสิทธิสิน บวรสมบัติ. (2547).
การประยุกต์ใช้เทคนิคด้านจุลชีววิทยาและ
เทคโนโลยีสะอาด สำหรับการผลิตน้ำมะกึ่ง
บรรจุขวด ของบริษัทหมั่นพาณิชยเชียงใหม่
จำกัด. รวบรวมผลงานโครงการที่ได้รับทุน
IRPUS ประจำปี 2547. สำนักงานโครงการ
IRPUS. กรุงเทพฯ., 138-139.
- นิธิยา รัตนพานนท์. (2544). หลักการแปรรูปอาหาร
เบื้องต้น. โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.
- วิไล รังสาทอง. (2543). เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร.
พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- อรอนงค์ นัยวิกุล และกมลทิพย์ มั่นภักดี. (2538).
บทบาทของอุตสาหกรรมอาหารกับการส่งเสริม
สุขภาพ. อุตสาหกรรมเกษตร. 6 (1): 54-65.
- อร่าม คุ่มกลาง และวินัย แสงแก้ว. (2542). การศึกษา
ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของเม้าหลวง
(*Antidesma thwaitesianum* Muell. Arg.) ใน
จังหวัดสกลนคร. เอกสารการประชุมสัมมนา
ทางวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
- ครั้งที่ 16: เล่ม 2 สาขาเกษตรศาสตร์, 485-
486.
- Ball, G., F., M. (2006). Vitamins in foods: analysis,
bioavailability and stability. Boca Raton:
Taylor & Francis Group.
- Fellows, P. (1997). Food Processing Technology.
Cambridge, UK: Principles and Practice.
Ellis Horwood Publishing Ltd.
- Meilgaard, M., Civille, C. V. and Carr, B. T. (1990).
Sensory Evaluation Techniques. Florida: CRC
Press, Inc.
- Rickman, J. C., Barrett, D. M. and Bruhn, C. M.
(2007). Nutritional comparison of fresh,
frozen and canned fruits and vegetables.
Part 1. Vitamins C and B and phenolic
compounds. Journal of the Science of Food
and Agriculture. 87: 930-944.
- Singh, R. P., Heldman, D. R. and Kirk, J. R. (1975).
Kinetic analysis of light-induced riboflavin
loss in whole milk, Journal of Food
Science. 40: 164.



พรรณไม้อันดับ Malpighiales ในป่านายูง-น้ำโสม อุทยานแห่งชาตินายูง-น้ำโสม จังหวัดอุดรธานี Malpighiales in Na Yung-Nam Som Forest, Na Yung-Nam Som National Park, Udon Thani Province

ศรชัย พุทธชัย¹ พิมพ์ดี พรพงศ์รุ่งเรือง¹ และ อมรรัตน์ มีสวาสดี^{1*}

บทคัดย่อ

ศึกษาพรรณไม้อันดับ Malpighiales ในป่านายูง-น้ำโสม อุทยานแห่งชาตินายูง-น้ำโสม จังหวัดอุดรธานี ระหว่างเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2552 ถึง เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2553 โดยศึกษาจากตัวอย่างพรรณไม้ภาคสนาม พบ 11 วงศ์ 36 สกุล 62 ชนิด 63 แทกซา ซึ่งเป็นพรรณไม้ในวงศ์ Euphorbiaceae 27 ชนิด วงศ์ Phyllanthaceae 23 ชนิด วงศ์ Hypericaceae 2 ชนิด 3 แทกซา วงศ์ Clusiaceae 2 ชนิด วงศ์ Passifloraceae 2 ชนิด และวงศ์ที่พบเพียง 1 ชนิด ได้แก่ Chrysobalanaceae, Erythroxylaceae, Irvingiaceae, Malpighiaceae, Ochnaceae และ Rhizophoraceae ในจำนวนนี้เป็นพืชเฉพาะถิ่นในประเทศไทย 3 ชนิด โดย 1 ชนิดเป็นพรรณไม้ในวงศ์ Euphorbiaceae ได้แก่ เปล้า (*Croton kerrii* Airy Shaw) และ 2 ชนิด เป็นพรรณไม้ในวงศ์ Phyllanthaceae ได้แก่ พันดา (*Cleistanthus denudatus* Airy Shaw) มะยมละม้าย (*Sauropus similis* Craib)

Abstract

Malpighiales in Na Yung-Nam Som Forest, Na Yung-Nam Som National Park, Udon Thani Province was performed between May 2009 and May 2010. Plant specimens were collected and identified. The results showed that there were 11 families, 36 genera, 62 species and 63 taxa in the area, including 27 species of Euphorbiaceae, 23 species of Phyllanthaceae, 2 species and 3 taxa of Hypericaceae, 2 species of Clusiaceae, 2 species of Passifloraceae and 1 species from each following families - Chrysobalanaceae,

¹ ศูนย์วิจัยอนุกรมวิธานประยุกต์ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

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

Erythroxylaceae, Irvingiaceae, Malpighiaceae, Ochnaceae and Rhizophoraceae. Three of which were endemic species to Thailand, namely *Croton kerrii* Airy Shaw (Euphorbiaceae), *Cleistanthus denudatus* Airy Shaw (Phyllanthaceae) and *Sauropus similis* Craib (Phyllanthaceae).

คำสำคัญ : อันดับ Malpighiales อุทยานแห่งชาตินาญ-น้ำโสม

Keywords : Malpighiales, Na Yung-Nam Som National Park

บทนำ

พรรณไม้ในอันดับ Malpighiales มีทั้งไม้ต้น ไม้เลื้อย พรรณไม้น้ำ พืชเบียน หรือคล้ายทลัส (thallus) เกาะบนหิน ดอกแยกเพศร่วมต้นหรือต่างต้น ส่วนใหญ่ดอกสมมาตรแบบรัศมี ฐานรองดอกมักจะ ไม่ปรากฏ วงกลีบรวมมี 4-5 กลีบ หรือทวีคูณของ 4-5 กลีบ จำนวนเกสรเพศผู้ส่วนใหญ่มี 4-5 อัน ในบางสกุลมีเกสรเพศผู้ที่เป็นหมัน เช่น สกุล *Passiflora* L. ส่วนใหญ่เกสรเพศเมียมี 3 คาร์เพลเชื่อมกัน รังไข่ ส่วนใหญ่อยู่เหนือวงกลีบ ผลมีทั้งแบบผลแห้งแตก ผลแบบเบอร์รี่ ผลเมล็ดเดี่ยวแข็ง ผลมีเนื้อหลายเมล็ด และผลปึกเดียว (Hoffmann, 2003) พรรณไม้ในอันดับนี้เป็นพรรณไม้ที่มีคุณค่าในด้านต่างๆ มากมาย มีทั้งเป็นพืชเศรษฐกิจ เช่น เสาวรส (*Passifloraceae*) สนุดำ (*Euphorbiaceae*) (ขวัญฤทัย คำผาเชื้อ, 2551) เป็นพืชสมุนไพร เช่น เปล้านิดต่าง ๆ (*Euphorbiaceae*) ช้างน้ำ (*Ochnaceae*) มะขามป้อม (*Phyllanthaceae*) เป็นอาหารของคนและสัตว์ เช่น มะพอก (*Chrysobalanaceae*) ติ้วส้ม (*Hypericaceae*) กระบก (*Irvingiaceae*) สุนไส (*Erythroxylaceae*) (ภูรินทร์ ภูภักดี, 2548) และเป็นพืชประดับ เช่น กำลังกระบือ โกสน มะเขย แสยก (*Euphorbiaceae*) (ก่องกานดา ชยามฤต, 2548) เป็นต้น ทั่วโลกมีพรรณไม้ในอันดับนี้ 35 วงศ์ 13,000 ชนิด (Judd et al., 2002) ในประเทศไทย มี 19 วงศ์ (กรมป่าไม้, 2544) อุทยานแห่งชาตินาญ-น้ำโสม ประกอบไปด้วยผืนป่า 3 แห่ง ได้แก่ ป่านาญ-น้ำโสม จังหวัดอุดรธานี ป่าพรานพร้าว-แก้งไก่อ จังหวัดหนองคาย และป่าภูเขากว้าง-ดงปากชม จังหวัดเลย (กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช,

2551) สำหรับป่านาญ-น้ำโสม ซึ่งเป็นผืนป่าที่ตั้งอยู่บนเทือกเขาภูพาน เป็นผืนป่าที่ยังมีความอุดมสมบูรณ์มากที่สุดของจังหวัดอุดรธานี พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นแหล่งต้นน้ำ ประกอบด้วยป่าดิบแล้ง ป่าเบญจพรรณ และป่าเต็งรังเป็นแหล่งท่องเที่ยวที่สำคัญของจังหวัดอุดรธานี เช่น น้ำตกยางทอง น้ำตกสามเทพ และน้ำตกธารทิพย์ เป็นต้น (National Park, Wildlife and Plant Conservation Department, 2006) เนื่องจากผืนป่าแห่งนี้ ยังไม่เคยมีการศึกษาความหลากหลายของพรรณไม้มาก่อน ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เป็นการเพิ่มข้อมูลด้านการกระจายพันธุ์ของพรรณไม้ในอันดับนี้ในประเทศไทย เป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการศึกษาด้านอื่นๆ ต่อไปในอนาคต เช่น ด้านนิเวศวิทยา ด้านสังคมพืช ด้านการกระจายตัวของพืช ด้านความหลากหลายชนิดของพืช และการวางแผนจัดการ และใช้ประโยชน์ทรัพยากรชีวภาพในระดับพื้นที่ให้มีความเหมาะสมต่อไป

วิธีการวิจัย

ศึกษาความหลากหลายชนิดของพรรณไม้ในอันดับ Malpighiales โดยการเดินสำรวจตามเส้นทางเดินสำรวจป่าระหว่าง เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2552 ถึง เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2553 ทุกสัปดาห์ 3 ครั้ง ครั้งละ 3-4 วัน เก็บตัวอย่างพืชเพื่อถ่ายภาพ และบันทึกข้อมูลภาคสนาม ได้แก่ สถานที่เก็บตัวอย่าง สังคมป่า วันเดือนปีที่เก็บ ลักษณะนิสัย ความสูง สี และกลิ่น เป็นต้น ทำตัวอย่างพรรณไม้แห้ง และตัวอย่างดองเก็บรักษาไว้ที่หอพรรณไม้ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช (BKF) และพิพิธภัณฑ์พืช มหาวิทยาลัยขอนแก่น (KKU) เพื่อเป็นตัวอย่างอ้างอิง

จากนั้นบรรยายลักษณะของพืชและระบุชื่อวิทยาศาสตร์ โดยใช้รูปวิธานของพันธุ์ไม้วงศ์ต่าง ๆ ในหนังสือพรรณพฤกษชาติของประเทศไทย พรรณพฤกษชาติของประเทศไทยใกล้เคียง และเปรียบเทียบกับตัวอย่างพืชที่ระบุชนิดโดยผู้เชี่ยวชาญซึ่งเก็บรักษาอยู่ที่หอพรรณไม้ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช (BKFP) และพิพิธภัณฑ์พืชกรุงเทพ (BK)

ผลการวิจัย

จากการศึกษาพบพืช 11 วงศ์ 36 สกุล 62 ชนิด 63 แทกซา จำแนกเป็น วงศ์ Euphorbiaceae 16 สกุล 27 ชนิด วงศ์ Phyllanthaceae 10 สกุล 23 ชนิด วงศ์ Hypericaceae 1 สกุล 2 ชนิด 3 แทกซา วงศ์ Clusiaceae 1 สกุล 2 ชนิด วงศ์ Passifloraceae 2 สกุล 2 ชนิด และวงศ์ที่พบเพียง 1 ชนิด ได้แก่ Chrysobalanaceae, Erythroxylaceae, Irvingiaceae, Malpighiaceae, Ochnaceae และ Rhizophoraceae โดยระบบนิเวศที่พบพรรณไม้ในอันดับนี้มากที่สุดคือ ระบบนิเวศป่าเบญจพรรณ รองลงมาเป็นระบบนิเวศป่าดิบแล้งและระบบนิเวศป่าเต็งรัง ตามลำดับ (ตารางที่ 1)

สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

จากผลการศึกษาพบพืชอันดับ Malpighiales ในพื้นที่ป่ายูง-น้ำโสมทั้งสิ้น 11 วงศ์ แสดงว่าพื้นที่นี้มีหลากหลายของพรรณไม้ในอันดับนี้ค่อนข้างมาก เนื่องจากมีรายงานพบพรรณไม้ในอันดับนี้ในประเทศไทย 19 วงศ์ (กรมป่าไม้, 2544) โดยวงศ์ที่ไม่พบในการศึกษาค้นคว้า ได้แก่ Ixonanthaceae, Rafflesiaceae, Salicaceae, Trigonaceae, Violaceae, Bonnetiaceae, Ctenolophonaceae และ Linaceae ซึ่งปัจจัยที่น่าจะทำให้

ไม่พบพืชวงศ์เหล่านี้เนื่องจากระบบนิเวศของแหล่งที่อยู่ เช่น มักพบพืชวงศ์ Rafflesiaceae ในระบบนิเวศที่เป็นป่าดิบเขาที่มีความชื้นสูง (Keng, 1972a) พืชวงศ์ Trigonaceae พบได้ในป่าดิบ (Van Welzen and Veldkamp, 2008) พืชวงศ์ Linaceae พบในป่าดิบที่ต่ำ พืชวงศ์ Violaceae พบในป่าดิบที่ต่ำ ป่าดิบเขา และเขตแอลไพน์ พืชวงศ์ Salicaceae พบตามริมธารน้ำที่ลุ่มต่ำ (ก่องกานดา ชยามฤต, 2548) ส่วนพืชในวงศ์ Bonnetiaceae (Keng, 1972b) วงศ์ Ctenolophonaceae (Larsen, 2001) และวงศ์ Ixonanthaceae (Larsen, 1997) มีการกระจายพันธุ์บริเวณตอนใต้ของประเทศไทย พืชวงศ์ Euphorbiaceae เป็นวงศ์ที่พบจำนวนมากที่สุด และรองลงมาคือ วงศ์ Phyllanthaceae ทั้งนี้เนื่องจากพืชทั้ง 2 วงศ์ สามารถเจริญเติบโตได้ในระบบนิเวศที่มีความหลากหลายแตกต่างกันหรือเกือบทุกสภาพป่า

ในพื้นที่ศึกษา พบพืชเฉพาะถิ่นในประเทศไทย โดยอ้างอิงข้อมูลจาก Santisuk et al. (2006) ได้แก่ พันดา (*Cleistanthus denudatus* Airy Shaw) เปล้า (*Croton kerrii* Airy Shaw) และมะยมละม้าย (*Sauropus similis* Craib) (รูปที่ 1 และรูปที่ 2) ซึ่งทางอุทยานแห่งชาตินาญ-น้ำโสมควรพิจารณาให้ความสำคัญในการอนุรักษ์พืชเหล่านี้เป็นพิเศษ

ระยะเวลาการออกดอกพืชอันดับ Malpighiales ที่สำรวจพบมีระยะเวลาครอบคลุมทุกฤดูกาล เนื่องจากพรรณไม้ในอันดับนี้ประกอบไปด้วย 11 วงศ์ จึงทำให้ช่วงระยะเวลาการออกดอกมีความแตกต่างกันออกไป ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึงเดือนธันวาคม บางชนิดอาจจะสามารถออกดอกได้ตลอดทั้งปี หรือทุกฤดูกาลขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของสภาพแวดล้อม เช่น *Phyllanthus amarus* Schumach. & Thonn. และ *Euphorbia heterophylla* L. เป็นต้น

ตารางที่ 1 พรรณไม้อันดับ Malpighiales ในป่านาเยUNG-น้ำโสม อุทยานแห่งชาตินาเยUNG-น้ำโสม จังหวัดอุดรธานี

วงศ์และชนิด	ชื่อสามัญ	นิเวศวิทยา	ช่วงเวลามีดอก
วงศ์ Chrysobalanaceae			
1. <i>Parinari anamense</i> Hance	มะพอก	ป่าเต็งรัง	ธ.ค. – ม.ค.
วงศ์ Clusiaceae			
2. <i>Garcinia gracillis</i> Pierre	ชะมาง	ป่าเบญจพรรณ	พ.ย. – ม.ค.
3. <i>G. fusca</i> Pierre	มะดันป่า ส้มโอง	ป่าดิบแล้ง	พ.ค. – ก.ค.
วงศ์ Erythroxylaceae			
4. <i>Erythroxylum cambodianum</i> Pierre	ตานกรับ	ป่าเต็งรัง	มิ.ย. – พ.ย.
วงศ์ Euphorbiaceae			
5. <i>Alchornea rugosa</i> (Lour.) Müll.Arg.	ขางปอยน้ำ	ริมน้ำป่าเบญจพรรณ	ธ.ค. – มี.ค.
6. <i>Balakata baccata</i> (Roxb.) Esser	โพบาย	ป่าดิบแล้ง	ทุกฤดูกาล
7. <i>Chaetocarpus castanocarpus</i> (Roxb.) Thwaites	สำเภา	ป่าเต็งรัง	ม.ค. – พ.ค.
8. <i>Cleidion spiciflorum</i> (Burm.f.) Merr.	คีมี่	ริมน้ำป่าเบญจพรรณ	มี.ค. – พ.ค.
9. <i>Cnesmone javanica</i> Blume	คำแยเครือ	ป่าเบญจพรรณ	เม.ย. – ก.ย.
10. <i>Croton kerrii</i> Airy Shaw	เปล้า	ป่าเบญจพรรณ	ม.ค. – ก.พ.
11. <i>C. kongensis</i> Gagnep.	เปล้าเงิน	ป่าเบญจพรรณ, ป่าดิบแล้ง	ม.ค. – ต.ค.
12. <i>C. roxburghii</i> N.P.Balacr.	เปล้าใหญ่	ป่าเบญจพรรณ	พ.ย. – มี.ค.
13. <i>C. robustus</i> Kurz	เปล้าใหญ่	ป่าเบญจพรรณ	ก.พ. – มี.ค.
14. <i>Dalechampia bidentata</i> Blume	มังกรคาบแก้ว	ป่าดิบแล้ง	ต.ค. – ม.ค.
15. <i>Euphorbia antiquorum</i> L.	สลัดไต่ป่า	ลานหินป่าเต็งรัง	ต.ค. – ธ.ค.
16. <i>E. heterophylla</i> L.	หญ้ายาง	ที่โล่ง, ริมทางเดินป่า เบญจพรรณ	ทุกฤดูกาล
17. <i>E. hirta</i> L.	น้านมราชสีห์	ที่โล่ง, ริมทางเดินป่า เบญจพรรณ	ทุกฤดูกาล
18. <i>E. thymifolia</i> L.	น้านมราชสีห์เล็ก	ที่โล่ง, ริมทางเดินป่า เบญจพรรณ	ทุกฤดูกาล
19. <i>Falconeria insigne</i> Royle	ดาตุมบก	ป่าเบญจพรรณ	มี.ค. – พ.ค.
20. <i>Homonoia riparia</i> Lour.	ไคร้หน้า	ริมน้ำป่าเบญจพรรณ	ต.ค. – ก.พ.
21. <i>Macaranga denticulata</i> (Blume) Müll.Arg.	ตองเตบ	ริมถนน, ป่าดิบแล้ง	ธ.ค. – มี.ค.
22. <i>M. gigantea</i> (Rchb.f. & Zoll.) Müll.Arg.	เต้าหลวง	ป่าดิบแล้ง	เม.ย. – ต.ค.

ตารางที่ 1 พรรณไม้อันดับ Malpighiales ในป่านายูง-น้ำโสม อุทยานแห่งชาตินายูง-น้ำโสม จังหวัดอุดรธานี (ต่อ)

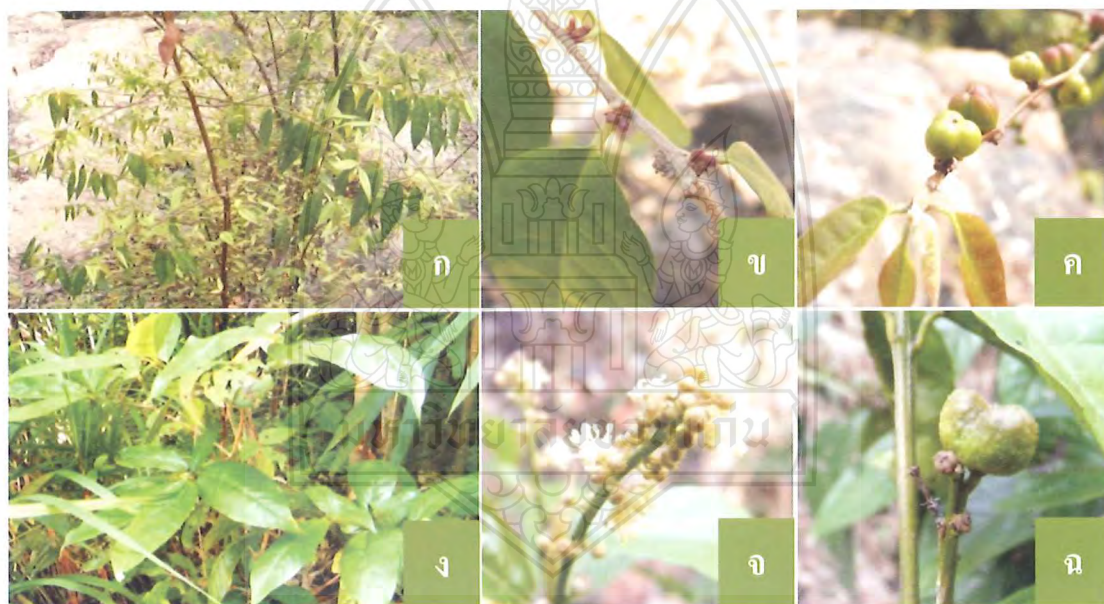
วงศ์และชนิด	ชื่อสามัญ	นิเวศวิทยา	ช่วงเวลาที่มีดอก
23. <i>M. kurzii</i> (Kuntze) Pax & K. Hoffm.	ปอแต่บ	ป่าดิบแล้ง	มิ.ย. – ส.ค.
24. <i>Mallotus babatus</i> Müll.Arg.	ตองเต้า	ริมถนน, ป่าดิบแล้ง	พ.ค. – ก.ค.
25. <i>M. paniculatus</i> (Lam) Müll.Arg.	สอยดาว	ริมถนน, ป่าเบญจพรรณ, ป่าดิบแล้ง	ส.ค. – ต.ค.
26. <i>M. philippensis</i> (Lam) Müll.Arg.	ค้ำเสด	ป่าเบญจพรรณ, ป่าดิบแล้ง	ก.ค. – พ.ย.
27. <i>M. coudercii</i> (Gagnep.) Airy Shaw	เต้าตัวเมีย	ที่โล่ง, ริมน้ำในป่า เบญจพรรณ, ป่าดิบแล้ง	พ.ย. – ม.ค.
28. <i>Microstachys chamaelea</i> (L.) Müll.Arg.	สร้อยนก	ที่โล่ง, ป่าเบญจพรรณ	ม.ค. – มี.ค.
29. <i>Suregada multiflorum</i> (A.Juss.) Baill.	ขันทองพญาบาท	ป่าเต็งรัง, ป่าเบญจพรรณ	ก.พ. – เม.ย.
30. <i>Triadica cochinchinensis</i> Lour.	สลีนก	ป่าเบญจพรรณ	ทุกฤดูกาล
31. <i>Trigonostemon reidioides</i> (Kurz) Craib	โลดทะนง	ริมถนน, ป่าเบญจพรรณ ป่าเต็งรัง	ทุกฤดูกาล
วงศ์ Hypericaceae			
32. <i>Cratoxylum cochinchinense</i> (Lour.) Blume	ตัวเกลี้ยง	ป่าเต็งรัง, ป่าเบญจพรรณ	มี.ค. – ส.ค.
33. <i>C. formosum</i> (Jack) Dyer ssp. <i>formosum</i> (Jack) Dyer	ตัวขาว	ป่าเต็งรัง, ป่าเบญจพรรณ	ก.พ. – พ.ค.
34. <i>C. formosum</i> (Jack) Dyer ssp. <i>pruniflorum</i> (Kurz) Goegelein	ตัวขน	ป่าเต็งรัง, ป่าเบญจพรรณ	ก.พ. – มิ.ย.
วงศ์ Irvingiaceae			
35. <i>Irvingia malayana</i> Oliv. ex Benn.	กระบก	ป่าเต็งรัง, ป่าเบญจพรรณ	มี.ค. – ส.ค.
วงศ์ Malpighiaceae			
36. <i>Aspidopterys thorelii</i> Dop	เถาประสงค้ตัวผู้	ป่าเบญจพรรณ	ส.ค. – ต.ค.
วงศ์ Ochnaceae			
37. <i>Ochna integerrima</i> (Lour.) Merr.	ช้างน้ำว	ป่าเต็งรัง, ป่าเบญจพรรณ	พ.ย. – มิ.ย.

ตารางที่ 1 พรรณไม้อันดับ Malpighiales ในป่านายูง-น้ำโสม อุทยานแห่งชาตินายูง-น้ำโสม จังหวัดอุดรธานี (ต่อ)

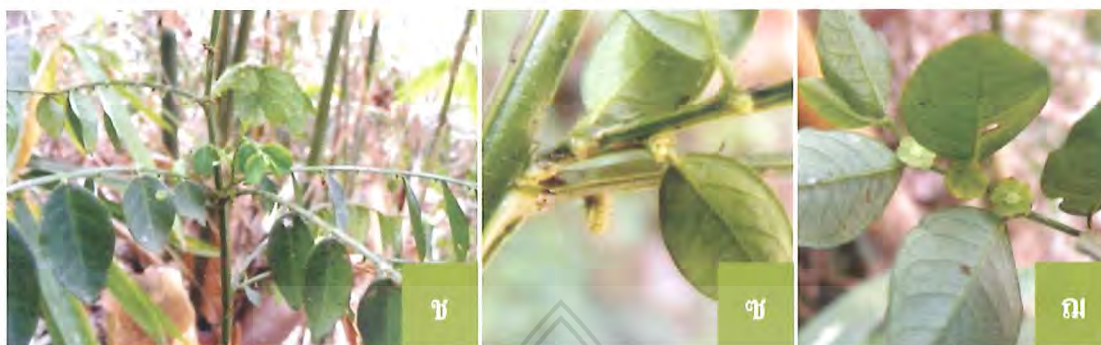
วงศ์และชนิด	ชื่อสามัญ	นิเวศวิทยา	ช่วงเวลาที่มีดอก
วงศ์ Passifloraceae			
38. <i>Adenia macrophylla</i> (Blume) Koord var. <i>macrophylla</i>	จีกาป่า	ป่าดิบแล้ง	มี.ค. - พ.ค.
39. <i>Passiflora foetida</i> L.	กระทกรก	ริมถนน, ป่าเต็งรัง	ทุกฤดูกาล
วงศ์ Phyllanthaceae			
40. <i>Antidesma acidum</i> Retz.	เมาสร้อย	ป่าเต็งรัง, ป่าเบญจพรรณ	พ.ค. - ก.ค.
41. <i>A. sootepense</i> Craib	เมาสาย	ป่าเบญจพรรณ, ป่าดิบแล้ง	พ.ค. - ก.ค.
42. <i>A. ghasembilla</i> Gaertn.	เมาไข่ปลา	ป่าเต็งรัง	พ.ค. - ส.ค.
43. <i>A. velutinosum</i> Blume	เมาควาย	ป่าเบญจพรรณ	เม.ย. - มิ.ย.
44. <i>Aporosa villosa</i> (Wall. ex Lindl) Baill.	โสด	ป่าเต็งรัง	ม.ค. - เม.ย.
45. <i>Baccaurea ramiflora</i> Lour.	มะไฟ	ป่าเบญจพรรณ, ป่าดิบแล้ง	ก.พ. - มี.ค.
46. <i>Breynia glauca</i> Craib	ระยับพิษ	ป่าเบญจพรรณ	พ.ย. - ม.ค.
47. <i>Bridelia affinis</i> Craib	ก้างปลา	ป่าเบญจพรรณ	ก.ย. - พ.ย.
48. <i>B. ovata</i> Decue	มะกา	ป่าเบญจพรรณ	ต.ค. - พ.ย.
49. <i>B. retusa</i> (L.) A.Juss.	เต็งหนาม	ป่าเบญจพรรณ	มิ.ย. - ส.ค.
50. <i>B. stipularis</i> (L.) Blume	มะกาเครือ	ริมน้ำ, ป่าเบญจพรรณ	ก.ค. - พ.ย.
51. <i>Cleistanthus denudatus</i> Airy Shaw	พันดา	ป่าเบญจพรรณ	ม.ค. - มี.ค.
52. <i>Flueggea virosa</i> (Roxb. Ex Willd.) Voigt	ก้างปลาขาว	ริมน้ำ, ริมถนน, ป่าเบญจพรรณ	ก.ค. - ก.ย.
53. <i>Glochidion eriocarpum</i> Champ	ไคร้ร่มด	ป่าดิบแล้ง	ก.ย. - มี.ค.
54. <i>Phyllanthus amarus</i> Schumach. & Thonn.	ลูกใต้ใบ	ที่โล่ง, ริมทางเดินป่าเบญจพรรณ	ทุกฤดูกาล
55. <i>P. elegans</i> Wall. ex Müll.Arg.	ผักหวานดง	ป่าเบญจพรรณ, ป่าดิบแล้ง	ทุกฤดูกาล
56. <i>P. emblica</i> L.	มะขามป้อม	ป่าเต็งรัง, ป่าเบญจพรรณ	ก.พ. - เม.ย.
57. <i>P. urinaria</i> L.	หญ้าใต้ใบ	ที่โล่ง, ริมทางเดินป่าเบญจพรรณ	ทุกฤดูกาล

ตารางที่ 1 พรรณไม้อันดับ Malpighiales ในป่านายูง-น้ำโสม อุทยานแห่งชาตินายูง-น้ำโสม จังหวัดอุดรธานี (ต่อ)

วงศ์และชนิด	ชื่อสามัญ	นิเวศวิทยา	ช่วงเวลามีดอก
58. <i>P. virgatus</i> G.Forst.	ขางอำเภอ	ที่โล่ง	ทุกฤดูกาล
59. <i>Sauropus bicolor</i> Craib	ศักหวานแดง	ป่าเต็งรัง	ต.ค. – ต.ค.
60. <i>S. quadrangularis</i> (Willd.) Müll.Arg.	มะขมเกลี้ยง	ป่าเต็งรัง	มี.ค. – ก.ค.
61. <i>S. spatulifolius</i> Beille	มะขมใบพาย	ป่าเบญจพรรณ	พ.ย. – ม.ค.
62. <i>S. similis</i> Craib	มะขมละม้าย	ป่าดิบแล้ง	เม.ย. – ต.ค.
วงศ์ Rhizophoraceae			
63. <i>Callallia brachiata</i> (Lour.) Merr.	เถียงพรา้งนางแอ	ป่าเบญจพรรณ	ต.ค. – มี.ค.



รูปที่ 1 พืชเฉพาะถิ่นในประเทศไทย: ก.-ค. พันดา (*Cleistanthus denudatus*); ง.-ฉ. เปล้า (*Croton kerrii*)



รูปที่ 2 พืชเลื้อยเถาในประเทศไทย: ช.-ณ. มะยมละม้าย (*Sauropus similis*)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนและส่งเสริมการทำวิทยานิพนธ์สำหรับนักศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษารหัสทุน 52231106 และทุนส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สควท.) ขอขอบคุณศูนย์วิจัยอนุกรมวิธานประยุกต์ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และเจ้าหน้าที่อุทยานแห่งชาติผาแดง-น้ำโสม ที่อำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์และในการศึกษาภาคสนาม

เอกสารอ้างอิง

กรมป่าไม้. (2544). ชื่อพรรณไม้แห่งประเทศไทย: เต็ม สมิตินันท์. กรุงเทพฯ: ประชาชน. 810 หน้า.
กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช. (2551). วนอุทยานผาแดง-น้ำโสม, 30 พฤศจิกายน 2551. http://www.thaiforestbooking.com/np_home.asp?npid=13&lg=1
กองกานดา ชยามฤต. (2548). พืชมีประโยชน์วงศ์เปล้า. กรุงเทพฯ: ประชาชน. หน้า 162-163.
_____. (2548). ลักษณะประจำวงศ์พรรณไม้. กรุงเทพฯ: ชุมชมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย. 112 หน้า. ขวัญฤทัย คำผาเชื้อ. (2551). พฤกษศาสตร์พื้นบ้านของชาวกระเหรี่ยงที่ตำบลบ้านจันทร์และแจ่มหลวง อำเภอแม่แจ่ม จังหวัดเชียงใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญา

มหาบัณฑิต สาขาชีววิทยา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 270 หน้า.

ภูรินทร์ ภูภักดี. (2548). การศึกษาพฤกษศาสตร์พื้นบ้านของพรรณพืชบริเวณป่าโลกตาบอด อำเภอเมือง จังหวัดกาฬสินธุ์. วิทยานิพนธ์การศึกษามหาบัณฑิต สาขาชีววิทยา บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 87 หน้า.

Hoffmann, P. (2003). Malpighiales: An Introduction. Retrieved June 29, 2009, from Royal Botanic Gardens, Kew: http://ftp.rbkew.org.uk/science/directory/teams/Malpighiales/annex/Malpigh_Bgground_re.doc

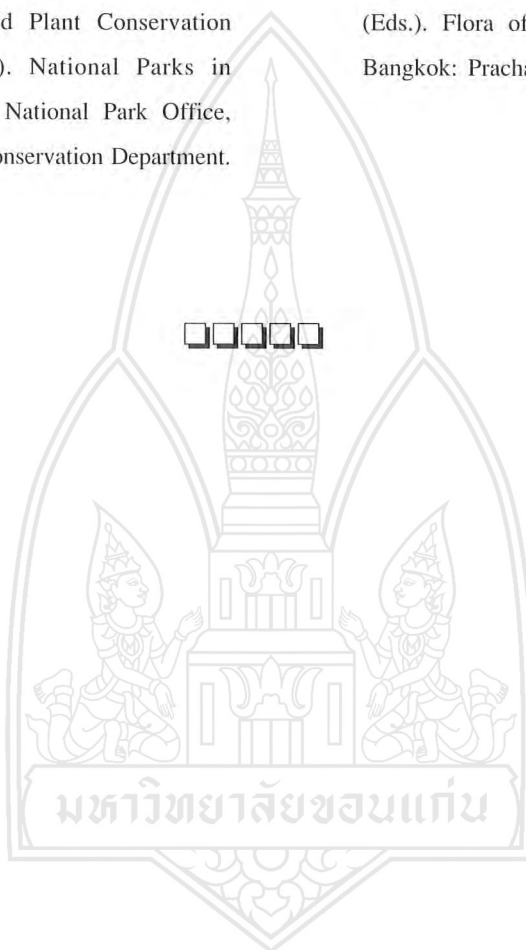
Judd, W.S., Campbell, C.S., Kellogg, E.A., Stevens, P.F. and Donoghue, M.J. (2002). Plant Systematics: A Phylogenetic Approach. 2nded. Sunderland: Sinauer. 464 pp.

Keng, H. (1972b). Bonnetiaceae. In T. Smitinand and K. Larsen (Eds.). Flora of Thailand. Vol. 2 part2. Bangkok: TISTR Press. pp. 159-160.

Keng, H. (1972a). Rafflesiaceae. In T. Smitinand and K. Larsen (Eds.). Flora of Thailand. Vol. 2 part 2. Bangkok: TISTR Press. pp. 182-184.

Larsen, K. (1997). Ixonanthaceae. In T. Santisuk and K. Larsen (Eds.). Flora of Thailand.

- Vol. 6 part 3. Bangkok: Diamond Printing. pp. 189-191.
- _____. (2001). Ctenolophonaceae. In T. Santisuk and K. Larsen (Eds.). Flora of Thailand. Vol. 7 part 3. Bangkok: Prachachon. pp. 391-393.
- National Park, Wildlife and Plant Conservation Department. (2006). National Parks in Thailand. Bangkok: National Park Office, Wildlife and Plant Conservation Department. p. 150.
- Santisuk T., Chayamarit K., Pooma R. and Suddee S. (2006). Thailand Red Data: Plants. Bangkok: Office of Natural resources and Environmental Policy and Planing. 238 pp.
- Van Welzen, P.C. and Veldkamp, J.F. (2008). Trigoniaceae. In T. Santisuk and K. Larsen (Eds.). Flora of Thailand. Vol. 9 part 2. Bangkok: Prachachon. pp. 173-175.





Application of Mike 11 for Water Quality Assessment at U-Tapao Canal, Southern of Thailand

Piyakarn Teartisup^{1*} and Prapeut Kerdsueb¹

Abstract

U-Tapao canal is the tributary of Songkhla lake basin, Southern Thailand. Water quality in this area was assessed through mathematic model (MIKE 11). The researcher analyzed hydraulic, dispersion characteristics and water quality coefficients. There were 3 key parameters used to represent hydrodynamic and water quality conditions of surface water: 1) water flow data in 2005 at the minimum average value of 20 percent, 2) BOD, and 3) DO. Three core modules of the MIKE 11 model predicted that changes of water quality would occur in 2007, 2012, 2017, 2022 and 2027. These changes will happen under the condition of BOD loading from the livestock sector being reduced to lower than 60 mg/l, community and industry sector contribution reduced to lower than 40 mg/l, and wastewater cut to lower than 10 mg/l of total loading. The result of calibration using the NAM Model found that the water level, from calculations and surveying, had a correlation coefficient = 0.812 (good relevance). A suitable factor derived was the Transport Dispersion Model, of which the selected dispersion coefficient was 100 m²/s. The results from the Water Quality Model, from which BOD, DO and water temperature were calibrated, were as follows: 1st order degradation constant for BOD at 20 degree Celsius = 0.15 per day maximum oxygen production by photosynthesis, at 20 degree Celsius = 1 g.O₂/m²/day, and the respiration of plants and animals at 20 degree Celsius = 1 g.O₂/m²/day. Water quality survey and calculation results show that water quality gradually worsened from upstream to downstream. In general, the U-Tapao canal depends on wastewater discharge and river water flow. The results of this paper show that reduction in BOD loading from all activities, as well as wastewater, are 10 percent of total loading. The water quality of this wetland will be lower than 2 mg/l, fairly good for Thai water quality standards.

Keywords : U-Tapao canal, MIKE 11 model, water quality assessment

¹ Faculty of Environment and Natural Resource Studies, Mahidol University, Thailand

* Corresponding Author, E-mail: enptt@mahidol.ac.th

Introduction

Assessing the water quality of a surface water system requires expertise from many disciplines. Although the various processes may be described in isolation, they interact in complex ways. Multiple academic fields are combined when addressing water quality objectives. The result is not simply the assemblage of a number of disciplines working independently on a problem. Physical, chemical, and biological processes also vary over a broad spectrum, both in time and space. Spatial variations largely depend on the topography of the water body and its external loadings. Temperature variations may have long-term (yearly), seasonal (monthly), diurnal (hourly), and short-term (minutes) time scales (Ji, 2008). Often water quality is defined in terms of concentrations of the various dissolved and suspended substances in the water; for example temperature, salinity, DO, nutrients, plankton, bacteria and heavy metals. The distribution of these substances must be calculated by a water quality model (Ji, 2000). "Modeling is a little like art in the words of Pablo Picasso. It is never completely realistic; it never tells the whole truth. But it constrains enough of the truth, hopefully, and enough realism to gain an understanding about environmental systems" (Schooner, 1996). Water quality management increasingly depends on accurate modeling. Models enable decision-makers to select better, more scientifically defensible choices among alternatives for water quality management. In many cases, the models are used to evaluate which alternative will be most effective in solving a long-term water quality problem. Management decisions require the consideration of existing conditions, as well as the

projection of anticipated future changes in the water system.

The U-Tapao canal watershed is located in the south of Thailand (see Figure 1). The upstream boundary is located at the Thai-Malaysian border, whereas the downstream boundary is located at Songkhla Lake, Gulf of Thailand. The watershed has an area 2,213 km², with 15 sub-watersheds (Klong Sa-dao, Lay, Klong Prik, Klong Phang-la, Klong Lumnui-Rumyai, Klong Ngae, Klong Pra-too, Klong Ra-Jamrai, Klong Tong, Klong Hin-lek-fai, Klong Wangyang, Klong Hwa, Klong Thum, Klong Wad, and Klong Rean). The total river length is about 106 km (PCD, 2005). There are many forms of land use. The major activities concern community, industry and livestock, with all sectors releasing wastewater into the river. Thus, this research aim was to analyze hydraulic, dispersion characteristics and the water quality coefficients of the river. Key parameters used to represent the hydrodynamic and water quality condition of surface waters were 1) water flow data in 2005 at the minimum average value of 20 percent, 2) BOD, and 3) DO. Model simulation predicts changes in water quality will occur in 2007, 2012, 2017, 2022 and 2027. A conceptual framework is presented in Figure 2.

MIKE 11

In 1972, the Danish Hydraulic Institute developed the MIKE 11 Model, a professional engineering software tool for the simulation of hydrology, hydraulics, water quality and sediment transport in estuaries, rivers, irrigation systems and other inland waters. Amongst the features which make the MIKE 11 Model the most widely used

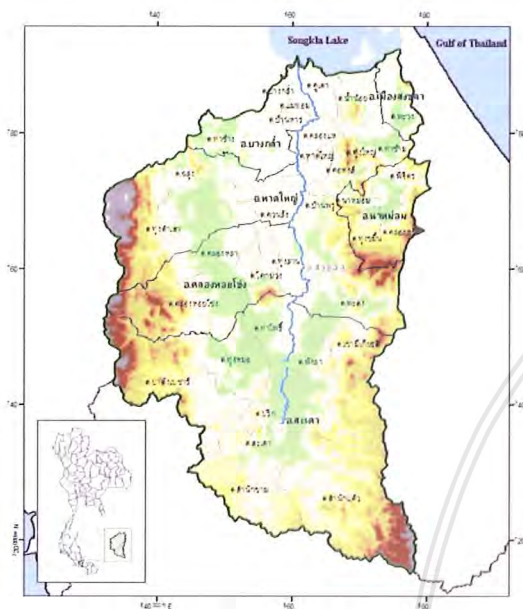


Figure 1. U-Tapao canal watershed

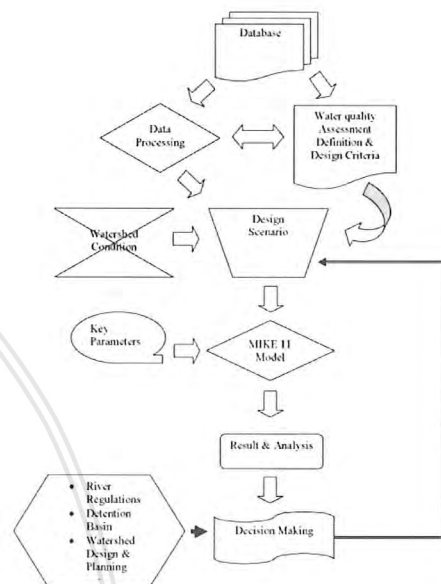


Figure 2. Conceptual framework

dynamic river modeling tool are its fast and robust numerical scheme, the wide range of hydrologic modules, advanced cohesive and non-cohesive sediment transport modules, a wide range of flood modeling modules, comprehensive water quality and eutrophication modules, links to advanced hydrological, sewer and coastal modeling tools, and Geographic Information System/GIS add-on modules (gcmd.nasa.gov/records/MIKE11.html June 19, 2007). This paper used three core modules of MIKE 11 for water quality assessment. First, the Rainfall-Runoff Module (RR) is a continuous precipitation-runoff model of the deterministic, lumped, conceptual type. The RR Module can apply general hydrological analysis, flood forecasting (combined with the Hydrodynamic Module), extensions of stream flow records, and prediction of low flows (hydrologicmodels.tamu.edu/Mike11RR.doc June 20, 2007). Second, the Hydrodynamic Module

(HD) contains all the core functionality for simulating hydrodynamic processes of the model. The HD Module uses an implicit, finite difference solver that calculates water level and flow for rivers and estuaries. The module includes fully dynamic solutions for open channel flow, high-order fully dynamic, diffusive waves, kinematic waves, quasi-steady state, kinematic routing, and automatic adapting of subcritical and supercritical flows (www.rockware.com/product/featuresLobby.php?id=191&category=409 June 20, 2007). And thirdly, the Water Quality Module (WQ) uses a complete numerical laboratory for ecological modeling. WQ can define the process using standard temperate as a basis, and transform any aquatic ecosystem into a reliable numerical model for accurate prediction. One of the preconditions from the WQ Module is an accurate low flow model for the areas (DHI, 2006).

Methodology

1. Data Requirements

Hydrodynamic modeling, especially the MIKE 11 Model, requires comprehensive data sets for model set up, calibration and assessment. Earlier research and long-term monitoring projects of Songkhla lakes (PCD, 2006a and Royal Irrigation Department, 2002) supplemented by the literature and other secondary sources provide much of the data for this model. Some additional monitoring and field investigations were necessary to fill gaps not satisfied by this existing baseline sources. The use

of baseline data was specified in the following section: 1) using GPS for specific position of climate stations and hydrological stations that cover the study area (Alfred, 1995), 2) collect rainfall data in 2005 and evaporation data for RR Module, 3) collect run-off data and river profile for HD Module, (this data covered all streams in the watershed at the same time as rainfall data was collected), and 4) collect water quality data (DO and BOD) in 2007 and waste loading (community, industry and livestock) for the WQ Module.

Table 1. Data employed within the MIKE 11 Model

Parameter	Sources
Topography	1:50,000 topography map
Precipitation and evaporation	The Thai Meteorological Dept. and Royal Irrigation Dept.
River network and profile	Royal Irrigation Dept.
Water level	Songkhla Irrigation Project,
Water quality data	Field measurement and laboratory observation

2. Data Manipulation and Analysis

The performance of a model is graphic and qualitative measure of the degree to which the model faithfully reproduces the measured data. The model variables that are often used in hydrodynamic model calibration and assessment include:

1) input spatial data to ARCGIS for locating the watershed, sub-watersheds, and interpolated flow chart of lateral flow by using the position of river flow,

2) Model calibration and validation

2.1) RR Module calibration

This study used the data from Run-off Station No. X16 (Klong Lay) for calibration and assigning parameters for all stream flow evaluations. Validation was defined from the matching of run-off graph data and water levels from the model. The result found that run-off graph data and water levels were moderately relevant by correlation coefficient = 0.884 (see Figure 3 and Table 2).

Table 2. Calibration parameter values for RR Module

Parameter	Calibrated Value
Umax	12.400
Lmax	300.0000
CQOF	0.9680
CKIF	731.8000
CK1, 2	50.0000
TOF	0.0028
TIF	0.4850
TG	0.9260
CKBF	2,951.0000

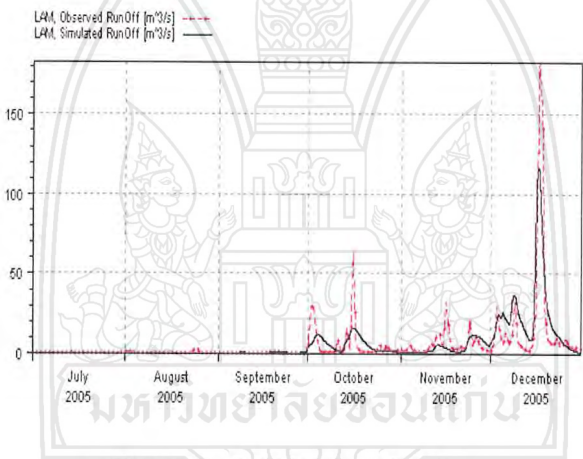


Figure 3. RR Module calibration

2.2) HD Module calibration

The calibration used lateral flow, run-off, water level, river profile and assigned at Chainnage 0000, at Run-off Station No. X172 (Klong Sadoa) for the upper watershed. The lower part was assigned with Chainnage 106813 at Run-off Station No. X194 (Klong Leampho) and Chainnage 73905

at Run off station No. X90 (Klong Bangsala) (see Figure 4). The results found that the relationship between existing data and data from the model were good, as the Manning coefficient = 0.033, correlation coefficient = 0.812 (see Figure 5). These results were used for estimating streamflow.

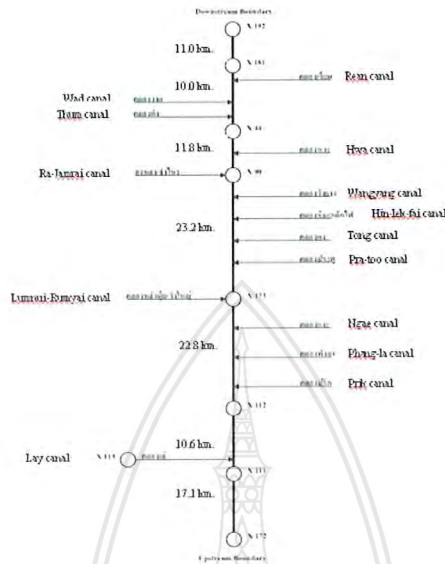


Figure 4. U-Tapao canal branches

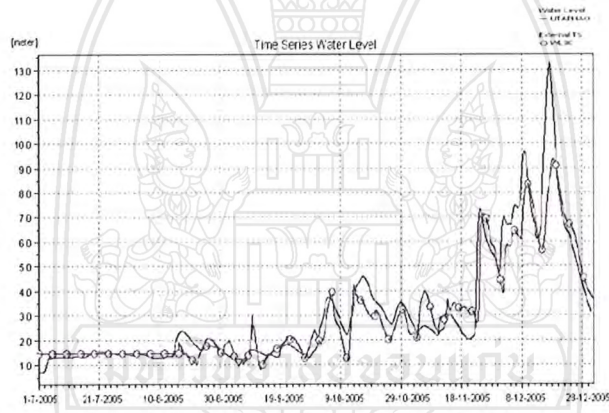


Figure 5. HD Module calibration

2.3) WQ Module calibration

The research used existing water quality data-2007 BO, DO and loading (dry and wet periods) - for calibration. The output of calibration was the Decay coefficient; it was used for water quality prediction. For WQ module calibration in the U-Tapao canal, the researcher used loading flow

data, steam flow rate, waste load and existing water quality data. Validation was defined from the matching of 2006 water quality data (PCD, 2006a, PCD, 2006b and Regional Environmental Office 16, 2006) and also data models at Chainnage 73905. The results found that water quality data is moderately relevant by correlation coefficient = 0.796 (Figures 6 and 7).

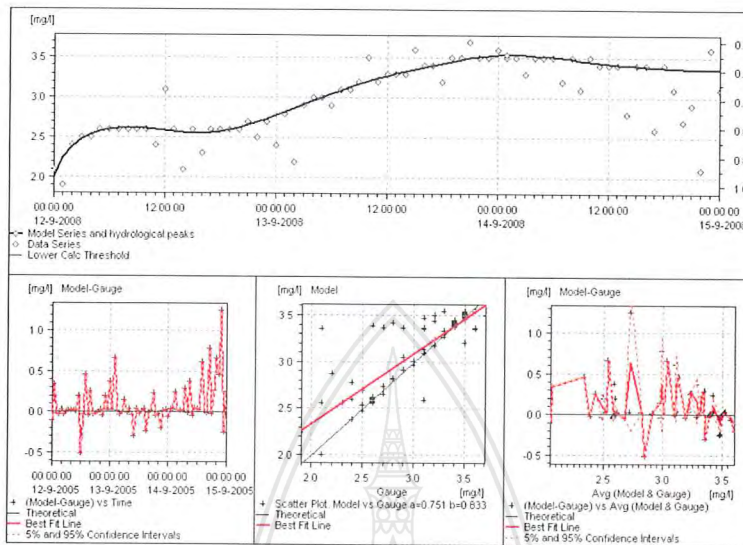


Figure 6. WQ Module calibration

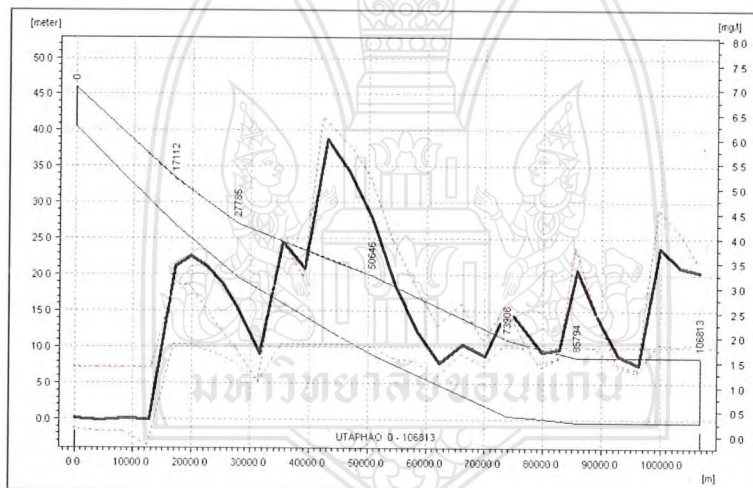


Figure 7. WQ Module calibration

The Decay coefficient for BOD and DO and aeration coefficient were defined by stream flow from the WQ Module. The key parameters were degradation constant for BOD at $20^{\circ}\text{C} = 0.15$ per

day, maximum oxygen production by photosynthesis at $20^{\circ}\text{C} = 1 \text{ g.O}_2/\text{m}^2/\text{day}$, and respiration of plants and animals at $20^{\circ}\text{C} = 1 \text{ g.O}_2/\text{m}^2/\text{day}$ (see Figures 8 and 9).

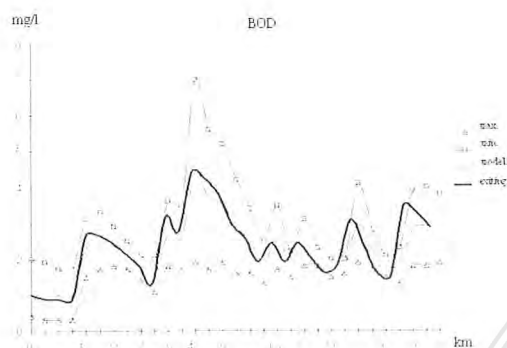


Figure 8. BOD validation

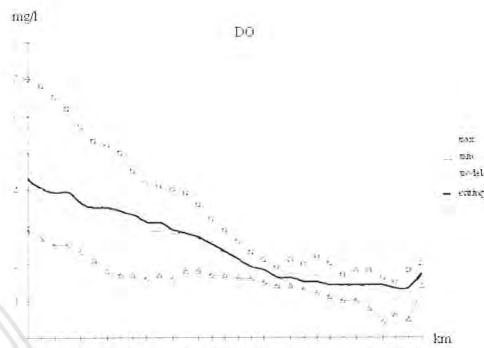


Figure 9. DO validation

Results and Discussion

1. Waste load

The major economic activities of U-Tapao canal watershed are community livelihoods, industry and livestock grazing. Waste load is discharged into U-Tapao canal by 15 channels (Klong Sa-dao, Klong Lay, Klong Prik, Klong Phang-la, Klong Lumnui-Rumyai, Klong Ngae, Klong Pra-too, Klong Ra-Jamrai, Klong Tong, Klong Hin-lek-fai, Klong Wangyang, Klong Hwa, Klong Thum, Klong Wad and Klong Rean). For water quality prediction, this research evaluated waste load

by simulation and predicted changes of water quality in 2007, 2012, 2017, 2022 and 2027 under the conditions of BOD concentration from the livestock sector being reduced to lower than 60 mg/l, community and industry sectors BOD reduced to lower than 40 mg/l, and wastewater is reduced to lower than 10 mg/l of total loading. The results show:

1) waste load from community

This study used regression analysis for population estimate and predicted the waste load (PCD, 2006c) as shown in equation 1 and 2 as:

Wastewater (kg day⁻¹) =
$$\frac{\text{number of population} \times \text{human wastewater flow rate (m}^3 \text{ day}^{-1})}{1,000}$$
--1

Waste load (mg l⁻¹) =
$$\frac{\text{average BOD in wastewater rate (m}^3 \text{ l}^{-1}) \times \text{wastewater (kg day}^{-1})}{1,000}$$
--2

The result found that Klong Rean and Klong Ngae sub-watersheds had high waste loads. For the predicted periods of 2012, 2017, 2022 and 2027,

waste loads will be 3,511 kg/day, 3,831 kg/day, 3,511 kg/day, and 4,653 kg/day, respectively.

2) waste load from industry sector

The waste load from the industrial sector used data from Regional Environmental Office 16 (2006) and the industrial GDP rate. We found 53 factories in U-Tapao canal watershed (from a total of 228) that release wastewater into the river.

The results found that Klong Ngae sub-watersheds had high waste loads. For the

predicted periods 2012, 2017, 2022 and 2027, waste loads will be 708 kg/day, 760 kg/day, 813 kg/day, and 865 kg/day, respectively.

3) waste load from livestock sector

Regression analysis and livestock data from 1993 to 2006 by the Department of Livestock Development were used to estimate livestock growth (PCD, 2006a) as well as in equations 3 and 4 for waste load prediction:

$$\text{Wastewater (kg day)} = \frac{\text{number of cattle} \times \text{livestock wastewater flow rate (m}^3 \text{ day)}}{1,000} \quad \text{--3}$$

$$\text{Waste load (mg l)} = \frac{\text{average BOD in wastewater rate (ml l)} \times \text{wastewater (kg day)}}{1,000} \quad \text{--4}$$

The results found that Klong Lumnui-Rumyai sub-watershed has high waste load. For the predicted periods 2012, 2017, 2022 and 2027, waste load will be 951 kg/day, 885 kg/day, 819 kg/day, and 754 kg/day, respectively.

2. Water quality prediction

Baseline data from 4.1, and existing water quality data in dry and wet periods, is assessed by the WQ Module. BOD and DO assessment will occur in 2007, 2012, 2017, 2022 and 2027.

Biochemical oxygen demand (BOD) is a measure of the quantity of oxygen used by

microorganisms in the oxidation of organic matter. Natural sources of organic matter include plant decay and leaf fall. At U-Tapao canal watershed, the graphs show that BOD concentration will increase from upstream to midstream (location at 30-50 km from upstream) because that area cover with many human settlements, industry, and livestock sectors but drop markedly through the location at 60-90 km from upstream. BOD concentration drop because that area has sewage treatment plant by Hat Yai municipality (see Figure 10 to 14). And BOD concentration will high again at downstream or low land because of that location cover with many communities.

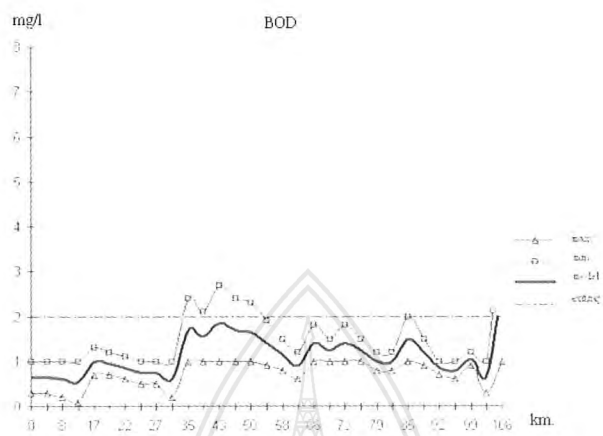


Figure 10. BOD prediction from waste load decrement in 2007: dry period

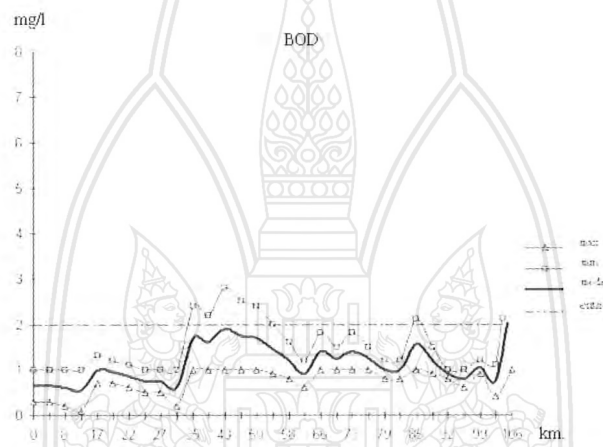


Figure 11. BOD prediction from waste load decrement in 2012: dry period

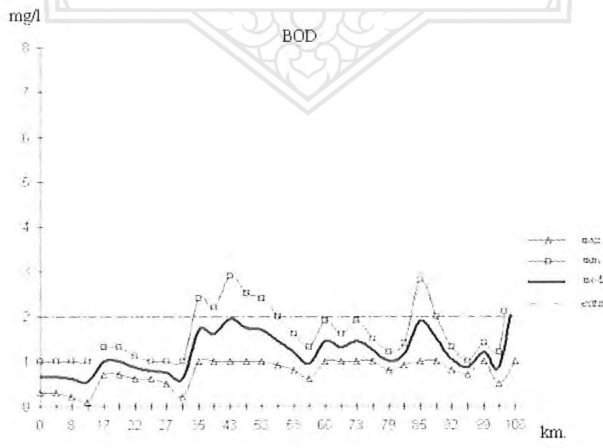


Figure 12. BOD prediction from waste load decrement in 2017: dry period

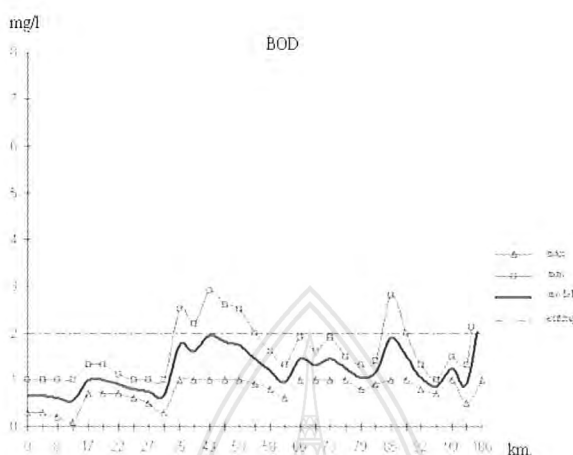


Figure 13. BOD prediction from waste load decrement in 2022: dry period

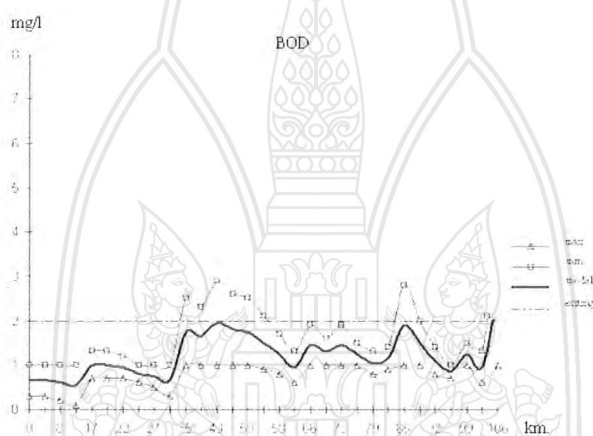


Figure 14. BOD prediction from waste load decrement in 2027: dry period

Dissolved oxygen (DO) refers to the volume of oxygen that is contained in water. Oxygen enters the water as rooted aquatic plants and algae undergo photosynthesis, and as oxygen is transferred across the air-water interface. The amount of oxygen that can be held by the water depends on the water temperature, salinity, and pressure. DO

may play a large role in the survival of aquatic. At U-Tapao canal watershed, the graphs show that DO will drop from upstream to downstream. Especially, DO will be fairly good (standard value for class 2) at 60-90 km from upstream because that area cover with Hat Yai municipality sewage treatment plant. (see Figure 14 to 19).

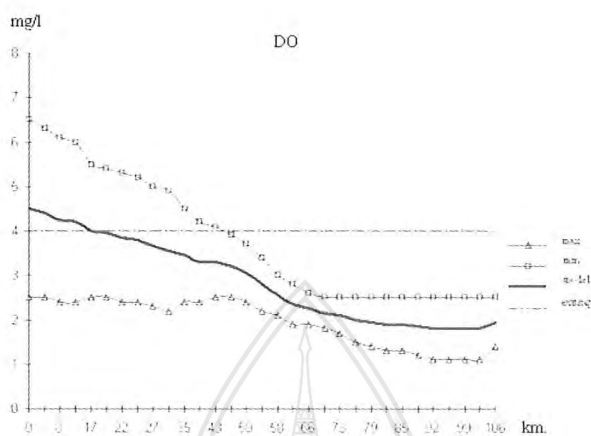


Figure 15. DO prediction from waste load decrement in 2007: dry period

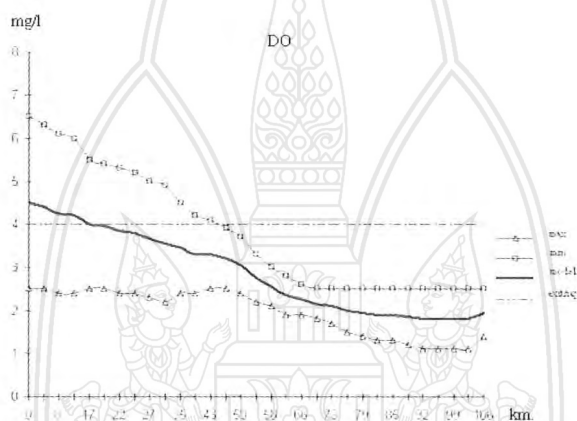


Figure 16. DO prediction from waste load decrement in 2012: dry period

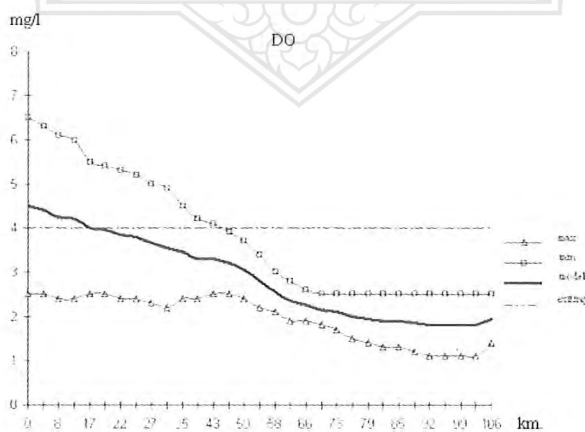


Figure 17. DO prediction from waste load decrement in 2017: dry period

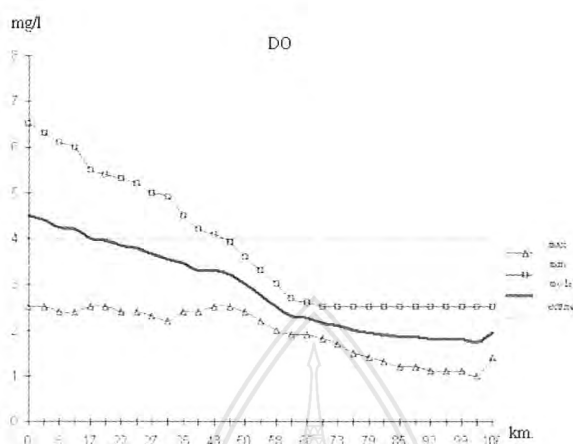


Figure 18. DO prediction from waste load decrement in 2022: dry period

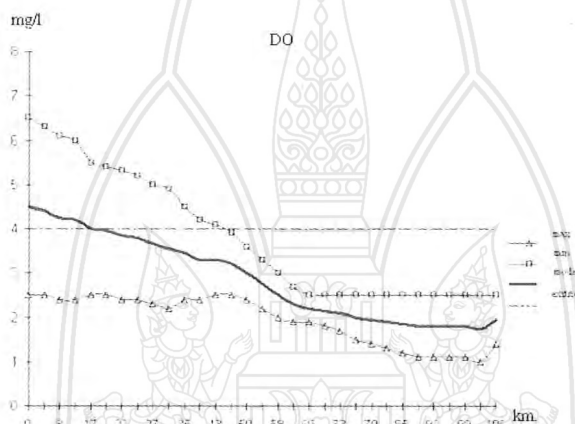


Figure 19. DO prediction from waste load decrement in 2027: dry period

Conclusions and Recommendations

Hydrology is central to management, restoration and creation of the environment. Most environmental loss and degradation which has taken place is associated with hydrological changes, while effort to stem and reverse negative trends frequently rely on future hydrological manipulations to achieve conditions conducive to certain plant and animal species (www.sciencedirect.com/science Journal of Hydrology Vol. 293, Issues 1-4, June 2004,

pp151-179, October 8, 2007). Using MIKE 11 for water quality assessment has limitations; the canals in the MIKE 11 model were simulated as being dry at this time, and hence the water surface areas for model reaches were probably overestimated throughout this period. This possibility highlights the need for detailed river profiles for a range of canal types, including those small, but often numerous, canals which are found in many watersheds but for which data is typically scarce. In general, modeling results

were in good agreement with observations. The highly seasonal nature of both groundwater and ditch water levels is clearly demonstrated.

After all modules have been studied, the results can predict future water quality, and this paper suggests that water quality improvements could be achieved by decreasing BOD from all point sources, and ensuring deliberate wastewater discharge totals under 90 percent of total wastewater (ONEP, 2004). After controlling these conditions, U-Tapao canal water quality will be fairly good (standard value for class 2) based on Surface Water Quality Standards (The Royal Government Gazette, 1994)

Model calibration and validation provides information necessary to evaluate the accuracy and reliability of results generated by the MIKE 11 Model (Jin and Ji, 2001). But the model must be continually updated in a timely manner. Maintaining, updating and enhancing a mathematic model require enormous amounts of resources. Therefore, a mathematic model that is for general purpose, is in the public domain and is available from and supported by government agencies is more likely to have a competitive advantage in long-term. In support management decision-making, a single model might not be able to represent all water quality components of interest, nor explain the complex water quality processes of concern.

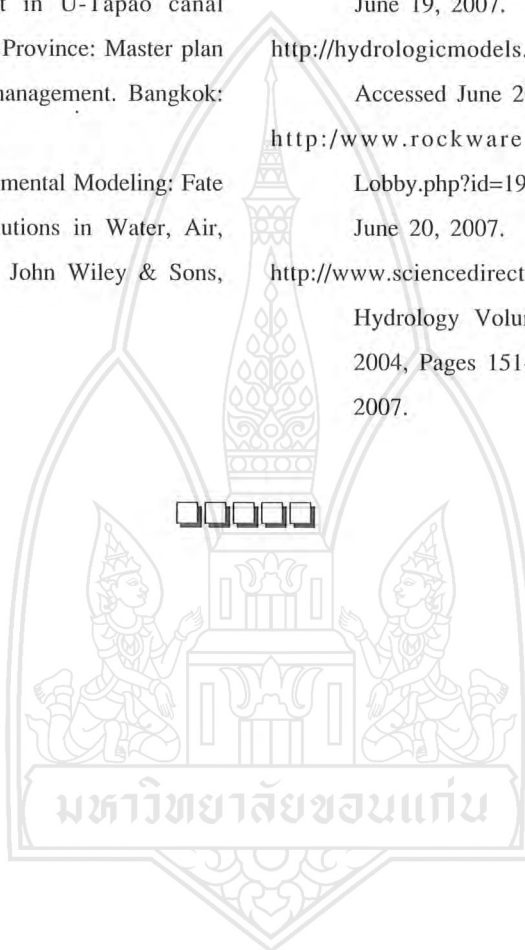
Acknowledgements

The paper was funded by the Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment, Thailand.

References

- Alfred, L. (1995). GPS satellite surveying. Wiley, New York, USA.
- DHI. (2006). Modeling the World of Water. Denmark: Vester Kopi, pp.13.
- Ji, Z.-G. (2006). Fate and transport in rivers, lakes, and estuaries. Standard Handbook of Environmental Science, Health, and Technology. New York: McGraw-Hill, pp. 8.47-8.55.
- Ji, Z.-G. (2008). Hydrodynamics and Water quality; modeling river, lakes, and estuaries. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, pp. 6-7.
- Jin, K.R. and Ji, Z.-G. (2001). Calibration and verification of Spectral Wind-wave Model for Lake Okeechobee. J. Hydraulic Engineering, pp 213-255.
- Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning/ ONEP. (2004). Master plan of waste and waste water management in Songkhla Basin. Bangkok: SD-Con Cooperation Inc.
- Pollution Control Department/ PCD. (2005). Songkhla Water Quality Monitoring Project Phase 1. Nakhon Pathom: Mahidol University.
- Pollution Control Department/ PCD. (2006a). Songkhla Water Quality Monitoring Project Phase 2. Nakhon Pathom: Mahidol University.
- Pollution Control Department/ PCD. (2006b). Lum-pum canal and U-Tapao canal conservation and remediation Project. Bangkok: E-square Inc.
- Pollution Control Department/ PCD. (2006c). Manual of agricultural waste water evaluation.

- Bangkok: Office of Water Quality Management, Pollution Control Department.
- Regional Environmental Office 16. (2006). Songkhla Water Quality Data. Songkhla: Regional Environmental Office 16.
- Royal Irrigation Department. (2002). Water Management Project in U-Tapao canal watershed, Songkhla Province: Master plan and EIA for Flood management. Bangkok: Kasetsart University.
- Schooner, J.L. (1996). Environmental Modeling: Fate and transport of Pollutions in Water, Air, and Soil. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- The Royal Government Gazette. (1994). The National Environmental Board, No.8, 1994, issued under the Enhancement and Conservation of Nation Environment Quality Act 1992. Bangkok, Thailand.
- <http://gcmd.nasa.gov/records/MIKE11.html>. Accessed June 19, 2007.
- <http://hydrologicmodels.tamu.edu/Mike11RR.doc>. Accessed June 20, 2007.
- <http://www.rockware.com/product/featuresLobby.php?id=191&category=409>. Accessed June 20, 2007.
- <http://www.sciencedirect.com/science>, Journal Of Hydrology Volume 293, Issues 1-4, June 2004, Pages 151-179. Accessed October 8, 2007.





**การสังเคราะห์ สมบัติเชิงความร้อน และสัณฐานวิทยา
ของพอลิ(เอปไซลอน-คาโพรแลคโตน)
พอลิ(แอล-แลคติกแอซิด) และพอลิเมอร์ผสม
Synthesis, Thermal Properties and Morphology of
Poly(ϵ -caprolactone) Poly(L-lactic acid) and Blends**

ชนกานต์ ปาณะวงศ์¹ และ ปวีณา มารไส^{1*}

บทคัดย่อ

พอลิ(เอปไซลอน-คาโพรแลคโตน) และพอลิ(แอล-แลคติกแอซิด) สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงของเอปไซลอน-คาโพรแลคโตน และการพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นของแอล-แลคติกแอซิด โดยมี สแตนนัสออกโทเอท เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR และ ¹H NMR พบพิกที่บ่งชี้ถึงการเกิดพอลิ(เอปไซลอน-คาโพรแลคโตน) และพอลิ(แอล-แลคติกแอซิด) จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GPC พบว่าน้ำหนัก โมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ทั้งสองที่สังเคราะห์ได้เท่ากับ 85,000 กรัม/โมล และ 68,000 กรัม/โมล ตามลำดับ เมื่อทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค DSC และ TG/DTA พบว่าสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น โดยพอลิเมอร์ผสม PCL/PLLA มีความเสถียรเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PCL สูงขึ้น

Abstract

Poly(ϵ -caprolactone), PCL and poly(L-lactic acid), PLLA were synthesized by ring opening polymerization of ϵ -caprolactone and direct condensation polymerization of L-lactic acid. Stannous octoate was used as a catalyst for polymerization. PCL and PLLA chemical structures were confirmed by FTIR and ¹H NMR. Gel Permeation Chromatography (GPC) of PCL and PLLA exhibited the highest average molecular weight 85,000 and 68,000 g/mol, respectively. Thermal properties of blends were investigated by DSC and

¹ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

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

TG/DTA techniques. The blends show improved thermal properties. It was found that thermal stability of PCL/PLLA blends increase with increasing of PCL content.

คำสำคัญ : พอลิ(ε-ไพลอน-คาโพรแลคโตน) พอลิ(แอล-แลคติกแอซิด) พอลิเมอร์ผสม สมบัติเชิงความร้อน

Keywords : Poly(ε-caprolactone), Poly(L-lactic acid), Polymer blends, Thermal properties

บทนำ

พอลิเมอร์ในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ที่มีโครงสร้างเป็นอะลิฟาติก สามารถย่อยสลายได้ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสหรือเอนไซม์ มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์เนื่องจากสามารถเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อเมื่ออยู่ในร่างกายมนุษย์ (biocompatibility) เมื่อย่อยสลายแล้วจะไม่เป็นอันตรายหรือกลายเป็นสารพิษทำลายเนื้อเยื่อ โดยนิยมนำพอลิ(ε-ไพลอน-คาโพรแลคโตน) [Poly(ε-caprolactone), PCL] และ พอลิ(แอล-แลคติกแอซิด) [Poly(L-lactic acid), PLLA] ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพประยุกต์ใช้เป็นโครงข่ายรองรับ (scaffold) วัสดุปลูกแผล และแคลปซูลบรรจุยาที่ต้องการให้ปลดปล่อยยาออกมาอย่างช้าๆ เป็นต้น (Qian et al., 1999) จากรายงานการวิจัยหลายปีที่ผ่านมาพบว่า PLLA และ PCL ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงต้องสังเคราะห์จากการพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงของแลคไทด์และε-ไพลอน-คาโพรแลคโตน โดยใช้สแตนนัสออกโทเอท (Sn(Oct)₂) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Liu et al., 2000) ส่วนการสังเคราะห์ PLLA จาก แอล-แลคติกแอซิด นั้นมีน้ำหนักโมเลกุลเพียง 10,000 กรัม/โมล ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน (Chen et al., 2006) โดย PLLA ที่สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มหรือเส้นใยได้ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งการสังเคราะห์ PLLA ผ่านพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นจากแอล-แลคติกแอซิด จะให้น้ำหนักโมเลกุลไม่สูงนักส่งผลให้การขึ้นรูปของพอลิเมอร์เป็นไปได้ยากยิ่งไปกว่านั้น PLLA มีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ส่งผลให้พอลิเมอร์มีลักษณะเปราะ และแตกหักได้ง่าย นอกจากนี้ยังพบว่า การสังเคราะห์ PCL โดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงเป็นพอลิเมอร์ (% yield) สูงถึง

94.1 เปอร์เซนต์ (Qian et al., 1999) PCL มีสมบัติเด่นๆ หลายอย่าง เช่น มีความเป็นไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) ซึ่งทนต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึก และมีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง จึงมีความยืดหยุ่นได้ดี (He et al., 2004) ดังนั้นถ้านำพอลิเมอร์สองชนิดนี้มาเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมแล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม อาจจะช่วยทำให้พอลิเมอร์ขึ้นรูปได้ง่าย แม้ว่า PLLA ที่สังเคราะห์ได้จะมีน้ำหนักโมเลกุลไม่สูงมากนักก็ตาม โดยใช้เทคนิคการผสมในสถานะสารละลาย (Solution blending) ซึ่งเป็นวิธีที่เตรียมได้ง่ายและประหยัด ในงานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์ PCL และ PLLA และเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PCL กับ PLLA พร้อมทั้งศึกษาลักษณะเฉพาะทางโครงสร้าง สมบัติเชิงความร้อน และพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ และของพอลิเมอร์ผสม

อุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการทดลอง

สารเคมี

ε-ไพลอน-คาโพรแลคโตน (ε-caprolactone 99%) และแอล-แลคติกแอซิด (L-lactic acid, LLA 85-90% in water) จากบริษัท Fluka ก่อนนำ LLA ไปใช้ต้องทำให้บริสุทธิ์ โดยนำ LLA ประมาณ 100 มิลลิลิตร เติมนลงในขวดกั่นกลม แล้วต่อเข้ากับชุดกลั่นแบบลดความดัน โดยกลั่นที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ภายใต้อากาศ 10 มิลลิเมตรปรอท จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็น เก็บที่อุณหภูมิ 4-5 องศาเซลเซียส ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา สแตนนัสออกโทเอท (Sn(Oct)₂) จากบริษัท Aldrich ไดคลอโรมีเทน (CH₂Cl₂) และเมทานอล (CH₃OH) จากบริษัท Aldrich และ Fluka ตามลำดับ

การสังเคราะห์พอลิ(เอปไชลอน-คาโพรแลกโตน)

การสังเคราะห์ PCL ใช้กระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย (solution Polymerization) มี $\text{Sn}(\text{Oct})_2$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเติมเอปไชลอน-คาโพรแลกโตน 2 กรัม ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.01 กรัม และ CH_2Cl_2 10 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลมสองคอขนาด 100 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน พร้อมกับกวนตลอดเวลา ได้สารละลายใส ไม่มีสีค่อนข้างหนืด ละลายด้วย CH_2Cl_2 10 มิลลิลิตร แล้วตกตะกอนด้วย CH_3OH จากนั้นกรองตะกอนที่ได้ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง PCL ที่ได้มีลักษณะเป็นผงสีขาว น้ำหนักประมาณ 0.7 กรัม

การสังเคราะห์พอลิ(แอล-แลคติก แอซิด)

การสังเคราะห์ PLLA ผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบบัลค์ โดยขัง LLA ที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์แล้ว 10 กรัม และ $\text{Sn}(\text{Oct})_2$ 0.5 กรัม ลงในขวดก้นกลมสองคอ ขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วกวนของผสมต่อเนื่องเป็นเวลา 40 ชั่วโมง ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 10 มิลลิเมตรปรอท จากนั้นละลายและตกตะกอนสารด้วย CH_2Cl_2 และ CH_3OH ตามลำดับ แล้วกรองตะกอนพอลิเมอร์ที่ได้ นำไปอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง PLLA ที่ได้มีลักษณะเป็นผงสีขาวน้ำหนักประมาณ 4 กรัม (ปัทมาเปลี่ยนประเสริฐ, 2552)

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิ(เอปไชลอน-คาโพรแลกโตน) และพอลิ(แอล-แลคติกแอซิด)

ผสม PCL และ PLLA ในอัตราส่วน 100:0 90:10 80:20 70:30 60:40 50:50 และ 0:100 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ละลายด้วย CH_2Cl_2 ความเข้มข้น 10% w/v (น้ำหนักพอลิเมอร์ผสมรวม 0.5 กรัม ใน CH_2Cl_2 5 มิลลิลิตร) แล้วเทสารละลายที่ได้ลงใน petri dish นำไปอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น

การวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของพอลิเมอร์

วิเคราะห์โครงสร้างของ PCL PLLA และพอลิเมอร์ผสม PCL และ PLLA ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) โดยใช้เครื่อง FTIR spectrometer รุ่น Spectrum one FTIR สำหรับการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการวัด FTIR สามารถเตรียมโดยนำตัวอย่างประมาณ 20 มิลลิกรัม ละลายใน CH_2Cl_2 หยดสารละลายลงบนโซเดียมคลอไรด์เซลล์ แล้วระเหยตัวทำละลายออก นำมาวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่แสดงเอกลักษณ์ของพอลิเมอร์ ในช่วงเลขคลื่น 450 - 4000 ซม.⁻¹

วิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy โดยใช้เครื่อง NMR spectrometer รุ่น Mercury plus As 400 MHz (vanian) ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับตรวจสอบด้วยเทคนิค ¹H NMR ทำได้โดยขังสารตัวอย่างประมาณ 10 มิลลิกรัม ละลายใน CDCl_3 ให้มีความเข้มข้นของสารตัวอย่างประมาณ 5% w/v

วิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค Gel Permeation Chromatography, GPC โดยเครื่องมือประกอบด้วย 2414 Refractive Index detector Water 515 HPLC pump และ GPC column ผลิตโดยบริษัท Waters โดยเตรียมตัวอย่างความเข้มข้น 0.1% w/v มีเตตระไฮโดรฟิวแรน (THF) เป็นตัวทำละลาย ใช้พอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์มาตรฐาน ที่อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตร/นาที ปริมาตรการฉีด 20 ไมโครลิตร และใช้อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

ศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry, DSC รุ่น Pyris 1 Perkin Elmer ซึ่งบอกถึงอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (T_g) อุณหภูมิหลอม (T_m) รวมทั้งความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ โดยขังสารตัวอย่างประมาณ 10 mg ใส่ลงในถาดอะลูมิเนียม (aluminum pan) แล้วนำไปวิเคราะห์ให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ -80 ถึง 230 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศ

ในโครเจนจากนั้นศึกษาสมบัติความเสถียรต่อความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric/Differential Thermal Analysis (TG/DTA) ทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 50-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยอัตราการเพิ่มความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที สารอ้างอิงที่ใช้ คือ alumina (Al_2O_3) ด้วยเครื่อง Pyris diamond TG/DTA (Perkin Elmer Instrument, USA) ชั่งสารตัวอย่างและสารอ้างอิงประมาณ 10 มิลลิกรัม ใส่ลงในถาดอลูมิเนียม โดยน้ำหนักของสารตัวอย่างและสารอ้างอิงต้องต่างกันไม่เกิน 5 มิลลิกรัม

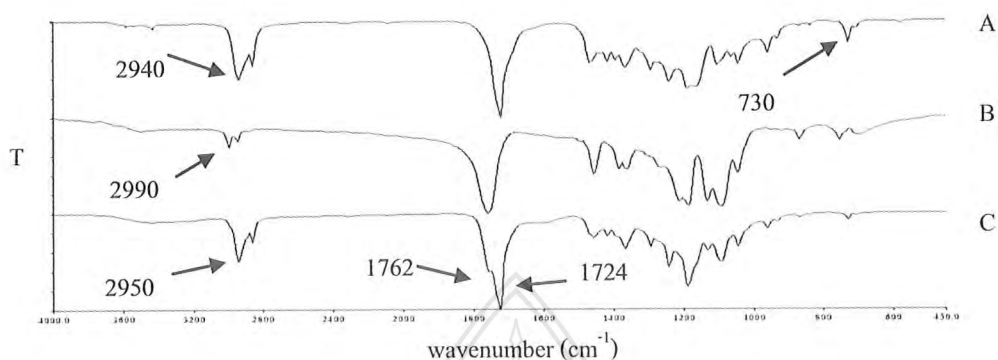
ศึกษาลักษณะพื้นผิวภาคตัดขวางของฟิล์มพอลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยใช้เครื่อง SEM ผลิตโดยบริษัท LEO ประเทศอังกฤษ รุ่น LEO Electron microscopy LEO 1450VP เตรียมตัวอย่างโดยนำฟิล์มพอลิเมอร์มาจุ่มในไนโตรเจนเหลว หักตัวอย่างแล้วนำไปติดบนแทปคาร์บอน บนวัสดุรองรับ (Stub) จากนั้นนำไปเคลือบด้วยทอง โดยใช้เครื่องเคลือบทอง (Sputter coater)

ผลการทดลองและอภิปราย

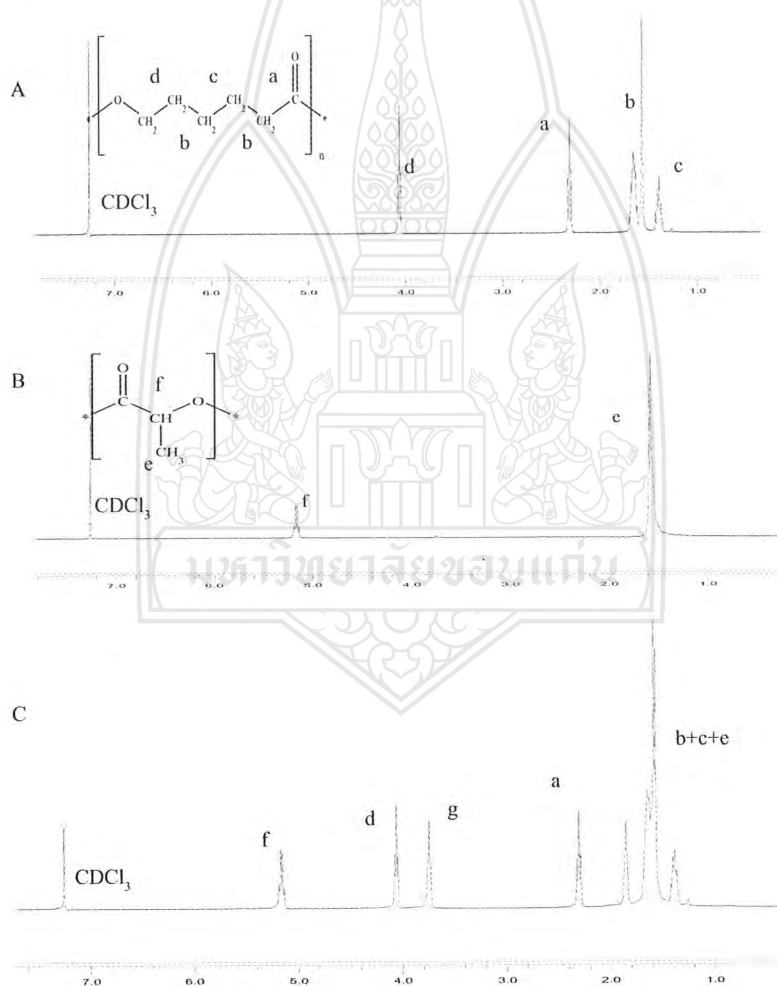
การวิเคราะห์โครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลของพอลิ(เอปไซลอน-กาโพรแลคโตน) พอลิ(แอล-แลคติกแอซิด) และพอลิเมอร์ผสม

จากการสังเคราะห์ PCL และ PLLA ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงเป็นพอลิเมอร์ 29 และ 40 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อนำพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่สังเคราะห์ได้มาขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ พบว่าสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ แต่เห็นได้ชัดว่าแผ่นฟิล์มของ PCL มีความยืดหยุ่นมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นฟิล์มของ PLLA ซึ่งมีความเปราะและฉีกขาดง่าย ส่วนการเตรียมแผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PCL และ PLLA ทำให้สามารถขึ้นรูปและลอกเป็นแผ่นฟิล์มได้ง่าย นอกจากนี้แผ่นฟิล์มนั้นยังมีความยืดหยุ่นมากขึ้นตามปริมาณของ PCL ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแผ่นฟิล์มมีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น ความหนาประมาณ 0.2 มิลลิเมตร

นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค FTIR และ ^1H NMR ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย FTIR แสดงดังรูปที่ 1 จากสเปกตรัมของ PCL (รูปที่ 1(A)) พบการดูดกลืนที่เกิดจากการยืดของพันธะ $\text{C}=\text{O}$ ที่เลขคลื่น $1,724\text{ cm}^{-1}$ และการยืดของ $\text{C}-\text{H}$ ใน CH_2 ที่เลขคลื่น $2,940\text{ cm}^{-1}$ ส่วนการยืดของ $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ ของอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (aliphatic polyester) ปรากฏที่เลขคลื่น 730 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการเปิดวงของเอปไซลอน-กาโพรแลคโตน (Gan et al., 1999) รูปที่ 1(B) เป็นสเปกตรัมของ PLLA ปรากฏพีคของ $\text{C}=\text{O}$ ของหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ที่ตำแหน่ง $1,760\text{ cm}^{-1}$ และพีคการยืดของ $\text{C}-\text{H}$ ใน CH_2 ที่เลขคลื่น $2,990\text{ cm}^{-1}$ ส่วนรูปที่ 1(C) เป็นสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม จะเห็นว่าพีคของ $\text{C}=\text{O}$ จะกว้างและมีสองพีคในฐานพีคเดียวกัน ซึ่งเกิดจากการรวมพีคของ PCL และ PLLA (Chen et al., 2003) จากนั้นตรวจสอบลักษณะเฉพาะทางโครงสร้างของพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค ^1H NMR ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าสเปกตรัมของ PCL (รูปที่ 2(A)) ปรากฏพีคของเมทิลีนโปรตรอน (CH_2) ในตำแหน่งต่างๆ ดังนี้ $1.39\ 1.60\ 2.32$ และ 4.05 ppm ตามลำดับ ส่วนสเปกตรัมของ PLLA (รูปที่ 2(B)) ปรากฏพีคของเมทิลโปรตรอน (CH_2) ที่ตำแหน่ง 1.55 ppm และพีคมีโทน์โปรตรอน (CH) ที่ตำแหน่ง 5.2 ppm (Gan et al., 1999) นอกจากนี้สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม (รูปที่ 2 (C)) มีการซ้อนเหลื่อมกันที่ $1.37\text{-}1.62\text{ ppm}$ ซึ่งเป็นพีคของ CH_3 และ CH_2 ที่ตำแหน่ง b c และ e มีการเลื่อนของพีค CH_2 ในตำแหน่ง a ($-\text{CH}_2-\text{COO}-$) มาที่ 2.30 ppm พีค CH_2 ในตำแหน่ง d ($-\text{CH}_2\text{O}-$) มาที่ 4.07 ppm และพีคของ CH ในตำแหน่ง f ($-\text{CH}-\text{COO}-$) มาที่ 5.17 ppm ยิ่งไปกว่านั้นที่ 3.69 ppm ของตำแหน่ง g ยังพบพีค $-\text{CH}_2-\text{OH}$ คาดว่าเป็นจุดที่ PCL เกิดอันตรกิริยากับ PLLA โดยที่ไฮโดรเจนที่ปลายสายโซ่ของ PLLA จะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่คาร์บอนิลของ PCL ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hoidy et al. (2010)



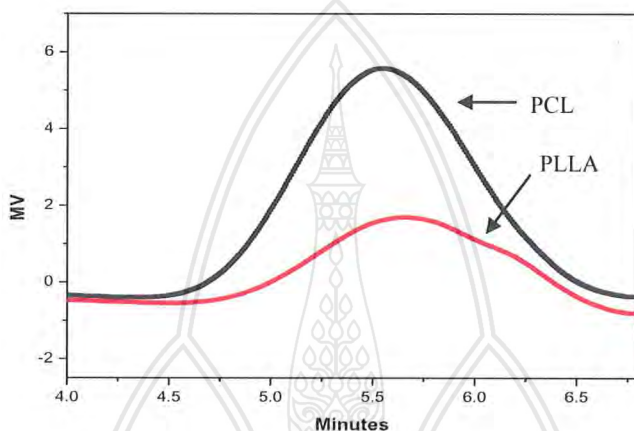
รูปที่ 1 FTIR สเปกตรัมของ (A) PCL (B) PLLA (C) พอลิเมอร์ผสม PCL/PLLA อัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 2 ^1H NMR สเปกตรัมของ (A) PCL (B) PLLA (C) พอลิเมอร์ผสม PCL/PLLA อัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก

เมื่อนำพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค GPC โครมาโตแกรมที่ได้แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของ PCL เท่ากับ 85,000 กรัม/โมล ค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 2.21 และ PLLA มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก 68,000

กรัม/โมล ส่วนค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 1.46 โดยที่ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาของ PLLA จะมีน้ำเกิดขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม และที่ความดัน 10 มิลลิเมตรปรอท อาจกำจัดน้ำออกจากระบบไม่หมด ซึ่งน้ำจะส่งผลให้ PLLA ที่สังเคราะห์ได้มีน้ำหนักโมเลกุลลดลง



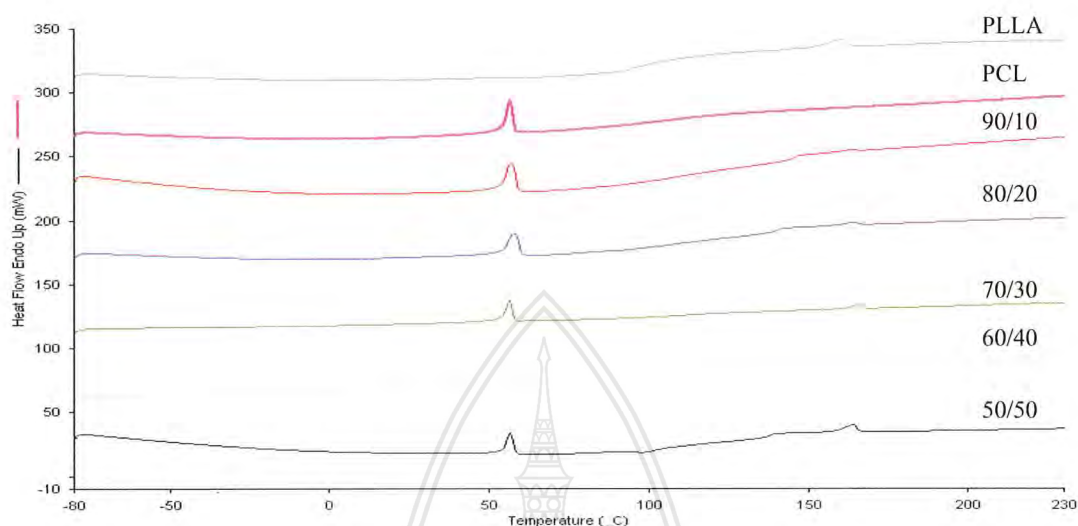
รูปที่ 3 GPC โครมาโตแกรมของ PCL และ PLLA

สมบัติเชิงความร้อน

จากการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ PCL PLLA และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PCL กับ PLLA (รูปที่ 4) พบค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (T_g) ของ PCL ที่ -56 องศาเซลเซียส และ PLLA ที่ 65 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิหลอม (T_m) ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเท่ากับ 57 และ 160 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พอลิเมอร์ผสมไม่แสดง T_g อย่างชัดเจน แต่แสดง T_m สองตำแหน่งในช่วง 56-166 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งอุณหภูมิหลอมของพอลิเมอร์ผสมจะใกล้เคียงกับอุณหภูมิหลอมของ PCL บริสุทธิ์ แต่จะสูงกว่าอุณหภูมิหลอมของ PLLA บริสุทธิ์ จะเห็นว่าอุณหภูมิหลอมของพอลิเมอร์ผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ PCL สูงขึ้น เมื่อคำนวณหาร้อยละความ

เป็นผลึก (X_c) ของพอลิเมอร์จากพื้นที่ใต้พีคของอุณหภูมิหลอม โดยใช้ความสัมพันธ์ของเอนทัลปีของการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ (ΔH_m) ต่อเอนทัลปีของการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างผลึกสมบูรณ์ (ΔH_m^o) ดังสมการ (1) โดยที่ $\Delta H_m^o \text{PCL} = 136.1$ จูล/กรัม และ $\Delta H_m^o \text{PLLA} = 93.6$ จูล/กรัม (Yuan et al., 2007) พบว่าร้อยละความเป็นผลึกของ PLLA ลดลงเมื่อปริมาณของ PCL ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจาก PCL ขัดขวางการเกิดผลึกของ PLLA โดย PCL เข้าไปแทรกภายในโครงสร้าง PLLA ทำให้การจัดเรียงตัวของโครงสร้างพอลิเมอร์มีความไม่เป็นระเบียบเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ T_m ที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม

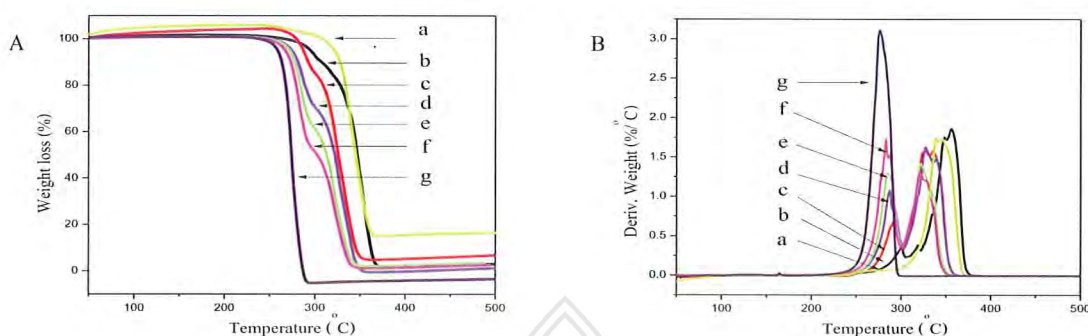
$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^o} \times 100 \% \quad (1)$$



รูปที่ 4 DSC เทอร์โมแกรมของ PCL PLLA และพอลิเมอร์ผสม PCL/PLLA ที่อัตราส่วน 90:10 80:20 70:30 60:40 และ 50:50 โดยน้ำหนัก

เมื่อศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของ PCL ด้วยเทคนิค TG/DTA ได้เทอร์โมแกรม TGA ดังแสดงในรูป 5(A) พบว่าช่วงอุณหภูมิ 50-310 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียน้ำหนักอย่างช้าๆ ช่วง 310-360 องศาเซลเซียส เป็นเส้นกราฟที่ชันมากขึ้น แสดงว่ามีการสูญเสียน้ำหนักอย่างรวดเร็วและพบว่า PCL มีการสูญเสียน้ำหนักประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 328 องศาเซลเซียส และมีการสูญเสียน้ำหนัก 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 345 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 1 จากเทอร์โมแกรม DTG (รูปที่ 5(B)) พบว่าเกิดการสูญเสียน้ำหนักของ PCL ด้วยอัตราสูงสุด 1.74 mg/min อยู่ที่ประมาณ 339 องศาเซลเซียส ส่วนการสลายตัวของ PLLA ลักษณะเทอร์โมแกรมจะคล้ายกับกรณีของ PCL นอกจากนี้เทอร์โมแกรมของ TGA เกิดการสูญเสียน้ำหนักของ PLLA ไป 10 เปอร์เซ็นต์และ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 263 องศาเซลเซียส และ 274 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเทอร์โมแกรม DTG ของ PLLA แสดงอัตราการสูญเสียน้ำหนัก สูงสุดที่อุณหภูมิ 276 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็ว 3.09 มิลลิกรัม/นาที

สำหรับพอลิเมอร์ผสมมีการสลายตัวเป็นสองช่วง โดยช่วงแรกเป็นการสลายตัวของ PLLA ที่อุณหภูมิประมาณ 282 - 299 องศาเซลเซียส และช่วงที่สองเป็นการสลายตัวของ PCL ที่อุณหภูมิ 321 - 356 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังแสดงถึงอุณหภูมิที่เกิดการสูญเสียน้ำหนักประมาณ 10 และ 50 เปอร์เซ็นต์ของพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วนต่างๆ ไว้ในตารางที่ 1 จะเห็นว่าที่อัตราส่วน 90:10 โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 299 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราสูงสุด 0.33 มิลลิกรัม/นาที และอุณหภูมิ 356 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราสูงสุด 1.85 มิลลิกรัม/นาที ตามลำดับ แสดงว่าพอลิเมอร์ผสมมีความเสถียรต่อความร้อนมากกว่า PLLA แต่น้อยกว่า PCL และในพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วนอื่นๆ พบว่ามีความเสถียรต่อความร้อนมากกว่า PLLA แต่น้อยกว่า PCL เช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสม PCL/PLLA มีค่าความเสถียรทางความร้อนสูงขึ้น เนื่องจาก PCL เกิดอันตรกิริยากับ PLLA โดยไฮโดรเจนที่ปลายสายโซ่ของ PLLA จะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่คาร์บอนิลของ PCL (Sivalingam et al., 2004)



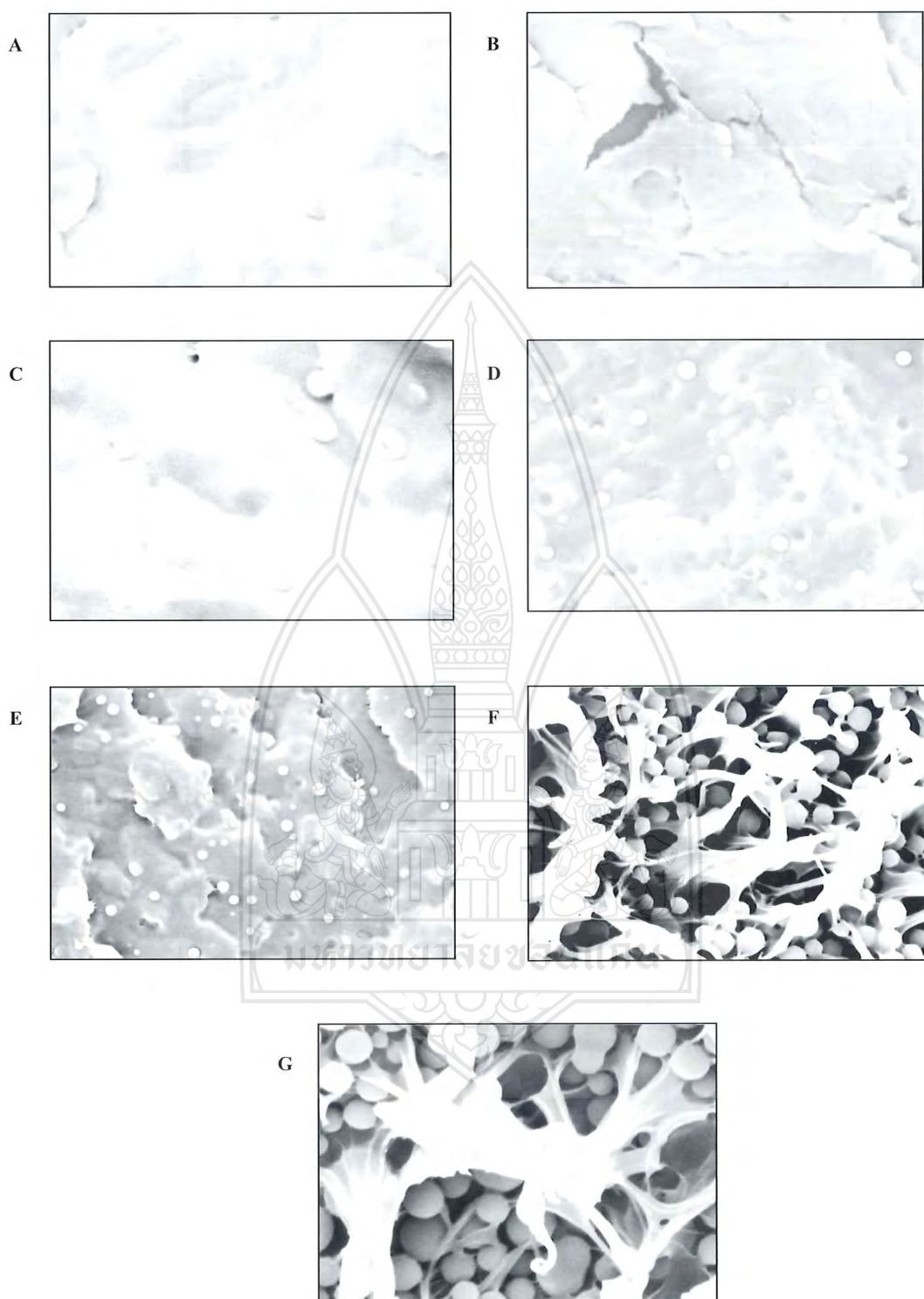
รูปที่ 5 (A) TG และ (B) DTG เทอร์โมแกรมของ (a) PCL (b-f) พอลิเมอร์ผสม PCL/PLLA อัตราส่วน (b) 90:10 (c) 80:20 (d) 70:30 (e) 60:40 (f) 50:50 (g) PLLA

ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิค SEM

ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวภาคตัดขวางของพอลิเมอร์โดยเทคนิคการถ่ายภาพ SEM ด้วยกำลังขยาย 5000 เท่าดังแสดงในรูปที่ 6A แสดงพื้นผิวภาคตัดขวางของ PCL ซึ่งแผ่นฟิล์มต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียว ส่วนในรูปที่ 6B ของ PLLA มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน แต่แผ่นฟิล์มไม่ต่อเนื่องมีรอยแยกชัดเจน แสดงถึงความเปราะซึ่งเป็นข้อด้อยของพอลิเมอร์ให้เห็น สำหรับรูปที่ 6C เป็นของพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วน 90:10 โดยน้ำหนัก พบว่า PLLA กระจายอยู่ในส่วนของ PCL นั่นคือ PLLA จะมีลักษณะเป็นเม็ดค่อนข้างกลมกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของ PCL และมีลักษณะคล้ายๆ กันในทุกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม แต่จะมีมากขึ้นเมื่อปริมาณของ PLLA เพิ่มขึ้น (รูปที่ 6D-G) (He et al., 2004) แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมไม่สามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้

สรุปผลการทดลอง

สามารถสังเคราะห์ PCL ผ่านกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวงคาโพรแลคโตนได้ มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักเท่ากับ 85,000 กรัม/โมล ส่วน PLLA ที่สังเคราะห์ได้มีน้ำหนักโมเลกุลไม่สูงมากนัก (68,000 กรัม/โมล) และเตรียมพอลิเมอร์ทั้งสองให้อยู่ในรูปของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้ ซึ่งแผ่นฟิล์มนั้นมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PCL ที่สูงขึ้น และพบว่าพอลิเมอร์ผสม PCL และ PLLA เกิดอันตรกิริยาต่อกัน ส่งผลให้มีความเสถียรต่อความร้อนมากกว่า PLLA แต่น้อยกว่า PCL จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC และ TG/DTA แต่ไม่สามารถเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PCL และ PLLA ให้เป็นเนื้อเดียวกันได้ เห็นได้จากภาพถ่ายพื้นผิวภาคตัดขวางของฟิล์มพอลิเมอร์จากเทคนิค SEM



รูปที่ 6 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5,000 เท่า สเกล 1 μm ของ (A) PCL (B) PLLA และ (C-G) พอลิเมอร์ผสม PCL/PLLA อัตราส่วน (C) 90:10 (D) 80:20 (E) 70:30 (F) 60:40 (G) 50:50

ตารางที่ 1 สมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์

ตัวอย่าง PCL/PLLA	PCL			PLLA			DTG ^B		TG ^B	
	T _m ^A (°C)	ΔH _m ^A (J/g)	X _c ^A (%)	T _m ^A (°C)	ΔH _m ^A (J/g)	X _c ^A (%)	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	อุณหภูมิการสูญเสียน้ำหนัก 10%	อุณหภูมิการสูญเสียน้ำหนัก 50% (°C)
PCL	57.04	49.98	36.72	-	-	-	339	-	328	345
PLLA	-	-	-	160.2	21.85	23.34	276	-	263	274
PCL/PLLA; 90/10	56.89	48.76	35.82	166.08	2.48	2.64	299	356	307	346
PCL/PLLA; 80/20	56.17	45.31	33.29	164.08	5.20	5.55	292	335	292	326
PCL/PLLA; 70/30	56.22	36.46	26.78	165.72	9.15	9.77	287	327	281	322
PCL/PLLA; 60/40	56.4	32.91	24.18	165.91	12.15	12.98	284	321	277	313
PCL/PLLA; 50/50	56.43	29.33	21.55	163.76	16.63	17.76	282	321	273	304

A จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry
B จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermogravimetric/Differential Thermal Analysis

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยนาโนเทคโนโลยีบูรณาการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สำหรับทุนสนับสนุนในการวิจัย ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- ปัทมิตา เปลี่ยนประเสริฐ. (2552). การสังเคราะห์ พอลิแอลแลกติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสม เพื่อประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์. [วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี] ขอนแก่น: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย ขอนแก่น.
- Chen, C., and Chueh, J. Y. (2003). Preparation and characterization of biodegradable PLA polymeric blends. *Biomaterials*. 24: 1167-1173.
- Gan Z., Yu D., Hong, Z., and Jing, X. (1999). Enzymatic degradation of poly (ϵ -caprolactone)/(DL- lactide) blend phosphate buffer solution. *Polymer*. 40: 1859-2862.
- He, A., Han, C., and Yang, G. (2004). Preparation and characterization of PLLA/P (CL-b-LLA) blends by an in ring opening polymerization. *Polymer*. 45: 8231-8237.
- Hoidy, W. H., Ahmad, M B., Jaffar, E. A. and Ibrahim, N. A. (2010). Preparation and characterization of polylactic acid/ polycaprolactone clay nanocomposites. *Applied sciences*. 2: 97-106.
- Liu, L., Li, S., Garreau, H., and Vert, M. (2000). Selective enzymatic degradations of Poly (L-lactide) and Poly(α -caprolactone) blend films. *Biomacromolecules*. 1: 350-359.
- Qian, H., Bei, J. and Wang, S. (1999). Synthesis, characterization and degradation of ABA block copolymer of L-lactide and caprolactone. *Polymer Degradation and Stability*. 68: 423-429.
- Sivalingam, G., Karthik, R. and Madras, G. (2004). Blends of poly(α -caprolactone) and poly (vinyl acetate): mechanical properties and thermal degradation. *Polymer Degradation and Stability*. 84: 345-351.
- Yuan, W., Zhang, F. and Xie, X. (2007). Synthesis, characterization, and in vitro degradation of ethyl cellulose-graft-poly(α -caprolactone)-block-poly(L-lactide) copolymers by sequential ring-opening polymerization. *Biomacromolecules*. 8: 1101-1108.





ระบบสร้างชุดข้อสอบโดยใช้การค้นหาแบบตาบ Examination Paper Generation System Using Tabu search

พยอม เหล่าชุมพล¹ พุทธดี ศิริแสงตระกูล^{1*}

บทคัดย่อ

ข้อสอบเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยในการวัดและประเมินผลผู้เรียน การสร้างชุดข้อสอบเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยุ่งยากและใช้เวลามาก เนื่องจากข้อสอบที่สร้างขึ้นต้องมีการกระจายให้ครบทุกจุดประสงค์ของการเรียนรู้ งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาโปรแกรมประยุกต์เพื่อสร้างชุดข้อสอบด้วยการประยุกต์ใช้การค้นหาแบบตาบ เพื่อแก้ปัญหาในการคัดเลือกข้อสอบให้ครบถ้วนตามจุดประสงค์การเรียนรู้ และการเลือกข้อสอบให้ไม่ซ้ำข้อเดิม ระบบสร้างชุดข้อสอบที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้ การประมวลผลทั้งหมดดำเนินงานผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยใช้เทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชัน โดยระบบประกอบด้วยฐานข้อมูลที่รวบรวมข้อมูลรายวิชา หน่วยการเรียนรู้ จุดประสงค์การเรียนรู้ ข้อสอบ และผู้ใช้ระบบ นอกจากนี้ระบบยังสามารถจัดพิมพ์ชุดข้อสอบและชุดเฉลยข้อสอบได้ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น ครูผู้สอนในแผนกคอมพิวเตอร์ธุรกิจ วิทยาลัยเทคนิคสกลนคร จำนวน 10 คน ได้ทดลองใช้ระบบสร้างชุดข้อสอบเพื่อผลิตข้อสอบวิชาโปรแกรมสำเร็จรูปในงานอาชีพและวิชาหลักเศรษฐศาสตร์ ระดับ ปวส.1 ค่าเฉลี่ยของการประเมินผลความพึงพอใจของครูต่อระบบสร้างชุดข้อสอบผ่านแบบสอบถาม พบว่าร้อยละ 94.67 และ ร้อยละ 5.33 ของครูที่ตอบแบบสอบถามประเมินความพึงพอใจระบบงานโดยรวมในระดับดีมาก และ ดี ตามลำดับ

Abstract

Examination paper is an important tool for the measurement and evaluation of learning. The generation of exam papers is extremely time consuming because of the need to match the questions in each exam paper to the learning outcomes of each subject. This process can lead to the duplication of questions and possible errors. The objective of this research was to develop an examination paper generation system

¹ ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

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

based on the Tabu search algorithm. The proposed system can select exam items according to the purpose of learning without duplicate examination papers in the same test.

The proposed system was developed under web-based application architecture. This system is comprised of a database of subjects, a study unit, the purpose of learning and users. The system can print source examination papers and the relevant answers. In order to evaluate the performance of the system, ten teachers from the Department of Business Computing were asked to test the system and give their opinions to judge the system through a prepared questionnaire. The teachers, five of whom teach on Computer Package at Work subject and five on the Principles of Economics subject, used the system to create exam papers for their subjects. The results show that overall user satisfactions with the examination paper generation system are 94.67% and 5.33% an average at the highest and high levels, respectively.

คำสำคัญ : การประเมินผล การค้นหาแบบตาบู่ เว็บแอปพลิเคชัน ระบบสร้างชุดข้อสอบ

Keywords : Evaluation, Tabu Search, Web Application, Examination Paper Generation System

บทนำ

การวัดผลและการประเมินผลการศึกษาเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของการศึกษาในด้านการเรียนการสอน ปัจจุบันครูเป็นผู้สร้างข้อสอบจะต้องใช้เวลาและความคิดในการสร้างแบบทดสอบ อีกทั้งต้องทำการวิเคราะห์ข้อสอบก่อนนำไปใช้ เพื่อให้ได้ข้อสอบที่มีคุณภาพ มีข้อสอบครบทุกจุดประสงค์การเรียนรู้ จึงทำให้การสร้างชุดข้อสอบในแต่ละครั้งนั้นเป็นเรื่องที่ยุ่งยาก และใช้เวลานาน ปัจจุบันมีงานวิจัยหลายงานได้นำเสนอระบบสร้างข้อสอบอัตโนมัติ โดยการประยุกต์ใช้อัลกอริธึมด้านปัญญาประดิษฐ์ เช่น เจเนติกอัลกอริธึม เพื่อช่วยในการสร้างข้อสอบให้เป็นไปตามเงื่อนไข แต่ยังมีปัญหาเรื่องความสอดคล้องและความเร็วในการประมวลผลให้เป็นไปตามเงื่อนไข (Wu et al., 2009) (Wei Huang et al., 2008)

งานวิจัยนี้จึงได้นำวิธีการค้นหาแบบตาบู่มาช่วยแก้ปัญหาในการค้นหาเลือกข้อสอบ เนื่องจากเป็นวิธีการค้นหาคำตอบจากบริเวณข้างเคียงคำตอบที่ดีที่สุดขณะนั้น โดยจะมีข้อห้ามไม่ให้ค้นหาซ้ำกับเซตของคำตอบเดิมที่มีอยู่หรือที่เรียกว่ารายการต้องห้าม (tabu list) รวมถึงวิธีการค้นหาประกอบด้วย

2 รูปแบบ คือ การค้นหาคำตอบโดยใช้หน่วยความจำระยะสั้น และการค้นหาคำตอบโดยใช้หน่วยความจำระยะยาว เพื่อช่วยให้การค้นหาคำตอบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ดังนั้นหลักการและกลไกการทำงานของทฤษฎีค้นหาแบบตาบู่จะทำให้คำตอบที่ได้มีคุณภาพและใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด งานวิจัยนี้มุ่งเน้นพัฒนาระบบสร้างชุดข้อสอบอัตโนมัติโดยใช้การค้นหาแบบตาบู่ และใช้เทคโนโลยี Web Application ซึ่งเป็นโปรแกรมประยุกต์ที่เข้าถึงด้วยโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์ การประมวลผลทั้งหมดดำเนินงานผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เพื่ออำนวยความสะดวกให้ครูในการสร้างชุดข้อสอบให้ครบตามจุดประสงค์การเรียนรู้

ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวัดผลและการประเมินผล

การวัดผล (measurement) และการประเมินผล (evaluation) (จักรศิริ ปิยะพิมลสิทธิ์, 2548) เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการเรียนการสอนสำหรับการศึกษา การวัดและประเมินผลมีความสำคัญต่อการเรียนการสอนของผู้สอนและผู้เรียนอย่างยิ่ง เพราะเป็นเครื่องมือวัดทางวิชาการ และนำผลที่ได้จากการวัดมาพิจารณา

ตัดสินใจเทียบกับเกณฑ์ หรือมาตรฐานประกันคุณภาพ (คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2552) ข้อสอบเป็นเครื่องมือที่ไปกระตุ้นให้สมองนึกคิดหาคำตอบในสิ่งที่เป็ผลลัพท์ของคำถามนั้นๆ โดยทั่วไปแล้วแบบทดสอบจะประกอบด้วย 2 ส่วน ที่สำคัญคือ ส่วนที่เป็นคำถาม (item) ซึ่งเป็นส่วนที่ต้องการให้สมองนึกคิด กับส่วนที่เป็นคำตอบ ซึ่งอาจอยู่ในรูปของตัวเลือก (choices) (อนุภวธรรม จันทรพรหม, 2551) ข้อสอบที่นำไปใช้จะต้องมีการตรวจสอบคุณภาพข้อสอบโดยการวิเคราะห์ข้อสอบเพื่อนำผลไปปรับปรุงข้อสอบให้ได้ข้อสอบที่ดีสำหรับการวัดผลครั้งต่อไป และจัดเก็บข้อสอบลงฐานข้อมูล (วิรุทธิ์ ธาณี, 2546) เพื่อการบริหารจัดการอย่างเป็นระบบ สะดวกต่อการนำไปใช้วัดผลได้ตามต้องการ ช่วยลดขั้นตอนการทำงาน และลดภาระงานของครูผู้สอน

การค้นหาแบบตาบู่ (tabu search)

การค้นหาแบบตาบู่ (Glover, 1989) เป็นวิธีการค้นหาคำตอบแบบเมตา-ฮิวริสติก (Meta-Heuristics) (Gwo-Jen Hwang et al., 2006) (สมศักดิ์ สมนเทศ, 2547) ซึ่งเป็นการค้นหาคำตอบแบบมีเหตุผล โดยวิธีการนี้ถูกออกแบบมาเพื่อแก้ปัญหาขนาดใหญ่ (Glover and Laguna, 1997) และมีความซับซ้อน เพราะใช้เวลาน้อย และวิธีการค้นหาแบบตาบู่มีความแตกต่างจากการค้นหาแบบเมตา-ฮิวริสติกอื่น ตรงที่ไม่ได้อาศัยการสุ่มหรือการเลือกจากความน่าจะเป็น แต่เป็นวิธีการค้นหาแบบดีเทอร์มินิสติก (deterministic) ซึ่งค้นหาคำตอบจากบริเวณข้างเคียงคำตอบที่ดีที่สุด ณ ขณะนั้น โดยจะมีข้อห้ามไม่ให้ค้นหาซ้ำกับเขตของคำตอบเดิมที่มีอยู่ หรือที่เรียกว่ารายการต้องห้าม (tabu list) ซึ่งวิธีการห้ามดังกล่าวจะเป็นการห้ามเพื่อมิให้ต้องไปหาผลเฉลยเดิม วิธีการค้นหาแบบตาบู่ประกอบไปด้วยรูปแบบการค้นหา 2 รูปแบบที่สำคัญ คือ การค้นหาคำตอบโดยใช้หน่วยความจำระยะสั้น (short term memory) และการค้นหาคำตอบโดยใช้หน่วยความจำระยะยาว (long term memory) ซึ่งการค้นหาคำตอบโดยใช้

หน่วยความจำระยะสั้นถือเป็นหน่วยความจำตามเวลา (regency base memory) หมายถึงการค้นหาอดีตหรือการจดจำประสบการณ์การค้นหาที่ผ่านมาเพียงระยะสั้น ในทางตรงกันข้ามการค้นหาคำตอบโดยใช้หน่วยความจำระยะยาวซึ่งถือเป็นหน่วยความจำความถี่ (frequency base memory) หมายถึง การค้นหาคำตอบที่ต้องจดจำในอดีตหรือประสบการณ์ที่ผ่านมาเพื่อช่วยให้การค้นหาคำตอบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จากหลักการการค้นหาคำตอบแบบตาบู่สามารถสรุปขั้นตอนการทำงานได้ดังนี้

1. สร้างคำตอบเริ่มต้น (initial solution)

โดยวิธีการสุ่ม (random) จากข้อมูลที่กำหนด โดยที่ S คือข้อมูลที่สร้างขึ้นจากการสุ่ม โดยจะมีข้อมูลเริ่มต้นตั้งแต่ 1 ถึง n โดยที่ n คือจำนวนข้อมูลที่ต้องการหาคำตอบ

$$\text{Initial Solution} = [S_1, S_2, \dots, S_n]$$

2. สร้างเขตของคำตอบข้างเคียง

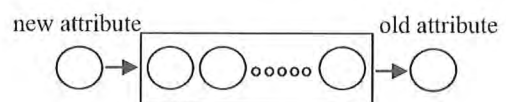
(neighborhood structure) โดยที่ N คือ เขตของคำตอบข้างเคียงที่เป็นไปได้ จากข้อมูลเริ่มต้นโดยจะกำหนดให้เขตคำตอบข้างเคียงที่เป็นไปได้ ตั้งแต่ 1 ถึง i

$$\text{Neighborhood Structure} = [N_1, N_2, \dots, N_i]$$

3. เลือกเขตคำตอบข้างเคียงที่ดีที่สุด (best neighborhood) โดยพิจารณาจากเขตคำตอบข้างเคียงที่ดีที่สุดของคำตอบเริ่มต้น

$$N^* = \{N_1, N_2, \dots, N_i\}$$

4. ตรวจสอบรายการตาบู่ โดยจะกำหนดให้ N^* บันทึกให้เป็นตาบู่ ถ้าคำตอบข้างเคียงเป็นคำตอบในรายการตาบู่ให้เปลี่ยนคำตอบใหม่ เมื่อสิ้นสุดการทำงานให้ยกเลิกความเป็นตาบู่ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะของรายการตาบู่ (สมศักดิ์ สมนเทศ, 2547)

5. ตรวจสอบรอบการทำงาน (stopping criteria) เป็นการตรวจสอบรอบการทำงานว่าค้นหาคำตอบครบรอบตามที่กำหนดไว้หรือยัง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลายงานวิจัยได้นำแนวคิดทฤษฎีการค้นหาแบบตราบ (tabu search) และทฤษฎีเจเนติก (genetic algorithm) โดยการประยุกต์ใช้งานของคอมพิวเตอร์บนระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต มาใช้แก้ปัญหาของระบบการสร้างชุดข้อสอบ ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Gwo-Jen Hwang et al. (2006) ได้นำเสนอแนวคิดวิธีการค้นหาแบบตราบมาใช้เพื่อช่วยในการค้นหาคัดเลือกข้อสอบ สร้างชุดข้อสอบจากคลังข้อสอบขนาดใหญ่ และการกำหนดเวลาให้กับการตอบคำถามของการทดสอบในแต่ละข้อ โดยการกำหนดหลายเงื่อนไข เช่น รายวิชา และจำนวนข้อสอบ ระบบจะทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยอัตราส่วนของจุดประสงค์การเรียนรู้และเวลาทดสอบ และนอกจากนี้งานวิจัยของ Wei Huang et al. (2008) ได้นำเสนอทฤษฎีเจเนติกอัลกอริทึมมาช่วยแก้ปัญหาของระบบการสร้างชุดข้อสอบ รวมถึงการเลือกวัตถุที่หลายๆ วัตถุ ซึ่งพิจารณาจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น ค่าระดับความยากง่ายของข้อสอบ ประสิทธิภาพของข้อสอบ ค่าอำนาจจำแนกของข้อสอบ เป็นต้น การประเมินผลสัมฤทธิ์พบว่าการสร้างข้อสอบมีความเที่ยงตรงมากขึ้น และเป็นการปรับปรุงวิธีการสร้างชุดข้อสอบให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ และงานวิจัยของ Wu Xiaojin (2009) ได้นำเสนอแนวคิดทฤษฎีเจเนติกอัลกอริทึมมาช่วยแก้ปัญหาในการคัดเลือกข้อสอบ และการทดสอบด้วยคอมพิวเตอร์ ผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งการทดสอบออนไลน์จะคัดเลือกข้อสอบโดยปรับเปลี่ยนระดับตามค่าความยากง่ายของข้อสอบ การกำหนดจำนวนข้อสอบ ระดับข้อสอบเป็นไปตามความเหมาะสมและความสามารถของผู้เรียนในการตอบคำถาม ซึ่งเป็นการทดสอบแบบปรับเหมาะสำหรับผู้เรียนเป็นรายบุคคล ซึ่งระบบที่นำเสนอ

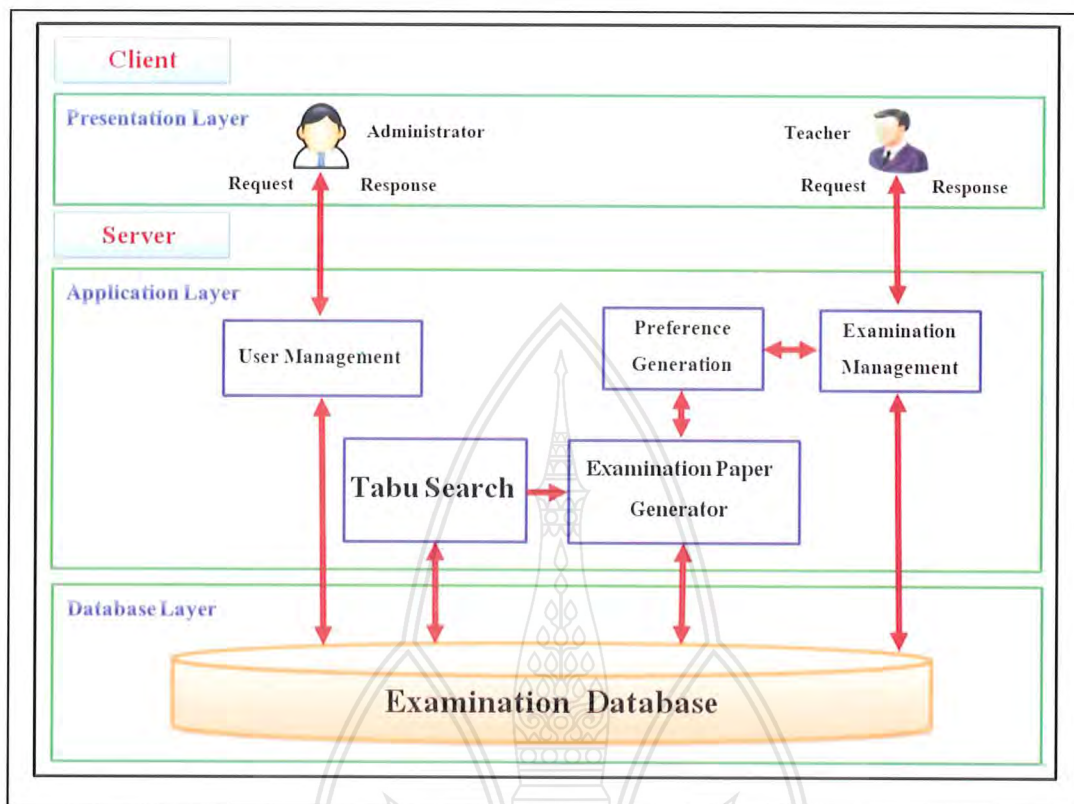
ยังต้องศึกษาเพิ่มเติมความสอดคล้องและความเร็วในการประมวลผลให้เป็นไปตามเงื่อนไข

วิธีดำเนินงาน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบสถาปัตยกรรมระบบสร้างชุดข้อสอบ และพัฒนาระบบสร้างชุดข้อสอบ โดยใช้การค้นหาแบบตราบ โดยศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการวัดและประเมินผล ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการค้นหาแบบตราบ ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากนั้นทำการศึกษาและวิเคราะห์วิธีการสร้างข้อสอบระบบงานเดิมโดยใช้แบบสอบถามประเมินความพึงพอใจในการสร้างชุดข้อสอบของระบบงานเดิม ออกแบบสถาปัตยกรรมของระบบสร้างชุดข้อสอบ ออกแบบระบบฐานข้อมูล ออกแบบขั้นตอนการประมวลผลตามทฤษฎีการค้นหาแบบตราบ ประยุกต์ใช้หลักการทฤษฎีตราบ การประมวลผลทั้งหมด ดำเนินงานผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยใช้เทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชัน โดยติดตั้งระบบโปรแกรมและระบบฐานข้อมูลบนเซิร์ฟเวอร์ จากนั้นให้ครูผู้ใช้ระบบ ทำการทดสอบใช้โปรแกรมสร้างชุดข้อสอบ และรวบรวมชุดข้อสอบที่ได้นำมาประเมินประสิทธิภาพด้านความถูกต้องของระบบสร้างชุดข้อสอบ และประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ในการใช้งานระบบสร้างชุดข้อสอบ

สถาปัตยกรรมการทำงานของระบบ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอสถาปัตยกรรมระบบสร้างชุดข้อสอบ โดยใช้การค้นหาแบบตราบ ผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยใช้องค์ประกอบเว็บแอปพลิเคชัน (พัชรดา วิเศษเกตุ, 2553) ในการทำงานแบบเซิร์ฟเวอร์กับไคลเอนต์ (client-Server) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 สถาปัตยกรรมของระบบสร้างชุดข้อสอบ

เพื่อให้ระบบงานสามารถติดต่อสื่อสารและทำงานร่วมกันได้อย่างอัตโนมัติ และช่วยอำนวยความสะดวกแก่ครูผู้ในระบบในการจัดการข้อมูลข้อสอบ และการสร้างชุดข้อสอบ จึงได้ออกแบบสถาปัตยกรรมของระบบ ประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

ระดับนำเสนอข้อมูล (presentation layer)

ทำหน้าที่ติดต่อกับผู้ใช้งานผ่านทางเว็บ อินเทอร์เน็ต โดยผู้ใช้งานสามารถเข้าใช้ระบบได้ โดยป้อน Username และ Password ซึ่งสามารถแบ่งระดับผู้ใช้งานออกเป็น 2 ระดับ ตามสิทธิการใช้งาน ได้แก่

1. ผู้ดูแลระบบ (administrator) เป็นผู้บริหารจัดการข้อมูลพื้นฐานของครูผู้ในระบบ
2. ครูผู้ในระบบ (teacher) เป็นผู้จัดการข้อมูลพื้นฐานของวิชา หน่วยการเรียนรู้ จุดประสงค์การเรียนรู้ ข้อสอบ สร้างชุดข้อสอบ สามารถเข้าไปใช้งาน

และประมวลผลได้เฉพาะรายวิชาที่สอน

ในส่วนนี้พัฒนาโดยใช้เครื่องมือ ซึ่งประกอบไปด้วยภาษา HTML, Java Script และ Ajax

ระดับโปรแกรมประยุกต์ (a pplication layer)

เป็นระบบการประมวลผลตามขั้นตอน อัลกอริทึมค้นหาแบบตามู ทำหน้าที่ค้นหาเลือกข้อสอบแบบอัตโนมัติ จัดลำดับการทำงาน และช่วยควบคุมการทำงานของเว็บแอปพลิเคชัน ขั้นตอนการค้นหาแบบตามู โดยสุ่มคำตอบเริ่มต้น จากนั้นสร้างเซตของคำตอบข้างเคียง เลือกเซตคำตอบข้างเคียงที่ดีที่สุด ตรวจสอบรายการตามู และตรวจสอบรอบการทำงานตามลำดับ รวมถึงการติดต่อฐานข้อมูล การเรียกข้อมูลจากฐานข้อมูลมาประมวลผลตามอัลกอริทึมที่กำหนดไว้ เมื่อประมวลผลเสร็จจึงข้อมูลที่ได้จะถูกจัดเก็บลงในฐานข้อมูล จากนั้นจะเรียกข้อมูลจากฐานข้อมูลเพื่อ

ส่งข้อมูลกลับคืนไปแสดงผลแก่ผู้ใช้งาน ซึ่งในส่วนนี้พัฒนาโดยใช้เครื่องมือ ซึ่งประกอบไปด้วย Apache Web Server เวอร์ชัน 2.2 PHP Script Language เวอร์ชัน 5.2

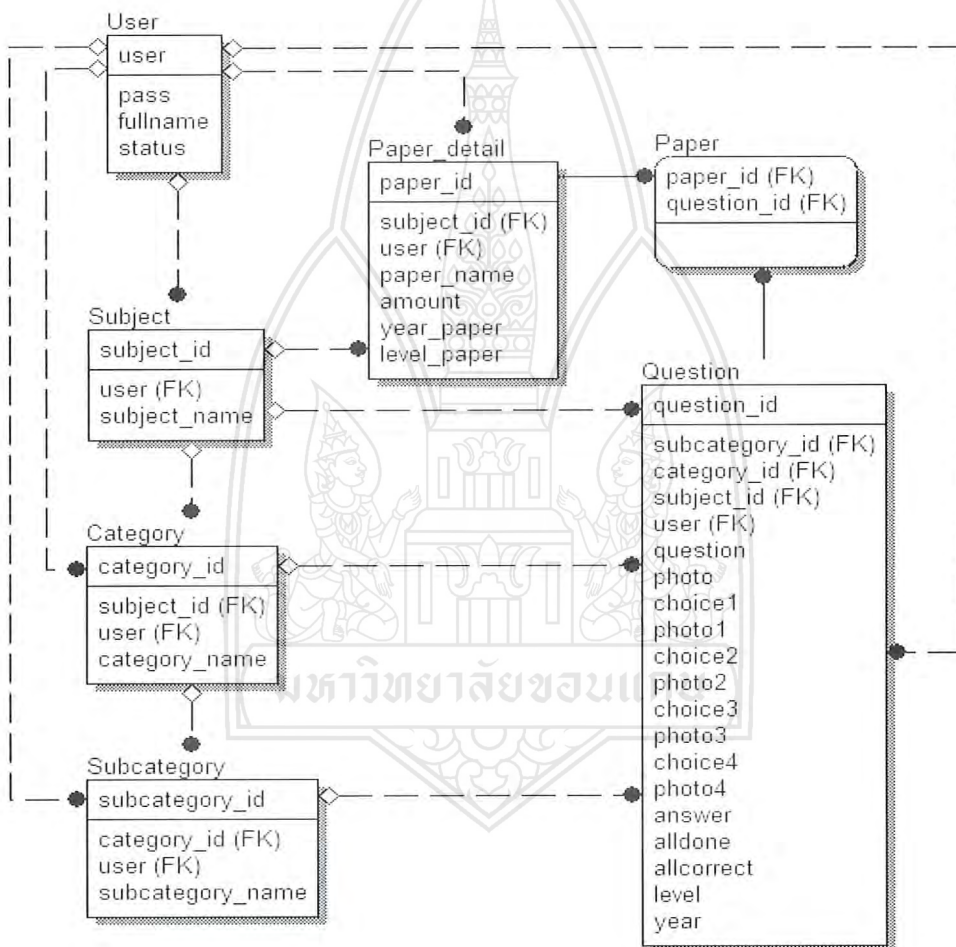
ระดับชั้นฐานข้อมูล (database layer)

เป็นส่วนในการจัดการเกี่ยวกับระบบฐานข้อมูลจัดเก็บข้อมูลที่ใช้ในระบบ ซึ่งในส่วนนี้พัฒนา

โดยใช้เครื่องมือ phpMyAdmin เวอร์ชัน 2.10 และใช้ MySQL เป็นระบบจัดการฐานข้อมูล

การออกแบบระบบฐานข้อมูล

จากการวิเคราะห์ออกแบบระบบใหม่ ได้ออกแบบระบบฐานข้อมูล ซึ่งเป็นแผนผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอนทิตี และแอททริบิวต์ ดังแสดงในรูปที่ 3



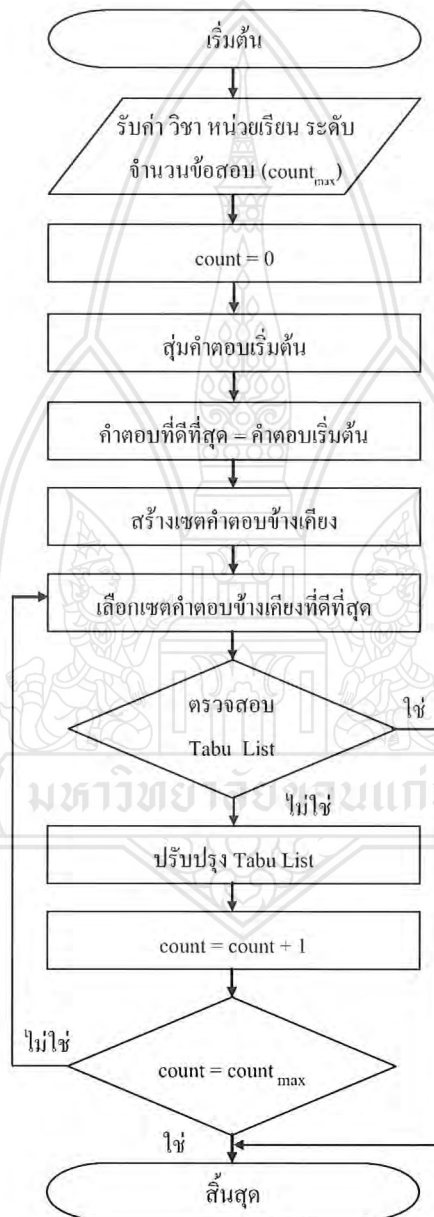
รูปที่ 3 แผนผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอนทิตี

การออกแบบขั้นตอนการค้นหาแบบตามู

ขั้นตอนการค้นหาแบบตามู ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการหาคำตอบที่เหมาะสม ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ มีการเพิ่ม tabu list ทำให้การหาคำตอบเสร็จสิ้นได้เร็วขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4

การประยุกต์ใช้ทฤษฎีการค้นหาแบบตามู

การประยุกต์ใช้ทฤษฎีการค้นหาแบบตามูเป็น ขั้นตอนการประมวลผลการค้นหาเลือกข้อสอบ โดย แสดงตัวอย่างข้อมูลข้อสอบจำนวน 20 ข้อ 5 จุด ประสงค์ ดังแสดงอยู่ในตารางที่ 1



รูปที่ 4 แผนผังขั้นตอนการสร้างชุดข้อสอบ โดยใช้การค้นหาแบบตามู

ตารางที่ 1 กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างข้อสอบกับจุดประสงค์การเรียนรู้

ความสัมพันธ์	จุดประสงค์การเรียนรู้				
	1	2	3	4	5
รหัสข้อสอบ	1	2	4	11	5
	3	8	12	16	13
	6	9	14	17	19
	7	10	15	18	20

จากตัวอย่างข้อสอบในตารางที่ 1 สามารถสรุปขั้นตอนการทำงานได้ดังนี้

1. สร้างคำตอบเริ่มต้น (initial solution) โดยวิธีการสุ่มจากรหัสข้อสอบ {1,2,3,4,5,6,...,20}

2. สร้างเขตคำตอบข้างเคียง (neighborhood structure) กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างจุดประสงค์การเรียนรู้กับรหัสข้อสอบ โดยในเขตคำตอบแต่ละรอบการประมวลผลจะต้องสอดคล้องกับจุดประสงค์การเรียนรู้ การเลือกข้อสอบไม่ซ้ำข้อเดิม และกระจายข้อสอบให้สมดุล

เขตคำตอบที่ 1 = {1, 2, 4, 11, 5}

เขตคำตอบที่ 2 = {3, 8, 12, 16, 13}

เขตคำตอบที่ 3 = {6, 9, 14, 17, 19}

เขตคำตอบที่ 4 = {7, 10, 15, 18, 20}

3. เลือกเขตคำตอบข้างเคียงที่ดีที่สุด (best neighborhood) เป็นการพิจารณาหาเขตคำตอบข้างเคียงจากคำตอบเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 5

ตรวจสอบรายการต้องห้าม (tabu list) โดยบันทึกคำตอบเริ่มต้น และเขตคำตอบข้างเคียงเก็บไว้ใน Tabu List เพื่อใช้ในการตรวจสอบความเป็นตาบ และค้นหาคำตอบรอบต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 6

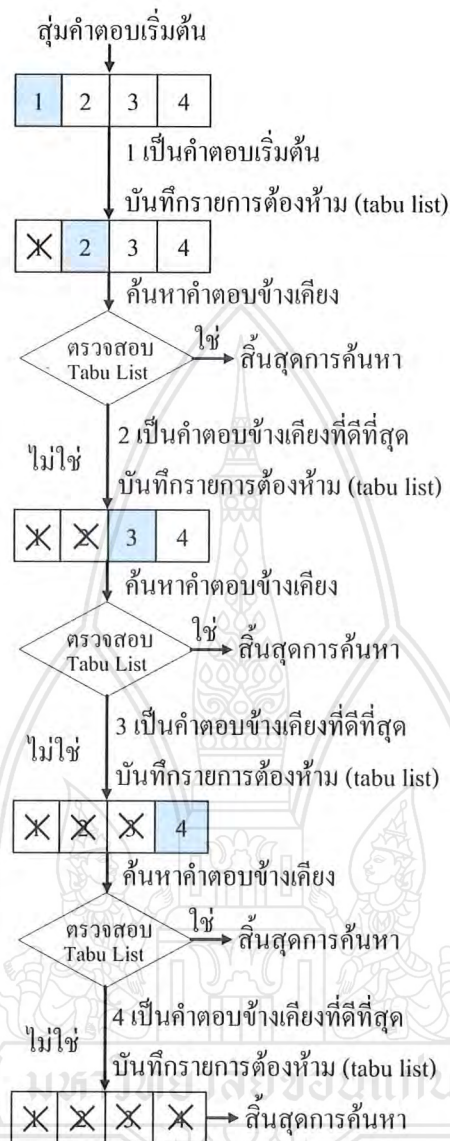
5. ตรวจสอบรอบการทำงาน (stopping criteria) เป็นการตรวจสอบรอบการทำงานว่าค้นหาคำตอบครบรอบตามที่กำหนดไว้หรือยัง โดยพิจารณาจากจำนวนข้อสอบที่ต้องการ

โปรแกรมประยุกต์ระบบสร้างชุดข้อสอบ โดยใช้การค้นหาแบบตาบ

การสร้างชุดข้อสอบจะกำหนดพารามิเตอร์วิชา หน่วยการเรียนรู้ จำนวนข้อสอบ และระดับข้อสอบ ดังแสดงในรูปที่ 7 จากนั้นจะทำการประมวลผลโดยใช้ขั้นตอนการค้นหาแบบตาบ สรุปผลการสร้างชุดข้อสอบ ดังแสดงในรูปที่ 8 และพิมพ์ชุดข้อสอบเป็นเอกสารเวิร์ด ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 5 การค้นหาเขตคำตอบข้างเคียง



รูปที่ 6 ขั้นตอนตรวจสอบรายการต้องห้าม

เลือกรายวิชา :

โปรแกรมสำเร็จรูปในงานอาชีพ

เลือกหน่วยการเรียนรู้

(เลือกได้มากกว่าหนึ่งหน่วย):

จำนวนข้อสอบ :

ระดับข้อสอบ :

สร้างข้อสอบ

เลือกหน่วยการเรียนรู้

แนะนำโปรแกรม Microsoft Word

การใช้งาน Microsoft Word เบื้องต้น

การสร้างและตกแต่งเอกสาร

การพิมพ์เอกสารจากทางเครื่องพิมพ์

การใช้งานตาราง

การสร้างวัตถุรูปวาด ล้างอักขระศิลป์ และชุด

การสร้างระบบงาน

แนะนำโปรแกรม Microsoft Excel

การตกแต่งเวิร์กชีต

การใช้สูตรคำนวณ

การสร้างกราฟ

บริหารข้อมูลในโปรแกรม Microsoft Excel

แนะนำโปรแกรม Microsoft Powerpoint

การนำเสนอเนื้อหา

การทำงานกับข้อความ

การสร้างเทมเพลตในโปรแกรม

แนะนำโปรแกรม Microsoft Access

การทำงานกับข้อมูลใน Datasheet

14

1 2 3 4 5

รูปที่ 7 หน้าจอการสร้างชุดข้อสอบ

จุดประสงค์การเรียนรู้	ข้อใด	รหัสข้อสอบ	จำนวนข้อสอบ
1	1-2	1,2	2
2	3-4	4,6	2
3	5-6	7,9	2
4	7-8	10,11	2
5	9-10	14,15	2
6	11-12	16,18	2
7	13-14	19,21	2
7	14	14	14

รูปที่ 8 หน้าจอสรุปผลการสร้างชุดข้อสอบ

ชื่อชุดข้อสอบ : หน่วยที่ 1

วิชา : 30000201 (โปรแกรมสำเร็จรูปในงานอาชีพ)

ระดับชุดข้อสอบ : 3 | จำนวน : 14 | ปีการศึกษา : 2553

ครูผู้สอน : นางนวลรัตน์ วัฒนาวารีกุล

วิทยาลัยเทคนิคสกลนคร

คำชี้แจง : จงเลือกคำตอบที่ถูกต้องที่สุดเพียงคำตอบเดียว

1) โปรแกรม Microsoft Word มีจุดเด่นคือ

ก. พิมพ์เอกสาร

ข. สร้างกราฟ

ค. วาดรูป

ง. คำนวณ

2) ปุ่มสัญลักษณ์ใด อยู่บนแถบเครื่องมือมาตรฐาน

ก. 

ข. 

ค. 

ง. 

รูปที่ 9 แสดงชุดข้อสอบเป็นเอกสาร

การประเมินประสิทธิภาพของระบบ

การประเมินประสิทธิภาพระบบสร้างชุดข้อสอบ โดยใช้การค้นหาแบบตามู ดังนี้

1. ประเมินประสิทธิภาพของระบบด้านความถูกต้องในการสร้างชุดข้อสอบให้สอดคล้องกับจุดประสงค์การเรียนรู้ การเลือกข้อสอบไม่ซ้ำข้อเดิม และกระจายข้อสอบได้เหมาะสม

2. ประเมินจากแบบสอบถามความพึงพอใจของผู้ใช้ในการใช้งานระบบสร้างชุดข้อสอบ โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนการใช้งานทั่วไป และส่วนการใช้งานแต่ละส่วนของโปรแกรม

การประเมินประสิทธิภาพของระบบด้านความถูกต้อง

ขั้นตอนในการประเมินประสิทธิภาพของระบบด้านความถูกต้องมีดังนี้ ทดสอบการใช้งานระบบสร้างชุดข้อสอบในแผนกคอมพิวเตอร์ธุรกิจ วิทยาลัยเทคนิคสกลนคร โดยกำหนดให้ครูผู้ใช้งานจำนวน 10 คน ทดสอบสร้างชุดข้อสอบในวิชาโปรแกรมสำเร็จรูปในงานอาชีพ และวิชาหลักเศรษฐศาสตร์ ระดับ ปวส.1 ข้อสอบแบบ 4 ตัวเลือก จำนวน 10 ชุด วิชาละ 5 ชุด โดยแต่ละชุดประกอบด้วย จำนวนข้อสอบ 100 ข้อ ทำการประมวลผลสร้างชุดข้อสอบ แสดงรายงานผลการสร้างชุดข้อสอบในแต่ละชุดมีการบันทึกชุดข้อสอบและพิมพ์ชุดข้อสอบ ทำการวิเคราะห์ชุดข้อสอบที่ได้ โดยครูผู้ใช้งานร่วมกับผู้วิจัย ผลปรากฏว่าได้ข้อสอบในชุดไม่ซ้ำกัน กระจายข้อสอบในชุดได้ครบทุกจุดประสงค์การเรียนรู้ และสามารถสร้างชุดข้อสอบได้ตรงตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ในการใช้งานระบบสร้างชุดข้อสอบ

ขั้นตอนในการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ในการใช้งานระบบสร้างชุดข้อสอบมีดังนี้ ให้ครูผู้ใช้งานจำนวน 10 คน ตอบแบบสอบถามประเมินความพึงพอใจต่อการใช้งานระบบสร้างชุดข้อสอบ

รวบรวมข้อมูลจากแบบสอบถามความพึงพอใจต่อระบบการสร้างชุดข้อสอบ พบว่าผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ในการใช้ระบบงานภาพรวมทั้งหมดอยู่ในระดับดีมาก ตามรายการประเมินดังนี้ ในส่วนของการใช้งานทั่วไป เป็นการประเมินลักษณะการใช้งานด้านการออกแบบส่วนติดต่อกับผู้ใช้ รูปแบบเว็บเพจ และความสะดวกในการใช้งาน ซึ่งได้รับการประเมินในระดับดีมาก คิดเป็นร้อยละ 88.33 ในระดับดี คิดเป็นร้อยละ 11.67 และส่วนของการใช้งานแต่ละส่วนของโปรแกรม เป็นการประเมินลักษณะการใช้งานด้านระบบจัดการฐานข้อมูล การสร้างชุดข้อสอบ ความสอดคล้องกับจุดประสงค์การเรียนรู้ พิมพ์ชุดข้อสอบ ซึ่งได้รับการประเมินในระดับดีมาก คิดเป็นร้อยละ 98.89 ในระดับดี คิดเป็นร้อยละ 1.11 ซึ่งรายละเอียดและผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ในการใช้งานระบบสร้างชุดข้อสอบ แสดงอยู่ในตารางที่ 2

สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อออกแบบและพัฒนา ระบบสร้างชุดข้อสอบ โดยการประยุกต์ใช้การค้นหาแบบตามู เพื่อคัดเลือกข้อสอบ ระบบที่พัฒนาขึ้นทำงานบนระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตโดยใช้เทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชัน และเพื่อทดสอบความถูกต้องและประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ครูผู้ใช้งานจำนวน 10 คน ได้ทดสอบใช้งานระบบสร้างชุดข้อสอบ และประเมินระบบโดยการตอบแบบสอบถามความพึงพอใจของผู้ใช้ ผลการทดสอบพบว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจระบบการสร้างชุดข้อสอบทั้งระบบอยู่ในระดับดีมาก

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระบบสร้างชุดข้อสอบ โดยใช้การค้นหาแบบตามูนี้ สามารถบริหารจัดการข้อสอบได้อย่างเป็นระบบ สะดวกต่อการนำไปใช้วัดและประเมินผลผู้เรียน ช่วยลดขั้นตอนการทำงาน และลดภาระงานของครูผู้สอนในการสร้างชุดข้อสอบได้อย่างสมบูรณ์

ตารางที่ 2 แสดงร้อยละของผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ในการใช้งานระบบสร้างชุดข้อสอบ

ที่	รายการประเมิน	ระดับความพึงพอใจ (ร้อยละ)			
		มากที่สุด	มาก	พอใช้	น้อย
	ส่วนที่ 1 การใช้งานทั่วไป				
1	รูปแบบเหมาะสมและสวยงาม	80.00	20.00	0.00	0.00
2	เมนูหลักของระบบใช้งานง่ายไม่ซับซ้อน	90.00	10.00	0.00	0.00
3	ความสะดวก ความคล่องตัวในการใช้งานระบบ	90.00	10.00	0.00	0.00
4	ค้นหา ได้ถูกต้อง รวดเร็ว	90.00	10.00	0.00	0.00
5	การเพิ่ม ลบ แก้ไขข้อมูลทำได้ง่ายและสะดวก	90.00	10.00	0.00	0.00
6	ระบบช่วยลดเวลาการทำงานแบบเดิมได้ดี	90.00	10.00	0.00	0.00
	ค่าเฉลี่ยผลการใช้งานทั่วไป	88.33	11.67	0.00	0.00
	ส่วนที่ 2 การใช้งานแต่ละส่วนของโปรแกรม				
7	ระบบจัดการข้อมูลครู	90.00	10.00	0.00	0.00
8	ระบบจัดการข้อมูลรายวิชา	100.00	0.00	0.00	0.00
9	ระบบจัดการข้อมูลหน่วยการเรียนรู้	100.00	0.00	0.00	0.00
10	ระบบจัดการข้อมูลจุดประสงค์การเรียนรู้	100.00	0.00	0.00	0.00
11	ระบบจัดการข้อมูลข้อสอบ	100.00	0.00	0.00	0.00
12	การสร้างชุดข้อสอบแบบอัตโนมัติ	100.00	0.00	0.00	0.00
13	ความสมดุลของจุดประสงค์การเรียนรู้	100.00	0.00	0.00	0.00
14	การจัดพิมพ์ข้อสอบ	100.00	0.00	0.00	0.00
15	การจัดพิมพ์เฉลยข้อสอบ	100.00	0.00	0.00	0.00
	ค่าเฉลี่ยผลการใช้งานแต่ละส่วนของโปรแกรม	98.89	1.11	0.00	0.00

ระบบที่พัฒนานี้จะเน้นที่การสร้างชุดข้อสอบ
ดังนั้นเพื่อให้ระบบรองรับทำงานได้มากขึ้น แนวทาง
ในการพัฒนาต่อไป คือ การพัฒนาแบบทดสอบ

ออนไลน์ และการวิเคราะห์ความยากของข้อสอบ
แบบอัตโนมัติ

เอกสารอ้างอิง

- คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนเรศวร
ราชนครินทร์. (2552). ความรู้พื้นฐานการ
วัดผลและประเมินผลการศึกษา [ออนไลน์].
[อ้างถึงเมื่อ 9 สิงหาคม 2553]. Available from
: <http://st.pnu.ac.th/km/measure/>
- ฉัตรศิริ ปิยะพิมลสิทธิ์. (2548). ทฤษฎีการวัดและ
การทดสอบ [ออนไลน์]. [อ้างถึงเมื่อ 9
สิงหาคม 2553]. Available from : [http://
www.watpon.com/testtheory/](http://www.watpon.com/testtheory/)
- ณัฐวรรณ จันทพรหม. (2551). ระบบสร้างชุด
ข้อสอบของโรงเรียนวชิราลัย. การค้นคว้า
แบบอิสระวิทยาศาสตร์มหัณตติต สาขาวิชา
วิทยาการคอมพิวเตอร์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- พัชรดา วิสัยเกตุ. (2550). Web application. [ออน
ไลน์]. [อ้างถึงเมื่อ 9 สิงหาคม 2553]. Avail-
able from : [http://gotoknow.org/file/
patcharida/Chap_01_Introduction.pdf](http://gotoknow.org/file/patcharida/Chap_01_Introduction.pdf)
- วิรัช ธานี. (2546). การพัฒนาโปรแกรมคลังข้อสอบ
บนระบบปฏิบัติการวินโดวส์. วิทยานิพนธ์
ปริญญาครุศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิจัยและ
ประเมินผลการศึกษา. บัณฑิตวิทยาลัย :
สถาบันราชภัฏอุบลราชธานี.
- สมศักดิ์ สันทะ. (2547). การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการ
ค้นหาแบบทามูและวิธีเชิงพันธุกรรม สำหรับ
พื้นผิวดอปสนอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศา
สตรมหาบัณฑิตคณะวิทยาศาสตร์และ
เทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- Glover, F. (1990). Tabu Search - Part II. This paper
appears in : Operations Research Society
of America. ORSA Journal on Computing.
2(1): 4-32.
- Glover, F. (1998). Tabu search-Wellsprings and
challenges. Eur. J. Oper. Res. 106: 221-225.
- Glover, F., Laguna, M. (1997). Tabu Search. Kluwer
Academic Publishers, Boston. pp.1-18.
- Gwo-Jen, H., Peng-Yeng, Y. and Shu-Heng, Y.
(2006). A Tabu Search Approach to
Generating Test Sheets for Multiple Assess-
ment Criteria. This paper appears in : IEEE
Transactions on Education. 49(1): 88-97.
- Wei, Huang, Zhao-hui, Wang. (2008). Design of
Examination Paper Generating System from
Item Bank by Using Genetic Algorithm.
This paper appears in : IEEE computer
society. International Conference on
Computer Science and Software Engineering
(CSSE.2008.47), pp. 1323-1325.
- Wu, Xiaoqin. (2009). Research and Design of
Intelligent Generating Test Paper System.
This paper appears in : IEEE Natural
science foundation of Anhui educational.
Committee (KJ2008B34). International
Conference on Issue Date : 3/09/2009,
pp. 1-4.





Equitable defective colorings of some classes of graphs

Sukanda Cummuang^{1,2} and Keaitsuda Nakprasit^{3*}

Abstract

A graph G has an *equitable (m, k) -defective coloring* if its vertex set can be partitioned into m classes $V_1, V_2, \dots, V_m$ such that the color classes satisfy the condition $||V_i| - |V_j|| \leq 1$ for every i, j and the maximum degree of any subgraph induced by vertices receiving the same color is at most k . A graph G is *equitably (m, k) -defective colorable* if G has an equitable (m, k) -defective coloring. The *equitable k -defective chromatic number* of a graph G , denoted by $\chi_{ED,k}(G)$, is the smallest positive integer m for which G is equitably (m, k) -defective colorable. In this paper, we give the equitable k -defective chromatic numbers of paths, cycles, complete graphs, hypercubes, stars, and wheels.

Introduction

A graph G is a triple consisting of a *vertex set* $V(G)$, an *edge set* $E(G)$, and a relation that associates with each edge two vertices (not necessarily distinct) called its *endpoints*. If vertex v is an endpoint of edge e , then v and e are *incident*. The *degree* of a vertex v in a graph G , denoted by $d_G(v)$ or $d(v)$, is the number of edges incident to v , except that each loop at v counts twice. The *maximum degree* is $\Delta(G)$, the *minimum degree* is $\delta(G)$, and G is *regular* if $\Delta(G) = \delta(G)$. The *neighborhood* of v , denoted by $N_G(v)$ or $N(v)$, is the set of vertices adjacent to v . The *order* of a graph G , denoted by $n(G)$ or $|G|$, is the number of vertices in G . The *size* of a graph G , denoted by $e(G)$, is the number of edges in G . A *loop* is an edge whose endpoints are the same. *Multiple edges* are edges having the same pair of endpoints. A *simple graph* is a graph having no loops or multiple edges (West, 2001). A graph G is *finite* if its vertex set and edge set are finite.

¹ Department of Mathematics, Faculty of Science, Khon Kaen University, Thailand, 40002.

² Centre of Excellence in Mathematics, PERDO, Bangkok, 10400, Thailand.

³ Applied Mathematics Research Group, Department of Mathematics, Faculty of Science, Khon Kaen University, Thailand, 40002.

* Corresponding author, E-mail: kmaneeruk@hotmail.com.

All graphs considered in this paper are finite and simple. A proper m -coloring of a graph G is a mapping $f: V(G) \rightarrow \{1, 2, \dots, m\}$ such that $f(u) \neq f(v)$ whenever u and v are adjacent vertices. The function f is called an m -coloring function. An independent set in a graph G is a set of pairwise nonadjacent vertices. The coloring function induces a partition of the vertex set of a graph G into independent subsets $V_1, V_2, \dots, V_m$ for which $V_i \cap V_j = \emptyset$ for $i \neq j$ and $V_1 \cup V_2 \cup \dots \cup V_m = V$. A graph G is called m -colorable if it has a proper m -coloring. The chromatic number of G , denoted by $\chi(G)$, is the smallest positive integer m such that G is m -colorable. The complement of a simple graph G , denoted by $\bar{G}$, is the simple graph with the vertex set $V(G)$ defined by $uv \in E(\bar{G})$ if and only if $uv \notin E(G)$. An induced subgraph is a subgraph obtained by deleting a set of vertices. We write $G[S]$ for $G - \bar{S}$, where $\bar{S} = V(G) - S$; this is the subgraph of G induced by S . A subset U of $V(G)$ is said to be k -independent if the maximum degree in $G[U]$ is at most k . Note that a 0-independent set is an independent set in the usual sense. A spanning subgraph of G is a subgraph with the vertex set $V(G)$. A graph G is (m, k) -colorable if its vertices can be colored with m colors such that each color class is k -independent. The k -defective chromatic number, denoted by $\chi_k(G)$, is the smallest positive integer m for which G is (m, k) -colorable. Let the ceiling $\lceil x \rceil$ and the floor $\lfloor x \rfloor$ denote, respectively, the smallest integer not less than x and the largest integer not greater than x . Note that $\chi_0(G)$ is the usual chromatic number of G . It is easy to see that $\chi_k(G) \leq \lceil n/(k+1) \rceil$, where n is the order of G . Achuthan et. al. (Achuthan et. al., 2011) determined the smallest order of a triangle-free graph such that $\chi_k(G) = m$, denoted by $f(m, k)$. They showed that $f(3, 2) = 13$. Moreover, they presented a lower bound for $f(m, k)$ for all $m \geq 3$ and also an upper bound for $f(3, k)$.

A graph G is said to be equitably m -colorable if G is m -colorable and $\|V_i| - |V_j| \leq 1$ for every i, j . The smallest positive integer m for which G is equitably m -colorable is called the equitable chromatic number of G , denoted by $\chi_=(G)$. It is obvious that $\chi_=(G)$ is not less than the ordinary chromatic number $\chi(G)$ (Furmańczyk, 2006). Meyer (Meyer, 1973) introduced this notion of equitable colorability. However, a work of Hajnal and Szemerédi (Hajnal and Szemerédi, 1970) actually showed that a graph G with the maximum degree $\Delta(G)$ is equitably k -colorable if $k > \Delta(G)$. Meyer (Meyer, 1973) conjectured that the stronger inequality $\chi_=(G) \leq \Delta(G)$ should hold if the connected graph G is neither a complete graph nor an odd cycle. Lih and Wu (Lih and Wu, 1996) proved, among other things, that this equitable coloring conjecture is true for connected bipartite graphs. Lam et. al. (Lam et. al., 2001) determined the equitable chromatic number of a complete n -partite graph $K(p_1, p_2, \dots, p_n)$. They showed that if M is the largest integer such that $p_i \pmod{M} < \lceil p_i / M \rceil$, ($i = 1, 2, \dots, n$), then $\chi_=(K(p_1, p_2, \dots, p_n)) = \sum_{i=1}^n \lceil p_i / (M+1) \rceil$.

The concept of (m, k) -coloring in an equitable version can be defined in a natural way. A graph G has an *equitable (m, k) -defective coloring* if its vertex set can be partitioned into m classes $V_1, V_2, \dots, V_m$ such that the color classes satisfy the condition $||V_i| - |V_j|| \leq 1$ for every i, j and each color class is k -independent. The graph G is *equitably (m, k) -defective colorable* if G has an equitable (m, k) -defective coloring. The *equitable k -defective chromatic number* of a graph G , denoted by $\chi_{ED,k}(G)$, is the smallest positive integer m for which G is equitably (m, k) -defective colorable. Note that $\chi_{ED,0}(G)$ is the usual equitable chromatic number of G .

Main Results

In this section, we investigate the equitable k -defective chromatic numbers of paths, cycles, complete graphs, hypercubes, stars, and wheels.

Lemma 1. $\chi_{ED,0}(G) \geq \chi(G)$.

Proof. Since an equitable coloring of G is a coloring of G , we have $\chi_{ED,0}(G) \geq \chi(G)$.

Hence $\chi_{ED,0}(G) \geq \chi(G)$.

Lemma 2. If H is a spanning subgraph of G , then $\chi_{ED,k}(G) \geq \chi_{ED,k}(H)$.

Proof. Since an equitable (m, k) -coloring of G is an equitable (m, k) -coloring of H , we obtain $\chi_{ED,k}(G) \geq \chi_{ED,k}(H)$.

Lemma 3. $\chi_{ED,k}(G) \geq \chi_{ED,k+1}(G)$.

Proof. Since an equitable (m, k) -coloring of G is an equitable $(m, k+1)$ -coloring of G , we have $\chi_{ED,k}(G) \geq \chi_{ED,k+1}(G)$.

A *path* is a simple graph whose vertices can be ordered so that two vertices are adjacent if and only if they are consecutive in the list; the path with n vertices is denoted by P_n .

Theorem 1. $\chi_{ED,k}(P_n) = \begin{cases} 1 & \text{for } (n=1) \text{ or } (n=2 \text{ and } k=1) \text{ or } (k \geq 2); \\ 2 & \text{otherwise.} \end{cases}$

Proof. Let $V(P_n) := \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ in the usual order.

It is obvious that $\chi_{ED,0}(P_1)=1$, $\chi_{ED,1}(P_1)=1$, and $\chi_{ED,1}(P_2)=1$.

From now on, we consider $n \geq 3$.

Case 1: $k \geq 2$. Since $\Delta(P_n) = 2 \leq k$, $\chi_{ED,k}(P_n) = 1$ for all $n \geq 1$.

Case 2: $k < 2$. Since $\Delta(P_n) = 2$ for $n \geq 3$, $\chi_{ED,k}(P_n) \geq 2$.

We partition the vertex set $V(P_n)$ into $V_1 = \{v_i : i \text{ is odd}\}$ and $V_2 = \{v_i : i \text{ is even}\}$.

Clearly, each V_i is a k -independent set of P_n and $||V_1| - |V_2|| \leq 1$.

Hence $\chi_{ED,k}(P_n) = 2$.

A *cycle* is a simple graph with an equal number of vertices and edges whose vertices can be placed around a circle so that two vertices are adjacent if and only if they appear consecutively along the circle; the cycle with n vertices is denoted by C_n , $n \geq 3$.

$$\textbf{Theorem 2. } \chi_{ED,k}(C_n) = \begin{cases} 1 & \text{for } k \geq 2; \\ 2 & \text{for } (k=0 \text{ and } n \text{ is even}) \text{ or } (k=1); \\ 3 & \text{for } k=0 \text{ and } n \text{ is odd.} \end{cases}$$

Proof. Let $V(C_n) := \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ in the usual order. We consider three cases.

Case 1: $k \geq 2$. Since $\Delta(C_n) = 2 \leq k$, $\chi_{ED,k}(C_n) = 1$.

Case 2: $(k=0 \text{ and } n \text{ is even}) \text{ or } (k=1)$. By Lemma 1, $\chi_{ED,k}(C_n) \geq 2$.

We partition the vertex set $V(C_n)$ into $V_1 = \{v_i : i \text{ is odd}\}$ and $V_2 = \{v_i : i \text{ is even}\}$.

Clearly, every V_i is a k -independent set of C_n and $||V_1| - |V_2|| \leq 1$.

Hence $\chi_{ED,k}(C_n) = 2$.

Case 3: $k=0$ and n is odd. By Lemma 1, $\chi_{ED,k}(C_n) \geq 3$.

We partition the vertex set $V(C_n)$ into three classes as the following two subcases.

Subcase 3.1 $n \equiv 0 \pmod{3}$ or $n \equiv 2 \pmod{3}$.

Let $V_1 = \{v_i : i \equiv 1 \pmod{3}\}$, $V_2 = \{v_i : i \equiv 2 \pmod{3}\}$, and $V_3 = \{v_i : i \equiv 0 \pmod{3}\}$.

Subcase 3.2 $n \equiv 1 \pmod{3}$.

Let $V_1 = \{v_i : i \equiv 1 \pmod{3} \text{ and } i \neq n\}$, $V_2 = \{v_i : i \equiv 2 \pmod{3} \text{ or } i = n\}$, and

$V_3 = \{v_i : i \equiv 0 \pmod{3}\}$.

From subcase 3.1 and subcase 3.2, it is clear that each V_i is a k -independent set of C_n and $\|V_i| - |V_j|\| \leq 1$ for every i, j . Hence $\chi_{ED,k}(C_n) = 3$.

A *complete graph* is a simple graph whose vertices are pairwise adjacent; the complete graph with n vertices is denoted by K_n .

Theorem 3. $\chi_{ED,k}(K_n) = \begin{cases} 1 & \text{for } k \geq n-1; \\ \lceil n/(k+1) \rceil & \text{for } k < n-1. \end{cases}$

Proof. Let $V(K_n) := \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$. We consider two cases.

Case 1: $k \geq n-1$. Since $\Delta(K_n) = n-1 \leq k$, $\chi_{ED,k}(K_n) = 1$ for all $n \geq 1$.

Case 2: $k < n-1$. Suppose there is an equitable (m, k) -coloring in K_n with $m < \lceil n/(k+1) \rceil$.

Then there is a color class of size $k+2$.

Hence the maximum degree of a graph induced by such a color class is at least $k+1$, a contradiction.

Therefore $\chi_{ED,k}(K_n) \geq \lceil n/(k+1) \rceil$.

We partition the vertex set $V(K_n)$ into $V_1 = \{v_i : i \equiv 1 \pmod{\lceil n/(k+1) \rceil}\}$, $V_2 = \{v_i : i \equiv 2 \pmod{\lceil n/(k+1) \rceil}\}, \dots, V_n = \{v_i : i \equiv 0 \pmod{\lceil n/(k+1) \rceil}\}$.

Clearly, each V_i is a k -independent set of K_n and $\|V_i| - |V_j|\| \leq 1$ for every i, j .

Hence $\chi_{ED,k}(K_n) = \lceil n/(k+1) \rceil$.

A graph G is *bipartite* if $V(G)$ is the union of two disjoint (possibly empty) independent sets called *partite sets* of G . A *complete bipartite graph* is a bipartite graph such that two vertices are adjacent if and only if they are in different partite sets. When the partite sets have size m and n ; the complete bipartite graph is denoted by $K_{m,n}$. If $m = 1$, we call $K_{1,n}$ a *star*.

The *hypercube* or *k-dimensional cube*, denoted by Q_k , is the simple graph whose vertices are the k -tuples with entries in $\{0, 1\}$ and whose edges are the pairs of k -tuples that differ in exactly one position.

Lemma 4. Let G be a connected bipartite graph with an edge whose partite sets are X and Y such that $\|X| - |Y|\| \leq 1$. If $k \geq \Delta(G)$, then $\chi_{ED,k}(G) = 1$, otherwise $\chi_{ED,k}(G) = 2$.

Proof. Let G be a connected bipartite graph with an edge whose partite sets are X and Y such that $\|X| - |Y|\| \leq 1$.

We consider two cases.

Case 1: $k \geq \Delta(G)$. It is obvious that $\chi_{ED,k}(G) = 1$ for all $n \geq 2$.

Case 2: $k < \Delta(G)$. Since G is a bipartite graph with an edge, Lemma 1 implies that $\chi_{ED,k}(G) \geq 2$.

We partition the vertex set of G into X and Y .

Clearly, X and Y are k -independent sets of G and $\|X| - |Y| \| \leq 1$.

Hence $\chi_{ED,k}(G) = 2$.

From Lemma 4, we obtain the following corollary.

- Corollary 1.**
- (i) If $k \geq n$, then $\chi_{ED,k}(K_{n,n}) = 1$, otherwise $\chi_{ED,k}(K_{n,n}) = 2$.
 - (ii) If $k \geq n$, then $\chi_{ED,k}(K_{n-1,n}) = 1$, otherwise $\chi_{ED,k}(K_{n-1,n}) = 2$.
 - (iii) If $k \geq n$, then $\chi_{ED,k}(Q_n) = 1$, otherwise $\chi_{ED,k}(Q_n) = 2$.

The *union* of graphs G and H , denoted by $G \cup H$, is the graph with a vertex set $V(G) \cup V(H)$ and an edge set $E(G) \cup E(H)$ (written $G + H$ if the vertex sets are disjoint). The *join* of simple graphs G and H , denoted by $G \vee H$, is the graph obtained from the disjoint union $G + H$ by adding the edges $\{xy : x \in V(G), y \in V(H)\}$.

A *wheel* is a simple graph consisting of a cycle C_{n-1} and another vertex called the center which is adjacent to all vertices in the cycle; the wheel with n vertices is denoted by $W_n, n \geq 4$. We note that $W_n = K_1 \vee C_{n-1}$.

Theorem 3. Let G' be a graph. If $|G'| = n, \Delta(G') \leq 2$ and $G = K_1 \vee G'$, then

$\chi_{ED,k}(G) = \lceil (n-k)/(k+2) \rceil + 1$ for $n > k \geq 2$ and $\chi_{ED,k}(G) = 1$ for $n \leq k$.

Proof. Let G' be a graph such that $|G'| = n, \Delta(G') \leq 2, G = K_1 \vee G', V(K_1) = \{v\}$, and $V(G') = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$.

Let e_j be the edge of vy_j for $1 \leq j \leq n$.

Case 1: $k \geq n$. Since $\Delta(G) = n \leq k, \chi_{ED,k}(G) = 1$ for all $n \geq 1$.

Case 2: $k < n$. Suppose there is an equitable (m, k) -coloring in G with $m \leq \lceil (n-k)/(k+2) \rceil$.

WLOG, $v, y_1, y_2, \dots, y_{k+1}$ are in the same color class. Hence the maximum degree of a graph induced by such a color class is $k+1$, a contradiction. So $\chi_{ED,k}(G) \geq \lceil (n-k)/(k+2) \rceil + 1$.

By the division algorithm, we obtain $n-k = (k+2)q+r, 0 \leq r \leq k+1$.

Subcase 2.1: $1 \leq r \leq k$.

Subsubcase 2.1.1: $q+r < k$. From $n-k = (k+2)q+r$, we have

$$n+1 = (k+2)q+r+k+1 < (k+1)q+2k+1 < (k+1)q+2k+2 = (k+1)(q+2).$$

So $((n+1)/(q+2)) < k+1$. Hence $\lceil (n+1)/(q+2) \rceil \leq k+1$.

We partition the vertex set of G into $q+2$ sets of size $\lfloor (n+1)/(q+2) \rfloor$ or $\lceil (n+1)/(q+2) \rceil$.

Since $\lceil (n+1)/(q+2) \rceil \leq k+1$, each set is k -independent. So G is equitably $(q+2, k)$ -colorable.

Since $q+2 = \lceil (n-k)/(k+2) \rceil + 1$, G is equitably $(\lceil (n-k)/(k+2) \rceil + 1, k)$ -colorable.

Subsubcase 2.1.2: $q+r = k$.

We put one vertex of $V(K_1)$ and k vertices of $V(G')$ into the same color class of size $k+1$ and partition the set of remaining vertices into $\lceil (n-k)/(k+2) \rceil$ classes of size k or $k+1$.

This implies G is equitably $(\lceil (n-k)/(k+2) \rceil + 1, k)$ -colorable.

Subsubcase 2.1.3: $q+r > k$.

We put one vertex of $V(K_1)$ and k vertices of $V(G')$ into the same color class of size $k+1$ and partition the set of remaining vertices into $\lceil (n-k)/(k+2) \rceil$ classes of size $k+1$ or $k+2$.

This implies G is equitably $(\lceil (n-k)/(k+2) \rceil + 1, k)$ -colorable.

Subcase 2.2: $r = 0$ or $k+1$.

We put one vertex of $V(K_1)$ and k vertices of $V(G')$ into the same color class of size $k+1$ and partition the set of remaining vertices into $\lceil (n-k)/(k+2) \rceil$ classes of size $k+1$ or $k+2$.

From subcase 2.1 and subcase 2.2, we obtain $\chi_{ED,k}(G) = \lceil (n-k)/(k+2) \rceil + 1$.

From Theorem 3, we obtain the two following corollaries.

$$\text{Corollary 2. } \chi_{ED,k}(K_{1,n}) = \begin{cases} 1 & \text{for } k \geq n; \\ \lceil (n-k)/(k+2) \rceil + 1 & \text{for } k < n. \end{cases}$$

Proof. Observe that $K_{1,n} = K_1 \vee G'$, where G' is a graph with n vertices and no edges.

By Theorem 3, $\chi_{ED,k}(K_{1,n}) = 1$ for $k \geq n$ and $\chi_{ED,k}(K_{1,n}) = \lceil (n-k)/(k+2) \rceil + 1$ for $k < n$.

$$\text{Corollary 3. } \chi_{ED,k}(W_n) = \begin{cases} 1 & \text{for } k \geq n-1; \\ \lceil ((n-1)-k)/(k+2) \rceil + 1 & \text{for } k < n-1. \end{cases}$$

Proof. Observe that $W_n = K_1 \vee G'$, where G' is a cycle with $n-1$ vertices.

By Theorem 3, $\chi_{ED,k}(W_n)=1$ for $k \geq n-1$ and $\chi_{ED,k}(W_n)=\lceil ((n-1)-k)/(k+2) \rceil +1$ for $k < n-1$.

Acknowledgments

This work is supported by the project for the promotion of Science and Mathematics Talented Teachers and the Centre of Excellence in Mathematics and Khon Kaen University. We would like to thank Applied Mathematics Research Group for partial financial support.

References

- Achuthan, N., Achuthan, N.R., and Simanihuruk, M. (2011). On minimal triangle-free graphs with prescribed k -defective chromatic number. *Discrete Mathematics*. 311: 1119-1127.
- Furmańczyk, H. (2006). Equitable coloring of graph products. *Opuscula Mathematica*. 26(1): 30-44.
- Hajnal, A. and Szemerédi, E. (1970). Proof of a conjecture of Erdős, in: Renji A. and Sos, V.T. editors., *Combinatorial Theory and Its Applications*. Vol. II, Colloquium of Mathematics Society Jonas Bolyai 4 (North-Holland, Amsterdam). 601-623.
- Lam, P. C. B., Shiua, W. C., Tonga, C. S., and Zhang, Z. F. (2001). On the equitable chromatic number of complete n -partite graphs. *Discrete Applied Mathematics*. 113: 307-310.
- Lih, K. W. and Wu, P. L. (1996). On equitable coloring of bipartite graphs. *Discrete Mathematics*. 151: 155-160.
- Meyer, W. (1973). Equitable coloring. *Amer. Math. Monthly*. 80: 920-922.
- West, D. B. (2001). *Introduction to Graph Theory*. Second edition. Illinois: Prentice-Hall.





The Number of General Triangles with Longest Side Less Than or Equal to n

Niroot Meekoed¹

Abstract

In this paper, we obtain the number of general triangles with longest side less than or equal to n is given by

$$N(\Delta)_{\leq n} = \begin{cases} \frac{n(n+2)(2n+5)}{24} & ; n \text{ is even} \\ \frac{(n+1)(n+3)(2n+1)}{24} & ; n \text{ is odd,} \end{cases}$$

where n is positive integer.

Keyword: General triangles

Introduction and Preliminaries

The triangle is one of the most interesting in geometry and important for study the trigonometry. It was studied extensively by the ancient Greek. There are many well-known theorems which related triangle, for example, Pythagorean' theorem and Thales' theorem etc. Kühleitner (Kühleitner, 1993) intended to study the number of Pythagorean triangles with hypotenuse less than n . Benito and Varona (Benito and Varona, 2002) concerned the number of Pythagorean triples (x, y, z) such that $x < n, y < n$.

Motivated by the above works, we will study the number of triangles with the longest side less than or equal to n . The following proposition is the most important in our study.

Proposition 1 (Fitzpatrick, 2005) In any triangle the sum of any two sides is greater than the remaining one.

¹ Banrai Pittayakhom School, Si Samrong District, Sukhothai Province, 64120

E-mail: meekoed@hotmail.com

Throughout this paper, we consider the general triangles with any side has positive integer length, for short, we say triangles. By proposition 1, we see that if let n be positive integer, then the general form of triangles with longest side less than or equal to n can be write $(a, a + b, a + b + c)$, where $a \in \{1, 2, \dots, n\}$, $b \in \{0, 1, 2, \dots, n-a\}$ and $c \in \{0, 1, 2, \dots, a-1\}$.

Main Results

Theorem 1 Let n be a positive integer, the number of general triangles with longest side less than or equal to n is given by

$$N(\Delta)_{\leq n} = \begin{cases} \frac{n(n+2)(2n+5)}{24} & ; n \text{ is even} \\ \frac{(n+1)(n+3)(2n+1)}{24} & ; n \text{ is odd.} \end{cases}$$

Proof: Let n be a positive integer.

Case 1 : n is even.

If $a = 1$, then $c \in \{0\}$.

Thus the general form of the triangle is $(1, 1+b, 1+b)$ for all $b \in \{0, 1, 2, \dots, n-1\}$.

If $a = 2$, then $c \in \{0, 1\}$.

For $c = 0$, the general form of the triangle is $(2, 2+b, 2+b)$ for all $b \in \{0, 1, 2, \dots, n-2\}$.

For $c = 1$, the general form of the triangle is $(2, 2+b, 3+b)$ for all $b \in \{0, 1, 2, \dots, n-3\}$.

If $a = 3$, then $c \in \{0, 1, 2\}$.

For $c = 0$, the general form of the triangle is $(3, 3+b, 3+b)$ for all $b \in \{0, 1, 2, \dots, n-3\}$.

For $c = 1$, the general form of the triangle is $(3, 3+b, 4+b)$ for all $b \in \{0, 1, 2, \dots, n-4\}$.

For $c = 2$, the general form of the triangle is $(3, 3+b, 5+b)$ for all $b \in \{0, 1, 2, \dots, n-5\}$.

$\vdots$

If $a = \frac{n}{2} - 1$, then $c \in \{0, 1, 2, \dots, \frac{n}{2} - 2\}$.

For $c = 0$, the general form of the triangle is $(\frac{n}{2} - 1, \frac{n}{2} - 1 + b, \frac{n}{2} - 1 + b)$ for all $b \in \{0, 1, 2, \dots, \frac{n}{2} + 1\}$.

For $c = 1$, the general form of the triangle is $(\frac{n}{2} - 1, \frac{n}{2} - 1 + b, \frac{n}{2} + b)$ for all $b \in \{0, 1, 2, \dots, \frac{n}{2}\}$.

$\vdots$

For $c = \frac{n}{2} - 2$, the general form of the triangle is $(\frac{n}{2} - 1, \frac{n}{2} - 1 + b, n - 3 + b)$ for all $b \in \{0, 1, 2, 3\}$.

If $a = \frac{n}{2}$, then $c \in \{0, 1, 2, \dots, \frac{n}{2} - 1\}$.

For $c = 0$, the general form of the triangle is $(\frac{n}{2}, \frac{n}{2} + b, \frac{n}{2} + b)$ for all $b \in \{0, 1, 2, \dots, \frac{n}{2}\}$.

For $c = 1$, the general form of the triangle is $(\frac{n}{2}, \frac{n}{2} + b, \frac{n}{2} + b + 1)$ for all $b \in \{0, 1, 2, \dots, \frac{n}{2} - 1\}$.

•

For $c = \frac{n}{2} - 1$, the general form of the triangle is $(\frac{n}{2}, \frac{n}{2} + b, n + b - 1)$ for all $b \in \{0, 1\}$.

If $a = \frac{n}{2} + 1$, then $c \in \{0, 1, 2, \dots, \frac{n}{2} - 1\}$.

For $c = 0$, the general form of the triangle is $(\frac{n}{2} + 1, \frac{n}{2} + 1 + b, \frac{n}{2} + 1 + b)$ for all $b \in \{0, 1, 2, \dots, \frac{n}{2} - 1\}$.

For $c = 1$, the general form of the triangle is $(\frac{n}{2} + 1, \frac{n}{2} + 1 + b, \frac{n}{2} + 2 + b)$ for all $b \in \{0, 1, 2, \dots, \frac{n}{2} - 2\}$.

•

For $c = \frac{n}{2} - 1$, the general form of the triangle is $(\frac{n}{2} + 1, \frac{n}{2} + 1, n)$.

•

If $a = n - 1$, then $c \in \{0, 1\}$.

For $c = 0$, the general form of the triangle is $(n-1, n-1+b, n-1+b)$ for all $b \in \{0, 1\}$.

For $c = 1$, the general form of the triangle is $(n-1, n-1, n)$.

If $a = n$, then $c \in \{0\}$.

Hence the general form of the triangle is (n, n, n) .

By above, we summarize the number of triangles as the following table :

$b = n - 1$	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
-------------	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

From table 1, we can conclude that

for $b = 0$, the summation of triangles is

$$1 + 2 + 3 + \cdots + \frac{n}{2} - 1 + \frac{n}{2} + \frac{n}{2} + \frac{n}{2} - 1 + \cdots + 3 + 2 + 1 = \frac{n}{2} \cdot \frac{n}{2} + 1. \quad (1)$$

For $b = 1$, the summation of triangles is

$$1 + 2 + 3 + \cdots + \frac{n}{2} - 1 + \frac{n}{2} + \frac{n}{2} - 1 + \cdots + 3 + 2 + 1 = \frac{n}{2} + \frac{n}{2} \cdot \frac{n}{2} - 1 = \frac{n}{2} \cdot \frac{n}{2}. \quad (2)$$

For $b = 2$, the summation of triangles is

$$1 + 2 + 3 + \cdots + \frac{n}{2} - 1 + \frac{n}{2} - 1 + \cdots + 3 + 2 + 1 = \frac{n}{2} - 1 \cdot \frac{n}{2}. \quad (3)$$

For $b = 3$, the summation of triangles is

$$\begin{aligned} 1 + 2 + 3 + \cdots + \frac{n}{2} - 2 + \frac{n}{2} - 1 + \frac{n}{2} - 2 + \cdots + 3 + 2 + 1 &= \frac{n}{2} - 1 + \frac{n}{2} - 1 \cdot \frac{n}{2} - 2 \\ &= \frac{n}{2} - 1 \cdot \frac{n}{2} - 1. \end{aligned} \quad (4)$$

$\vdots$

For $b = n-3$, the summation of triangles is $1+2+1=4=(2)(2)$. (n-2)

For $b = n-2$, the summation of triangles is $1+1=2=(1)(2)$. (n-1)

For $b = n-1$, the summation of triangles is $1=(1)(1)$. (n)

Thus, the number of triangles is the summation of the above n equations, that is

$$N(\triangle)_{\leq n} = (1)(1) + (1)(2) + (2)(2) + (2)(3) + \cdots + \frac{n}{2} \cdot \frac{n}{2} + \frac{n}{2} \cdot \frac{n}{2} + 1.$$

Since $1^2 + 2^2 + 3^2 + \cdots + m^2 = \frac{m(m+1)(2m+1)}{6}$ and

$(1)(2) + (2)(3) + (3)(4) + \cdots + m(m+1) = \frac{m(m+1)(m+2)}{3}$, we can rewrite the number of triangles as follows ;

$$\begin{aligned} N(\triangle)_{\leq n} &= (1)(1) + (1)(2) + (2)(2) + (2)(3) + \cdots + \frac{n}{2} \cdot \frac{n}{2} + \frac{n}{2} \cdot \frac{n}{2} + 1 \\ &= [1^2 + 2^2 + 3^2 + \cdots + \frac{n}{2}^2] + [(1)(2) + (2)(3) + (3)(4) + \cdots + \frac{n}{2} \cdot \frac{n}{2} + 1] \\ &= \frac{\frac{n}{2} \cdot \frac{n}{2} + 1}{6} + \frac{\frac{n}{2} \cdot \frac{n}{2} + 1}{3} \\ &= \frac{n \cdot \frac{n}{2} + 1}{24} + \frac{n \cdot \frac{n}{2} + 1}{24} \\ &= \frac{n \cdot \frac{n}{2} + 2}{24}. \end{aligned}$$

Case 2 : n is odd.

Similarly, we have the number of triangles is

$$\begin{aligned}
 N(\triangle)_{\leq n} &= (1)(1) + (1)(2) + (2)(2) + (2)(3) + \cdots + \frac{n+1}{2} - 1 \quad \frac{n+1}{2} + \frac{n+1}{2} \quad \frac{n+1}{2} \\
 &= [1^2 + 2^2 + 3^2 + \cdots + \frac{n+1}{2}^2] + [(1)(2) + (2)(3) + (3)(4) + \cdots + \frac{n+1}{2} - 1 \quad \frac{n+1}{2}] \\
 &= \frac{\frac{n+1}{2} \quad \frac{n+1}{2} + 1 \quad n+1+1}{6} + \frac{\frac{n+1}{2} - 1 \quad \frac{n+1}{2} \quad \frac{n+1}{2} + 1}{3} \\
 &= \frac{n+1 \quad n+2 \quad n+3}{24} + \frac{n-1 \quad n+1 \quad n+3}{24} \\
 &= \frac{n+1 \quad n+3 \quad 2n+1}{24}.
 \end{aligned}$$

□

References

- Benito, M. and Varona, J. L. (2002). Pythagorean triangle with legs less than n . Journal of Computational and Applied Mathematics. 143 : 117(126.
- Kühleitner, M. (1993). An omega theorem on Pythagorean triples. Abhandlungen aus dem Mathematischen Seminar der Universität Hamburg. 63 : 105(113.
- Fitzpatrick, R. (2005). Euclid's Elements in Greek : Vol. I : Books 1-4. North Carolina : Lulu Press.



Simple Proofs for Determining All Nonisomorphic Bands of Order 3 and Nonisomorphic Bands of Order 4 Which Have an Identity Element

Somchit Chotchaisthit¹

Abstract

In this paper we show that there are only 10 nonisomorphic bands of order 3 and there are 10 nonisomorphic bands of order 4 which have an identity element.

Key words: bands

2000 Mathematics Subject Classification: 60F05

Let $(S, *)$ be a semigroup. An element a of S is called an idempotent element if $a^2 = a$. A band is a semigroup in which every element is idempotent. An element e of S is called an identity element if $a * e = a = e * a$ for all a in S . An element z of S is called the left (right) zero element if $z * s = z$ ($s * z = z$) for all s in S . An element z of S is called a zero element if $z * s = z = s * z$ for all s in S . It is known that there are 5 nonisomorphic semigroups of order 2 and there are 3 nonisomorphic bands of order 2. In this paper we show that there are 10 nonisomorphic bands of order 3 and there are 10 nonisomorphic bands of order 4 which have an identity element.

The following proposition gives a property of bands of order 3.

Proposition Every band of order 3 has at least one left zero or has at least one right zero.

Proof. Let $S = (\{a, b, c\}, *)$ be any band. We consider the product $a * b$.

Case 1. $a * b = a$. If $a * c = a$, then a is a left zero element of S . If $a * c = b$, then $a = a * b = a * (a * c) = (a * a) * c = a * c = b$. This is impossible. Finally, if $a * c = c$, then $a * (b * c) = (a * b) * c = a * c = c$. This implies that $b * c = c$. So c is a right zero element of S .

Case 2. $a * b = b$. If $c * b = a$, then $a = c * b = c * (b * b) = (c * b) * b = a * b = b$. This is impossible. So $c * b = b$ or $c * b = c$. In case $c * b = b$, b is a right zero of S . In case $c * b = c$

¹ Department of Mathematics, Faculty of Science, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

E-mail: somchit@kk.ac.th

we have $(c * a) * b = c * (a * b) = c * b = c$. This implies that $c * a = c$. So c is a left zero element of S .

Case 3. $a * b = c$. So we have $a * c = a * (a * b) = (a * a) * b = a * b = c$. Since $a * (b * c) = (a * b) * c = c * c = c$, $b * c$ cannot be equal to a . If $b * c = c$, then c is a right zero element of S . In case $b * c = b$, we have $(b * a) * b = b * (a * b) = b * c = b$. So b is a left zero element of S . $\square$

We know that $\mathbb{Z}_3$ (group of residues modulo 3) has only one idempotent. It has neither left zero nor right zero. Next we want to give two examples. One example is a semigroup of order 3 having two idempotents but it has neither a left zero nor a right zero. Another example is a band of order 4 but it has neither a left zero nor a right zero.

*	a	b	c
a	a	b	c
b	b	b	c
c	c	c	b

*	a	b	c	d
a	a	a	c	c
b	b	b	d	d
c	a	a	c	c
d	b	b	d	d

Theorem There are only 10 nonisomorphic bands of order 3.

Proof. Let $S = (\{a, b, c\}, *)$ be any band of order 3. By proposition, S has at least one left zero or right zero. We know that every semigroup which has only one left zero or has only one right zero has a zero. So we consider 3 cases:

Case 1. S has a zero. WLOG, we may assume that a is the zero of S . So we consider 3 subcases of case 1 according to the product $b * c$.

Subcase 1.1 $b * c = a$. Since $(c * b) * c = c * (b * c) = c * a = a$, $c * b$ is not equal to c . Since $b * (c * b) = (b * c) * b = a * b = a$, $c * b$ is not equal to b . Therefore $c * b = a$. So we have the Table 1.

Subcase 1.2 $b * c = b$. Since $b * (c * b) = (b * c) * b = b * b = b$, $c * b$ is not equal to a . Therefore $c * b = b$ or $c * b = c$. So we have Table 2 and Table 3.

Subcase 1.3 $b * c = c$. Since $(c * b) * c = c * (b * c) = c * c = c$, $c * b$ is not equal to a . Therefore $c * b = b$ or $c * b = c$. So we have Table 4 and Table 5.

Case 2. S has more than one left zero. WLOG, we may assume that a and b are left zeros of S . So we consider 3 subcases of case 2 according to the product $c * a$.

Subcase 2.1 $c * a = a$. Since $(c * b) * a = c * (b * a) = c * b$, $c * b$ is not equal to c . Therefore $c * b = a$ or $c * b = b$. So we have Table 6 and Table 7.

Subcase 2.2 $c * a = b$. We have $c * b = c * (c * a) = (c * c) * a = c * a = b$. So we

have the Table 8.

Subcase 2.3 $c * a = c$. We have $c * b = (c * a) * b = c * (a * b) = c * a = c$. So we have the Table 9.

Case 3. S has more than one right zero. WLOG, we may assume that a and b are right zeros of S . So we consider 3 subcases of case 3 according to the product $a * c$.

Subcase 3.1 $a * c = a$. Since $a * (b * c) = (a * b) * c = b * c$, $b * c$ is not equal to c . Therefore $b * c = a$ or $b * c = b$. So we have Table 10 and Table 11.

Subcase 3.2 $a * c = b$. We have $b * c = (a * c) * c = a * (c * c) = a * c = b$. So we have the Table 12.

Subcase 3.3 $a * c = c$. We have $b * c = b * (a * c) = (b * a) * c = a * c = c$. So we have the Table 13.

The following tables are obtained from the above argument.

*	a	b	c
a	a	a	a
b	a	b	a
c	a	a	c

Table 1

*	a	b	c
a	a	a	a
b	a	b	b
c	a	b	c

Table 2

*	a	b	c
a	a	a	a
b	a	b	b
c	a	c	c

Table 3

*	a	b	c
a	a	a	a
b	a	b	c
c	a	b	c

Table 4

*	a	b	c
a	a	a	a
b	a	b	c
c	a	c	c

Table 5

*	a	b	c
a	a	a	a
b	b	b	b
c	a	a	c

Table 6

*	a	b	c
a	a	a	a
b	b	b	b
c	a	b	c

Table 7

*	a	b	c
a	a	a	a
b	b	b	b
c	b	b	c

Table 8

*	a	b	c
a	a	a	a
b	b	b	b
c	c	c	c

Table 9

*	a	b	c
a	a	b	a
b	a	b	a
c	a	b	c

Table 10

*	a	b	c
a	a	b	a
b	a	b	b
c	a	b	c

Table 11

*	a	b	c
a	a	b	b
b	a	b	b
c	a	b	c

Table 12

*	a	b	c
a	a	b	c
b	a	b	c
c	a	b	c

Table 13

Next we want to show that all tables are associative. It is easy to see that table 2, 3, 4, 5 come from semigroup of order 2 by adding a zero element. Table 9 is a left zero semigroup. Table 13 is a right zero semigroup. It is easy to compute that remaining tables has a zero or a left zero or a right zero. It is easy to check that table 5 is isomorphic to table 2, table 8 is isomorphic to table 6, table 12 is isomorphic to table 10 and remaining tables are nonisomorphic. Now, we can conclude that there are only 10 nonisomorphic bands of order 3. $\square$

Lemma Let S be a semigroup which has an identity element 1 and $b \in S$. If a is a nonidentity idempotent element of S , then $a * b$ and $b * a$ are nonidentity elements.

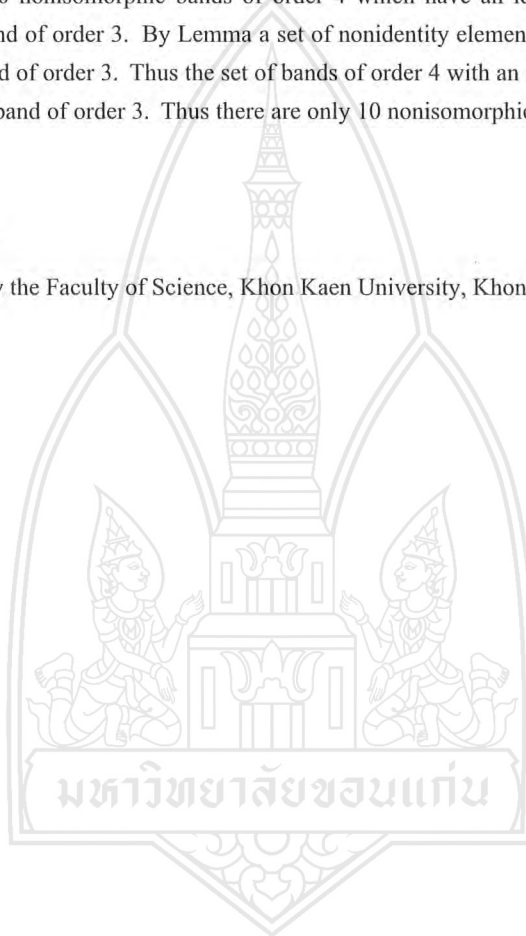
Proof. Let a be a nonidentity element of S and $a * b = 1$. Then $a = a * 1 = a * (a * b) = (a * a) * b = a * b = 1$. This contradict with $a \neq 1$. The case $b * a$ is similar to that one. $\square$

Corollary There are 10 nonisomorphic bands of order 4 which have an identity element.

Proof. Now we have 10 nonisomorphic bands of order 4 which have an identity element by adding an identity element to each band of order 3. By Lemma a set of nonidentity element of a band of order 4 with an identity element form a band of order 3. Thus the set of bands of order 4 with an identity element is one-to-one correspondent to the set of band of order 3. Thus there are only 10 nonisomorphic bands of order 4 which have an identity element. $\square$

Acknowledgements

This work was supported by the Faculty of Science, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand.





ดัชนีวารสารวิทยาศาสตร์ มข.
(เรียงตามชื่อผู้แต่ง)
ปีที่ 39 (พ.ศ. 2554)

ผู้เขียน	ชื่อเรื่อง	ฉบับที่	หน้า
Amornrat Aungwerojwit	Cataclysmic Variables	3	387
Ismaair Jehlong	เรณูวิทยาของพรรณไม้ปลูกในมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ประเทศไทย (Palynology of Cultivated Plant Species at Yala Rajabhat University, Thailand)	3	433
Niroot Meekoed	The Number of General Triangles with Longest Side Less Than or Equal to n	4	696
Piyakarn Teartisup Prapeut Kerdsueb	Application of Mike 11 for Water Quality Assessment at U-Tapao Canal, Southern of Thailand	4	649
Somchit Chotchaisthit	Simple Proofs for Determining All Nonisomorphic Bands of Order 3 and Nonisomorphic Bands of Order 4 Which Have an Identity Element	4	701
Somporn Prasertsongskun Witool Chaipakdee	Effect of Chitosan on Growth and Development of <i>Phalaenopsis cornucervi</i> (Breda) Blume & Rchb.f.	1	113
Somsong Nanakorn Niyada Honark Supannee Ungpansattawong Wichuda Chaisiwamongkol Amnuay Maneesriwongul Rassame Suwanwerakamtorn Sarintip Raksasataya Kusuma Chusilp	ลายนิ้วมือและพหุปัญญา: การศึกษาเบื้องต้น (Fingerprint Pattern and Multiple Intelligence: a Preliminary Study)	1	105

ผู้เขียน	ชื่อเรื่อง	ฉบับที่	หน้า
Sukanda Cummuang Keaitsuda Nakprasit	Equitable defective colorings of some classes of graphs	4	688
เกียรติสุดา นาคประสิทธิ์	การระบายสีเส้นเชื่อมในกราฟ (Edge-Coloring in Graphs)	3	421
ขวัญชัย กุเจริญไพศาล กนกกร สีนมา	เอนไซม์ไซลานาสสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ (Xylanases for Biofuel Production)	2	159
ครรชิต พิระภาค	การประยุกต์เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศเพื่อศึกษา การถือครองที่ดินเขตพื้นที่ชายแดน: กรณีศึกษา องค์การบริหารส่วนตำบลโนนดินแดง อำเภอ โนนดินแดง จังหวัดบุรีรัมย์ (An Application of Geoinformation Technology to Study Ownership in Margin Areas : A Case Study in Non Din Deang Sub-district Administrative Organization, Amphoe Non Din Deang, Buriram Province)	1	137
จันทร์ดา ประเสริฐสุกุล นิภาดา พากักดี	ตัวประมาณอัตราส่วนตัวใหม่ของค่าเฉลี่ยประชากร ในการสุ่มตัวอย่างแบบอย่างง่าย (A new Ratio Estimator of a Population in Random Sampling)	1	149
จันทร์ดาพร ทองเอกแก้ว กิริติชัยนันต์ จรรยาเพศ	ความหลากหลายของยีสต์ทนร้อนบริเวณอุทยานแห่งชาติ ภูจองนายอย (Diversity of Thermotolerant Yeasts in Phujong Nayoy National Park)	2	242
ชนกานต์ ปาณวงค์ ปวีณา มาริไสว	การสังเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน และสัณฐานวิทยา ของพอลิ(เอปไซลอน-คาโพรแลกโตน) พอลิ(แอล-แลคติกแอซิด) และพอลิเมอร์ผสม (Synthesis, thermal properties and morphology of Poly(ϵ -caprolactone) Poly(L-lactic acid) and blends)	4	664
ดวงหทัย สิงห์ทะ วสุ ปฐมอารีย์	เทคนิค Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (DGGE): หลักการ และการประยุกต์ใช้ทางจุลชีววิทยา สิ่งแวดล้อม (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis : Principle and Application in Environmental Microbiology)	3	321

ผู้เขียน	ชื่อเรื่อง	ฉบับที่	หน้า
ธนจันทร์ มหาวนิช	การใช้นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปีเพื่อติดตามการเคลื่อนที่ของน้ำในระบบอาหาร (Use of Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy for Monitoring Water Mobility in Food Systems)	3	409
ชนากร แสงสง่า ชุตตา บุญภักดี	ยีนที่สร้างไวเทลโลจีนินและโปรตีนโซนารดิเอด้าในปลา: ตัวชี้วัดทางชีวภาพของสารรบกวนฮอร์โมนเอสโตรเจน (e-EDCs) ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ (Vitellogenin and Zona Radiata Protein Genes in Fish: Biomarkers of Estrogenic Endocrine Disrupting Compounds (e-EDCs) Contamination in Aquatic Environment)	3	364
ธิดารัตน์ สมดี	บทบาทของรีซิสตินกับโรคอ้วนและโรคเบาหวาน (Association of Resistin Role's with Obesity and Diabetes Mellitus)	4	550
นงลักษณ์ มีทอง	แบตเตอรี่ชนิดใหม่เพื่ออนาคต: แบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออน (New Rechargeable Battery for The Future: Sodium-Ion Batteries)	4	598
นพคุณ ภักดีณรงค์ อาณัติ จันทรธิระติกุล	ผลของการเสริมไส้เดือนดินในอาหารต่อการเจริญเติบโตและอัตราการรอดของลูกกุ้งก้ามกราม (Effect of supplementation of earthworm into diets on growth and survival rates of the giant freshwater prawn juveniles)	3	466
นพรัตน์ มะเห สุสดี มุหะหมัด อุไรวรรณ วัฒนกุล	คุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระของผลผลิตจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดของไคโตแซนและน้ำตาล (Antioxidant Activity of Maillard Reaction Product from Chitosan and Sugar)	1	80
นฤมล ชนานันต์ อรพรรณ บุญประดิษฐ์ ธีระชัย ชนานันต์	การศึกษาความหลากหลายทางพันธุกรรมของมะลิสกุลจัสมีนัมด้วยเทคนิคอาร์เอพีดี (Study the Genetic Diversity in <i>Jasminum</i> Using Random Amplified Polymorphic DNA Technique)	2	263

ผู้เขียน	ชื่อเรื่อง	ฉบับที่	หน้า
น้ำทิพย์ พนมไทย บุญอ้อม โฉมทิ ประสิทธิ์ พยัคฆพงษ์	การเปรียบเทียบวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย สำหรับข้อมูลตัวแปรพหุ (A Comparison of Missing Data Estimation Methods for Multivariate Data)	3	502
นิธิพนธ์ พุทธธงชัย ธวัชชัย กุลวรรณิษพงษ์ พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล สุธรรม ศรีหล่มสัก	ผลของสมบัติไพโซโซอิเล็กทริกในวัสดุ PZTs ต่อการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Effect of Piezoelectric Properties of PZTs on Energy Harvesting)	2	281
นุชนาถ วุฒิประดิษฐกุล	ภาวะเครียดจากออกซิเดชันและระบบต้าน การเกิดออกซิเดชันในพืช (Oxidative stress and antioxidative system in plants)	2	172
ปาริชาติ พุ่มขจร พงศ์ศักดิ์ รัตนชัยกุลโสภณ	แลคติกแอซิดแบคทีเรีย : หัวเชื้อและการถูกทำลาย โดยแบคทีเรียโอเฟจ (Lactic Acid Bacteria : Starter Culture and Bacteriophage Infection)	4	525
พยอม เหล่าชุมพล พฤษดี ศิริแสงตระกูล	ระบบสร้างชุดข้อสอบโดยใช้การค้นหาคำแบบคาบ (Examination Paper Generation System Using Tabu search)	4	675
พรจักร ศรีพัชรารุช	วัสดุกักเก็บไฮโดรเจน (Hydrogen Storage Materials)	4	608
พรประภา ขุนถนอม สุกัญญา สายธิ	ผลของภาชนะบรรจุและการเก็บรักษาต่อ คุณค่าทางโภชนาการของน้ำผลไม้ผสมน้ำสับปะรด (Effects of Package and Storage on Nutritive Values of Mao and Pineapple Juices)	4	631
พรศิริ ทองเปรม ประธาน วงศ์ศรีเวช	ผลการแคลไซน์ต่อการดูดซับของตัวเร่งปฏิกิริยา ในการบำบัดน้ำเสียฟีนอล (Calcination Effect on Adsorption of Catalyst for Phenolic Wastewater Treatment)	2	270
พัชรภรณ์ จิตติวงศ์เสวต	เส้นใยนาโนในงานใช้งานด้านวัสดุโครงสร้าง สำหรับแพะเลี้ยงเซลล์ (Nanofibers in Scaffolding Applications)	2	210

ผู้เขียน	ชื่อเรื่อง	ฉบับที่	หน้า
พัชรี แสงจันทร์ มัทธมา เจียจันทิก วรรณวิภา แก้วประดิษฐ์ เกริก ปั่นหนึ่งเพ็ชร	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปล่อยก๊าซมีเทน กับลักษณะสัณฐานของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และพันธุ์สกลนคร (Relationship between Methane Emission Rate and Morphological Characteristics of Chainat 1 and Sakol Nakhon rice Varieties)	3	447
พิม มะลิงาม คณินทร์ ธีรภาพโอฬาร	การประมาณเรขาคณิตแบบจุดโดยฟังก์ชัน w (A Pointwise Geometric Approximation by w -Functions)	3	490
ภพแก้ว พุทธรักษ์	พืชดัดแปลงพันธุกรรมกับการถ่ายฝากสารพันธุกรรม ด้วยแบคทีเรีย <i>Agrobacterium tumefaciens</i> (Genetically Modified Plants with <i>Agrobacterium</i> <i>tumefaciens</i> : a tool for Plant Transformation)	1	14
ภัทรภรณ์ แก้วกุล	คุณลักษณะและอายุการเก็บรักษาของน้ำมันรำข้าว หอมมะลิอินทรีย์แบบบีบเย็น (Characterization and Shelf Life of Cold Pressed Organic Jasmine Rice Bran oil)	1	96
มังกร ศรีสะอาด ยอดธง ไบมาก	พลาสติกชีวภาพสังเคราะห์: ชนิด การสังเคราะห์ และสมบัติของพอลิแลคติกแอซิด (Synthetic Bioplastics: Types, Synthesis and Properties of Poly(lactic acid)s)	1	52
ยุวันดา เอี่ยมเผ่าจีน ปทุมมา ศิริพันธ์โนน	การปลูกอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์บนผ้าฝ้าย ที่ปรับปรุงด้วยพอลิสดิไรโนอิลโฟนิคแอซิดและ สมบัติการป้องกันรังสียูวี (Growth of ZnO nanoparticles on poly 4-styrenesulfonic acid modified cotton fabrics and UV protection property)	3	459
รัตนภรณ์ ลิสิงห์	จากสาหร่ายขนาดเล็กสู่เชื้อเพลิงชีวภาพ : โอกาส และความท้าทาย (From Microalgae to Biofuel: Opportunities and Challenges)	3	334
ละอียด นาคกระแสร	กลไกการควบคุมน้ำและไอออนในปลาน้ำจืดและน้ำเค็ม (Osmoregulation and ionoregulation of freshwater and seawater fishes)	4	540

ผู้เขียน	ชื่อเรื่อง	ฉบับที่	หน้า
ลำไย ธีรัตน์พันธุ์	ผลของโลหะหนักต่อสัตว์หน้าดินจำพวกหอย (Effect of Heavy Metals on Mollusk)	3	375
วุดินันท์ รักษาจิตร คมสัน สัจจะสถาพร	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแอกติวิตีของเอนไซม์ไฮโดรจีเนส และไนโตรจีเนสในการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพของ ไซยาโนแบคทีเรีย (Factors Influencing Hydrogenase and Nitrogenase Activity in Cyanobacterial Biohydrogen Production)	1	1
ศรชัย พุทธชัย พิมพ์วดี พรพงษ์รุ่งเรือง อมรรัตน์ มีสวาสดี	พรรณไม้อันดับ Malpighiales ในป่านายูง-น้ำโสม อุทยานแห่งชาตินายูง-น้ำโสม จังหวัดอุดรธานี (Malpighiales in Na Yung-Nam Som Forest, Na Yung-Nam Som National Park, Udon Thani Province)	4	640
ศิริพร ภัทรกิจกำจร มนทิรา จะนนท์	การเตรียมซีรัมด้วยเทคนิคอย่างง่ายเพื่อการค้นพบ สารบ่งชี้ทางชีวภาพ (Simple techniques for serum preparations in biomarkers discovery)	1	28
ศิริลักษณ์ นามวงษ์	แนวโน้มการใช้ประโยชน์จากอาร์เคียชอบเค็ม (Trend of Usage from Halophilic Archaea)	1	36
ศิริวรรณ ดีภู	นาโนเทคโนโลยี กับ ไบโอเซนเซอร์ (Nanotechnology and Biosensor)	4	575
สมักร์ พิมานแพง	เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้พอลิเอนิลีน เป็นขั้วแคโทด (Dye-Sensitized Solar Cell based on Polyaniline Films as Counter Electrode)	4	587
สรพงศ์ เบญจศรี	เครื่องหมายโมเลกุลสำหรับการปรับปรุงพันธุ์พืช (Molecular Markers for Plant Breeding)	3	350
สายันต์ โพธิ์เกตุ	การคำนวณปริมาณไอน้ำกลั่นตัวได้ในบรรยากาศ ของประเทศไทย (Calculation of Precipitable Water Vapor in the Atmosphere of Thailand)	1	130
สุธรรม ศรีหล่มสัก	ตัวทำความร้อน PTCR-BaTiO ₃ (PTCR-BaTiO ₃ Heating Element)	1	71

ผู้เขียน	ชื่อเรื่อง	ฉบับที่	หน้า
สุบัณฑิต นิ่มรัตน์ กนิษฐา ตั้งข้าว ไทรมาศ บุญไทย วีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย	ผลของยาปฏิชีวนะต่อการเปลี่ยนแปลงของแบคทีเรีย ทางทะเลและการเคลื่อนที่ของสเปิร์มในน้ำเชื้อ ปลากระพงขาว (<i>Lates calcarifer</i>) (Effect of Antibiotic on the Change of Marine Bacteria and Motility of Spermatozoa in Asian Seabass (<i>Lates calcarifer</i>) Semen Preserved under Chilled Storage)	2	252
สุปราณี วุ่นศรี ธวัช ชิตตระการ ไทรภพ ผ่องสุวรรณ ภัทร อัยรักษ์ สมศักดิ์ คงแสง พวงทิพย์ แก้วทับทิม	การหาช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเก็บเกี่ยว ทะลายปาล์มน้ำมัน (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัม (Indicating of the Optimal Harvesting Time for Oil Palm Fruit-clusters (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.) by Spectrum Analysis Technique)	3	515
สุปรีย์ พินิจสุนทร	ผลของการเจือราดต่อสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกส์ ของแคลเซียมโคบอลต์ไทต์ (Effect of Elemental Doping on the Thermoelectric Properties of Calcium Cobaltite)	2	219
สุรางคณา มาตย์วิเศษ	การพัฒนาเมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบ พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: The Membrane Development)	2	232
อรรวรรณ พิมพ์จันทร์ หนูเดือน เมืองแสน	การขยายพันธุ์ข้าวเหนียวดำในหลอดทดลอง (In Vitro Regeneration of Purple Glutinous Rice (<i>Oryza sativa</i> L.))	4	621
อริศรา จรากร วิภารัตน์ เชื้อขาวด รัตน สำนัเมือง	การวิเคราะห์หาปริมาณสารกลุ่มซัลโฟนาไมด์อย่างง่าย ในตัวอย่างยาด้วยเทคนิค สเปกโตรโฟโตเมตรีโดยใช้ 8 - ไฮดรอกซีควิโนลีนเป็นรีเอเจนต์ในการทำปฏิกิริยาร่วม (Simple Analytical Method for the Determination of Sulfonamides in Pharmaceutical Preparations by Spectrophotometry Using 8-Hydroxyquinoline as Coupling Reagent)	1	120
อรุโณทัย จำปีทอง สุทธาธร ไชยเรืองศรี	พืชน้ำ : บทบาทสำคัญกับการบำบัดน้ำเสีย (Aquatic Macrophytes: The Important Roles in Wastewater Treatment)	2	182

ผู้เขียน	ชื่อเรื่อง	ฉบับที่	หน้า
อ่อนลมี กมลอินทร์ วันวิสา พัฒนศิริวิศว สุธรรม ศรีหล่มสัก นงลักษณ์ มีทอง	การศึกษาโครงสร้างของ $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{TiO}_3$ โดยใช้วิธี Rietveld refinement (Structural Studies of $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{TiO}_3$ Using the Rietveld Refinement Method)	3	475
อารดา ขาฟี่ ชนิดย์ อินทรรัตน์	การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ในการ พัฒนาแหล่งน้ำ กรณีศึกษา ตำบลประณีต อำเภอเขาสมิง จังหวัดตราด (Application of Geographic Information System on Water Resource Development: A Case Study in Pranit Sub-District, Khao Saming District, Trad Province)	2	299
อารีย์ ชูคำ วรวิทย์ วงศ์นิรมัยกุล	การตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงด้วยวิธีทางกายภาพ (The Detection of Latent Fingerprints by Physical Methods)	2	193
อารีย์ ชูคำ วรวิทย์ วงศ์นิรมัยกุล	การตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงด้วยวิธีการทางเคมี และแสง (The Detection of Latent Fingerprints by Chemical and Optical Methods)	4	559



ดัชนีวารสารวิทยาศาสตร์ มข.
(เรียงตามชื่อเรื่อง)
ปีที่ 39 (พ.ศ. 2554)

ชื่อเรื่อง	ผู้เขียน	ฉบับที่	หน้า
Application of Mike 11 for Water Quality Assessment at U-Tapao Canal, Southern of Thailand	Piyakarn Teartisup Praeut kersueb	4	649
Cataclysmic Variables	Amornrat Aungwerojwit	3	387
Effect of Chitosan on Growth and Development of <i>Phalaenopsis cornucervi</i> (Breda) Blume & Rchb.f.	Somporn Prasertsongkun Witool Chaipakdee	1	113
Equitable defective colorings of some classes of graphs	Sukanda Cummuang Keaitsuda Nakprasit	4	688
Simple Proofs for Determining All Nonisomorphic Bands of Order 3 and Nonisomorphic Bands of Order 4 Which Have an Identity Element	Somchit Chotchaisthit	4	701
The Number of General Triangles with Longest Side Less Than or Equal to n	Niroot Meekoed	4	696
กลไกการควบคุมน้ำและไอออนในปลาน้ำจืดและน้ำเค็ม (Osmoregulation and Ionoregulation of Freshwater and Seawater Fishes)	ละเอียด นาคกระแสร	4	540
การขยายพันธุ์ข้าวเหนียวดำในหลอดทดลอง (In Vitro Regeneration of Purple Glutinous Rice (<i>Oryza sativa</i> L.))	อรรณพ พิมพจันทร์ หนูเดือน เมืองแสน	4	621

ชื่อเรื่อง	ผู้เขียน	ฉบับที่	หน้า
การคำนวณปริมาณไอน้ำกลั่นตัวได้ในบรรยากาศ ของประเทศไทย (Calculation of Precipitable Water Vapor in the Atmosphere of Thailand)	สายันต์ โพธิ์เกตุ	1	130
การใช้นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี เพื่อติดตามการเคลื่อนที่ของน้ำในระบบอาหาร (Use of Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy for Monitoring Water Mobility in Food Systems)	ธนจันทร์ มหาวนิช	3	409
การตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงด้วยวิธีการทางเคมีและแสง (The Detection of Latent Fingerprints by Chemical and Optical Methods)	อารีย์ ชูคำ วรวิทย์ วงศ์นิรมัยกุล	4	559
การตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงด้วยวิธีทางกายภาพ (The Detection of Latent Fingerprints by Physical Methods)	อารีย์ ชูคำ วรวิทย์ วงศ์นิรมัยกุล	2	193
การเตรียมซีรัมด้วยเทคนิคอย่างง่ายเพื่อการค้นพบ สารบ่งชี้ทางชีวภาพ (Simple Techniques for Serum Preparations in Biomarkers Discovery)	ศิริพร ภัทรกิจกำจร มนทิรา จະนันท์	1	28
การประมาณเรขาคณิตแบบจุดโดยฟังก์ชัน w (A Pointwise Geometric Approximation by w -Functions)	พิม มะลิงาม กณิษฐ์ ธีรภาพโอพาร	3	490
การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ในการ พัฒนาแหล่งน้ำ กรณีศึกษา ตำบลประณีต อำเภอ เขาสมิง จังหวัดตราด (Application of Geographic Information System on Water Resource Development: A Case Study in Pranit Sub-District, Khao Saming District, Trad Province)	อารดา ชาฟีอี ธนิตย์ อินทร์ตัน	2	299
การประยุกต์เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศเพื่อศึกษา การถือครองที่ดินเขตพื้นที่ชายแดน: กรณีศึกษา องค์การบริหารส่วนตำบลโนนดินแดง อำเภอ โนนดินแดง จังหวัดบุรีรัมย์	ครรชิต พิระภาค	1	137

ชื่อเรื่อง

ผู้เขียน

ฉบับที่

หน้า

(An Application of Geoinformation Technology
to Study Ownership in Margin Areas : A Case Study
in Non Din Deang Sub-district Administrative Organization,
Amphoe Non Din Deang, Buriram Province)

การปลูกอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์บนผ้าฝ้าย
ที่ปรับปรุงด้วยพอลิซไตรีนซัลโฟนิคแอซิดและ
สมบัติการป้องกันรังสียูวี

(Growth of ZnO Nanoparticles on Poly
4-Styrenesulfonic Acid Modified Cotton Fabrics
and UV Protection Property)

การเปรียบเทียบวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย
สำหรับข้อมูลตัวแปรพหุ

(A Comparison of Missing Data Estimation
Methods for Multivariate Data)

การพัฒนาเมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง
แบบพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน

(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells :
The Membrane Development)

การระบายสีเส้นเชื่อมในกราฟ
(Edge-Coloring in Graphs)

การวิเคราะห์หาปริมาณสารกลุ่มซัลโฟนาไมด์
อย่างง่ายในตัวอย่างยาด้วยเทคนิค สเปกโตรโฟโตเมตรี
โดยใช้ 8 - ไฮดรอกซีควิโนลีนเป็นรีเอเจนต์ในการทำ
ปฏิกิริยาร่วม

(Simple Analytical Method for the Determination of
Sulfonamides in Pharmaceutical Preparations by
Spectrophotometry Using 8-Hydroxyquinoline as
Coupling Reagent)

การศึกษาความหลากหลายทางพันธุกรรมของมะลิ
สกุลจัสมินัมด้วยเทคนิคอาร์เอพีดี
(Study the Genetic Diversity in *Jasminum* Using
Random Amplified Polymorphic DNA Technique)

ยุวันดา เอี่ยมเผ่าจีน
ปณณมา ศิริพันธ์ โนน

น้ำทิพย์ พนมไทย
บุญอ้อม โจมที
ประสิทธิ์ พัทธพงษ์

สุรางคณา มาตย์วิเศษ

เกียรติสุดา นาคประสิทธิ์

อริศรา จรากร
วิภารัตน์ เชื้อขวด
รัตนา สนั่นเมือง

นฤมล ธนानันต์
อรพรรณ บุญประดิษฐ์
ธีระชัย ธนานันต์

3 459

3 502

2 232

3 421

1 120

2 263

ชื่อเรื่อง	ผู้เขียน	ฉบับที่	หน้า
การศึกษาโครงสร้างของ โดยใช้วิธี Rietveld refinement (Structural Studies of $Ba_{1-x}La_xTiO_3$ Using the Rietveld Refinement Method)	อ่อนลมี กมลอินทร์ วันวิสา พัฒนศิริวิศ สุธรรม ศรีหล่มสัก นงลักษณ์ มีทอง	3	475
การสังเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน และ สัณฐานวิทยาของพอลิ(เอปไซลอน-คาโพรแลกโตน) พอลิ (แอล-แลคติกแอซิด) และพอลิเมอร์ผสม (Synthesis, Thermal Properties and Morphology of Poly (ϵ -caprolactone) Poly (L-lactic acid) and Blends)	ชนกานต์ ปาณวงค์ ปวีณา ฆารไสว	4	664
การหาช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเก็บเกี่ยว ทะลายปาล์มน้ำมัน (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัม (Indicating of the Optimal Harvesting Time for Oil Palm Fruit-clusters (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.) by Spectrum Analysis Technique)	สุปราณี วุ่นศรี ธวัช ชิตตระการ ไทรภพ ผ่องสุวรรณ ภัทร อัยรักษ์ สมศักดิ์ กองแสง พวงทิพย์ แก้วทับทิม	3	515
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปล่อยก๊าซมีเทน กับลักษณะสัณฐานของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และ พันธุ์สกลนคร (Relationship between Methane Emission Rate and Morphological Characteristics of Chainat 1 and Sakol Nakon rice Varieties)	พัชรี แสนจันทร์ มัชฌิมา เจียจันทิก วรรณวิภา แก้วประดิษฐ์ เกริก ปั่นแห่งเพ็ชร	3	447
ความหลากหลายของยีสต์ทนร้อนบริเวณอุทยาน แห่งชาติภูจองนายอย (Diversity of Thermotolerant Yeasts in Phujong Nayoy National Park)	จันทราพร ทองเอกแก้ว กิริติชนันต์ จรรยาเพศ	2	242
คุณลักษณะและอายุการเก็บรักษาของน้ำมันรำข้าว หอมมะลิอินทรีย์แบบบีบเย็น (Characterization and Shelf Life of Cold Pressed Organic Jasmine Rice Bran oil)	ภัทรภรณ์ แก้วกุล	1	96
คุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระของผลผลิตจากปฏิกิริยา เมลลาร์ด ของโคโคแซนและน้ำตาล (Antioxidant Activity of Maillard Reaction Product from Chitosan and Sugar)	นพรัตน์ มะเห สุสดี มุหะหมัด อุไรวรรณ วัฒนกุล	1	80

ชื่อเรื่อง	ผู้เขียน	ฉบับที่	หน้า
เครื่องหมายโมเลกุลสำหรับการปรับปรุงพันธุ์พืช (Molecular Markers for Plant Breeding)	สรพงศ์ เบญจศรี	3	350
จากสาหร่ายขนาดเล็กสู่เชื้อเพลิงชีวภาพ : โอกาสและความท้าทาย (From Microalgae to Biofuel: Opportunities and Challenges)	รัตนภรณ์ ลีสิงห์	3	334
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสงที่ใช้พอลิแอนิไลน์ เป็นขั้วเคาน์เตอร์ (Dye-Sensitized Solar Cell based on Polyaniline Films as Counter Electrode)	สมักร์ พิมานแพง	4	587
ตัวทำความร้อน PTCR-BaTiO ₃ (PTCR-BaTiO ₃ Heating Element)	สุธรรม ศรีหล่มลัก	1	71
ตัวประมาณอัตราส่วนตัวใหม่ของค่าเฉลี่ยประชากร ในการสุ่มตัวอย่างแบบอย่างง่าย (A new Ratio Estimator of a Population in Random Sampling)	จันทร์รา ประเสริฐสกุล นิภาดา พากักดี	1	149
เทคนิค Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (DGGE): หลักการ และการประยุกต์ใช้ทางจุลชีววิทยา สิ่งแวดล้อม (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis : Principle and Application in Environmental Microbiology)	ดวงหทัย สิงห์กะ วสุ ปฐุมอารีย์	3	321
นาโนเทคโนโลยี กับ ไบโอสเซนเซอร์ (Nanotechnology and Biosensor)	ศิริวรรณ ตัญญู	4	575
แนวโน้มการใช้ประโยชน์จากอาร์เคียชอบเค็ม (Trend of Usage from Halophilic Archaea)	ศิริลักษณ์ นามวงษ์	1	36
บทบาทของรีซิสตินกับโรคอ้วนและโรคเบาหวาน (Association of Resistin Role's with Obesity and Diabetes Mellitus)	ธิดารัตน์ สมดี	4	550
แบตเตอรี่ชนิดใหม่เพื่ออนาคต : แบตเตอรี่ชนิด โซเดียมไอออน (New Rechargeable Battery for The Future: Sodium-Ion Batteries)	นงลักษณ์ มีทอง	4	598

ชื่อเรื่อง	ผู้เขียน	ฉบับที่	หน้า
ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแอกติวิตีของเอนไซม์ไฮโดรจีเนสและไนโตรจีเนสในการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพของไซยาโนแบคทีเรีย (Factors Influencing Hydrogenase and Nitrogenase Activity in Cyanobacterial Biohydrogen Production)	วุฒินันท์ รักษาจิตร คมสัน สัจจะสตาพร	1	1
ผลการแคลไซน์ต่อการดูดซับของตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำเสียฟีนอล (Calcination Effect on Adsorption of Catalyst for Phenolic Wastewater Treatment)	พรศิริ ทองเปรม ประธาน วงศ์ศรีเวช	2	270
ผลของการเจือธาตุต่อสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกส์ของแคลเซียมโคบอลต์ไทต์ (Effect of Elemental Doping on the Thermoelectric Properties of Calcium Cobaltite)	สุปรีย์ พินิจสุนทร	2	219
ผลของการเสริมไส้เดือนดินในอาหารต่อการเจริญเติบโตและอัตราการรอดของลูกกุ้งก้ามกราม (Effect of Supplementation of Earthworm into Diets on Growth and Survival Rates of the Giant Freshwater Prawn Juveniles)	นพคุณ ภักดีณรงค์ อาณัติ จันทธีระติกุล	3	466
ผลของภาชนะบรรจุและการเก็บรักษาต่อคุณค่าทางโภชนาการของน้ำเมาผสมน้ำสับปะรด (Effects of Package and Storage on Nutritive Values of Mao and Pineapple Juices)	พรประภา ชุนธนอม สุกัญญา สายธิ	4	631
ผลของยาปฏิชีวนะต่อการเปลี่ยนแปลงของแบคทีเรียทางทะเลและการเคลื่อนที่ของสเปิร์มในน้ำเชื้อปลากะพงขาว (<i>Lates calcarifer</i>) (Effect of Antibiotic on the Change of Marine Bacteria and Motility of Spermatozoa in Asian Seabass (<i>Lates calcarifer</i>) Semen Preserved under Chilled Storage)	สุบันจิต นิมรัตน์ กนิษฐา พึ่งชั่ว ไครมาส บุญไทย วีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย	2	252
ผลของโลหะหนักต่อสัตว์หน้าดินจำพวกหอย (Effect of Heavy Metals on Mollusk)	ลำไย ธีรตันพันธุ์	3	375

ชื่อเรื่อง	ผู้เขียน	ฉบับที่	หน้า
ผลของสมบัติไพโซอิเล็กทริกในวัสดุ PZTs ต่อการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Effect of Piezoelectric Properties of PZTs on Energy Harvesting)	นิธิพนธ์ พุทธงชัย ธนัดชัย กุลรวานิชพงษ์ พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล สุธรรม ศรีหล่มลัก	2	281
พรรณไม้อันดับ Malpighiales ในป่านายูง-น้ำโสม อุทยานแห่งชาตินายูง-น้ำโสม จังหวัดอุดรธานี (Malpighiales in Na Yung-Nam Som Forest, Na Yung-Nam Som National Park, Udon Thani Province)	ศรชัย พุทธชัย พิมพ์วิดิ พรพงษ์รุ่งเรือง อมรรัตน์ มีสวัสดิ์	4	640
พลาสติกชีวภาพสังเคราะห์: ชนิด การสังเคราะห์ และสมบัติของพอลิแลคติกแอซิด (Synthetic Bioplastics : Types, Synthesis and Properties of Poly (lactic acid)s)	มังกร ศรีสะอาด ยอดธง ไบมาก	1	52
พืชตัดแปลงพันธุกรรมกับการถ่ายฝากสารพันธุกรรม ด้วยแบคทีเรีย <i>Agrobacterium tumefaciens</i> (Genetically Modified Plants with <i>Agrobacterium</i> <i>tumefaciens</i> : a tool for Plant Transformation)	ภพแก้ว พุทธิรักษ์	1	14
พืชน้ำ : บทบาทสำคัญกับการบำบัดน้ำเสีย (Aquatic Macrophytes : The Important Roles in Wastewater Treatment)	อรุโณทัย จำปีทอง สุทธาธร ไชยเรืองศรี	2	182
ภาวะเครียดจากออกซิเดชันและระบบด้านการเกิด ออกซิเดชันในพืช (Oxidative Stress and Antioxidative System in Plants)	นุชนาถ วุฒิประดิษฐ์กุล	2	172
ยีนที่สร้างไวเทลโลจีนิและโปรตีนโซนาราดิเอต้า ในปลา : ตัวชี้วัดทางชีวภาพของสารรบกวน ฮอร์โมนเอสโตรเจน (e-EDCs) ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ (Vitellogenin and Zona Radiata Protein Genes in Fish: Biomarkers of Estrogenic Endocrine Disrupting Compounds (e-EDCs) Contamination in Aquatic Environment)	ชนากร แสงสง่า ฐดา บุญภักดี	3	364

ชื่อเรื่อง	ผู้เขียน	ฉบับที่	หน้า
ระบบสร้างชุดข้อสอบโดยใช้การค้นหาแบบตามู (Examination Paper Generation System Using Tabu search)	พยอม เหล่าชุมพล พฤษดี ศิริแสงตระกูล	4	675
เรณูวิทยาของพรรณไม้ปลูกในมหาวิทยาลัยราชภัฏ ยะลา ประเทศไทย (Palynology of Cultivated Plant Species at Yala Rajabhat University, Thailand)	Ismaair Jehlong	3	433
ลายนิ้วมือและพหุปัญญา : การศึกษาเบื้องต้น (Fingerprint Pattern and Multiple Intelligence: a Preliminary Study)	Somsong Nanakorn Niyada Honark Supanee Ungpansattawong Wichuda Chaisiwamongkol Amnuay Maneesriwongul Rassame Suwanwerakamtorn Sarintip Raksasataya Kusuma Chusilp	1	105
แลคติกแอซิดแบคทีเรีย : หัวเชื้อและการถูกทำลาย โดยแบคทีเรียโอเฟจ (Lactic Acid Bacteria : Starter Culture and Bacteriophage Infection)	ปาริชาติ พุ่มขจร พงศ์ศักดิ์ รัตนชัยกุลโสภณ	4	525
วัสดุกักเก็บไฮโดรเจน (Hydrogen Storage Materials)	พรจักร ศรีพิชราวุธ	4	608
เส้นใยนาโนในการใช้งานด้านวัสดุโครงสร้าง สำหรับเพาะเลี้ยงเซลล์ (Nanofibers in Scaffolding Applications)	พัชรภรณ์ จิตติวงศ์เสวต	2	210
เอนไซม์ไคซานสเพื่อการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ (Xylanases for Biofuel Production)	ขวัญชัย คูเจริญไพศาล กนกกร สีนมา	2	159

ข้อแนะนำในการเขียนบทความลงวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ประเภทของเรื่องที่จะตีพิมพ์

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

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 ผู้เขียนควรจะอัดสำเนาเก็บไว้เป็นหลักฐานของตัวเอง 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. เชิงอรรถ (footnote) ใช้เฉพาะที่จำเป็นเพื่อขยายหรือให้รายละเอียดเพิ่มเติมแก่ใจความเฉพาะตอนในบทความ

9. ตารางและภาพประกอบ คำบรรยายประกอบตารางหรือภาพประกอบควรจะสั้นและชัดเจน ถ้าเป็นภาพถ่ายให้ใช้ภาพขาว-ดำ ขนาดโปสการ์ด ภาพเขียนลายเส้นควรเขียนด้วยหมึกดำ ภาพที่เขียนต้องชัดเจน และมีขนาดที่เหมาะสม

10. เอกสารอ้างอิง หรือบรรณานุกรม แนะนำให้เขียนตามแบบที่ทางวารสารกำหนด

11. หากไม่ปฏิบัติตามข้อแนะนำในการเขียนบทความ บทความของท่านอาจไม่ได้รับการตีพิมพ์ หรือตีพิมพ์ล่าช้า

ส่งต้นฉบับมาที่

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

E-mail: kku_scijournal@kku.ac.th

อภิสิทธิ์ในการสำหรับผู้เขียน

เรื่องที่ได้รับการตีพิมพ์ ผู้เขียนจะได้รับวารสารฉบับนั้น 1 เล่ม

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ตัวอย่าง

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันและกรดไขมันของจิ้งหรีดทองลาย (*Gryllus* sp.) ที่เลี้ยงเพื่อการค้า

บรรจง เชื้อเมืองพาน¹ วิรัช ว่องพัฒนากุล² 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

ใบสั่งลงโฆษณา ในวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

เขียนที่.....

วันที่.....

เรียน บรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ข้าพเจ้า.....ตำแหน่ง.....

เป็นตัวแทนของ (บริษัท/ห้างร้าน/องค์กร).....

ที่อยู่..... โทรศัพท์.....

โทรสาร..... มีความประสงค์จะลงโฆษณาในวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ดังรายการต่อไปนี้

ในฉบับ (สี)

☐ เต็มหน้า

☐ ครึ่งหน้า

โดยข้าพเจ้าขอให้ลงโฆษณา จำนวน.....ฉบับ นับตั้งแต่ฉบับแรก ที่จะพิมพ์ในครั้งต่อไป
หลังจากที่ท่านได้รับหนังสือฉบับนี้แล้ว

พร้อมกันนี้ ข้าพเจ้าได้ส่งต้นฉบับเพื่อลงโฆษณา (แผ่น CD ข้อมูล) และเงินค่าโฆษณาเป็นรณาคดี
ในนาม คุณสุภาพร พิมพัวปี ตั้งจ่าย ปท. มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002 เป็น
จำนวนเงิน.....บาท (.....)

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ลงนาม.....

(.....)

อัตราค่าโฆษณาในวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

		ลง 1 ฉบับ (บาท)	ลง 4 ฉบับ (บาท)
ในฉบับ (สี)	เต็มหน้า	1,000	3,600
	ครึ่งหน้า	500	1,800

ใบสมัครเป็นสมาชิก วารสารวิทยาศาสตร์ มข.

เขียนที่.....

วันที่.....

เรียน บรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ข้าพเจ้า.....

ที่อยู่.....รหัสไปรษณีย์.....

โทรศัพท์.....โทรสาร..... มีความประสงค์จะสมัคร

สมาชิก “วารสารวิทยาศาสตร์ มข.” ตั้งแต่วันที่.....ปีที่.....ถึงฉบับที่.....

ปีที่..... รวมทั้งสิ้น.....ฉบับ

พร้อมกันนี้ ข้าพเจ้าได้ส่งเงินค่าสมัครสมาชิก เป็นธนาคัติ ในนาม คุณสุภาพร
พิมพ์วาปี ส่งจ่าย ปท. มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002 เป็นจำนวนเงิน
.....บาท (.....)

ลงนาม.....

(.....)

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

กำหนดออกของวารสารวิทยาศาสตร์ มข. และอัตราค่าสมัครสมาชิก

ปีละ 4 ฉบับ เป็นจำนวนเงิน 200 บาท

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



หนังสือในโครงการผลิตตำรา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



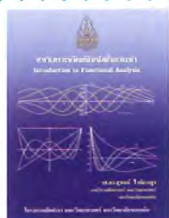
สถิติพื้นฐาน
พร้อมตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม
MINITAB SPSS และ SAS
รองศาสตราจารย์ชัชวาลย์ เรืองประพันธ์
พิมพ์ครั้งที่ 5 2543 • 510 หน้า
ISBN 974-675-666-4
ราคา 200 บาท



**หลักการเบื้องต้นและการประยุกต์ใช้
เทคนิคคูควบในเคมีวิเคราะห์**
รองศาสตราจารย์ ดร. ทักสิทธิ์ จันทน์ไทย
2543 • 202 หน้า
ISBN 974-678-333-2
ราคา 150 บาท



**การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม
SPSS for Windows**
รองศาสตราจารย์ชัชวาลย์ เรืองประพันธ์
2544 • 620 หน้า
ISBN 974-654-608-2
ราคา 300 บาท



การวิเคราะห์ฟังก์ชันคลื่นพื้นฐาน
รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ ไวทัยงูร
2547 • 344 หน้า
ISBN 974-367-958-8
ราคา 200 บาท



**สเปกโทรสโกปี ในการพิสูจน์
โครงสร้างของสารอินทรีย์**

รองศาสตราจารย์ ดร. สมเดช กนกมธากุล
2547 • 238 หน้า
ISBN 974-435-348-1
ราคา 180 บาท



แมงป่องข้าง

รองศาสตราจารย์ ดร. ศักดา ดาดวง
นางสาวนันทวัน เอื้อวงศ์กุล
2547 • 64 หน้า
ISBN 974-435-571-9
ราคา 160 บาท



สมการเชิงอนุพันธ์สามัญ

Ordinary Differential Equations
รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ ไวทัยงูร
2550 • 470 หน้า
ISBN 978-974-7707-55-7
ราคา 240 บาท



เคมีเฮเทอโรไซคลิกแอโรแมติก
Aromatic Heterocyclic Chemistry

รองศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ หาญวงนงศ์
2550 • 122 หน้า
ISBN 978-974-7707-71-7
ราคา 90 บาท



หลักการของพันธุวิศวกรรมในโพรแคริโอต
Principles of Genetic Engineering in Prokaryote

รองศาสตราจารย์ ดร. นิสันต์ สัตยาชัย
2551 • 164 หน้า
ISBN 978-974-10-2673-9
ราคา 120 บาท



**พอลิเมอร์และชีวโมเลกุลในสารประกอบ
อินทรีย์**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พัทธมา ธีรพรชัยสิทธิ์
2553 • 112 หน้า
ISBN 978-616-7183-57-2
ราคา 80 บาท



เคมีอินทรีย์เบื้องต้น

รองศาสตราจารย์ ดร. ขวัญใจ กนกมธากุล
2553 • 317 หน้า
ISBN 978-616-7183-75-6
ราคา 240 บาท



อนุกรมวิธานระดับโมเลกุลของพืช

รองศาสตราจารย์ ดร. อรุณรัตน์ ฉวีราช
2553 • 172 หน้า
ISBN 978-616-7183-76-3
ราคา 160 บาท



เคมีโคออร์ดิเนชันของ คอปเปอร์

รองศาสตราจารย์ ดร. สุจิตรา ยังมี
2553 • 260 หน้า
ISBN 978-616-223-007-3
ราคา 200 บาท



จลนพลศาสตร์เคมี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทิพาภรณ์ ศรีธัญรัตน์
2554 • 110 หน้า
ISBN 978-616-223-086-8
ราคา 90 บาท

ท่านที่สนใจหนังสือในโครงการผลิตตำรา ติดต่อสั่งซื้อได้ที่... รองศาสตราจารย์ชัชวาลย์ เรืองประพันธ์

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

