



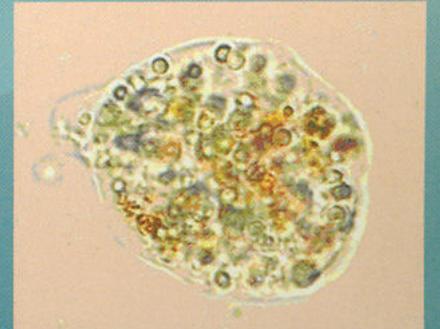
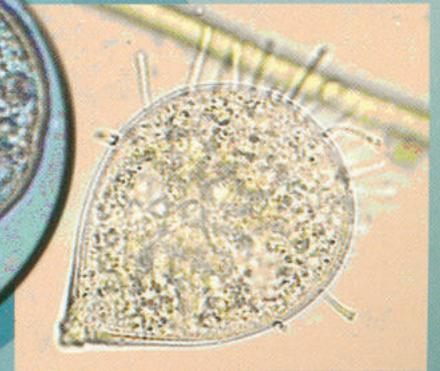
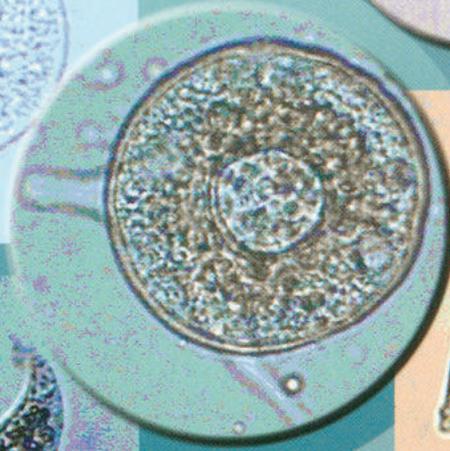
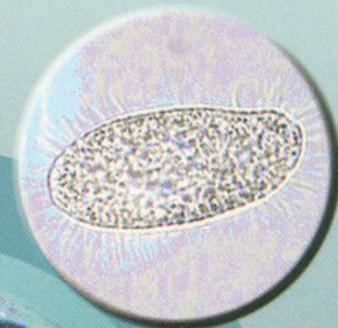
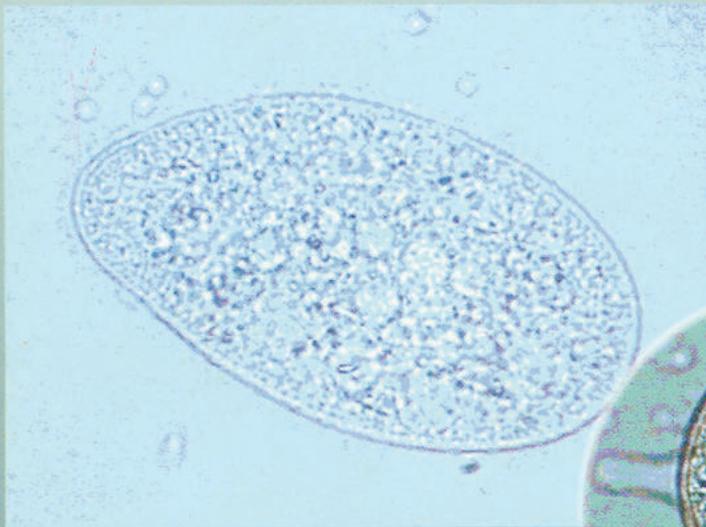
วารสาร

ISSN : 0125 - 2364

# วิทยาศาสตร์ชุมชน

KKU SCIENCE JOURNAL

ปีที่ 35 ฉบับที่ 4 (ต.ค. - ธ.ค. 59) Vol. 35 No. 4 (Oct. - Dec. 97)





วารสาร  
**วิทยาศาสตร์ปูช.**  
K K U SCIENCE JOURNAL ISSN/ 0125 - 2364

**เจ้าของ**

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**สำนักงาน**

คณะวิทยาศาสตร์ ตึก 6 มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
อ.เมือง จ.ขอนแก่น 400002  
โทรศัพท์ 0-4320-2372 โทรสาร 0-4320-2371

**วัตถุประสงค์**

1. เพื่อส่งเสริมและเผยแพร่วิชาการในสาขาวิชาต่าง 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  
(ละออศรี เสนาะเมือง)  
รองคณบดีฝ่ายวิชาการ  
(เอกพรรณ สวัสดิ์ชิตัง)

**บรรณาธิการ**

นฤมล แสงประดับ

**กองบรรณาธิการ**

กิตติกร นาคประสิทธิ์  
งามนิจ อาจอินทร์  
ชุตินา หาญจวนิช  
ประเสริฐ แข่งขัน  
สมปอง ธรรมศิริรักษ์  
สมเดช กนกเมธาคูล  
สุพรรณิ อึ้งปัญญาตวงค์  
เสาวนิต ทองพิมพ์  
อัจฉราภรณ์ ภักดี  
ธรรมพิเชษฐ แผงโยธา  
สุภาพร พิมพ์วาปี

**ฝ่ายศิลป์และภาพ**

กิเลน ดิฉนรเศรษฐ์  
สุชาติ เทพภูเขียว

**ฝ่ายเหรียญเสก**

บุญคุ้ม เหลือล้ำ

**ฝ่ายจัดการและ  
เลขานุการ**

ศุภลักษณ์ ทองปิ่น  
สมศักดิ์ อุ่นจันทิ

**บทความและงานวิจัย  
ได้รับการกลั่นกรอง  
จากผู้ทรงคุณวุฒิ**

บทความหรือข้อคิดเห็นใด ๆ ในวารสารนี้เป็นของผู้เขียน ไม่จำเป็นต้องสอดคล้องกับทัศนะของกองบรรณาธิการ

# วิทยาศาสตร์ชุมชน

K K U S C I E N C E J O U R N A L

ปีที่ 35 ฉบับที่ 4

Volume 35 Number 4

## บรรณาธิการแถลง

## บทความ

- เซลล์แสงอาทิตย์กับสีย้อมไวแสงจากพืชในประเทศไทย  
Solar Cells and Dye-sensitizer from  
Thai plants  
พีรภิกิตต์ คมสัน..... 205
- การเตรียมอนุภาคนาโนของสังกะสีออกไซด์  
ด้วยวิธีการบดและการตกตะกอน  
สุเมธา สุวรรณบุรณ์..... 215

## งานวิจัย

- ผลต้านฤทธิ์ของชาเขียวต่อพิษจากยาพาราเซตามอล  
ในเนื้อเยื่อตับอ้วนพิษและคุณภาพน้ำเชื้อ  
Protective effect of green tea against paracetamol  
induced hepatotoxicity, testes and quality of  
seminal fluid impairment  
อำพา เหลืองภิรมย์ พันเพชร เมล่น้อย..... 222
- แนวทางการสังเคราะห์โมเลกุลต้นแบบสำหรับ  
ยับยั้งเอนไซม์ IspH  
Synthesis Strategy of Molecular Templates  
for IspH Enzyme Inhibitors  
ชาญศักดิ์ ไชยสิทธิ์ สุรศักดิ์ แก่นเกษ  
วนิดา ศรีประสิทธิ์ อภิรัตน์ ทายิดา  
ชนกพร เผ่าศิริ..... 231

# วิทยาศาสตร์ชุมชน

K K U S C I E N C E J O U R N A L

ปีที่ 35 ฉบับที่ 4

Volume 35 Number 4

## งานวิจัย

- ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็ง ขนาดอนุภาค และสมบัติวิทยากระแสของน้ำยางธรรมชาติ  
Correlation between Total Solid Content, Particle Size and Rheological Properties of Natural Rubber Latex  
พรทิพย์ ประกายมณีวงศ์  
ไชยวัฒน์ รักสกุลพิวัฒน์  
จันทิมา ดีประเสริฐกุล..... 239
- แบบจำลองการนำความร้อนใน 2 มิติ  
อนุสรณ์ ศรีธีระวิโรจน์..... 246
- แนวโน้มผลกระทบของการชะล้างเกลือตามธรรมชาติ และการผลิตเกลือต่อคุณภาพน้ำในแม่น้ำสงคราม  
The Impacts Trend of Natural Leaching and Salt Production on the Water Quality of the Songkram River  
ชุตินา คู่คู่สมุทร ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง  
ศุภลักษณ์ ศรีจารนัย รัตนา มหาชัย..... 252
- ความหลากหลายของโพรโทซัวในบ่อบำบัดน้ำเสีย แบบชีวภาพของโรงงานน้ำตาลมิตรภูเวียง  
Diversity of Protozoa in Biological Wastewater Treatment Ponds of Mitr Phuviang Sugar Factory  
พินิจ หวังสมนึก วรณยุภา เย็นเฉื่อย..... 264
- ดัชนี..... 277



วิทยาลัยวิทยาศาสตร์  
KKU SCIENCE JOURNAL

ISSN 0125 - 2364

#### Publisher

Faculty of Science, Khon Kaen University,  
Thailand.

#### Office

Faculty of Science, Building 6, Khon Kaen  
University. Khonkaen 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  
(La-Orsri Sanoamuang)  
Associate Dean for Academic Affairs  
(Ekaphan Swatsitang)

**Editor** Narumon Sangpradub

**Editorial Board** Kittikorn Nakpasit  
Ngamnij Arch-int  
Chutima Hanjavanit  
Prasert Kaengkan  
Sompong Thammasirirak  
Somdej Kanokmedhakul  
Supunnee Ungpansattawong  
Soawanit Tongpim  
Adcharaporn Pagdee  
Thampichet Pangyotha  
Suphaporn Phimwapi

**Artists** Kilen Tinnoraset  
Suchart Thepphukhieo

**Treasurer** Boonkoom Lualon

**Managing Staff** Suphaluk Tongpun

**and Secretary** Somsak Unjantee

All articles published in  
KKU Science Journal have been  
peer reviewed.

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

# บรรณาธิการ **แกลบ**

## สวัสดิ์คะ ท่านผู้อ่านที่รักและเคารพทุกท่าน

เนื่องในวาระดิถีสงท่ายปีเก่า พ.ศ. 2550 และขึ้นปีใหม่ พ.ศ. 2551 ขออาราธนาคุณพระศรีรัตนตรัยและสิ่งศักดิ์ทั้งหลาย ดลบันดาลให้ท่านผู้อ่านทุกท่านเจริญด้วยจตุรพิธพรชัย และสำเร็จในสิ่งพึงปรารถนาที่ดีทุกประการ

กองบรรณาธิการขอขอบพระคุณทุกท่านที่ส่งบทความมาเพื่อพิจารณา และขอเชิญชวนทุกท่านส่งบทความปริทัศน์หรือบทความวิจัยมาแลกเปลี่ยนความรู้ด้านวิทยาศาสตร์กันอย่างต่อเนื่อง เพื่อจะได้มีเรื่องดีๆ ที่น่าสนใจอ่านตลอดปีคะ

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มช. ขอกราบขอบพระคุณท่านผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้เกียรติพิจารณาบทความวิจัยและบทความปริทัศน์ เพื่อลงในวารสาร ฉบับปีที่ 35 (ปี พ.ศ. 2550) ดังรายนามต่อไปนี้ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับความกรุณาจากท่านตลอดไป

รศ.ดร.ชุตินา หาญจวนิช  
ผศ.ดร.เยาวลักษณ์ ดิสระ  
รศ.ดร.ด่าง พุทธศุภร์  
ผศ.ดร.วิไลลักษณ์ ชินะจิตร  
รศ.ดร.ธิตินา รุกไชยศิริกุล  
ผศ.ดร.ศิริธร ศิริอมรพรรณ  
รศ.ดร.บุญยืน กิจวิจารณ์  
ผศ.ดร.สมปอง ธรรมศิริรักษ์  
รศ.ดร.ภควดี สุทธิไวยกิจ  
ผศ.ดร.สุภรณ์ กตเวทิน  
รศ.ดร.วรรณภา อิชิตะ  
ผศ.ดร.เสาวนิต ทองพิมพ์  
รศ.ดร.วิชัย ลีลาว์ชรมาศ  
ผศ.ดร.เอกพรรณ สวัสดิ์ชิตัง  
รศ.ดร.วิเชียร กิจปรีชาวนิช  
ผศ.น.สพ.ดร.สัณชัย ลักษณะโกเศศ  
รศ.ดร.ศักดิ์ดา ดาดวง  
ผศ.ประโยชน์ ธรรมกรบัญญัติ  
รศ.ดร.ศักดิ์สิทธิ์ จันทร์ไทย  
ผศ.สพ.ดร.พ้านาน สุขสวัสดิ์  
รศ.ดร.ศิริรัตน์ เร่งพิพัฒน์

ผศ.สมพร เฉลิมสุข  
รศ.ดร.สมเดช กนกเมธากุล  
ดร.กิตติกร นาคประสิทธิ์  
รศ.ดร.สันติ แม้นศิริ  
ดร.จรูญ จักรมณี  
รศ.ดร.สาวิตรี ลิ้มทอง  
ดร.ชัยพจน์ มุทาพร  
รศ.ดร.สุภา ทารหนองบัว  
ดร.ชิตชล ผลารักษ์  
รศ.ดร.แสวง รวยสูงเนิน  
ดร.นรากร คณาศรี  
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด  
ดร.ประเสริฐ แข่งขัน  
ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ ธานี  
ดร.ศรีประจักษ์ ครอบสุข  
ผศ.ดร.ประวิทย์ สุดแก้ว  
ดร.ศิริธร บุราณรักษ์  
ผศ.ดร.ปราณี ชุมสำโรง  
ดร.สมัคร์ พิมาณแพง  
ผศ.ดร.เมธา รัตนกรพิทักษ์  
อาจารย์อนุสรณ์ ศรีธีระวิโรจน์

บรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มช.

## เซลล์แสงอาทิตย์กับสีย้อมไวแสงจากพืชในประเทศไทย Solar Cells and Dye-sensitizer from Thai plants

พีรกิตติ์ คมสัน<sup>1</sup>

### บทนำ

การใช้พลังงานเป็นปัญหาของคนทั่วโลก ที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการเกิดภัยธรรมชาติในยุคปัจจุบัน นักวิทยาศาสตร์จึงแสวงหาแหล่งพลังงานที่ยั่งยืนและก่อปัญหาน้อยลง เช่น ชีวมวล น้ำ ลม ความร้อนใต้พิภพ และแสงแดด (Zervos et al., 2004) แสงแดดเป็นแหล่งพลังงานที่ได้รับความนิยม สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปพลังงานไฟฟ้าได้โดยอุปกรณ์ที่เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) ซึ่งเมื่อถูกกล่าวถึงมักหมายถึงชนิดที่มีธาตุซิลิคอนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งปัจจุบันมีการนำมาผลิตไฟฟ้าในโรงเรียนตำรวจตระเวนชายแดนในพื้นที่ห่างไกลการคมนาคม

เซลล์แสงอาทิตย์ยังใช้สนองความต้องการของสังคมได้น้อย เพราะปัญหาหลักคือค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการผลิต มีความสงสัยในความไม่คุ้มทุน เช่น ข้อกล่าวหาว่า พลังงานที่ใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์สิ้นเปลืองมากกว่าพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตได้ ข้อจำกัดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารกึ่งตัวนำทำให้นักวิทยาศาสตร์สนใจที่จะพัฒนาอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกชนิดหนึ่งคือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cells) ซึ่งว่ากันว่ามียอดทุนถูกกว่า (O'Regan and Grätzel, 1991) ผลิตง่ายกว่า และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าเซลล์

### แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม

บทความนี้จะกล่าวถึงเรื่องที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่อยู่ระหว่างการพัฒนาในด้านสีย้อมไวแสง ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้มีราคาแพง ทำให้เมื่อผนวกกับปัญหาการเสื่อมสภาพจึงไม่คุ้มค่าในการใช้งาน และเสนอความคิดเห็นเรื่องความพยายามที่จะตามหาสีย้อมไวแสงที่เหมาะสมกว่าเดิมจากข้อได้เปรียบในความหลากหลายของพรรณไม้ในประเทศไทย

### แหล่งผลิตไฟฟ้าสำหรับท้องถิ่นคืออย่างไร

ก่อนอื่นเราควรพิจารณาประโยชน์ของแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่สามารถนำไปใช้ในท้องถิ่น เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าการพัฒนาประสบความสำเร็จ ประโยชน์ที่อาจเกิดขึ้นมีดังนี้

1. ลดค่าใช้จ่ายและพลังงานที่สูญเสียในการขนส่งกระแสไฟฟ้าระยะไกลของประเทศไทย
2. ลดการก่อสร้างโรงผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ (ทำให้คนในท้องถิ่นยังคงมีไฟฟ้าใช้หากศูนย์รวมการผลิตไฟฟ้าเกิดภัยธรรมชาติหรือภัยสงคราม)
3. ลดการจ่ายค่าไฟฟ้าเพราะมีแหล่งพลังงานใกล้ตัว (คนในท้องถิ่นได้ประโยชน์)
4. ลดการปล่อยมลพิษ เช่น ไนโตรเจน ไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และสารปรอท จาก

<sup>1</sup> ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร  
e-mail: peerakitk@hotmail.com

การผลิตไฟฟ้า เพื่อความปลอดภัยของสิ่งมีชีวิต แห้ง ยาและอาหารจากความหลากหลายทางชีวภาพ ลดปัญหา การขาดแคลนน้ำ ทะเลระดับน้ำทะเลที่กำลังกินพื้นที่ ชายฝั่ง

5. สนับสนุนเศรษฐกิจแบบพึ่งตนเองได้ ไม่รวมศูนย์อยู่ในเมืองใหญ่

### เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีส่วนประกอบที่ทำหน้าที่ต่างกันเป็นชั้นๆ จึงเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้าได้ เซลล์ อย่างง่ายสำหรับการสาธิตประกอบด้วย

1. กระจกใสที่นำไฟฟ้าได้ มาจากกระจก โปร่งใสที่เคลือบฟิล์มของดีบุก (IV) ออกไซด์ที่ผ่านการ โด๊ป (doped  $\text{SnO}_2$ ) หรือสารในกลุ่มออกไซด์ที่นำไฟฟ้า ได้ (transparent conducting oxide, TCO) เพื่อส่งผ่าน อิเล็กตรอน

2. ฟิล์มไทเทเนียม (IV) ออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ที่มีรูพรุน ในรูปผลึกระดับนาโน แบบอะนาเทส (anatase) ซึ่งเป็นวัสดุที่เสถียร ราคาถูก ใช้ในเซลล์แสง อาทิตย์ชนิดนี้ได้ดีมาก และไม่เป็นพิษ ( $\text{TiO}_2$  ได้รับการ ยอมรับให้ผสมในยาสีฟัน น้ำตาลไอซ์ซิ่ง และลูกกวาด) อาจผสมวัสดุอื่น ชั้นนี้ยังมีพื้นที่ผิวมากก็ยิ่งดี เพราะ ความพรุนทำให้ยึดเกาะสีย้อมไวแสงได้มาก ฟิล์ม  $\text{TiO}_2$

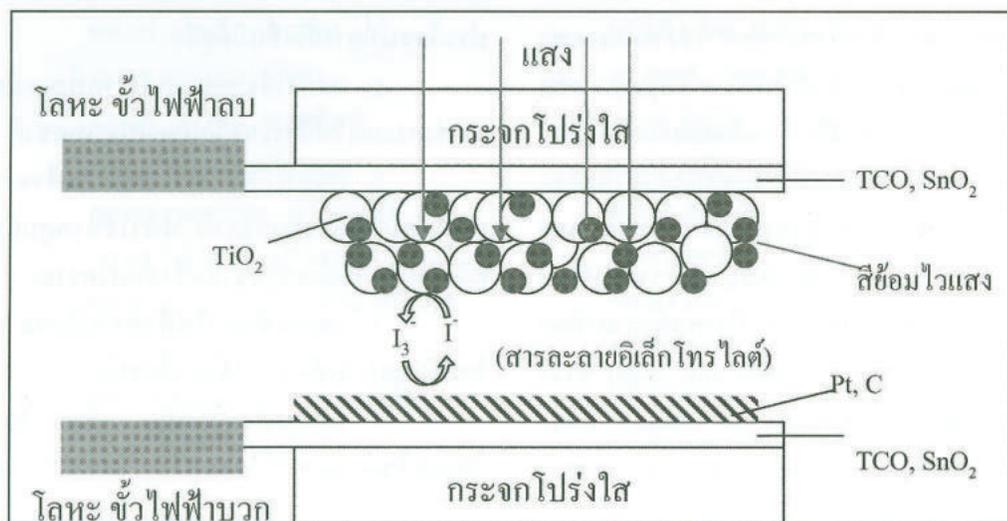
นี้ใช้เคลือบได้กระจกนำไฟฟ้าด้านที่สัมผัสแสง

3. สีย้อมไวแสง (sensitizing dye) ที่จะดูด กลืนแสงที่จะมากระทบ ประกอบด้วยโมเลกุลที่จะปล่อย อิเล็กตรอนพลังงานสูงออกมาเมื่อกระทบพลังงานแสง

4. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ช่วยส่งผ่าน อิเล็กตรอน อาจเป็นของเหลว เจล หรืออยู่ในรูปแบบ อื่นตามแต่จะพัฒนาขึ้นมา สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เหลวที่นิยมใช้กันนั้นประกอบด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ เกลือไอโอไดด์ และไอโอดีน

5. ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนกระจกนำไฟฟ้าด้าน ล่างที่จะรับอิเล็กตรอนจากวงจรภายนอกมาส่งให้สาร ละลายอิเล็กโทรไลต์ เพื่อส่งอิเล็กตรอนคืนให้สีย้อม ไวแสง วัสดุที่ใช้จะเป็นฟิล์มแกรไฟต์หรือแพลทินัม (Dyesol, 2007)

เมื่อแสงส่องผ่านมากระทบสีย้อมไวแสง อิเล็กตรอนในโมเลกุลสีย้อมไวแสงที่ถูกกระตุ้นไปที่ ระดับพลังงานสูงก็จะส่งกระแสไฟฟ้าชั่วลบผ่านผลึก  $\text{TiO}_2$  ที่สีย้อมไวแสงนั้นเคลือบอยู่ แล้วเคลื่อนไปสู่ขั้ว ไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าได้แผ่นกระจกด้านที่รับแสงจึงให้กระแส ขั้วลบ เมื่อกระแสผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอก แล้วเคลื่อน ผ่านเข้ามาบนกระจกนำไฟฟ้าด้านล่าง อุปกรณ์ข้อ 5 ก็จะช่วยส่งอิเล็กตรอนผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และกลับสู่สีย้อมไวแสง ดังรูปที่ 1 (Grätzel, 2003)



รูปที่ 1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ปัจจุบันวัสดุที่ใช้อาจเปลี่ยนไป องค์ประกอบแต่ละส่วนสามารถเลือกใช้หรือแยกพัฒนาเพื่อปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้น ให้หาง่ายและช่วยลดต้นทุน มากขึ้นได้ นักวิจัยเชื่อว่าการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ ไม่จำเป็นต้องมาจากโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เบ็ดเสร็จเหมือนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารกึ่งตัวนำ และเชื่อว่าถ้าพัฒนาถึงระดับหนึ่ง ประชาชนจะหาซื้อวัตถุดิบมาประกอบใช้เองได้อย่างง่าย เพราะอุปกรณ์ราคาไม่แพง แต่ยังมีปัญหาในการประยุกต์ เพราะยังเป็นที่สงสัยว่าอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจะเสื่อมสภาพเมื่อใช้ไม่นาน และต้องใช้สีย้อมไวแสงที่มีราคาแพงเกินไป

ในทางทฤษฎี Ferber et al. (1998) ได้เสนอแบบจำลองทางไฟฟ้าแบบหนึ่งของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ ส่วน Greijer et al. (2000) ศึกษาผลทางสิ่งแวดล้อมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้และเสนอว่า นี่น่าจะเป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าทางเลือกที่ยั่งยืน แต่มีสิ่งที่จะต้องทำให้ดีขึ้น คือ ประสิทธิภาพ (efficiency) การผลิตที่ใช้พลังงานต่ำกว่านี้ และวัสดุที่ใช้ควรจะนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ปัจจุบันมีเซลล์แสงอาทิตย์อีกแบบหนึ่งที่ทำหาคือการนำไปใช้ Miyasaka and Murakami (2004) รายงานอุปกรณ์ลักษณะคล้ายกันนี้ แต่เป็นรูปแบบที่ซับซ้อนขึ้น เก็บประจุไฟฟ้าในตัวเองได้ เรียกว่า "photo-capacitor" ซึ่งใช้งานได้แม้ไม่ค่อยมีแสงแดด และปล่อยกระแสไฟฟ้าได้ในที่มืด

### สีย้อมไวแสง กับเรื่องน้ำคืด

สีย้อมไวแสงเป็นองค์ประกอบที่จะดูดกลืนแสงเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้ามีตัวอย่างในธรรมชาติคือ คลอโรฟิลล์ ซึ่ง Tennekone and Divigalpitiya (1981) นำมาทำเซลล์แสงอาทิตย์

สีย้อมไวแสงที่เหมาะสมในการใช้งานควรมีคุณสมบัติเบื้องต้น คือ เป็นโมเลกุลที่ดูดกลืนแสงได้มาก เป็นช่วงกว้าง ในช่วงความยาวคลื่นที่มีแสงตกลงมา (เช่น ถ้ามีพื้นระอุสลับเขียวหรือเป็นอะโรเมติก ก็จะดี

เพราะสามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วส่งอิเล็กตรอนผ่านพันธะไพ และยังมีเสถียรเมื่อเกิดประจุบวกในกระบวนการ) มีคุณสมบัติในการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ควรจะยึดเกาะบนผลึก  $TiO_2$  ได้ดี (เช่น การมีหมู่กรดอินทรีย์ เป็นต้น) มีความคงทน คือ ไม่สลายตัวเมื่อใช้งานไปนานๆ สีย้อมไวแสงที่มีคุณสมบัติพอมักเป็นสารเชิงซ้อนของรูทีเนียม ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงแต่ราคาแพง เช่น  $Ru(2,2'-bipyridine-4,4'-dicarboxylic acid)_2$  (NCS)<sub>2</sub> หรือนิยมเรียกว่า N3 (Nazeeruddin, 1993) ซึ่งถูกใช้อย่างกว้างขวางเพราะให้ประสิทธิภาพสูง

ค่าใช้จ่ายในการผลิตสีย้อมไวแสงที่มาจากสารสังเคราะห์ทางเคมี ทำให้นักวิทยาศาสตร์บางกลุ่มค้นหาสีย้อมไวแสงที่ไม่ต้องใช้ธาตุรูทีเนียม และค้นหาแหล่งสีย้อมไวแสงจากธรรมชาติ ซึ่งนอกจากจะดูดกลืนแสงได้กว้างและมากแล้ว ข้อจำกัดเรื่องทรัพยากรและความยุ่งยากยังน้อยกว่าสารสังเคราะห์ทางเคมีอีกด้วย

นอกจากนี้ ในด้านสิ่งแวดล้อม สารเคมีสังเคราะห์จำนวนมากรวมทั้งสีย้อม ล้วนเป็นสารที่ก่ออันตรายต่อชีวิตได้ (ปัจจุบันประเทศในยุโรปห้ามนำเข้าสิ่งทอที่ย้อมด้วยสีเอโซ (azo dyes) ที่สามารถแตกตัวให้สารก่อมะเร็ง) มลพิษจากกระบวนการผลิตสีย้อมและน้ำทิ้งอาจทำให้ดินและน้ำเสีย การกำจัดใช้ค่าใช้จ่ายสูง ในขณะที่การใช้สีย้อมจากพืชมีผลดี คือ เมื่อการผลิตพึ่งพาเทคโนโลยีขนาดใหญ่มีน้อยลง สังคมก็จะพึ่งตนเองได้อย่างยั่งยืนมากขึ้น หากโรงงานถูกทำลายแล้วเครื่องมือการผลิตสำเร็จรูปมีน้อยลง เราก็ยังมีภูมิปัญญาที่นำวัตถุดิบในธรรมชาติมาแปรรูปใช้ได้มากขึ้น

สีย้อมไวแสงสังเคราะห์หลายชนิดมีสมบัติการถ่ายโอนอิเล็กตรอนดีเพราะเป็นสารเชิงซ้อนของไอออนโลหะรูทีเนียม สารสกัดจากพืชก็อาจนำมาปรับปรุงได้ด้วยการเกิดสารเชิงซ้อนกับธาตุเหล็ก ซึ่งเป็นโลหะทรานซิชันหมู่เดียวกับรูทีเนียม ที่มีข้อดีคือ สารประกอบของเหล็กราคาไม่แพง ในวงการย้อมผ้ารู้กันว่า ไอออนเหล็ก  $Fe^{2+}$  เป็นตัวช่วยให้เกิดการยึดเกาะที่ให้สีเข้มมีด

นำพิจารณาว่า อาจเป็นไปได้ว่ามีพืชบางชนิดที่มีรงควัตถุที่มีคุณสมบัติเหมาะสม ประเทศไทยน่าจะได้เปรียบในความหลากหลายของรงควัตถุ เพราะมีความหลากหลายทางชีวภาพ

### รายงานการทดลองใช้สีข้อมไวแสงจากพืช

ความคิดที่จะใช้รงควัตถุจากพืชมาเป็นสีข้อมไวแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ในประเทศไทยยังไม่ค่อยมีงานวิจัยที่จริงจัง และความคิดที่จะทำมักจะถูกคัดค้านจากนักวิชาการในเมืองใหญ่ แต่ในต่างประเทศนั้นมีรายงานการวิจัยหลายเรื่องที่ใช้สีข้อมไวแสงจากพืชโดยตรง นิยมสกัดสีข้อมจากดอกและผลของต้นไม้

ในประเทศจีน Hao et al. (2006) รายงานว่าได้นำ ข้าวเหนียวดำ (black rice) ดอกปาริฉัตร ดอก *Rosa xanthina*, พริก และสาหร่ายทะเล มาสกัดด้วยอัลกอฮอล์แล้วทำให้สีข้อมบริสุทธิ์ขึ้นด้วยโครมาโทกราฟี นำสีข้อมมาทดลองทำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสง ได้ผลว่าสีข้อมจากข้าวเหนียวดำดีที่สุด เนื่องจากข้าวเหนียวดำมีแอนโทไซยานิน (anthocyanin) ซึ่งยึดเกาะฟิล์ม  $TiO_2$  ได้ดี

แอนโทไซยานิน ซึ่งพบได้ง่ายในดอกไม้และผลไม้ที่มีสีเข้ม และคงทนในสภาพกรด ได้รับความสนใจมากกว่ารงควัตถุในธรรมชาติชนิดอื่น สมบัติในการยึดเกาะอนุภาค  $TiO_2$  เกิดจากหมู่ไฮดรอกซีในโมเลกุล งานวิจัยที่ใช้ส่วนของพืชที่มีสารในกลุ่มแอนโทไซยานินมาเป็นสีข้อมไวแสง เช่น Sirimanne et al. (2006) ใช้รงควัตถุจากผลทับทิม Dai and Rabani (2001) ใช้รงควัตถุจากผลทับทิมในดักกลางที่เป็นน้ำ Garcia et al. (2003a) ใช้รงควัตถุในลูกหว้า (*Eugenia jambolana* Lam) โดยสกัดจากน้ำผลไม้สด Polo et al. (2006) ศึกษาการใช้แอนโทไซยานินสีม่วงน้ำเงินจาก jaboticaba (*Myrtus cauliflora* Mart) และ calafate (*Berberies buxifolia* Lam) ส่วน Kumara et al. (2006) รายงานสีข้อมไวแสงที่สกัดจากโบซิโซ (shiso) และ Garcia et al. (2003b) ศึกษาส่วนสกัดสดจากผล chaste

tree (*Solanum americanum*, Mill.), mulberry (*Morus alba*, L.) และ cabbage-palm (*Euterpe oleracea*, Mart) มาใช้เป็นสีข้อมไวแสงเปรียบเทียบกับสารประกอบของรูทีเนียม และเสนอว่าการใช้สีข้อมไวแสงจากผลไม้ทั้งสาม เป็นทางเลือกในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่รวดเร็วกว่า ง่ายกว่า และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าสีข้อมสังเคราะห์ แต่ต้องรอการศึกษาความเสถียรในการใช้งาน ผลการวิจัยได้ทำให้นักวิจัยกลุ่มหนึ่งกล้าที่จะค้นหาสีข้อมไวแสงจากธรรมชาติในประเทศบราซิล ซึ่งอุดมด้วยความหลากหลายทางชีวภาพต่อไป (Polo et al., 2004)

Amao et al. (2004) รายงานการนำอนุพันธ์ของคลอโรฟิลล์ที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ให้มีหมู่กรดอินทรีย์ซึ่งจับยึด  $TiO_2$  ได้ดี มาใช้เป็นสีข้อมไวแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วน Yamazaki et al. (2007) ใช้สารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ (carotenoids) เป็นสีข้อมไวแสง

Tennakone et al. (1998a) รายงานการใช้สีข้อมไวแสงพวกแทนนินและสารประกอบฟีนอลิก ได้ผลที่น่าสนใจ มีรายงานว่าสารกลุ่มนี้ (ซึ่งพบในชาดำ) มีคุณสมบัติที่ดีเมื่อยึดเกาะบน  $TiO_2$  เพราะเกิดสารเชิงซ้อนกับไอออนไทเทเนียม (Tennakone et al., 1996)

Tennakone et al. (1998b) รายงานการใช้รงควัตถุซานทาลิน (santalin) ที่แยกจากไม้จันทน์แดง (*Pterocarpus santalinus*) เป็นสีข้อมไวแสงในเซลล์แบบของแข็ง ทดสอบได้กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่สูงในระดับที่น่าพอใจ และซานทาลินที่เคลือบบน  $TiO_2$  ระดับนาโนมีความเสถียรสูง เพราะเกิดสารเชิงซ้อนที่แข็งแรงกับ  $TiO_2$

ในประเทศไทย Wongcharee et al. (2007) รายงานการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสงที่ใช้สารสกัดจากกระเจี๊ยบ และดอกอัญชัน ได้ผลว่ากระเจี๊ยบให้ประสิทธิภาพดีกว่าดอกอัญชันและสารผสมแตกต่างจากผลการทดลองของ จักรพงษ์ ศรีแก้วเลิศ และคณะ ที่กล่าวว่ายัญชันให้กำลังไฟฟ้าดีที่สุด รองลงมาคือ กระเจี๊ยบ ไบยอ และไบอ่อนสั๊ก (กระทรวงพลังงาน, 2550)

## พืชที่ให้สีในประเทศไทย

พืชเป็นแหล่งสารอินทรีย์ที่หลากหลาย คนไทยมีภูมิปัญญาการทำสีผสมอาหารและสีย้อมผ้าจากพืชมากมาย ตัวอย่างสีผสมอาหารจากพืช เช่น กลีบเลี้ยงกระเจี๊ยบ (*Hibiscus sabdariffa* L.) ให้สีแดง ดอกแก่คำฝอย (*Carthamus tinctorius* L.) ให้สีเหลือง เมล็ดคำแสด (*Bixa orellana* L.) ให้สีส้ม ใบเตยสด (*Pandanus* ssp.) ให้สีเขียว แก่นไม้ฝาง (*Caesalpinia sappan* L.) ให้สีชมพูเข้ม ดอกอัญชันสด (*Clitoria ternatea* L.) ให้สีม่วง ตัวอย่างสีย้อมผ้าจากพืช เช่น แก่นขนุน (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) ให้สีเหลือง เปลือกต้นสมอ (*Terminalia chebula* Retz.) ให้สีดำ เปลือกต้นนุ่น (*Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.) ให้สีชมพูเป็นต้น (สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2540)

แก่นไม้ของต้นฝาง (*Caesalpinia sappan* L.) เมื่อแช่ในน้ำร้อนจะให้สีแดงอย่างรวดเร็ว ใช้น้ำยาอูทัย มีวิธีสกัดสีคือ สับให้เป็นชิ้นเล็กๆ นำไปต้มและแช่น้ำทิ้งไว้เป็นสัปดาห์ มีรงควัตถุชนิดหนึ่งคือ บราซิลิน (brazilin) ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันที่จับยึด  $TiO_2$  ได้ดี เนื้อในฝักถูน หรือ ราชพฤกษ์ (*Cassia fistula* Linn.) ละลายน้ำให้สีเข้มได้ โดยเฉพาะในน้ำร้อนจะให้สีเข้มได้ดีมาก สารชนิดหนึ่งที่ทำให้มีสีคือกรดฟิสทูลิก (fistulic acid) (Bahorun, 2005)

พืชที่มีแอนโทไซยานินสูงมากชนิดหนึ่งคือ มันเสา (*Dioscorea alata* L.) ชนิดที่มีหัวสีม่วง รากสีชมพู ผู้เขียนเคยเห็นการผ่าหัวมันเสานขนาดใหญ่ที่ขูดจากจังหวัดระยอง เนื้อในมียางสีม่วงเข้มปริมาณมาก มันเสาเป็นพืชที่มีหลายแห่งทั่วโลก บางประเทศใช้ผลิตไอศกรีมและขนมหวาน ในประเทศไทยก็ขึ้นทั่วไป ภาคเหนือเรียกว่า มันเสียม ภาคใต้เรียกว่า มันหู่ เมื่อปลูกใช้เวลา 6-12 สัปดาห์จึงเริ่มเกิดหัว (มีจำนวนโครโมโซม  $2n = 20,30,40, \dots, 80$ )

พืชที่มีแอนโทไซยานินเสถียรเป็นพิเศษถึงกับมีลิตธิบัตร์ที่สกัดรงควัตถุมาใช้สำหรับอาหารและเครื่องสำอางสำเร็จรูป คือ ก้ามปูหลอด (*Tradescantia zebrina*

Hort. ex Bosse.) ไม่ประดับคลุมดินแปลกตาในวงศ์ผักปลาบ (Commelinaceae) ซึ่งมีสารแอนโทไซยานินที่มีความเสถียรเป็นพิเศษ (Brouillard, 1981 และ Teh and Francis, 1988) เจริญเติบโตง่าย มีสรรพคุณทางสมุนไพรเล็กน้อย มีลิตธิบัตร์ที่นำแอนโทไซยานินที่มีความเสถียรเป็นพิเศษจากพืชในวงศ์ผักปลาบหลายชนิดมาสกัดใช้เป็นรงควัตถุสำหรับอาหารและเครื่องสำอาง (Hidekazu, 1986)

รงควัตถุชนิดหนึ่งที่ผู้เขียนคิดว่าทำหายนอกการนำมาทำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้คือ “คราม” (indigo) ซึ่งเป็นรงควัตถุในทางเคมียีนส์ ผ้ามืดหอม และผลิตภัณฑ์มากมาย มักเป็นพืชในสกุล *Indigofera* ซึ่งมีหลากหลายในประเทศไทย แต่คนไทยนิยมใช้ต้นคราม (*Indigofera tinctoria* Linn.) และ ห้อม (*Baphicacanthus cusia* Brem.) สำหรับการย้อมผ้า ได้เป็นเจดสีตั้งแต่เขียวเข้มไปจนถึงม่วง (ต่างจากสีครามสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมที่ทำได้เพียงสีเขียว) มีขบวนการย้อมผ้าเรียกว่า “หม้อมหอม” ในภูมิปัญญาพื้นเมืองในหลายชนเผ่า ลักษณะที่น่าสนใจของการย้อมสีครามก็คือ เมื่อเด็ดใบครามผสมน้ำน้ำนั้นยังไม่มียสี แต่เมื่อนำผ้าจุ่มในน้ำแล้วยกขึ้นมาให้ถูกอากาศ ผ้านั้นจะมีสีครามติดในเนื้อผ้า โดยที่สีครามไม่ละลายน้ำ เนื่องจากพืชในกลุ่มนี้มีสารพวกที่เรียกว่า อินดิแคน (indican) ซึ่งละลายน้ำได้ แต่เมื่อมีการทำปฏิกิริยากับอากาศจะเปลี่ยนเป็นสาร “คราม” (indigo) ซึ่งไม่ละลายน้ำ นี่จึงเป็นสมบัติพิเศษที่อาจเป็นไปได้ว่าการใช้สีครามจากพืชจะยึดเกาะบน  $TiO_2$  อย่างที่การใช้สีสังเคราะห์ไม่อาจทำได้

แหล่งรงควัตถุอื่นๆ ได้แก่ สารสีดำจากเปลือกมะพร้าวเผา ที่ใช้ทำขนมเปียกปูน ละลายน้ำเป็นสีดำกรองได้ หัวหอมมีรงควัตถุบางชนิดซึ่งโครงสร้างโมเลกุลน่าสนใจเช่นกัน เปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟ (*Coffea* ssp.) มีสารประกอบฟีนอลิก ผลสุกของกมลา (*Mallotus philippensis* (Lamk) Muell.Arg.) มี รือทเทลอริน (rotterin) ซึ่งโมเลกุลมีหมู่ฟีนอลอยู่หลายตำแหน่งอยู่เกือบร้อยละ 11

คำแสด (*Bixa orellana* L.) ซึ่งมีมากทางภาคเหนือ มีรงควัตถุชื่อ บิซิน (bixin) ซึ่งเป็นแคโรทีนอยด์ที่มีหมู่กรดอินทรีย์ ในเชื้อหุ้มเมล็ด จึงใช้ผลิตรงควัตถุโดยนำมาเมล็ดมาแช่น้ำ กรองเอาน้ำทิ้งไว้ระยะหนึ่งจะมีผงสีส้มตกตะกอน ใช้ในการย้อมผ้าและแต่งสีอาหาร

แก่นไม้ขนุนมีสาร โมริน (morin) ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลน่าสนใจ ดอกทองกวาว (*Butea monosperma* (Lam.) Taubert) มีสารบิวทิน (butin) ดอกกรรณิการ์ (*Nyctanthes arbortristis* L.) มีรงควัตถุชื่อ นิกแทนทิน (nyctanthin) ดอกคำฝอยมีสารคาร์ตามิน (carthamin) ขมิ้นชัน (*Curcuma longa* L.) ซึ่งเป็นสมุนไพรประจำบ้านเพราะมีฤทธิ์ทางเภสัชมาก มีสารกลุ่มเคอร์คิวมิน (curcumin) เปลือกมะม่วง (*Mangifera* spp.) ให้สีเหลือง ใช้ย้อมผ้าและงานจักสาน ประดู่บ้าน (*Pterocarpus indicus* Willd.) มีสารซานทาลิน เปลือกและผลมะม่วงหิมพานต์ (*Anacardium occidentale*) ให้สีดำ ลำต้นขมิ้นเครือ (*Arcangelisia flava* (L.) Merr.) มีสารเบอร์เบอรีน (berberine)

พืชที่ให้สีย้อมที่เป็นที่รู้จักได้แก่ สะเดา (*Azadirachta indica* A. Juss. var. *siamensis* Val.) ตะแบก (*Lagerstroemia floribunda* Jack.) กระดินบ้าน (*Leucaena* spp.) เปลือกนนทรี (*Peltophorum pterocarpum* (DC.) K. Heyne) เปลือกโกกงาง (*Rhizophora* spp.) รากขยอบ้าน (*Morinda citrifolia* L.) ขางจากเปลือกต้นรัง (*Garcinia hanburyi* Hook.f.) ใบคิ้วแดง (*Cratogeomys formosum* (Jack) Dyer ssp.) ผลมะเกลือ (*Diospyros mollis* Griff.) ผลสมอพิเภก (*Terminalia bellerica* (Gaertn.) Roxb.) ตะโก (*Diospyros rhodocalyx* Kurz.), มะพลับ (*Diospyros malabarica* (Desr.) Kostel.), ยูคาลิปตัส (*Eucalyptus* spp.) ตะแบก (*Lagerstroemia floribunda* Jack.) มะขาม (*Tamarindus indica* L.) ฝรั่ง (*Psidium guajava* L.) สาบเสือ (*Eupatorium odoratum* L.) สีเสียดเหนือ (*Acacia catechu* (L.f.) Willd.) หูกวาง (*Terminalia catappa* L.) เทียนดอก (*Impatiens balsamina* L.) เทียนกิ่ง (*Lawsonia inermis* L.) พุดซ้อน เสม็ดขนุน (*Syzygium* spp.) พลองกินลูก

(*Memecylon ovatum* Sm.) (เล็มเมนส์, 2544)

บนคอกแม่สะลอง ชนกลุ่มน้อยเผ่าเย้า อาข่า และลีซอ มีชีวิตที่เกี่ยวข้องกับพืชนานาพรรณ นอกจากจะใช้สีครามย้อมผ้าจากห้อมและพืชสกุล *Indigofera* แล้ว ยังใช้หัวว่านหอมแดง (*Eleutherine americana* Merr.) ย้อมเปลือกไข่ให้เป็นสีแดง เปลือกต้นเก็ด (*Dalbergia toliacensis*) ใช้ย้อมผ้า เปลือกต้นผ้า (*Callicarpa arborea* Roxb.) ให้สีแดง (ชูศรี และ ปรีทรรศน์ ไตรสนธิ, 2542)

ยังมีพืชอีกมากมายตามท้องถิ่นต่างๆ ที่ยังไม่เป็นที่รู้จัก บางทีสีย้อมไวแสงที่น่าสนใจอาจจะอยู่ในวัชพืชใกล้ตัวที่คิดไม่ถึงก็เป็นได้

### การทดสอบเบื้องต้น

วิธีสังเกตอย่างหนึ่งเกี่ยวกับพืชที่ให้รงควัตถุคือ ชิ้นส่วนพืชบางชนิดละลายน้ำร้อนหรือตัวทำละลายแล้ว ให้สีละลายออกมาได้ทันที เช่น ไม้ฝางแดง ดอกคำฝอย ผลสมอทะเล พริกไทยดำ เปลือกมังคุด ฯลฯ แต่เมื่อนำมาย้อมสี  $TiO_2$  อาจให้สีที่ต่างออกไป บางครั้งสารละลายชิ้นส่วนพืชไม่ค่อยมีสี แต่สามารถย้อมสีได้ ผู้เขียนลองแซ่กระจกที่เคลือบ  $SnO_2$  เคลือบ  $TiO_2$  ที่มีรูพรุน (ได้จากนักวิจัยในสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ) ในน้ำดอกอัญชัน ประมาณสองชั่วโมงเกิดการย้อมสีเป็นสีเหลือง แต่ถ้าเปลี่ยนตัวทำละลายเป็นเอทานอลจะได้สีน้ำเงิน

ผู้เขียนได้นำชิ้นส่วนพืชกว่าสิบชนิดมาทดลองย้อมสีบนแผ่นกระจกดังกล่าว เพื่อสำรวจพืชที่มีความเป็นไปได้ที่จะใช้เป็นสีย้อมไวแสง ได้ผลการทดลองจากการประมาณด้วยสายตาว่า ชิ้นส่วนพืชที่ย้อมให้  $TiO_2$  มีสีเข้มได้เมื่อนำไปเป็นตัวทำละลายได้แก่ เปลือกไม้มะพลับ ผงดอกคำฝอย เปลือกเงาะสด เปลือกมังคุดสด กลีบดอกบัวแห้ง และแก่นไม้ฝางแดง สำหรับแก่นไม้ฝางแดงแม้จะให้สีชมพูเข้มได้อย่างรวดเร็วง่ายดาย แต่ถูกฟลอกสีได้จนหมดภายในเวลาไม่กี่ชั่วโมงเมื่อโดนแสงแดดโดยตรง เช่นเดียวกับขมิ้นชัน เปลือกไม้มะพลับย้อมสีได้เข้มกว่าผงดอกคำฝอยเล็กน้อย สีย้อมจากผงดอกคำฝอยก็ถูกฟลอกสีได้

ส่วนสีข้อมจากเปลือกมะพลับคงทนกว่าพืชชนิดอื่น การข้อมสีจากน้ำที่แช่เปลือกไม้มะพลับถ้าแช่ไว้ 4 ชั่วโมง จะได้สีเข้มกว่าที่แช่ไว้ 2 ชั่วโมง

ชิ้นส่วนพืชอีกสามชนิดที่น่าสนใจ คือ กลีบดอกบัวแห้ง เปลือกมะเสลด และเปลือกมังคุดสด ซึ่งได้ข้อมูลจากการทดลองโดยนำชิ้นส่วนพืชแช่น้ำร้อน นำกระเจดักกล่าวแช่ไว้หนึ่งคืน ได้สีเข้มค่อนข้างชัดเจน เปลือกมังคุดให้สีดำส่วนการฟอกสีเมื่อโดนแสงแดดนั้น ยังไม่ได้ทำการทดลอง

ยังมีพืชที่ให้สีข้อมไวแสงได้มากมายที่ยังไม่เคยมีการทดลองประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ ชิ้นส่วนพืชนั้นอาจหาได้จากพืชสดในท้องถิ่น ตลาด ร้านขายสมุนไพร หรือสวนรุกขชาติต่างๆ

### ข้อจำกัดและทางแก้

อุปสรรคที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์คือการเสื่อมสภาพ เนื่องจากอนุภาค  $TiO_2$  ทำความสะอาดตัวเองได้เมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ต สารอินทรีย์ที่ยึดเกาะจึงเสื่อมสลายระหว่างการใช้งาน ดังที่ Vautier et al. (2001) รายงานการเร่งการสลายตัวของสีครามในกระบวนการที่มีอนุภาค  $TiO_2$  และรังสีอัลตราไวโอเล็ตเพื่อใช้ขจัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการข้อมสี Sommeling et al. (2004) รายงานการทดสอบความเสถียรในระยะยาว และกล่าวว่า การพัฒนาในด้านความเสถียรมีอิทธิพลอย่างแรงต่อการใช้ในทางพาณิชย์ งานวิจัยที่น่าสนใจ คือ Zhang et al. (2007) รายงานปัญหาการเสื่อมสภาพรวดเร็วของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ในรูปของแข็ง ซึ่งจะไม่เกิดขึ้นเมื่อกรองรังสีอัลตราไวโอเล็ตออกไป และได้แก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการเคลือบขั้วไฟฟ้า  $TiO_2$  ที่มีรูพรุนด้วยชั้นบางเป็นพิเศษของแมกนีเซียมออกไซด์ ซึ่งสามารถป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงของ  $TiO_2$  ได้

จากการทดลองให้มีหมู่กรดอินทรีย์ในโมเลกุลสีข้อมไวแสง มีการเสนอว่า การยึดเกาะของหมู่กรดอินทรีย์ในโมเลกุลสีข้อมไวแสงบนอนุภาค  $TiO_2$  มีอิทธิพลต่อความเสถียรอย่างมาก (Kang et al, 2000)

Tributsch (2004) ก็วิเคราะห์ว่าเรื่องการยึดเกาะบนพื้นผิวมีอิทธิพลต่อการเสื่อมสภาพ

วิธีแก้การเสื่อมสภาพอีกทางหนึ่งคือ ทำให้สีข้อมไวแสงเกิดสารเชิงซ้อนกับโลหะ เกียรติภูมิ รอดพันธ์ (2549) นำสีจากลูกหว้า (*Syzygium cumini* (Linn.) Skeets) และขมิ้นชัน (*Curcuma longa* Linn.) มาใช้เป็นสีข้อมไวแสง ได้ค่าการดูดกลืนแสงของสาร สกัตรวงค์วัดอยู่ในช่วง 300-600 nm และปรับปรุงความเสถียรและประสิทธิภาพของสารสกัตรวงค์สีธรรมชาติดังกล่าว โดยทำให้เกิดสารเชิงซ้อนของโมเลกุลสีข้อมกับไอออนของโลหะ เช่น เหล็ก ทองแดง และสังกะสี

การเสื่อมสภาพเป็นจุดอ่อนที่ใหญ่ ถ้าสามารถทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ใช้งานเป็นเวลานานพอในระยะยาวได้ ก็จะทำให้ทำหยาต่อการพัฒนาให้เป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าของชาวโลก

### สีข้อมไวแสงพอลิเมอร์สังเคราะห์

นอกจากสีข้อมไวแสงจากพืช สีข้อมไวแสงอีกกลุ่มหนึ่งที่นำลงศึกษาเป็นแนวทาง คือ สารอินทรีย์ที่ดูดกลืนแสงได้มากเป็นพิเศษ เช่น พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (conducting polymer) ซึ่งมีพันธะคู่สลับเดี่ยวตลอดแนวของโมเลกุลซึ่งเป็นสายยาว หรือโพลิโกเมอร์ (รงควัตถุเมลานินที่ทำให้เส้นผมและผิวหนังคนมีสีเข้มก็เป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้า มีจุลินทรีย์หลายชนิดผลิตเมลานินได้)

ผู้เขียนเคยมีความตั้งใจจะใช้สีข้อมไวแสงสังเคราะห์ในกลุ่มพอลิไทโอฟีน (polythiophene) ที่ปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันให้ยึดเกาะบน  $TiO_2$  ได้ดี โดยออกแบบให้มีหมู่กรดอินทรีย์และให้ส่วนที่เป็นพันธะคู่สลับเดี่ยวอยู่ชิดกับส่วนที่ยึดเกาะ  $TiO_2$  มากที่สุด แนวความคิดนี้มีคนรายงานผลงานวิจัยมาก่อนแล้ว แต่ยังมีข้อบกพร่องที่ไม่ตรงกับแนวคิดของผู้เขียน กล่าวคือ Liu et al. (2004) นำพอลิเมอร์นำไฟฟ้ามาใช้เป็นสีข้อมไวแสง แต่ยังไม่มีการยึดเกาะบน  $TiO_2$  ที่ดีพอ เพราะเป็นการใช้ฟิล์มพอลิไทโอฟีนเคลือบเป็นแผ่นบนชั้น  $TiO_2$  และยังไม่ได้ประสิทธิภาพที่น่าสนใจ ส่วน

Yanagida et al. (2004) แม้จะใช้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ละลายในตัวทำละลายได้มาใช้เป็นสีย้อมไวแสง แต่ผู้เขียนสังเกตว่าพันธะคู่บนหมู่กรดอินทรีย์ที่ยึดเกาะกับ  $TiO_2$  นั้นไม่เชื่อมต่อกับพันธะไพลตามแนวพันธะคู่สลับเดี่ยว ทำให้การส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างสีย้อมไวแสงกับชั้น  $TiO_2$  ไม่ค่อยดีเท่าที่ควร

แนวความคิดของผู้เขียนข้างต้นนั้น ได้รับข้อโต้แย้งว่า พอลิเมอร์มีโมเลกุลยาว อาจมีความหนืดสูง ไม่สามารถแทรกตัวเข้าไปยึดเกาะกับ  $TiO_2$  ควรแก้ไขโดยเปลี่ยนแผนที่จะทำจากรูปของพอลิเมอร์ เป็นโพลิโกลิเมอร์ที่มีความยาวต่างๆ ดังนั้น ผู้เขียนได้เคียวแผนการทดลองที่จะประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมไวแสงเป็นพอลิเมอร์หรือโพลิโกลิเมอร์ของ thiophene-3-carboxylic acid ซึ่งน่าจะให้คุณสมบัติตามที่ต้องการ แต่งานวิจัยนี้มีเหตุให้ต้องเลิกทำไปเสียก่อนระหว่างงานเคมีอินทรีย์สังเคราะห์ (ความล่าช้าที่เกิดขึ้นมาจากความผิดพลาด คือ ได้เลือกสังเคราะห์มอนอเมอร์ผ่าน 3-cyanothiophene ซึ่งเป็นของเหลวที่ระเหยไปหมดระหว่างการแยกสาร)

แต่สิ่งที่น่าสนใจในการค้นหาสีย้อมไวแสงถ้าทำสำเร็จก็คือ พอลิเมอร์ของ thiophene-3-carboxylic acid อาจนำมาใช้ในการประกอบอุปกรณ์ระดับชาวบ้านได้ดีถ้าไม่เป็นพิษ เพราะละลายน้ำได้ (Kim et al., 1999 และ Englebienne and Weiland, 1996) อย่างไรก็ตาม เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารอินทรีย์กลุ่มนี้มีหลายรูปแบบที่อยู่ระหว่างการศึกษาในวงการวิจัย

### การใช้เป็นสื่อการเรียนรู้วิทยาศาสตร์

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมาจากอุปกรณ์ที่ประกอบได้ง่ายและมีสีสันทำทาบความอยากรู้อยากเห็น จึงสามารถใช้เป็นของเล่นที่ให้ความสนุกสนาน กระตุ้นความคิดและความรู้สำหรับนักเรียนชั้นมัธยมหรือระดับที่โตกว่าได้ นักเรียนสามารถนำส่วนของพีชชนิดต่างๆ ที่มีสีสันทาสักน้ำตาลหรือละลายรงควัตถุสำหรับใช้เป็นสีย้อมไวแสงได้อย่างง่าย เพียงจุ่มแผ่นกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบ  $TiO_2$  ลงในสารละลายสีนั้น

ซึ่งอาจสกัดจากพืชผัก มาประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าและทดสอบประสิทธิภาพเปรียบเทียบกัน การประกอบที่ง่ายแต่มีหลักการสามารถทำให้เยาวชนมีแรงบันดาลใจที่ดีได้ นอกจากนี้ นักวิจัยยังได้แรงคลใจจากการทดลองดังกล่าวที่จะช่วยกันคิดแบ่งหน้าที่พัฒนาองค์ประกอบต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

คำถามที่ว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะพัฒนาให้มีความเหมาะสมพอที่จะเป็นแหล่งพลังงานของสังคมได้หรือไม่ เป็นคำถามที่สำคัญ แต่สิ่งที่สำคัญไม่แพ้กันคือ การเรียนรู้ และการปลูกฝังให้เยาวชนและนักวิจัยมีใจรักที่จะคิดค้นงานวิจัยที่มีประโยชน์ต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม

### บทสรุป

ประเทศไทยมีแหล่งสีย้อมไวแสงจากพืชที่นำมาทำการทดลองใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงตั้งแต่ในกลุ่มแอนโทไซยานิน จนถึงรงควัตถุที่หลากหลายจากพืชที่ยังไม่เป็นที่รู้จักขณะเดียวกันก็ต้องหาทางป้องกันการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ งานทั้งสองส่วนเป็นความหวังสำหรับแหล่งผลิตไฟฟ้าที่อาจเป็นไปได้ เพื่อวิถีชีวิตที่ยั่งยืนและส่งผลิตต่อสิ่งแวดล้อม

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาอัจฉริยภาพทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสำหรับเด็กและเยาวชน ของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และนายชัยยุทธ แซ่ก้ง สำหรับโอกาสในการเรียนรู้ของผู้เขียน

ผลบุญที่เกิดขึ้นจากการเขียนบทความนี้ จึงมีแต่ผู้มีส่วนร่วมในการค้นคว้าวิจัยในเรื่องที่กล่าวมาทุกเรื่อง และผู้มีส่วนช่วยเหลือทุกคน

## เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงพลังงาน. การประกวดโครงการ Solar Challenge (อ้างเมื่อ 16 กรกฎาคม 2550) ทางเว็บไซต์ <http://www.energy.go.th/th/childrenCornerProject.asp>.
- เกียรติภูมิ รอดพันธ์. (2549). บทคัดย่องานประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (อ้างเมื่อ 12 มีนาคม 2550) ทางเว็บไซต์ [http://www.ipst.ac.th/dpst/meeting49s/abstract/P\\_CHE.pdf](http://www.ipst.ac.th/dpst/meeting49s/abstract/P_CHE.pdf) หน้า 3.
- ชูศรี ไตรสนธิ และ ปรีทรรศน์ ไตรสนธิ (2542). การศึกษาพฤกษศาสตร์พื้นบ้านของชนกลุ่มน้อยเผ่าต่างๆ บนดอยแม่สะลอง. ภาควิชาชีววิทยาคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สำนักงานคณะกรรมการการสาธารณสุขมูลฐาน. (2540). ผักพื้นบ้าน ความหมายและภูมิปัญญาของสามัญชนไทย. กรุงเทพฯ. สถาบันการแพทย์แผนไทย กรมการแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข
- อาร์.เอช.เอ็ม.เจ. เล็มเมนส์. (2544). พืชที่ให้สีข้อมและแทนนิน. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
- Amao, Y., Yamada, Y. and Aoki, K. (2004). *J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry*. 164: 47-51.
- Bahorun, T., Neergheen, V.S. and Aruoma, O.I. (2005). *African Journal of Biotechnology*. 4(13): 1530-1540.
- Brouillard, R. (1981). *Phytochemistry*. 20: 143-145.
- Dai, Q. and Rabani, J. (2001). *Chem. Commun.* 20: 2142-2143.
- Dyesol company. (Accessed 2 June 2007) <http://www.dyesol.com>.
- Englebienne, P. and Weiland, M. (1996). *J. Immunological Methods*. 191: 159-170.
- Ferber, J., Stangl, R. and Luther, J. (1998). *Solar Energy Material and Solar Cells*. 53: 29-54.
- Garcia, C.G., Polo, A.S. and Iha, N.Y.M. (2003a). *An. Acad. Bras. Ciênc.* 75(2).
- Garcia, C.G., Polo, A.S. and Iha, N.Y.M. (2003b). *J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry*. 160: 87-91.
- Grätzel, M. (2003). "Dye-sensitized solar cells" *J. Photochem. Photobiol. C: Photochem. Rev.* 4: 145.
- Greijer, H., Karlson, L., Lindquist, S. and Hagfeldt, A. (2000). *Renewable Energy*. 23(1): 27-39.
- Hao, S., Wu, J., Huang, Y. and Lin, J. (2006). *Sol. Energy*. 80: 209-214.
- Hidekazu, I. (1986). Patent. JP61085476.
- Kang, T., Chun, K., Hong, J.S., Moon, S. and Kim, K. (2000). *J. Electrochem. Soc.* 147(8): 3049-3053.
- Kim, B., Chen, L., Gong, J.P. and Osada, Y. (1999). *Macromolecules*. 32: 3964-3969.
- Kumara, G.R.A., Kaneko, S., Okuya, M., Onwona-Agyeman, B., Konno, A. and Tennakone, K. (2006). *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 90(9): 1220-1226.
- Liu, J., Kadnikova, E.N., Liu, Y., McGehee, M.D. and Frechet, J.M.J. (2004). *J. Am. Chem. Soc.* 126: 9486-9487.
- Miyasaka, T. and Murakami, T.N. (2004). *Applied Physics Letters*. 85(17): 3932-3934.
- Nazeeruddin, M.K., Kay, A., Rodicio, I., Humphry-Baker, R., Mueller, E., Liska, P., Vlachopoulos, N. and Graetzel, M. (1993). *J. Am. Chem. Soc.* 115(14): 6382-6390.
- O'Regan, B. and Grätzel, M. (1991). *Nature*. 353: 737-740.

- Polo, A.S., Itokazu, M.K. and Iha, N.Y.M. (2004). *Coordination Chemistry Reviews*. 248: 1343-1361.
- Polo, A.S. and Iha, N.Y.M. (2006). *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 90(13): 1936-1944.
- Sirimanne, P.M., Senevirathna, M.K.I., Premalal, E.V.A., Pitigala, P.K.D.D.P., Sivakumar, V. and Tennakone, K. (2006). *J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry*. 177: 324-327.
- Sommeling, P.M., Speth, M., Smit, H.J.P., Bakker, N.J. and Kroon, J.M. (2004). *J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry*. 164: 137-144.
- Teh, L.S. and Francis, F.J. (1988). *Journal of Food Science*. 53(5): 1580-1.
- Tennakone, K. and Divigalpitiya, W.M.R. (1981). *Japanese J. Applied Physics*. 20: 299-300.
- Tennakone, K., Kumara, G.R.R.A., Kumarasinghe, A.R., Sirimanne, P.M. and Wijayantha, K.G.U. (1996). *J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry*. 94: 217-220.
- Tennakone, K., Kumara, G.R.R.A., Wijayantha, K.G.U., Kottegoda, I.R.M., Perera, V.P.S. and Aponsu, G.M.L.P. (1998a). *Semicond. Sci. Technol.* 13: 134-138.
- Tennakone, K., Kumara, G.R.R.A., Kottegoda, I.R.M., Perera, V.P.S. and Weerasundara, P.S.R.S. (1998b). *J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry*. 117: 137-142.
- Tributsch, H. (2004). *Coordination Chemistry Reviews*. 248: 1511-1530.
- Vautier, M., Guillard, C. and Herrmann, J.M. (2001). *J. Catalysis*. 201: 46-59.
- Wongcharee, K., Meeyoo, V. and Chavadej, S. (2007). *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 91(7): 566-571.
- Yamazaki, E., Murayama, M., Nishikawa, N., Hashimoto, N., Shoyama, M. and Kurita, O. (2007). *Solar Energy*. 81(4): 512-516.
- Yanagida, S., Senadeera, G. K. R., Nakamura, K., Kitamura, T. and Wada, Y. (2004). *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 166: 75-80.
- Zervos, A., Lins, C. and Schafer, O. (2004). *Tomorrow's world 50% renewables scenario for 2040. Renewable Energy World*. 7(4): 238-245.
- Zhang, X., Taguchi, T., Wang, H., Meng, Q., Sato, O. and Fujishima, A. (2007). *Research on Chemical Intermediates*. 33(1-2): 5-11.



## การเตรียมอนุภาคนาโนของสังกะสีออกไซด์ ด้วยวิธีการบดและการตกตะกอน

สุเมธา สุวรรณบุรณ์<sup>1</sup>

### บทนำ

ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทกับชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมาก แต่จริงๆ แล้วมีผู้มองเห็นถึงความเป็นไปได้ของนาโนเทคโนโลยีมาเป็นเวลานานแล้ว อีกทั้งงานวิจัยทางด้านนาโนนั้นก็มีมานานแล้วเช่นกัน หนึ่งในบรรดานักวิทยาศาสตร์ที่มีชื่อเสียงที่ได้กล่าวถึงนาโนเทคโนโลยีไว้ คือ ศาสตราจารย์ริชาร์ด ฟายน์แมน (Richard Feynman) ผู้ซึ่งได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี พ.ศ. 2508 ได้กล่าวไว้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2502 ว่า “สักวันหนึ่งเราจะสามารถประกอบสิ่งต่างๆ ผลิตสิ่งต่างๆ ขึ้นมาจากการจัดเรียงอะตอมด้วยความแม่นยำ และเท่าที่ข้าพเจ้ารู้ ไม่มีกฎทางฟิสิกส์ใดๆ หรือแม้แต่หลักความไม่แน่นอนที่จะมาขัดขวางความเป็นไปได้นี้”

นาโน มีรากศัพท์มาจากภาษากรีกโบราณที่แปลว่าแคระ แต่ในปัจจุบันคำว่า นาโน หมายถึงหน่วยวัด โดยที่ 1 นาโนเมตรมีขนาดเท่ากับหนึ่งในพันล้านส่วนของเมตรหรือมีขนาดเล็กกว่าเส้นผมคนประมาณหนึ่งแสนเท่า ดังนั้นขนาดของนาโนจึงอยู่ในระดับของอะตอม โดยที่ 1 นาโนเมตรมีความยาวประมาณ 10 อะตอมของไฮโดรเจนหรือ 5 อะตอมของซิลิกอนที่นำมาวางเรียงต่อกันเป็นเส้นตรง โดยวัสดุที่จัดว่าเป็นวัสดุนาโนนั้นจะต้องมีขนาดอยู่ในช่วง 1-100 นาโนเมตร หากวัสดุใดที่มีขนาดใหญ่เกินกว่านี้จะใช้หน่วยอื่นๆ แทน เช่น ไมโครเมตรและมิลลิเมตร เป็นต้น

สำหรับนาโนเทคโนโลยีในปัจจุบันจะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างและวัสดุที่มีขนาดเล็กๆ ที่ประกอบหรือผลิตขึ้นมาจากการจัดเรียงอะตอมหรือโมเลกุลเข้าด้วยกันด้วยความแม่นยำและถูกต้องในระดับนาโนเมตรเพื่อทำให้ได้สมบัติต่างๆ ที่แตกต่างไปจากวัสดุชนิดเดียวกันแต่มีขนาดในระดับของจุลภาค เช่น จุดหลอมเหลวของวัสดุนาโนจะต่ำลงเมื่อเทียบกับวัสดุที่มีขนาดใหญ่ และค่าคงตัวแลตทิซจะลดลงเนื่องจากจำนวนอะตอมหรือออรอนจะอยู่ที่ผิวเป็นส่วนใหญ่เมื่อเทียบกับจำนวนอะตอมหรือออรอนทั้งหมด เป็นต้น ปัจจุบันนี้การเตรียมอนุภาคนาโนของออกไซด์ของโลหะเป็นจุดสนใจศึกษาของนักวิจัยจำนวนมาก เนื่องจากอนุภาคนาโนมีพื้นที่ผิวและความหนาแน่นต่อหน่วยปริมาตรสูง มีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีและโปร่งแสงสูง ซึ่งรายงานฉบับนี้จะกล่าวถึงการเตรียมอนุภาคนาโนของสังกะสีออกไซด์ เนื่องจากอนุภาคนาโนของสังกะสีออกไซด์มีแถบช่องว่างพลังงานสูง และมีสมบัติทางแสงที่ดี ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นไดโอดเปล่งแสงและตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีได้ เป็นต้น (Cao, 2003)

### การเตรียมอนุภาคนาโนของออกไซด์ของโลหะ

ช่วงเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมาประเทศต่างๆ มีการพัฒนาวิธีการเตรียมอนุภาคนาโน หรือวัสดุนาโนขึ้นมามากมาย โดยวิธีการเตรียมอนุภาคนาโนดังกล่าวสามารถจำแนกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ กระบวนการเตรียม

<sup>1</sup> หลักสูตรวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

จากบนลงล่าง (top-down approach) และกระบวนการเตรียมจากล่างขึ้นบน (bottom-up approach) ซึ่งการเตรียมอนุภาคนาโนจากกระบวนการทั้งสองนี้มีทั้งข้อได้เปรียบและเสียเปรียบที่แตกต่างกันออกไป ดังจะได้อธิบายในรายละเอียดเฉพาะส่วนของวิธีการเตรียมที่เป็นที่นิยมในประเทศไทยในปัจจุบันต่อไป

### 1. กระบวนการเตรียมจากบนลงล่าง

กระบวนการเตรียมวัสดุจากบนลงล่างเป็นกระบวนการที่ทำให้วัสดุที่มีขนาดใหญ่แตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ หรือกลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กๆ สำหรับกระบวนการเตรียมอนุภาคนาโนของออกไซด์ของโลหะที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ วิธีการบดซึ่งเป็นการเตรียมผงในสถานะของแข็ง โดยระหว่างการบดนั้นจะเกิดการประสานกันของอนุภาค (welding) การแตกหักของอนุภาค (fracturing) และการประสานเข้ากันใหม่ (rewelding) ของอนุภาคเกิดขึ้นซ้ำๆ (Suryanarayana, 2001) สำหรับการบดนั้นมีทั้งการบดแบบธรรมดา (milling) และการบดด้วยพลังงานสูง (high-energy ball mill)

การเตรียมอนุภาคนาโนของโลหะและออกไซด์ของโลหะด้วยการบดนี้เป็นวิธีการหนึ่งที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากการเตรียมอนุภาคนาโนด้วยวิธีการบดมีข้อดีที่เห็นได้ชัดเจนดังต่อไปนี้ (Tokumitsu, 1997)

1. การเตรียมอนุภาคด้วยวิธีการบดสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิห้อง อีกทั้งกระบวนการบดเป็นกระบวนการที่ไม่ต้องให้ทั้งความร้อนและความเย็นแก่ระบบระหว่างการบด และ

2. การเตรียมอนุภาคด้วยการบดสามารถใช้เตรียมผงในรูปของโลหะผสมหรือออกไซด์ของโลหะผสมที่เป็นที่ต้องการของโรงงานอุตสาหกรรม และวิธีการบดด้วยพลังงานสูงนี้ยังสามารถใช้เตรียมอนุภาคที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรได้เป็นอย่างดีอีกด้วย

อย่างไรก็ตาม การเตรียมอนุภาคนาโนด้วยเทคนิคนี้ยังมีจุดด้อยอยู่หลายประการ (Cao, 2003) เช่น

1. ผิวของอนุภาคที่เตรียมได้ไม่เรียบ

2. อนุภาคที่ได้ อาจจะมีสิ่งเจือปนร่วมอยู่ ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการเลือกใช้หม้อบดและลูกบดที่ไม่เหมาะสม

3. อนุภาคที่เตรียมได้มีความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างและความไม่สมบูรณ์ที่ผิวซึ่งอาจส่งผลต่อสมบัติอื่นๆ ได้ เช่น สภาพนำไฟฟ้า เนื่องจากพหุจะเกิดการกระเจิงที่ผิวแบบไม่ยืดหยุ่นส่งผลให้สภาพนำไฟฟ้าลดลง

การเตรียมอนุภาคด้วยการบดสามารถทำได้ง่ายๆ โดยการนำผงโลหะหรือออกไซด์ของโลหะที่ต้องการบดมาผสมกันในหม้อบดและใส่ลูกบดลงไปในสัดส่วนที่ต้องการศึกษา หลังจากนั้นจึงทำการบดด้วยเครื่องมือดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งระหว่างการบดผงตัวอย่าง จะเกิดลักษณะที่สำคัญๆ ขึ้นดังนี้

1. เกิดการผสมกันและการกระจายตัวออกจากกันของอนุภาคที่ถูกบด

2. เกิดการกระแทกกันของผงกับลูกบด ทำให้ได้ขนาดผลึกหรือขนาดอนุภาคที่เล็กลง

3. เกิดความเครียดและตำหนิต่างๆ ที่อนุภาค เช่น ช่องว่างหรือคิสโลเคชัน ถ้าอนุภาคที่ถูกบดเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างรุนแรงจะส่งผลให้พลังงานอิสระของอนุภาคเพิ่มขึ้น ซึ่งจะกระตุ้นให้เกิดการแพร่ของอะตอมได้ง่ายขึ้น

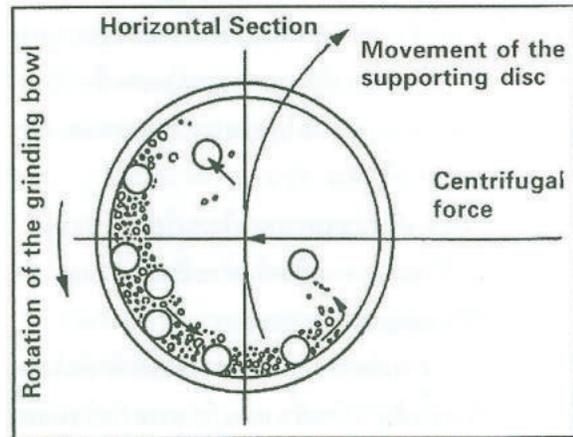
4. เกิดการสร้างพื้นผิวใหม่ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ผิวได้ดียิ่งขึ้น

5. เกิดการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นในบางกรณี

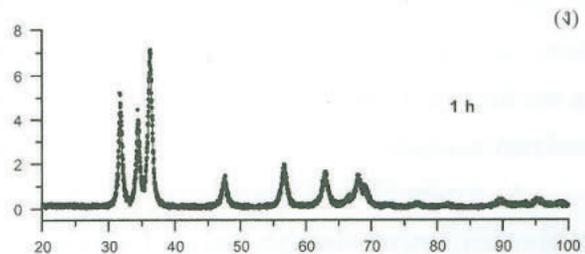
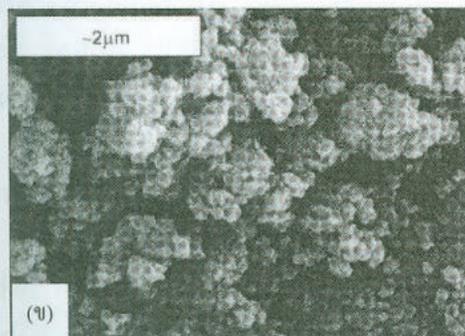
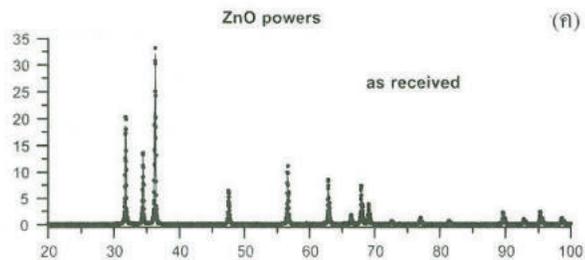
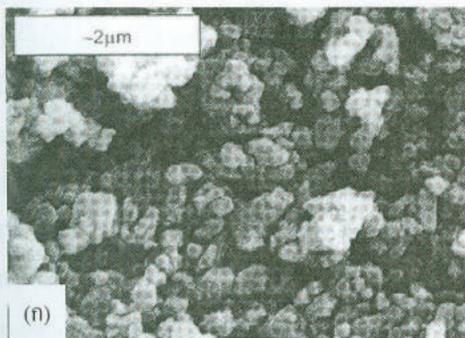
Damonte L.C. และคณะ (Damonte et al, 2004) ได้ศึกษาอิทธิพลของการบดอนุภาค ZnO ที่มีขนาดอนุภาคตั้งต้นอยู่ในช่วง 170-500 นาโนเมตร เมื่อทำการบดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักลูกบดต่อสารตั้งต้นเป็น 10:1 พบว่าขนาดของอนุภาคลดลงอยู่ในช่วง 50-110 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2(ก) และ 2(ข) และเมื่อทำการตรวจสอบเฟสโดยศึกษาจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะเห็นได้ว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผง ZnO ที่ผ่านการบดมาเป็นเวลา 1 ชั่วโมงยังคงแสดงรูปแบบที่

เหมือนกับผง ZnO ก่อนบด แต่ลักษณะของฟีกภายหลังการบดจะกว้างขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2(ค) และ (ง) ซึ่งสอดคล้องกับขนาดของผลึกที่เล็กลง เมื่อคำนวณด้วยสูตรของ Scherrer ( $D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta}$ ) เมื่อ D คือ ขนาด

ของผลึก k คือ ค่าคงที่  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์  $\beta$  คือ ค่าความกว้างที่ครึ่งหนึ่งของฟีกที่มีความเข้มสูงสุด และ  $\theta$  คือ มุมที่รังสีเอกซ์ตกกระทบ)



รูปที่ 1 (ก) หม้อบดแบบ planetary และ (ข) การเคลื่อนที่ของลูกบดขณะบดสารในหม้อบด (Suryanarayana, 2001)



รูปที่ 2 (ก) และ (ข) แสดงรูปร่างและขนาดของผง ZnO (ค) และ (ง) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ก่อนและหลังบด ตามลำดับ (Damonte et al, 2004)

## 2. กระบวนการเตรียมจากล่างขึ้นบน

กระบวนการเตรียมวัสดุจากล่างขึ้นบนเป็นกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคที่มีขนาดเล็กจากระดับของอะตอมหรือโมเลกุลของสารตั้งต้น รวมถึงการประกอบตัวเอง (self-assembly) และการจัดเรียงอะตอมให้เป็นโครงสร้างใหม่ๆ ด้วยเครื่องมือที่เฉพาะ

สำหรับเทคนิคที่นิยมใช้ในการเตรียมอนุภาคนาโนของออกไซด์ของโลหะอย่างแพร่หลาย คือ วิธีการทางเคมีสารละลาย เช่น วิธีโซล-เจล หรือการตกตะกอนจากสารละลาย เป็นต้น

การเตรียมอนุภาคนาโนของออกไซด์ของโลหะด้วยวิธีโซล-เจล จะเกิดผ่านขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้ (Cushing et al, 2004)

1. การเกิดสารละลายที่เสถียรของเกลือโลหะที่ใช้เป็นสารตั้งต้น เรียกขั้นตอนนี้ว่าการเกิดโซลและปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสจะเกิดขึ้นในขั้นตอนนี้

2. โซลของโลหะเกิดการเปลี่ยนสภาพจากโซลเป็นเจลผ่านการเชื่อมต่อของโลหะด้วยหมู่ออกซิเจนหรือหมู่ไฮดรอกซิลด้วยการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นส่งผลให้ความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

3. การบ่มเจล ขั้นตอนนี้เป็นการปล่อยให้เจลเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นได้อย่างต่อเนื่องเพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสจากเจลเป็นเจลที่แข็งขึ้น ขั้นตอนนี้เจลที่จับตัวกันเป็นโครงร่างตาข่ายจะเกิดการหดตัวและตัวทำละลายจะระเหยออกจากโครงสร้างเจล

4. การทำให้เจลแห้งขั้นตอนนี้เป็นการระเหยน้ำและของเหลวอื่นๆ ออกจากเจล ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเซโรเจล (xerogel) เมื่อระเหยน้ำและของเหลวอื่นๆ ออกที่สภาวะปกติ แต่ถ้าทำการระเหยน้ำและของเหลวอื่นๆ ออกที่สภาวะวิกฤตขวยยิ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเรียกว่า แอโรเจล (aerogel)

5. การเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (dehydration) ซึ่งจะเป็นการกำจัดน้ำจากโมเลกุล M-OH ที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นระหว่างการเผาแคลไซน์ ทำให้ได้อนุภาคของออกไซด์ของโลหะ MO

6. การเผาซินเตอร์ ขั้นตอนนี้จะทำให้ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น เนื่องจากรูพรุนที่เกิดขึ้นได้หายไป โดยทั่วไปขั้นตอนนี้มักใช้ในการเตรียมเซรามิกและแก้ว

สำหรับวิธีการตกตะกอนนั้นเป็นการเตรียมอนุภาคนาโนของออกไซด์ของโลหะโดยการตกตะกอนด้วยตัวตกตะกอนจำพวก NaOH, KOH และ NH<sub>4</sub>OH เป็นต้น เมื่อตัวตกตะกอนทำปฏิกิริยากับสารละลายของเกลือโลหะของสารตั้งต้นจะเกิดเป็นออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ของโลหะดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



วิธีการเตรียมอนุภาคนาโนของออกไซด์ของโลหะด้วยวิธีการทางเคมีสารละลายนี้เป็นวิธีที่ใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากทำได้ง่าย อุปกรณ์ที่ใช้ราคาไม่แพงและสามารถหาได้ทั่วไป และสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังมีขีดจำกัดอยู่บ้าง กล่าวคือ เมื่อระบบที่ศึกษามีการเจือด้วยโลหะชนิดอื่นๆ การเข้าแทนที่ของโลหะเจือที่ตำแหน่งของโลหะในโครงสร้างผลึกอาจเกิดได้ไม่ดัดนักเนื่องจากแรงผลักดันในการเกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องมาจากศักย์ไฟฟ้าเคมีเพียงอย่างเดียว และในบางกรณีการกำจัดไอออนร่วม เช่น NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ที่ดูดซับอยู่ที่ผิวของอนุภาคออกไซด์ของโลหะทำได้ยาก ทำให้อนุภาคที่เตรียมได้ยังคงมีไอออนเหล่านี้ค้างอยู่ เป็นต้น (Cushing et al, 2004) โดยทั่วไปอนุภาคที่เกิดจากการตกตะกอนจะมีขนาดใหญ่หรือเล็กหรือมีรูปร่างเป็นอย่างไรนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ ปัจจัย เช่น ธรรมชาติของสารตั้งต้น ตัวทำละลาย สารเพิ่มความเสถียร สารเจือ และอุณหภูมิของระบบ เป็นต้น ซึ่งรายงานฉบับนี้จะกล่าวรายละเอียดในบางประเด็นเท่านั้น

Li D. และคณะ (Li et al, 2003) ได้ศึกษาบทบาทของตัวตกตะกอน ได้แก่ สารละลายแอมโมเนีย (ammonia solution) ไตรเอทานอลเอมีน (triethanolamine, TEA) และเฮกซะเมทิลีนเตตระเอมีน (hexame-

thylenetetramine, HMT) เมื่อทำการตกตะกอนอนุภาค ZnO จากสารตั้งต้น  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  พบว่ารูปร่างและขนาดของอนุภาคที่เตรียมได้มีความแตกต่างกันไปกล่าวคือ อนุภาค ZnO ที่เกิดจากการตกตะกอนด้วย TEA มีรูปร่างเป็นทรงรีที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 3 ไมครอน อนุภาค ZnO ที่เกิดจากการตกตะกอนด้วย HMT มีรูปร่างคล้ายแท่งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.24 ไมครอน และอนุภาค ZnO ที่เกิดจากการตกตะกอนด้วยสารละลายแอมโมเนียมีรูปร่างคล้ายเข็มที่มีความยาวประมาณ 5.5 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงรูปร่างและขนาดของผง ZnO เมื่อตกตะกอนด้วย (ก) TEA (ข) HMT และ (ค)  $NH_4OH$  (Li et al, 2003)

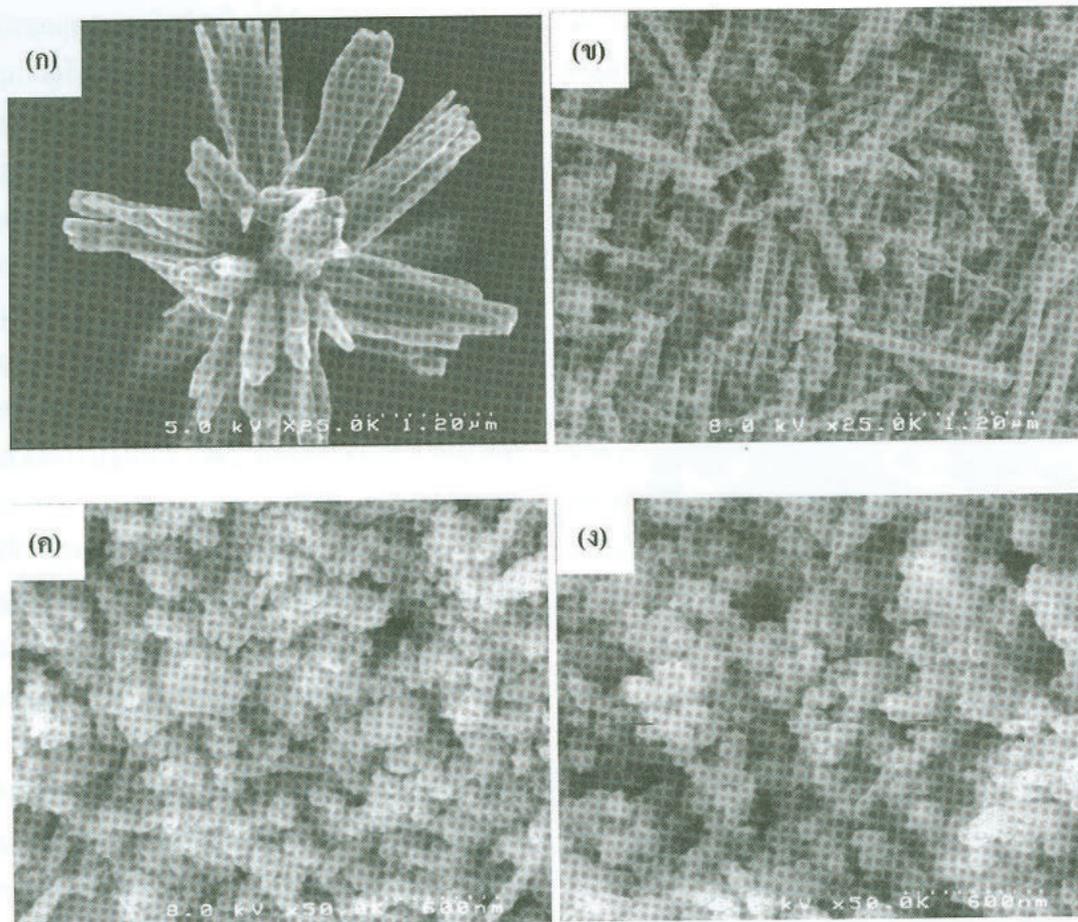
นอกจากตัวตกตะกอนแล้วรูปแบบหรือขั้นตอนของการเตรียมที่แตกต่างกันยังเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการเกิดรูปร่างและขนาดที่แตกต่างกันของอนุภาคออกไซด์ของโลหะที่เตรียมได้ ตัวอย่างเช่น เมื่อทำการเตรียมอนุภาค ZnO จากสารตั้งต้น  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  โดยใช้ น้ำเป็นตัวทำละลายและทำการตกตะกอนด้วยสารละลาย NaOH ถ้าการเตรียมอนุภาค ZnO ดังกล่าวกระทำผ่านการรีฟลักซ์ (reflux) ที่อุณหภูมิ 55-60 องศาเซลเซียส โดยทำการคนสารละลายที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 30 นาที พบว่าอนุภาคที่เตรียมได้นั้นมีรูปร่างที่คล้ายดาว (star-like) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 6 ไมครอน ในขณะที่อนุภาค ZnO ที่เตรียมด้วยการตกตะกอนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10-15 นาทีก่อนทำการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 55-60 องศาเซลเซียส พบว่าอนุภาค ZnO นั้นมีรูปร่างคล้ายเข็ม (McBride et al, 2003)

สารเพิ่มความเสถียรเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดรูปร่างและขนาดที่แตกต่างกันของอนุภาคออกไซด์ของโลหะ เช่น กรณีการเตรียมอนุภาค ZnO จากสารตั้งต้น  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  โดยใช้ Span 80 เป็นสารเพิ่มความเสถียรของระบบ (Lu et al, 1997) อนุภาคที่เตรียมได้มีรูปร่างเป็นทรงกลมที่มีขนาดระหว่าง 50-150 นาโนเมตร และมีการกระจายตัวของอนุภาคในช่วงแคบ แต่เมื่อเปลี่ยนไปใช้ไดเอทิลีนไกลคอล (diethylene glycol) อนุภาค ZnO ที่เตรียมได้ยังคงมีรูปร่างเป็นทรงกลม แต่มีขนาดที่โตขึ้นเป็น 100-600 นาโนเมตร (Seelig, 2003) ส่วนระบบที่ประกอบด้วย  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  กรดออกซาลิก 1,2-อีเทนไดออล และไดเอทานอลเอมีน รูปร่างของอนุภาค ZnO ที่เตรียมได้มีลักษณะคล้ายลวด (wire) โดยแต่ละเส้นของลวดจะประกอบด้วยอนุภาคทรงกลมที่มีขนาดระหว่าง 18-24 นาโนเมตร (Pillai et al, 2004)

สารเจือเป็นปัจจัยอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการลดขนาดและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอนุภาคออกไซด์ของโลหะ เช่น เมื่อตกตะกอนอนุภาค ZnO ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมจากสารตั้งต้นซิงค์อะซิโตนอะซิโตน

ไฮเดรต ( $Zn(C_5H_7O_2)_2 \cdot xH_2O$ ) และอะลูมิเนียมอะซิทิลอะซิโตน ( $Al(C_5H_7O_2)_3$ ) และคกตะกอนด้วย 0.5 M KOH พบว่า เมื่อปริมาณ  $Al(C_5H_7O_2)_3$  เพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 10 mol% ขนาดของผลึกที่ได้จะมีขนาดลดลง

จาก 54 เป็น 15 นาโนเมตร และรูปร่างของอนุภาคเปลี่ยนแปลงจากลักษณะแท่งเป็นอนุภาคทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 4 (Suwanboon et al, 2007)



รูปที่ 4 แสดงรูปร่างและขนาดของผง ZnO เมื่อเจือด้วย (ก) 0 mol%Al (ข) 3 mol%Al (ค) 5 mol%Al และ (ง) 10 mol%Al เมื่อเผาแคลไซน์ที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (Suwanboon et al, 2007)

นอกจากปัจจัยที่กล่าวมาทั้งหมดแล้ว ขนาดอนุภาคของโลหะออกไซด์ที่เตรียมได้ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาอีกด้วย โดยทั่วไปขนาดของอนุภาคในตัวทำละลายใดๆ จะโตขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น อนึ่ง ณ เวลาใดๆ ขนาดของอนุภาคจะโตขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยาเช่นกัน เช่น กรณีของการเตรียมอนุภาค ZnO ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขนาดของอนุภาคเฉลี่ย

ที่ได้จะโตกว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ ZnO ที่เตรียมที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในเวลา 2 ชั่วโมงเท่าๆ กัน (Hu et al, 2003)

### บทสรุป

อนุภาคออกไซด์ของโลหะที่มีรูปร่างและขนาดที่ต่างกันสามารถเตรียมได้จากการบดหรือการบดด้วยพลังงานสูงซึ่งทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่

แตกออกเป็นอนุภาคเล็กๆ โดยขนาดที่ได้นั้นจะมีขนาดเล็กหรือโตขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของลูกบดต่อน้ำหนักสารที่ถูกบด ความเร็วรอบและเวลาที่ใช้ในการบด ส่วนการเตรียมอนุภาคออกไซด์ของโลหะด้วยวิธีการตกตะกอนนั้นจะให้รูปร่างที่หลากหลายกว่าอนุภาคที่ได้จากการบด โดยที่รูปร่างของอนุภาคและขนาดที่ได้จะเป็นอย่างไรนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของระบบ ขั้นตอนที่แตกต่างกัน และอุณหภูมิที่เลือกใช้เป็นสำคัญ

### เอกสารอ้างอิง

- Cao, G. (2003). Introduction. Nanostructures and nanomaterials(synthesis, properties and applications). London: Imperial College Press. 1-13.
- Cushing, B.L., Kolesnichenko, V.L. and O'Connor C.J. (2004). Recent advances in the liquid-phase syntheses of inorganic nanoparticles. Chemical Reviews. 104: 3893-3946.
- Damonte, L.C., Mendoza Zelis, L.A., Mari Soucase, B. and Hernandez Fenollosa, M.A. (2004). Nanoparticles of ZnO obtained by mechanical milling. Powder Technology. 148: 15-19.
- Hu, Z., Oskam, G., Lee Penn, R., Pesika, N. and Searson, P.C. (2003). The influence of anion on the coarsening kinetics of ZnO nanoparticles. Journal of Physical Chemistry B. 107: 3124-3130.
- Li, D. and Haneda H. (2003) Morphologies of zinc oxide particles and their effects on photocatalysis. Chemosphere. 51: 129-137.
- Lu, C.H. and Yeh, C.H. (1997). Emulsion precipitation of submicron zinc oxide powder. Materials Letter. 33: 129-132.
- McBride, R.A., Kelly, J.M. and McCormack, D.E. (2003) Growth of well-defined ZnO microparticles by hydroxide ion hydrolysis of zinc salts. Journal of Materials Chemistry. 13: 1196-11201.
- Pillai, S.C., Kelly J.M., McCormack, D.E. and Ramesh, R. (2004). Self-assembled arrays of ZnO nanoparticles and their application as varistor materials. 14: 1572-1578.
- Seelig, E.W., Tang, B., Yamilov, A., Cao, H. and Chang, R.P.H. (2003). Self-assembled 3D photonic crystals from ZnO colloidal spheres. Materials Chemistry and Physics. 80: 257-263.
- Suwanboon, S., Amornpitoksuk, P., Haidoux, A. and Tedenac, J.C. (2007). Structural and optical properties of undoped and aluminium doped zinc oxide nanoparticles via precipitation method at low temperature. Journal of Alloys and Compounds. (In Press).
- Suryanarayana,C. (2001). Mechanical alloying and milling. Progress in Materials Science. 46: 1-184.
- Tokumitsu, K. (1997). Reduction of metal oxides by mechanical alloying method. Solid State Ionics. 101-103: 25-31.



ผลต้านฤทธิ์ของชาเขียวต่อพิษจากยาพาราเซตามอล  
ในเนื้อเยื่อตับอวัยวะและคุณภาพน้ำเชื้อ  
Protective effect of green tea against paracetamol  
induced hepatotoxicity, testes and quality of seminal  
fluid impairment

อำพา เหลืองภิรมย์<sup>1\*</sup> และพันเพชร เมล่น้อย<sup>2</sup>

บทคัดย่อ

หนูเม้าส์ที่ได้รับยาพาราเซตามอลทางปากด้วยขนาด 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว เป็นเวลา 7 วันติดต่อกัน พบมีระดับเอนไซม์ SGPT (serum glutamic pyruvate transaminase) สูงถึง  $199.50 \pm 16.18$  IU/ ลิตร และสูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญที่  $P < 0.05$  สอดคล้องกับจุลพยาธิสภาพของตับซึ่งพบมีการทำลายเนื้อเยื่อตับอย่างรุนแรง มีบริเวณเซลล์ตาย และบริเวณเซลล์ตับมีช่องโหว่จำนวนมาก ส่วนจุลพยาธิสภาพของอวัยวะพบมีจำนวนชั้นของสเปิร์มาโตไซต์และชั้นสเปิร์มาติดในท่อเซมินิเฟอร์สลดลง อีกทั้งคุณภาพน้ำเชื้อที่ได้จากท่ออีพิดิไดมิสและท่อวาสดีเฟอเรนก็ลดลงด้วยอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อให้หนูเม้าส์ดื่มชาเขียวเข้มข้น 2.5 % แทนน้ำดื่มก่อนให้ยา 4 วัน และตลอดการทดลอง พบว่าระดับเอนไซม์ SGPT ลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่  $P < 0.05$  และเนื้อเยื่อตับที่ถูกทำลายลดลงด้วย นอกจากนี้จุลพยาธิสภาพและคุณภาพน้ำเชื้อก็ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สรุปได้ว่าการดื่มชาเขียวเข้มข้น 2.5% แทนน้ำดื่มก่อนและร่วมกับขณะได้รับยาสามารถลดพิษที่เกิดจากยาพาราเซตามอลต่อตับและอวัยวะได้

Abstract

Male mice were forced fed with paracetamol 500 mg/Kg BW/ day for 7 consecutive days. Enzyme SGPT (serum glutamic pyruvic transaminase) significantly increased up to  $199.50 \pm 16.18$  IU/ L and differed from control group at  $P < 0.05$ . Corresponding results were showed severe liver damage by increasing necrosis areas and vacuolation areas. Testicular impairment also was found by decreasing of spermatocyte layer and spermatid layer in seminiferous tubules, concord evidences showed low quality of seminal analysis. However, when mice drunk green tea 2.5% as drinking water 4 days before paracetamol

<sup>1</sup> ศูนย์วิจัยอนุกรมวิธานประยุกต์ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

<sup>2</sup> นักวิทยาศาสตร์ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

\* corresponding author, e-mail amplua@kku.ac.th

treatment and during paracetamol treatment, liver damage and testicular impairment were significantly improved. These results were concluded that green tea 2.5% may protect the liver and testis against paracetamol induced toxicity.

คำสำคัญ : ยาพาราเซตามอล ตับ อัณฑะ ชาเขียว การเกิดพิษ

Key words: paracetamol, liver, testes, green tea, toxicity

## บทนำ

ยาพาราเซตามอลเป็นสารใช้แก้ปวดลดไข้ ขนาดของยาที่เหมาะสมคือ 500-1000 กรัม/วัน และไม่ควรรับประทานติดต่อกันนานเกิน 5 วัน ถ้ารับประทานนานเกินหรือขนาดสูงเกิน จะเกิดพิษทำลายตับ การตรวจพบสารเคมีที่ผลิตจากตับ เช่น เอนไซม์ SGPT (serum glutamic pyruvate transaminase) และ bilirubin ปริมาณสูงในเลือดสามารถใช้บอกภาวะเนื้อเยื่อตับถูกทำลาย (Zilva and Pannel, 1984) สารและยารวมถึงเอทานอลเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกสลาย เพื่อขับออกจากร่างกายทางน้ำดีมากับกากอาหารหรือขับออกทางไตในรูปปัสสาวะ กระบวนการสลายสารในเซลล์ตับจะมีอนุมูลอิสระเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามกลไกตามปกติภายในเซลล์ตับจะมีสารกลูตาไทโอน (glutathione) ไปจับและขจัดสารอนุมูลอิสระ เป็นกลไกกำจัดสารอนุมูลอิสระ (anti - oxidant defence) กรณีที่ร่างกายได้รับสารหรือยามากจะมีอนุมูลอิสระมากกว่าที่ตับจะขจัดได้หมด สารอนุมูลอิสระที่เหลือนี้จะไปทำลายเยื่อหุ้มเซลล์และภายในเซลล์ตับ นอกจากนี้ยังไปทำลายเนื้อเยื่ออื่นๆ เช่น อัณฑะ Ratnasooriya and Jayakody (2000) รายงานว่าหนูที่ได้รับยาพาราเซตามอลทางปากในขนาด 500 และ 1000 มิลลิกรัม./ กิโลกรัม น้ำหนักตัว เป็นเวลา 30 วัน มีผลทำให้จำนวนสเปิร์มและการเคลื่อนที่ของสเปิร์มที่ได้จากท่ออู่ปัสสาวะลดลงถึง 60% ปัจจุบันมีการนำพืชสมุนไพรที่มีสารต้านอนุมูลอิสระ (anti-oxidant) สูงมาใช้ในการทำลายเนื้อเยื่อตับที่เกิดจากยาและสารพิษ เช่น สารสกัดจากตัวลิ้นแระด (ทิวส์คักกี) จรรยาเจริญ และ วีรพล คู่คงวิริยพันธุ์, 2540) และ สารสกัดจากลูกใต้ใบ (วันดี อุดมศักดิ์ และคณะ, 2543)

Kumar et al (2006) ได้ใช้สารสกัดจากรากของจิงจ้อเหล็ก (Opereculum turpethum L.) เป็นพืชกลุ่มผักนึ่ง ในการต้านพิษจากยาพาราเซตามอลที่เกิดกับเนื้อเยื่อตับ Liu et al (2006) ได้ใช้สารสกัดจากกลีบเลี้ยงของดอกกระเจียบแดง (Hibicus sabdariffa) ในการต้านพิษต่อเนื้อเยื่อตับของหนูแรทที่ได้รับสารคาร์บอนเตตราคลอไรด์ (CCl<sub>4</sub>) ส่วนชาเขียว (Camellia sinensis) มีสารโพลีฟีนอลสูง 30-40% ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระและสามารถลดระดับ oxidative stress ภายในเซลล์ได้เป็นอย่างดี (Woochang et al, 2005, Daniela et al, 2005, Quing et al, 2006) ในการศึกษาครั้งนี้จึงสนใจนำชาเขียวมาศึกษาการต้านฤทธิ์ความเป็นพิษของยาพาราเซตามอลที่เกิดในเนื้อเยื่อตับ เนื้อเยื่ออัณฑะและคุณภาพน้ำเชื้อของหนูเม้าส์

## อุปกรณ์และการทดลอง

### สัตว์ทดลอง

หนูเม้าส์ (*Mus musculus*) พันธุ์ Swiss albino เพศผู้ อายุ 8-9 สัปดาห์ จากหน่วยสัตว์ทดลอง คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น เลี้ยงและทดลองในเรือนสัตว์ทดลองของภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ ที่มีอุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส ช่วงสว่าง : ช่วงมืด = 14 : 10 ให้อาหารสำเร็จรูป และน้ำดื่มตลอดเวลา

### การเตรียมชาเขียว

นำชาเขียวชนิดผงบรรจุในซอง (Sencha green tea) ขนาด 12 และ 20 กรัม (2 กรัมต่อซอง) ชงด้วยน้ำเดือด 800 มิลลิลิตรนาน 5 นาที จะได้ชาเขียวเข้มข้น

1.5 และ 2.5 % (W/V) ตามลำดับ เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเพื่อให้หนูดื่มแทนน้ำดื่มระหว่างการทดลอง เก็บตัวอย่างให้ระดับการทำลายเนื้อเยื่อตับ (ตามวิธีของ วินดี อุดมอักษร, 2545)

พิจารณาบริเวณภาพเนื้อเยื่อตับภายใต้กล้องจุลทรรศน์ด้วยกำลังขยายเลนส์วัตถุ  $\times 10$  และเลนส์วัตถุ  $\times 10$

ระดับ 0 เนื้อเยื่อตับปกติ พบเซลล์และการเรียงตัวของเซลล์เป็นพวยอย่างมีระเบียบ

ระดับ 1 เซลล์ผิดปกติ มีนิวเคลียสขนาดใหญ่เล็กน้อย มีบริเวณการตายของเซลล์ (necrosis) และบริเวณมีการรวมกลุ่มของเม็ดเลือดขาว (lymphocytic infiltration) 1-2 บริเวณ

ระดับ 2 เซลล์ผิดปกติ มีนิวเคลียสจำนวนมาก (ขนาด 2 ใน 3 ของเซลล์) มีบริเวณการตายของเซลล์ และบริเวณมีการรวมกลุ่มของเม็ดเลือดขาว 5-6 บริเวณ

ระดับ 3 เนื้อเยื่อตับถูกทำลายมาก พบบริเวณมีการตายของเซลล์ บริเวณมีการรวมกลุ่มของเซลล์เม็ดเลือดขาว และพบมีช่องโหว่ภายในเซลล์ตับ (vacuolation area) บริเวณกลางพู 4-5 พู

## การทดลอง

### 1. การต้านฤทธิ์ของชาเขียวต่อพิษของยาพาราเซตามอลในเนื้อเยื่อตับ

หนูเม้าส์เพศผู้ จำนวน 30 ตัว แบ่งเป็น 5 กลุ่มๆ ละ 6 ตัว

กลุ่มที่ 1. กลุ่มควบคุมให้น้ำกลั่น 0.2 มิลลิลิตร / ตัว / วัน เป็นเวลา 11 วัน

กลุ่มที่ 2. ให้ชาเขียวเข้มข้น 2.5 % ดื่มแทนน้ำ เป็นเวลา 11 วัน

กลุ่มที่ 3. ให้ยาพาราเซตามอลขนาด 500 มิลลิกรัม / กิโลกรัม น้ำหนักตัว เป็นเวลา 7 วัน

กลุ่มที่ 4. ให้ชาเขียวเข้มข้น 1.5 % ดื่มแทนน้ำก่อน 4 วัน แล้วให้ยาพาราเซตามอลขนาด 500 มิลลิกรัม / กิโลกรัม น้ำหนักตัวพร้อมดื่มชาเขียวแทนน้ำ

ต่ออีก 7 วัน

กลุ่มที่ 5. ให้ชาเขียวเข้มข้น 2.5 % ดื่มแทนน้ำก่อน 4 วัน แล้วให้ยาพาราเซตามอลขนาด 500 มิลลิกรัม / กิโลกรัม น้ำหนักตัว พร้อมดื่มชาเขียวแทนน้ำต่ออีก 7 วัน

เมื่อครบกำหนด 11 วัน ทำการสลบสัตว์ทดลองทุกกลุ่มด้วยอีเธอร์ เก็บชิ้นเนื้อเพื่อตรวจหาระดับเอนไซม์ SGPT สุ่มตัดเนื้อเยื่อตับบางส่วนแช่ในสารละลาย Bouin's fluid เพื่อรักษาสภาพ จากนั้นนำไปทำสไลด์ถาวรด้วยวิธีพาราฟิน (paraffin method) ตัดเนื้อเยื่อหนา 5 ไมครอน ย้อมสีด้วยสีฮีมาทอกซาลิน และสีอีโอซิน (H&E) จากนั้นนำสไลด์มาตรวจสอบจุลพยาธิสภาพของเนื้อเยื่อในสไลด์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์

### 2. การต้านฤทธิ์ของชาเขียวต่อพิษของยาพาราเซตามอลในเนื้อเยื่ออวัยวะและการสร้างสเปิร์ม

จากการทดลองที่ 1 หลังสลบหนูด้วยอีเธอร์ตัดต่อ epididymis และท่อ vas deferens นำไปแช่ให้ได้ตัวสเปิร์มด้วยน้ำเกลือ (NaCl 0.9%) เพื่อตรวจสอบหาคุณภาพน้ำเชื้อตามวิธีของ เทวิน วงษ์พระลับ (2542) ส่วนอวัยวะตัดและแช่ใน Bouin's fluid เพื่อรักษาสภาพแล้วนำไปทำสไลด์ถาวรด้วยวิธีพาราฟิน ตรวจสอบจุลพยาธิสภาพของเนื้อเยื่ออวัยวะในสไลด์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์

### การวิเคราะห์ข้อมูล

ประเมินค่าเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของระดับเอนไซม์ SGPT จำนวนสเปิร์มทั้งหมด จำนวนสเปิร์มที่มีรูปร่างผิดปกติ จำนวนสเปิร์มที่เคลื่อนที่ปกติและจำนวนสเปิร์มที่มีชีวิตทั้งในกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยวิธี one-way analysis of variance (ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's multiple range test ของโปรแกรม SAS (มนต์ชัย ดวงจินดา, 2544) ส่วนลักษณะจุลพยาธิสภาพของเนื้อเยื่อตับและอวัยวะใช้

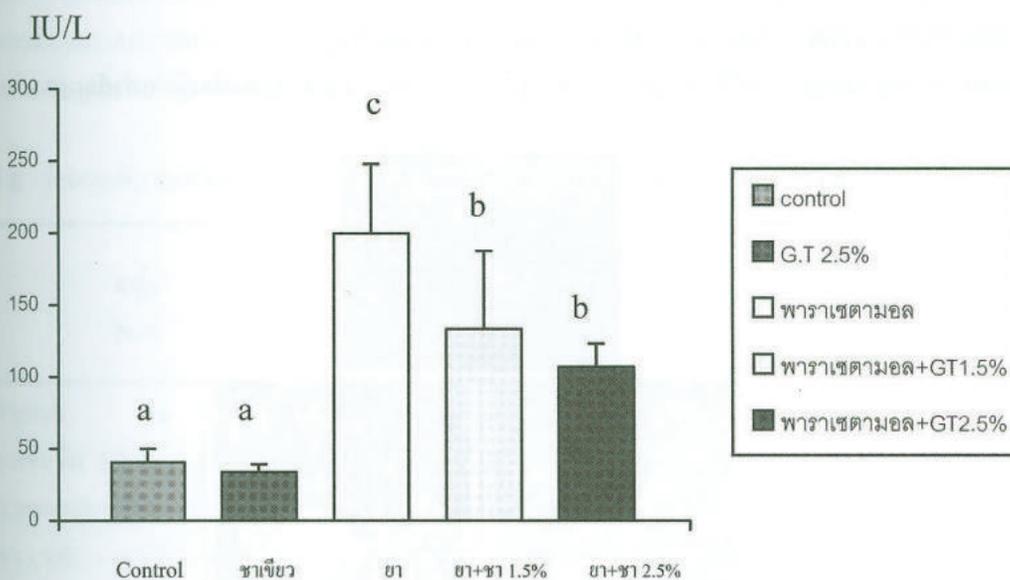
การบรรยายลักษณะที่ผิดปกติและประเมินค่าเป็นร้อยละของความผิดปกติในแต่ละกลุ่มการทดลองและเปรียบเทียบค่าโดยวิธี Duncan's multiple range test ของโปรแกรม SAS

### ผลการทดลอง

การต้านฤทธิ์ของชาเขียวต่อพิษของยาพาราเซตามอลในเนื้อเยื่อตับ

หนูเม้าส์กลุ่มที่ได้รับชาเขียวเข้มข้น 2.5 % มีระดับเอนไซม์ SGPT ( $33.67 \pm 5.60$  IU/ ลิตร) ไม่

แตกต่างจากกลุ่มควบคุม (SGPT =  $40.50 \pm 9.26$  IU/ ลิตร) ส่วนหนูกลุ่มที่ได้รับยาพาราเซตามอลขนาด 500 มิลลิกรัม / กิโลกรัม น้ำหนักตัว ร่วมกับชาเขียวเข้มข้น 1.5% และร่วมกับชาเขียวเข้มข้น 2.5% พบว่ามีระดับเอนไซม์ SGPT =  $133.00 \pm 54.29$  และ  $106.83 \pm 48.18$  IU/ ลิตร ตามลำดับ และแตกต่างจากกลุ่มที่ได้รับยาพาราเซตามอลขนาด 500 มิลลิกรัม / กิโลกรัม น้ำหนักตัวซึ่งมีเอนไซม์ SGPT =  $199.50 \pm 16.18$  IU/ ลิตร) อย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) รูปที่ 1



รูปที่ 1 ระดับเอนไซม์ SGPT ในซีรัมของหนูเม้าส์ที่ได้รับยาพาราเซตามอลและชาเขียว (G.T.) อักษรที่ต่างกันระหว่างคอลัมน์มีระดับเอนไซม์ระหว่างกลุ่มต่างกันทางสถิติที่  $P < 0.05$

ผลการตรวจจุลพยาธิสภาพของเนื้อเยื่อตับพบว่ากลุ่มที่ได้รับยาพาราเซตามอลขนาด 500 มิลลิกรัม / กิโลกรัม น้ำหนักตัว มีความรุนแรงของการทำลายเนื้อเยื่อตับที่ระดับ 2-3 และพบร้อยละ 100 ขณะที่หนูกลุ่มที่ได้รับยาพาราเซตามอลร่วมกับน้ำชาเขียวเข้มข้น 2.5% มีการทำลายเนื้อเยื่อตับลดลงโดยมีระดับความรุนแรงที่ 1-3 และมีการพบร้อยละ 100 ส่วนกลุ่มที่ได้รับยาพาราเซตามอลขนาด 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม น้ำหนักตัวร่วมกับชาเขียวเข้มข้น 1.5% พบมีการทำลายเนื้อเยื่อ

ตับที่ระดับความรุนแรงที่ 2-3 และพบร้อยละ 100 ซึ่งมีระดับการทำลายของเนื้อเยื่อตับไม่แตกต่างจากหนูกลุ่มที่ได้รับยาพาราเซตามอลอย่างเดียว ลักษณะที่ผิดปกติในเนื้อเยื่อตับพบบริเวณมีเซลล์ตาย (necrosis area) และบริเวณเซลล์ตับมีช่องโหว่ (vacuolation area) โดยหนูกลุ่มที่ได้รับยาพาราเซตามอลร่วมกับชาเขียวเข้มข้น 2.5% พบจำนวนบริเวณของเซลล์ตายและบริเวณเซลล์ตับมีช่องโหว่ลดลงแต่ไม่แตกต่างจากกลุ่มที่ได้รับยาพาราเซตามอลอย่างเดียว (ตารางที่ 1 และรูปที่ 2)

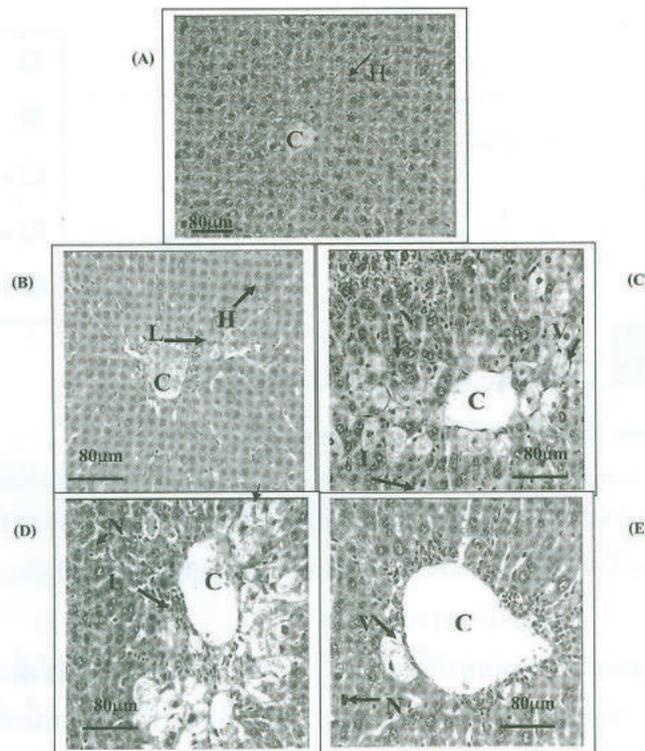
ตารางที่ 1 ระดับความรุนแรงในการทำลายเนื้อเยื่อตับ จำนวนบริเวณที่พบเซลล์ตับตาย และบริเวณเซลล์ตับมีช่องโหว่ของหนูเม้าส์กลุ่มที่ได้รับยาพาราเซตามอลและชาเขียว

กลุ่มทดลอง N=6	ระดับความรุนแรง (ร้อยละที่พบ)	Necrosis area ( $\bar{X} \pm SD$ )	Vacuolation area ( $\bar{X} \pm SD$ )
กลุ่มควบคุม	0-1 (16.67)	$0.33 \pm 0.81^a$	$0.00 \pm 0.00^a$
ชาเขียว 2.5 %	0 (100)	$0.00 \pm 0.00^a$	$0.00 \pm 0.00^a$
ยาพาราเซตามอล	2-3 (100)	$16.00 \pm 12.01^b$	$9.83 \pm 8.49^b$
ยาพาราเซตามอล + ชาเขียว .5%	2-3 (100)	$16.67 \pm 9.83^b$	$11.00 \pm 9.97^b$
ยาพาราเซตามอล + ชาเขียว 2.5%	1-3 (100)	$11.00 \pm 3.76^b$	$7.00 \pm 5.65^b$

N = จำนวนสัตว์ในแต่ละกลุ่ม

ตัวอักษรในคอลัมน์เดียวกันที่เหมือนกัน ได้ผลไม่มีความแตกต่างกัน

ตัวอักษรในคอลัมน์เดียวกันที่ไม่เหมือนกัน ได้ผลมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ )



รูปที่ 2 เนื้อเยื่อตับตัดตามขวางของหนูกลุ่มที่ได้รับยาพาราเซตามอลและชาเขียว (H & E, x 40) A. กลุ่มควบคุม พบเซลล์ตับ (hepatocyte, H) ปกติ; B. กลุ่มได้รับชาเขียวเข้มข้น 2.5% พบ lymphocytic infiltration (L) เล็กน้อย; C. กลุ่มได้รับพาราเซตามอลขนาด 500 mg/kg.bw พบ necrosis area (N) และ vacuolation area (V) จำนวนมากรอบๆ central vein; D. กลุ่มได้รับพาราเซตามอล 500 mg/kg.bw + ชาเขียวเข้มข้น 1.5% พบ lymphocytic infiltration (L), necrosis area (N) และ vacuolation area (V) จำนวนมากรอบๆ central vein; E. กลุ่มได้รับพาราเซตามอล 500 mg/kg.bw + ชาเขียวเข้มข้น 2.5% พบ lymphocytic infiltration (L) และ vacuolation area (V) เล็กน้อย

### การต้านฤทธิ์ของชาเขียวต่อพิษของยาพาราเซตามอลในเนื้อเยื่ออัณฑะและการสร้างสเปิร์ม

ผลการตรวจสอบจุลพยาธิสภาพของเนื้อเยื่ออัณฑะ พบว่า หนูกลุ่มที่ได้รับชาเขียวเข้มข้น 2.5% กลุ่มที่ได้รับยาพาราเซตามอลขนาด 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม น้ำหนักตัวร่วมกับชาเขียวเข้มข้น 1.5% และ 2.5% มีจำนวนชั้นของ spermatocytes =  $2.16 \pm 0.29$ ,  $2.06 \pm 0.19$  และ  $2.11 \pm 0.17$  ชั้นตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุมที่มีจำนวนชั้น spermatocytes =  $2.15 \pm 0.26$  ชั้น ยกเว้นหนูกลุ่มที่ได้รับยาพาราเซตามอล 500 มิลลิกรัม / กิโลกรัม น้ำหนักตัว มีจำนวนชั้น spermatocytes ลดลงอย่างมาก =  $1.70 \pm 0.27$  ชั้น และแตกต่างจากกลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ )

ส่วนจำนวนชั้น spermatids พบว่า หนูกลุ่มที่ได้รับชาเขียวเข้มข้น 2.5% มีจำนวนชั้น spermatids =  $3.63 \pm 0.32$  ชั้นซึ่งไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุมที่มีจำนวนชั้น spermatids =  $3.75 \pm 0.52$  ชั้น ส่วนหนูกลุ่มที่ได้รับยาพาราเซตามอลขนาด 500 มิลลิกรัม / กิโลกรัม น้ำหนักตัวร่วมกับชาเขียวเข้มข้น 2.5% มีจำนวนชั้น spermatids เพิ่มขึ้นเป็น  $2.76 \pm 0.58$  ชั้นซึ่งมากกว่าของหนูกลุ่มที่ได้รับยาพาราเซตามอล 500 มิลลิกรัม / กิโลกรัม น้ำหนักตัวอย่างเดียว และกลุ่มที่ได้รับยาพาราเซตามอลขนาด 500 มิลลิกรัม / กิโลกรัม น้ำหนักตัว ร่วมกับชาเขียวเข้มข้น 1.5% ที่มีจำนวนชั้น spermatids =  $1.63 \pm 0.32$  และ  $1.83 \pm 0.40$  ชั้นตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) ตารางที่ 2 และรูปที่ 3

ตารางที่ 2 จำนวนชั้นของเซลล์ต่างๆ ในท่อเซมินิเฟอรัสของหนูเม้าส์ที่ได้รับยาพาราเซตามอลและชาเขียว

กลุ่ม N=6	จำนวนชั้น Spermatocytes (X ± SE)	จำนวนชั้น Spermatids (X ± SE)
กลุ่มควบคุม	$2.15 \pm 0.26^b$	$3.75 \pm 0.52^c$
ชาเขียวเข้มข้น 2.5 %	$2.16 \pm 0.29^b$	$3.63 \pm 0.32^c$
ยาพาราเซตามอล 500 มก./ กก.น.น.ตัว	$1.70 \pm 0.27^a$	$1.63 \pm 0.32^a$
ยาพารา (500) + ชาเขียว 1.5 %	$2.06 \pm 0.19^b$	$1.83 \pm 0.40^a$
ยาพารา (500) + ชาเขียว 2.5 %	$2.11 \pm 0.17^b$	$2.76 \pm 0.58^b$

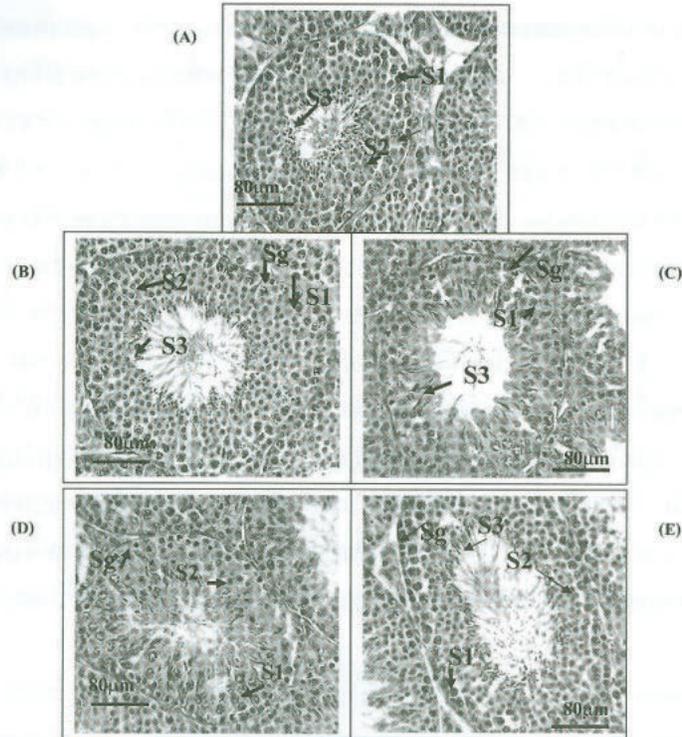
N = จำนวนสัตว์ในแต่ละกลุ่ม

ตัวอักษรในคอลัมน์เดียวกันที่เหมือนกัน ได้ผลไม่มีความแตกต่างกัน

ตัวอักษรในคอลัมน์เดียวกันที่ไม่เหมือนกัน ได้ผลมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ )

ผลการตรวจคุณภาพสเปิร์มที่ได้จากท่อ epididymis และท่อ vas deferens พบว่าหนูกลุ่มควบคุมและกลุ่มที่ได้รับชาเขียวเข้มข้น 2.5% มีจำนวนสเปิร์มทั้งหมดและจำนวนสเปิร์มที่เคลื่อนที่ปกติไม่แตกต่างกัน แต่กลุ่มที่ได้รับยาพาราเซตามอลขนาด 500 มิลลิกรัม / กิโลกรัม น้ำหนักตัวอย่างเดียวยังมีจำนวนสเปิร์มทั้งหมด

และจำนวนสเปิร์มที่เคลื่อนที่ปกติต่างจากกลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) ส่วนกลุ่มที่ได้รับชาเขียวเข้มข้น 1.5 % และ 2.5 % ร่วมกับยาพาราเซตามอล พบว่าจำนวนสเปิร์มทั้งหมดและจำนวนสเปิร์มที่เคลื่อนที่ปกติเพิ่มขึ้นกว่ากลุ่มที่ได้รับยาอย่างเดียวยังมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) ดังตารางที่ 3



**รูปที่ 3** อิมมูโนฮิสโตเคมีของท่อน้ำเชื้อที่ได้รับยาฟาราเซตามอลและชาเจียว (H & E, x40) แสดง spermatogonia (Sg), spermatocytes (S1), spermatids (S2), และ spermatozoas (S3) A. กลุ่มควบคุมมีชั้นต่างๆ ครบ; B. ชาเจียว 2.5% มีชั้นต่างๆ ครบ; C. ยาฟาราเซตามอล 500 mg/kg.bw ไม่พบชั้น spermatids และมีจำนวน spermatozoas น้อย; D. ยาฟาราเซตามอล 500 mg/kg.bw และชาเจียว 1.5% ไม่พบชั้น spermatids และมีจำนวน spermatozoas น้อย; E. ยาฟาราเซตามอล 500 mg/kg.bw + ชาเจียว 2.5% มีชั้นต่างๆ ครบ

**ตารางที่ 3** จำนวนสเปิร์มทั้งหมด จำนวนสเปิร์มที่เคลื่อนที่ปกติ จำนวนสเปิร์มที่มีชีวิตและจำนวนสเปิร์มที่มีรูปร่างผิดปกติของท่อน้ำเชื้อที่ได้รับยาฟาราเซตามอลและชาเจียว

กลุ่มทดลอง N=6	จำนวนสเปิร์ม (X±SD, x10 <sup>6</sup> ตัว/ม.ล)	สเปิร์มที่เคลื่อนที่ (X±SD, %)	สเปิร์มที่มีชีวิต (X±SD, %)	สเปิร์มที่มีรูปร่าง ผิดปกติ (X±SD, %)
กลุ่มควบคุม	34.45 ± 4.31 <sup>d</sup> (100)	62.67 ± 4.63 <sup>c</sup> (100)	68.58 ± 2.05 <sup>c</sup> (100)	22.00 ± 4.09 <sup>a</sup> (100)
ชาเจียว 2.5 %	31.66 ± 5.17 <sup>d</sup> (91.90)	61.16 ± 4.99 <sup>c</sup> (97.59)	62.16 ± 5.34 <sup>b</sup> (90.64)	26.16 ± 3.88 <sup>ab</sup> (118.91)
ยาฟาราเซตามอล	21.41 ± 3.47 <sup>a</sup> (62.15)	48.16 ± 7.08 <sup>a</sup> (76.85)	48.00 ± 6.75 <sup>a</sup> (69.99)	34.58 ± 4.80 <sup>cd</sup> (157.18)
ยาฟาราเซตามอล + ชาเจียว 1.5%	24.16 ± 3.12 <sup>b</sup> (70.13)	52.33 ± 4.08 <sup>b</sup> (83.50)	47.58 ± 4.28 <sup>a</sup> (69.38)	36.41 ± 3.58 <sup>d</sup> (165.50)
ยาฟาราเซตามอล + ชาเจียว 2.5%	26.16 ± 1.95 <sup>c</sup> (75.94)	54.50 ± 4.76 <sup>b</sup> (86.96)	51.66 ± 6.11 <sup>a</sup> (75.33)	30.83 ± 3.66 <sup>bc</sup> (140.14)

N = จำนวนหนูในแต่ละกลุ่มการทดลอง 6 ตัว

ตัวอักษรในคอลัมน์เดียวกันที่เหมือนกัน ได้ผล ไม่มีความแตกต่างกัน

ตัวอักษรในคอลัมน์เดียวกันที่ไม่เหมือนกัน ได้ผลมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ P < 0.05

( ) = ค่าร้อยละเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม

## สรุปและอภิปรายผล

หนูกลุ่มที่ได้รับยาพาราเซตามอล 500 มิลลิกรัม / กิโลกรัม น้ำหนักตัวเป็นเวลา 7 วัน พบมีระดับเอนไซม์ SGPT ในซีรัมสูงแสดงว่าตับมีการถูกทำลาย สอดคล้องกับผลการตรวจสอบจุลพยาธิสภาพของเนื้อเยื่อตับ พบมีเนื้อเยื่อตับถูกทำลายในระดับความรุนแรงที่ 2-3 มีอัตราการพบรอยละ 100 พบจำนวนบริเวณเซลล์ตาย (necrosis area) และบริเวณเซลล์ตับมีช่องโหว่ (vacuolation area) เพิ่มขึ้น และต่างจากกลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนกลุ่มที่ได้รับน้ำชาเขียวเข้มข้น 2.5% ร่วมกับยาพาราเซตามอล พบว่าระดับเอนไซม์ SGPT ในซีรัมลดลง เนื้อเยื่อตับถูกทำลายลดลงและมีระดับความรุนแรงที่ 1-3 จำนวนบริเวณเซลล์ตับตาย และจำนวนบริเวณเซลล์ตับมีช่องโหว่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ได้รับยาอย่างเดียว แสดงว่าน้ำชาเขียวที่เข้มข้น 2.5% ถ้าหนูได้ดื่มแทนน้ำสามารถต้านพิษของยาพาราเซตามอลขนาด 500 มิลลิกรัม/ กิโลกรัม น้ำหนักตัวที่จะไปทำลายเนื้อเยื่อตับได้ สอดคล้องกับรายงานของ Scott (2005) ที่กล่าวว่าคนไข้ที่มีระดับเอนไซม์ SGPT และ SGOT สูง หลังให้ดื่มชาเขียวขนาด 1.5 กรัมเป็นเวลา 14 วัน สามารถลดระดับเอนไซม์ให้เป็นปกติได้ Schmidt et al. (2004) รายงานว่าสารสกัดจากชาเขียวขนาด 500 - 1000 ไมโครกรัม/ มิลลิลิตร สามารถลดการตายของเซลล์ตับที่ถูกชักนำให้เกิดการอักเสบ และเลี้ยงในสูตรอาหาร Resazuin (Alamar Blue) assay นอกจากนี้ Mhamadin et al. (2004) รายงานว่าหนูแรทที่มีไตอักเสบเนื่องจากได้รับสาร cyclosporine A (CsA) 20 มิลลิกรัมเป็นเวลา 25 วัน มีระดับสาร glutathione (GSH) และระดับเอนไซม์ glutathione-S-transferase (GST) ในซีรัมลดลง แต่เมื่อให้ดื่มชาเขียวเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 1.5% พบว่าระดับสาร glutathione และระดับเอนไซม์ glutathione-S-transferase (GST) ในซีรัมเพิ่มขึ้น แสดงว่าการอักเสบของเนื้อเยื่อตับลดลงอย่างไรก็ตามสถาบันเทคโนโลยีชีวภาพของประเทศไทย (2548) รายงานว่า การออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของชาเขียวเกิดหลังดื่ม 30-50 นาทีและอยู่นาน 80 นาที

ส่วนผลด้านฤทธิ์ของชาเขียวต่อพิษของยาพาราเซตามอลที่เกิดกับเนื้อเยื่ออวัยวะและต่อการสร้างสเปิร์ม พบว่าหนูกลุ่มที่ดื่มชาเขียวเข้มข้น 2.5% แทนน้ำดื่มก่อนและตลอดการทดลองที่ให้น้ำยาพาราเซตามอลขนาด 500 มิลลิกรัม/ กิโลกรัม น้ำหนักตัวเป็นเวลา 7 วัน มีจำนวนชั้นสเปิร์มมาโตไซด์ในท่อเซมินิเฟอรัสสูงกว่ากลุ่มที่ได้รับยาอย่างเดียวและมีค่าใกล้เคียงกับกลุ่มควบคุม ส่วนชั้นสเปิร์มมาติคก็เพิ่มขึ้น แต่ยังคงต่ำกว่ากลุ่มควบคุม และสูงกว่ากลุ่มที่ได้รับยาพาราเซตามอลอย่างเดียว แสดงว่าการดื่มน้ำชาเขียวสามารถลดการทำลายเซลล์ผลิตสเปิร์มในท่อเซมินิเฟอรัสที่เกิดจากพิษของยาพาราเซตามอลได้ ผลทางจุลพยาธิสภาพในท่อเซมินิเฟอรัสนี้สอดคล้องกับผลการตรวจคุณภาพสเปิร์มที่ได้จากท่ออิปิโดไมสและท่อวาสดีเฟอเรน โดยกลุ่มที่ได้รับชาเขียวเข้มข้น 2.5 % ก่อนและร่วมกับได้รับยาพาราเซตามอลมีจำนวนสเปิร์มทั้งหมดและจำนวนสเปิร์มที่เคลื่อนที่ปกติเพิ่มขึ้นกว่ากลุ่มที่ได้รับยาพาราเซตามอลอย่างเดียว แต่ไม่มีผลต่อจำนวนสเปิร์มที่มีชีวิตและจำนวนสเปิร์มที่มีรูปร่างผิดปกติ ชาเขียวมีสารโพลีฟีนอล ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (anti-oxidant) สูงถึง 30-40 % (Woochang et al., 2005; Daniela et al., 2005; Quing et al., 2006) จึงสามารถลดจำนวนอนุมูลอิสระที่เกิดจากยาพาราเซตามอลและลดการทำลายต่อเนื้อเยื่อของอวัยวะ ทำให้กระบวนการสร้างสเปิร์มถูกรบกวนลดลงด้วย

การศึกษาครั้งนี้สรุปได้ว่าน้ำชาเขียวเข้มข้น 2.5 % ถ้าดื่มแทนน้ำก่อนได้รับยาพาราเซตามอลอย่างน้อย 4 วัน และดื่มในช่วงที่ได้รับยาพาราเซตามอลด้วย สามารถต้านหรือลดพิษของยาที่เกิดต่อเนื้อเยื่อตับเนื้อเยื่ออวัยวะและต่อคุณภาพน้ำเชื้อได้

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์วิจัยอนุกรมวิธานประยุกต์ และภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

### เอกสารอ้างอิง

- ทวีศักดิ์ จรรยาเจริญ และ วีรพล กุ่มงวริยพันธุ์. (2540).ฤทธิ์ป้องกันอันตรายของสารสกัดต้นลิ้นแรดต่อเซลล์ตับที่ถูกชักนำให้บาดเจ็บด้วยพาราเซตามอล. ศรีนครินทร์เวชสาร. 12 (ฉบับพิเศษ): 650.
- เทวินทร์ วงษ์พระลับ. (2542). การสืบพันธุ์ในสัตว์. พิมพ์ครั้งที่1. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.
- วันดี อุดมอักษร, สถาพร พุฒิพรหลาย, มาลินี วงศ์นาวา, อนุพงศ์ นิตเรืองจำรัส, นุชรัตน์ วรรณพงศ์ และ นิรชา ยันเยี่ยม. (2543). ฤทธิ์ลูกใต้ใบต่อพิษของยาพาราเซตามอลในตับหนูขาว. กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. 44 (2): 119-132.
- Daniela, E., Patrizia, R., Alessandra, B., Paola, F., Pier, L.B. and Giulio, T. (2005). Effectiveness of moderate green tea consumption on anti-oxidative status and plasma lipid profile in humans. *Nutritional Biochemistry*. 16: 144-149.
- Liu, J.H. Chen, C.C., Wang, W.H., Hsu, J.D., Yang, J.D., Yang, C.J. (2006). The protective effects of *Hibiscus sabdariffa* extract on CCl<sub>4</sub> - induced liver fibrosis in rats. *Food and Chemical Toxicology*. 44: 336-343.
- Mohamadin, A.M., El-Beshbishy, H.A. and El-Mahdy, M.A. (2004). Green tea extract attenuates cyclosporine A induced oxidative stress in rats. *Pharmacological research*. 51 : 51-57.
- Qing, Y.W., Bo, Z., Yu, J.C., Yang, L. and Zhong, L.L. (2006). Synergistic effect of green tea polyphenols with trolox on free radical-induced oxidative DNA damage. *Food Chemistry*. 96(1): 90-95.
- Ratnasooriya, W.D. and Jayakody, J.R.S.C. (2000). Long - term administration of large doses of paracetamol impairs the reproductive competence of male rats. *Asian Journal Andrology*. 2: 247-255.
- Schmidt, M., Schmitz, H.J., Baumgart, A., Guedon, D., Netsch, M.I., Kreuter, M.H., Schmidlin, C.B. and Schrenk, D. (2004). Toxicity of green tea extracts and their constituents in rat hepatocytes in primary culture. *Food and Chemical Toxicology*. 43: 307-314.
- Suresh Kumar, S.V., Sujatha, C., Syamala, J., Nagasudha, B. and Mishra, S.H. (2006). Protective effect of root extract of *Operculina turpethum* Linn. against paracetamol induced hepatotoxicity in rats. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*. 68:32-38.
- Woochang, L., Won-Ki, M., Sail, C., Yong-Wha, L., Hyosoon, P., Do, H.L., You, K:L. and Ji, E.S. (2005). Long-term effects of green tea ingestion on atherosclerotic biological markers in smokers. *Clinical Biochemistry*. 38 : 84-87.
- Zilva, F.J. and Pannel, P.R. (1984). *Clinical chemistry in diagnosis and treatment*. 4<sup>th</sup> edition. Lley-Luke London. pp 318-319.



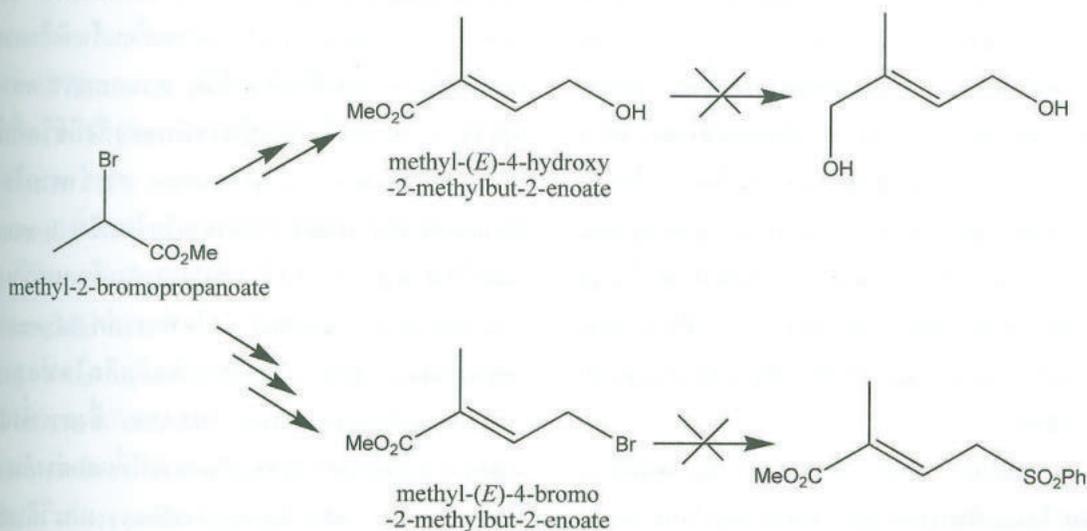
# แนวทางการสังเคราะห์โมเลกุลต้นแบบสำหรับยับยั้ง เอนไซม์ IspH

## Synthesis Strategy of Molecular Templates for IspH Enzyme Inhibitors

ชาญศักดิ์ ไชยสิทธิ์<sup>1</sup> สุรศักดิ์ แก่นเกษ  
วนิดา ศรีประสิทธิ์ อภิรัตน์ ทายิดา และ ชนกพร เผ่าศิริ<sup>1\*</sup>

### บทคัดย่อ

สารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารยับยั้งเอนไซม์ IspH คือ Methyl-(E)-4-hydroxy-2-methylbut-2-enoate และ Methyl-(E)-4-bromo-2-methylbut-2-enoate สามารถเตรียมได้จาก methyl-2-bromopropanoate โดยคิดเป็น 29% และ 18% ตามลำดับ ถึงแม้ว่าการทดลองเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันของสารทั้งสองเพื่อนำไปใช้ทดสอบการออกฤทธิ์ในการยับยั้งเอนไซม์ IspH ยังไม่ให้ผลที่น่าพอใจ ขั้นตอนการสังเคราะห์ดังกล่าวจึงอาจเป็นวิธีที่ง่ายและให้ผลได้ที่สูง



<sup>1</sup> ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

\* corresponding author, e-mail: chapha@kku.ac.th

### Abstract

Syntheses of molecular templates for synthesizing IspH enzyme inhibitors including **Methyl-(E)-4-hydroxy-2-methylbut-2-enoate** and **Methyl-(E)-4-bromo-2-methylbut-2-enoate** can be successfully conducted. Starting from methyl-2-bromopropanoate, both compounds were obtained in 29% and 18% overall yields, respectively. Although functional group transformations of these compounds showed unsatisfactory results, these procedures have been proved to be convenient and provided good yields.

**คำสำคัญ:** สารยับยั้งเอนไซม์ ไอโซพรีนอยด์ วิถีเมวาโลเนต ยาต้านมาลาเรีย

**Key words:** Enzyme Inhibitors, Isoprenoid, Non-mevalonate Pathway, Antimalarial Drugs

### บทนำ

มาลาเรียเป็นโรคที่พบได้ในเขตร้อนชื้นที่เกิดขึ้นจากเชื้อ *Plasmodium falciparum* ซึ่งมียุงก้นปล่องสกุล *Anopheles* เป็นพาหะ (Razakandrainibe, et al. 2005) องค์การอนามัยโลกได้ประมาณการว่ามีประชากรโลกประมาณ 300-500 ล้านคนติดเชื้อมาแล้วในแต่ละปี และมีผู้เสียชีวิตจากโรคนี้ประมาณ 2.7 ล้านคน (Rogers, et al. 2000) จากปัญหาสุขภาพดังกล่าวทำให้มีการรักษาโรคมมาลาเรียและการพัฒนาตัวยารวมทั้งการรักษาอย่างต่อเนื่อง ยาที่มีประสิทธิภาพที่เคยใช้ในการรักษา คือ คลอโรควิน (chloroquin) ซึ่งปัจจุบันนี้พบว่าเชื้อมาลาเรียเกิดการดื้อยา นอกจากนี้ยังพบว่า มีการใช้ยาซัลฟาดอกซิน (sulfadoxine) และไพริมิทามีน (pyrimethamine) ในการรักษาแต่ก็พบการดื้อยาเช่นเดียวกัน (Olliaro, et al. 2001) การรักษาได้พัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยใช้การรักษาแบบผสมผสาน โดยการใช้ยาที่ออกฤทธิ์ในแบบต่างๆ กัน เช่น การรักษาที่ใช้ยาอื่นร่วมกับอาร์ทิมิซินิน (artemisinin) ซึ่งพบว่าใช้ได้ผลในบางพื้นที่ซึ่งมีการดื้อยาชนิดไม่รุนแรงและมีรายงานว่าใช้ไม่ได้ผลในประเทศแถบทวีปแอฟริกา (Greenwood, et al. 2005)

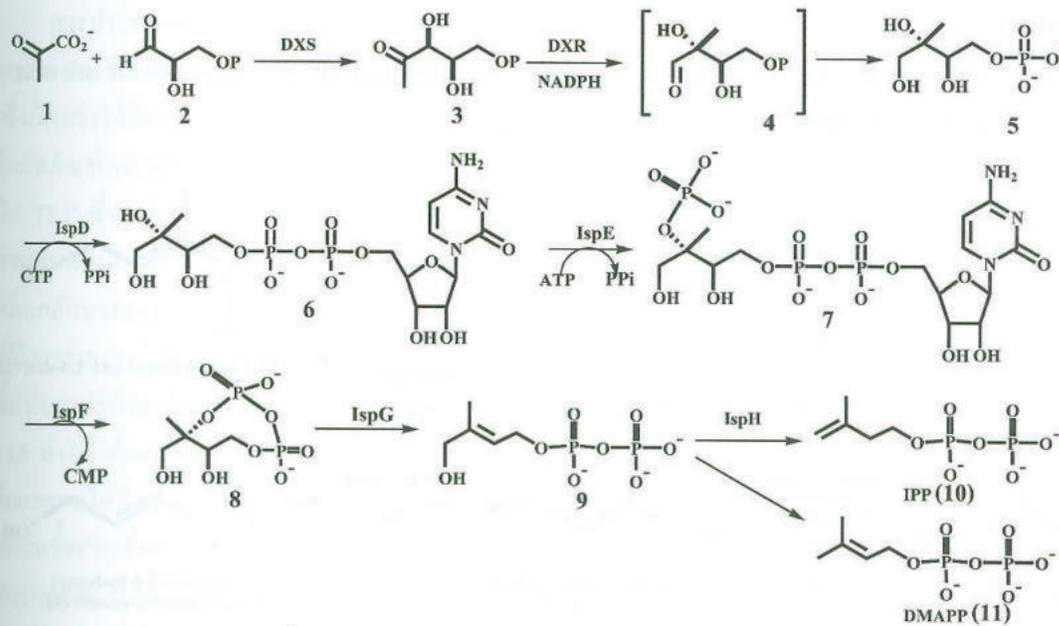
จากปัญหาและความสำคัญดังกล่าวจึงต้องการค้นคว้าและพัฒนาแนวทางในการรักษาโรคมมาลาเรีย ซึ่งยังหมายรวมถึงการพัฒนาโมเลกุลใหม่ที่คาดว่าจะใช้เป็นตัวยานำมาทดแทนยาที่ใช้ในปัจจุบัน เพื่อชะลอการดื้อยาของเชื้อมาลาเรีย รวมทั้งเพื่อให้การรักษา

มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยมีหลักการที่สำคัญอย่างหนึ่งในการพัฒนาตัวยาคือ ต้องหายาที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งเอนไซม์ที่ใช้ในการสร้างสารที่จำเป็นสำหรับวงจรชีวิตของจุลินทรีย์ โดยที่เอนไซม์ชนิดนั้นไม่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์

วิถีชีวสังเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตสารที่จำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิตที่น่าสนใจคือวิถีชีวสังเคราะห์ของสารจำพวกไอโซพรีนอยด์ (Isoprenoid) ซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์ธรรมชาติที่มีอยู่ในสิ่งมีชีวิตทุกชนิด ตัวอย่างของสารในกลุ่มไอโซพรีนอยด์ที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต ได้แก่ ยูบิควิโนน (Ubiquinone) และคลอเลสเตอรอล (Cholesterol) โดยที่ ยูบิควิโนนเกี่ยวข้องกับกระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน และปฏิกิริยารีดอกซ์ในสิ่งมีชีวิต ส่วนคลอเลสเตอรอลเกี่ยวข้องกับการสร้างเยื่อหุ้มไขมันของสิ่งมีชีวิตที่เป็นยูคาริโอต (Rohmer, et al. 1999) สารจำพวกไอโซพรีนอยด์มีวิถีชีวสังเคราะห์มาจากไอโซพรีน (Isoprene) ซึ่งเป็นสารที่มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม ได้แก่ ไอโซเพนทีนิล ไดฟอสเฟต (Isopentenyl diphosphate, IPP) และ ไดเมทิลอัลลิล ไดฟอสเฟต (Dimethylallyl diphosphate, DMAPP) ซึ่งสารทั้งสองสังเคราะห์ขึ้นโดยสองวิถีชีวสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน คือ วิถีเมวาโลเนต (Mevalonate Pathway) และวิถีเมวาโลเนต (Non-mevalonate Pathway) หรือชื่อที่ได้รับความนิยมในขณะนี้คือวิถีเมทิลอิทริทอลฟอสเฟต (Methylerythritol Phosphate Pathway, MEP Pathway)

สำหรับวิถีเมวาโลเนทพบได้ในสัตว์และยีสต์ในช่วงแรกๆที่มีการค้นพบวิถีชีวสังเคราะห์ดังกล่าว (Harwood, et al. 2000) และมีการยอมรับกันอย่างแพร่หลายในขณะนั้นว่าเป็นเพียงวิถีเดียวที่ใช้ในการสังเคราะห์สารประเภทไอโซพรีนอยด์ในสิ่งมีชีวิตทุกประเภท จากนั้นในเวลาถัดมาได้มีการค้นพบวิถีชีวสังเคราะห์ของไอโซพรีนอยด์แบบใหม่ เรียกว่า วิถีนอน-เมวาโลเนท หรือ

วิถี MEP (รูปที่ 1) โดย ดร. โรเมอร์ และ ดร.โอริโกนิ ซึ่งทำการทดลองในระบบที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงในปี ค.ศ. 1993 (Kuzuyama, et al., 2002) และไม่พบการใช้วิถีนอน-เมวาโลเนทในสัตว์ชั้นสูง สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมรวมทั้งมนุษย์ แต่พบวิถีชีวสังเคราะห์ดังกล่าวในพืชชั้นสูง สาหร่าย รวมทั้งปรสิตที่ก่อให้เกิดโรคมาลาเรีย คือ *P. falciparum* (Rohdich et al., 2004)

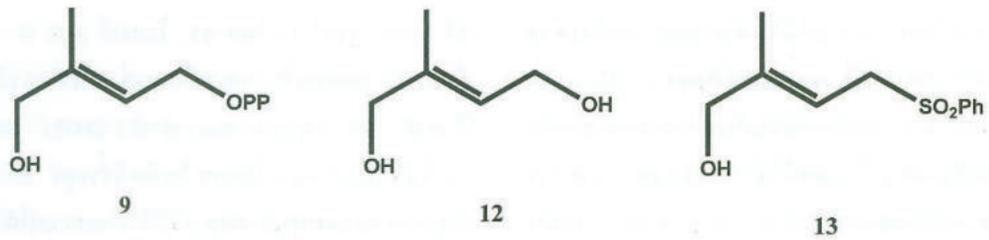


รูปที่ 1 แสดงวิถีชีวสังเคราะห์แบบนอน-เมวาโลเนท

วิถีนอน-เมวาโลเนทจึงเป็นเป้าหมายใหม่ในการพัฒนาที่ใช้ในการยับยั้งจุลชีพที่ใช้เฉพาะวิถีนอน-เมวาโลเนท เช่น สามารถพัฒนาสารกำจัดวัชพืช ยาฆ่าแมลง รวมทั้งยาต้านมาลาเรียได้อีกด้วย งานวิจัยชิ้นนี้จึงมุ่งให้ความสำคัญในการออกแบบและสังเคราะห์สารยับยั้งเอนไซม์ IspH ซึ่งใช้ 1-hydroxy-2-methyl-2-(E)-butenyl-4-diphosphate (HMBPP, 9) เป็นซับสเตรท ทั้งนี้โมเลกุลที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันของ HMBPP (9) มีแนวโน้มที่จะถูกนำเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์ได้ง่าย เนื่องจากเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กจึงมีความเหมาะสมในการพัฒนาไปเป็นยาได้

ในขั้นแรกของการออกแบบสารยับยั้งเอนไซม์ IspH จะเน้นที่การสังเคราะห์โมเลกุลที่มีขั้วน้อยเพื่อความ

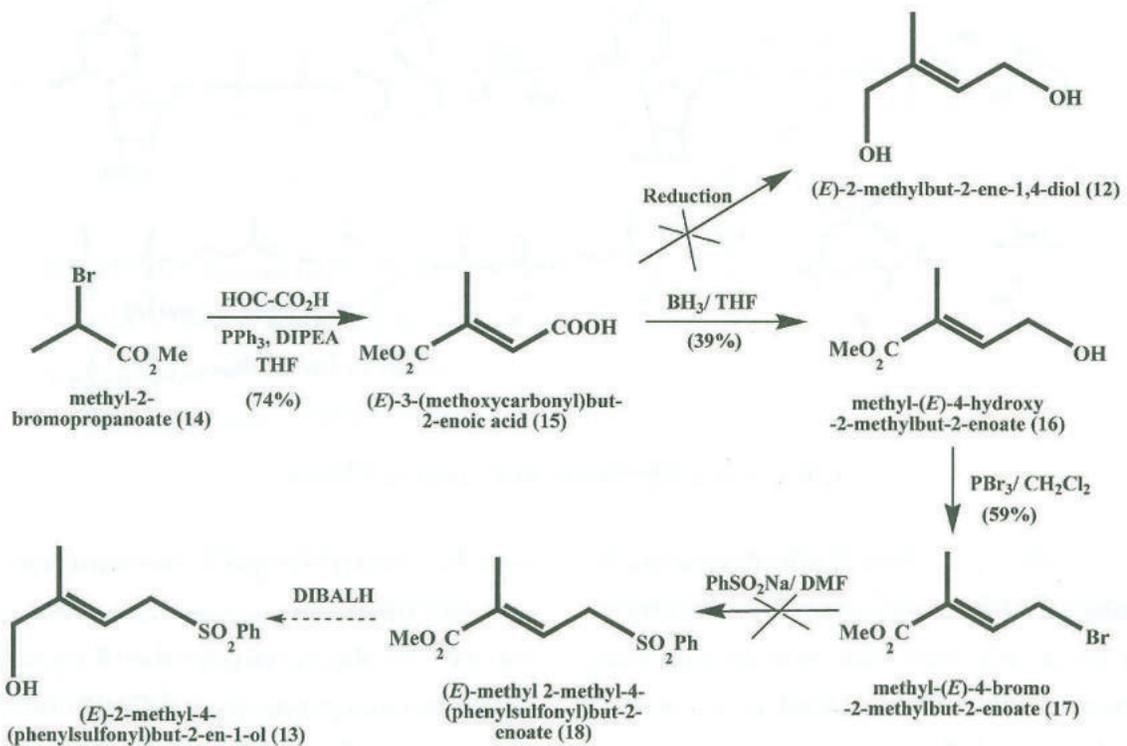
สะดวกในการทำสารให้บริสุทธิ์โดยเทคนิคทางโครมาโตกราฟี จากการศึกษาของ Fairlamb และคณะ (Fairlamb, et al. 2003) เพื่อพัฒนาการสังเคราะห์สารต้านจุลินทรีย์ โดยเริ่มจาก Farnesyl diphosphate ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันเป็น diphosphate เช่นเดียวกับกับ HMBPP (9) พบว่าการแทนที่หมู่ฟังก์ชันที่เป็น ไดฟอสเฟตด้วยหมู่ฟีนิลซัลโฟน แล้วทำให้ได้สารที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อ *Candida albicans* *Shizosaccharomyces pomb* และ *Saccharomyces cerevisiae* ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาการสังเคราะห์สาร (13) เพื่อนำมาทดสอบการยับยั้งจุลินทรีย์ ทั้งนี้สารที่ไม่มีหมู่ diphosphate (12) ก็มีความเป็นไปได้ที่จะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ IspH เช่นกัน (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 การออกแบบโมเลกุลที่คาดว่าจะยับยั้งเอนไซม์ IspH

### การทดลอง

การสังเคราะห์สารต้นแบบใช้ขั้นตอนการสังเคราะห์สาร HMBPP (9) ตามวิธีของ Wolff และคณะ ตามที่ได้มีการรายงานไว้แล้ว (Wolff, et al. 2002) ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การสังเคราะห์โมเลกุลต้นแบบสำหรับยับยั้งเอนไซม์ IspH

ในขั้นแรกเป็นปฏิกิริยาแบบ Wittig ของ methyl-2-bromopropionate (14) กับ glyoxylic acid monohydrate เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็น (E)-3-(methoxycarbonyl)but-2-enoic acid (15) จากนั้นทำปฏิกิริยารีดักชันของสาร 15 โดยใช้  $BH_3$  เป็นตัวรีดิวซ์ทำให้ได้

methyl-(E)-4-hydroxy-2-methylbut-2-enoate (16) ในขั้นถัดไปเป็นปฏิกิริยาโบรมิเนชันของสาร 16 ได้ผลิตภัณฑ์เป็น methyl-(E)-4-bromo-2-methylbut-2-enoate (17) การเติมหมู่ phenylsulphone ไปยังสาร 17 ทำได้โดยการใช้ sodium benzene sulfonate เป็น

นิวคลีโอไฟล์เพื่อให้ได้ (*E*)-methyl-2-methyl-4-(phenylsulfonyl)but-2-enoate (18) จากนั้นการทำปฏิกิริยารีดักชันของสาร 18 ควรจะได้ (*E*)-2-methyl-4-(phenylsulfonyl)but-2-en-1-ol (13) เป็นผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ปฏิกิริยารีดักชันของสาร 15 คาดว่าทำให้ได้ (*E*)-2-methylbut-2-ene-1,4-diol (12) ตามที่ต้องการ

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

สารประกอบคาร์บอกซิลิก 15 สามารถเตรียมได้จากสาร 14 คิดเป็น 74 % ได้มีการทดลองซ้ำหลายครั้ง ซึ่งก็พบว่าให้ร้อยละผลได้ที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังได้ผลิตภัณฑ์หลักเพียงหนึ่งสารจากการทดสอบด้วยเทคนิค TLC ซึ่งทำให้สาร 15 มีความบริสุทธิ์สูงหลังจากผ่านขั้นตอนการทำคอลัมน์โครมาโทกราฟี การพิสูจน์เอกลักษณ์ของสาร 15 ที่ได้ให้ผลสอดคล้องกับตามที่มีการรายงานไว้แล้ว (Wolff, et al. 2002) หลังจากนั้นพบว่าปฏิกิริยารีดักชันของสารประกอบคาร์บอกซิลิก 15 ทำให้ได้แอลกอฮอล์ 16 ในปริมาณ 39% ซึ่งเป็นร้อยละผลได้ที่ค่อนข้างต่ำ ถึงแม้ว่าจะมีการทดลองซ้ำหลายครั้งรวมทั้งการใช้ตัวทำละลายที่ปราศจากน้ำหลังการกลั่นทันที ทั้งนี้คาดว่าอาจเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น การรีดิวซ์หมู่เอสเทอร์ไปพร้อมๆ กับหมู่คาร์บอกซิล ซึ่งอาจจะทำให้ได้สาร 12 เป็นผลิตภัณฑ์รอง อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์รองที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชันมีปริมาณน้อยมากจนไม่สามารถนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์ได้ในลำดับถัดไปจึงได้มีการทำปฏิกิริยารีดักชันของสาร 15 โดยใช้ lithium aluminium hydride เพื่อให้ได้สาร 12 จากการทดลองดังกล่าวพบว่าได้ผลิตภัณฑ์ทั้งสิ้นหกสารเมื่อทดสอบด้วยเทคนิค TLC และสารทั้งหมดมีค่า  $R_f$  ที่ใกล้เคียงกันมากจึงทำให้การแยกสารให้บริสุทธิ์ด้วยเทคนิคคอลัมน์โครมาโทกราฟีไม่ประสบความสำเร็จ ในลำดับถัดไปจึงได้ทำการรีดิวซ์สารประกอบเอสเทอร์ 16 ด้วยตัวรีดิวซ์ที่เป็น diisobutyl aluminium hydride (Clayden, et al. 2001) จากการทดสอบผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเทคนิค TLC ปรากฏเป็นสารจำนวนมากเช่นกัน การที่ปฏิกิริยารีดักชันทั้งสองครั้งไม่ได้ผลตามที่คาดการณ์ไว้

อาจเนื่องมาจากผลของหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถจับกับอะลูมิเนียมได้ ทำให้การเติมไฮโดรด์ไปยังหมู่เอสเทอร์เกิดขึ้นได้ยาก ในลำดับถัดไปได้ทำการเติมหมู่ป้องกันของแอลกอฮอล์ 16 ด้วย TBDMSCI (Greene, et al. 1991) ถึงแม้ว่าการติดตามปฏิกิริยาด้วยเทคนิค TLC แสดงให้เห็นถึงการเกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์ที่ค่อนข้างสมบูรณ์ แต่หลังจากหยุดปฏิกิริยาและทำการสกัดแยกผลิตภัณฑ์ออกมา พบว่าไม่ได้สารในปริมาณมากพอที่จะนำไปตรวจสอบเอกลักษณ์ได้ ทั้งนี้อาจเป็นได้ว่าการใช้สภาวะในการ work up ที่เป็นเบสแรงเกินไปทำให้หมู่ TBDMS- เกิดการหลุดออกได้ หลังจากเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแล้ว

สำหรับแนวทางอื่นในการสังเคราะห์สารยับยั้งเอนไซม์ IspH คือ การทำปฏิกิริยาโบรมีนชันของแอลกอฮอล์ 16 พบว่าได้สารประกอบ 17 ตามที่ต้องการในปริมาณ 59% หลังจากนั้นได้ทำการทดลองเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันของสาร 17 โดยเริ่มจากการทำปฏิกิริยาซัลโฟเนชันเพื่อเปลี่ยนหมู่โบรมไนด์ให้เป็นหมู่ฟีนิลซัลโฟเนซึ่งเป็นหมู่แทนที่ที่เหมาะสมสำหรับหมู่ไคฟอสเฟต (Fairlamb, et al. 2003) อย่างไรก็ตาม พบว่าในสภาวะที่ได้ทำการทดลองไม่ปรากฏเป็นสารที่ 18 ตามต้องการ ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าในสภาวะของการทดลองที่ใช้ DMF เป็นตัวทำละลายยังมีความเป็นขี้ที่ ไม่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา จึงควรมีการปรับเปลี่ยนสภาวะที่หลากหลายมากขึ้นในลำดับถัดไป

### สรุปผล

จากผลการทดลองทั้งหมดพอจะชี้ให้เห็นถึงแนวทางในการสังเคราะห์สารตั้งต้นและสารประกอบที่เกี่ยวข้องเพื่อนำไปสู่การสังเคราะห์สารยับยั้งเอนไซม์ IspH รวมไปถึงรีเอเจนต์ต่างๆ และตัวทำละลายที่เหมาะสม เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์และได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ โดยได้ทำการทดลอง แบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ คือ การเตรียม methyl-(*E*)-4-hydroxy-2-methylbut-2-enoate (16) และ methyl-(*E*)-4-bromo-2-methylbut-2-enoate (17) รวมทั้ง

การนำสารดังกล่าวไปสังเคราะห์เป็นสารที่มีแนวโน้มในการยับยั้งเอนไซม์ IspH

การเตรียมสาร **methyl-(E)-4-hydroxy-2-methylbut-2-enoate (16)** สามารถทำได้ในสองขั้นตอน โดยเริ่มจาก methyl-2-bromopropanoate (14) คิดเป็น 29% แต่การทดลองเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันของสาร 16 เพื่อนำไปใช้ทดสอบการออกฤทธิ์ในการยับยั้งเอนไซม์ IspH อย่างเช่นการทำปฏิกิริยารีดักชันยังไม่ให้ผลที่น่าพอใจ

การเตรียมสาร **methyl-(E)-4-bromo-2-methylbut-2-enoate (17)** สามารถทำได้ในสามขั้นตอน โดยเริ่มจาก methyl-2-bromopropanoate (14) คิดเป็น 18% การทดลองเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันของสาร 17 เช่นการทำปฏิกิริยาซัลโฟเนชันยังไม่ให้ผลตามที่ต้องการ จึงควรมีการออกแบบปฏิกิริยาที่หลากหลายเพื่อทดลองกับสารที่สามารถเตรียมได้แล้ว เพื่อให้ได้สารยับยั้งเอนไซม์ IspH ตามที่ต้องการต่อไป

### วิธีการทดลอง

#### สารเคมีและเครื่องมือ

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองซื้อได้จากบริษัท Sigma-Aldrich ซึ่งประกอบด้วย Acetonitrile (99%), Tetrahydrofuran (กลั่นด้วย sodium/benzophenone ก่อนทำการทดลอง),  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  (กลั่นด้วย  $\text{CaH}_2$  ก่อนทำการทดลอง), Ethyl acetate (HPLC grade), Hexane (HPLC grade), Ether (HPLC grade), methyl-2-bromopropanoate (98 %), diisopropylethylamine (98 %), triphenylphosphine (98 %), glyoxylic acid monohydrate (98 %), 1 M borane tetrahydrofuran complex, 50 % aqueous acetic acid, กรด HCl 6 M, sodium hydrogen carbonate อิมตัว, lithium aluminium hydride, diisobutyl aluminium hydride, celite, 15 % sodium hydroxide, sodium hydride, TBDMSCl, imidazole, rotary evaporater, hot plate, balances, UV lamp, TLC sheet Merck หน้า 0.2 cm, Silica gel 60. พิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้  $^1\text{H}$  NMR จากเครื่อง NMR Spectrophotometer ขนาด 400 MHz

การเตรียม **(E)-4-methoxy-3-methyl-4-oxobut-2-enoic acid (15)**

ละลาย triphenylphosphine (6.27g, 23.93 mmol, 1 equivalent) ใน  $\text{CH}_3\text{CN}$  70 mL แล้วเติม methyl-2-bromopropanoate (4.00 g, 23.95 mmol, 1 equivalent) คนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่  $65^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นเติม diisopropyl ethylamine (3.95 ml, 23.95 mmol, 1 equivalent) และ glyoxylic acid monohydrate (2.23 g, 23.95 mmol, 1 equivalent) ใน  $\text{CH}_3\text{CN}$  12 mL ตั้งปฏิกิริยาไว้ที่  $0^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำปฏิกิริยาต่อที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ในขั้นถัดไปทำการระเหยตัวทำละลายออกครึ่งหนึ่ง โดยวิธีลดความดัน จากนั้นเติม ethyl acetate จำนวน 10 mL แล้วล้างด้วย  $\text{NaHCO}_3$  (3x30 mL) นำของผสมที่ได้สกัดด้วย ethyl acetate (2x10 mL) ปรับ pH ให้เป็นกรดด้วย HCl เข้มข้นปริมาณ 5 mL แล้วสกัดด้วย ethyl acetate (3x30 mL) นำชั้นอินทรีย์ที่ได้มากำจัดน้ำออกโดยเติม  $\text{MgSO}_4$  anhydrous จากนั้นกรองแล้วนำไประเหยตัวทำละลายออกจนแห้ง ได้ผลิตภัณฑ์เป็นของแข็งสีเหลือง (2.55 g, 74 %, Rf = 0.36, 7:3 ethyl acetate/ hexane) $^1\text{H}$  NMR (400 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ):  $\delta$  = 2.35 (3H, s,  $\text{CH}_3$ ), 3.84 (3H, s,  $\text{CO}_2\text{CH}_3$ ), 6.81 (1H, s, CH).

การเตรียม **Methyl (E)-4-hydroxy-2-methylbut-2-enoate (16)**

ละลาย **(E)-4-methoxy-3-methyl-4-oxobut-2-enoic acid (15)** (1.00 g, 6.94 mmol, 1 equivalent) ใน THF 40 mL แล้วเติมสารละลาย borane tetrahydrofuran complex (1 M, 6.94 mL, 6.94 mmol, 1 equivalent) ที่  $-10^\circ\text{C}$  แล้วคนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นทำการหยุดปฏิกิริยาโดยเติมกรดแอสซิดิก 50 % , 3 mL อย่างช้าๆ แล้วระเหยตัวทำละลายออก ในลำดับถัดไปหยด  $\text{NaHCO}_3$  ที่อิมตัวปริมาณ 40 mL ที่  $0^\circ\text{C}$  แล้วทำการสกัดของผสมด้วย ethyl acetate (3x15 mL) จากนั้น

ทำการล้างชั้นสารอินทรีย์ด้วย  $\text{NaHCO}_3$  (25 mL) รวมชั้นน้ำที่สกัดได้เข้าด้วยกันแล้วสกัดด้วย ethyl acetate (2x25 mL) ในลำดับถัดไปรวมชั้นสารอินทรีย์เข้าด้วยกันแล้วระเหยตัวทำละลายออกจนแห้ง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันสีเหลืองอ่อน (639 mg, 71 %,  $R_f = 0.45$ , ethyl acetate/hexane 7:3) หลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาทำให้บริสุทธิ์โดยใช้คอลัมน์โครมาโทกราฟี (7:3 ethyl acetate/hexane) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวสีเหลืองอ่อน (383 mg, 39 %,  $R_f = 0.45$ , ethyl acetate/hexane 7:3)  $^1\text{H NMR}$  (400 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ):  $\delta = 1.80$  (3H, s,  $\text{CH}_3$ ), 3.75 (3H, s,  $\text{CO}_2\text{CH}_3$ ), 4.30 (2H, d,  $\text{CH}_2\text{OH}$ ), 6.82 (1H, t, CH). IR( $\text{cm}^{-1}$ ): 3417 (O-H stretching), 2921 (C-H stretching), 1714 (C=O stretching), 1444 (C=C stretching), 1025 (primary alcohol C-O stretching).

#### การเตรียม (E)-methyl-4-bromo-2-methylbut-2-enoate (17)

ละลาย methyl-(E)-4-hydroxy-2-methylbut-2-enoate (16) (454 mg, 3.49 mmol, 1 equivalent) ใน  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  10 mL จากนั้นเติม tribromophosphine (1.16 mL, 1.16 mmol, 0.33 equivalent) ที่  $0^\circ\text{C}$  ตั้งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในลำดับถัดไปหยุดปฏิกิริยาด้วยการเติม  $\text{NaHCO}_3$  ที่อิ่มตัว 1.0 mL ล้างด้วยน้ำกลั่น 1 mL แล้วนำชั้นน้ำมาสกัดด้วย hexane (2x4 mL) รวมชั้นสารอินทรีย์เข้าด้วยกันแล้วล้างด้วยสารละลาย  $\text{NaCl}$  ที่อิ่มตัว ลำดับถัดไปนำชั้นสารอินทรีย์มาดูดความชื้นด้วย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  anhydrous กรองด้วยสำลีแล้วระเหยตัวทำละลายออกจนแห้ง ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันสีเหลืองอ่อน (399 mg, 59 %,  $R_f = 0.36$ , ethyl acetate/hexane 3:7)  $^1\text{H NMR}$  (400 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ):  $\delta = 1.92$  (3H, s,  $\text{CH}_3$ ), 3.76 (3H, s,  $\text{CO}_2\text{CH}_3$ ), 4.03 (2H, d,  $J = 8.6$  Hz,  $\text{CH}_2\text{-Br}$ ), 6.92 (1H, t,  $J = 8.6$  Hz, CH).  $^{13}\text{C NMR}$  (100 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ):  $\delta = 11.8$  ( $=\text{C-CH}_3$ ), 25.5 ( $\text{CH}_2\text{-Br}$ ), 51.7 ( $\text{CO}_2\text{CH}_3$ ), 131.5 ( $\text{CH}=\text{C}$ ), 134.7 ( $\text{CH}=\text{C-CH}_3$ ), 167.3

(CO). IR ( $\text{cm}^{-1}$ ): 2958 (C-H stretching), 1714 (C=O stretching), 1442 (C=C stretching), 1096 (C-O stretching).

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณฝ่ายวิจัย สำนักบริหารการวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนทุนสำหรับนักวิจัยใหม่ประจำปี พ.ศ. 2548

#### เอกสารอ้างอิง

- Clayden, J.; Greeves, N.; Warren, S.; Wothers, P. (2001). Organic Chemistry. New York. Oxford University Press Inc. 616-641.
- Fairlamb, I. J. S.; Dickinson, J. M.; O'Connor, R.; Cohen, L. H.; Thiel, C. F. (2003). Synthesis and antimicrobial evaluation of farnesyl diphosphate mimetics. Bioorganic Chemistry. 31: 80-97.
- Greene, T. W.; Wuts, P. G. M. (1991). Protective Groups in Organic Synthesis. (2). New York John Wiley & Sons, Inc. 77-80.
- Greenwood, B. M.; Bojang, K.; Whitty, C. J. M.; Targett, G. A. (2005). Malarie. The lancet 365: 1487-1497.
- Harwood, J.; Quinn, P. J. (2000). Sterols and Isoprenoids. Biochemistry Society Transaction. 28: 785-789.
- Kuzuyama, T. (2002). Mevalonate and Non-mevalonate Pathways for the Biosynthesis of Isoprene Units. Bioscience Biotechnology Biochemistry. 66: 1619-1627.
- Olliaro, P. L. (2001). An overview of chemotherapeutic targets for antimalarial drug discovery. Pharmaceutical Therapy. 89: 207-219.
- Razakandrainibe, F. G.; Durand, P.; Koella, J. C.; De Meeus, T.; Rousset, F.; Ayala, F. J.;

- Renaud, F. (2005). Clonal population structure of the malaria agent *Plasmodium falciparum* in high-infection regions. *Proceeding in National Academy of Science* 102: 17388-17393.
- Rogers, D. J.; Randolph, S. E. (2000). The global spread of malaria in a future, warmer world. *Science*. 289: 1763-1766.
- Rohdich, F.; Bacher, A.; Eisenreich, W. (2004). Perspectives in anti-infective drug design. The late steps in the biosynthesis of the universal terpenoid precursors, isopentenyl diphosphate and dimethylallyl diphosphate. *Bioorganic Chemistry*. 32: 292-308.
- Rohmer, M. (1999). The discovery of a mevalonate-independent pathway for isoprenoid biosynthesis in bacteria, algae and higher plants. *Natural Product Representative*. 16: 565-574.
- Wolff, M.; Seemann, M.; Billiard, C. G.; Tritsch, D.; Campos, N.; Concepcion, M. R.; Boronatb, A.; Rohmera, M. (2002). Isoprenoid biosynthesis via the methylerythritol phosphate pathway. (E)-4-Hydroxy-3-methylbut-2-enyl diphosphate: chemical synthesis and formation from methylerythritol cyclodiphosphate by a cell-free system from *Escherichia coli*. *Tetrahedron Letters*. 43: 2555-2559.



ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็ง ขนาดอนุภาค  
และสมบัติวิทยาการไหลของน้ำยางธรรมชาติ  
Correlation between Total Solid Content, Particle Size  
and Rheological Properties of Natural Rubber Latex

พรทิพย์ ประกายมณีวงศ์<sup>1</sup> ไชยวัฒน์ รักสกุลพิวัฒน์<sup>1</sup> และจันทิมา ดีประเสริฐกุล<sup>2</sup>

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของน้ำยางธรรมชาติ (*Hevea brasiliensis*) โดยเตรียมตัวอย่างจากน้ำยางสด และรักษาสภาพน้ำยางสด ด้วยสารละลายแอมโมเนียปริมาณ 1.0% ด้วยวิธีการปั่นแยกให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (%TSC) ในช่วง 55-65% จากการศึกษาพบว่าความหนืดของตัวอย่างน้ำยางเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้น โดยความหนืดของน้ำยางมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆและจากการวัดความหนืดที่ค่าอัตราเฉือนต่างกัน พบว่าเมื่อน้ำยางได้รับแรงเฉือน น้ำยางแสดงพฤติกรรมแบบ shear thinning ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออนุภาคยางได้รับแรงเฉือนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและมีการจัดเรียงตัว ตามทิศทางของแรงที่ได้รับ ทำให้ความหนืดของน้ำยางลดลง

เมื่อศึกษาขนาดอนุภาคยางของน้ำยางธรรมชาติพบว่า ตัวอย่างน้ำยางชั้นที่เตรียมได้มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 350-760 nm และขนาดของอนุภาคยางในแต่ละชุดตัวอย่างน้ำยางชั้นมีแนวโน้มเล็กลงตามลำดับการเก็บตัวอย่างจากการปั่นแยกตัวอย่างน้ำยางชั้นที่ได้จากเครื่องปั่นแยกชนิด De Laval Centrifugal Separator นอกจากนี้ขนาดอนุภาคยางในตัวอย่างน้ำยางสกิม (130-160 nm) มีขนาดเล็กกว่าตัวอย่างน้ำยางชั้น สำหรับผลของขนาดอนุภาคยางของน้ำยางที่มีต่อความหนืด ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าตัวอย่างน้ำยางที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดใกล้เคียงกันแต่มีขนาดอนุภาคต่างกัน ความหนืดของน้ำยางมีความแตกต่างกันน้อยมาก เนื่องจากอนุภาคยางเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปภายใต้แรงที่เกิดจากการปั่นแยกตัวอย่าง ดังนั้นการเตรียมตัวอย่างน้ำยางตามขนาดอนุภาคด้วยการปั่นแยกอาจจะไม่ถูกต้อง และน้ำยางธรรมชาติมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคยางสูง

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์พอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 30000

### Abstract

In this study, the factors affecting viscosity of natural rubber latex were investigated. Samples were prepared from *Hevea brasiliensis* natural rubber latex which was concentrated with 55-65 %TSC by centrifugation and preserved with 1.0% ammonia solution. The effect of total solid content, particle size and particle size distribution on viscosity was examined. It was found that the viscosity of the natural rubber latex slowly increased as %TSC was increased. The viscosity was measured at various shear rates, all samples showed shear thinning behavior.

By using De Laval Centrifugal Separator, the particle sizes of concentrated latex were in the range of 350-760 nm. It was found that the particle size tended to decrease following to the collected fraction sequence from the centrifugation. The rubber particle size in skim latex (130-160 nm) was smaller than the particle size of concentrated latex. The effect of particle size on viscosity did not show significant difference. The rubber particle is highly deformable. Thus the size separation under centrifugal force may not be accurately discreet. All samples had a broad particle size distribution.

**คำสำคัญ :** น้ำยางธรรมชาติ ความหนืด ปริมาณของแข็งทั้งหมด

**Key words :** Natural rubber latex, Viscosity, Total solid content

### บทนำ

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทยและชีวิตความเป็นอยู่ของประชากรกว่า 6 ล้านคน หรือร้อยละ 10 ของประชากรทั้งประเทศ ปริมาณการผลิตยางของไทยในปี 2549 จำนวนทั้งสิ้น 3.137 ล้านตัน และส่งออกยางปริมาณ 2.772 ล้านตัน (สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, 2550) แต่น้ำยางธรรมชาติมีสมบัติที่ด้อยในเรื่องคุณภาพของน้ำยางที่ไม่สม่ำเสมอทำให้ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตในขั้นตอนต่างๆ ที่ได้นำน้ำยางธรรมชาติไปใช้งาน ทั้งในขั้นตอนการแปรรูปน้ำยางสด จนถึงในระดับอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางชนิดต่างๆ ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงได้สนใจและทำการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติที่สำคัญของน้ำยางธรรมชาติเพื่อหาแนวทางในการควบคุมคุณภาพของน้ำยางธรรมชาติให้มีความสม่ำเสมอ โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความหนืด (viscosity) ของน้ำยางธรรมชาติ เช่น ปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content, %TSC) ขนาดอนุภาคยาง (particle size)

และอัตราเฉือน (shear rate) ที่ใช้ ซึ่งค่าความหนืดของน้ำยางมีความสำคัญต่อกระบวนการแปรรูปน้ำยางสด ขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง และสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางที่ได้ และสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้ K. Cornish และ J.L. Brichta (Cornish and Brichta, 2002) รายงานว่าเมื่อปริมาณของแข็งในน้ำยางธรรมชาติมีมากขึ้นความหนืดของน้ำยางเพิ่มขึ้น และ J.T. Varkey และคณะ (Varkey et al., 1995) พบว่าน้ำยางธรรมชาติแสดงพฤติกรรมแบบ shear thinning เมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น

### สารเคมี อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 1. สารเคมี

- 1.1 น้ำยางธรรมชาติ (*Hevea brasiliensis*) พันธุ์ RRIM 600 จากศูนย์วิจัยยางหนองคาย
- 1.2 สารละลายแอมโมเนีย 25% และ 30% จากบริษัท BDH Laboratory Supplies และ MERCK (Germany)

## 2. อุปกรณ์ที่ใช้

2.1 เครื่องปั่นแยกชนิด De Laval Centrifugal Separator (รุ่น LR16KR) จากบริษัท AB Separator Stockholm (SWEDEN)

2.2 เครื่องวัดความหนืดชนิด Brookfield viscometer แบบ concentric cylinder จากบริษัท Brookfield Engineering Laboratories (USA)

2.3 เครื่องวัดขนาดอนุภาคชนิด BI-200SM Goniometer and BI-9000AT Digital Autocorrelator จากบริษัท Brookhaven Instruments Corporation (USA)

## 3. วิธีการทดลอง

3.1 เก็บตัวอย่างน้ำยางสด เดิมสารละลายแอมโมเนีย 1% เพื่อรักษาสภาพน้ำยาง

3.2 หาปริมาณของแข็งทั้งหมดของตัวอย่างน้ำยางสด มีขั้นตอนดังนี้

ชั่งและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอนของจานแก้ว เหน้ยางสดลงบนจานแก้วประมาณ  $10.0 \pm 0.5$  กรัม ชั่งและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน และเอียงจานแก้วแล้วหมุนช้าๆ เพื่อให้น้ำยางแผ่กระจายทั่วจานแก้ว (อาจเติมน้ำกลั่นหรือน้ำบริสุทธิ์เทียบเท่าน้ำกลั่นประมาณ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ผสมกับน้ำยางในจานแก้วก่อน) จากนั้นนำจานแก้วไปอบในตู้อบ โดยให้จานแก้วอยู่ในแนวระนาบและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $70 \pm 2^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งแผ่นยางใส นำจานแก้วออกจากตู้อบ ทำให้เย็นในโถแก้วดูดความชื้น ชั่งและบันทึกน้ำหนัก ให้อบต่ออีก 30 นาที และทำซ้ำอีก จนน้ำหนักที่บันทึกสองครั้งหลังแตกต่างกันไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัม

3.3 ปั่นน้ำยางสดเพื่อเตรียมเป็นน้ำยางชั้นที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (TSC) ประมาณ 55-65 % โดยทำการปั่นน้ำยางสดด้วยเครื่องปั่นแยกชนิด De Laval Centrifugal Separator และเก็บตัวอย่างน้ำยางชุดละ 5 ขวด ขวดละประมาณ 100 มิลลิลิตร จากนั้นรักษาสภาพด้วยสารละลายแอมโมเนีย 0.7 %

3.4 นำตัวอย่างน้ำยางที่เตรียมได้แต่ละขวด ไปหาค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดตาม ISO 124:1997 โดยมีขั้นตอนดังนี้

เทน้ำยางลงบนจานแก้วประมาณ  $5.0 \pm 0.5$  กรัม และบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน เติมน้ำกลั่นหรือน้ำบริสุทธิ์เทียบเท่าน้ำกลั่นประมาณ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ผสมกับน้ำยางในจานแก้ว และเอียงจานแก้วแล้วหมุนช้าๆ เพื่อให้น้ำยางแผ่กระจายทั่วจานแก้ว จากนั้นนำจานแก้วไปอบ และทำตามขั้นตอนในข้อ 3.2

3.5 นำตัวอย่างน้ำยางที่เตรียมได้แต่ละขวด ไปหาความหนืดของน้ำยางที่ค่าอัตราเฉือน  $3.0575, 6.115, 12.23, 24.46, 61.15$  และ  $122.3 \text{ sec}^{-1}$  ขณะที่ทำการวัดความหนืดควบคุมอุณหภูมิที่  $25^{\circ}\text{C}$

3.6 นำตัวอย่างน้ำยางที่เตรียมได้แต่ละขวด ไปหาขนาดของอนุภาคยางในน้ำยางด้วยเทคนิคการกระเจิงของแสง (light scattering) โดยเจือจางตัวอย่างน้ำยางด้วยสารละลายแอมโมเนีย 0.7 % จนได้สารที่ค่อนข้างใส และวัดขนาดอนุภาคยางที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  ความยาวคลื่น 532 nm

3.7 นำตัวอย่างน้ำยางที่เตรียมได้แต่ละตัวอย่าง ไปหาน้ำหนักโมเลกุล โดยนำตัวอย่างน้ำยางไปเตรียมเป็นแผ่นฟิล์ม และละลายในสารละลายโทลูอีน จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปหาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค gel permeation chromatography (GPC) โดยใช้อัตราการไหลที่ 0.5 มิลลิลิตร/นาที วัดที่อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$

## ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

### 1. ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อความหนืด

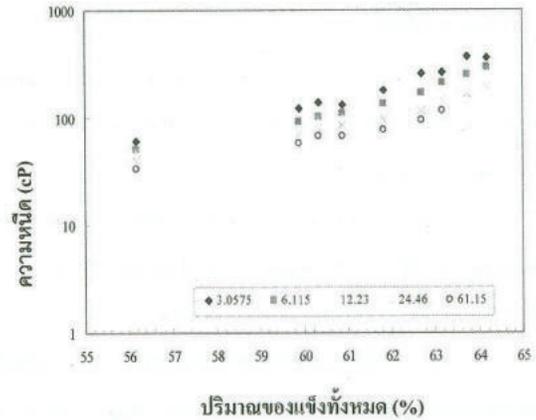
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งทั้งหมด (%TSC) กับความหนืดของน้ำยางธรรมชาติ จากตารางที่ 1 เห็นได้ว่าตัวอย่างน้ำยางเดือนกันยายน 2548 ชุดที่ 1 ที่เตรียมได้มีปริมาณของแข็งทั้งหมดสูงสุดคือ 64.2 % และเมื่อนำตัวอย่างไปหาค่าความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ยืนยันว่าเมื่อปริมาณของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้น ความหนืดของน้ำยางมีค่ามากขึ้น และค่าความหนืดของตัวอย่างน้ำยางได้ผล

ในลักษณะเช่นเดียวกันที่ค่าอัตราเฉือนต่างๆ ผลที่ได้ ดังกราฟรูปที่ 1 จะเห็นว่าที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดค่า ความหนืดของน้ำยางจะมีค่าน้อย และเมื่อปริมาณ ของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้นความหนืดของน้ำยางก็จะมีค่า ค่อยๆ เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ K. Cornish และคณะ นั่นคือ เมื่อน้ำยางธรรมชาติมี ปริมาณของแข็งมากขึ้นความเข้มข้นของน้ำยางเพิ่มขึ้น แรงกระทำระหว่างอนุภาคยงมีมากขึ้นส่งผลให้ความ หนืดของน้ำยางมีค่ามากขึ้นด้วย (Cornish and Brichta, 2002) และผลงานวิจัยของ M. Schneider และคณะ ได้ศึกษาในน้ำยางสังเคราะห์ที่เตรียมจาก butyl acrylate, methyl methacrylic acid และ acrylic acid ถ้า ปริมาณของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้น ความหนืดของน้ำยาง สังเคราะห์จะเพิ่มขึ้น (Schneider et al., 2002)

ตารางที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %TSC กับค่า ความหนืดของตัวอย่างน้ำยาง SEP05\_1<sup>(a)</sup>

ตัวอย่าง	%TSC	ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ (cP)					
		3.057	6.115	12.23	24.46	61.15	122.3
SEP05_1/1(b)	64.2	356	291	235	195	-	-
SEP05_1/2	63.7	363	250	201	165	-	-
SEP05_1/3	63.2	261	209	177	146	116	-
SEP05_1/4	62.7	256	169	140	117	94	-
SEP05_1/5	61.8	179	136	113	95	77	-
SEP05_1/6	60.9	133	109	100	84	68	-
SEP05_1/7	60.3	138	101	92	80	68	-
SEP05_1/8	59.9	123	92	79	69	58	53
SEP05_1/9	56.2	61	51	46	40	34	31

- (a) SEP05\_1/1 หมายถึง น้ำยางเดือนกันยายน 2548 ชุดที่ 1
- (b) SEP05\_1/1 หมายถึง น้ำยางเดือนกันยายน 2548 ชุดที่ 1 ลำดับที่ 1
- SEP05\_1/2 หมายถึง น้ำยางเดือนกันยายน 2548 ชุดที่ 1 ลำดับที่ 2

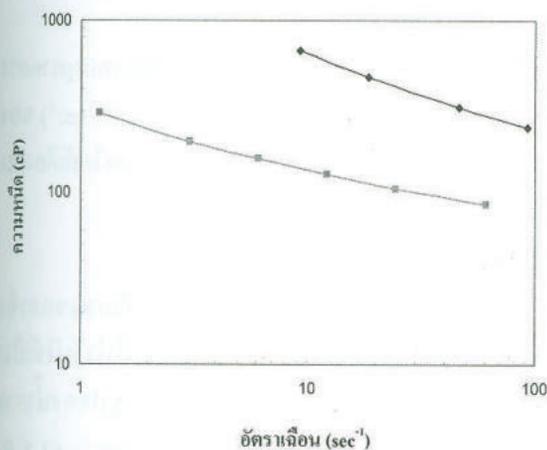


รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็ง ทั้งหมด กับค่าความหนืดของตัวอย่างน้ำยาง SEP05\_1

ในการวัดความหนืดของน้ำยาง ค่าอัตราเฉือน ที่ใช้มีผลต่อค่าความหนืดของน้ำยางเช่นกัน จึงได้ทำการ ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเฉือนต่างๆ กับความ หนืดของน้ำยางธรรมชาติ จากการทดลองจะเห็นว่าที่ ค่าอัตราเฉือนสูงขึ้น ความหนืดของน้ำยางจะมีค่าลดลง เช่น ผลการทดลองในตารางที่ 2 ตัวอย่างน้ำยางเดือน มกราคม 2547 ชุดที่ 1 (%TSC = 62.0%) และ ตัวอย่างน้ำยางเดือนสิงหาคม 2547 ชุดที่ 3 (%TSC = 62.3%) เมื่อนำตัวอย่างไปหาความหนืดที่อัตราเฉือน ต่างๆพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราเฉือนความหนืดของน้ำยางจะมี ค่าลดลง นั่นคือเมื่อให้แรงกระทำต่อน้ำยางเพิ่มขึ้นทำให้อ อนุภาคยงมีแรงกระทำระหว่างกันมากขึ้น และอนุภาค ยงที่ได้รับแรงเฉือนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและมีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแรงที่ได้รับ ส่งผลทำให้ ความหนืดของน้ำยางลดลง (Blackley, 1997) จะเห็น ได้จากกราฟรูปที่ 2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรา เฉือนกับความหนืด และพบว่าเมื่ออัตราเฉือนสูงขึ้น น้ำยางจะแสดงพฤติกรรมแบบ shear thinning โดย P.F. Luckham และคณะ (Luckham and Ukeje, 1999) ได้ ทำการทดลองในน้ำยางพอลิสไตรีน ซึ่งได้ผลการทดลอง ในลักษณะเดียวกัน H.E. Hone และคณะ (Hone et al., 2000) พบว่าที่อัตราเฉือนสูง น้ำยางพอลิสไตรีนแสดง พฤติกรรมแบบ shear thinning

ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเฉือนกับความหนืดของน้ำยางธรรมชาติ

JAN04_1 (%TSC=62.044)		AUG04_3 (%TSC=62.309)	
อัตราเฉือน (sec <sup>-1</sup> )	ความหนืด (cP)	อัตราเฉือน (sec <sup>-1</sup> )	ความหนืด (cP)
12.23	665	0.6115	511.93
24.46	468	1.223	287.96
61.15	314	3.0575	197.09
122.3	240	6.115	157.42
		12.23	127.34
		24.46	105.27
		61.15	84.47



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนกับความหนืด (a) น้ำยาง JAN04\_1 (%TSC = 62.684), (b) น้ำยาง AUG04\_3 (%TSC = 62.309)

## 2. ผลของขนาดอนุภาคต่อความหนืด

การปั่นแยกตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติด้วยเครื่องปั่นแยกชนิด De Laval Centrifugal Separator ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3 พบว่าตัวอย่างน้ำยางชั้นที่เตรียมได้มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 350-760 nm และน้ำยางสกิมมีขนาดอนุภาคประมาณ 150 nm และเมื่อนำตัวอย่างน้ำยางสดเดือนกันยายน 2548 ไปปั่นเพื่อเตรียมตัวอย่าง พบว่า ขนาดอนุภาคของน้ำยางชั้นแต่ละ

ตัวอย่างมีแนวโน้มที่เล็กลงตามลำดับการเก็บตัวอย่างจากการปั่นแยก (Blackley, 1997) คือ ตัวอย่างน้ำยางที่เก็บลำดับที่ 1 มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าตัวอย่างน้ำยางที่เก็บลำดับที่ 2 และตัวอย่างน้ำยางที่เก็บลำดับที่ 2 มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าตัวอย่างน้ำยางที่เก็บในลำดับต่อมา เมื่อศึกษาผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อความหนืดของน้ำยางธรรมชาติ โดยนำตัวอย่างน้ำยางที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดใกล้เคียงกัน แต่มีขนาดอนุภาคต่างกันมาหาความหนืด ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างน้ำยางที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดใกล้เคียงกัน พบว่า ความหนืดของตัวอย่างน้ำยางมีความแตกต่างกันน้อยมาก แม้จะมีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน ตามที่แสดงเปรียบเทียบในกราฟรูปที่ 3 ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงที่เกิดจากการปั่นแยกตัวอย่าง จึงทำให้ขนาดอนุภาคของในแต่ละตัวอย่างที่เตรียมได้มีความแตกต่างกันไม่ชัดเจน และขนาดอนุภาคของน้ำยางธรรมชาติมีการกระจายตัวสูง

ตารางที่ 3 แสดงขนาดอนุภาคของน้ำยางธรรมชาติที่ได้จากการปั่นด้วยเครื่องปั่นแยกชนิด De Laval Centrifugal Separator

ตัวอย่าง	ขนาดอนุภาค (nm)	PDI
SEP05_1/1	446.6 ± 9.6	1.08
SEP05_1/2	422.3 ± 15.8	1.02
SEP05_1/3	406.7 ± 12.1	1.12
SEP05_1/4	381.0 ± 12.5	1.06
SEP05_1/5	374.3 ± 11.7	1.02
SEP05_1/skim	149.4 ± 3.68	1.32

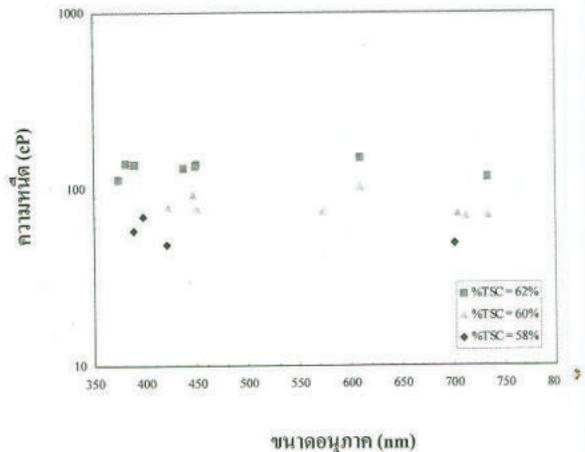
เมื่อศึกษาผลของขนาดอนุภาค ที่มีต่อความหนืดของน้ำยางธรรมชาติ โดยนำตัวอย่างน้ำยางที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดใกล้เคียงกัน แต่มีขนาดอนุภาคต่างกันมาหาความหนืด ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาค  
 ยางกับความหนืดของน้ำยางธรรมชาติที่มี  
 ปริมาณของแข็งทั้งหมดใกล้เคียงกัน

ตัวอย่าง	%TSC	ขนาดอนุภาค (nm)	ความหนืด (cP) ที่อัตราเฉือน $12.23 \text{ sec}^{-1}$
DEC04_2/2	57.7	$397.5 \pm 43.0$	70
AUG05_2/5	57.7	$420.8 \pm 11.3$	48
SEP05_2/1	58.0	$388.1 \pm 10.9$	58
AUG04_1/5	57.3	$700.7 \pm 31.3$	49
AUG04_1/3	60.2	$703.7 \pm 23.2$	73
AUG04_1/4	60.1	$733.6 \pm 15.4$	71
AUG04_1/6	60.3	$572.5 \pm 13.0$	74.2
AUG04_2/2	59.5	$711.2 \pm 17.3$	69.8
AUG04_2/5	60.8	$609.2 \pm 24.5$	103.7
AUG05_1/4	59.9	$449.9 \pm 10.6$	76.8
SEP05_1/1	60.3	$446.6 \pm 9.6$	92.1
SEP05_1/2	59.9	$422.3 \pm 15.8$	78.7
AUG04_1/4	62.1	$733.6 \pm 15.4$	116.5
AUG04_2/5	62.3	$609.2 \pm 24.5$	150
AUG05_1/2	62.4	$448.5 \pm 20.1$	135.7
AUG05_1/4	62.5	$449.9 \pm 10.6$	137.6
AUG05_1/5	62.3	$438.0 \pm 9.8$	131
SEP05_1/4	62.7	$381.0 \pm 12.5$	140.1
SEP05_1/5	61.8	$374.3 \pm 11.7$	113
SEP05_2/2	62.2	$389.9 \pm 13.1$	138

เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างน้ำยางที่มีปริมาณ  
 ของแข็งทั้งหมดที่ใกล้เคียงกัน พบว่า ความหนืดของ  
 ตัวอย่างน้ำยางมีความแตกต่างกันน้อยมาก แม้จะมีขนาด  
 อนุภาคที่แตกต่างกัน ตามที่แสดงเปรียบเทียบในกราฟ  
 รูปที่ 3 ทั้งนี้อาจเนื่องจากอนุภาคยางเกิดการเปลี่ยนแปลง  
 รูปร่างภายใต้แรง ที่เกิดจากการปั่นแยกตัวอย่าง และ  
 เครื่องปั่นแยกตัวอย่างไม่สามารถปรับค่าความเร็วในการ

ปั่นของเครื่องได้ จึงทำให้การแยกตัวอย่างตามขนาด  
 อนุภาคทำได้ยากและขนาดอนุภาคยางในน้ำยางธรรมชาติ  
 มีการกระจายตัวสูง



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคยาง  
 กับความหนืด (ที่อัตราเฉือน  $12.23 \text{ sec}^{-1}$ ) ของ  
 น้ำยางที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดใกล้เคียงกัน

### สรุปผลงานวิจัย

น้ำยางธรรมชาติโดยทั่วไปมีค่าปริมาณของแข็ง  
 ทั้งหมดอยู่ระหว่าง 30-40 % แต่น้ำยางที่นำไปใช้เป็น  
 วัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางจะอยู่ในรูปของน้ำยาง  
 ข้น ที่มีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดไม่น้อยกว่า 61.5 %  
 ในงานวิจัยนี้ นำน้ำยางธรรมชาติไปปั่นเพื่อเพิ่มความ  
 เข้มข้นของน้ำยาง ด้วยวิธีการปั่นแยก (Centrifugation)  
 พบว่า ปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำยางเพิ่มขึ้น ไปอยู่  
 ในช่วง 55-65 % และนำตัวอย่างน้ำยางไปศึกษาผลของ  
 ปริมาณของแข็งทั้งหมด และขนาดอนุภาคต่อความหนืด  
 ที่ค่าอัตราเฉือนต่างๆ สามารถสรุปได้ว่า ที่อัตราเฉือน  
 ค่าหนึ่ง เมื่อน้ำยางที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดมากขึ้น  
 ตัวอย่างน้ำยางจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และเมื่อ  
 อัตราเฉือนเพิ่มขึ้น ความหนืดของน้ำยางจะมีค่าลดลง  
 กล่าวคือ น้ำยางแสดงพฤติกรรมแบบ shear thinning  
 การปั่นแยกตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติโดยเก็บตัวอย่างจาก  
 การปั่นตัวอย่างละประมาณ 100 มิลลิลิตร พบว่า  
 ขนาดอนุภาคของตัวอย่างน้ำยางมีแนวโน้มของขนาดที่

เล็กน้อยตามลำดับของการเก็บตัวอย่าง คือ ตัวอย่างที่เก็บ  
ขวดที่ 1 จะมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าตัวอย่างน้ำยางขวด  
ที่ 2 และมีขนาดอนุภาคเล็กน้อยตามลำดับ เมื่อนำตัวอย่าง  
น้ำยางธรรมชาติที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดใกล้เคียงกัน  
มีขนาดอนุภาคที่ต่างกัน ไปหาความหนืดที่อัตราเฉือน  
เดียวกัน พบว่าเมื่อนำยางจะมีขนาดอนุภาคยางที่ต่างกัน  
แต่เมื่อมีปริมาณของแข็งทั้งหมดใกล้เคียงกัน ความหนืด  
ของน้ำยางก็ใกล้เคียงกัน

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์น้ำยางสดจาก  
ศูนย์วิจัยยางหนองคาย จังหวัดหนองคาย ผู้วิจัยใคร่ขอ  
ขอบพระคุณหน่วยงานดังกล่าวมา ณ ที่นี้ด้วย

### เอกสารอ้างอิง

- สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. (2550). สถิติยาง  
ประเทศไทย. 1: 5.
- Blackley, D.C. (1997). Polymer Latices: Science and  
technology, Second Edition. T.J. Press  
International Ltd, Padstow, Cornwall, 60-64.
- Cornish, K. and Brichta, J.L. (2002). J. of Polymer  
and the Environment. 112: 13-18.
- Hone H.E., Howe M. and Whitesides H. (2000).  
J. Colloids and Surfaces. 27: 283-306.
- Luckham, P.F. and Ukeje, M.A. (1999). J. of Colloid  
and Interface Sci. 220: 347-356. Schneider,  
M., Claverie, J., Grailiat, C. and McKenna,  
T.F. (2002). J. Appl Polym Sci. 84: 1878-  
1896.
- Varkey, J.T., Rao, S.S. and Thomas, S. (1995). Plas-  
tics, Rubber and Composites Processing and  
Applications. 23: 249-257.



## แบบจำลองการนำความร้อนใน 2 มิติ

อนุสรณ์ ศรีธีระวิโรจน์<sup>1</sup>

### บทคัดย่อ

ได้สร้างแบบจำลองการนำความร้อนใน 2 มิติของแผ่นวัสดุโดยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อคำนวณหาฟลักซ์ความร้อนและอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลอง จากการคำนวณพบว่า แผ่นเหล็กขนาดกว้าง 40 cm ยาว 40 cm ซึ่งวางตั้งในแนวตั้งโดยมีเงื่อนไขขอบเขต คือ อุณหภูมิที่ ด้านบน 100°C ด้านซ้าย 75°C ด้านขวา 50°C และด้านล่าง 0°C ที่สภาวะสมดุล มีฟลักซ์ความร้อนเข้าเท่ากับฟลักซ์ความร้อนออก โดยมีขนาด  $1.71645 \times 10^6 \text{ W.m}^{-2}$  และแบบจำลองสามารถศึกษาการนำความร้อนกับวัสดุชนิดอื่นๆ ได้

### Abstract

A model of heat conduction in a 2-dimensional plate material using numerical method was proposed in order to calculate heat flux and temperature on different positions of the plate. The results show that for a 40x40 cm<sup>2</sup> Fe hanging in vertical with temperatures of 100, 75, 50 and 0°C at the top, on the left, on the right and at the bottom respectively, at steady state the heat flux flowing in and out equal to  $1.71645 \times 10^6 \text{ W.m}^{-2}$ . In addition, this model can be adapted to study other materials as well.

คำสำคัญ: แบบจำลองความร้อน

Key words: Heat conduction model

### บทนำ

แผ่นวัสดุที่ได้รับพลังงานความร้อนจะมีการนำความร้อนจากด้านที่ร้อนกว่าไปยังด้านที่เย็นกว่า โดยที่วัสดุแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการนำความร้อนไม่เท่ากัน ดังนั้นถ้าเราสามารถนำวัสดุที่หาง่ายและราคาถูกมาใช้โดยการศึกษการส่งผ่านพลังงานความร้อนที่ตำแหน่งต่างๆ ของวัสดุโดยการสร้างแบบจำลองการคำนวณเชิงตัวเลข จะทำให้เราทราบประสิทธิภาพการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ ก่อนนำไปทดลองจริงได้

### ทฤษฎี

จากกฎข้อที่ศูนย์ของเทอร์โมไดนามิกส์ “ความร้อนสามารถถ่ายเทจากที่ที่มีระดับความร้อนสูง (อุณหภูมิสูง) ไปยังที่ที่มีระดับความร้อนต่ำ (อุณหภูมิต่ำ)”

การส่งพลังงานความร้อนจากด้านที่ร้อนกว่าไปยังด้านที่เย็นกว่าโดยพลังงานความร้อนจะถูกส่งผ่านโมเลกุลไปเป็นทอดๆ ไป แต่โมเลกุลตัวกลางไม่ได้เคลื่อนที่ไปด้วย เรียกว่า การนำความร้อน (Heat Conduction)

<sup>1</sup> ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนเข้าสู่จุดๆ หนึ่ง จะเท่ากับอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนออกจากจุดๆ นั้น ดังนั้น อุณหภูมิที่ทุกๆ จุดในเนื้อวัตถุจะคงที่และลดลงอย่างเป็นสัดส่วนกับระยะทางจากวัตถุด้านที่ร้อนกว่าไปยังด้านที่เย็นกว่า เรียกว่า วัตถุอยู่ในสถานะคงตัว (Steady State)

ค่าคงที่ของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อหนึ่งหน่วยความยาว ( $\frac{dT}{dx}$ ) เรียกว่า เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) จะมีค่าคงที่ จากการทดลองพบว่า ที่สถานะคงตัวจะมี

$$\frac{dQ}{dt} \propto A \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

ดังนั้น อัตราการไหลของความร้อน (The Rate of Heat Flow) เขียนแทนด้วย H หน่วย J/s หรือ W มีค่าเท่ากับ

$$H = \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} = kA \frac{T_H - T_C}{L} \quad (2)$$

k เป็นค่าคงที่ เรียกว่า สภาพนำความร้อน (Thermal Conductivity) หน่วย  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ หน่วย  $m^2$

วัตถุที่มีค่า k มาก จะนำความร้อนได้ดี ส่วนสารที่มีค่า k น้อย จะนำความร้อนได้ไม่ดี หรือเป็นฉนวนความร้อนที่ดี

อัตราการไหลของความร้อน ( $dQ/dt$ ) ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (A) เรียกว่า กระแสความร้อน (Heat Current) เขียนแทนด้วย  $j_E$  มีหน่วยเป็น  $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$  จากสมการ(2)

$$j_E = \frac{H}{A} = \frac{dQ/dt}{A} = k \frac{T_H - T_C}{L} \quad (3)$$

กระแสความร้อน เรียกอีกอย่างว่า ฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux) เขียนแทนด้วย q

จากสมการการนำความร้อน (Heat Conduction Equation) ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation)

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

$\alpha$  คือ ความสามารถในการแพร่กระจายความร้อน (Thermal Diffusivity) มีหน่วย  $m^2 \cdot s^{-1}$

“ที่สถานะคงตัว จะมีอัตราการไหลของความร้อนคงที่ หรือฟลักซ์ความร้อน คงที่”

สำหรับการนำความร้อนใน 2 มิติ โดยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Methods) จะแบ่งให้แผ่นวัสดุเป็นตารางที่มีขนาดเล็กๆ เรียกว่า กริด (Grids) กว้าง  $\Delta x$  ลึก  $\Delta y$  ดังรูปที่ 1 ในที่นี้กำหนดให้

$$h = \Delta x = \Delta y \quad (5)$$

ในแต่ละกริด จะมีผลรวมแบบพีชคณิตของฟลักซ์ความร้อนเข้ากับฟลักซ์ความร้อนออกต่อระยะทางกับกริดด้านข้างทั้งแกน X และแกน Y มีสมการเป็น

$$\nabla^2 T = \frac{T_{i+1,j} + T_{i-1,j} + T_{i,j+1} + T_{i,j-1} - 4T_{i,j}}{h^2} \quad (6)$$

เรียกสมการนี้ว่า สมการอนุพันธ์ของลาปลาซ (Laplacian Difference Equation)

อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อหนึ่งหน่วยเวลาในสมการ(4) มีสมการเป็น

$$\frac{\partial T}{\partial t} \cong \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_{\text{new}} - T_{\text{old}}}{\Delta t} \quad (7)$$

แทนสมการ (6) และ (7) ลงสมการ (4) จะได้

$$T_{i,j}^{\text{new}} = T_{i,j}^{\text{old}} + \frac{\alpha \Delta t}{h^2} [T_{i+1,j} + T_{i-1,j} + T_{i,j+1} + T_{i,j-1} - 4T_{i,j}] \quad (8)$$

โดยที่  $T_{i,j}^{\text{new}}$  คือ อุณหภูมิของกริดที่พิกัด (i, j) ที่เวลาใหม่

$T_{i,j}^{\text{old}}$  คือ อุณหภูมิของกริดที่พิกัด (i, j) ที่เวลาเดิม

ช่วงเวลา  $\Delta t$  ที่เหมาะสม มีค่าตามสมการ

$$\Delta t \leq \frac{h^2}{4k} \quad (9)$$

แผ่นนำความร้อน มีค่าน้อยกว่าค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ( $\epsilon_{\min}$ ) ที่กำหนด ดังรูปที่ 2 โดยมีฟลักซ์ความร้อนเข้า เท่ากับฟลักซ์ความร้อนออก มีขนาด  $1.71645 \times 10^6$  W.m<sup>2</sup> ใช้เวลาเข้าสู่สมดุล  $5.94282 \times 10^4$  s รูป ก) แสดง เกรดสีเป็นสเกลสีเทา (Gray Scale) ของอุณหภูมิ และ รูป ข) แสดงทิศทางการไหลของฟลักซ์ความร้อนทุก ตำแหน่งของแผ่นตัวนำ จะเห็นได้ว่า ทิศทางของฟลักซ์ความร้อนจะชี้จากตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยัง ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าตามทิศทางของลูกศร และสามารถทราบระดับของอุณหภูมิของแต่ละตำแหน่ง จากการเปรียบเทียบกับแถบเกรดสีที่อยู่ด้านบนได้

### บทสรุปและวิจารณ์

แบบจำลองการนำความร้อนใน 2 มิตินี้ สามารถคำนวณฟลักซ์ความร้อน ปริมาณความร้อน ทิศทางของฟลักซ์ความร้อน และอุณหภูมิที่ตำแหน่ง ต่างๆ ของแผ่นเหล็ก โดยที่สภาวะสมดุลจะมีฟลักซ์ ความร้อนเข้าแผ่นนำความร้อนเท่ากับฟลักซ์ความร้อน ออกแผ่นนำความร้อน โดยพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลง ร้อยละของฟลักซ์ความร้อนสุทธิที่เข้า-ออกแผ่นนำความร้อน มีค่าน้อยกว่าค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดที่กำหนดไว้

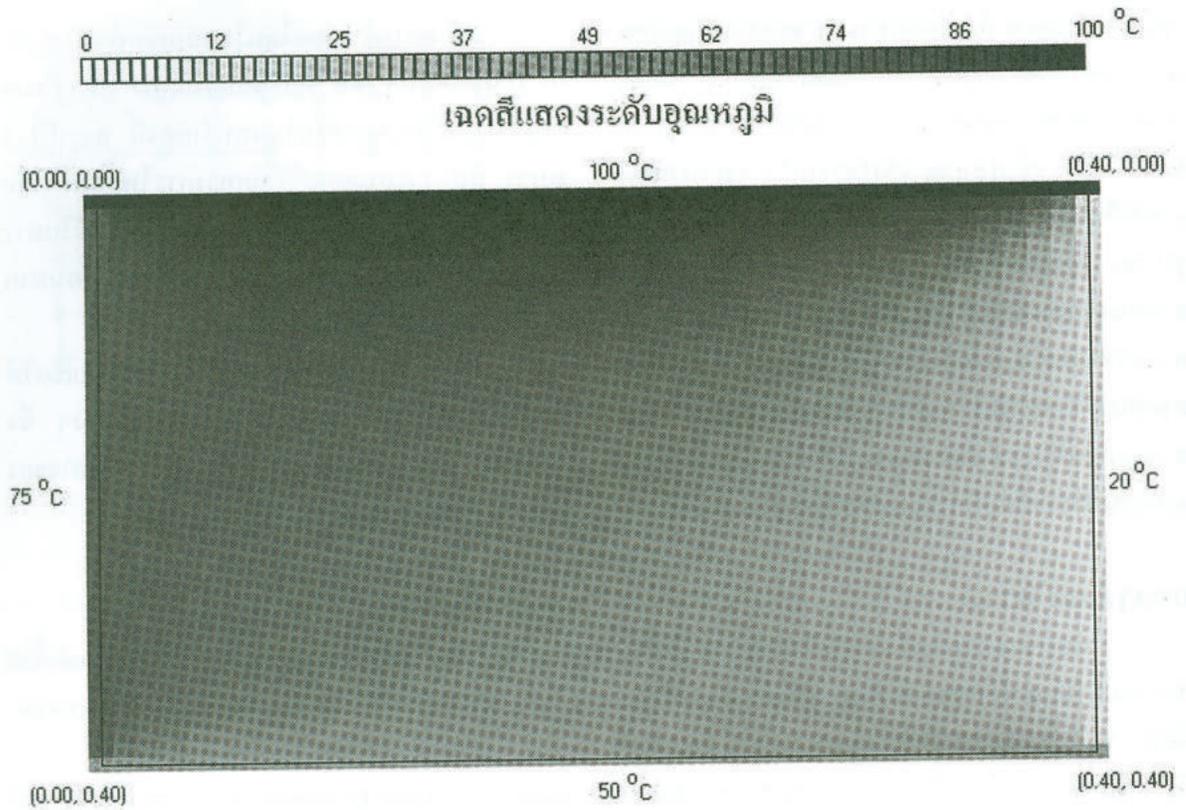
จากการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่เหมือนกัน กับวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น อลูมิเนียม เป็นต้น แล้วสังเกต การนำความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบจำลองนี้ ดังรูปที่ 3 พบว่า ที่สภาวะสมดุลจะได้ทิศทางการไหลของความร้อนที่เหมือนกัน สิ่งที่แตกต่างกันคือ ระยะเวลาที่ใช้ในการ ปรับตัวเข้าสู่สมดุล โดยสารที่มีสภาพนำความร้อนมาก จะใช้เวลาน้อยกว่า คือ  $9.83640 \times 10^3$  s

นอกจากนี้สามารถกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้เป็นฉนวนหรือแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่างๆ ซึ่ง ผลจากการเปลี่ยนเงื่อนไขขอบเขต ทำให้ได้ทิศทางของ ฟลักซ์ความร้อนแตกต่างกันไป

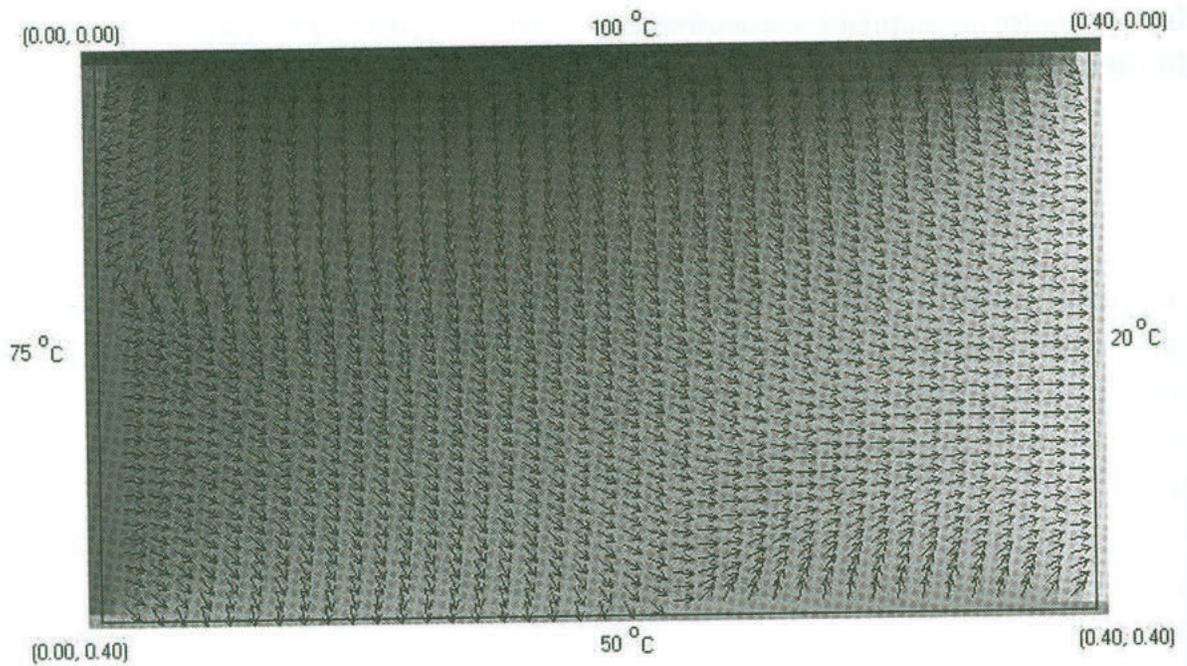
### เอกสารอ้างอิง

- Steven, C. C. and Raymond P. C. (1990). Numerical Methods for Engineers. 2nd ed. McGraw-Hill Book Company. pp.460-498.
- Young, H. D. and Freedman, R.A. (2000). University Physics. 10th ed. Addison-Wesley Publishing Company. pp.715-749.



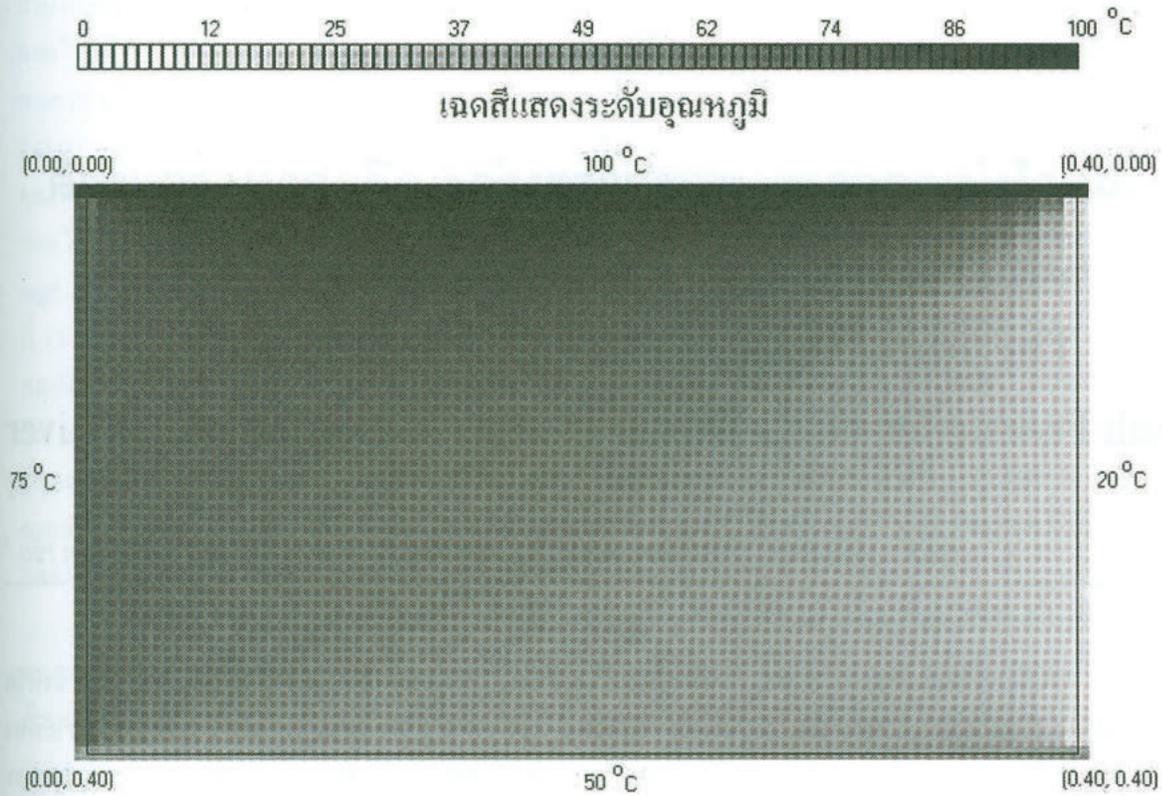


ก) เจดสีแสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆในแผ่น

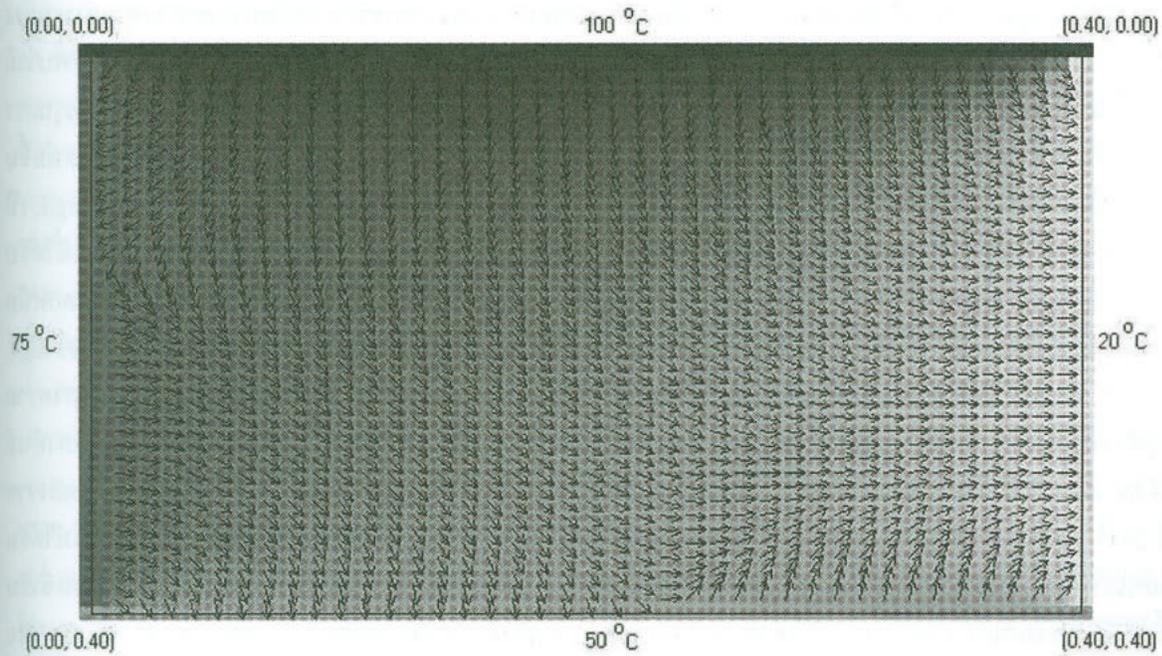


ข) ทิศทางการไหลของความร้อนที่ตำแหน่งต่างๆในแผ่น

รูปที่ 2 เมื่อวัสดุที่นำความร้อน คือ เหล็ก



ก) เฉดสีแสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆในแผ่น



ข) ทิศทางการไหลของความร้อนที่ตำแหน่งต่างๆในแผ่น

รูปที่ 3 เมื่อวัสดุที่นำความร้อน คือ อลูมิเนียม

# แนวโน้มผลกระทบของการชะล้างเกลือตามธรรมชาติ และการผลิตเกลือต่อคุณภาพน้ำในแม่น้ำสงคราม The Impacts Trend of Natural Leaching and Salt Production on the Water Quality of the Songkram River

ชุดิมา กุคู่สมุทร ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง สุกลักษณ์ ศรีจารนัย และรัตนา มหาชัย<sup>1</sup>

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้เก็บตัวอย่างทั้งสิ้น 13 สถานี ระหว่างอำเภอบ้านดุง จังหวัดอุดรธานี ถึงบ้านท่าสะอาด จังหวัดหนองคาย เก็บตัวอย่าง 4 ครั้ง คือ มิถุนายน สิงหาคม ธันวาคม 2547 และกุมภาพันธ์ 2548 วิเคราะห์หาปริมาณแอนไอออน แคทไอออนและโลหะได้แก่  $\text{Cl}^-$   $\text{NO}_3^-$   $\text{SO}_4^{2-}$   $\text{PO}_4^{3-}$   $\text{Na}^+$   $\text{K}^+$   $\text{Mg}^{2+}$  และ  $\text{Ca}^{2+}$  สรุปผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำสถานีที่ 1 ห้วยผาเสือนซึ่งใช้เป็นจุดควบคุม ปริมาณคลอไรด์เดือนกุมภาพันธ์ 37.9 mg/L (ปี 2545 12.63 mg/L) เมื่อเปรียบเทียบกับ 2547 พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมาก สถานีที่ 2 ห้วยปลาตอง เป็นแหล่งน้ำในอำเภอบ้านดุงรับน้ำจากห้วยผาเสือน และเป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการทำนาเกลือบริเวณบ้านดุงอย่างรุนแรง เดือนกุมภาพันธ์ตรวจพบปริมาณคลอไรด์ถึง 14,555.00 mg/L (ปี 2545 9,435.67 mg/L) ณ สถานีนี้พบว่ามีแนวโน้มปริมาณคลอไรด์เพิ่มขึ้นจากปี 2545 ทุกฤดูกาล แสดงว่าผลกระทบการทำนาเกลือบ้านดุงมีแนวโน้มรุนแรงขึ้น สถานีที่ 3 อ่างเก็บน้ำท่ามะนาว สถานีนี้รับน้ำที่ไหลจากห้วยปลาตองจึงทำให้น้ำในอ่างมีความเค็มเพิ่มขึ้นจนกลายเป็นอ่างเก็บน้ำเค็ม สถานีนี้มีความเค็มสูงมาก ปริมาณคลอไรด์เดือนกุมภาพันธ์เท่ากับ 4,473. mg/L (ปี 2545 4,397.67 mg/L) แสดงว่าปริมาณคลอไรด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากปี 2545 อาจสรุปได้ว่า น้ำในสถานีนี้ได้รับผลกระทบจากการทำนาเกลือของอำเภอบ้านดุงรุนแรงมากกว่าปี 2545 สถานีที่ 4 สะพานทวน เมื่อมีฝนตกหนักจะมีน้ำเค็มล้นผ่านฝายน้ำล้นของอ่างเก็บน้ำท่ามะนาวมาเจือปน ปริมาณคลอไรด์เดือนกุมภาพันธ์เท่ากับ 3,692 mg/L (ปี 2545 น้ำแห้ง ไม่สามารถเก็บตัวอย่างได้) สถานีที่ 5 สะพานแม่น้ำสงคราม บริเวณนี้ถือเป็นต้นลำน้ำสงครามอยู่ห่างจากพื้นที่ทำเกลือบ้านโนนสะแบงและบ้านหนองกวาง ประมาณ 12 กม. ปริมาณคลอไรด์เดือนกุมภาพันธ์ 84.88 mg/L (ปี 2545 129.40 mg/L) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ ณ สถานีนี้ พบว่ามีแนวโน้มลดลงจากปี 2545 แสดงว่าน้ำจุดนี้มีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากในปี 2547 มีปริมาณฝนตกมากกว่าปี 2545 และไม่ได้รับผลกระทบจากพื้นที่ทำเกลือดังกล่าว สถานีที่ 6 ห้วยหลัว น้ำในจุดนี้ได้รับอิทธิพลโดยตรงจากห้วยทวนซึ่งรับน้ำเค็มจากอ่างเก็บน้ำท่ามะนาว ปริมาณคลอไรด์เดือนกุมภาพันธ์ 323.90 mg/L (ปี 2545 646.13 mg/L) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ ณ สถานีนี้ พบว่า มีแนวโน้มลดลง สถานีที่ 7 ใต้สะพานบ้านหนองกา สถานีนี้เป็นจุดที่ใช้ศึกษาผลกระทบจากการชะล้างจากกิจกรรมทำเกลือแหล่งใหญ่ ซึ่งได้แก่ บริเวณบ้านเขมซึ่งอยู่ฝั่งซ้ายของ

<sup>1</sup> ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

ลำน้ำห่างออกไป 17 กม. ปริมาณคลอไรด์เดือนกุมภาพันธ์เท่ากับ 153.44mg/L (ปี 2545 311.50 mg/L) ปริมาณเกลือคลอไรด์มีแนวโน้มลดลง สถานีที่ 8 บ้านนาดี บริเวณนี้เป็นแม่น้ำสงครามที่ไหลผ่านบ้านโพธิ์ชุมพลและบ้านหนองบัวเงินและอยู่ในเขตบ้านนาดีซึ่งไม่มีการทำเกลือ ปริมาณคลอไรด์เดือนกุมภาพันธ์ 63.16 mg/L (ปี 2545 338.07 mg/L) ปริมาณคลอไรด์มีแนวโน้มลดลงจากปี 2545 สถานีที่ 9 บ้านท่าสาวท (ถ้ำเต่า) น้ำในบริเวณนี้มีคุณภาพพอๆ กับสถานีที่ 8 ปริมาณคลอไรด์เดือนกุมภาพันธ์ 99.07mg/L (ปี 2545 309.37 mg/L) ปริมาณเกลือคลอไรด์มีแนวโน้มลดลง สถานีที่ 10 เหนือน้ำพุเค็ม 100 เมตร ปริมาณคลอไรด์สูงสุดในเดือนกุมภาพันธ์ 575.90 mg/L ปี 2545 550.30 mg/L) ปริมาณเกลือคลอไรด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เพราะมีการย้ายหม้อต้มเกลือจากสถานีที่ 13 (มาอยู่ที่สถานีที่ 11 ในเดือน ธ.ค. 2545) สถานีที่ 12 บริเวณใกล้กับจุดลำเลียงน้ำพุเค็ม (สถานีที่ 11) น้ำในสถานีนี้จะได้รับการปนเปื้อนจากการคูดน้ำเค็มขึ้นมาต้มเกลือโดยตรง พบปริมาณคลอไรด์สูงสุดในเดือนกุมภาพันธ์ 711.00 mg/L (ปี 2545 754.60 mg/L) จะเห็นว่า การปนเปื้อนลดลงเล็กน้อยแม้จะมีการต้มเกลือบนฝั่งก็ตาม แสดงว่ามีการจัดการเกี่ยวกับการสูบน้ำเค็มดีขึ้น สถานีที่ 13 ท้ายน้ำพุ ห่างจากสถานีที่ 12 ประมาณ 600 เมตร ตามลำน้ำ ปริมาณคลอไรด์เดือนกุมภาพันธ์ 385.05mg/L (ปี 2545 540.07 mg/L) ปริมาณคลอไรด์มีแนวโน้มลดลง เพราะย้ายหม้อต้มเกลือไปอยู่สถานี 11 แล้วตั้งแต่ ธ.ค. 2545

สรุปได้ว่า ทุกสถานีของลำน้ำสงครามได้รับผลกระทบจากการทำเกลือลดลงจากปี 2545 เนื่องจากอิทธิพลของฝนที่ตกมากกว่าในปี 2547 ยกเว้นสถานีที่ 10 บ้านท่าสะอาด ได้รับผลกระทบเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากการย้ายหม้อต้มเกลือจากสถานีที่ 13 มาอยู่ที่สถานีที่ 11 และพบว่า สถานีที่ 2 และ 3 ซึ่งอยู่นอกลำน้ำได้รับผลกระทบรุนแรงขึ้นกว่าปี 2545 จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาผลกระทบต่อน้ำใต้ดินตลอดจนสิ่งก่อสร้างบริเวณใกล้เคียง

### Abstract

In this study water samples from Songkram river were collected and analyzed from March 2004 to February 2005. The obtained results were compared with that of Songkram river in 2002. The result revealed that, the quality of water was depended on the rain content , therefore the content of chloride in February of each station will be used for the comparison of the degree of contamination. Water samples were collected from 13 stations in June, August and December 2004 and February 2005 and analyzed, the results were compared as follow ; station 1 which was a controlled station, the content of chloride in February 2005 was 37.90 mg/L (12.63 mg/L in 2002), the chloride content was seriously increased. Station 2 and 3 were seriously affected by salt production in Ban Dung. The content of chloride in February was 14,555.00 mg/L, and 4,473.00 mg/L, respectively (9,435.67 mg/L and 4,397.67 mg/L in 2002 respectively). The chloride content in both stations were increased compared with that of in 2002. It can be concluded that the contamination was more seriously than in 2002. Station 4, which received discharge from station 3 during rainy season. The chloride level in February was 3,692 mg/L, (no data in 2002). Station 5 which was 12 km. far from the salt production area of None-Sabang and Ban Nong kwung, but the water quality revealed that there was no evidence of serious salt contamination from these area. The chloride content in February was 84.88 mg/L (129.40 mg/L in 2002). Thus the chloride content trends to decrease. It can be concluded that the quality of water in this station was depended on the content of rain. Station 6 was indirectly affected by salt production in Ban Dung since it received the discharge from station 4. The chloride in February was

323.90 mg/L (646.13 mg/L in 2002), the contamination trends to decrease. Station 7 was selected to study for the contribution of Ban Serm salt production area which was 17 km away. The content of chloride in February was 153.44 mg/L (311.50 mg/L in 2002), the chloride content trends to decrease and revealed that there was no contribution from the activity. The water quality at station 8 and 9 were about the same level, the amount of chloride in February were 63.16 mg/L and 99.07 mg/L respectively (338.07 mg/L and 309.37 mg/L respectively in 2002) thus the chloride content trends to decrease in both stations revealed that there was no contribution from the activity. Station 10, 12 and 13 were serious affected by salt production in Ban Ta-sa-ard. The highest amount of chloride in February were 575.90 mg/L (550.30 mg/L in 2002), 711.00 mg/L (754.60 mg/L in 2002), 385.05 mg/L (540.07 mg/L in 2002), respectively, Thus the chloride content trends to increase slightly at station 10 and decrease at station 12 and 13 compared with that of in 2002. The water quality at station 12 and 13 were higher than that in 2002 because of the better management of the underground salt water resource at station 11, while the contamination at station 10 was increased due to salt production activity that moved from station 13 to 11 since December 2002.

It can be concluded that the contamination at every stations in this river were decreased with respected to the year 2002 except station 10, because the salt production plants were moved to station 11 since December 2002. Station 2 and 3 were seriously contaminated at higher degree than in 2002. It is necessary to study the impact on groundwater quality and on the concrete construction around these areas as well.

**คำสำคัญ:** การชะล้างเกลือ, การผลิตเกลือ, แม่น้ำสงคราม

**Key words:** Natural leaching, salt production, water quality

## บทนำ

แม่น้ำสงครามเป็นลำน้ำธรรมชาติที่มีความสำคัญสายหนึ่งของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ไหลผ่านพื้นที่หลายจังหวัด อาทิเช่น จังหวัด อุดรธานี สกลนคร และหนองคาย ประชาชนสองฟากฝั่งใช้น้ำเพื่อการอุปโภค บริโภค และทำเกษตรกรรม ช่วงฤดูฝนลำน้ำจะมีน้ำมาก บางพื้นที่จะเกิดน้ำท่วมบริเวณ 2 ฝั่ง แม่น้ำ มีสัตว์น้ำอุดมสมบูรณ์ แต่จะเกิดการตื่นเงินอย่างรวดเร็วหลังจากสิ้นสุดฤดูฝน เพราะไหลลงสู่ลำน้ำโขงอย่างรวดเร็ว

เนื่องจากภาคอีสานมีธรณีสัณฐานเป็นที่ราบสูงที่มีชื่อว่า ที่ราบสูงโคราช ซึ่งประกอบไปด้วยแอ่งกะทะขนาดใหญ่ ๒ แอ่ง คือ แอ่งโคราชและแอ่งสกลนคร ทั้งสองแอ่งมีพื้นที่ครอบคลุมประมาณ 50,000 ตารางกิโลเมตร ได้พื้นดินใต้แอ่งโคราชและแอ่ง

สกลนคร บรรจุไปด้วยชั้นเกลือหิน ชั้นหินดินเหนียว และชั้นหินดินดานของชุดหินมหาสารคามเป็นส่วนใหญ่ เกลือหินที่พบมีปริมาณมากมาย ถือเป็นทรัพยากรทางธรรมชาติอย่างหนึ่งของภาคอีสาน ที่ก่อให้เกิดอาชีพการทำนาเกลือสินเธาว์ เกลือเป็นวัตถุดิบอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญ 1 ใน 5 ของแร่อุตสาหกรรมของโลก ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของมนุษย์ สถาบันเกลือได้ประมาณการใช้ประโยชน์ของเกลือไว้ถึง 14,000 วิธี การผลิตเกลือของผู้ผลิตรายย่อยในพื้นที่ภาคอีสานนิยมทำกันสองแบบ คือ การสูบน้ำบาดาลที่มีหินเกลือละลายอยู่ขึ้นมาต้มโดยใช้เกลือหรือฟืนเป็นเชื้อเพลิง การทำนาเกลือแบบนี้จะให้น้ำขมที่จะต้องทิ้งซึ่งมีผลทำให้ดินเค็มและน้ำเค็มได้เมื่อถูกระบายลงสู่แหล่งน้ำ นอกจากนี้ยังมีผลกระทบเนื่องจากเขม่าควัน ฟุ้งขึ้นที่ลอยไปเป็นระยะไกลๆ ได้

อีกวิธีหนึ่ง คือ การทำนาตาก กรณีหลังมีผลทำให้ดินบริเวณที่ตากและพื้นที่บริเวณรอบ ๆ มีความเค็ม ป็นผลให้น้ำผิวดินและน้ำใต้ดินบริเวณใกล้เคียงได้รับผลกระทบ การทำนาตากและการดื่มน้ำจึงก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ มากมาย เช่น การทรุดตัวของพื้นดิน เนื่องจากการสูบน้ำบาดาล การเกิดปัญหาดินเค็ม น้ำบาดาลและน้ำผิวดินเค็ม ทำให้สภาพนิเวศน์ของแหล่งน้ำที่รองรับเกิดการเปลี่ยนแปลง แม่น้ำสงครามเป็นแม่น้ำที่ไหลผ่านพื้นที่ทำนาเกลือ 3 จังหวัด ซึ่งได้แก่ บ้านดุง บ้านเขมิ จังหวัดอุดรธานี บ้านหนองกิ้ง บ้านโนนสะแบง จังหวัดสกลนคร บ้านท่าสะอาด จังหวัดหนองคาย จึงน่าจะทำการศึกษาผลกระทบของการชะล้างของกราบเกลือที่เกิดในช่วงฤดูแล้ง การทำนาเกลือ และเนื่องจากวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตเป็นน้ำบาดาลเค็ม จึงได้ตรวจวิเคราะห์หาปริมาณโลหะอื่นๆ นอกเหนือจากโซเดียมและคลอไรด์ด้วย เพื่อจะได้ทราบสภาวะการปนเปื้อนของโลหะอื่น โดยเฉพาะโลหะเป็นพิษ ซึ่งต้องมีการเฝ้าระวังในลำน้ำนี้ด้วย

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณแอนไอออน ได้แก่ คลอไรด์ ไนเตรท ซัลเฟต โลหะ ได้แก่ โซเดียม โปแตสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม ที่ละลายในแม่น้ำสงคราม และสรุปแนวโน้มผลกระทบของการชะล้างเกลือตามธรรมชาติ และการผลิตเกลือต่อคุณภาพน้ำในแม่น้ำสงครามเทียบกับปี 2545

### วิธีการวิจัย

ทำการศึกษาผลกระทบของการชะล้างและการทำเกลือ บริเวณพื้นที่บ้านดุง จังหวัดอุดรธานี และบ้านโนนสะแบง (จังหวัดอุดรธานี) บ้านหนองกิ้ง (จังหวัดสกลนคร) และบ้านท่าสะอาด (จังหวัดหนองคาย) ทำการเก็บตัวอย่างน้ำวิเคราะห์ทุกๆ 3 เดือน เป็นเวลา 12 เดือน จากสถานีเก็บตัวอย่าง 13 สถานี ทำการวิเคราะห์หาปริมาณแอนไอออน ได้แก่ คลอไรด์ ไนเตรท และซัลเฟต โดยใช้วิธี ion chromatography (IC) และ

โซเดียม โปแตสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม โดยวิธี Flame atomic emission spectrometry และโดยวิธี flame atomic absorption spectrometry แล้วใช้ปริมาณการปนเปื้อนของคลอไรด์ ในการประเมินผลกระทบของการชะล้างและการทำนาเกลือที่มีต่อคุณภาพน้ำในลำน้ำสงคราม

สารเคมี สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ สารละลายมาตรฐาน NaCl, KCl, MgCl<sub>2</sub>, MnCl<sub>2</sub>, CaCl<sub>2</sub>, (1000 ppm) Spectrosol grade Carlo Elba, Italy. HCl, HNO<sub>3</sub>, 65%, Analar grade, Carlo Elba, Italy. KMnO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> Analar grade, Ajax Chemical, Australia, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Analar grade, Merck, Germany. Argon gas, acethylene gas, nitrogen gas, Pure grade. NaHCO<sub>3</sub> Analar grade, BDH Chemical Ltd., and Deionized water (DI), Osmo Nics, Inc., U.S.A.

เครื่องมือ เครื่องมือที่ใช้มีดังนี้ atomic absorption spectrometer, Perkin Elmer AA winlab, ion chromatography, dionex, U.S.A , conductivity meter, Suntext Model Sc-17A

การทดลอง แบ่งเป็น 3 ส่วน

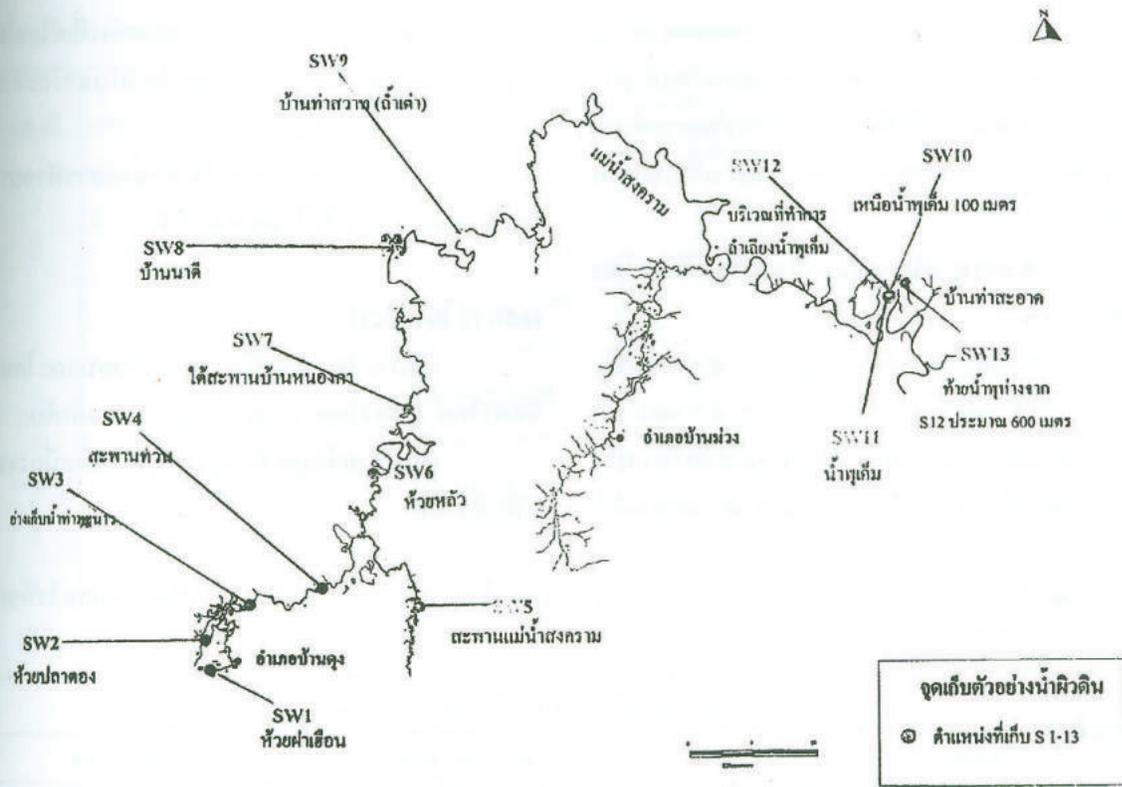
#### 1. วิธีเตรียมสารเคมี ดังต่อไปนี้

เตรียมสารละลายผสมของ Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 1.8 mM และ NaHCO<sub>3</sub> 1.7 mM mobile phase (ก่อนใช้เจือจาง 10 เท่า) สารละลาย Cl<sup>-</sup> NO<sub>3</sub><sup>-</sup> SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> และ PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> ผสมเข้มข้น 20 ppm สารละลายมาตรฐาน Na K Ca Mg เข้มข้น 100 ppm เพื่อใช้เตรียมสารละลายมาตรฐานสำหรับสร้างกราฟมาตรฐานต่อไป สารละลายกรด HNO<sub>3</sub> 1 N

ตารางที่ 1 แสดงสถานีเก็บตัวอย่างลำน้ำสงคราม

สถานีที่	ชื่อสถานีเก็บตัวอย่าง	ที่ตั้งโดยสังเขป
1*	ห้วยผาเือน	หลักกิโลเมตรที่ 59.9 ริมถนนหลวงหมายเลข 2022 ห่างจากสถานีที่ 2 ประมาณ 2.5 กม. ตามลำน้ำ
2*	ห้วยปลาตอง	ตำบลศรีสุทรโธ อำเภอบ้านดุง จังหวัดอุดรธานี สองฟากถนนหลวงหมายเลข 2096 ห่างจากสถานีที่ 3 ประมาณ 2 กม. ตามลำน้ำ
3*	อ่างเก็บน้ำท่ามะนาว	อำเภอบ้านดุง จังหวัดอุดรธานี ห่างจากหลักกิโลเมตรที่ 47 ถนนหลวงหมายเลข 2096 ประมาณ 1.2 กม.
4*	สะพานทวน	อยู่บนเส้นทางบ้านดุง-คำชะโนด ห่างจากสถานีที่ 3 ประมาณ 3 กม. ตามลำน้ำ
5	สะพานแม่น้ำสงคราม	อยู่บนเส้นทางบ้านดุง-คำชะโนดเป็นต้นแม่น้ำสงคราม
6	ห้วยหลัว	บริเวณบ้านห้วยหลัวบนถนนหลวงหมายเลข 2090 ห่างจากสถานีที่ 5 ประมาณ 7 กม.
7	ใต้สะพานบ้านหนองกา	บริเวณบ้านหนองกา เก็บที่สะพานหน้าวัดศรีการาม ซึ่งอยู่บนถนนหลวงหมายเลข 2096 ห่างจากสถานีที่ 6 ประมาณ 7 กม. ตามลำน้ำ
8	บ้านนาดี	บริเวณบ้านนาดี อำเภอโซ่พิสัย จังหวัดหนองคาย หลักกิโลเมตรที่ 35 บนถนนหลวงหมายเลข 2267 ห่างจากสถานีที่ 7 ประมาณ 10 กม.
9	บ้านท่าสาวาท (ถ้ำเต่า)	บ้านท่าสาวาท (ถ้ำเต่า) อำเภอโซ่พิสัย จังหวัดหนองคาย หลักกิโลเมตรที่ 38 บนถนนหลวงหมายเลข 2267 ห่างจากสถานีที่ 8 ประมาณ 8 กม. ตามลำน้ำ
10	เหนือน้ำพุเค็ม บ้านท่าสะอาด100 ม.	บ้านท่าสะอาด อำเภอเซกา จังหวัดหนองคาย หลักกิโลเมตรที่ 71 บนถนนหลวงหมายเลข 222 ห่างจากสถานีที่ 9 ประมาณ 35 กม. ตามลำน้ำ
11	น้ำพุเค็มอยู่กลางแม่น้ำสงครามบริเวณบ้านท่าสะอาด	บ้านท่าสะอาด อำเภอเซกา จังหวัดหนองคาย ห่างจากสถานีที่ 10 ประมาณ 100 ม. ตามลำน้ำ
12	บริเวณลำเลียงน้ำเค็มขึ้นมาคัมบนฝั่ง บ้านท่าสะอาด	บ้านท่าสะอาด อำเภอเซกา จังหวัดหนองคาย ห่างจากสถานีที่ 10 ประมาณ 200 ม. ตามลำน้ำ
13	บริเวณเขตบ้านท่าสะอาดห่างจากสถานีที่ 12 ประมาณ 2 กม. ตามลำน้ำ	บ้านท่าสะอาด อำเภอเซกา จังหวัดหนองคาย ห่างจากสถานีที่ 10 ประมาณ 600 ม. ตามลำน้ำ

\* หมายถึง สถานีอยู่นอกลำน้ำสงคราม



รูปที่ 1 แผนที่แสดงสถานีเก็บน้ำ

2. วิธีเตรียมตัวอย่าง

2.1 วิธีเตรียมตัวอย่างสำหรับหาปริมาณแอนไอออนโดยวิธี IC

เก็บตัวอย่างใส่ขวดพลาสติกที่สะอาด กรองด้วยกระดาษกรองใยแก้วขนาด 10 ไมครอน กรองซ้ำอีกครั้งด้วยกระดาษกรองมิลลิพอร์ ขนาด 0.45 ไมครอน โดยใช้ syring เก็บไว้ในขวดขนาด 5 mL ปิดให้สนิท ทำการวิเคราะห์ทันที

2.2 วิธีเตรียมตัวอย่างสำหรับการหาปริมาณโลหะอัลคาไลด์และอัลคาไลด์เอิร์ท

เก็บรักษาตัวอย่างด้วยกรด  $HNO_3$  65 % 5 mL ต่อตัวอย่าง 1 ลิตร ถ่ายตัวอย่างใส่บีกเกอร์ต้มให้เดือดเบาๆ จนเหลือปริมาตร 500 mL ทิ้งให้เย็น กรองแล้วปรับปริมาตรเป็น 1000 mL เก็บใส่ขวดพลาสติกที่สะอาดนำไปวิเคราะห์ เตรียมสารละลายแบบล่งค์โดยใช้ น้ำกลั่น 500 mL แทนตัวอย่างดำเนินวิธีเช่นเดียวกับการเตรียมน้ำตัวอย่าง เก็บไว้เป็นแบบรงค์ตัวอย่าง

3. วิธีวิเคราะห์

3.1 การหาปริมาณแอนไอออนโดยเทคนิค IC  
เตรียมสารละลายมาตรฐานผสมของ  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$  และ  $PO_4^{3-}$  ให้มีความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิด 2, 4, 6, 8 และ 10 ppm นำสารละลายชั้น 10 ppm ฉีดเข้าเครื่อง จะได้โครมาโทแกรมที่มีค่า  $t_R$  ของแอนไอออนแต่ละชนิด แล้วป้อนค่า  $t_R$  ชื่อแอนไอออน และระดับความเข้มข้นลงในตาราง (component table) จากนั้นใช้คำสั่งสร้างกราฟมาตรฐานโดยฉีดสารละลายมาตรฐานแต่ละความเข้มข้นจนครบ เครื่องจะทำการประมวลผลแล้วสร้างกราฟมาตรฐานของไอออนแต่ละชนิด นำสารละลายตัวอย่างที่เตรียมไว้ในข้อ 2.1 มาทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับสารละลายมาตรฐาน ผลวิเคราะห์บางส่วนแสดงในตารางที่ 2

3.2 การหาปริมาณโลหะอัลคาไลด์ โดยเทคนิค AES

เตรียมสารละลายมาตรฐาน Na และ K ที่มี ความเข้มข้น 1, 2, 3, และ 5 ppm ตามลำดับ ดูดสาร

ละลายมาตรฐานเข้าเครื่อง เพื่อวัดค่าการคายแสง เครื่อง จะสร้างกราฟมาตรฐานให้ วิเคราะห์ตัวอย่างโดยนำสารละลายตัวอย่างที่เตรียมในข้อ 2.2 มาทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับสารละลายมาตรฐาน ผลการวิเคราะห์บางส่วนแสดงในตารางที่ 3

### 3.3 การหาปริมาณโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท โดยเทคนิค AAS

เตรียมสารละลายมาตรฐาน Ca ความเข้มข้น 1, 2, 3 และ 5 ppm และ Mg 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.0 ppm จากนั้นนำสารละลายมาตรฐานดูคเข้าเครื่อง เพื่อวัดค่าการดูดกลืน และเครื่องจะสร้างกราฟมาตรฐานให้

วิเคราะห์ตัวอย่างโดยนำสารละลายตัวอย่างที่เตรียมในข้อ 2.2 มาทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับสารละลายมาตรฐาน (ไม่ได้แสดงผลไว้)

### 3.4 การวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารตัวอย่าง (ค่า Conductivity ไม่ได้แสดงผลไว้)

#### ผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียมและโลหะอัลคาไลน์ แสดงในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ (นำเสนอข้อมูลเพียงบางส่วนเท่านั้นเนื่องจากมีพื้นที่จำกัด)

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณคลอไรด์ (Cl) ค่าในวงเล็บเป็นปริมาณคลอไรด์ของปี 2545

สถานีที่	ปริมาณคลอไรด์ (Cl) ในน้ำตัวอย่าง (mg/L)			
	มิถุนายน 2547	สิงหาคม 2547	ธันวาคม 2547	กุมภาพันธ์ 2548
1	166.50 ± 0.14	17.18 ± 0.15	4.94 ± 0.00	37.90 ± 0.62 (12.63 ± 0.12)
2	21,448 ± 0	1,122.1 ± 11.9	5,546.7 ± 0.0	14,555 ± 0(9,435.7 ± 3.2)
3	11,209 ± 0	4,5620 ± 12	4,840.0 ± 0.0	4,473.0 ± 0.0(4,397.7 ± 1.53)
4	573.00 ± 7.50	281.50 ± 27.60	497.95 ± 20.20	3,692.0 ± 35.4 (ไม่ได้เก็บน้ำ)
5	133.45 ± 14.14	11.16 ± 0.03	56.65 ± 0.02	84.88 ± 0.06 (129.40 ± 0.98)
6	428.20 ± 8.10	60.80 ± 2.00	160.65 ± 2.20	323.90 ± 1.95 (646.13 ± 5.08)
7	532.50 ± 78.00	15.79 ± 0.73	143.40 ± 0.40	153.44 ± 0.60 (311.50 ± 3.89)
8	408.64 ± 11.60	16.43 ± 0.22	90.62 ± 10.50	63.16 ± 0.20 (338.07 ± 4.99)
9	132.45 ± 10.00	28.02 ± 0.04	96.70 ± 1.50	99.07 ± 4.52 (309.37 ± 0.83)
10	506.75 ± 16.12	25.67 ± 0.05	255.45 ± 1.00	575.90 ± 0.00(550.30 ± 5.82)
11	*	*	*	*(19,4597 ± 6.)
12	116.26 ± 1.62	25.63 ± 0.20	379.20 ± 0.20	711.00 ± 0.00 (754.60 ± 4.50)
13	167.15 ± 32.80	24.59 ± 0.75	590.00 ± 0.02	385.05 ± 14.14 (540.07 ± .27)

\* ไม่สามารถเก็บน้ำตัวอย่างได้ เนื่องจากชาวบ้านต่อท่อขึ้นมาบนฝั่งจึงต้องใช้ปั๊มน้ำขึ้นมา

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณโซเดียมในน้ำตัวอย่าง แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

สถานี	ปริมาณโซเดียม (Na) ในตัวอย่างน้ำ (mg/L)			
	กุมภาพันธ์ 2548	มิถุนายน 2547	สิงหาคม 2547	ธันวาคม 2547
1	2.46 ± 0.07	107.00 ± 3.25	0.68 ± 0.04	5.47 ± 0.03
2	1698.84 ± 28.30	1942.00 ± 25.46	1,576 ± 2.91	2553.00 ± 41.01
3	489.99 ± 4.95	4454.00 ± 5.66	1,552 ± 1.7	1165.50 ± 7.78
4	20.02 ± 0.97	425.50 ± 0.71	135.00 ± 0.00	380.50 ± 0.71
5	12.28 ± 0.20	26.94 ± 0.08	0.04 ± 0.006	38.58 ± 0.11
6	54.09 ± 0.18	185.60 ± 0.57	1.57 ± 0.17	96.95 ± 0.49
7	52.27 ± 0.31	248.50 ± 2.12	1.63 ± 0.24	99.40 ± 0.57
8	19.28 ± 0.40	164.50 ± 0.71	0.74 ± 0.04	63.15 ± 0.21
9	31.04 ± 0.62	258.50 ± 0.18	2.36 ± 0.09	76.55 ± 2.12
10	36.61 ± 1.36	169.80 ± 0.28	1.82 ± 0.07	166.05 ± 1.20
11	*	*	*	*
12	130.24 ± 2.24	144.05 ± 0.49	1.93 ± 0.04	157.50 ± 2.12
13	52.22 ± 1.28	137.95 ± 2.47	1.45 ± 0.05	202.40 ± 0.14

\* ไม่สามารถเก็บน้ำตัวอย่างได้ เนื่องจากชาวบ้านต่อต้านขุดบ่อน้ำจึงต้องใช้บ่อดึงน้ำขึ้นมา

### สรุปผลและอภิปราย

จากข้อมูลคุณภาพน้ำของแต่ละสถานีในปี 2547 เทียบกับคุณภาพน้ำของปี 2545 สรุปได้ว่า

**สถานีที่ 1 ห้วยผาเอือน** น้ำมีคุณภาพจัดอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้เพื่อการชลประทานได้ และเหมาะกับการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ ปริมาณคลอไรด์สูงสุดที่พบในช่วงต้นฤดูฝนเดือนมิถุนายน คือ  $166.50 \pm 0.14$  mg/L ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุด  $514.00$   $\mu$ s/cm บริเวณดินน้ำใกล้เคียงจุดนี้ไม่พบการทำนาเกลือ คลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นช่วงต้นฤดูฝนน่าจะเกิดจากการชะล้างคราบเกลือบนพื้นดินตามธรรมชาติในช่วงฤดูแล้งพอถึงช่วงที่ฝนตกมากๆ จะไม่เห็นผลกระทบนี้ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ ณ สถานีนี้ระหว่างปี 2545 กับ 2547 พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกฤดูจากยกเว้นต้นฤดูฝนปี 2547 มีค่าต่ำกว่าต้นฤดูฝนปี 2545 เนื่องจากปี 2547 เก็บตัวอย่างเดือนมิถุนายนซึ่งมีฝนตกมากกว่า แสดงว่าการชะล้างตามธรรมชาติเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

**สถานีที่ 2 ห้วยปลาตอง** เป็นแหล่งน้ำในอำเภอบ้านดุงรับน้ำจากห้วยผาเอือนและเป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากการทำนาเกลือบริเวณบ้านดุง ช่วงฤดูฝนผู้ประกอบการหยุดทำนาเกลือและมีการเจือจางของน้ำฝนทำให้ปริมาณคลอไรด์ลดลงเท่ากับ  $1,122.00 \pm 3.25$  mg/L และค่าการนำไฟฟ้าลดลง เท่ากับ  $2,150.00$   $\mu$ s/cm คุณภาพน้ำดีขึ้นมีปลาอาศัยอยู่ แต่ส่วนใหญ่เป็นปลานิลตัวเล็กๆ เมื่อฝนหยุดตกเริ่มมีการทำนาเกลือ ในเดือนพฤศจิกายนน้ำ ณ จุดนี้จะได้รับอิทธิพลจากน้ำบาดาลเค็มที่ถูกดูดขึ้นมาเพื่อผลิตเกลือทำให้น้ำบริเวณนี้เค็มจัดขึ้นเป็นลำดับ จนถึงช่วงเดือนกุมภาพันธ์ตรวจพบปริมาณคลอไรด์ถึง  $14,555.00 \pm 0.00$  mg/L ค่าการนำไฟฟ้า  $3,990$   $\mu$ s/cm น้ำจากสถานีนี้จะไหลลอดใต้ถนนผ่านพื้นที่ทำนาเกลือแล้วไหลไปลงอ่างเก็บน้ำท่ามะนาว ในช่วงฤดูร้อนน้ำระเหยเร็วมาก น้ำจะแห้งก่อนไหลไปถึงอ่างเก็บน้ำและทิ้งคราบเกลือไว้ในบริเวณก่อนถึงอ่างเก็บน้ำ เมื่อเปรียบเทียบ

ปริมาณคลอไรด์ ณ สถานีนี้ระหว่างปี 2545 กับ 2547 พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกฤดูกาล แสดงว่าผลกระทบการทำนาเกลือบ้านดุงมีผลรุนแรงขึ้น

**สถานีที่ 3** อ่างเก็บน้ำท่ามะนาว สถานีนี้รับน้ำที่ไหลจากห้วยปลาตองจึงทำให้น้ำในอ่างมีความเค็มเพิ่มขึ้นจนกลายเป็นอ่างเก็บน้ำเค็ม กล่าวได้ว่า เป็นผลกระทบจากการทำนาเกลือของอำเภอบ้านดุงรุนแรง และเป็นพื้นที่กว้าง สถานีนี้มีความเค็มสูงมาก พบคลอไรด์ช่วงเดือนมิถุนายนสูงถึง  $11,209 \pm 0$  mg/L ค่าการนำไฟฟ้า  $13,810.00$   $\mu\text{s/cm}$  เมื่อผ่านช่วงที่มีฝนตกชุกไปแล้วน้ำมีความเค็มลดลง ปริมาณคลอไรด์ลดลงเท่ากับ  $4,560.20 \pm 11.80$  mg/L ในเดือนธันวาคม ปริมาณคลอไรด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในปี 2547 มีค่า  $4,022.0 \pm 910.0$  mg/L เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ ณ สถานีนี้ระหว่างปี 2545 กับ 2547 พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจสรุปได้ว่าน้ำในสถานีนี้ได้รับผลกระทบจากการทำนาเกลือของอำเภอบ้านดุงรุนแรงมากกว่าปี 2545 ช่วงฤดูแล้งจะพบคราบเกลือเป็นริ้วมีรอบอ่างประมาณ 1 ตารางกิโลเมตร ทำให้พื้นที่เหล่านั้นเกิดสภาวะดินเค็มและไม่อาจใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้ ยังอาจส่งผลกระทบต่อน้ำบาดาลบริเวณใกล้เคียง (เอกอัมพล เทียมกลาง 2546) คราบเกลือเหล่านี้เกิดจากน้ำเค็มที่ไหลล้นจากนาเกลือบริเวณบ้านดุง ในฤดูฝนน้ำฝนจะชะคราบเกลือเหล่านี้ลงสู่อ่างเก็บน้ำ และไหลล้นข้ามฝายลงไปรวมกับน้ำในห้วยทวน (สถานีที่ 4) และไหลลงแม่น้ำสงครามในที่สุด น้ำในอ่างเก็บน้ำนี้ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการชลประทานหรือเป็นแหล่งพักพิงของสัตว์น้ำได้ นั่นหมายความว่าอ่างเก็บน้ำแห่งนี้ใช้ประโยชน์อะไรไม่ได้แล้ว หากมีการทำนาเกลือกันอย่างต่อเนื่องและมากขึ้น ควรมีการดูแลเกี่ยวกับการเพิ่มขึ้นของระดับความเค็มของน้ำในอ่างเก็บน้ำนี้อย่างใกล้ชิด จากการศึกษาในปี 2547 สามารถยืนยันได้ว่าน้ำในสถานีนี้มีความเค็มสูงมากกว่าปี 2545 ถึง 3 เท่า และควรมีการศึกษาการกระจายของดินเค็มและคุณภาพน้ำบาดาลในบริเวณรอบอ่างเก็บน้ำด้วยเพื่อหาทางป้องกันต่อไป

**สถานีที่ 4** สะพานทวน สถานีนี้จะมีน้ำไหลในช่วงฤดูฝนเพราะมีพื้นที่รับน้ำฝนมาก และเมื่อฝนตกหนักขึ้นจะมีน้ำเค็มล้นผ่านฝายน้ำล้นจากอ่างเก็บน้ำท่ามะนาวมาเจือปน การปนเปื้อนของน้ำเค็มจึงเกิดจากอิทธิพลของอ่างเก็บน้ำ เพราะบริเวณใกล้เคียงไม่มีการทำนาเกลือ ห้วยนี้จะมีน้ำไหลเฉพาะช่วงฤดูฝนเท่านั้น เมื่อฝนหยุดตกน้ำในห้วยจะแห้งลงอย่างรวดเร็ว ช่วงเดือนกุมภาพันธ์จะไม่มีน้ำไหลเลย โดยปกติช่วงฤดูฝนจะมีน้ำจากสถานีนี้ไหลไปลงแม่น้ำสงครามบริเวณระหว่างสถานีที่ 5 และ 6 เป็นเหตุให้น้ำในแม่น้ำ ณ สถานีที่ 6 มีความเค็มสูงขึ้น ถือว่าเป็นอิทธิพลที่เกิดจากการทำนาเกลือบ้านดุง ณ สถานีนี้มีค่าคลอไรด์ระหว่าง  $281.50 \pm 27.60$  ถึง  $3,692.00 \pm 35.37$  mg/L ค่าการนำไฟฟ้าระหว่าง  $688.00$   $\mu\text{s/cm}$  ถึง  $7,340.00$   $\mu\text{s/cm}$  และ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ ณ สถานีนี้ระหว่างปี 2545 กับ 2547 พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกฤดูกาลเช่นกัน

**สถานีที่ 5** สะพานแม่น้ำสงคราม บริเวณนี้ถือเป็นต้นลำน้ำสงครามสิ่งแวดล้อมโดยรอบเป็นพื้นที่ป่าทุ่งป่าทาม เนื่องจากเป็นพื้นที่ต่ำในช่วงฤดูฝนจะต้องรับน้ำฝนเป็นจำนวนมากจึงท่วมป่าเพราะไหลลงแม่น้ำสงครามไม่ทัน บริเวณที่ใกล้เคียงสถานีที่ 5 มีการทำนาเกลือที่บ้านหนองกว้าง และบ้านโนนสะแบง ซึ่งอยู่ห่างออกไปประมาณ 12 กิโลเมตร (ตามแผนที่ในรูปที่ 1) แต่ปริมาณคลอไรด์ในสถานีที่ 5 เมื่อเทียบกับสถานีที่ 2 และ 3 (ซึ่งได้รับผลกระทบจากการทำนาเกลือ) มีค่าแตกต่างกันมาก และพื้นที่โดยรอบของสถานีนี้ไม่พบคราบเกลือในช่วงฤดูแล้ง เมื่อถึงฤดูฝนคุณภาพน้ำ ณ สถานีนี้จึงเหมือนกับน้ำผิวดินที่สะอาดทั่วไป ปริมาณคลอไรด์ต่ำสุด  $11.16 \pm 0.03$  mg/L ค่าการนำไฟฟ้าต่ำสุด  $91.00$   $\mu\text{s/cm}$  และมีค่าสูงสุดในช่วงเดือนมิถุนายนมีค่า  $133.45 \pm 14.14$  mg/L ค่าการนำไฟฟ้า  $509.00$   $\mu\text{s/cm}$  เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ ณ สถานีนี้ระหว่างปี 2545 กับ 2547 พบว่ามีแนวโน้มลดลงจาก 2545 แสดงว่าน้ำจุดนี้มีคุณภาพดีขึ้นซึ่งอาจเกิดจากในปี 2547 มีปริมาณฝนตกมากกว่าปี 2545

คุณภาพน้ำ ณ จุดนี้จัดอยู่ในระดับดีตลอดปี สามารถนำไปใช้เพื่อการอุปโภค การชลประทาน และสัตว์น้ำสามารถอาศัยอยู่ได้ แต่น้ำในบริเวณนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วในเดือนธันวาคมหลังหมดฝน และเหลือระดับน้ำไม่สูงนักในเดือนกุมภาพันธ์ จากการศึกษาของโครงการการไหลของน้ำใต้ดินและการเคลื่อนย้ายเกลือในพื้นที่ท่าเกลือ พบว่า การทำนาเกลือบริเวณบ้านหนองกว้างและโนนสะแบงมีการระบายน้ำจากนาเกลือลงสู่ลำห้วยต่างๆ บริเวณใกล้เคียง ซึ่งเป็นพื้นที่ลุ่มฤดูฝนจะมีน้ำท่วมแต่ในฤดูแล้งในลำห้วยจะเหือดแห้งพบคราบเกลืออยู่ในร่องน้ำ แต่พอถึงฤดูฝนน้ำฝนจะชะเกลือเหล่านี้ไหลลงลำน้ำสงครามบริเวณบ้านคำยางและบ้านโนนสะอาดบริเวณห้วยคาน ในการศึกษาครั้งนี้มิได้เก็บตัวอย่าง ณ จุดนี้ แต่เก็บตัวอย่างที่บ้านท่าสะอาดซึ่งห่างจากจุดนี้ไปอีกประมาณ 14 กิโลเมตร ตามลำน้ำ

**สถานีที่ 6** ห้วยหล่น้ำในจุดนี้ได้รับอิทธิพลโดยตรงจากห้วยทวนซึ่งรับน้ำเต็มจากอ่างเก็บน้ำท่ามะนาว โดยไหลผ่านทางหน้าฝายของอ่างเก็บน้ำท่ามะนาว ในช่วงฤดูฝนที่ฝนตกหนัก นอกจากจะมีน้ำจากสถานีที่ 5 มาเจือจางแล้วยังมีน้ำฝนจากพื้นที่ริมน้ำสองฝั่งแม่น้ำไหลลง ณ จุดนี้ด้วย ปริมาณคลอไรด์ต่ำสุด ณ สถานีนี้เท่ากับ  $60.80 \pm 0.17$  mg/L ค่าการนำไฟฟ้าต่ำสุด  $129.00$   $\mu$ s/cm ในเดือนสิงหาคม สามารถนำน้ำจากสถานีนี้ไปใช้ในการอุปโภคและการชลประทานได้ ในช่วงฤดูแล้งนอกจากจะไม่มีฝนตกแล้วอัตราการระเหยของน้ำจะสูงขึ้นเพราะมีแดดจัด ความชื้นในอากาศน้อย และระดับน้ำในจุดนี้ลึกเพียง 2 เมตรกว่าเท่านั้น ความเค็มในแม่น้ำจึงเพิ่มขึ้น และเพิ่มสูงสุดในเดือนมิถุนายนโดยปริมาณคลอไรด์สูงสุด  $428.20 \pm 8.50$  mg/L ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุด  $1,733.0$   $\mu$ s/cm อาจเนื่องมาจากการที่น้ำฝนชะล้างคราบเกลือที่สะสมในดินช่วงฤดูแล้งทำให้เกิดการปนเปื้อนมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ ณ สถานีนี้ระหว่างปี 2545 กับ 2547 พบว่า มีแนวโน้มลดลงทุกฤดูกาล ซึ่งเป็นอิทธิพลจากฝน ยกเว้นต้นฤดูฝนเพราะสถานีนี้อยู่ในลำน้ำและได้รับผลกระทบทางอ้อมจากสถานีที่ 4 น้ำ ณ สถานี

นี้จึงมีคุณภาพต่ำกว่าสถานีที่ 5 ทุกฤดูกาลด้วย

**สถานีที่ 7** ได้สะพานบ้านหนองกา สถานีนี้ห่างจากสถานีที่ 6 เป็นระยะทาง 7 กิโลเมตรตามลำน้ำ เป็นจุดที่ใช้ศึกษาผลกระทบจากการชะล้างจากกิจกรรมทำเกลือแหล่งใหญ่ ซึ่งได้แก่ บริเวณบ้านเขมซึ่งอยู่ฝั่งซ้ายของลำน้ำอยู่ห่างออกไป 17 กิโลเมตร ปริมาณสูงสุดของคลอไรด์ในเดือนมิถุนายน  $532.50 \pm 78.00$  mg/L ค่าการนำไฟฟ้า  $1,498.0$   $\mu$ s/cm ปริมาณต่ำสุดในช่วงเดือนสิงหาคมเท่ากับ  $15.79 \pm 0.73$  mg/L ค่าการนำไฟฟ้า  $162.00$   $\mu$ s/cm จากการเปรียบเทียบคุณภาพน้ำระหว่างจุดใกล้เคียง คือ สถานีที่ 6 ในฤดูกาลเดียวกัน พบว่า มีระดับความเค็มต่ำกว่าสถานีที่ 6 สรุปได้ว่า การทำเกลือบริเวณบ้านเขมไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในแม่น้ำสงคราม การทำเกลือในบ้านเขมอาจส่งผลกระทบต่อพื้นที่เพาะปลูกใกล้เคียงและคุณภาพน้ำบาดาลในบริเวณนั้น จึงน่าจะมีการศึกษาคุณภาพน้ำบาดาล และสภาพดินเค็มในบริเวณนั้น เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ ณ สถานีนี้ระหว่างปี 2545 กับ 2547 ปริมาณเกลือคลอไรด์มีแนวโน้มลดลงทุกฤดูกาลยกเว้นต้นฤดูฝน แต่คุณภาพจะดีกว่าสถานีที่ 6 เล็กน้อย

**สถานีที่ 8** บ้านนาดี บริเวณนี้เป็นแม่น้ำสงครามที่ไหลผ่านบ้านโพธิ์ชุมพลและบ้านหนองบัวเงิน และอยู่ในเขตบ้านนาดีซึ่งไม่มีการทำเกลือ ชาวบ้านได้ขุดหนองน้ำในหมู่บ้านเป็นแนวขนานไปกับแม่น้ำสงคราม เพื่อกักเก็บน้ำจัดไว้ใช้ในฤดูแล้ง ในฤดูฝนช่วงฝนตกชุกน้ำฝนจะล้นผ่านท่อระบายน้ำลงสู่แม่น้ำสงคราม น้ำในบริเวณนี้จึงมีคุณภาพดี ปริมาณสูงสุดของคลอไรด์ในเดือนมิถุนายน  $408.64 \pm 11.60$  mg/L ค่าการนำไฟฟ้า  $1,412.00$   $\mu$ s/cm ปริมาณคลอไรด์ต่ำสุดในเดือนสิงหาคม  $16.43 \pm 0.22$  mg/L ค่าการนำไฟฟ้า  $101.00$   $\mu$ s/cm ในภาพรวมน้ำในสถานีนี้จะมีคุณภาพดีกว่าสถานีที่ 7 แสดงให้เห็นว่า ไม่มีการปนเปื้อนเพิ่มขึ้นระหว่างสถานีที่ 7 ถึงสถานีที่ 8 แต่จะมีน้ำคุณภาพดีไหลเข้ามาเจือจางระหว่างสถานีที่ 7 ถึงสถานีที่ 8 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ ณ สถานีนี้ระหว่างปี 2545 กับ 2547 ปริมาณเกลือคลอไรด์มี

แนวโน้มลดลงทุกฤดูกาลยกเว้นต้นฤดูฝนและคุณภาพดีกว่าสถานีที่ 7 เล็กน้อย

**สถานีที่ 9 บ้านท่าสวาท (ลำเต่า) น้ำในบริเวณนี้มีคุณภาพพอๆ กับสถานีที่ 8 แต่ไม่มีน้ำฝนล้นจากหนองเข้ามาเจือจาง อย่างไรก็ตาม คุณภาพน้ำ ณ จุดนี้ในช่วงฤดูฝนเดือนสิงหาคมซึ่งมีฝนตกชุกมีปริมาณคลอไรด์ต่ำสุด  $28.02 \pm 0.04$  mg/L ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ  $143.00$   $\mu$ s/cm และพบปริมาณสูงสุดในเดือนมิถุนายน  $132.45 \pm 10.00$  mg/L ค่าการนำไฟฟ้า  $571.00$   $\mu$ s/cm และไม่ได้รับผลกระทบจากการทำนาเกลือ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ ณ สถานีนี้ระหว่างปี 2545 กับ 2547 ปริมาณเกลือคลอไรด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกฤดูกาลยกเว้นเดือนกุมภาพันธ์ แต่คุณภาพพอๆ กับสถานีที่ 8**

**สถานีที่ 10 หนื่อน้ำพุเค็ม 100 เมตร บริเวณนี้อยู่ห่างจากสถานีที่ 11 ซึ่งเป็นน้ำพุเค็มกลางลำน้ำสงครามบริเวณบ้านท่าสะอาด ตำบลท่าสะอาด อำเภอเซกา จังหวัดหนองคาย จึงมีปริมาณคลอไรด์สูงกว่าสถานีที่ 9 อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากได้รับผลกระทบจากบริเวณน้ำพุเค็ม โดยปริมาณคลอไรด์สูงสุดในเดือนกุมภาพันธ์ มีค่า  $575.90 \pm 0.00$  mg/L ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุด  $1,402.0$   $\mu$ s/cm ในช่วงฝนตกหนัก (เดือนสิงหาคม) น้ำท่วมไม่มีการต้มเกลือ น้ำจึงมีคุณภาพดีคือ มีปริมาณคลอไรด์  $25.67 \pm 0.07$  mg/L และค่าการนำไฟฟ้า  $116.00$   $\mu$ s/cm ช่วงน้ำลดเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2545 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ ณ สถานีนี้ระหว่างปี 2545 กับ 2547 ปริมาณเกลือคลอไรด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกฤดูกาล ยกเว้นเดือนสิงหาคมจะมีปริมาณลดลงเล็กน้อย ในเดือนธันวาคมปี 2547 ปริมาณเกลือเพิ่มสูงกว่าปี 2545 มาก เนื่องจากชาวบ้านย้ายหม้อต้มเกลือจากบ้านท่าสะอาดมาเป็นจุดที่ 11 ซึ่งอยู่ใกล้กับจุดที่ 10 มากกว่า**

**สถานีที่ 12 บริเวณใกล้กับจุดลำเลียงน้ำพุเค็ม น้ำในสถานีนี้จะได้รับการปนเปื้อนจากการดูดน้ำเค็มขึ้นมาต้มเกลือจากสถานีที่ 11 โดยตรง พบปริมาณคลอไรด์สูงสุดในเดือนกุมภาพันธ์มีค่า  $711.00 \pm 0.00$  mg/L**

ค่าการนำไฟฟ้า  $1689$   $\mu$ s/cm ปริมาณคลอไรด์ถูกเจือจางลงมากในเดือนสิงหาคมมีค่า  $25.63 \pm 0.20$  mg/L ค่าการนำไฟฟ้า  $127$   $\mu$ s/cm เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ ณ สถานีนี้ระหว่างปี 2545 กับ 2547 ปริมาณเกลือคลอไรด์มีแนวโน้มลดลงทุกฤดูกาล ยกเว้นเดือนธันวาคมซึ่งเป็นผลมาจากปี 2545 มีการย้ายโรงเรือนต้มเกลือจากบริเวณบ้านท่าสะอาดจึงไม่มีการต้มเกลือในช่วงเก็บตัวอย่าง แต่ปี 2547 เดือนเดียวกันมีการต้มเกลือบนฝั่งแม่น้ำ ณ สถานีที่ 11 แล้ว จึงทำให้มีการปนเปื้อนของคลอไรด์สูงขึ้น

**สถานีที่ 13 ท้ายน้ำพุห่างจากสถานีที่ 12 ประมาณ 600 เมตรตามลำน้ำ เป็นน้ำที่ไหลมาจากสถานีที่ 12 เนื่องจากมีน้ำเจือจางจากจุดที่ 10 จึงมีคุณภาพดีกว่าจุดที่ 12 ปริมาณคลอไรด์สูงสุดในเดือนธันวาคมมีค่า  $590.00 \pm 0.04$  mg/L ค่าการนำไฟฟ้า  $1,075$   $\mu$ s/cm ปริมาณคลอไรด์ต่ำสุดในเดือนสิงหาคม  $24.59 \pm 0.75$  mg/L ค่าการนำไฟฟ้า  $118$   $\mu$ s/cm เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ ณ สถานีนี้ระหว่างปี 2545 กับ 2547 ปริมาณเกลือคลอไรด์มีแนวโน้มลดลงทุกฤดูกาลยกเว้นเดือนธันวาคม การปนเปื้อนที่ลดลงนี้เนื่องจากการที่ชาวบ้านต่อท่อคูดน้ำเค็มมาต้มเกลือบริเวณฝั่งทำให้คุณภาพน้ำดีขึ้น น้ำจากสถานีนี้จะไหลสู่แม่น้ำโขงต่อไป**

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยขอนแก่น เพื่อนร่วมงานจากภาควิชาเทคโนโลยีธรณี คณะเทคโนโลยีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการสำรวจพื้นที่และข้อมูลที่จำเป็นต่างๆ ภาควิชาเคมี และคณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ใช้เครื่องมือต่างๆ จึงใคร่ขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

### บรรณานุกรม

ชุตินาถ ภูคุ้มสมุทร สุนันทา เสงรัมย์ รัตนา มหาชัย ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง งามนิจ นนทโส ตริตราภรณ์ ชุศรี วิรัช ว่องพัฒนานุกูล เฉลิม เรืองวิริยะชัย ศุภลักษณ์ ศรีจรรย์ และสุจิตรา อุดลย์เดชา.

- (2531). ผลกระทบของอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมที่มีต่อคุณภาพของน้ำในลำน้ำพอง. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 16 (2): 96-118.
- ชุตินา คูคุ้มมูทร สุนันทา เสงรัมย์ รัตนา มหาชัย ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง งามนิจ นนทโส ตรีตราภรณ์ ชุศรี วิรัช ว่องพัฒนากุล เฉลิม เรื่องวิริยะชัย สุกลักษณ์ ศรีจารนัย และสุจิตรา อุดลย์เดชา. (2531). ผลกระทบของอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมที่มีต่อคุณภาพของน้ำในลำน้ำพอง (ต่อ). วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 16 (3): 161-179.
- ชุตินา คูคุ้มมูทร สุนันทา เสงรัมย์ รัตนา มหาชัย ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง งามนิจ นนทโส ตรีตราภรณ์ ชุศรี วิรัช ว่องพัฒนากุล เฉลิม เรื่องวิริยะชัย สุกลักษณ์ ศรีจารนัย และสุจิตรา อุดลย์เดชา. (2531). ผลกระทบของอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมที่มีต่อคุณภาพของน้ำในลำน้ำพอง (ต่อ). วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 16 (4): 227-235.
- ชุตินา คูคุ้มมูทร สุนันทา เสงรัมย์ รัตนา มหาชัย ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง งามนิจ นนทโส ตรีตราภรณ์ ชุศรี วิรัช ว่องพัฒนากุล เฉลิม เรื่องวิริยะชัย สุกลักษณ์ ศรีจารนัย และสุจิตรา อุดลย์เดชา. (2532). ผลกระทบของอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมที่มีต่อคุณภาพของน้ำในลำน้ำพอง (ต่อ). วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 17 (1): 50-62.
- ชุตินา คูคุ้มมูทร สุนันทา เสงรัมย์ รัตนา มหาชัย ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง งามนิจ นนทโส ตรีตราภรณ์ ชุศรี วิรัช ว่องพัฒนากุล เฉลิม เรื่องวิริยะชัย สุกลักษณ์ ศรีจารนัย และสุจิตรา อุดลย์เดชา. (2531). ผลกระทบของอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมที่มีต่อคุณภาพของน้ำในลำน้ำพอง (ตอนจบ). วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 17 (2): 103-116.



**ความหลากหลายของโพรโทซัวในบ่อบำบัดน้ำเสีย  
แบบชีวภาพของโรงงานน้ำตาลมิตรภูเวียง  
Diversity of Protozoa in Biological Wastewater  
Treatment Ponds of Mitr Phuviang Sugar Factory**

พินิจ หวังสมนึก และ วรณยุภา เย็นเฉื่อย<sup>1</sup>

**บทคัดย่อ**

การศึกษาความหลากหลายของโพรโทซัวในบ่อบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพของโรงงานน้ำตาลมิตรภูเวียง อำเภอหนองเรือ จังหวัดขอนแก่น จำนวน 8 บ่อ ใน 3 ฤดูกาลผลิต ช่วงแรก (ฤดูหีบอ้อย) ระหว่างปลายเดือนมีนาคมถึงต้นเดือนเมษายน 2547 ช่วงที่สอง (ฤดูปิดหีบอ้อย) ระหว่างปลายเดือนเมษายนถึงต้นเดือนพฤษภาคม 2547 และช่วงที่สาม (ช่วงหลังการตากบ่อก่อนฤดูเปิดหีบอ้อย) ปลายเดือนพฤศจิกายน 2547 และตรวจวัดคุณภาพน้ำทางเคมีและกายภาพ เช่น อุณหภูมิ (T) ค่าความเป็นกรด-เป็นด่าง (pH) ค่าของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ (TDS) ค่าของแข็งที่แขวนลอยในน้ำ (SS) และค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (BOD) ค่าคลอไรด์ (Cl) ที่ละลายน้ำ ตรวจสอบลักษณะเพื่อระบุชนิดของโพรโทซัวด้วยกล้องจุลทรรศน์ใช้แสง พบโพรโทซัวรวมทั้งสิ้น 13 Class 97 ชนิด ได้แก่ Class Karyorelictea 2 ชนิด Class Spirotrichea 28 ชนิด Class Prostomatea 2 ชนิด Class Litostomatea 8 ชนิด Class Phyllopharyngea 4 ชนิด Class Oligohymenophorea 15 ชนิด Class Nassophorea 3 ชนิด Class Euglenoidea 20 ชนิด Class Phytomonadea 7 ชนิด Class Cryptomonadea 1 ชนิด Class Lobosea 12 ชนิด Class Filoreticulosea 1 ชนิด และ Class Heliozoa 3 ชนิด โพรโทซัวส่วนใหญ่มีการกระจายตัวคล้ายกันทุกบ่อบำบัด ยกเว้นโพรโทซัวใน Class Karyorelictea Class Prostomatea Class Filoreticulosea และ Class Heliozoa มีจำนวนค่อนข้างน้อย ส่วน Class Spirotrichea และ Class Euglenoidea มีค่อนข้างมาก จำนวนและความแตกต่างของชนิดโพรโทซัวในบ่อบ้างๆ เนื่องจากความแตกต่างด้านกายภาพและเคมีของแหล่งน้ำ เช่น ค่าความเป็นกรด-เป็นด่าง อุณหภูมิ และค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี โพรโทซัวบางชนิดพบเฉพาะในน้ำเสียมาก เช่น *Podophrya collini*, *P. fixa*, *Spirostomum teres* และ *Acinaria incurvata* บางชนิดพบเฉพาะในน้ำสะอาด เช่น *Amphileptus craparedei*, *Lacrymaria olor*, *Tetrahymena vorax*, *Entosiphon sulcatum*, *Distigmopsis grossei* and *Arcella bathystoma* โพรโทซัวเหล่านี้อาจใช้เป็นดัชนีชีวภาพชี้วัดคุณภาพน้ำได้

<sup>1</sup> ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

### Abstract

The species diversity of protozoa was investigated in seven biological wastewater treatment ponds of Mitr Phuviang Sugar Factory, Nongrua District, Khon Kaen Province. Water samples were collected in three phases of sugar production, including sugar phase (late of March to early of April 2004), non-sugar production phase (late of April to early of May 2004) and after drying pond phase (late of November 2004). Water samples were analyzed for the following chemical and physical parameters: temperature (T), pH, BOD, total dissolved solid (TDS), suspended solid (SS) and chloride (Cl). Protozoa were identified by light microscopy. Ninety-seven species of protozoa belonging to thirteen classes were found; two species of Class Karyorelictea, twenty-eight species of Class Spirotrichea, two species of Class Prostomatea, eight species of Class Litostomatea, four species of Class Phyllopharyngea, fifteen species of Class Oligohymenophorea, three species of Class Nassophorea, twenty species of Class Euglenoidea, seven species of Class Phytomonadea, one species of Class Cryptomonadea, twelve species of Class Lobosea, one species of Class Filoreticulosea and three species of Class Heliozoa. Protozoa communities were similar at the different sites. There were very few protozoa in Class Karyorelictea, Prostomatea, Filoreticulosea and Heliozoa whereas there were many Spirotrichea and Euglenoidea. The different numbers of species of protozoa affected from the difference of both physical and chemical factors of the water in the ponds. Some factor could limit the growth of protozoa. The obvious factors that caused the difference were pH, temperature and BOD. Some species of protozoa were found only in severe wastewater, such as *Podophrya collini*, *P. fixa*, *Spirostomum teres* and *Acinaria incurvata*. Some species were found in clean water, such as *Amphileptus craparedei*, *Lacrymaria olor*, *Tetrahymena vorax*, *Entosiphon sulcatum*, *Distigmopsis grossei* and *Arcella bathystoma*. These species may be used as bioindicators of water quality.

**คำสำคัญ:** ความหลากหลายของโพรโทซัว, พารามิเตอร์ด้านเคมีฟิสิกส์, บ่อบำบัดน้ำเสีย

**Key words:** Protozoa Diversity, Physicochemical Parameters, Wastewater Treatment Ponds

### บทนำ

โพรโทซัวที่ดำรงชีวิตอิสระในธรรมชาติมีบทบาทสำคัญต่อระบบนิเวศของแหล่งน้ำ นอกจากนี้มีบทบาทต่อสัตว์ชนิดต่างๆ ในแหล่งน้ำแล้วยังเป็นตัวควบคุมการเพิ่มปริมาณของแบคทีเรียและพวกรา (Finlay and Esteban, 1998) จากการตรวจสอบกระเพาะอาหารของปลา พบว่า มีโพรโทซัวที่มีเปลือกจำนวนมาก (Hardoim and Heckman, 1996) นักชีววิทยาจำนวนหนึ่งได้ศึกษาการใช้โพรโทซัวในการบ่งชี้คุณภาพน้ำ โดยดูจากชนิดที่พบมากหรือพบเฉพาะแหล่งน้ำแบบต่างๆ เช่น โพรโทซัวบางชนิดทนต่อสภาพน้ำเสียที่เกิด

จากสารเคมี เช่น แอมโมเนียและไฮโดรเจนซัลไฟด์ ขณะที่โพรโทซัวอื่นๆ ไม่สามารถทนทานสภาพน้ำเสียในแบบเดียวกันนี้ได้ (Kudo, 1966) บพิธ จารุพันธุ์ และ นันทพร จารุพันธุ์ (2532) พบว่า มีโพรโทซัวจำนวน 30 สกุล สามารถใช้เป็นดัชนีบ่งบอกคุณภาพน้ำของบึงมักกะสัน กรุงเทพมหานคร และ พินิจ หวังสมนึก และคณะ (2545) พบโพรโทซัว 13 ชนิด ที่พบเฉพาะในบ่อน้ำเสียก่อนได้รับการบำบัดของบึงทุ่งสร้าง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น Lee et al. (2004) พบว่า มีโพรโทซัวพวกซิลิเอท 25 ชนิดใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ความสกปรกของน้ำได้

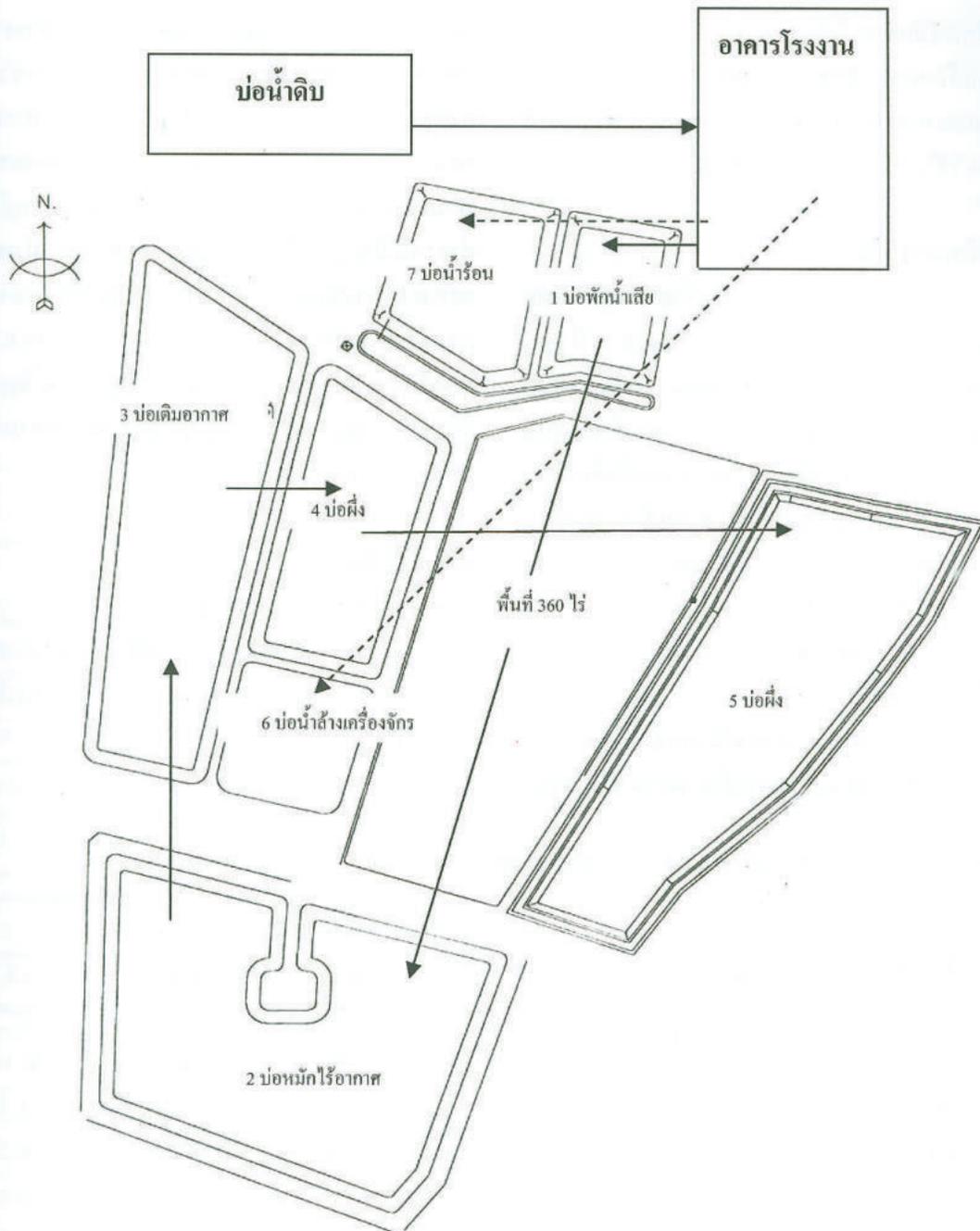
ขั้นตอนการผลิตและการจัดระบบต่างๆ ของโรงงานน้ำตาลมิตรภูเวียง อำเภอหนองเรือ จังหวัดขอนแก่น ได้รับการรับรองมาตรฐาน ISO 14001 ในกระบวนการผลิตใช้การฟอกขาวน้ำตาลด้วยเรซินแทนการใช้สารเคมี น้ำทิ้งที่เกิดจากกระบวนการผลิตไม่มีสารเคมีเจือปน มีการบำบัดน้ำเสียตามขั้นตอนแบบชีวภาพ (biological wastewater treatment) ปัจจัยหลักในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย คือ การใช้สิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำโดยเฉพาะจุลินทรีย์ต่างๆย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นอาหาร นอกจากนี้ ยังมีการบำบัดน้ำเสียด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำแบบประดิษฐ์ (constructed wetland) โดยมีพืชน้ำเป็นองค์ประกอบหลักในการบำบัดน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมหรือนำไปใช้ประโยชน์ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาความหลากหลายของโพรโทซัวตามคุณสมบัติที่แตกต่างกันของน้ำในบ่อบำบัดน้ำเสียระดับต่างๆ

### สถานที่ดำเนินการวิจัย

บ่อบำบัดน้ำเสียของโรงงานมี 7 บ่อ (รูปที่ 1) ซึ่งมีลักษณะและหน้าที่ต่างๆ กัน คือ บ่อที่ 1 บ่อพักน้ำเสีย น้ำเสียในบ่อนี้จัดอยู่ในประเภทน้ำเสียมาก มีปริมาณอินทรียสารและของแข็งที่ละลายน้ำปนเปื้อนสูง น้ำมีสีดำคล้ำ กลิ่นเหม็น ผิวหน้ามีฝ้าหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร บ่อที่ 2 บ่อหมักไร้อากาศ น้ำเสียในบ่อนี้จัดเป็นน้ำเสียมากเช่นกัน แต่มีปริมาณอินทรียสารและของแข็งที่ละลายน้ำปนเปื้อนน้อยกว่าบ่อพักน้ำเสีย น้ำมีสีดำ กลิ่นเหม็น ผิวหน้ามีฝ้าหนาประมาณ 4 มิลลิเมตร มีผักทอดยอดจำนวนมากขึ้นบริเวณริมฝั่ง มีนกเป็ดน้ำมาอาศัยอยู่ บ่อที่ 3 บ่อเติมอากาศ น้ำเสียในบ่อนี้จัดเป็นน้ำที่ก้ำกึ่งพื้นสภาพ มีปริมาณอินทรียสารปนเปื้อนลดลงมาก น้ำมีสีดำ ไม่มีตะกอนและกลิ่นเหม็น มีหนอนแดงอาศัยอยู่จำนวนมาก บ่อที่ 4 บ่อกึ่งผึ่งน้ำเสีย ในบ่อนี้ก้ำกึ่งพื้นสภาพ มีปริมาณอินทรียสารปนเปื้อนน้อยกว่าบ่อเติมอากาศมาก น้ำค่อนข้างใส ไม่มีกลิ่นเหม็น มีสาหร่ายสีเขียว บ่อที่ 5 บ่อผึ่ง น้ำเสียในบ่อนี้เป็นน้ำที่พื้นสภาพแล้ว มีปริมาณอินทรียสาร

ปนเปื้อนต่ำ น้ำใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่นเหม็น มีพืชน้ำและสัตว์น้ำ เช่น พวกแมลงน้ำ จำนวนมาก บ่อที่ 6 บ่อน้ำล้างเครื่องจักร น้ำเสียในบ่อนี้มีโซดาไฟปริมาณสูง น้ำมีสีแดง เหนียวข้น กลิ่นเหม็นฉุน ไม่มีสัตว์น้ำ บ่อที่ 7 บ่อน้ำร้อน น้ำเสียในบ่อนี้มีลักษณะคล้ายบ่อกึ่งผึ่ง แต่มีอุณหภูมิและปริมาณสารอินทรีย์สูงกว่า น้ำมีสีดำ มีผักทอดยอดจำนวนมากขึ้นบริเวณริมฝั่ง นอกจากนี้ยังมีบ่อน้ำดิบซึ่งรับน้ำมาจากแหล่งน้ำในธรรมชาติจากลำน้ำเชิญ เป็นน้ำที่มีคุณภาพดี มีปริมาณอินทรียสารปนเปื้อนต่ำมาก น้ำใส ไม่มีกลิ่น มีพืชน้ำและสัตว์น้ำอาศัยอยู่จำนวนมาก

ปัจจัยหลักในกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงาน คือ ใช้สิ่งมีชีวิตต่างๆ ที่อาศัยอยู่ในน้ำโดยเฉพาะจุลินทรีย์ช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์จากน้ำเสียจากบ่อบำบัดน้ำเสียต่างๆ น้ำเสียจากกิจกรรมต่างๆ ในโรงงานไหลไปรวมกันในบ่อพักน้ำเสีย (บ่อที่ 1) มีจุดสูบน้ำต่อไปยังบ่อหมักไร้อากาศ (บ่อที่ 2) ซึ่งใช้ปรับค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (BOD) โดยวิธีบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนให้มีค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมีต่ำกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วจึงปล่อยน้ำไหลไปยังบ่อเติมอากาศ (บ่อที่ 3) ซึ่งเป็นวิธีบำบัดแบบใช้ออกซิเจน โดยการเติมอากาศลงในน้ำเสียด้วยเครื่องจักรเพื่อลดค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมีให้เหลือต่ำกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ก่อนปล่อยให้น้ำไหลไปลงบ่อกึ่งผึ่ง (บ่อที่ 4) ซึ่งเป็นที่พักน้ำเพื่อให้ตกตะกอนและบำบัดน้ำแบบใช้ออกซิเจนโดยไม่ใช้เครื่องจักรเติมอากาศเพื่อลดค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมีให้น้อยกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ก่อนสูบน้ำไปใช้ในกิจกรรมต่างๆของโรงงาน หากค่าน้ำเสียในบ่อกึ่งผึ่งยังมีค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมีมากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำจะถูกสูบกลับไปลงที่ทิ้งไว้บ่อผึ่ง (บ่อที่ 5) เพื่อรับแสงแดดและตกตะกอนจนได้ค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมีต่ำกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนบ่ออื่นๆ คือ บ่อน้ำล้างเครื่องจักร (บ่อที่ 6) ใช้น้ำเสียจากการล้างเครื่องจักรด้วยโซดาไฟและทิ้งไว้จนตกตะกอนและแห้ง หลังจากปิดหีบอ้อย



รูปที่ 1 แผนผังแสดงบ่อน้ำบำบัดน้ำเสียระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพของโรงงานน้ำตาลมิตรภูเวียง

- แสดงทิศทางการไหลของน้ำเสียจากโรงงานเข้าสู่บ่อน้ำบำบัดระดับต่างๆ
- > แสดงทิศทางการไหลของน้ำเสียจากโรงงานเข้าสู่บ่อน้ำร้อนและบ่อน้ำล้างเครื่องจักร

บ่อน้ำร้อน (บ่อที่ 7) ใช้รับน้ำร้อนที่ใช้พ่นน้ำลงไปบน กองกากอ้อยและใช้ฉีดทำความสะอาดพื้นถนนของ โรงงานและบ่อน้ำดิบซึ่งได้รับน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติ ถูกนำไปใช้ในกระบวนการต่างๆ ของโรงงาน

### วิธีดำเนินการวิจัย

เก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อน้ำเสียจำนวน 7 บ่อ และบ่อน้ำดิบ 1 บ่อ จำนวน 3 ครั้ง ในรอบ 1 ปี ตาม ฤดูกาลผลิต คือ ช่วงแรก (ฤดูหีบอ้อย) ระหว่างปลาย เดือนมีนาคมถึงต้นเดือนเมษายน 2547 ช่วงที่สอง (ฤดู บิดหีบอ้อย) ระหว่างปลายเดือนเมษายนถึงต้นเดือน พฤษภาคม 2547 และช่วงที่สาม (ช่วงหลังการตากบ่อ ก่อนฤดูเปิดหีบอ้อย) ปลายเดือนพฤศจิกายน 2547 น้ำถูกกรองด้วยตะแกรงกรองแพลงก์ตอนขนาด 20 ไมโครเมตร และเก็บเอาดินและเศษวัตถุเข้าเป็ยรวมทั้ง พืชในในแต่ละบ่อใส่ภาชนะแยกกันแล้วนำมาตรวจหา โพรโทซัวในห้องปฏิบัติการด้วยกล้องจุลทรรศน์ และจัดจำแนกหมวดหมู่โพรโทซัวตามวิธีการของ

Hausmann and Hulsmann (1996) และบันทึกความถี่ (หมายเหตุ - ตารางที่ 2) ของการพบโพรโทซัวชนิด ต่างๆ จากน้ำตัวอย่างบ่อละ 10 สไลด์ (slide) ส่วนหนึ่งของตัวอย่างน้ำที่เก็บแต่ละครั้งถูกนำไปตรวจหาคุณสมบัติ ทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสีย เช่น อุณหภูมิ (T) ค่าความเป็นกรด-เป็นด่าง (pH) ค่าของแข็งทั้งหมดที่ ละลายในน้ำ (TDS) ค่าของแข็งที่แขวนลอยในน้ำ (SS) และค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (BOD) ค่า คลอไรด์ (Cl) ที่ละลายน้ำ ที่ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ เอกชนหมายเลข S - 134 บริษัทรวมเกษตรอุตสาหกรรม จำกัด สาขามิตรภูเวียง (ตารางที่ 1)

### ผลการศึกษา

#### 1. ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย

ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียทางกายภาพ และทางเคมีบางประการที่ตรวจวัดระหว่างการศึกษา (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 คุณภาพน้ำเสียทางกายภาพและทางเคมีบางประการที่ตรวจวัดระหว่าง 3 ช่วงฤดูกาลผลิต

บ่อน้ำดิบน้ำเสีย	คุณภาพน้ำเสีย					
	pH	BOD (ppm)	T (°C)	SS (ppm)	TDS (ppm)	Cl (ppm)
บ่อพักน้ำเสีย	5.4-7.0	1,022-3,311	27-35	180-358	1,110-6,190	100-1100
บ่อหมักไร้อากาศ	6.8-7.4	112-484	27-30	32-172	625-2,875	124-224
บ่อเติมอากาศ	7.1-8.1	102-172	29-31	66-166	1,615-2,370	196-202
บ่อกึ่งฝั่่ง	7.1-9.2	46-106	27-31	34-46	515-2,210	100-210
บ่อฝั่่ง	7.0-8.5	41 *	27-31	36-50	585-1,755	140-204
บ่อน้ำล้างเครื่องจักร	8.2-11.2	- - -	27-32	586-1560	10,445-64,975	1,700-4,000
บ่อน้ำร้อน	5.1-8.0	46-232	27-49	48-166	805-1,115	18-108
บ่อน้ำดิบ	7.0-8.2	11-23	27-29	16-48	30-570	22-30

หมายเหตุ : (- - -) หมายถึง ไม่วิเคราะห์เนื่องจากน้ำมีปริมาณโซเดียมซัลไฟด์สูงอาจทำความเสียหายแก่อุปกรณ์ และ (\*) หมายถึง ค่าคงที่ตลอดปี

2. ความหลากหลายของโพรโทซัว

การศึกษาความหลากหลายชนิดของโพรโทซัวในบ่อน้ำบาดน้ำเสียของโรงงานน้ำตาลมิตรภูเวียง อำเภอหนองเรือ จังหวัดขอนแก่น ทั้ง 3 ฤดูกาลผลิต พบโพรโทซัวรวมทั้งสิ้น 13 Class 97 ชนิด ได้แก่ Class Karyorelictea 2 ชนิด Class Spirotrichea 28 ชนิด Class Prostomatea 2 ชนิด Class Litostomatea 8 ชนิด

Class Phyllopharyngea 4 ชนิด Class Oligohymenophorea 15 ชนิด Class Nassophorea 3 ชนิด Class Euglenoidea 20 ชนิด Class Phytomonadea 7 ชนิด Class Cryptomonadea 1 ชนิด Class Lobosea 12 ชนิด Class Filoreticulosea 1 ชนิด และ Class Heliozoa 3 ชนิด พบชนิดของโพรโทซัวในบ่อน้ำบาดระดับต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 2 แสดงความถี่ของโพรโทซัวที่สำรวจพบในบ่อน้ำบาดน้ำเสียระดับต่างๆ ของโรงงานน้ำตาลมิตรภูเวียง ระหว่างเดือนมีนาคมถึงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2547

ชนิดของโพรโทซัว	บ่อน้ำบาดน้ำเสีย							
	บ่อหมักไร้อากาศ	บ่อเติมอากาศ	บ่อกึ่งผิ้ว	บ่อน้ำล่างเครื่องจักร	บ่อน้ำร้อน	บ่อพักน้ำเสีย	บ่อผิ้ว	บ่อน้ำดิบ
<b>Phylum Alveolata</b>								
<b>Class Karyorelictea</b>								
<i>Loxodes magnus</i>	-	1+ / - / -	-	-	-	-	-	-
<i>L. rostrum</i>	1+ / - / -	-	-	-	-	-	-	-
<b>Class Spirotrichea</b>								
<i>Acineria incurvata</i>	-	1+ / - / -	-	-	-	-	-	-
<i>Aspidisca costada</i>	4+ / - / -	1+ / - / -	- / 4+ / -	-	4+ / 3+ / -	4+ / - / -	2+ / 1+ / -	4+ / 4+ / 4+
<i>Colpoda</i> sp.	3+ / - / -	-	-	-	-	3+ / - / -	-	-
<i>Cyclogramma trichocystis</i>	-	-	-	-	- / 1+ / -	-	-	-
<i>Drepanomonas revoluta</i>	-	-	-	-	-	4+ / 1+ / -	-	-
<i>Euplotes aediculatus</i>	2+ / - / -	2+ / - / -	-	-	1+ / - / 2+	-	-	2+ / - / -
<i>E. affinis</i>	-	1+ / - / -	-	-	-	-	-	-
<i>E. patella</i>	-	-	-	-	2+ / - / -	-	-	-
<i>Euplotes</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	4+ / - / -
<i>Halteria glandinella</i>	-	2+ / - / 2+	-	-	-	-	-	-
<i>Linostoma</i> sp.	1+ / - / -	-	-	-	-	-	-	-
<i>Nicolella</i> sp.	1+ / - / -	-	-	-	-	-	-	-
<i>Oxytricha fallax</i>	1+ / - / -	4+ / - / -	-	-	1+ / - / -	- / 1+ / 3+	-	3+ / - / -
<i>O. haematoplasma</i>	-	-	-	-	-	3+ / 1+ / -	-	- / 1+ / -
<i>Paranassula microstoma</i>	-	-	-	-	- / - / 1+	-	-	-
<i>Paruroleptus magnifitus</i>	-	2+ / - / -	-	-	2+ / - / -	-	-	-
<i>Phacodinium</i> sp.	-	-	-	-	-	- / 1+ / -	-	-
<i>Spirostomum teres</i>	- / 2+ / -	- / 2+ / -	-	-	-	4+ / 2+ / -	-	-
<i>Stylonychia grandis</i>	-	-	- / 3+ / -	-	2+ / 2+ / -	-	-	-
<i>S. mytilus</i>	-	-	4+ / - / -	-	2+ / - / 4+	2+ / - / 1+	-	-
<i>S. pustulata</i>	-	-	- / 1+ / -	-	2+ / 2+ / 2+	2+ / - / 1+	-	- / 2+ / -
<i>Stylonychia</i> sp.	-	-	- / 1+ / -	-	2+ / 2+ / -	1+ / - / 3+	-	- / 2+ / -
<i>Tachysoma echinata</i>	-	-	-	-	2+ / - / -	-	-	-
<i>Tillina canalifera</i>	-	1+ / - / -	-	-	1+ / - / -	-	-	-
<i>Trichonympha</i> sp.	1+ / 1+ / 3+	2+ / - / -	-	-	-	-	-	-
<i>Uroleptus longicaudatus</i>	-	-	-	-	1+ / - / -	-	-	-
<i>U. limnetis</i>	-	-	-	4+ / 4+ / 2+	-	-	-	-
<i>Urostyla weissei</i>	-	-	-	-	2+ / - / -	-	-	-
<b>Class Prostomatea</b>								
<i>Coleps octospinus</i>	- / - / 4+	2+ / 2+ / -	2+ / 3+ / 2+	-	- / 4+ / -	-	3+ / 4+ / 3+	4+ / 3+ / 4+

ชนิดของโปรโตซัว	บ่อน้ำบาดน้ำเสีย							
	บ่อหมักไร้อากาศ	บ่อเติมอากาศ	บ่อกึ่งผิ้ว	บ่อน้ำล่างเครื่องจักร	บ่อน้ำร้อน	บ่อพักน้ำเสีย	บ่อผิ้ว	บ่อน้ำดิบ
<i>Spathidium</i> sp.	- / 2+ / -	-	-	-	-	-	-	2+ / - / -
<b>Class Phyllopharyngea</b>								
<i>Chilodonella cucullulus</i>	-	-	- / - / 3+	-	4+ / 3+ / 4+	- / 2+ / -	3+ / 2+ / 1+	2+ / - / -
<i>Chilodontopsis vorax</i>	-	-	- / 1+ / -	-	4+ / - / -	2+ / - / -	-	- / 4+ / -
<i>Podophrya collini</i>	1+ / - / -	-	-	-	-	-	-	-
<i>P. fixa</i>	2+ / - / -	-	-	-	-	-	-	-
<b>Class Oligohymenophorea</b>								
<i>Astylosoon</i> sp.	-	1+ / - / -	-	-	-	-	-	-
<i>Clatbrostoma</i> sp.	-	-	-	-	-	- / - / 1+	-	-
<i>Cristigera phoenix</i>	-	3+ / - / -	4+ / - / -	-	-	-	-	-
<i>Cyclidium glaucoma</i>	4+ / - / -	- / 4+ / 3+	4+ / 4+ / 4+	-	2+ / 2+ / 1+	4+ / 3+ / -	3+ / 3+ / -	4+ / - / -
<i>Frontonia complanata</i>	-	-	1+ / - / -	-	-	-	-	-
<i>Loxocepharus plagius</i>	- / 4+ / -	4+ / 1+ / -	2+ / - / -	-	2+ / - / -	- / 4+ / -	-	- / 2+ / -
<i>Opisthonecta henneguyi</i>	-	-	1+ / - / -	-	-	-	-	-
<i>Pyxidium urceolatum</i>	-	2+ / 2+ / -	- / - / 1+	-	-	4+ / - / 2+	- / - / 1+	2+ / 2+ / 2+
<i>Strobilidium caudatum</i>	- / 1+ / -	-	-	-	-	-	-	-
<i>Tetrahymena pyriformis</i>	-	-	-	4+ / - / -	-	-	-	-
<i>Tetrahymena vorax</i>	-	-	-	-	-	-	-	- / 2+ / -
<i>Vorticella campanella</i>	3+ / 1+ / -	3+ / 2+ / -	-	-	1+ / 2+ / -	2+ / 1+ / -	-	3+ / - / -
<i>V. convallaria</i>	2+ / 1+ / -	-	-	-	2+ / 1+ / -	-	3+ / - / -	-
<i>V. infusium complex</i>	-	-	- / - / 2+	-	- / 4+ / -	-	-	1+ / - / -
<b>Class Nassophorea</b>								
<i>Paramecium caudatum</i>	4+ / 2+ / -	3+ / 1+ / -	3+ / - / -	-	- / 4+ / 4+	4+ / - / -	- / 1+ / 4+	3+ / 3+ / 1+
<i>P. multimicronucleatum</i>	4+ / 2+ / -	-	-	-	- / - / 4+	- / 4+ / 4+	- / 1+ / 4+	1+ / - / -
<i>P. trichium</i>	4+ / 4+ / -	2+ / - / -	-	-	-	2+ / - / -	-	-
<b>Phylum Euglenozoa</b>								
<b>Class Euglenoidea</b>								
<i>Astasia dangeardi</i>	- / - / 1+	-	-	-	- / 3+ / 1+	-	- / - / 4+	-
<i>Distigmopsis grossei</i>	-	-	-	-	-	-	-	1+ / - / 4+
<i>Entosiphon sulcatum</i>	-	-	-	-	-	-	-	1+ / - / 1+
<i>Euglena acus</i>	- / 3+ / -	- / 1+ / -	-	-	-	-	- / 1+ / -	4+ / 2+ / -
<i>E. geniculata</i>	-	1+ / - / -	- / 2+ / -	-	4+ / 3+ / -	- / - / 4+	-	- / 3+ / 2+
<i>E. polymorpha</i>	- / - / 3+	4+ / - / -	1+ / 1+ / -	-	-	1+ / - / -	- / 2+ / -	-
<i>E. rostrifera</i>	- / 2+ / -	3+ / - / -	3+ / - / -	-	4+ / 3+ / -	-	-	-
<i>E. rubra</i>	-	3+ / - / -	-	-	4+ / 3+ / -	-	-	2+ / - / -
<i>Heteronema acus</i>	-	-	- / 1+ / -	- / 3+ / -	-	-	-	-
<i>Heteronema</i> sp.	-	-	1+ / - / -	-	-	- / 1+ / -	- / 1+ / -	- / 1+ / -
<i>Macrotrichomonas pulchra</i>	-	-	-	- / 4+ / -	-	-	-	-
<i>Notosolenus apocamptus</i>	- / 1+ / -	-	-	-	2+ / - / -	-	-	-
<i>Peranema trichophorum</i>	-	3+ / 1+ / -	- / 1+ / -	4+ / - / -	2+ / - / -	1+ / - / -	- / 2+ / -	4+ / 2+ / -
<i>Phacus acuminata</i>	- / 4+ / 3+	- / 3+ / -	-	-	4+ / 4+ / -	-	- / 3+ / -	4+ / 1+ / -
<i>P. alata</i>	1+ / - / -	2+ / 4+ / -	2+ / - / -	-	- / 4+ / -	-	1+ / 3+ / -	4+ / 1+ / -
<i>P. longicauda</i>	-	-	1+ / - / -	-	-	-	-	-
<i>P. torta</i>	- / 1+ / -	2+ / - / -	2+ / 1+ / -	-	3+ / - / -	-	-	4+ / - / -
<i>Phacus</i> sp.	1+ / 4+ / -	2+ / 1+ / -	3+ / - / -	-	-	-	- / - / 2+	4+ / 1+ / 1+
<i>Pouchetia fusus</i>	- / 4+ / -	-	- / 3+ / 1+	-	-	-	- / - / 1+	-
<i>Trachelomonas</i> sp.	-	-	-	-	4+ / - / -	-	-	-

ชนิดของโพรโทซัว	บ่อน้ำบาดน้ำเสีย							
	บ่อหมักไร้อากาศ	บ่อเติมอากาศ	บ่อทิ้งฝัง	บ่อน้ำล้างเครื่องจักร	บ่อน้ำร้อน	บ่อพักน้ำเสีย	บ่อทิ้ง	บ่อน้ำดิบ
<b>Phylum Chlorophyta</b>								
<b>Class Phytomonadea</b>								
<i>Chlamydomonas</i> sp.	-	- / 3+/-	-	-	-	-	-	-
<i>Chlorogonium euchlorum</i>	-	-	- / - / 1+	-	2+ / - / -	-	-	2+ / 4+ / -
<i>Eudorina elegans</i>	-	-	-	-	-	-	-	- / 4+ / -
<i>Gonium pectorale</i>	2+ / 1+ / -	-	-	-	-	-	-	1+ / - / -
<i>Pandorina morum</i>	1+ / - / -	1+ / - / -	-	-	-	-	-	-
<i>Pandorina</i> sp.	1+ / 1+ / -	-	- / 1+ / -	-	-	-	-	1+ / - / -
<i>Spondylomorom quaternarium</i>	1+ / 1+ / -	-	-	-	-	-	-	-
<b>Phylum Chromista</b>								
<b>Class Cryptomonadea</b>								
<i>Chilomonas paramoecium</i>	-	- / - / 4+	-	-	-	- / - / 4+	- / 4+ / -	- / 4+ / -
<b>Class Lobosea</b>								
<i>Amoeba dubia</i>	-	-	-	-	-	-	2+ / - / -	- / 2+ / -
<i>A. proteus</i>	-	-	1+ / - / -	4+ / - / -	-	1+ / - / -	-	-
<i>A. qurgonia</i>	-	-	1+ / - / -	4+ / - / -	-	1+ / - / -	-	-
<i>A. radiosa</i>	- / 2+ / -	-	- / - / 3+	-	-	-	-	2+ / - / -
<i>Amoeba</i> sp.	1+ / 1+ / -	-	-	4+ / 4+ / -	- / 1+ / -	-	-	1+ / - / -
<i>Arcella bathystoma</i>	-	2+ / - / -	- / 1+ / -	-	4+ / - / -	-	- / - / 1+	-
<i>Hartmannella vermiformis</i>	-	-	-	4+ / - / -	-	-	-	-
<i>Paramoeba eilhardi</i>	-	-	-	2+ / - / -	-	-	-	-
<i>Pelomyxa carolinensis</i>	2+ / - / -	1+ / - / -	-	2+ / 3+ / -	-	- / 1+ / -	2+ / - / -	1+ / - / -
<i>P. palustris</i>	-	- / - / 1+	1+ / - / -	1+ / - / -	1+ / - / -	-	-	2+ / 1+ / -
<i>Striamoeba similis</i>	-	-	- / - / 1+	-	-	-	1+ / - / -	-
<i>Thecamoeba terricola</i>	-	-	1+ / - / -	-	-	-	-	-
<b>Class Filoreticulosea</b>								
<i>Gromia fluvialis</i>	-	-	-	-	-	-	- / 1+ / -	1+ / - / -
<b>Class Heliozoa</b>								
<i>Actinophrys sol</i>	-	-	- / 1+ / 2+	-	-	-	-	-
<i>Acanthocystis turfacea</i>	1+ / 1+ / -	-	- / - / 1+	-	-	-	-	-
<i>Echinospaerium eichhorni</i>	-	-	-	4+ / - / -	-	-	-	-
รวม	39	36	39	13	40	28	23	41

หมายเหตุ : +/+ แทนความถี่ที่ตรวจพบโพรโทซัวในช่วงฤดูหิมะน้อย / ฤดูปิดหิมะน้อย / ช่วงหลังการตกบ่อน้ำก่อนฤดูเปิดหิมะน้อย ตามลำดับ 4+ = พบบ่อยและมีจำนวนมาก(8-10 สไลด์) 3+ = พบจำนวนปานกลาง (5-7 สไลด์) 2+ = พบจำนวนน้อย (3-4 สไลด์) 1+ = พบจำนวนน้อยมาก(1-2 สไลด์) - = ไม่พบโพรโทซัว

### สรุปและวิจารณ์ผลการศึกษา

การศึกษาความหลากหลายของโพรโทซัวในบ่อน้ำบาดน้ำเสียของโรงงานน้ำตาลมิตรภูเวียง อำเภอหนองเรือ จังหวัดขอนแก่น พบชนิดของโพรโทซัวในบ่อน้ำบาดระดับต่างๆ รวมทั้งสิ้น 13 Class 97 ชนิด (ตารางที่ 2) ช่วงระหว่างปลายเดือนมีนาคมถึงต้นเดือนเมษายน 2547 (ฤดูหิมะน้อย) พบชนิดของโพรโทซัวมาก

ที่สุดรวม 83 ชนิด ช่วงระหว่างปลายเดือนเมษายนถึงต้นเดือนพฤษภาคม 2547 (ฤดูปิดหิมะน้อย) พบชนิดของโพรโทซัวทั้งสิ้น 60 ชนิด และช่วงปลายเดือนพฤศจิกายน 2547 (ช่วงหลังการตกบ่อน้ำก่อนฤดูเปิดหิมะ) พบชนิดของโพรโทซัวน้อยที่สุด 31 ชนิด

คุณภาพน้ำทางกายภาพ และทางเคมีบางประการของทุกบ่อ เช่น ค่าความเป็นกรด-เป็นด่าง ค่า

ของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ ค่าของแข็งที่แขวนลอยในน้ำ ค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (BOD) และค่าคลอไรด์ มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงคล้ายๆ กันไปตามช่วงต่างๆ ของปี แต่ช่วงเวลาพบจำนวนและชนิดของโพรโทซัวแตกต่างกัน เช่น ในบ่อพักน้ำเสียซึ่งรับน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำตาลและการอุปโภคบริโภคของพนักงานมารวมไว้ก่อนส่งไปหมักแบบไร้ออกซิเจนที่บ่อหมักไร้อากาศ น้ำในบ่อนี้จัดเป็นน้ำเสียมากระดับ 5 ตามมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2537) น้ำมีสีดำ มีกลิ่นเหม็นมาก ลักษณะของค่าคุณภาพน้ำทางกายภาพและทางเคมีบางประการใกล้เคียงกับบ่อหมักไร้อากาศ แต่มีค่าความต้องการใช้ออกซิเจนทางชีวเคมีสูงกว่ามาก พบโพรโทซัว 28 ชนิด โพรโทซัว 2 ชนิดที่พบเฉพาะที่บ่อนี้เท่านั้น คือ *Phacodinium* sp. และ *Clatbrostoma* sp. จึงน่าจะใช้ 2 ชนิดนี้เป็นดัชนีชีวภาพบ่งชี้สภาพน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์สูงมากๆ ได้ แต่ก็พบโพรโทซัวหลายชนิดที่เหมือนกับชนิดที่พบในบ่อหมักไร้อากาศ ได้แก่ *Aspidisca costata*, *Oxytricha fallax*, *Spirostomum teres*, *Cyclidium glaucoma*, *Loxocephalus plagiis*, *Vorticella campanula*, *Paramecium caudatum*, *P. multimicronucleatum*, *P. trichium*, *Euglena polymorpha*, *Phacus alata*, *Pouchetia futus* และ *Pelomyxa carolinensis* โพรโทซัวกลุ่มนี้เป็นพวกที่สามารถปรับตัวให้สามารถอาศัยอยู่ได้ในน้ำเสียมากระดับต่างๆ เหมือนกับการรายงานของ ฟินิจและคณะ (2545, 2549) ซึ่งศึกษาความหลากหลายของโพรโทซัวในแม่น้ำพองและความหลากหลายชนิดของโพรโทซัวในบ่อบำบัดน้ำเสียบึงทุ่งสร้าง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น พบว่า มีโพรโทซัวหลายชนิดที่เหมือนกับการศึกษาครั้งนี้ในแหล่งน้ำที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน เช่น เป็นน้ำเสียน้ำทิ้งจากภาคเกษตรกรรม โรงงานอุตสาหกรรม และชุมชนเมือง น้ำสกปรกและมีกลิ่นเหม็นมาก

โพรโทซัวที่พบในบ่อหมักไร้อากาศมี 39 ชนิด แต่ชนิดที่พบเฉพาะในบ่อหมักไร้อากาศมี 5 ชนิด

คือ *Loxodes rostrum*, *Phacodinium* sp., *Podophrya collini*, *P. fixa* และ *Spondylomorom quaternarium* (ตารางที่ 2) พบโพรโทซัวบางชนิด เช่น *Loxodes* sp. เหมือนกับรายงานของฟินิจ และคณะ (2545, 2549) มุกดา (2536) ที่พบในน้ำเน่า มีสีดำ และกลิ่นเหม็น

บ่อเติมอากาศรับน้ำจากบ่อหมักไร้อากาศมาบำบัดต่อ แต่ยังมีคุณสมบัติของน้ำใกล้เคียงกับบ่อหมักไร้อากาศ บ่อนี้ตรวจพบโพรโทซัว 36 ชนิด มีโพรโทซัวบางชนิดที่พบเหมือนกันในทั้ง 2 บ่อ เช่น *Aspidisca costata*, *Coleps octospinus*, *Euplotes aediculata*, *Oxytricha fallax*, *Spirostomum teres*, *Didinium nasutum* และ *Paramecium caudatum* ชนิดที่พบในบ่อเติมอากาศ แต่ไม่พบในบ่ออื่น มี 5 ชนิด คือ *Loxodes magnum*, *Acinaria incurvata*, *Euplotes affinis*, *Tillina canalifera* และ *Astylosoon* sp. ฟินิจและคณะ (2545, 2549) มุกดา (2536) พบโพรโทซัวหลายชนิดที่เป็นชนิดเดียวกันกับการศึกษาครั้งนี้ในแหล่งน้ำที่มีคุณสมบัติของน้ำใกล้เคียงกัน คือ เป็นน้ำค่อนข้างเสียระดับ 5 (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2537) ซึ่ง Foissner and Berger (1996) กล่าวว่าโพรโทซัวบางชนิด เช่น *Acinaria incurvata* พบมากในน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนละลายค่อนข้างต่ำหรือไม่มีเลย

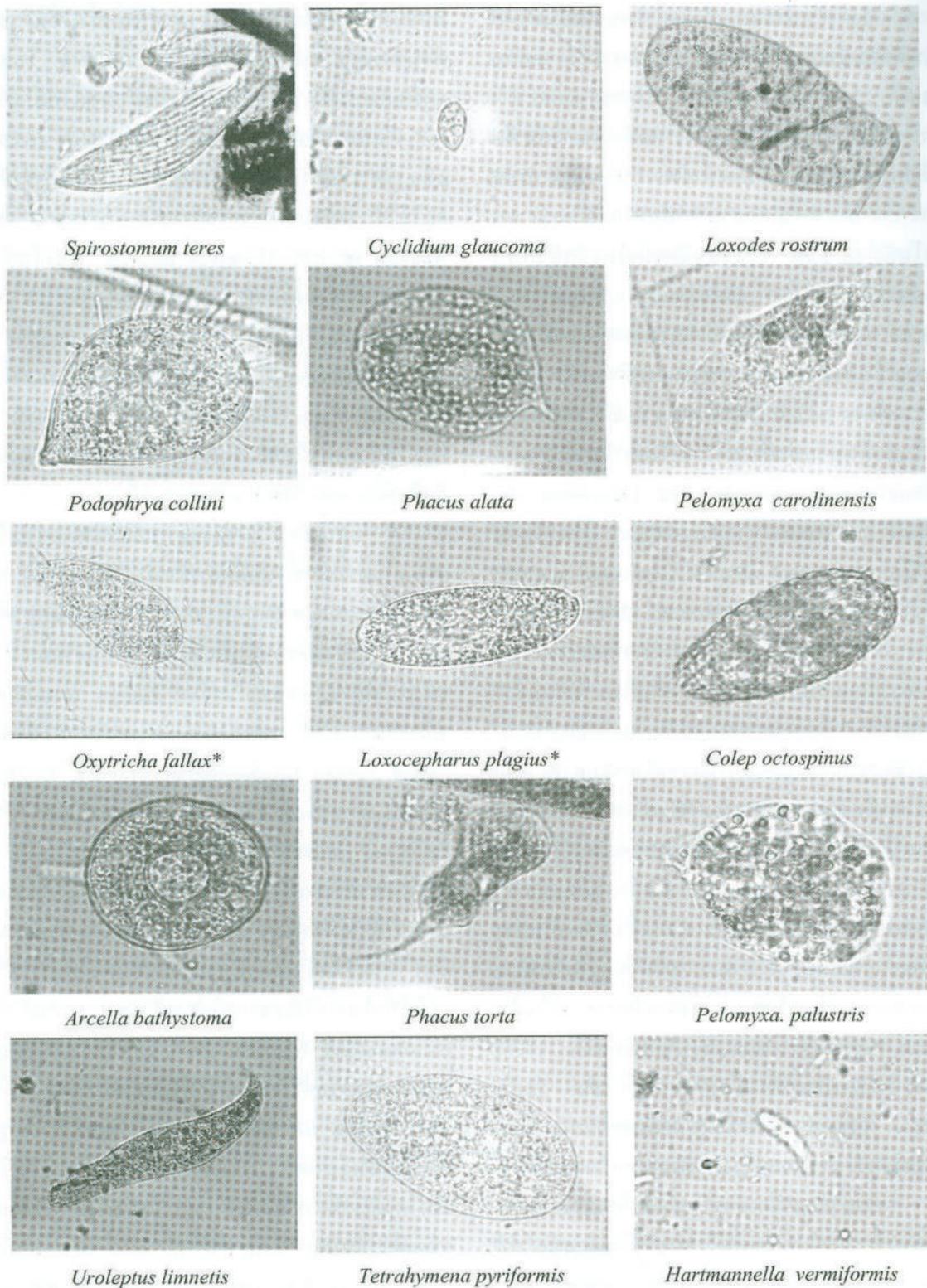
บ่อกึ่งฝังรับน้ำเสียจากบ่อเติมอากาศมาฝั่งบำบัดต่อเพื่อให้เกิดการตกตะกอนและลดค่าปริมาณความต้องการใช้ออกซิเจนให้มีค่าต่ำกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นน้ำที่มีสภาพค่อนข้างดีระดับ 3 (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2537) โพรโทซัวที่พบในบ่อนี้มี 41 ชนิด แต่พวกที่ไม่พบในบ่ออื่นมี 5 ชนิด คือ *Frontonia complanata*, *Opithnecta henneguyi*, *Phacus longicauda*, *Thecamoeba terricola* และ *Actinophrys sol* โพรโทซัวกลุ่มนี้ไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำเสียมากได้แต่ดำรงชีวิตได้ดีในน้ำที่เสียเล็กน้อยที่มีค่าความต้องการใช้ออกซิเจนทางชีวเคมีไม่สูงมากซึ่งในน้ำลักษณะนี้มีพวกแบคทีเรียอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น (ตารางที่ 2)

บ่อฝังรับน้ำจากบ่อกึ่งฝังน้ำในบ่อนี้เป็นน้ำที่มีคุณภาพค่อนข้างดีระดับ 3 (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2537) มีค่าคุณภาพน้ำทางกายภาพและทางเคมีบางประการใกล้เคียงบ่อกึ่งฝัง แต่ที่แตกต่างกันคือ บ่อฝังมีพีชีน้ำขึ้นและมีแมลงน้ำจำนวนมาก มีสภาพบ่อดีกว่าบ่อกึ่งฝัง แสงแดดสามารถส่องผ่านได้ดีกว่า พบโพรโทซัว 28 ชนิด จำนวนชนิดของโพรโทซัวที่พบในแต่ละช่วงของปีมีค่าใกล้เคียงกันเพราะค่าคุณภาพน้ำทางกายภาพและทางเคมีบางประการค่อนข้างคงที่ เช่น ค่าความเป็นกรด-เป็นด่าง ค่าอุณหภูมิของน้ำ และค่าความต้องการใช้ออกซิเจนทางชีวเคมี ชนิดของโพรโทซัวที่พบในบ่อฝังแต่ไม่พบในบ่ออื่น มี 2 ชนิดคือ *Amphileptus claparedei* และ *Lacrymaria olor* (ตารางที่ 2) Farmer (1980) กล่าวว่า มีโพรโทซัวบางชนิด เช่น *Coleps* sp. และ *Amphileptus* sp. พบเฉพาะในน้ำดี และ ฟินิจ และคณะ (2545, 2549) ก็พบโพรโทซัวหลายชนิดเหมือนกับการศึกษาครั้งนี้ในแหล่งน้ำที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันคือเป็นน้ำที่ค่อนข้างสะอาดระดับ 3 (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2537) มีการปนเปื้อนของน้ำทิ้งจากกิจกรรมต่างๆ น้อย และมีโพรโทซัวบางชนิด เช่น *Peranema tricophorum* ที่พบเหมือนกับที่พบในบ่อกึ่งฝังและบ่อฝังแต่มีรูปร่างขนาดแตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างกันนี้อาจเกิดจากองค์ประกอบทางเคมีของน้ำ เช่น ความเป็นกรด-เป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ปริมาณความต้องการใช้ออกซิเจน อินทรีย์สาร อนินทรีย์สาร เป็นต้น (Farmer, 1980) และ Hausmann and Hulsmann (1996) รายงานว่าคุณภาพน้ำทางด้านกายภาพ เช่น ระดับอุณหภูมิ ฤดูกาล ปริมาณความเข้มของแสง และช่วงเวลาของแสง มีผลต่อรูปร่างของโพรโทซัวเช่นกัน

บ่อน้ำล่างเครื่องจักรรับน้ำเสียโดยตรงจากการล้างเครื่องจักรและการล้างพื้นโรงงานใช้โซเดียมซัลไฟด์ เพื่อตกตะกอนสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำ ค่าคุณภาพน้ำทางกายภาพและทางเคมีมีลักษณะแตกต่างจากบ่ออื่นๆ คือ ค่า pH ค่าของแข็งแขวนลอย ค่าของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ และค่าคลอไรด์สูงมาก (ตารางที่ 1) น้ำ

มีปริมาณโซเดียมซัลไฟด์สูง ทำให้พบสิ่งมีชีวิตในน้ำค่อนข้างน้อย พบโพรโทซัวเพียง 13 ชนิด ในช่วงฤดูหีบอ้อยน้ำมีการปนเปื้อนของโซเดียมซัลไฟด์ (4,000 ppm.) และของแข็งที่ละลายน้ำในปริมาณสูง (64,975 ppm.) (ตารางที่ 1) ทำให้โพรโทซัวส่วนใหญ่ดำรงชีวิตอยู่ไม่ได้ แต่พบโพรโทซัวบางชนิดจำนวนมาก เช่น *Amoeba* sp. และ *Uroleptus limnetis* โพรโทซัวที่พบในบ่อน้ำล่างเครื่องจักรแต่ไม่พบในบ่ออื่น มี 5 ชนิดคือ *Uroleptus limnetis*, *Tetrahymena pyriformis*, *Macrotrichomonas pulchra*, *Hartmannella vermiformis* และ *Paramoeba cilhardi* (ภาพที่ 2, ตารางที่ 2) โพรโทซัวเหล่านี้สามารถเจริญได้ดีในน้ำที่มีโซเดียมซัลไฟด์และคลอไรด์ปริมาณสูงๆ ได้

บ่อน้ำร้อน ในช่วงฤดูหีบอ้อยค่าความเป็นกรด-เป็นด่างของน้ำบ่อนี้ค่อนข้างต่ำเพียง 5.1-5.2 และอุณหภูมิของน้ำมีค่าสูงสุดถึง 48-49 องศาเซลเซียส ชนิดของโพรโทซัวที่ตรวจพบทันทีที่เก็บน้ำขึ้นจากบ่อ มี 10 ชนิด คือ *Oxytricha fallax*, *Coleps octospinus*, *Monodinium* sp., *Trachelocerca conifer*, *Chilodontopsis vorax*, *Loxocepharus plagius*, *Euglena geniculata*, *Phacus torta*, *Arcella bathystoma* และ *Pelomyxa palustris* โพรโทซัว 10 ชนิดแรกที่ตรวจพบเป็นพวกที่สามารถดำรงชีวิตในน้ำที่มีอุณหภูมิค่อนข้างสูงได้ แต่ก็พบโพรโทซัวเหล่านี้ได้ในบ่อบำบัดอื่นๆ ด้วย โพรโทซัวเหล่านี้สามารถปรับตัวให้ดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในน้ำที่มีอุณหภูมิก่อนข้างสูงและปกติได้ดี Hausmann and Hulsmann (1996) รายงานว่า *Oxytricha fallax* สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในอุณหภูมิช่วง 41-56 องศาเซลเซียส และ Farmer (1980) รายงานว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงทำให้มีผลต่อการแบ่งตัวเจริญเติบโตได้เร็วขึ้นหรือลดลง และมีผลทำให้โพรโทซัวชนิดเดียวกันมีขนาดและรูปร่างลักษณะแตกต่างกันไปบ้าง เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำ นอกจากนี้ ยังตรวจพบโพรโทซัวเพิ่มอีก 30 ชนิด หลังจากทิ้งไว้หลายวัน เนื่องจากในช่วงฤดูปิดหีบอ้อยน้ำในบ่อน้ำร้อนจะเย็นลง



ภาพที่ 2 โพรโทซัวที่พบมากในน้ำเสียมาก (2 แถวบน) พวกที่สามารถอาศัยอยู่ในน้ำอุณหภูมิต่ำประมาณ 48-49 °ซ (แถวที่ 3 และ 4) และพวกที่สามารถอาศัยอยู่ในน้ำที่มีปริมาณสารเคมีสูง (แถวที่ 5) ขนาดสเกล (scale) ภาพ (----- = 50 ไมโครเมตร)

ทำให้โปรโตซัว 30 ชนิด ดังกล่าวสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้และทิ้งระยะพักตัว (cyst) ไว้ในบ่อนี้เมื่อสภาวะแวดล้อมภายนอกไม่เหมาะสม คือ ในระหว่างที่บางส่วนของบ่อแห้งลงระหว่างที่มีการตากบ่อไปจนถึงฤดูเปิดหีบอ้อย โปรโตซัวเหล่านี้จะออกจากระยะพักตัวเมื่อสภาวะแวดล้อมภายนอกเหมาะสม

บ่อน้ำคิบซึ่งใช้เป็นตัวแทนของการสำรวจโปรโตซัวจากแหล่งน้ำธรรมชาติพบโปรโตซัว 41 ชนิด ชนิดของโปรโตซัวที่พบในบ่อนี้แต่ไม่พบในบ่ออื่น มี 3 ชนิด คือ *Tetrahymena vorax*, *Entosiphon sulcatum* และ *Distigmopsis grossei*

ผลการศึกษาครั้งนี้สรุปได้ว่ามีโปรโตซัวหลายชนิดที่อาจใช้เป็นตัวชี้วัดคุณภาพน้ำแบบต่างๆ ได้ เช่น พวกที่พบเฉพาะในน้ำเสียมาก ได้แก่ *Clatbrostoma* sp., *Loxodes rostrum*, *L. magnum*, *Phacodinium* sp., *Podophrya collini*, *P. fixa*, *Spirostomum teres* และ *Acinaria incurvata* พวกที่พบเฉพาะในน้ำคุณภาพน้ำดี เช่น น้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติ ได้แก่ *Lacrymaria olor*, *Tetrahymena vorax*, *Distigmopsis grossei*, *Arcella bathystoma*, *Heteronema* sp. และ *Gromia fluvialis* พวกที่พบในน้ำที่มีอุณหภูมิสูง (38-49 องศาเซลเซียส) ได้แก่ *Oxytricha fallax*, *Coleps octospinus*, *Monodinium* sp., *Chilodontopsis vorax*, *Loxocephalus plagiatus*, *Euglena geniculata*, *Phacus torta*, *Arcella bathystoma* และ *Pelomyxa palustris* แต่มีหลายชนิดที่สามารถปรับตัวให้ดำรงชีวิตอยู่ในสภาพน้ำที่มีค่าคุณภาพน้ำทางกายภาพและทางเคมีบางประการแตกต่างกันได้ เช่น *Clatbrostoma* sp., *Loxodes rostrum*, *L. magnum*, *Phacodinium* sp., *Podophrya collini*, *P. fixa*, *Spirostomum teres* และ *Acinaria incurvata* ส่วนพวกที่พบเฉพาะในแหล่งน้ำมีปริมาณสารเคมีสูงยังมีการศึกษาน้อยมาก ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัทรวมเกษตรอุตสาหกรรม จำกัด สาขามิตรภูเวียงที่อนุญาตให้เข้าไปศึกษาและ

ช่วยอำนวยความสะดวกด้านต่างๆ และการวิเคราะห์น้ำเสีย ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์กิติ เอกอำพน และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปรียา หวังสมนึก ที่ให้คำแนะนำในการเขียนต้นฉบับ

### เอกสารอ้างอิง

- คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. (2537). เรื่อง การกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำจืดผิวดิน. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติฉบับที่4/2537 เล่ม 111 ตอนที่4/2537 เล่ม 111 ตอนที่ 162.
- บพิท จารุพันธ์ และนันทพร จารุพันธ์. (2532). การศึกษาชนิดของโปรโตซัวเพื่อใช้เป็นดัชนีบ่งบอกคุณภาพน้ำ. รายงานการวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร.
- พินิจ หวังสมนึก, ภูวภูณ กรพันธุ์ และ อินทราปรุ่งเกียรติ.(2545). ความหลากหลายของโปรโตซัวในเขื่อนอุบลรัตน์ จังหวัดขอนแก่น. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 30 (4): 240-252.
- พินิจ หวังสมนึก ฉัฐนันท์ ประยูรชาญ นันทพร จารุพันธ์ และ สมพงษ์ คุณย์จินดาชาพร. (2549). ความหลากหลายชนิดของโปรโตซัวในบ่อบำบัดน้ำเสียบึงทุ่งสร้าง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 34 (1): 72-87.
- มุกดา สุขสมาน. 2536. การศึกษานิวสวิตาและการเผยแพร่กระจายของโปรโตซัวในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต. สถาบันไทยคดีศึกษา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- Farmer, J. N. 1980. The Protozoa: Introduction to Protozoology. The C.V. Mosby Company, Sent Louis, U.S.A.
- Finlay, B. J. and Esteban, G. F. (1998). Freshwater Protozoa: Biodiversity and Ecological Function. Biodiv. Conserv., Dordrecht, 7:

- 1163-1186.
- Foissner, W. and Berger, H. (1996). A User Friendly Guide to the Ciliates (Protozoa, Ciliophora) Blackwell Science Ltd., Fresh-Water Biology. 35(2): 375-482.
- Hardoim, E.L. and Heckman, C.W. (1996). The seasonal succession of biotic communities in the wetlands of the tropical and dry climatic zone: IV. The free-living Sarcodines and Ciliates of the Pantanal of Mato Grosso, Brazil. *Int. Rev. Ges. Hydrobiol.*, Berlin, 8(3), p.367- 384,
- Hausmann, K. and Hulsmann, N. (1996). Protozoology. 2<sup>nd</sup> ed. Thieme Medical Publishers, Inc. New York. U.S.A.
- Kudo, R. R. 1966. Protozoology. 5<sup>th</sup> ed. Charles C. Thomas. U.S.A. 1174 pp.
- Lee, S., Basu, S., Tyler, C.W. and Wei I.W. (2004). Ciliate Populations as Bio-Indicators at Deer Island Treatment Plant. *Advances in Environmental Reserch.*
- Nicolau, A., Dias, N., Mota, M. and Lima, N. (2001). Trends in the use of Protozoa in the Wastewater Treatment. Mini-review. Available Source: [http://www. Sciencedirect.com/](http://www.Sciencedirect.com/). April 9, 2004.



**ดัชนีอนุกรมวารสารวิทยาศาสตร์ มข.  
(เรียงตามชื่อผู้เขียน)  
ปีที่ 35 (พ.ศ. 2550)**

ผู้เขียน	ชื่อเรื่อง	ฉบับที่	หน้า
กัญญาณา นิกดี	เปรียบเทียบ ลักษณะสัณฐานวิทยา การเจริญ และความคงตัวของแบคทีเรียโอฟาจที่จำเพาะต่อ <i>Salmonella typhi</i> และ <i>Shigella dysenteriae</i> Comparison of morphology, growth and stabiligy of <i>S. typhi</i> and <i>S. dysenteriae</i> spe- cific bacteriophages	2	113-122
กัญญาณา นิกดี	ไวรัสตับอักเสบบี ซี	1	1-7
กัญญาณา นิกดี	การคัดแยกและลักษณะสมบัติบางประการ ของแบคทีเรียโอฟาจจำเพาะต่อ <i>S. typhi</i> Isolation and partial characterization of <i>Salmonella typhi</i> -specific bacteriophage	3	162-169
กัชรินทร์ สิริวงศ์	การคำนวณพลังงานไอออไนเซชันของกรด เปปไทด์นิวคลีอิกโดยวิธีทางเคมีควอนตัม	1	28-36
จุรีรัตน์ รัตนทิพย์ นุชรีย์ ศิริ และ อังศุมาลย์ จันทราปัติย์	การเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานของด้วงเต่า ห้าไร <i>Stethorus pauperculus</i> (Weise) และ <i>Stethorus siphonulus</i> Kapur Comparative morphology of acarophagous lady beetles, <i>Stethorus pauperculus</i> (Weise) and <i>Stethorus</i> <i>siphonulus</i> Kapur	3	170-179
เฉลิม เรื่องวิริยะชัย	สารฟีนานซีนที่ผลิตจาก <i>Pseudomonas</i> spp.	3	186-194
ชนกพร เผ่าศิริ และคณะ	แนวทางการสังเคราะห์โมเลกุลต้นแบบสำหรับ ยับยั้งเอนไซม์ IspH Synthesis Strategy of Molecular Templates for IspH Enzyme Inhibitors	4	231-238

ผู้เขียน	ชื่อเรื่อง	ฉบับที่	หน้า
ชาญเรืองฤทธิ์ จันทน์นอก	การคำนวณเชิงตัวเลขของการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวตั้งภายใต้แรงโน้มถ่วง Numerical Calculation of Motion of a Falling Body under Gravitational Force	3	195-203
ชาญเรืองฤทธิ์ จันทน์นอก	ผลของสนามศักย์โน้มถ่วงโลกต่อความเร็วของเสียงในอากาศ	1	8-12
ชาญเรืองฤทธิ์ จันทน์นอก	ฟังก์ชันคลื่นของสถานะพื้นของโบซอนที่ถูกกักในสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับทิศทาง	2	61-66
ชุติมา กุคู่สมุทร ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง ศุภลักษณ์ ศรีจารนัย และรัตนา มหาชัย	แนวโน้มผลกระทบต่อของการชะล้างเกลือตามธรรมชาติและการผลิตเกลือต่อคุณภาพน้ำในแม่น้ำสงคราม The Impacts Trend of Natural Leaching and Salt Production on the Water Quality of Songkram River	4	252-263
บรรจง เชื้อเมืองพาน วิรัช ว่องพัฒนากุล และปวีณา พงษ์คนตรี	การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน และกรดไขมันของจิ้งหรีดทองลาย ( <i>Gryllus sp.</i> ) ที่เลี้ยงเพื่อการค้า	2	82-87
ประเสริฐ แข่งขัน	สืบสรจากการคำนวณ	3	151-161
ปรานอม ภูษฎาภิรมย์ วิภาวรรณ ชูเผือก และอนุชัย นิเวศน์ปฐมวัฒน์	การศึกษาเปรียบเทียบการใช้สารละลายเดก-แทรนที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการแยกเม็ดเลือดขาวชนิดนิวโทรฟิลในกระต่าย	2	108-112
พรทิพย์ ประกายมณีวงศ์ ไชยวัฒน์ รักสกุลพิวัฒน์ และจันทิมา ศิประเสริฐกุล	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็ง ขนาดอนุภาค น้ำหนักโมเลกุล และสมบัติวิทยากระแสของน้ำยางธรรมชาติ Correlation between Solids Content, Particle Size, Molecular Weight and Rheological Properties of Natural Rubber Latex	4	239-245
พินิจ หวังสมนึก และวรุณยุภา เย็นเฉื่อย	ความหลากหลายของโพรโทซัวในบ่อบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพของโรงงานน้ำตาลมิตรภูเวียง Diversity of Protozoa in Biological Wastewater Treatment Ponds of Mitr Phuviang Sugar Factory	4	264-276

ผู้เขียน	ชื่อเรื่อง	ฉบับที่	หน้า
พีรภักดิ์ คมสัน	เซลล์แสงอาทิตย์กับสีข้อมไวแสงจากพืชในประเทศไทย Solar Cells and Dye-sensitizer from Thai plants	4	205-214
รัตนภรณ์ ลีสิงห์	ไบโอดีเซลจากน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก Biodiesel from microalgal oil	3	135-143
วิจารณ์ สดศิริ และเรืองอุไร เมธาวิ	บทประยุกต์ของการหมุนแกนและการเลื่อนแกนทางขนานในการหาจุดสะท้อน	3	144-150
วิวัฒน์ ยังดี	การสร้างฟิล์มสีที่เปลี่ยนแบบควบคุมความกว้างและความสูงได้ผ่านทางพอร์ตขนาน	1	42-48
วิภาดา หงส์ทะนี ศักดิ์สิทธิ์ จันทรไทย วรรณดี บุญญศิริชด และเฉลิม เรืองวิริยะชัย	การผลิตและการวิเคราะห์สารปฏิชีวนะฟีนาคีนจากแบคทีเรีย <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	1	49-59
สมพร เฉลิมสุข	เรเดียม-226:นิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติที่น่าสนใจในเชิงสิ่งแวดล้อม	1	13-16
สมพร ประเสริฐส่งสกุล และวิฑูล ไชยภักดี	การออกดอกของกล้วยไม้หวายเหลืองจันทบูร ( <i>Dendrobium friedericksianum</i> Rchb.f) ในหลอดทดลอง	3	180-194
สาริต แซ่จิ่ง	มีจำนวนเฉพาะอยู่เป็นจำนวนอนันต์	1	22-27
สุเมธา สุวรรณบุรณ์	การเตรียมอนุภาคนาโนของสังกะสีออกไซด์ด้วยวิธีการบดและการตกตะกอน	4	215-221
สันติ ทองธรรมมา ศักดิ์สิทธิ์ จันทรไทย วรรณดี บุญญศิริชด และเฉลิม เรืองวิริยะชัย	การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรบางประการที่มีผลกระทบต่อสมบัติของไฟโอไซยานิน A Study on an influence of some factors affecting on pyocyanin	2	123-133
โสภณ บุญลือ	พัฒนาการเข้าอาศัยของเชื้อราอาร์บัสคูลาร์มายคอร์ไรซาในรากพืช การดูดซับและการเคลื่อนย้ายฟอสฟอรัส Development of Root Colonization of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Phosphorus Uptake and Transportaion	2	73-81
หนูเดือน เมืองแสน	ไมโครอาร์เอ็นเอ (microRNA)	2	67-69

ผู้เขียน	ชื่อเรื่อง	ฉบับที่	หน้า
อำพา เหลืองภิรมย์ และพันเพชร เมล่น้อย	ผลต้านฤทธิ์ของชาเขียวต่อพิษจากยาพารา- เซตามอลในเยื่อเยื่อตับอัมตะและคุณภาพน้ำเชื้อ Protective effect of green tea against paracetamol induced hepatotoxicity, tests and quality of seminal fluid impairment	4	222-230
อนุสรณ์ ศรีธีระวิโรจน์	แบบจำลองการนำความร้อนใน 2 มิติ	4	246-251
อนุสรณ์ ศรีธีระวิโรจน์	แบบจำลองเชิงตัวเลขของการเคลื่อนที่ของวัตถุ ในแนววิถีโค้ง โดยคิดแรงเสียดทานของอากาศ	1	17-21
Chavi Yenjai, Khaetthareeya Sutthanut, Bungon Sripanidkulchai, Nate Mungkhun, Chalayut Wongma, Siriboon Mukdasai, Teeraporn Kongkaew	Further Studies of Bioactive Flavonoids from <i>Kaempferia parviflora</i>	1	37-41
Janpen Intaraprasert	การแยกสารไครอลของตัวยาเบต้า-บล็อกเกอร์ บางชนิด โดยเทคนิคแก็บพลีลารีอิลีกโตร- โฟรีซิส Chiral Separation of Some $\beta$ -blocker Drugs by Capillary Electrophoresis	2	95-107

**ดัชนีอนุกรมวารสารวิทยาศาสตร์ มข.  
(เรียงตามชื่อเรื่อง)  
ปีที่ 35 (พ.ศ. 2550)**

ชื่อเรื่อง	ผู้เขียน	ฉบับที่	หน้า
การคำนวณเชิงตัวเลขของการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวโค้งภายใต้แรงโน้มถ่วง Numerical Calculation of Motion of a Falling Body under Gravitational Force	ชาญเรืองฤทธิ์ จันทร์นอก	3	195-203
การคำนวณพลังงานไอออไนเซชันของกรดเปปไทด์นิวคลีอิกโดยวิธีทางเคมีควอนตัม	กัชรินทร์ ศิริวงศ์	1	28-36
การคัดแยกและลักษณะสมบัติบางประการของแบคทีเรียโอฟาจำเพาะต่อ <i>S. typhi</i> Isolation and partial characterization of <i>Salmonella typhi</i> -specific bacteriophage	กัญญ์จนา นิกดี	3	162-169
การเตรียมอนุภาคนาโนของสังกะสีออกไซด์ด้วยวิธีการบดและการตกตะกอน	สุเมธา สุวรรณบุรณ์	4	215-221
การเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานของด้วงเต่าห้าไร <i>Stethorus pauperculus</i> (Weise) และ <i>Stethorus siphonulus</i> Kapur Comparative morphology of acarophagous lady beetles, <i>Stethorus pauperculus</i> (Weise) and <i>Stethorus siphonulus</i> Kapur	จุรีรัตน์ รัตนทิพย์ นุชรัย ศิริ และอังศุมาลย์ จันทราปัดย์	3	170-179
การผลิตและการวิเคราะห์สารปฏิชีวนะฟีนาคีนจากแบคทีเรีย <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	วิภาดา หงส์ทะนี ศักดิ์สิทธิ์ จันทร์ไทย วรรณดี บัญญัติรัชต์ และเฉลิม เรืองวิริยะชัย	1	49-59
การแยกสารไครอลของตัวยาเบต้า-บล็อกเกอร์บางชนิดโดยเทคนิคแคปิลลารี อิเล็กโตรโฟรีซิส Chiral Separation of Some $\beta$ -blocker Drugs by Capillary Electrophoresis	Janpen Intaraprasert	2	95-107

ผู้เขียน	ชื่อเรื่อง	ฉบับที่	หน้า
การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน และกรดไขมันของ จิ้งหรีดทองลาย ( <i>Gryllus</i> sp.) ที่เลี้ยงเพื่อการค้า	บรรจง เชื้อเมืองพาน วิรัช ว่องพัฒนากุล และปวีณา พงษ์คนตรี	2	82-87
การศึกษาเปรียบเทียบการใช้สารละลาย เดกแทรนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ในการแยกเมล็ด เลือดขาวชนิดนิวโทรฟิลในกระต่าย	ปรานอม กุชฎาภิรมย์ วิภาวรรณ ชูเผือก และอนุชัย นิเวศน์ปฐมวัฒน์	2	108-112
การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรบางประการที่มี ผลกระทบต่อสมบัติของไพโอไซยานิน A Study on an influence of some factors affecting on pyocyanin	สันติ ทองธรรมมา ศักดิ์สิทธิ์ จันทร์ไทย วรรณดี บุญญัตร์ชาติ และเฉลิม เรืองวิริยะชัย	2	123-133
การสร้างฟิล์มสีที่เคลือบแบบควบคุมความกว้าง และความสูงได้ผ่านทางพอร์คขนาน	วิวัฒน์ ยังดี	1	42-48
การออกดอกของกล้วยไม้หวายเหลืองจันทร์บูร ( <i>Dendrobium friedericksianum</i> Rchb.f) ใน หลอดทดลอง	สมพร ประเสริฐส่งสกุล และวิฑูร ไชยภักดี	3	180-194
ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็ง ขนาด อนุภาค น้ำหนักโมเลกุล และสมบัติวิทยา การเสกของน้ำยางธรรมชาติ Correlation between Solids Content, Particle Size, Molecular Weight and Rheological Prop- erties of Natural Rubber Latex	พรทิพย์ ประกายมณีวงศ์ ไชยวัฒน์ รักสกุลพิวัฒน์ และจันทิมา ดีประเสริฐกุล	4	239-245
ความหลากหลายของโพรโทซัวในบ่อบำบัด น้ำเสียแบบชีวภาพของโรงงานน้ำตาลมิตรภูเวียง Diversity of Protozoa in Biological Waste- water Treatment Ponds of Mitr Phuviang Sugar Factory	พินิจ หวังสมนึก และวรุณยุภา เย็นเฉื่อย	4	264-276
เซลล์แสงอาทิตย์กับสีย้อมไวแสงจากพืชใน ประเทศไทย Solar Cells and Dye-sensitizer from Thai plants	พีรภิกดิ์ คมสัน	4	205-214

ผู้เขียน	ชื่อเรื่อง	ฉบับที่	หน้า
แนวโน้มผลกระทบของการชะล้างเกลือตามธรรมชาติและการผลิตเกลือต่อคุณภาพน้ำในแม่น้ำสงคราม The Impacts Trend of Natural Leaching and Salt Production on the Water Quality of Songkram River	ชุติมา กุญ์สมุทร ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง ศุภลักษณ์ ศรีจารนัย และรัตนา มหาชัย	4	252-263
แนวทางการสังเคราะห์โมเลกุลต้นแบบสำหรับยับยั้งเอนไซม์ IspH Synthesis Strategy of Molecular Templates for IspH Enzyme Inhibitors	ชนกพร เผ่าศิริ และคณะ	4	231-238
บทประยุกต์ของการหมุนแกนและการเลื่อนแกนทางขนานในการหาจุดสะท้อน ไบโอดีเซลจากน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก Biodiesel from microalgal oil	วิจารณ์ สดศิริ และเรืองอุไร เมธาวิ รัตนภรณ์ ลีสิงห์	3	144-150
แบบจำลองการนำความร้อนใน 2 มิติ แบบจำลองเชิงตัวเลขของการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนววิถีโค้ง โดยคิดแรงเสียดทานของอากาศ	อนุสรณ์ ศรีธีระวิโรจน์ อนุสรณ์ ศรีธีระวิโรจน์	4 1	246-251 17-21
เปรียบเทียบ ลักษณะสัณฐานวิทยา การเจริญและความคงตัวของแบคทีเรียโอฟาที่จำเพาะต่อ <i>Salmonella typhi</i> และ <i>Shigella dysenteriae</i> Comparison of morphology, growth and stability of <i>S. typhi</i> and <i>S. dysenteriae</i> specific bacteriophages	กัญญ์จนา นีกดี	2	113-122
ผลของสนามศักย์โน้มถ่วงโลกต่อความเร็วของเสียงในอากาศ	ชาญเรืองฤทธิ์ จันทร์นอก	1	8-12
ผลด้านฤทธิ์ของชาเขียวต่อพิษจากยาพาราเซตามอลในเยื่อเยื่อตับอันตะและคุณภาพน้ำเชื้อ Protective effect of green tea against paracetamol induced hepatotoxicity, tests and quality of seminal fluid impairment	อำพา เหลืองภิรมย์ และพันเพชร เมลั่น้อย	4	222-230
พัฒนาการเข้าอาศัยของเชื้อราอาร์บัสคูลาร์มายคอร์ไรซาในรากพืช การดูดซับและการเคลื่อนย้ายฟอสฟอรัส	โสภณ บุญลือ	2	73-81

ผู้เขียน	ชื่อเรื่อง	ฉบับที่	หน้า
Development of Root Colonization of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Phosphorus Uptake and Transportaion			
ฟังก์ชันกลั่นของสถานะพื้นของ โบซอนที่ถูกกักในสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับทิศทาง	ชาญุเรืองฤทธิ์ จันทร์นอก	2	61-66
มีจำนวนเฉพาะอยู่เป็นจำนวนอนันต์	สาธิต แซ่จิ่ง	1	22-27
ไมโครอาร์เอ็นเอ (microRNA)	หนูเดือน เมืองแสน	2	67-69
เรเดียม-226:นิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติที่น่าสนใจในเชิงสิ่งแวดล้อม	สมพร เฉลิมสุข	1	13-16
ไวรัสตับอักเสบ ซี	กัญญ์จนา นิกดี	1	1-7
สารฟีนอลิกที่ผลิตจาก <i>Pseudomonas</i> spp.	เฉลิม เรื่องวิริยะชัย	3	186-194
สี่สรรจากการคำนวณ	ประเสริฐ แข่งขัน	3	151-161
Further Studies of Bioactive Flavonoids from <i>Kaempferia parviflora</i>	Chavi Yenjai, Khaetthareeya Sutthanut, Bungon Sripanidkulchai, Nate Mungkhun, Chalalyut Wongma, Siriboon Mukdasai, Teeraporn Kongkaew	1	37-41

## ข้อแนะนำในการเขียนบทความลงวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

### ประเภทของเรื่องที่จะตีพิมพ์

1. รายงานผลการวิจัยและค้นคว้าหรือการสำรวจที่ยังไม่เคยตีพิมพ์ในวารสารหรือหนังสืออื่นมาก่อน
2. บทความปริทัศน์ ได้แก่งานเขียนที่รวบรวมหรือเรียบเรียงจากเอกสารหรือหนังสือต่าง ๆ เพื่อเผยแพร่และฟื้นฟูงานด้านวิชาการระดับต่าง ๆ
3. บทความแสดงข้อคิดเห็นหรือข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในด้านวิชาการ เรื่องแปล ข่าววิชาการย่อความจากงานวิจัยหรือหนังสือใหม่ที่นำเสนอ

### 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 บทความย่อ 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 ช่องห่างระหว่างบรรทัดตามมาตรฐาน
  - 1.8 พิมพ์ลงในกระดาษขาว A4 (โรเนียวสัน) โดยใช้กระดาษหน้าเดียว ความยาวไม่เกิน 10 หน้า ส่งต้นฉบับ 2 ชุด (ไม่ต้องส่งแผ่นดิสก์ หรือแผ่นซีดีในขั้นตอนนี้ เมื่อได้รับแจ้งว่าได้ลงพิมพ์แล้ว ผู้เขียนส่งฉบับแก้ไข 1 ชุด พร้อมแผ่นดิสก์ หรือแผ่นซีดี)
2. ต้นฉบับ จะถูกพิจารณาโดยกองบรรณาธิการ และจะตอบรับการได้รับบทความโดยไม่ส่งต้นฉบับคืน ผู้เขียนควรจะทำสำเนาเก็บไว้เป็นหลักฐานของตัวเอง 1 ฉบับ
3. ต้นฉบับ จะต้องมีความถูกต้องทั้งในด้านเนื้อหา และการใช้ภาษา รวมทั้งมีความสมบูรณ์ในรูปแบบพร้อมที่จะนำลงตีพิมพ์ได้
  4. ชื่อเรื่อง ให้ใช้ภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ไม่ยาวเกินไป และหลีกเลี่ยงการใช้คำย่อโดยไม่จำเป็น
  5. ชื่อผู้เขียน เขียนชื่อภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษพร้อมทั้งบอกสถานที่ทำงานให้ชัดเจน
  6. เนื้อเรื่อง ใช้ได้ทั้งภาษาไทยล้วนและภาษาอังกฤษล้วน ถ้าใช้ภาษาไทย ภาษาอังกฤษที่ใช้ปนกับภาษาไทยนั้นให้พยายามแปลเป็นไทยเท่าที่จะทำได้ และให้เขียนคำเดิมกำกับในวงเล็บ การทับศัพท์ภาษาอังกฤษ ตลอดทั้งการเขียนตัวสะกด การันต์ ในภาษาไทยให้ใช้ตามแบบราชบัณฑิตยสถาน

## ข้อแนะนำในการเขียนบทความลงวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

7. ในกรณีของบทความวิจัย ต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ และแบ่งเนื้อหาของบทความเป็นบทนำ วิธีดำเนินงาน ผลการวิเคราะห์ บทสรุปและวิจารณ์

8. เชิงอรรถ (footnote) ใช้เฉพาะที่จำเป็นเพื่อขยายหรือให้รายละเอียดเพิ่มเติมแก่ใจความเฉพาะตอนในบทความ

9. ตารางและภาพประกอบ ถ้าบรรยายประกอบตารางหรือภาพประกอบควรจะสั้นและชัดเจน ถ้าเป็นภาพถ่ายให้ใช้ภาพขาว-ดำ ขนาดโปสการ์ด ภาพเขียนลายเส้นควรเขียนด้วยหมึกดำ ภาพที่เขียนต้องชัดเจน และมีขนาดที่เหมาะสม

10. เอกสารอ้างอิง หรือบรรณานุกรม แนะนำให้เขียนตามแบบที่ทางวารสารกำหนด

### ส่งต้นฉบับมาที่

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

### อภิสิทธิ์สำหรับการสำหรับผู้เขียน

เรื่องที่ได้รับการตีพิมพ์ ผู้เขียนจะได้รับวารสารฉบับนั้น 2 เล่ม และสำเนาพิมพ์อีก 15 ชุด



## การเขียนเอกสารอ้างอิงในวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

**เอกสารอ้างอิง (Reference)** หมายถึง เอกสารหรือส่วนหนึ่งของเอกสารที่อ้างอิงถึงหรือแปลมาโดยตรง การเขียนเอกสารอ้างอิงในเนื้อหา นั้น ให้ใช้ระบบชื่อและปี เช่น Williams (2001) รายงานว่า... หรือ... (Williams, 2001) การเขียนเอกสารอ้างอิงในตอนท้ายบทความนั้น ให้ใส่เฉพาะเล่มที่มีการอ้างอิงไว้แล้วในเนื้อหาเท่านั้น หากอ้างอิงจาก เล่มภาษาไทย 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.

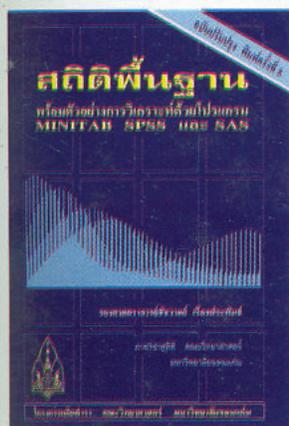
ข. ภาษาอังกฤษ

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

### หมายเหตุ

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

# หนังสือในโครงการผลิตตำรา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



## สถิติพื้นฐาน

พร้อมตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม  
MINITAB SPSS และ SAS

รองศาสตราจารย์ชัชวาลย์ เรืองประพันธ์  
พิมพ์ครั้งที่ 5 2543 • 510 หน้า

ISBN 974-675-666-4

ราคา 180 บาท



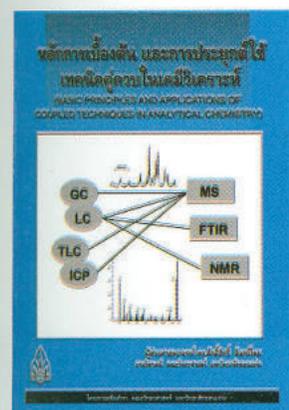
## แมงป่องข้าง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ตักดา ดาดวง  
นางสาวนันทวัน เอื้องวงศ์กุล

2547 • 64 หน้า

ISBN 974-435-571-9

ราคา 160 บาท

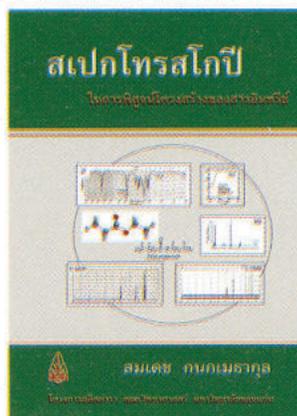


## หลักการเบื้องต้นและการประยุกต์ใช้เทคนิคคู่ควบในเคมีวิเคราะห์

รองศาสตราจารย์ ดร. ทักศิลาธิ์ จันทร์ไทย  
2543 • 202 หน้า

ISBN 974-678-333-2

ราคา 150 บาท

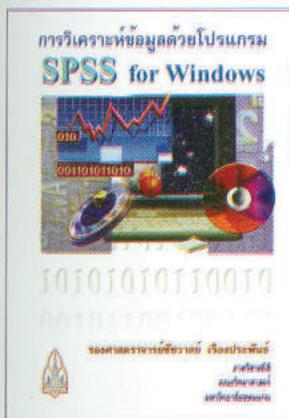


## สเปกโทรสโกปี ในการพิสูจน์โครงสร้างของสารอินทรีย์

รองศาสตราจารย์ ดร. สมเดช กนกเมธากุล  
2547 • 238 หน้า

ISBN 974-435-348-1

ราคา 150 บาท

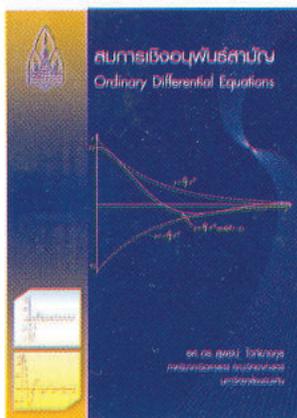


## การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม SPSS for Windows

รองศาสตราจารย์ชัชวาลย์ เรืองประพันธ์  
2544 • 620 หน้า

ISBN 974-654-608-2

ราคา 300 บาท

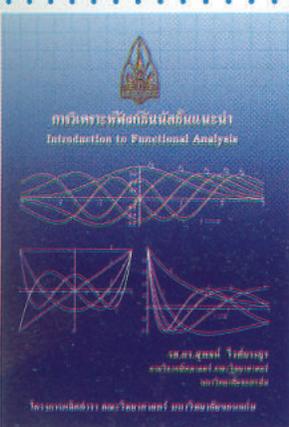


## สมการเชิงอนุพันธ์สามัญ Ordinary Differential Equations

รองศาสตราจารย์ ดร. สุทนต์ ไวกัยงกูร  
2550 • 470 หน้า

ISBN 978-974-7707-55-7

ราคา 240 บาท

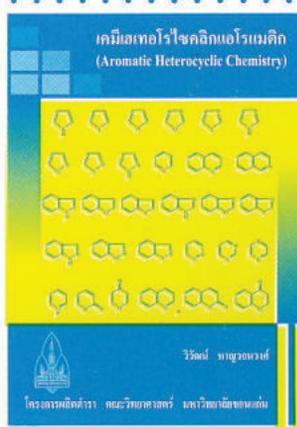


## การวิเคราะห์ฟังก์ชันหลายตัวแปร

รองศาสตราจารย์ ดร. สุทนต์ ไวกัยงกูร  
2547 • 344 หน้า

ISBN 974-367-958-8

ราคา 200 บาท



## เคมีเฮเทอโรไซคลิกแอโรแมติก Aromatic Heterocyclic Chemistry

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ หาญวงษ์  
2550 • 122 หน้า

ISBN 978-974-7707-71-7

ราคา 90 บาท

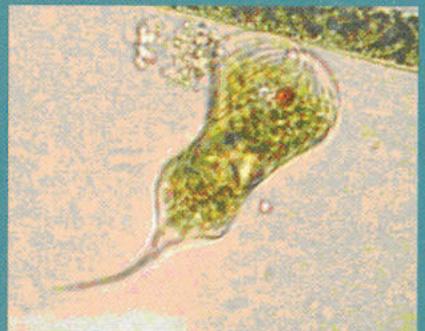
ท่านที่สนใจหนังสือในโครงการผลิตตำรา ติดต่อสั่งซื้อได้ที่... รองศาสตราจารย์ชัชวาลย์ เรืองประพันธ์  
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002 โทรศัพท์/โทรสาร 0 4320-2375 E-mail: chatrav@kku.ac.th



*Spirostomum teres*



*Colep octospinus*



*Phacus torta*