ISSN : 0125 - 2364

วารสาร

# วิทยาศาสตร์มข.

KKU SCIENCE JOURNAL

ปีที่ 36 ฉบับที่ 4 (ต.ค. - ธ.ค. 51) Vol. 36 No. 4 (Oct. - Dec. 08)

ISSN 0125 - 2364

วารสาร
# วิทยาศาสตร์ มข.
KKU SCIENCE JOURNAL

**เจ้าของ**

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**สำนักงาน**

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

**วัตถุประสงค์**

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

**กำหนดออก** ปีละ 4 ฉบับ

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

**ที่ปรึกษา**

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์ (ละออศรี เสนาะเมือง)
รองคณบดีฝ่ายวิชาการ (เอกพรรณ สวัสดิ์ชิตัง)

**บรรณาธิการ**

นฤมล แสงประดับ

**กองบรรณาธิการ**

กิตติกร นาคประสิทธิ์
งามนิจ อาจอินทร์
ชุติมา หาญจวณิช
ประเสริฐ แข่งขัน
สมปอง ธรรมศิริรักษ์
สมเดช กนกเมธากุล
สุพรรณี อึ้งปัญสัตวงศ์
เสาวนิต ทองพิมพ์
อัจฉราภรณ์ ภักดี
อริศรา ชาแก้ว

**ฝ่ายศิลป์และภาพ**

กิเลน ติณนรเศรษฐ์
สุชาติ เทพภูเขียว

**ฝ่ายเหรัญญิก**

บุญคุ้ม เหลือล้น

**ฝ่ายจัดการและเลขานุการ**

สุภาพร พิมพ์วาปี
สมศักดิ์ อุ่นจันที

**บทความและงานวิจัย ได้รับการกลั่นกรอง จากผู้ทรงคุณวุฒิ**

*บทความหรือข้อคิดเห็นใด ๆ ในวารสารนี้เป็นของผู้เขียน ไม่จำเป็นต้องสอดคล้องกับทัศนะของกองบรรณาธิการ*

# สารบัญ Table of Contents

ISSN 0125 - 2364

วารสาร
# วิทยาศาสตร์ มข.
KKU SCIENCE JOURNAL

ปีที่ 36 ฉบับที่ 4 Volume 36 Number 4

## บรรณาธิการแถลง

## บทความ

❐ บทบาทของการจัดเรียงตัวใหม่ของโครโมโซม
กับการแตกแขนงของสปีชีส์
The Role of Chromosome Rearrangements
in Speciation
*ไพโรจน์ ประมวล*..... 253

❐ ประจุบนผิวอนุภาคดินขาว
Surface Charges on Kaolinite Particles
*สุธรรม ศรีหล่มสัก*..... 262

❐ การฉายรังสีบำบัดแบบผสานความเข้ม
Intensity Modulated Radiation Therapy
*พัฒนา ภู่วนิชย์*..... 270

## งานวิจัย

❐ การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน
และคุณค่าทางโภชนาการของผักหวานบ้าน
(*Sauropus androgynus* L. Merr.)
Determination of Antioxidant Capacity
and Nutritive Values of Pak-Wanban
(*Sauropus androgynus* L. Merr.)
*Narumon Benjapak, Prasan Swatsitang*
*and Sayan Tanpanich*..... 279

10 AUG 2009
มหาวิทยาลัยมหิดล ศูนย์วิทยทรัพยากร
วิทยาศาสตร์ มงคลสุข
LIBRARY
FACULTY OF SCIENCE
MAHIDOL UNIVERSITY

# สารบัญ (ต่อ) Table of Contents (cont.)

ISSN 0125 - 2364

วารสาร
# วิทยาศาสตร์ มข.
KKU SCIENCE JOURNAL

ปีที่ 36 ฉบับที่ 4 Volume 36 Number 4

## งานวิจัย

❐ Characterization of a Fragrant Gene and Enzymatic Activity of Betaine Aldehyde Dehydrogenase in Aromatic and Nonaromatic Thai Rice Cultivars

*Pichedsak Srivong, Preeya Wangsomnuk, Paweena Pongdontri*..... 290

❐ การอนุรักษ์และใช้ประโยชน์ทรัพยากรป่าชุมชน บ้านโคกประดู่ ตำบลมหาโพธิ อำเภอสระโบสถ์ จังหวัดลพบุรี

Conservation and Utilization of Community Forest Resource of Ban Kok Pra Doo, Maha Pho Sub-district, Sa Bot District, Lop Buri Province

*ธเนศ แตงสาตร์, ยรรยงค์ อินทร์ม่วง, มณีรัตน์ องค์วรรณดี*..... 302

❐ การประยุกต์ใช้หญ้าอาหารสัตว์ในการบำบัดน้ำเสียในระบบบึงประดิษฐ์

Application of Pasture for Wastewater Treatment in Constructed Wetland

*พันธ์ทิพย์ กล่อมเจ๊ก*..... 312

# สารบัญ (ต่อ) Table of Contents (cont.)

ISSN 0125 - 2364

วารสาร
วิทยาศาสตร์ มข.
KKU SCIENCE JOURNAL

ปีที่ 36 ฉบับที่ 4 Volume 36 Number 4

## งานวิจัย

❐ ประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสีย
ด้วยถ่านกัมมันต์กะลามะพร้าว
Adsorption Effectiveness of Sulfide Ion
in Wastewater by Coconut-Shell Activated Carbons
*สรัญญา ธนสัมฤทธิ์, นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์, วิทยา ปั้นสุวรรณ*..... 327

❐ การดูดซับเสียงในยางธรรมชาติผสมดินขาว
Acoustic Absorption of Clay Filled Natural Rubber
*สมบัติ พุทธจักร, ธรณิศ นาวารัตน์, ดาริกา จาเอาะ*..... 338

❐ HYPERIDENTITIES IN THE $x(yz) \approx x(y(zz))$
CLASS OF GRAPH ALGEBRAS OF TYPE (2,0)
*Mittree Krapeedang, Tiang Poomsa-ard*..... 348

❐ การปรับปรุงระบบการบริหารคงคลังของอะไหล่
ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์
Improving the Inventory Management of Spare Parts
in Hard Disk Drive Business
*มัญชุพัฒน์ ฉ่ำสูงเนิน*..... 364

วารสาร
# วิทยาศาสตร์ มข.
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
Arissara Chakaew

**Artists** Kilen Tinnoraset
Suchart Thepphukhieo

**Treasurer** Boonkoom Lualon

**Managing Staff and Secretary** Suphaporn Phimwapi
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.**

# บรรณาธิการแถลง

***สวัสดีคะ*** **ท่านผู้อ่านที่รักและเคารพทุกท่าน**

ข่าวคนเผือกในแทนซาเนียและบุรุนดีถูกคุกคามเนื่องจากความเชื่อว่า เลือดเนื้อของคนเหล่านี้เป็นส่วนผสมของยาวิเศษ ทำให้ตั้งแต่เดือนมีนาคม พ.ศ. 2551 เป็นต้นมา มีผู้เคราะห์ร้ายถูกฆ่าตายแล้วกว่า 30 ราย นับเป็นเรื่องน่าสลดใจอย่างยิ่ง เพราะในแวดวงวิทยาศาสตร์ทราบกันดีว่าสภาพเผือก (albinism) เป็นลักษณะพันธุกรรม (recessive autosome) แต่เพราะอวิชชาจึงทำให้เกิดการเบียดเบียนกันเช่นนี้ สำหรับประเทศไทยในช่วงระหว่างความขัดแย้งทางการเมืองที่ยกระดับจากการชุมนุมปราศรัยไปสู่การยึดทำเนียบรัฐบาล และในที่สุดปิดสนามบินสุวรรณภูมิและสนามบินดอนเมืองนั้น ได้เกิดปรากฏการณ์ธรรมชาติบนท้องฟ้าเมื่อดาวศุกร์ ดาวพฤหัสบดี และดวงจันทร์ โคจรมาอยู่ใกล้กัน เกิดเป็น “พระจันทร์ยิ้ม” ที่ทำให้ทุกคนที่มองเห็นต่างมีจิตใจเบิกบานและมีสีหน้ายิ้มแย้มตามไปด้วย “พระจันทร์ยิ้ม” อาจทำให้หลายคนระลึกได้ว่าเราทั้งหลายต่างเป็นเพื่อนผู้ร่วมทุกข์ เกิด แก่ เจ็บ ตาย ด้วยกัน

วารสารวิทยาศาสตร์ มข. ฉบับนี้ มีเรื่องมาเสนอมากมาย เช่น แนวคิดการแตกแขนงของสปีชีส์จากการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซม การดูดซับเสียงของยางธรรมชาติผสมดินขาว การใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับซัลไฟด์อิออนในน้ำเสีย และการใช้หญ้าอาหารสัตว์บำบัดน้ำเสียในระบบบึงประดิษฐ์ การไขความลับของข้าวหอมกับ *Badh 2 gene* เรียนรู้บทเรียนการอนุรักษ์และการใช้ประโยชน์ทรัพยากรป่าชุมชนอย่างยั่งยืนของชุมชนบ้านโคกป่าดู่ จังหวัดลพบุรี ที่สามารถพลิกฟื้นป่าเสื่อมโทรมให้กลายเป็นแหล่งอาหารของชุมชน เป็นที่อยู่อาศัยของพันธุ์พืชและสัตว์ป่าหายาก อ่านเรื่องคุณค่าทางโภชนาการและความสามารถในการต้านออกซิเดชั่นของผักหวานบ้านและเพิ่มความรู้ด้านเทคโนโลยีด้านการแพทย์ในการวินิจฉัยโรค และการบำบัดรักษาโรคมะเร็งด้วยเทคนิค IMRT ที่จะช่วยให้คนไข้มีโอกาสหายป่วยหรือรอดชีวิตมากขึ้น เรื่องของแม่เหล็กเซรามิกส์ รวมทั้งการปรับปรุงระบบการบริหารคงคลังของอะไหล่ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ และปิดท้ายด้วยงานวิจัยด้านคณิตศาสตร์สำหรับลับสมองก่อนสิ้นปี

เนื่องในวาระดิถีส่งท้ายปีเก่าพุทธศักราช 2551 และขึ้นปีใหม่พุทธศักราช 2552 กองบรรณาธิการฯ ขอกราบขอบพระคุณท่านผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ได้กรุณาพิจารณาบทความและขออาราธนาคุณพระศรีรัตนตรัยและสิ่งศักดิ์สิทธิ์ในสากลโลกคุ้มครองให้ท่านผู้ทรงคุณวุฒิ ท่านผู้เขียนบทความและท่านผู้อ่านทุกท่าน เจริญด้วยจตุรพิธพรชัย วารสารฉบับนี้จะเป็นฉบับสุดท้ายของกองบรรณาธิการฯ ชุดปัจจุบัน และขอแจ้งข่าวดีว่าวารสารวิทยาศาสตร์ มข. ได้รับทุนสนับสนุนการพัฒนาวารสารจากสำนักงานการอุดมศึกษา เชิญพบกับกองบรรณาธิการชุดใหม่และโฉมใหม่ของวารสารในปีหน้าคะ

***บรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข.***

# บรรณาธิการแถลง

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข. ขอกราบขอบพระคุณท่านผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้เกียรติพิจารณาบทความวิจัยและบทความปริทัศน์ เพื่อลงในวารสาร ฉบับปีที่ 36 (ปี พ.ศ. 2551) ดังรายนามต่อไปนี้ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับความกรุณาจากท่านตลอดไป

| | |
|---|---|
| ผศ.ดร.ทิพวัลย์ | พัฒนางกูร |
| ผศ.ดร.อัจฉรา | หาญชูวงศ์ |
| รศ.ศิรภพ | สุวรรณโรจน์ |
| ผศ.ดร.จิราภรณ์ | โตจรัส |
| ดร.ไชยพงษ์ | เรืองสุวรรณ |
| ดร.อรุจี | เหมือนวงศ์ |
| รศ.ดร.ช่อฟ้า | นิลรัตน์ |
| ผศ.ดร.พัฒนี | อุดมกะวานิช |
| รศ.สุพรรณี | อึ้งปัญสัตวงศ์ |
| รศ.ดร.สำรวม | จงเจริญ |
| รศ.ดร.วันเพ็ญ | วิโรจนกูฎ |
| รศ.วิรัช | เรืองศรีตระกูล |
| ศ.ดร.ณรงค์ | ปั้นนิ่ม |
| ผศ.สมจิตร์ | วิภาวีนุกูล |
| รศ.ดร.สมปอง | ธรรมศิริรักษ์ |
| ผศ.ดร.คมศร | ลมไธสง |
| ผศ.ดร.สินีนาฎ | ศิริ |
| ผศ.ดร.ประสาร | สวัสดิ์ซิตัง |
| ผศ.ดร.ศิริธร | ศิริอมรพรรณ |
| รศ.ดร.ศักดา | ดาดวง |
| ดร.ณรงค์ฤทธิ์ | อัศวเรืองพิภพ |
| รศ.สนั่น | สุภาลัย |
| รศ.ดร.สาวิตรี | ลิ่มทอง |
| รศ.ดร.อาภรณ์ | วงษ์วิจารณ์ |
| รศ.กรรณิกา | ชัชวาลวานิช |
| ดร.สุขใจ | รัตนยุวกร |
| รศ.ศาสตรา | วงศ์ธนวสุ |
| ดร.สาธิต | แซ่จึง |
| ดร.กิตติกร | นาคประสิทธิ์ |
| รศ.ดร.ฉวีวรรณ | รัตนประเสริฐ |
| ผศ.ดร.รณสรรพ์ | ชินรัมย์ |
| ผศ.ดร.เพ็ญประภา | เพชระบูรณิน |
| รศ.ดร.แสวง | รวยสูงเนิน |
| รศ.นิตย์ | รื่นรมย์ |
| รศ.ดร.เพียงพบ | มนตร์นวลปรางค์ |
| ผศ.ดร.อภิชัย | เหมะธุริน |
| ดร.พันทิพย์ | โตแก้ว |
| ดร.จิตรลดา | สมทรัพย์ |
| ศ.ดร.ทศพร | วงศ์รัตน์ |
| ดร.นพคุณ | ภักดีณรงค์ |
| รศ.ดร.พรศิลป์ | ผลพันธิน |
| ผศ.ดร.ยรรยงค์ | อินทร์ม่วง |
| ผศ.พิศมัย | ชัยรัตน์อุทัย |
| ศ.ดร.ทวีศักดิ์ | บุญเกิด |
| รศ.ดร.อารีย์ | ทองภักดี |
| ศ.ดร.ยุพาภรณ์ | เข็มประสิทธิ์ |
| รศ.ดร.พิเชฐ | ชาวหา |
| ดร.เจษฎาพร | พิทักษ์สุธีพงศ์ |
| รศ.ดร.พรเทพ | ถนนแก้ว |
| ผศ.ดร.อัจฉราภรณ์ | ภักดี |
| รศ.ดร.แสวง | รวยสูงเนิน |
| รศ.มานัส | มงคลสุข |
| ผศ.ประวัติ | ผดุงเจริญ |
| ผศ.ดร.พัฒนา | อนุรักษ์พงศธร |
| ดร.ไตรเทพ | วิชย์โกวิทเทน |
| รศ.ดร.เฉลียว | กุวังคะดิลก |
| ผศ.ดร.ศิริรัตน์ | วงศ์ประกรณ์กุล |
| ผศ.ดร.ปณิธาน | พีรพัฒนา |
| ดร.โสพล | บุตรงาม |
| รศ.วิชาญ | เตชิตธีระ |
| ผศ.ดร.พิสิฏฐ์ | เจริญสุดใจ |
| รศ.กัลยาณี | คุปตานนท์ |
| รศ.ดนัย | อารยะพงษ์ |

*บรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข.*

ว.วิทย. มข. 36(4) 253-261 (2551) KKU Sci. J.36(4) 253-261 (2008)

# บทบาทของการจัดเรียงตัวใหม่ของโครโมโซม กับการแตกแขนงของสปีชีส์

# The Role of Chromosome Rearrangements in Speciation

*ไพโรจน์ ประมวล*[1]

## บทนำ

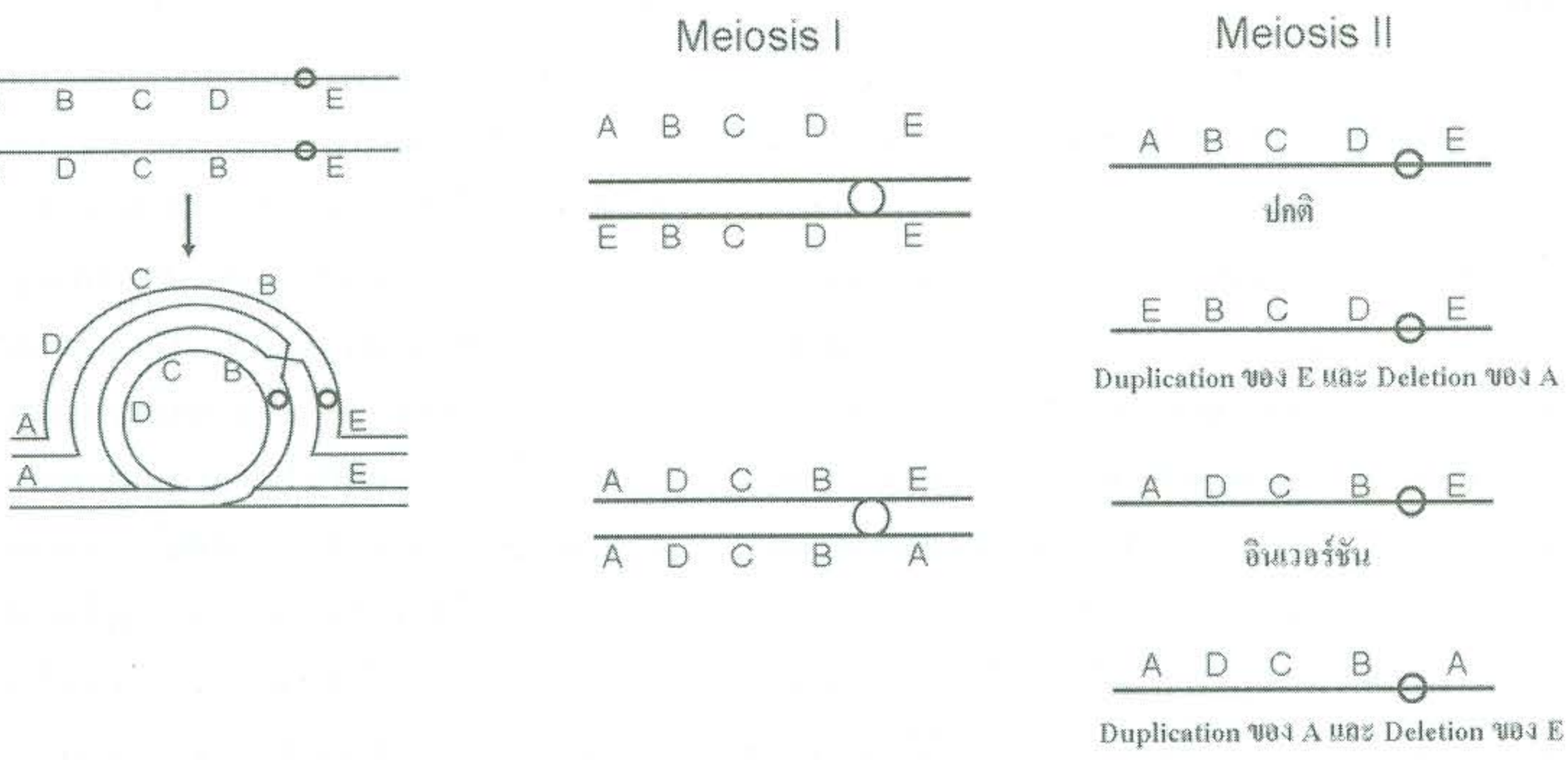
การแตกแขนงของสปีชีส์ (speciation) เป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญทางชีววิทยา ซึ่งได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางจากนักชีววิทยาทั้งในอดีตและปัจจุบัน ตามคำจำกัดความของสปีชีส์ ทางชีววิทยา (biological species concept) สปีชีส์ หมายถึง กลุ่มของสิ่งมีชีวิตที่สามารถผสมพันธุ์กันได้และมีการแบ่งแยกทางการสืบพันธุ์จากสปีชีส์อื่น (Mayr, 1963) ดังนั้นกลไกที่สำคัญที่นำไปสู่การแตกแขนงของสปีชีส์คือการแบ่งแยกทางการสืบพันธุ์ (reproductive isolation) มีการเสนอแนวคิดเรื่องกลไกการแตกแขนงของสปีชีส์อย่างหลากหลาย แต่กลไกที่นักชีววิทยาส่วนใหญ่ยอมรับและมีหลักฐานที่สนับสนุนแนวคิดอย่างชัดเจนคือ allopatric speciation model ซึ่งเสนอโดย Mayr (1963) กลไกการแตกแขนงของสปีชีส์แบบ allopatric speciation ให้ความสำคัญกับการแบ่งแยกทางภูมิศาสตร์ของประชากร และการจำกัดของยีนโฟลว (gene flow) ด้วยแนวกั้นทางภูมิศาสตร์ การสะสมความแตกต่างทางพันธุกรรมเนื่องจากยีนโฟลวถูกจำกัดผลักดันให้ประชากรไม่สามารถผสมพันธุ์กันได้เมื่อการกระจายทางภูมิศาสตร์ของสองประชากรซ้อนทับกันอีกครั้ง (secondary contact)

นอกเหนือจากแนวคิดการแตกแขนงของสปีชีส์แบบ allopatric ปัจจุบันแนวคิดที่กำลังได้รับความสนใจ คือการแตกแขนงของสปีชีส์จากการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซม แม้ว่าแนวคิดเรื่องการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมกับการแตกแขนงของสปีชีส์จะได้รับความสนใจมานาน เนื่องจากสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่มีความแตกต่างของโครโมโซม เช่น จำนวนของโครโมโซมแตกต่างกัน หรือรูปร่างของโครโมโซมแตกต่างกันจากการเกิดอินเวอร์ชัน (inversion) ทรานสโลเคชัน (translocation) เซนทริกฟิวชัน (centric fusion) และเซนทริกฟิชชัน (centric fission) แต่การยอมรับแนวคิดเรื่องการแตกแขนงของสปีชีส์จากการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมยังจำกัดอยู่เฉพาะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการเพิ่มจำนวนโครโมโซมแบบโพลีพลอยด์ (polyploidization) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพืช เชื่อว่าประมาณร้อยละ 50 ของพืชดอกในปัจจุบันแตกแขนงเป็นสปีชีส์ใหม่จากการกลายพันธุ์แบบโพลีพลอยด์ในอดีต (Ayala

[1] ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต.ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150
E-mail: pairot.p@msu.ac.th

and Coluzzi, 2005)

บทบาทของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโครโมโซมที่มีการจัดเรียงส่วนของโครโมโซมใหม่ (structural rearrangements) รูปแบบต่างๆ เช่น ทรานสโคเคชัน และอินเวอร์ชัน จะมีผลต่อการแตกแขนงของสปีชีส์ ซึ่งได้รับความสนใจมานาน (White, 1978) โดยเชื่อว่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้เกิดการแบ่งแยกทางการสืบพันธุ์(reproductive isolation) ของประชากรได้ เนื่องจากในกระบวนการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตที่มีโครโมโซมเป็นแบบเฮตเทอโรไซกัส (heterozygous) ซึ่งมีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมแบบรีซิโปรกัลทรานสโลเคชัน (reciprocal translocation) หรือแบบอินเวอร์ชันอาจมีครอสซิงโอเวอร์ (crossing over) ภายในห่วงของอินเวอร์ชัน (inversion loop) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโครโมโซมเหล่านี้จะมีผลให้ได้เซลล์สืบพันธุ์ที่มีโครโมโซมผิดปกติ (รูปที่ 1) เช่น การเพิ่มจำนวน (duplication) หรือการขาดหายไป (deletion) ของยีน ซึ่งความผิดปกติดังกล่าวทำให้เซลล์สืบพันธุ์ตาย หรือทำให้ลูกที่เกิดจากเซลล์สืบพันธุ์ที่ผิดปกติดังกล่าวเป็นหมัน ดังนั้นฟิตเนสของลูกผสม (hybrid) จึงลดลง กระบวนการการคัดเลือกโดยธรรมชาติ (natural selection) จะส่งเสริมให้เกิดการแบ่งแยกทางการสืบพันธุ์ระหว่างประชากรในที่สุด ซึ่งปรากฏการณ์ที่ลูก ผสมมีฟิตเนสลดลงเรียกว่า “underdominance”




**รูปที่ 1** อินเวอร์ชันแบบเฮตเทอโรไซกัสที่เกิดครอสซิงโอเวอร์ภายในห่วงของอินเวอร์ชันมีผลให้ได้เซลล์สืบพันธุ์ที่มีความผิดปกติ ซึ่งมีผลให้เซลล์สืบพันธุ์ตายหรือทำให้ฟิตเนสของลูกผสมลดลง

## โมเดลของการแตกแขนงของสปีชีส์จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโครโมโซม

โมเดลของการแตกแขนงของสปีชีส์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโครโมโซมมีผู้เสนอไว้จำนวนมาก อย่างไรก็ตามมีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ได้รับความสนใจในวงกว้าง โมเดลเกือบทั้งหมดที่มีการเสนอในอดีตมีเงื่อนไขร่วมกันคือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโครโมโซมที่จะนำไปสู่การแตกแขนงของสปีชีส์ได้ ต้องเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ทำให้ลูกผสมมีฟิตเนสลดลง ซึ่งอาจเป็นหมันหรือตาย โมเดลที่เสนอ (King, 1993; Rieseberg, 2001) มีข้อแตกต่างกันบ้างเล็กน้อยดังนี้

(1) Chain process in speciation model

(White, 1978) กล่าวว่าการแบ่งแยกทางการสืบพันธุ์ซึ่งเทียบเท่ากับการแตกแขนงของสปีชีส์ เกิดจากอิทธิพลของความแตกต่างของโครงสร้างของโครโมโซมหลายๆแห่งรวมกัน ซึ่งความแปรผันของโครงสร้างของโครโมโซมแต่ละตำแหน่งมีผลต่อฟิตเนสน้อย แต่เมื่อรวมกันจำนวนมากทำให้เกิดความแตกต่างและส่งผลให้เกิดการแบ่งแยกทางการสืบพันธุ์ในที่สุด

(2) Chromosomal transilience model (Templeton, 1981) กล่าวว่าการแบ่งแยกทางการสืบพันธุ์เกิดจากอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโครโมโซมที่มีผลรุนแรงต่อฟิตเนสของลูกผสม โครโมโซมรูปแบบใหม่ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงนี้เพิ่มจำนวนขึ้นในประชากรโดยอิทธิพลของเจเนติกดริฟต์ (genetic drift) ซึ่งต้องอาศัยประชากรที่มีขนาดเล็กและยีนโฟลวจากประชากรอื่นถูกจำกัด

(3) Stasipatric model (White, 1978) กล่าวว่าการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโครโมโซมมีผลในการลดฟิตเนสของลูกผสมอย่างรุนแรง การเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมดังกล่าวเกิดขึ้นในประชากรที่อยู่ภายในขอบเขตการกระจายทางภูมิศาสตร์ของสปีชีส์เดิม การเพิ่มจำนวนของสมาชิกในประชากรที่มีโครโมโซมรูปแบบใหม่เป็นผลมาจากกลไก “meiotic drive”

(4) Quantum speciation model (Grant, 1981) กล่าวว่าการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโครโมโซมเกี่ยวข้องกับการปรับตัวของสิ่งมีชีวิต โครโมโซมรูปแบบใหม่นี้จะเพิ่มจำนวนและอยู่คงที่ในประชากรที่อพยพไปตั้งถิ่นฐานใหม่ (founder population) อย่างรวดเร็ว จากอิทธิพลของเจเนติกดริฟต์ และการผสมพันธุ์แบบเลือดชิด (inbreeding) ซึ่งนำไปสู่การแบ่งแยกทางการสืบพันธุ์ระหว่างประชากรใหม่กับประชากรเดิม

(5) Saltational model (Lewis, 1966) กล่าวว่าการผสมแบบเลือดชิดที่เกิดขึ้นในประชากรซึ่งอพยพไปตั้งถิ่นฐานบริเวณชายขอบ (peripheral population) ของประชากรเดิมเหนี่ยวนำให้เกิดการแตกหักของโครโมโซม และทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของโครโมโซม โดยโครโมโซมรูปแบบใหม่เพิ่มจำนวนและอยู่คงที่ในประชากรโดยอิทธิพลของเจเนติกดริฟต์และการผสมพันธุ์แบบเลือดชิด

ปัญหาที่สำคัญของโมเดลการแตกแขนงของสปีชีส์จากอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโครโมโซมที่กล่าวมาข้างต้น คือ การเพิ่มจำนวนและการอยู่คงที่ของโครโมโซมในประชากร ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมที่ทำให้เกิดการแบ่งแยกทางการสืบพันธุ์ซึ่งนำไปสู่การแตกแขนงของสปีชีส์จะต้องมีผลต่อการลดฟิตเนสของลูกผสม การเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมเกิดขึ้นในประชากรโดยมิวเทชัน (mutation) จะต้องเป็นในรูปแบบเฮตเทอโรไซกัส ดังนั้นจึงเป็นความขัดแย้งในทางทฤษฎีที่มิวเทชันที่ทำให้ฟิตเนสของลูกผสมลดลงจะเพิ่มจำนวนขึ้นในประชากร เนื่องจากการเพิ่มของโครโมโซมรูปแบบใหม่ในประชากรต้องเป็นโครโมโซมรูปแบบที่ไม่มีผลในทางลดฟิตเนส ดังนั้นจะเห็นได้ว่าโมเดลที่กล่าวมาข้างต้นต้องอาศัยเจเนติกดริฟต์หรือการผสมแบบเลือดชิดจึงสามารถเพิ่มจำนวนโครโมโซมรูปแบบใหม่ในประชากรได้ ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่สำคัญที่ทำให้โมเดลของการแตกแขนงของสปีชีส์จากการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมจำกัดอยู่ในเงื่อนไขของประชากรบางประเภทเท่านั้น (Spirito, 1998)

**ตารางที่ 1** โมเดลการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมและกลไกที่นำไปสู่การแบ่งแยกทางการสืบพันธุ์ (reproductive isolation) และการแตกแขนงของสปีชีส์ (speciation)

| โมเดล | ประเภท* | กลไกที่นำไปสู่การแบ่งแยกทางการสืบพันธุ์และการแตกแขนงของสปีชีส์ |
|---|---|---|
| 1. Chain process model | Hybrid-dysfunction | ลูกผสมมีฟิตเนสต่ำ |
| 2. Chromosome transilience model | Hybrid-dysfunction | ลูกผสมมีฟิตเนสต่ำ |
| 3. Stasipatric model | Hybrid-dysfunction | ลูกผสมมีฟิตเนสต่ำ |
| 4. Quantum speciation model | Hybrid-dysfunction | ลูกผสมมีฟิตเนสต่ำ |
| 5. Saltational model | Hybrid-dysfunction | ลูกผสมมีฟิตเนสต่ำ |
| 6. Suppressed-recombination[1] | Suppressed-recombination | สะสมความแตกต่างทางพันธุกรรมภายในอินเวอร์ชัน |
| 7. Suppressed-recombination[2] | Suppressed-recombination | อินเวอร์ชันป้องกันการลดความแตกต่างทางพันธุกรรมที่เกิดจากยีนโฟลวระหว่างประชากรและ/หรือรีคอมบิเนชัน (recombination) |

**หมายเหตุ:** * ประเภทแบ่งตามบทบาทของอินเวอร์ชันต่อการสะสมความแตกต่างทางพันธุกรรมของประชากร (Ayala and Coluzzi, 2005)

[1] โมเดลที่เสนอโดย Coluzzi (1982) และ Rieseberg (2001)

[2] โมเดลที่เสนอโดย Kirkpatrick and Barton (2006)

## แนวคิดการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมกับการแตกแขนงของสปีชีส์ยุคใหม่

โมเดลของการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมกับการแตกแขนงของสปีชีส์อาจแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม (Ayala and Coluzzi, 2005) (ตารางที่ 1) ดังนี้

(1) Hybrid-dysfunction models ซึ่งเป็นกลุ่มโมเดลที่การแตกแขนงของสปีชีส์ เป็นผลจากการลดฟิตเนสของลูกผสม กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมทำให้ลูกผสมที่เกิดระหว่างประชากรที่มีโครโมโซมแตกต่างกันมีฟิตเนสลดลงตามที่ได้กล่าวข้างต้น

(2) Suppressed-recombination model โมเดลกลุ่มนี้เสนอเริ่มต้นโดย Coluzzi (1982) เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมและการแตกแขนงของสปีชีส์ในยุงก้นปล่องชนิด *Anopheles gambiae* โดยโมเดลแบบ Suppressed-recombination กล่าวถึงบทบาทของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโครโมโซม เช่น การเกิดอินเวอร์ชันจะช่วยป้องกันการเกิดรีคอมบิเนชันของยีนภายในอินเวอร์ชัน ซึ่งการป้องกันการเกิดรีคอมบิเนชันของยีนทำให้สามารถสะสมความแตกต่างทางพันธุกรรมภายในอินเวอร์ชัน และความแตกต่างนี้นำไปสู่การแตกแขนงของสปีชีส์ได้

เนื่องจากความขัดแย้งในทางทฤษฎีของการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมและการแตกแขนงของสปีชีส์ตามโมเดลแบบ Hybrid-dysfunction ทำให้แนวคิด

ของการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมกับการแตกแขนงของสปีชีส์มีแนวโน้มทางโมเดลแบบ Suppressed-recombination โดยความสำคัญของการเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโครโมโซม เช่น การเกิดอินเวอร์ชัน มีส่วนร่วมกับการแตกแขนงของสปีชีส์ (หรือเป็นตัวกลางที่สำคัญที่ทำให้เกิดการแตกแขนงของสปีชีส์) โดยบทบาทของการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมกับการแตกแขนงของสปีชีส์ตามแนวคิด Supressed-recombination มีหลักฐานจากการศึกษาระดับอณูพันธุศาสตร์ (molecular genetic) ในปัจจุบันจากการเปรียบเทียบความแตกต่างทางพันธุกรรมภายในส่วนของโครโมโซมที่เกิดอินเวอร์ชัน (rearranged chromosomes) กับส่วนที่ไม่เกิดอินเวอร์ชัน (collinear chromosome) ระหว่างสปีชีส์ พบว่าความแตกต่างทางพันธุกรรมในส่วนของยีนที่อยู่ภายในอินเวอร์ชันมีมากกว่า นอกจากนี้ในการเปรียบเทียบสัดส่วนของการเกิดการแทนที่ของเบสแบบ nonsynonymous ต่อจำนวนตำแหน่งของ nonsynonymous ($K_A$) เปรียบเทียบกับสัดส่วนของการแทนที่เบสแบบ synonymous ต่อจำนวนตำแหน่งของ synonymous ($K_S$) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน นั่นคือ ค่า $K_A/K_S$ ใกล้เคียงกับ 1 หรืออาจมากกว่า ซึ่งหมายถึงการเกิด positive selection ในลำดับนิวคลีโอไทด์ภายในอินเวอร์ชัน ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแทนที่เบสส่วนใหญ่เกิดแบบ synonymous ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกรดอะมิโน ดังนั้นฟิตเนสจึงไม่เปลี่ยนแปลง แต่หากการเปลี่ยนแปลงแทนที่เบสเป็นแบบ nonsynonymous จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกรดอะมิโน ซึ่งอาจส่งผลให้ฟิตเนสลดลงหรือเพิ่มขึ้นก็ได้ ในกรณีที่การเปลี่ยนแปลงทำให้ฟิตเนสลดลง การคัดเลือกโดยธรรมชาติแบบ purifying selection จะกำจัดมิวเทชันนั้นออกจากประชากร แต่หากการเปลี่ยนแปลงทำให้ฟิตเนสเพิ่มขึ้น กระบวนการ positive selection จะรักษาการเปลี่ยนแปลงนั้นไว้และเพิ่มจำนวนลักษณะนั้นขึ้นในประชากรเนื่องจากมีฟิตเนสสูงกว่าลักษณะเดิม ดังนั้นหากเปรียบเทียบค่า $K_A/K_S$ มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าเกิด positive selection

การเปรียบเทียบโครโมโซมของมนุษย์ (*Homo sapiens*) กับชิมแพนซี (*Pan troglodytes*) พบว่ามีความแตกต่างของโครโมโซมจากการเกิด pericentric inversion ในโครโมโซม 9 แท่ง ได้แก่ แท่งที่ 1, 4, 5, 9, 12, 15, 16, 17 และ 18 (Yunis and Prakash, 1982) จากการเปรียบเทียบความแตกต่างของนิวคลีโอไทด์ภายในส่วนที่เกิดอินเวอร์ชันและในส่วนที่ไม่เกิดอินเวอร์ชันระหว่างมนุษย์กับชิมแพนซีจำนวน 115 ยีน (59 ยีนภายในอินเวอร์ชัน และ 56 ยีนนอกอินเวอร์ชัน) พบว่าสัดส่วนของ $K_A/K_S$ มีค่ามากกว่า 1 จำนวน 26 ยีน ในจำนวนนี้ 20 ยีน (76.9%) เป็นยีนที่อยู่ในอินเวอร์ชัน และมีเพียง 6 ยีนที่อยู่นอกอินเวอร์ชัน สำหรับยีนที่มีค่า $K_A/K_S < 1$ จำนวน 89 ยีน มีเพียง 39 ยีน (43.8%) ที่อยู่ในอินเวอร์ชันขณะที่อีก 50 ยีนอยู่นอกอินเวอร์ชัน (Navarro and Barton, 2003a) ความแตกต่างของอัตราการสะสมความแตกต่างระหว่างยีนที่อยู่ภายในและภายนอกอินเวอร์ชันสอดคล้องกับแนวคิด Suppressed-recombination ซึ่งกล่าวว่าการเกิดอินเวอร์ชันเป็นเกราะป้องกันการเกิดริคอมบิเนชัน ทำให้สะสมความแตกต่างทางพันธุกรรมได้มากกว่า อย่างไรก็ตามยังไม่มีหลักฐานชัดเจนว่าความแตกต่างทางพันธุกรรมที่พบภายในอินเวอร์ชันนั้นเกี่ยวข้องกับการแตกแขงของสปีชีส์หรือไม่

การศึกษาแมลงหวี่สกุล *Drosophila* อาจบ่งชี้ถึงหลักฐานที่สำคัญเกี่ยวกับการเกิดอินเวอร์ชันและการแตกแขนงของสปีชีส์ ในการศึกษาแมลงหวี่ชนิด *Drosophila pseudoobscura* และ *D. persimilis* ซึ่งเป็นสปีชีส์ที่มีความใกล้ชิดทางสายวิวัฒนาการ โดยศึกษาเปรียบเทียบแบบแผนการเรียงตัวของโพลีทีนโครโมโซมพบว่าแมลงหวี่ทั้งสองสปีชีส์มีอินเวอร์ชันบนแขนข้างซ้ายของโครโมโซม X ต่างกัน (Anderson et at., 1977; Moore and Taylor, 1986) และจากการเปรียบเทียบความแตกต่างของยีนที่

เกี่ยวข้องกับกลไกการแบ่งแยกทางการสืบพันธุ์ของแมลงหวี่สองสปีชีส์นี้พบว่ายีนส่วนใหญ่อยู่ภายในส่วนของโครโมโซมที่เกิดอินเวอร์ชัน ซึ่งสอดคล้องกับ Suppressed-recombination model นอกจากนี้ในการศึกษายุงก้นปล่องชนิด *Anopheles gambiae* ซึ่งเป็นพาหะที่สำคัญของโรคมาลาเรียในแอฟริกาได้ผลสอดคล้องกัน โดยศึกษาเปรียบเทียบแบบแผนการเรียงตัวของแบนด์ของโพลีทีนโครโมโซมระหว่างยุงที่มีการกระจายทางภูมิศาสตร์ที่ซ้อนทับกัน (sympatric) พบว่าเกิดอินเวอร์ชันที่คงที่ (fixed inversion) ต่างกัน ขณะที่ไม่พบความแตกต่างดังกล่าวในยุงที่มีการกระจายทางภูมิศาสตร์ที่แบ่งแยก (Ayala and Coluzz, 2005) การศึกษาเหล่านี้บ่งชี้ว่าการเกิดอินเวอร์ชันมีบทบาทต่อการแตกแขนงของสปีชีส์ในกรณีที่ยีนโฟลวระหว่างประชากรไม่ได้ถูกจำกัดด้วยปัจจัยทางภูมิศาสตร์

Navarro and Barton (2003b) เสนอแนวคิดและโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการสะสมความแตกต่างทางพันธุกรรมภายในและภายนอกอินเวอร์ชัน ผลการศึกษาพบว่าการสะสมความแตกต่างทางพันธุกรรมเกิดขึ้นภายในจีโนมส่วนที่เกิดอินเวอร์ชันมากกว่าส่วนที่ไม่เกิดอินเวอร์ชัน และความแตกต่างดังกล่าวนี้ทำให้การเกิดอินเวอร์ชันมีบทบาทสำคัญต่อการแตกแขนงของสปีชีส์อย่างมาก อย่างไรก็ตามโมเดลของ Navarro และ Barton เน้นความสำคัญของการแบ่งแยกทางภูมิศาสตร์ของประชากรว่าจะต้องเข้ามามีส่วนเกี่ยวข้องกับการสะสมความแตกต่างทางพันธุกรรม

Kirkpatrick and Barton (2006) เสนอแนวคิดเกี่ยวกับบทบาทของการเกิดอินเวอร์ชันกับการแตกแขนงของสปีชีส์แบบใหม่ โดยแนวคิดของ Kirkpatrick และ Barton แตกต่างจากแนวคิดอื่นๆ เนื่องจากโมเดลที่กล่าวมาก่อนหน้านี้เกี่ยวกับบทบาทของการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซม เช่น การเกิดอินเวอร์ชัน เชื่อว่าการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมเป็นจุดเริ่มต้น จากนั้นความแตกต่างทางพันธุกรรมจึงเริ่มสะสม และการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมช่วยป้องกันการเกิดริคอมบิเนชัน (suppressed-recombination model) หรือการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมและการเพิ่มจำนวน ทำให้เกิดการแบ่งแยกทางการสืบพันธุ์เนื่องจากการผสมพันธุ์ระหว่างประชากรที่มีรูปแบบโครโมโซมแตกต่างกัน ทำให้ได้ลูกผสมที่มีฟิตเนสลดลง

สำหรับโมเดลของ Kirkpatrick และ Barton กล่าวว่าอินเวอร์ชันเกิดขึ้นภายหลังจากการเพิ่มของความถี่ของยีนที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการปรับตัวของสิ่งมีชีวิตในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน โดยอินเวอร์ชันที่เกิดขึ้นหากเกิดในตำแหน่งที่เป็นยีนซึ่งมีส่วนในการปรับตัวจะทำให้ยีนดังกล่าวถูกปกป้องจากกระบวนการรีคอมบิเนชันกับยีนที่มาจากประชากรอื่นซึ่งมียีนที่ไม่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมในประชากรนั้นเนื่องจากการปรับตัวที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ดังนั้นยีนที่อยู่ภายในอินเวอร์ชันจึงยังคงถูกรักษาไว้ และการปรับตัวของสิ่งมีชีวิตยังคงอยู่ในกรณีที่สมาชิกในประชากรที่ไม่เกิดอินเวอร์ชันในตำแหน่งของยีนที่เกี่ยวข้องกับการปรับตัว ยีนนั้นจะเกิดริคอมบิเนชันและทำให้เปลี่ยนสภาพกลายเป็นยีนที่ไม่สามารถแสดงลักษณะที่ปรับตัวต่อสภาพแวดล้อมในขณะนั้นได้ ดังนั้นฟิตเนสของสมาชิกในประชากรที่ไม่มีอินเวอร์ชันคอยปกป้องยีนจึงต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสมาชิกที่มีอินเวอร์ชันในตำแหน่งของยีนที่เกี่ยวข้องกับการปรับตัว เมื่อเวลาผ่านไปความถี่ของอินเวอร์ชันจึงเพิ่มขึ้นในประชากร และในท้ายที่สุดอาจเพิ่มจนกระทั่งเกิดอินเวอร์ชันที่คงที่ การศึกษาที่สนับสนุนแนวคิดของ Kirkpatrick และ Barton มาจากการศึกษาเซลล์พันธุศาสตร์ของแมลงหวี่ชนิด *Drosophila melanogaster* พบว่าความถี่ของอินเวอร์ชัน *In(2L)t* แสดงลักษณะ cline (ความถี่ของอินเวอร์ชันที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงมีความสัมพันธ์กับปัจจัยทางนิเวศวิทยาหรือภูมิศาสตร์) โดยมีความสัมพันธ์กับละติจูด ความถี่ของ *In(2L)t* มีค่าสูงใกล้เคียงเส้นศูนย์สูตร (ละติจูดต่ำ) ดังนั้นอินเวอร์ชันนี้

จึงอาจเกี่ยวข้องกับการปรับตัวในภูมิอากาศที่ร้อน การศึกษาในห้องปฏิบัติการพบว่าอินเวอร์ชันนี้เกี่ยวข้องกับการปรับตัวต่ออุณหภูมิ (Van Delden and Kamping, 1991) การศึกษายีน *Adh* ที่มีตำแหน่งอยู่ภายในอินเวอร์ชัน *In(2L)t* พบว่าความถี่ของยีน *Adh* แสดงลักษณะ cline เช่นเดียวกัน การศึกษาลำดับนิวคลีโอไทด์ของตำแหน่งจุดหักของอินเวอร์ชัน และเปรียบเทียบความแตกต่างพบว่าอายุของอินเวอร์ชันประมาณ 100,000 ปี แต่อายุของความแปรผันของนิวคลีโอไทด์ในยีน *Adh* มีค่ามากกว่า ดังนั้นจึงสอดคล้องกับแนวคิดของ Kirkpatrick และ Barton โดยอินเวอร์ชันเกิดหลังจากการเพิ่มความถี่ของยีนที่เกี่ยวข้องกับการปรับตัว (ในกรณีนี้คือ *Adh* และยีนอื่นๆ ภายในอินเวอร์ชัน) และอินเวอร์ชันทำหน้าที่ในการปกป้องยีนที่เกี่ยวข้องกับการปรับตัวดังกล่าว

สมมติฐานเกี่ยวกับบทบาทของการเกิดอินเวอร์ชันต่อการแตกแขนงของสปีชีส์ที่เสนอโดย Kirkpatrick และ Barton น่าสนใจเป็นอย่างมาก การศึกษาเซลล์พันธุศาสตร์ในแมลงหลายชนิดแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซม เช่น การเกิดอินเวอร์ชันเกี่ยวข้องกับการปรับตัวต่อสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน (Hoffmann et al., 2004) ดังมีรายงานในยุงก้นปล่อง (Coluzzi et al., 1979) แมลงหวี่ (Stalker, 1980; Knibb et al., 1981; Hoffmann et al., 2004) แมลงริ้นดำ (Adler and McCreadie, 1997; Boakye et al., 1998; Joy and Conn, 2001, Pramual et al., 2005) และแมลงหนอนแดง (Martin, 1965; Hardikar and Nath, 2001; Pramual et al., 2008) ถ้ามีการศึกษาทดสอบสมมติฐานเพิ่มเติมในอนาคตจะทำให้เราทราบบทบาทที่แน่ชัดของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโครโมโซมต่อการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต

## สรุป

การพัฒนาเทคนิคด้านอณูพันธุศาสตร์ในปัจจุบันมีประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาความรู้เกี่ยวกับบทบาทของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโครโมโซมต่อการวิวัฒนาการ แม้ว่าข้อมูลยังมีไม่เพียงพอที่จะสรุปว่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีบทบาทที่เกี่ยวข้องกับการแตกแขนงของสปีชีส์โดยตรง แต่ข้อมูลจากสิ่งมีชีวิตหลายชนิดแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโครโมโซมเช่น การเกิดอินเวอร์ชัน มีส่วนเกี่ยวข้องกับการแตกแขนงของสปีชีส์ แนวคิดในอดีตเชื่อว่าบทบาทของอินเวอร์ชันต่อการแตกแขนงของสปีชีส์อาจเกี่ยวข้องกับการป้องกันยีนโฟลว (gene flow) โดยตรง เช่น ในกรณีของการลดฟิตเนสของลูกผสม แต่เนื่องจากปัญหาความขัดแย้งในทางทฤษฎี ทำให้ปัจจุบันแนวคิดเรื่องบทบาทของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโครโมโซมต่อการแตกแขนงของสปีชีส์เปลี่ยนแปลงไป การเกิดอินเวอร์ชันรวมถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในโครโมโซมรูปแบบอื่นๆ อาจมีบทบาทสำคัญในการเป็นเกราะป้องกันไม่ให้เกิดริคอมบิเนชันในบางส่วนของจีโนมเท่านั้น ถ้าส่วนที่เกิดอินเวอร์ชันนี้มียีนที่มีบทบาทสำคัญ เช่น ยีนที่เกี่ยวข้องกับการแบ่งแยกทางการสืบพันธุ์ หรือยีนที่เกี่ยวข้องกับการปรับตัวต่อสภาพแวดล้อม การสะสมความแตกต่างของยีนเฉพาะภายในส่วนอินเวอร์ชันที่ถูกปกป้องจากการเกิดรีคอมบิเนชันอาจเพียงพอต่อการแตกแขนงของสปีชีส์

## เอกสารอ้างอิง

Adler, P.H., and McCreadie, J.W. (1997). The hidden ecology of black flies; sibling species and ecological scale. American Entomologist, Fall: 153-161.

Anderson, W.W., Ayala, F.J., and Michod, R.E. (1977). Chromosomal and allozymic diagnosis of three species of *Drosophila* Journal of Heredity 68:70-74

Ayala, F.J. and Coluzzi, M. (2005). Chromosome speciation: Humans, Drosophila, and mosquitoes. Proceeding of the National Academy of Science of the USA 102: 6535-6542

Boakye, D.A., Back, C., Fiasorgbor, G.K., Sib A.P.P., and Coulibaly Y. (1998). Sibling species distributions of the *Simulium damnosum* complex in the West African Onchocerciasis Control Programme area during the decade 1984-93, following intensive larviciding since 1974. Medical Veterinary Entomology 12, 345-358.

Coluzzi, M. (1982). Spatial distribution of chromosomal inversions and speciation in anopheline mosquitoes. In: *Mechanisms of Speciation* (C. Barigozzi ed.), pp. 143-153. A.R. Liss, Inc., New York.

Coluzzi, M., Sabatini, A., Petrarca, V., and Di Deco, M.A. (1979). Chromosomal differentiation and adaptation to human environments in the *Anopheles gambiae* complex. Transaction of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene 73(5): 483-97.

Grant, V. (1981). Plant Speciation. Columbia University Press.

Hardikar, A.A. and Nath, B.B. (2001).Chromosomal polymorphism is associated with nematode parasitism in a natural population of a tropical midge. Chromosoma 110:58-64.

Hoffmann, A. A., Sgrò, C. M. and Weeks, A. R. (2004). Chromosomal inversion polymorphisms and adaptation. Trend in Ecology and Evolution 19:482-488.

Joy, D.A. and Conn, J.E. (2001). Molecular and morphological phylogenetic analysis of an insular radiation in Pacific black flies (*Simulium*). Systematic Biology 50, 18-38.

King, M. (1993). Species Evolution. Cambridge University Press.

Kirkpatric, M. and Barton, N. (2006). Chromosome inversions, local adaptation and speciation. Genetics 173: 419-434.

Knibb, W.R., Oakeshott, J.G. and Gibson, J.B. (1981). Chromosome inversion polymorphisms in *Drosophila melanogaster*. I. Latitudinal clines and associations between inversions in Australian populations. Genetics 98: 833-847.

Lewis, H. (1966). Speciation in flowering plants. Science 152: 167-172.

Martin, J. (1965). Interrelation of inversion systems in the midge *Chironomus intertinctus* (Diptera: Nematocera) II. A nonrandom association of linked inversions. Genetics 52:371-383.

Mayr, E. (1963). Animal Species and Evolution. Harvard University Press.

Moore, B. C., and Taylor, C. E. (1986). *Drosophila* of southern California III: Gene arrangements of *Drosophila persimilis* Journal of Heredity 77:313-323

Navarro, A., and Barton, N.H. (2003a). Chromosomal speciation and molecular divergence: accelerated evolution in rearranged chromosomes. Science 300: 321-324.

Navarro, A. and Barton, N.H. (2003b). Accumulating postzygotic isolation gene in parapatry: a new twist on chromosomal speciation. Evolution 57: 447-459.

Pramual, P., Gomontean, B., Buasay, V., Srikhamwiang, N., Suebkar, P., Niamlek, C., Donsinphoem, Y., and Chalat-Chieo, K. 2008 Population cytogenetics of *Chironomus circumdatus* Kieffer, 1921 (Diptera, Chironomidae) from Thailand. Genetica Doi: 10.1007/s10709-008-9255-9.

Pramual, P., Kuvangkadilok, C., Baimai, V., and Walton, C. (2005). Phylogeography of the black fly *Simulium tani* (Diptera: Simuliidae) from Thailand as inferred from mtDNA sequences. Molecular Ecology 14: 3989-4001.

Rieseberg, L.H. (2001). Chromosomal rearrangements and speciation. Trend in Ecology and Evolution 16: 351-358.

Spirito, F. (1998). The role of chromosome change in speciation. In Endless form Species and Speciation (Howard, D.J. and Berlocher, S. H. eds) pp. 320-329.Oxford University Press, New York

Stalker, H.D. (1980). Chromosome studies in wild populations of *Drosophila melanogaster.* II. Relationship of inversion frequencies to latitude, season, wing-loading and flight activity. Genetics 95: 211-223.

Templeton, A.R. (1981). Mechanisms of speciation - a population genetic approach. Annual Review of Ecology and Systematics 12: 23-48

Van Delden, W., and Kamping, A. (1991). Changes in relative fitness with temperature among 2nd chromosome arrangements in *Drosophila melanogaster.* Genetics 127: 507-514.

White, M.D.J. (1978). Modes of Speication. W.H. Freeman & Co.

Yunis, J. J., and Prakash. O. (1982). The origin of man: a chromosomal pictorial legacy. Science 215:1525-1530.

❑❑❑❑❑

ว.วิทย. มข. 36(4) 262-269 (2551) KKU Sci. J.36(4) 262-269 (2008)

# ประจุบนผิวอนุภาคดินขาว

# Surface Charges on Kaolinite Particles

*สุธรรม ศรีหล่มสัก*[1]

เป็นที่ทราบกันว่าอนุภาคดินขาวมีลักษณะเป็นแผ่นแบนๆ รูปหกเหลี่ยมดังภาพที่ 1-2 นอกจากนี้ยังเป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าที่ผิวของอนุภาคดินขาวมีประจุไฟฟ้าอยู่ เพราะผิวอนุภาคดินขาวสามารถดูดซับเอาไอออนต่างๆ ไว้ที่ผิวของอนุภาคดินได้ดี อย่างไรก็ตามยังไม่เป็นที่ชัดเจนว่าประจุที่อยู่บนผิวของอนุภาคดินจัดเรียงตัวแบบใด นักวิจัยจำนวนมาก เช่น Boss (2003) เชื่อกันว่าอนุภาคดินจัดเรียงเอาประจุลบไว้ส่วนที่เป็นหน้า (face) ทั้งสองและประจุบวกไว้ส่วนที่เป็นขอบของอนุภาคดินดังแสดงในรูปที่ 3 สาเหตุหนึ่งที่นักวิจัยเชื่อแบบนี้เพราะว่ามีงานวิจัยชิ้นหนึ่งที่แสดงภาพถ่ายของอนุภาคดินจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนดังแสดงในรูปที่ 4 (Reed, 1995) จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าอนุภาคทองซึ่งมีประจุลบดูดจับกับส่วนที่เป็นขอบของอนุภาคดิน ดังนั้นนักวิจัยหลายท่านจึงเชื่อว่าขอบของอนุภาคดินจึงน่าจะมีประจุเป็นบวกและหน้าทั้งสองของอนุภาคดินจึงน่าจะมีประจุเป็นลบ

อย่างไรก็ตามนักวิจัยอีกกลุ่มหนึ่งเช่น Carty (1999); Schroeder (2008) ได้มีแนวคิดอีกอย่างว่าประจุที่ผิวของอนุภาคดินขาวน่าจะมีลักษณะดังรูปที่ 5 จากรูปจะเห็นได้ว่าแนวคิดนี้เชื่อว่าประจุที่ด้านหน้าๆ หนึ่งมีประจุเป็นบวกและหน้าอีกหน้าหนึ่งมีประจุเป็นลบ ส่วนที่ขอบของอนุภาคดินมีประจุเป็นบวกกับลบสลับกันไป โดยได้ให้เหตุผลใหญ่ๆ ที่สนับสนุนแนวคิดนี้ 2 ข้อ คือ

1) ดินขาวเป็นแร่ซิลิเกตแบบแผ่นซึ่งประกอบด้วย layers ของ silicon tetrahedral $(Si_2O_5)^{2-}$ กับ aluminum octahedral $(Al_2(OH_4))^{2+}$ ประกอบกันอยู่เป็น Tetrahedral:Octahedral หรือ T:O structure ดังแสดงโดยรูปที่ 6 จากรูปที่ 6a จะเห็นได้ว่า silicon tetrahedron layer เกิดจาก silicon tetrahedron ($SiO_4^{4-}$) หลายๆ หน่วยเชื่อมกันอยู่ ที่ระดับความเป็นกรด-ด่างกลางๆ (pH = 7) ผิวของอนุภาคดินด้านนี้น่าจะมีประจุเป็นลบ เพราะจุด Isoelectric Point (IEP) ของ SiO2 อยู่ที่ pH 2-3.5 (สุธรรม ศรีหล่มสัก, 2549 a และ 2549 b) รูปที่ 6b แสดงว่า aluminum octahedral layer เกิดจาก ($Al(OH)_6^{3-}$) หลายๆ หน่วยเชื่อมกันอยู่ที่ pH = 7 ผิวของอนุภาคดินด้านนี้น่าจะมีประจุเป็นบวก เพราะจุด IEP ของ $Al_2O_3$ อยู่ที่ pH 8.5-10.4 (สุธรรม ศรีหล่มสัก, 2549 a และ 2549 b) จากรูปที่ 6c จะเห็นว่า tetrahedral กับ octahedral layers จับกันโดย share ออกซิเจนกันเกิดเป็น T:O sheet ผิวของอนุภาคดินหน้าที่เป็น tetrahedron จึงมีประจุเป็นลบขณะที่ผิวของอนุภาคดินหน้าที่เป็น octahedron จึงมีประจุเป็นบวก ส่วนที่ขอบของอนุภาคดินจะมีประจุบวกและลบสลับกัน

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

E-mail: sriloms@hotmail.com

2) ที่ pH 7 ต้องใช้ polyacrylic acid (PAA) เพียง 58% ในการกระจาย (disperse) อนุภาคดินขาว เมื่อเทียบกับ PAA ที่ต้องใช้ในการกระจายอนุภาค $\alpha$-$Al_2O_3$ ซึ่งมีพื้นที่ผิวเท่ากับอนุภาคดินขาว (Carty, 1999) ทั้งนี้เป็นที่ทราบกันว่า PAA เป็นอิเล็กโทรไลต์ที่ซึ่งเมื่อแตกตัวแล้วให้ไอออนลบ $[CH_2CHCOO^-]_n$ ไปจับที่ผิวของอนุภาคส่วนที่มีประจุเป็นบวกในน้ำ slip และทราบกันโดยทั่วไปว่าที่ pH 7 ผิวของอนุภาค $\alpha$-$Al_2O_3$ ทุกส่วนในน้ำ slip มีประจุที่ผิวเป็นบวก ดังนั้นการที่ต้องใช้ PAA เพียงแค่ 58% ในการกระจายอนุภาคดินขาวเมื่อเทียบกับที่ต้องใช้ในการกระจายอนุภาค $\alpha$-$Al_2O_3$ แสดงว่าที่ pH 7 ผิวอนุภาคดินขาวมีประจุเป็นบวกเพียง 58% ส่วนที่เหลืออีก 42% มีประจุเป็นลบ

เพื่อเป็นการพิสูจน์เหตุผลในข้อที่สอง (Carty, 1999) สมมุติรูปที่ 7 แสดงแบบจำลองของอนุภาคดินขาวโดยกำหนดให้อนุภาคดินมีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 2L และหนา h จากรูปอาจจะแบ่งพื้นที่ผิวทั้งหมดของอนุภาคดิน ($A_{tot}$) ออกเป็นสองส่วนคือ พื้นที่ผิวส่วนที่เป็นขอบ ($A_{edge}$) กับพื้นที่ผิวส่วนที่เป็นด้านหน้าบนและล่าง ($A_{basal}$) จากแบบจำลองข้างต้นอาจจะเขียนสมการแทนพื้นที่ผิวของอนุภาคดินได้ว่า

$$A_{tot} = A_{edge} + A_{basal} = 6hL + 2\left\{\frac{3\sqrt{3}}{3}(L^2)\right\} \quad \text{____(1)}$$

กำหนดให้ x เป็น aspect ratio ของอนุภาคดิน จากแบบจำลองจะได้ว่า x = h/2L แทน x เข้าไปในสมการ (1) และหาอัตราส่วนของพื้นที่ผิวส่วนที่เป็นขอบเทียบกับพื้นที่ผิวส่วนทั้งหมดของอนุภาคดินขาว ($f_{edge}$) ได้เท่ากับ

$$f_{edge} = \frac{A_{edge}}{A_{tot}} = \frac{6hL}{6hL + 2\left\{\frac{3\sqrt{3}}{2}L^2\right\}} = \frac{12x}{12x + 3\sqrt{3}} \quad \text{____(2)}$$

Carty (1999) อธิบายว่าจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของอนุภาคดินขาวที่มีความสมบูรณ์ มีความหนาประมาณ 103 $\pm$ 30 nm และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1100 $\pm$ 430 nm ดังนั้น aspect ratio ของดินขาวเท่ากับ x = 103/1100 = 0.095 แทนค่า x เข้าไปในสมการ (2) ได้ว่า $f_{edge}$ = 18% แสดงว่าพื้นที่ผิวส่วนที่เป็นขอบของอนุภาคดินขาวมีสัดส่วนเป็น 18% ดังนั้นสัดส่วนของพื้นที่ผิวส่วนที่เป็นด้านบนและล่างของอนุภาคดินเท่ากับ 100-18% = 82% แบ่งพื้นที่ผิวส่วนที่เป็นด้านบนและล่างของอนุภาคออกเป็นสองส่วนเท่าๆ กันคือส่วนที่เป็นผิวของ silicon tetrahedral layer กับส่วนที่เป็นผิวของ aluminum octahedral layer พื้นที่ผิวส่วนที่มีประจุเป็นบวกคือพื้นที่ผิวส่วนที่เป็นผิวของ aluminum octahedral layer กับส่วนที่เป็นขอบ ดังนั้นสัดส่วนที่มีประจุเป็นบวกที่ผิวของอนุภาคดินขาวคือ (82(2) + 18 = 59% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเปอร์เซ็นต์ของ PAA ที่ต้องใช้ในการกระจายอนุภาคดินขาวเมื่อเทียบกับที่ต้องใช้ในการกระจายอนุภาค $\alpha$-$Al_2O_3$ ผู้เขียนมีความเห็นว่าการที่ผิวด้านหน้าบนล่างของอนุภาคดินขาวมีประจุไฟฟ้าต่างชนิดกันอาจจะเป็นสาเหตุให้อนุภาคดินขาวที่อยู่ในธรรมชาติมักจะเรียงตัวกันซ้อนเป็นชั้นๆ (stacking) ดังรูปที่ 8

โดยสรุปยังมีความเห็นที่แตกต่างกันเกี่ยวกับการจัดตัวของประจุไฟฟ้าบนผิวของอนุภาคดินขาวจริงๆ แล้วการจัดตัวของประจุไฟฟ้าบนผิวของอนุภาคดินขาวที่แขวนลอยในน้ำ slip ยังคงเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะแวดล้อม เช่น pH ของน้ำ slip, อิเล็กโทรไลต์ในน้ำ slip ฯลฯ คงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมและกำหนดสภาวะแวดล้อมที่แน่ชัดลงไปมากกว่านี้ก่อนที่จะสรุปชัดเจนลงไปว่าประจุไฟฟ้าบนผิวอนุภาคดินขาวจัดเรียงตัวกันอย่างไร

## เอกสารอ้างอิง

จุมพล คืนตัก, ธงชัย พึ่งรัศมี และพิภพ วสุวานิช. (2521). ดิน เอกสารเศรษฐธรณี เล่มที่ 19 กองเศรษฐธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี. 7-16.

สุธรรม ศรีหล่มสัก. (2549 a). การทำให้อนุภาคเซรามิกแขวนลอยอย่างเสถียรในน้ำสลิป I. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี. 13(3):259-270.

สุธรรม ศรีหล่มสัก. (2549 b). การทำให้อนุภาคเซรามิกแขวนลอยอย่างเสถียรในน้ำสลิป II. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี. 13(3): 271-283.

Boss, E. (2003). The Characteristic of Clay. Available at http://misclab.umeoce.maine.edu/boss/classes/SMS_618_2003/Characteristics_of_Clay.pdf

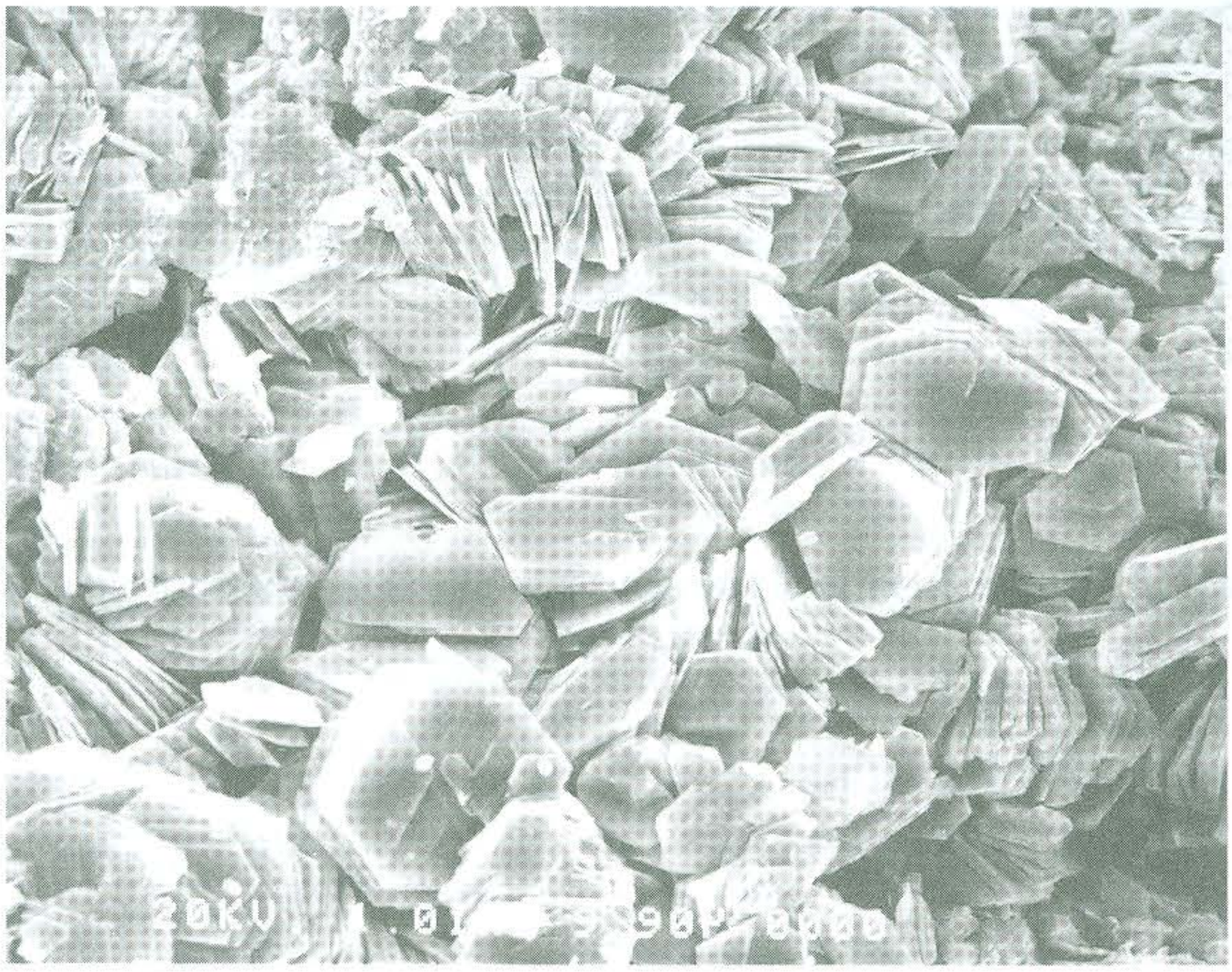
Carty, W. M. (1999). The Colloidal Nature of Kaolinite. Am. Ceram. Soc. Bull. 78(8): 72-78.

Kugler, R. L. (2008). Scanning Electron Micrographs of Clays. Available at http://www.arenisca.com/

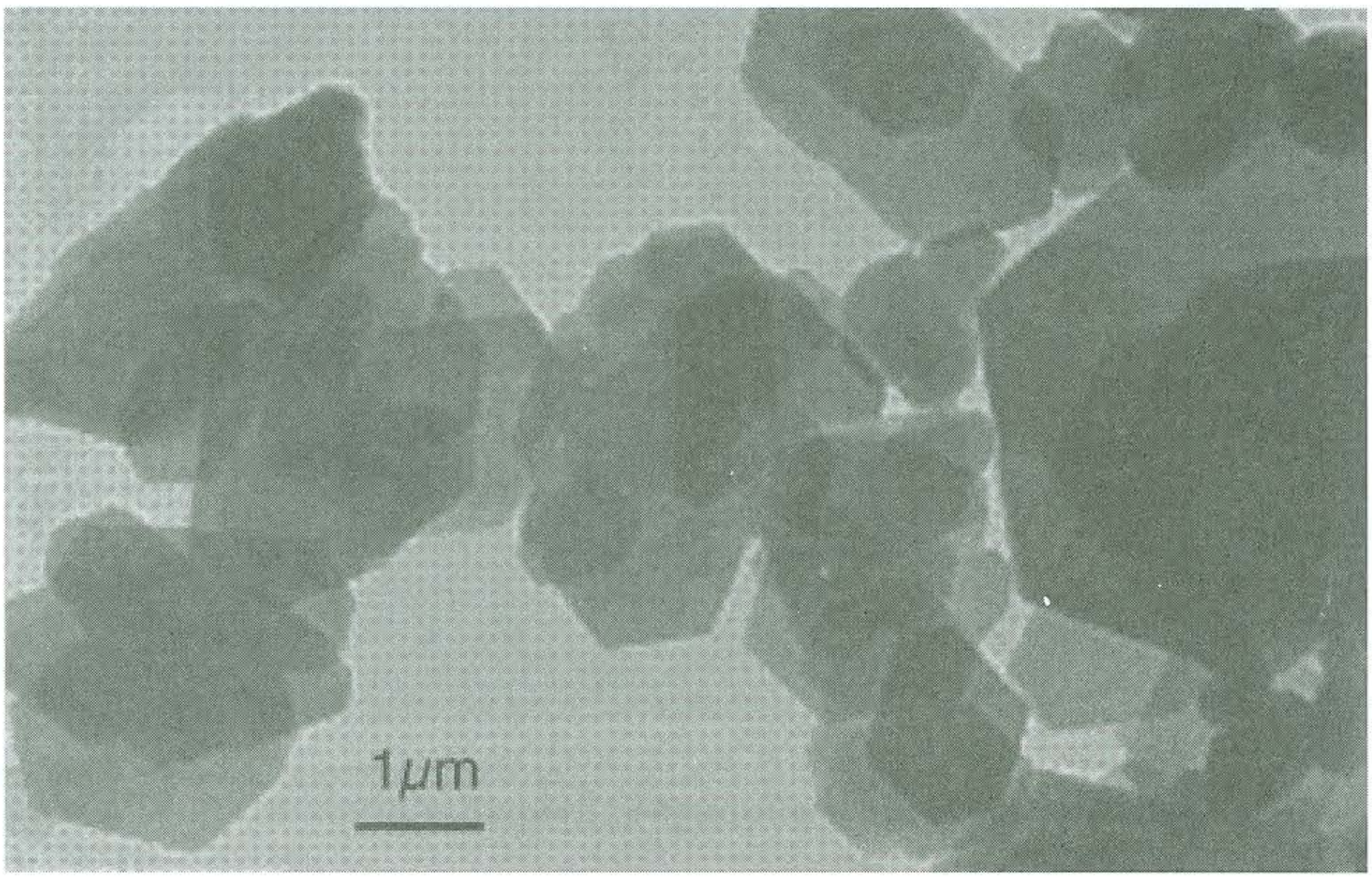
PetroTech Associates. (2008). Scanning Electron Microscope of Kaolinite. Available at http://www.petrotech-assoc.com/images/kaolinite_2.jpg

Reed, J. S. (1995). Principles of Ceramics Processing. 2nd edition. New York: John Wiley & Sons, Inc. 154-155.

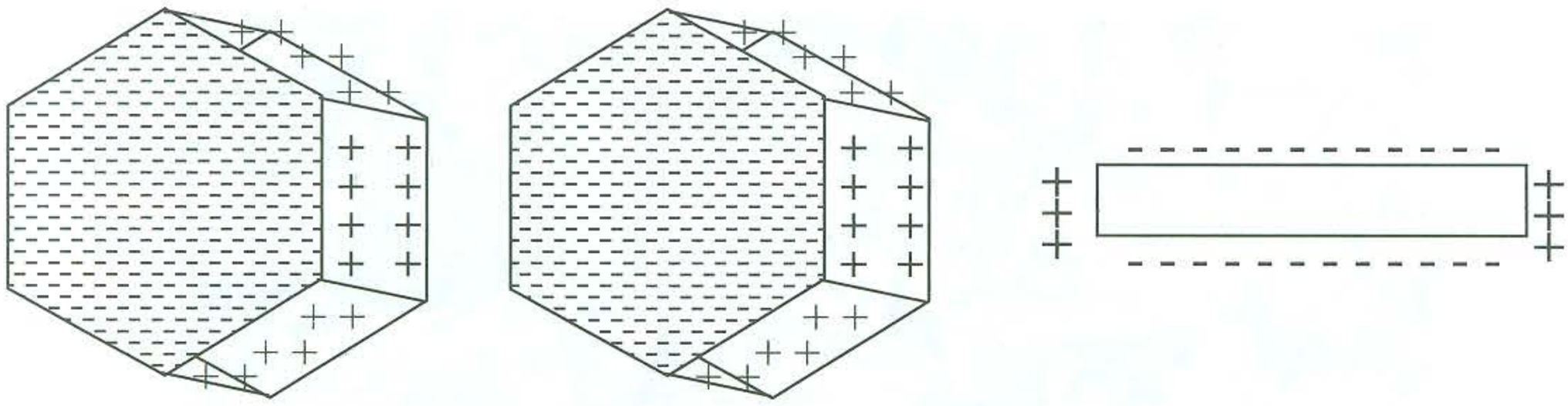
Schroeder, P.A. (2008). Lecture notes for Clay Mineralogy. Available at http://www.gly.uga.edu/Schroeder/geol6550/



**รูปที่ 1** อนุภาคดินขาวถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (PetroTech Associate, 2008)

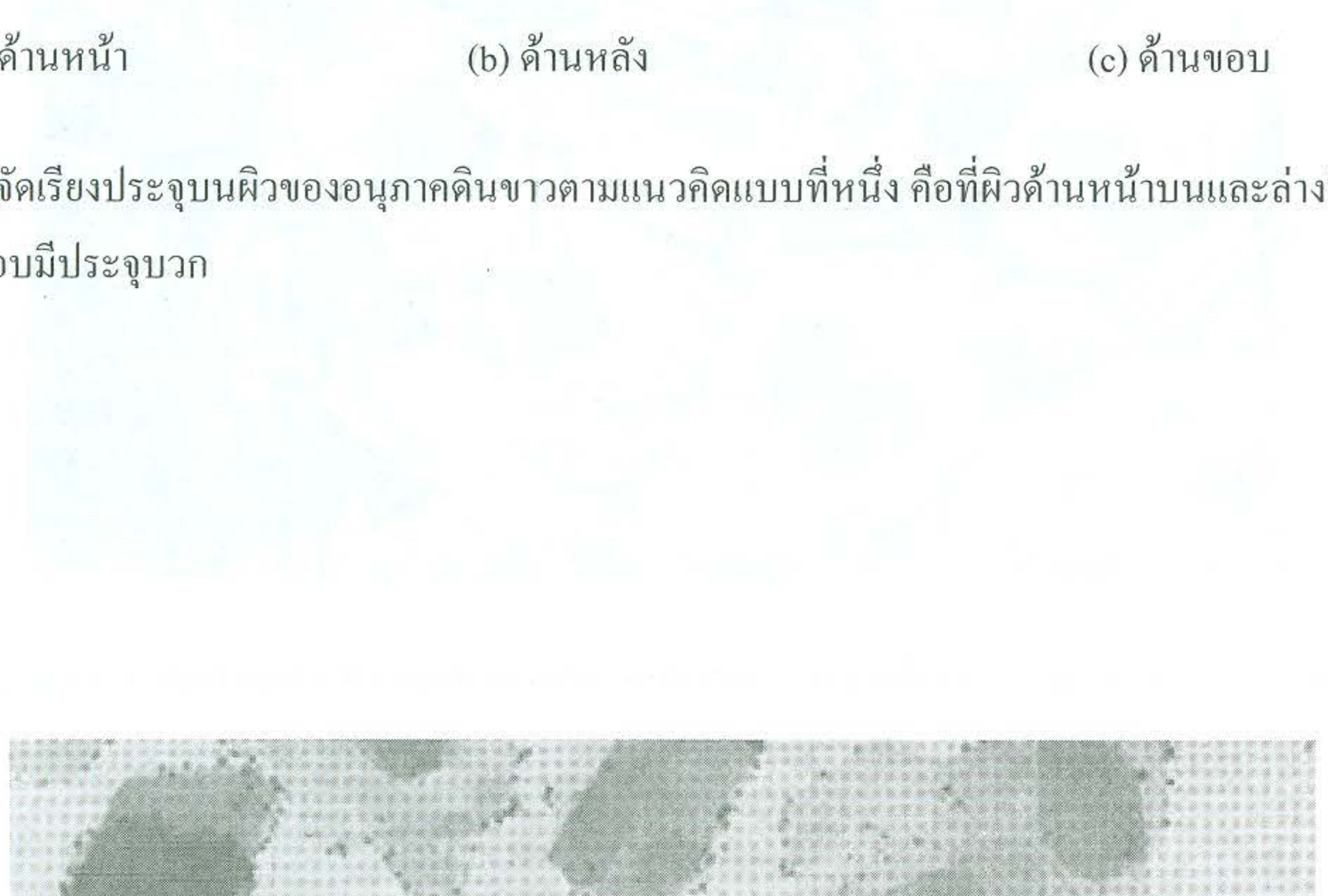



**รูปที่ 2** อนุภาคดินขาวถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทะลุผ่าน (Schroeder, 2008)

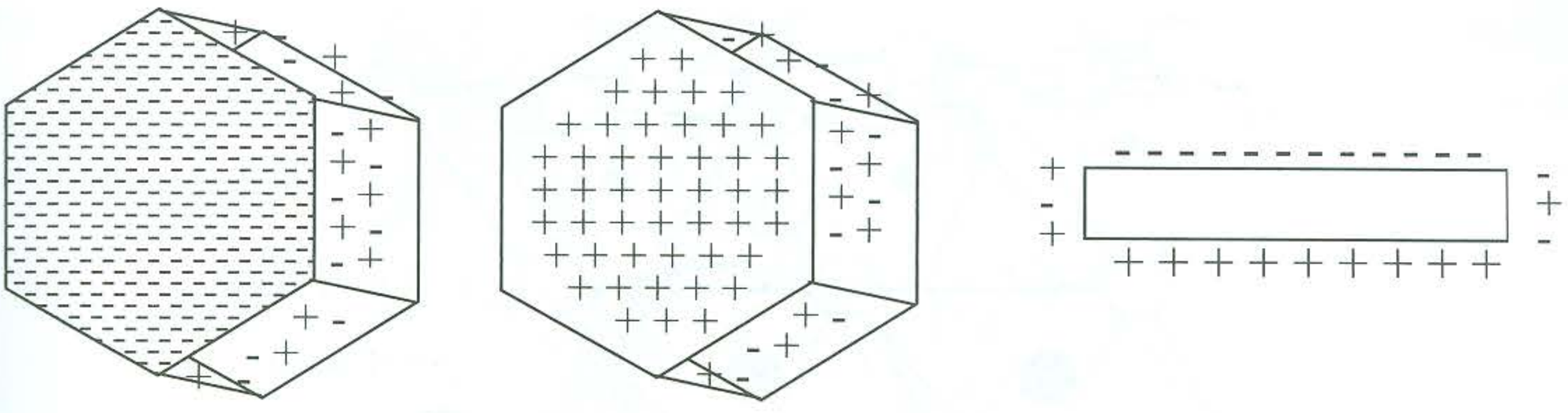


(a) ด้านหน้า (b) ด้านหลัง (c) ด้านขอบ

**รูปที่ 3** การจัดเรียงประจุบนผิวของอนุภาคดินขาวตามแนวคิดแบบที่หนึ่ง คือที่ผิวด้านหน้าบนและล่างมีประจุลบ; ที่ขอบมีประจุบวก

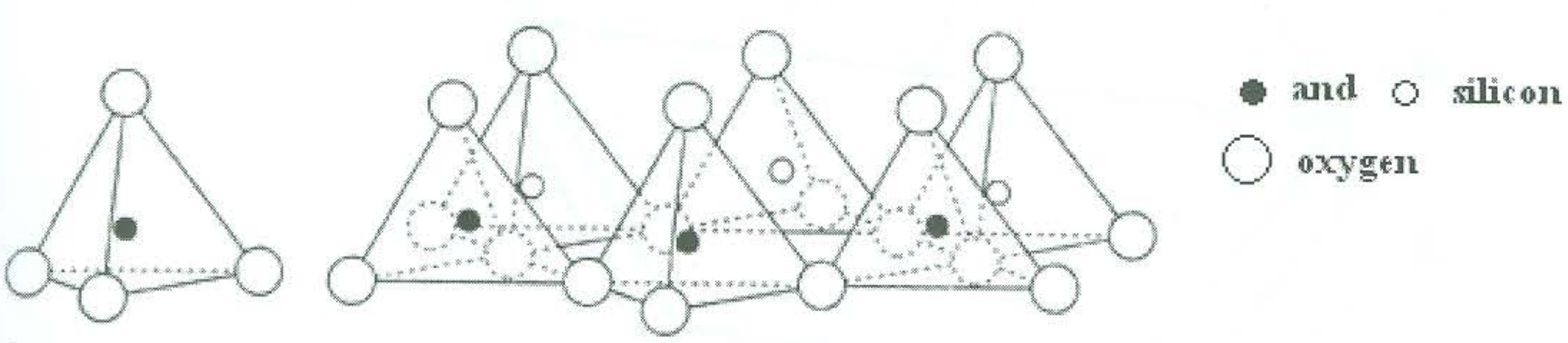



**รูปที่ 4** คอลลอยด์ของทองซึ่งมีประจุเป็นลบดูดซับที่ขอบของอนุภาคดินขาว (Reed, 1995)

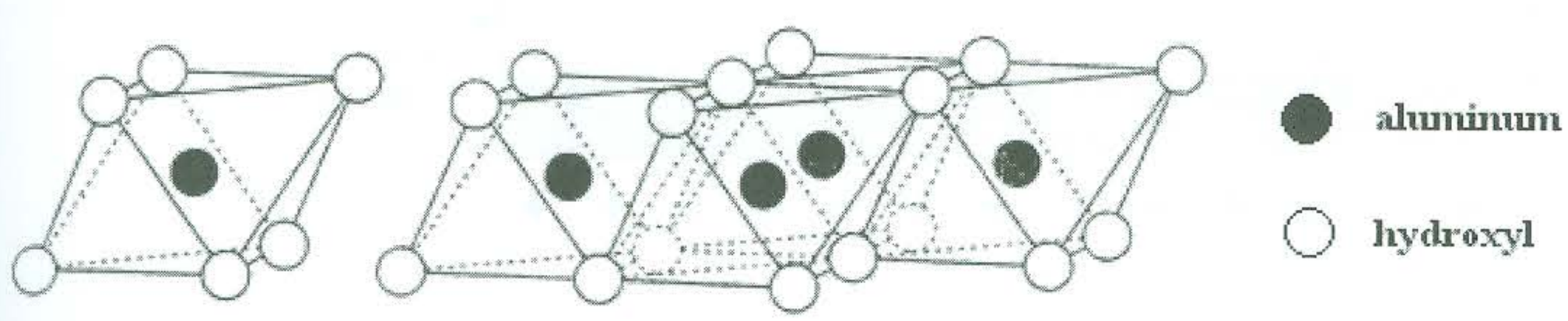


(a) ด้านหน้า (b) ด้านหลัง (c) ด้านขอบ

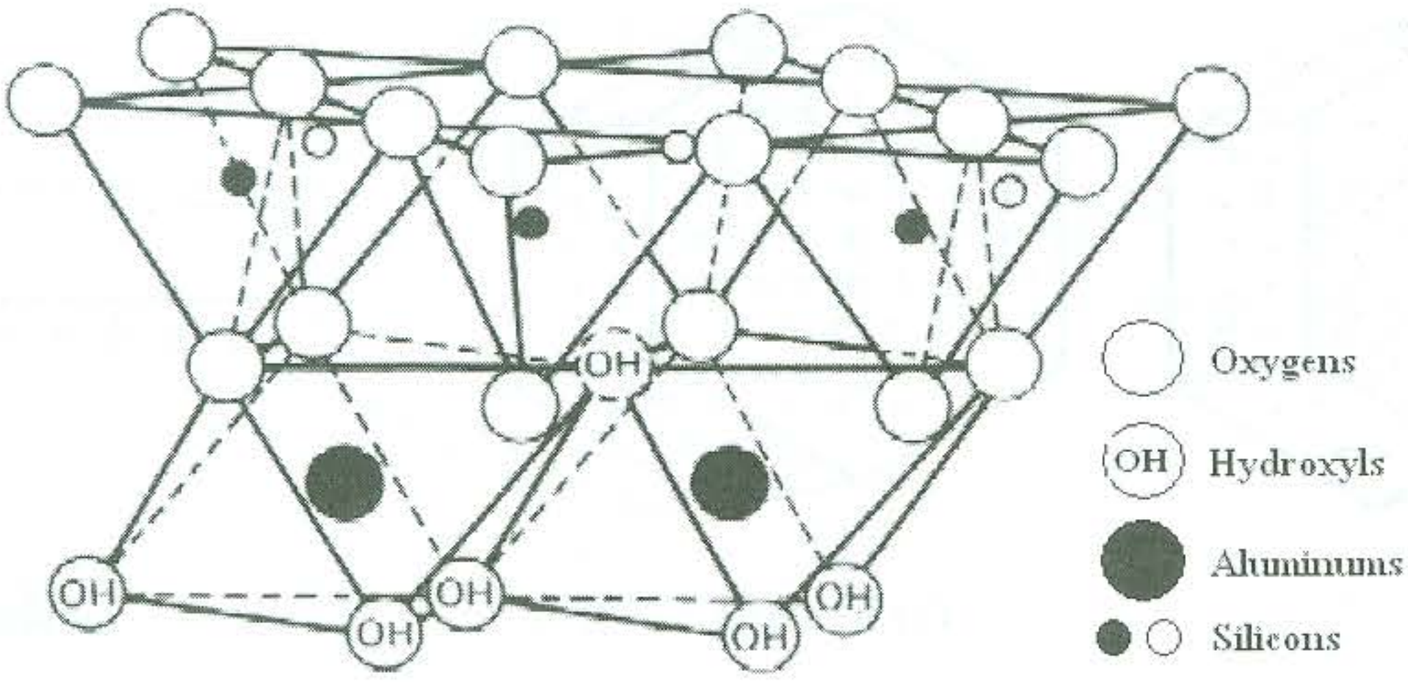
**รูปที่ 5** การจัดเรียงประจุบนผิวของอนุภาคดินขาวตามแนวคิดแบบที่สองคือที่ผิวด้านหน้าบนมีประจุลบ; ที่ผิวด้านล่างมีประจุบวก; ที่ขอบมีประจุบวกและลบสลับกัน



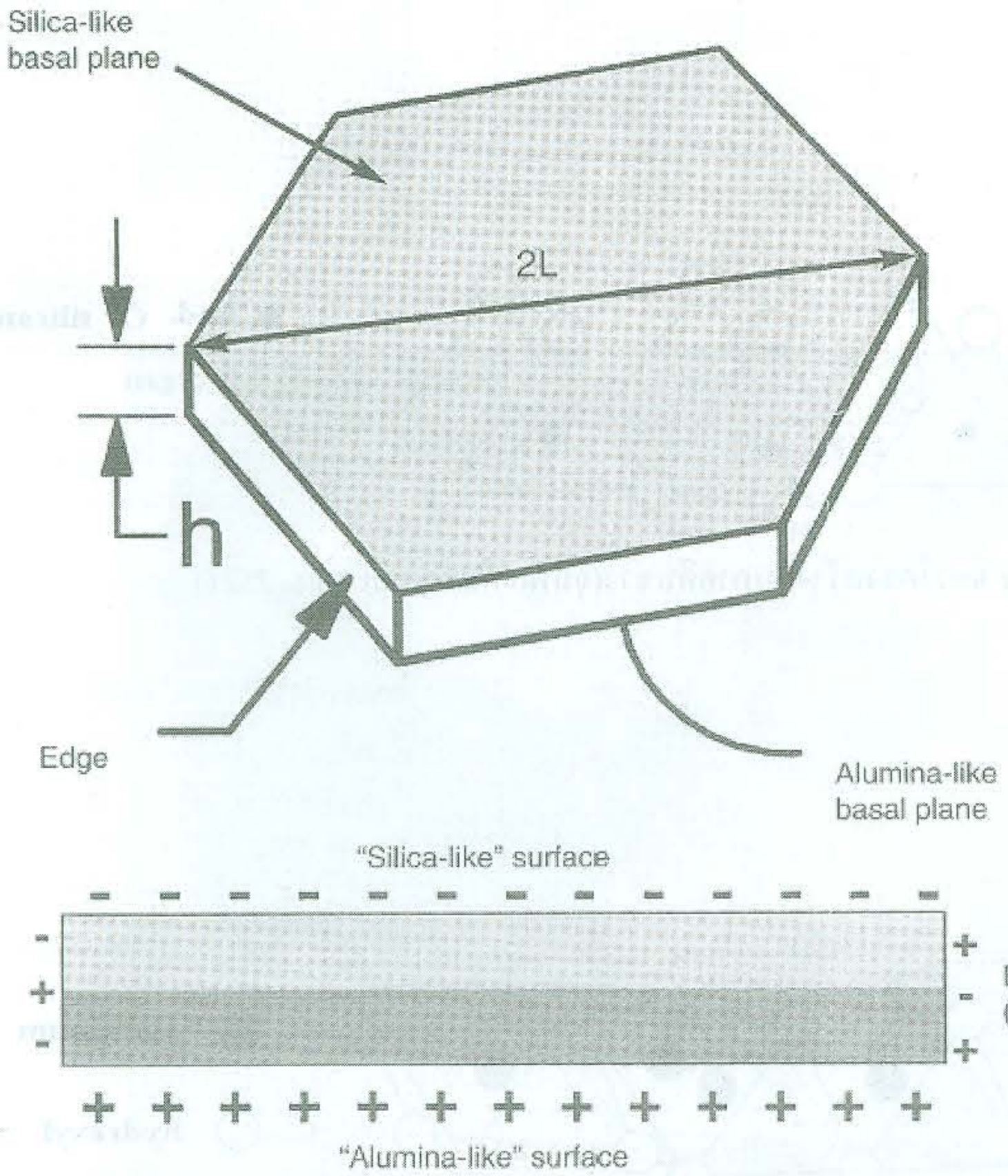

**รูปที่ 6a** Silicon tetrahedral layer ของโครงสร้างอนุภาคดินขาว(จุมพล คืนตัก และคณะ, 2521)



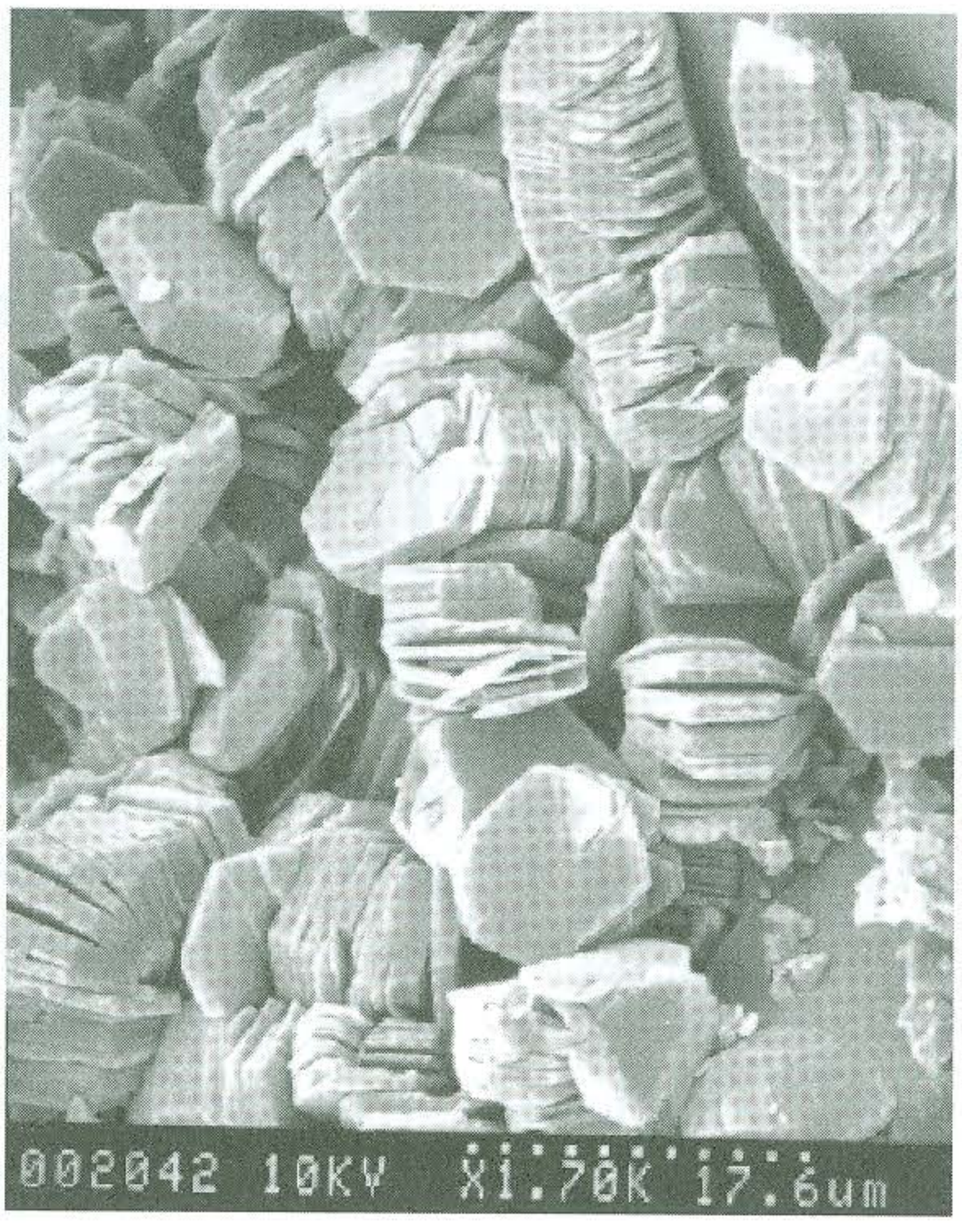

**รูปที่ 6b** Aluminum octahedral layer ของโครงสร้างอนุภาคดินขาว(จุมพล คืนตัก และคณะ, 2521)




**รูปที่ 6c** การจับการของ silicon tetrahedral layer กับ aluminum octahedral layer เป็น T:O sheet ของอนุภาคดินขาว (จุมพล คืนตัก และคณะ, 2521)




**รูปที่ 7** แบบจำลองของอนุภาคดินขาวของ (Carty, 1999)




**รูปที่ 8** การซ้อนกัน (stacking) ของอนุภาคดินขาว (Kugler, 2008)

ว.วิทย. มข. 36(4) 270-278 (2551) KKU Sci. J.36(4) 270-278 (2008)

# การฉายรังสีบำบัดแบบผสานความเข้ม
# Intensity Modulated Radiation Therapy

*พัฒนา ภู่วนิชย์* [1]

## บทนำ

ในปัจจุบัน ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีทางการแพทย์จะเจริญก้าวหน้าแต่อัตราการเสียชีวิตของคนป่วยด้วยโรคมะเร็งในอวัยวะต่างๆยังคงมีอยู่เป็นจำนวนมาก วงการวิทยาศาสตร์ทั้งด้านกายภาพและสุขภาพจึงมีการพัฒนาอุปกรณ์และขบวนการทั้งในด้านการวินิจฉัยโรค (Diagnosis) และด้านการบำบัดรักษา (Therapy) ให้มีประสิทธิผลมากที่สุด ตัวอย่างเช่นการพัฒนาระบบการสร้างภาพจากการสั่นพ้องแม่เหล็ก (Magnetic Resonance Imaging) ซึ่งนิยมเรียกกันสั้นๆว่า เอ็มอาร์ไอ (MRI) ที่ช่วยในการวินิจฉัยโรค ทำให้สามารถได้ภาพของของก้อนเนื้องอกที่แตกต่างจากเนื้อเยื่อปรกติของร่างกายได้อย่างชัดเจน ด้านการบำบัดรักษา จากการใช้รังสีรักษาแบบดั้งเดิม (Urie et al. 1991) ที่เรียกกันว่าการฉายรังสีแบบ 2 มิติ (2D Conventional Radiotherapy) พัฒนาขึ้นเป็นการฉายรังสีแบบ 3 มิติ (3D Conformal Radiotherapy) (Roach et al. 1994 และ Austin-Seymour et al. 1996) จากการพัฒนาอย่างต่อเนื่องประกอบกับระบบคอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถสูงที่นำมาควบคุมการผสานความเข้มของการฉายรังสีทำให้สามารถจำกัดขอบเขตบริเวณการฉายรังสีได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้โอกาสหายป่วยหรือรอดชีวิตของคนไข้มีมากขึ้น เทคนิคดังกล่าวนี้เป็นเทคนิคการฉายรังสีแบบใหม่ของการฉายรังสีแบบ 3 มิติ เรียกกันว่า การฉายรังสีบำบัดแบบผสานความเข้ม (Intensity Modulated Radiation Therapy) และมีศัพท์ทางเทคนิคอย่างสั้นๆว่า ไอเอ็มอาร์ที (IMRT) (Nutting et al. 2000) ซึ่งในบทความนี้จะเป็นรายละเอียดเบื้องต้นของวิธีการฉายรังสีแบบไอเอ็มอาร์ที

## การฉายรังสีบำบัด

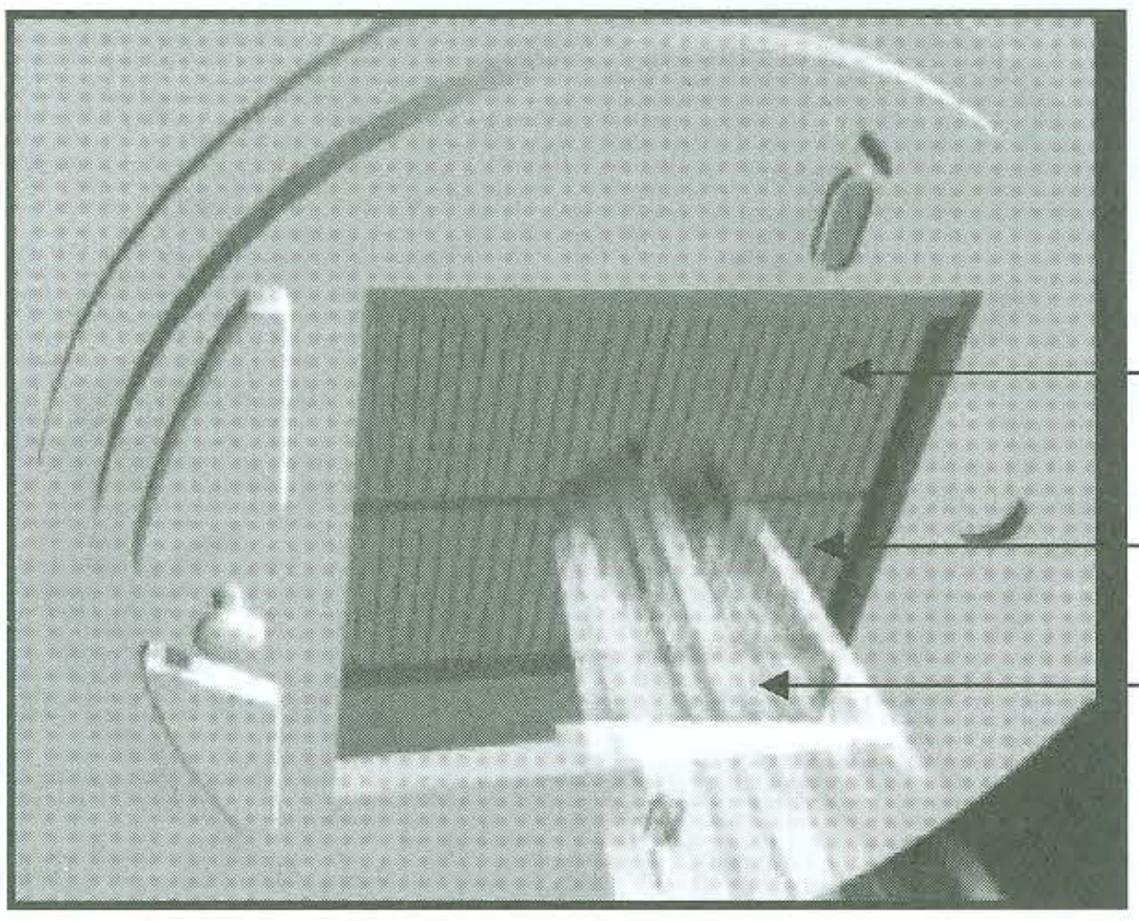
การฉายรังสีบำบัด (Radiation Therapy) เป็นหนึ่งในขบวนการในการกำจัดเซลเนื้อร้ายที่ก่อตัวและเจริญเติบโตอยู่ตามอวัยวะภายในร่างกาย การกำจัดเนื้อร้ายเหล่านี้อาจจะทำได้โดยการผ่าตัด(Surgery) หรือใช้เคมีบำบัด (Chemo-therapy) แต่การเลือกใช้วิธีหนึ่งวิธีใดหรืออาจจะใช้ควบคู่กันไปจะขึ้นกับดุลพินิจของแพทย์ผู้ดำเนินการรักษา การฉายรังสีบำบัดมักจะถูกนำมาใช้ในกรณีที่ไม่สามารถทำการผ่าตัดได้ รังสีที่นิยมใช้ในขบวนการคือ รังสีแกมมาจากสารกัมมันตรังสีเช่นโคบอลต์ (Cobalt -60) หรือซีเซียม (Cesium-137) หรือ ใช้รังสีเอ็กซ์พลังงานสูงจากเครื่องเร่งอนุภาค (Linear accelerator หรือย่อว่า Linac ) ในยุคปัจจุบันนิยมใช้รังสีเอ็กซ์จากเครื่องเร่งอนุภาค มากกว่าการใช้รังสีแกมมาเนื่องมาจากข้อดีของความปลอดภัยและประสิทธิภาพที่ดีกว่า รวมทั้งสามารถประยุกต์ใช้ระบบไอเอ็มอาร์ทีได้อีกด้วย

[1] ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002
E-mail: patina@kku.ac.th



**รูปที่ 1** เครื่องฉายรังสีเอ็กซ์พลังงานสูง (Linac 2000) ของบริษัทแวเรียน สามารถเลือกให้รังสีเอ็กซ์ได้ 3 ระดับ คือในช่วง 4MV หรือ 6 MV หรือ 9 - 12 MV หรือ 15 - 22 MV และรังสีอิเล็กตรอนตั้งแต่ 6 - 23 MeV

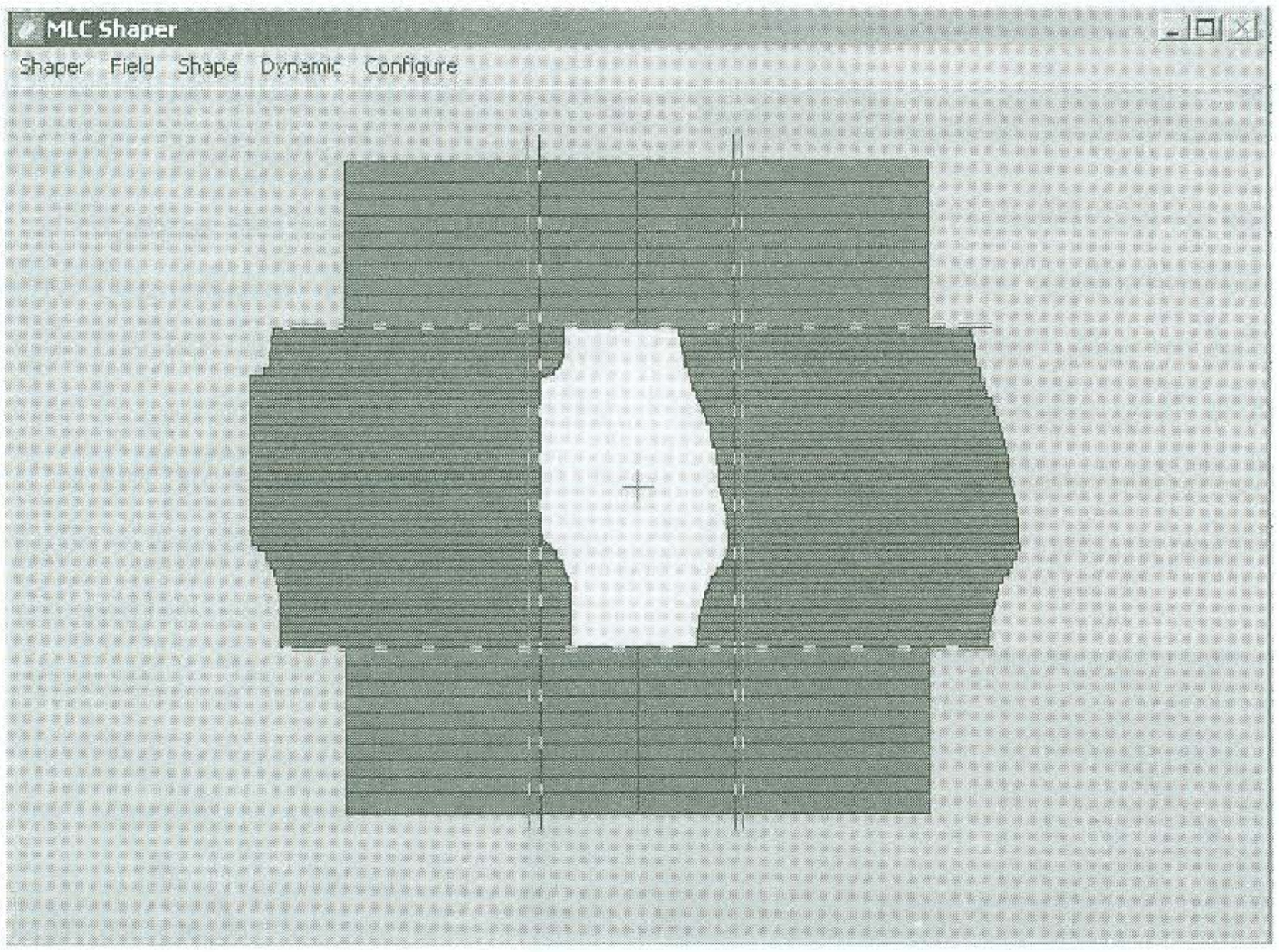
เครื่องเร่งอนุภาคที่ใช้ในการฉายรังสีจะผลิตรังสีเอ็กซ์จากการเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงตามที่กำหนดแล้วปล่อยให้ชนเป้าทังสเตนหรือทองแดง เพื่อปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปรังสีเอ็กซ์ตามต้องการโดยทั่วไป เครื่องเร่งอนุภาคประกอบด้วยส่วนผลิตอิเล็กตรอน (Electron gun) ส่วนของ Krystron ที่ผลิตไมโครเวฟไปยังส่วนท่อที่ใช้เร่งอิเล็กตรอนในแนวตรง ส่วนสนามแม่เหล็กที่ควบคุมอิเล็กตรอนให้โค้งเข้าชนเป้า ส่วนเป้าที่เปลี่ยนพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนให้เป็นรังสีเอ็กซ์ ส่วนควบคุมทิศทางของรังสีเอ็กซ์ และส่วนควบคุมรูปร่าง (shape) ของลำรังสี ซึ่งเรียกว่า คอลลิเมเตอร์ (Collimator) มีลักษณะดังรูปที่ 2




**รูปที่ 2** คอลลิเมเตอร์แบบหลายแผ่น (Multileaf Collimator or MLC) ของเครื่องฉายรังสี

ในเครื่องเร่งอนุภาคที่ใช้ในคลีนิคของหน่วยรังสีบำบัด คอลลิเมเตอร์จะมีลักษณะเป็นแผ่นกั้นชิ้นเล็กๆ เรียงขนานกันไว้ มี 2ด้าน แต่ละชิ้นจะถูกควบคุมการจัดวางตำแหน่งด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อเปิดช่องให้รังสีผ่านได้ตามรูปร่างที่เราต้องการ ในการฉายรังสีบำบัดแบ่งดั้งเดิม แผ่นกั้นจะถูกกำหนดให้เปิดเป็นช่องและจะเปิดค้างไว้ตลอดการฉายรังสี การจัดตำแหน่งของแต่ละแผ่นอย่างเหมาะสมจะทำให้ลำรังสีมีขอบเขตที่เหมาะเจาะกับรูปร่างของก้อนเนื้อร้ายที่ต้องการกำจัด และส่วนที่คอลลิเมเตอร์ปกปิดไว้จะเป็นส่วนของเซลปกติที่ไม่ต้องการให้ถูกรังสีทำลาย แต่ถ้าเป็นเครื่องฉายรังสีโคบอลต์จะไม่มี

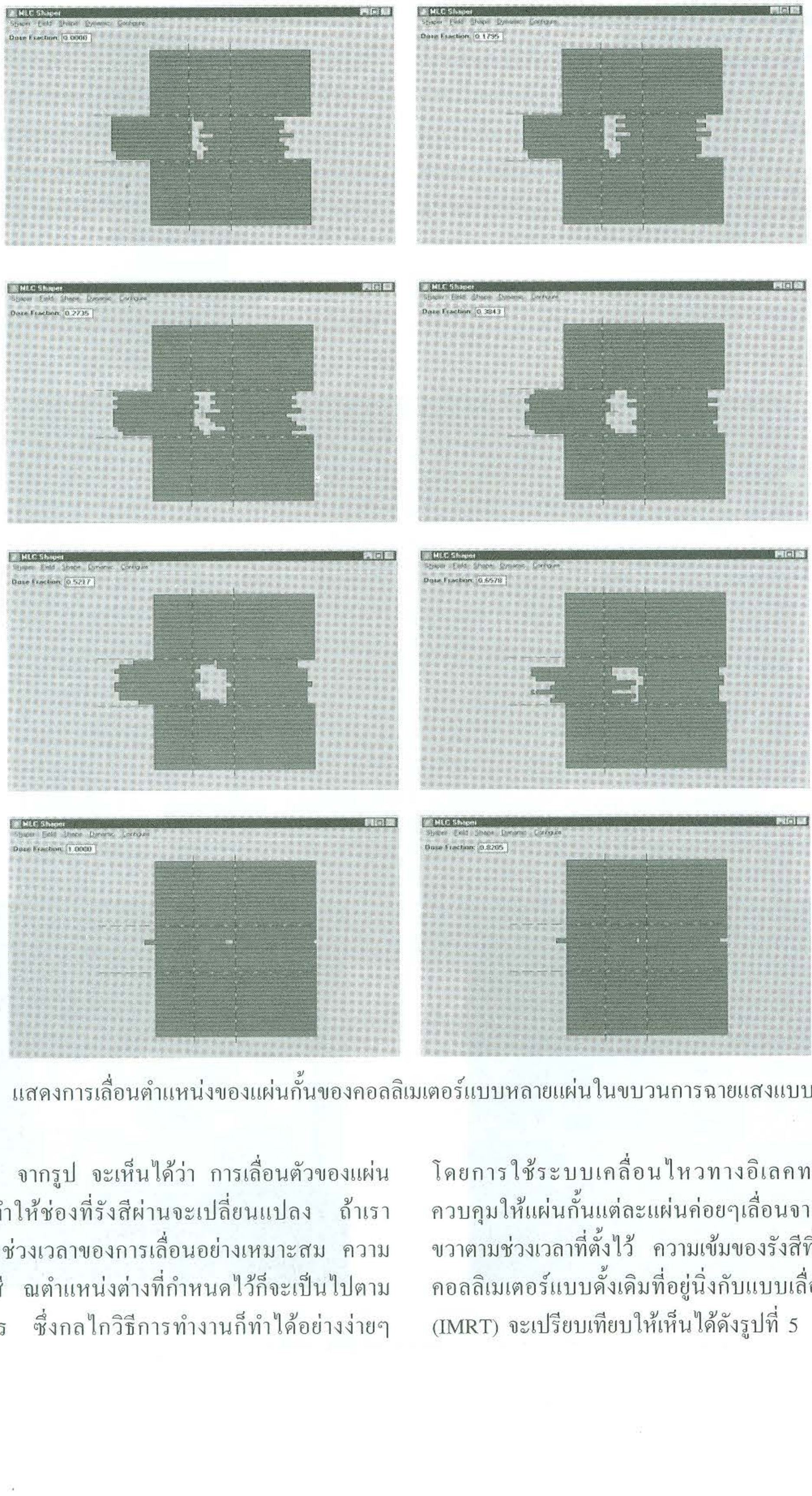
MLC ประกอบอยู่ การปกป้องเนื้อเยื่อปกติทำได้โดยใช้การหล่อตะกั่วนำมากั้นขวาง (Shadowed shield) ลำของรังสี ซึ่งจะใช้ได้กับคนไข้ในเฉพาะรายของการรักษา ถ้าเปลี่ยนคนไข้หรือเปลี่ยนตำแหน่งของการฉายรังสีก็จะต้องทำการหล่อบล็อกตะกั่วกันใหม่ ถึงแม้ว่าจะสามารถหล่อบล็อกตะกั่วโดยการหลอมบล็อกเก่าและนำมาขึ้นรูปกันใหม่ได้แต่ก็เป็นขบวนการที่ยุ่งยาก ผิดกับการใช้ MLC ที่สามารถควบคุมรูปร่างได้โดยระบบไฟฟ้าอิเลคทรอนิคส์ ซึ่งควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ระบบที่ยุ่งยากซับซ้อนนี้จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่เครื่องฉายรังสีโคบอลต์เสื่อมความนิยมในการใช้งานลงไป




**รูปที่ 3** ภาพของคอลลิเมเตอร์แบบหลายแผ่น (MLC) ที่จัดตำแหน่งให้ลงตัวกับก้อนเนื้อร้าย

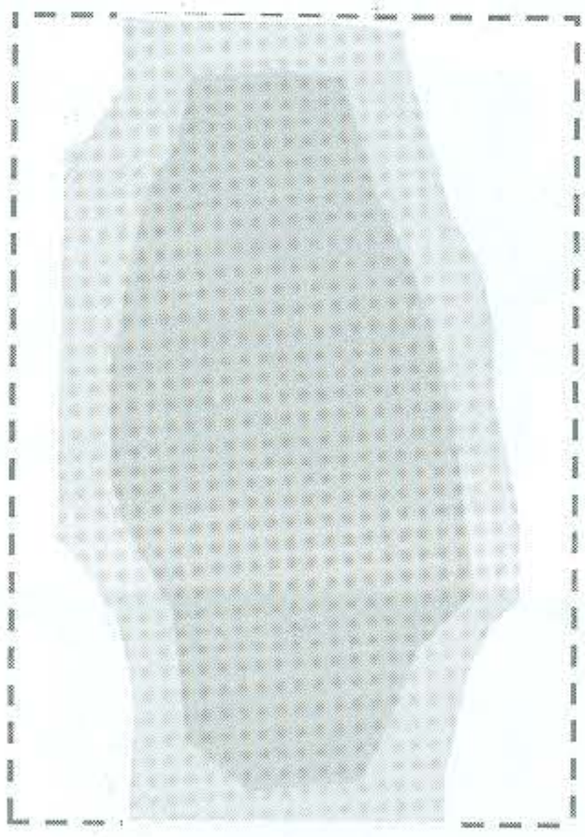
## การฉายรังสีบำบัดแบบผสานความเข้ม

โดยทั่วไปก้อนเนื้องอกจะเจริญเติบโตแทรกอยู่กับเนื่อเยื่อปกติและจะมีขนาดบางๆ ในบริเวณขอบแต่หนามากขึ้นตรงกลางของก้อนเนื้อ ในการฉายรังสีแบบดั้งเดิม ค่าความเข้มแสงในพื้นที่ที่ฉายผ่านคอลลิเมเตอร์จะมีค่าสม่ำเสมอเท่ากันหมดนั่นหมายถึงว่าทั้งขอบและส่วนกลางของก้อนเนื้อจะได้รับรังสีเท่ากัน ทั้งที่บริเวณขอบของก้อนเนื้อที่มีมวลบางกว่าควรจะได้รับรังสีน้อยกว่า การฉายรังสีบำบัดแบบผสานความเข้มซึ่งเริ่มรู้จักกันดีในวงการรังสีบำบัดที่มักจะเรียกอย่างสั้นๆ ว่า "ไอเอ็มอาร์ที" เป็นขบวนการฉายรังสีที่พัฒนาจากระบบเดิมโดยการนำคอมพิวเตอร์มาควบคุมการเลื่อนตัวของ MLC ในระหว่างช่วงของการฉายรังสี (ถ้าเป็นระบบแบบดั้งเดิม MLC จะถูกกำหนดให้อยู่นิ่ง) การเลื่อนตัวเป็นจังหวะนี้จะทำให้เราควบคุมการกระจายความเข้มของรังสีในขอบเขตที่เซลเนื้อร้ายอยู่ได้อย่างเหมาะสมมากขึ้น

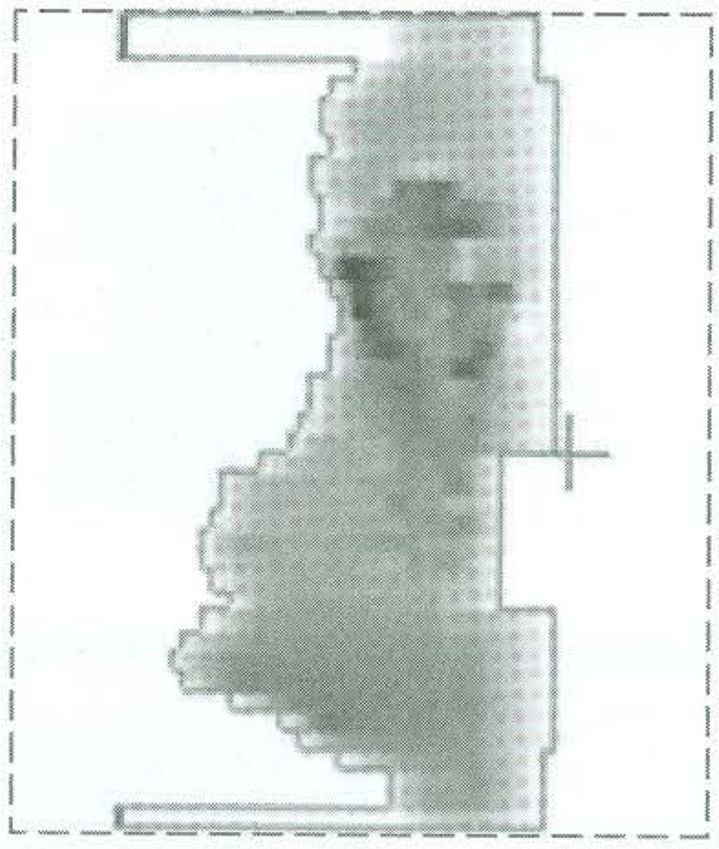



**รูปที่ 4** แสดงการเลื่อนตำแหน่งของแผ่นกั้นของคอลลิเมเตอร์แบบหลายแผ่นในขบวนการฉายแสงแบบ IMRT

จากรูป จะเห็นได้ว่า การเลื่อนตัวของแผ่นกั้นจะทำให้ช่องที่รังสีผ่านจะเปลี่ยนแปลง ถ้าเราควบคุมช่วงเวลาของการเลื่อนอย่างเหมาะสม ความเข้มรังสี ณตำแหน่งต่างที่กำหนดไว้ก็จะเป็นไปตามต้องการ ซึ่งกลไกวิธีการทำงานก็ทำได้อย่างง่ายๆ โดยการใช้ระบบเคลื่อนไหวทางอิเลคทรอนิคส์ควบคุมให้แผ่นกั้นแต่ละแผ่นค่อยๆเลื่อนจากซ้ายไปขวาตามช่วงเวลาที่ตั้งไว้ ความเข้มของรังสีที่ฉายผ่านคอลลิเมเตอร์แบบดั้งเดิมที่อยู่นิ่งกับแบบเลื่อนตัวได้ (IMRT) จะเปรียบเทียบให้เห็นได้ดังรูปที่ 5



(ก)

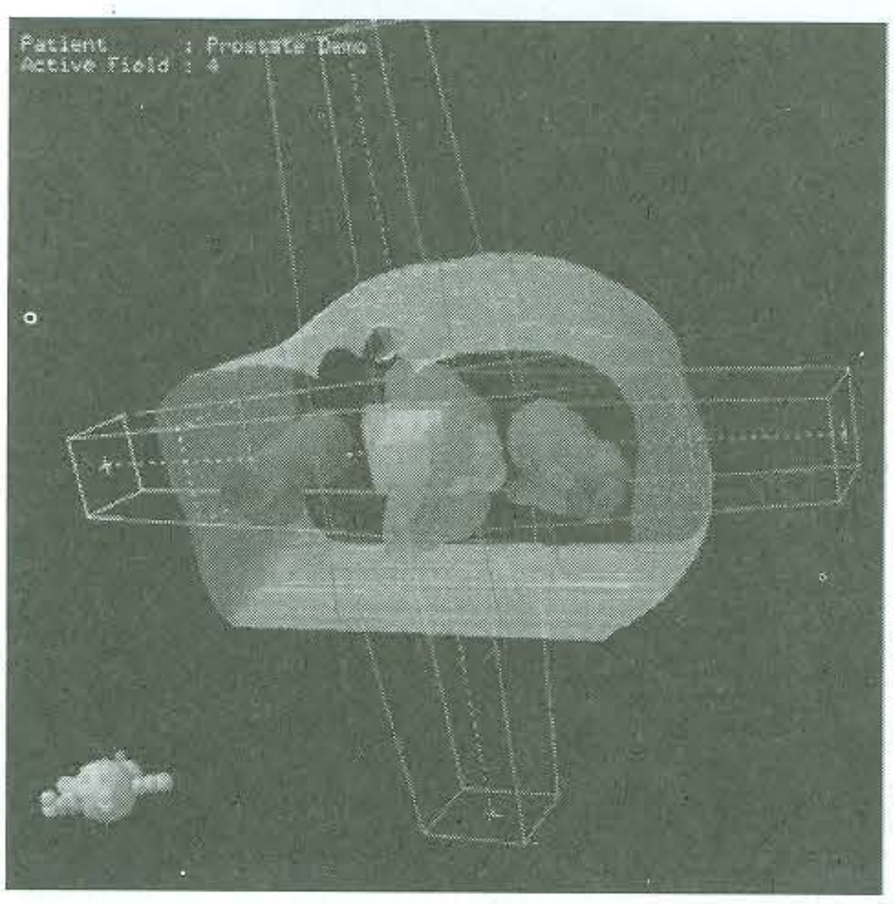


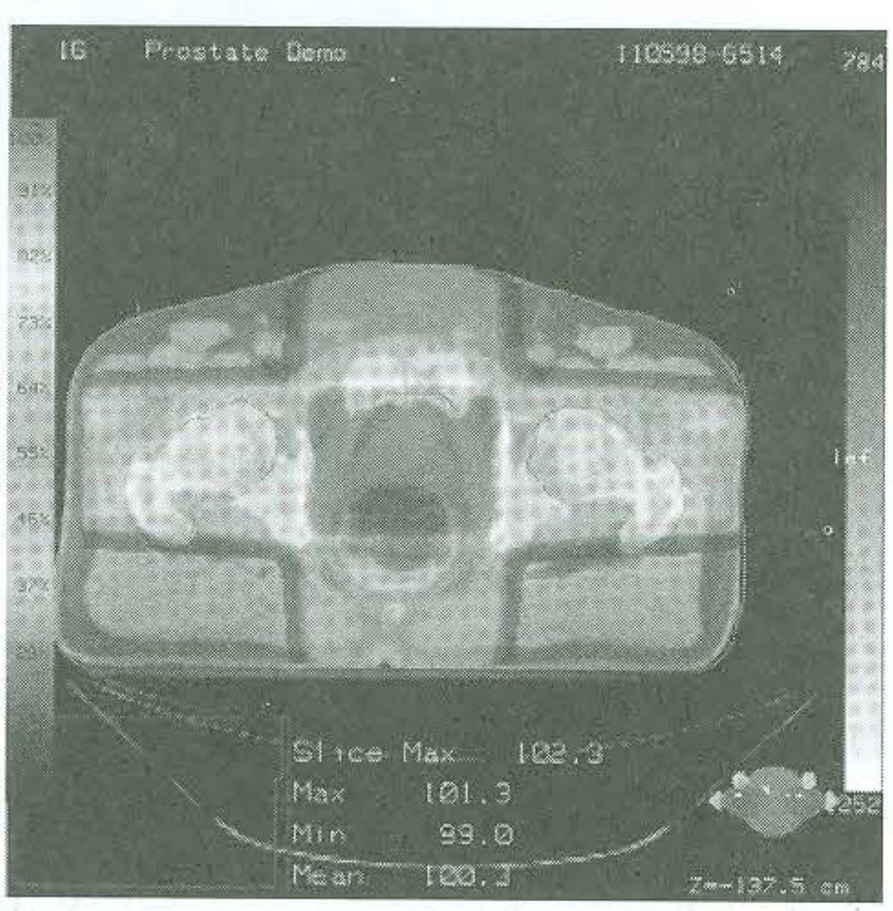
(ข)

**รูปที่ 5** ความเข้มรังสีที่ฉายแบบดั้งเดิม(ก) และแบบใหม่ (IMRT) (ข)

## การฉายรังสีบำบัดแบบ 3 มิติ

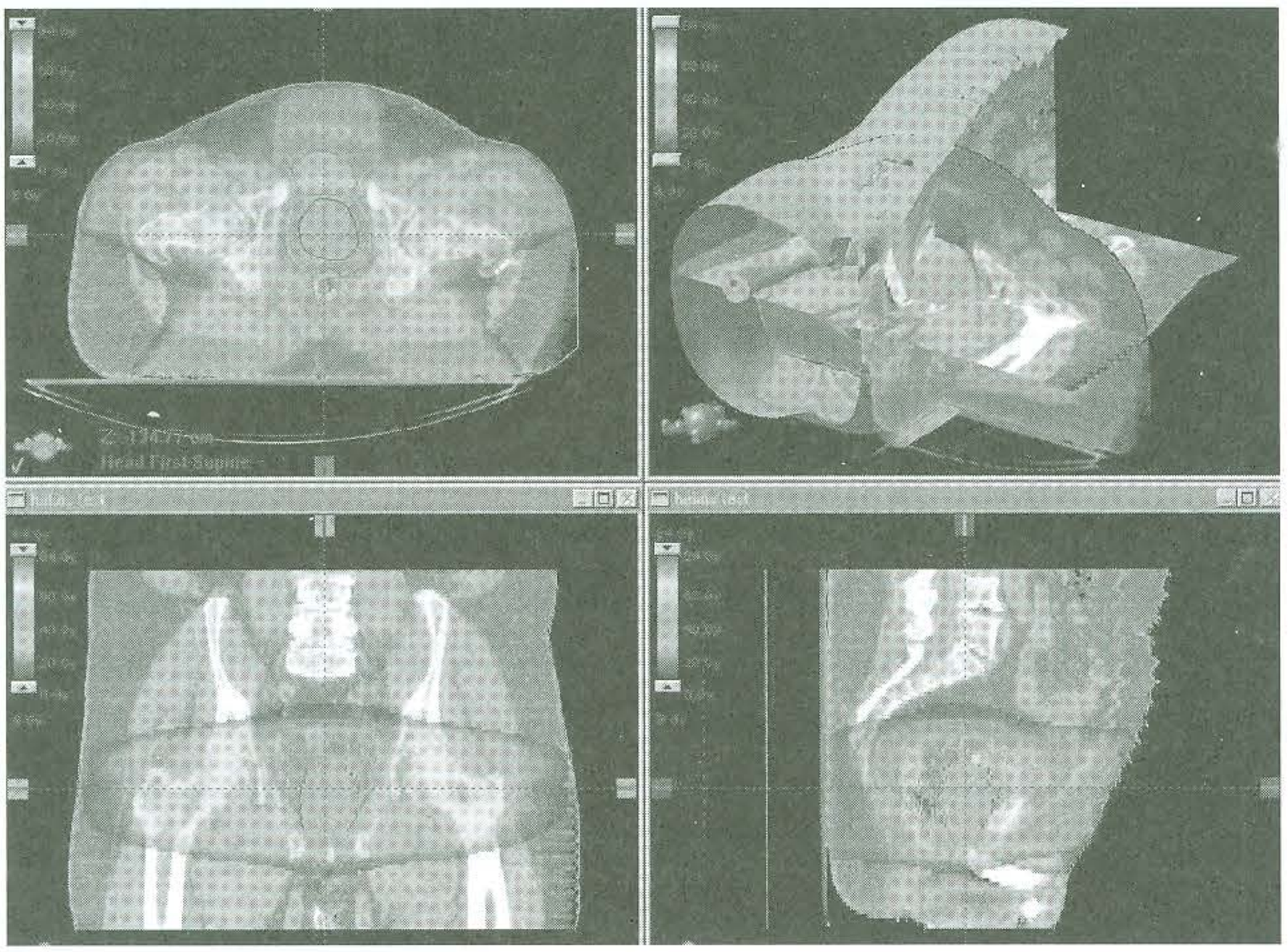
ธรรมชาติของรังสีเอ็กซ์หรือรังสีแกมมาจะมีอำนาจในการทะลุทะลวงผ่านเข้าไปในเนื้อเยื่อได้ดีแต่ปริมาณรังสีที่ผ่านลึกเข้าไปจะมีค่าพลังงานลดลงอย่างรวดเร็ว เนื้อเยื่อที่ต้องการกำจัดมักอยู่ลึกภายในร่างกาย ถ้าใช้รังสีเพียงลำแสงเดียว การฉายรังสีให้ได้รับพลังงานที่เพียงพอเพื่อให้ก้อนเนื้อร้ายถูกทำลายจะทำให้เนื้อเยื่อปรกติที่เป็นทางเข้าของรังสีจะได้รับรังสีมากตามไปด้วย เพื่อหลีกเลี่ยงการทำอันตรายต่อเนื้อ เยื่อดีๆ จึงจำเป็นต้องใช้ลำรังสีอย่างน้อย 2 แนวฉายขึ้นไป (บางครั้งใช้มากถึง 5 แนว) โดยจัดให้แนวรังสีไปประสานกันและให้บริเวณที่ก้อนเนื้อร้ายอยู่เป็นจุดรวมของแนวรังสี การฉายรังสีแบบนี้เรียกกันว่า “การฉายรังสีบำบัดแบบ 3 มิติ” ตัวอย่างเช่นการใช้รังสี 4 แนว เพื่อทำลายเซลมะเร็งในต่อมลูกหมาก (prostate) ดังรูปที่ 6




**รูปที่ 6** การฉายรังสีบำบัดแบบ 3 มิติแบบดั้งเดิม (MLC ไม่มีการเคลื่อนไหว)

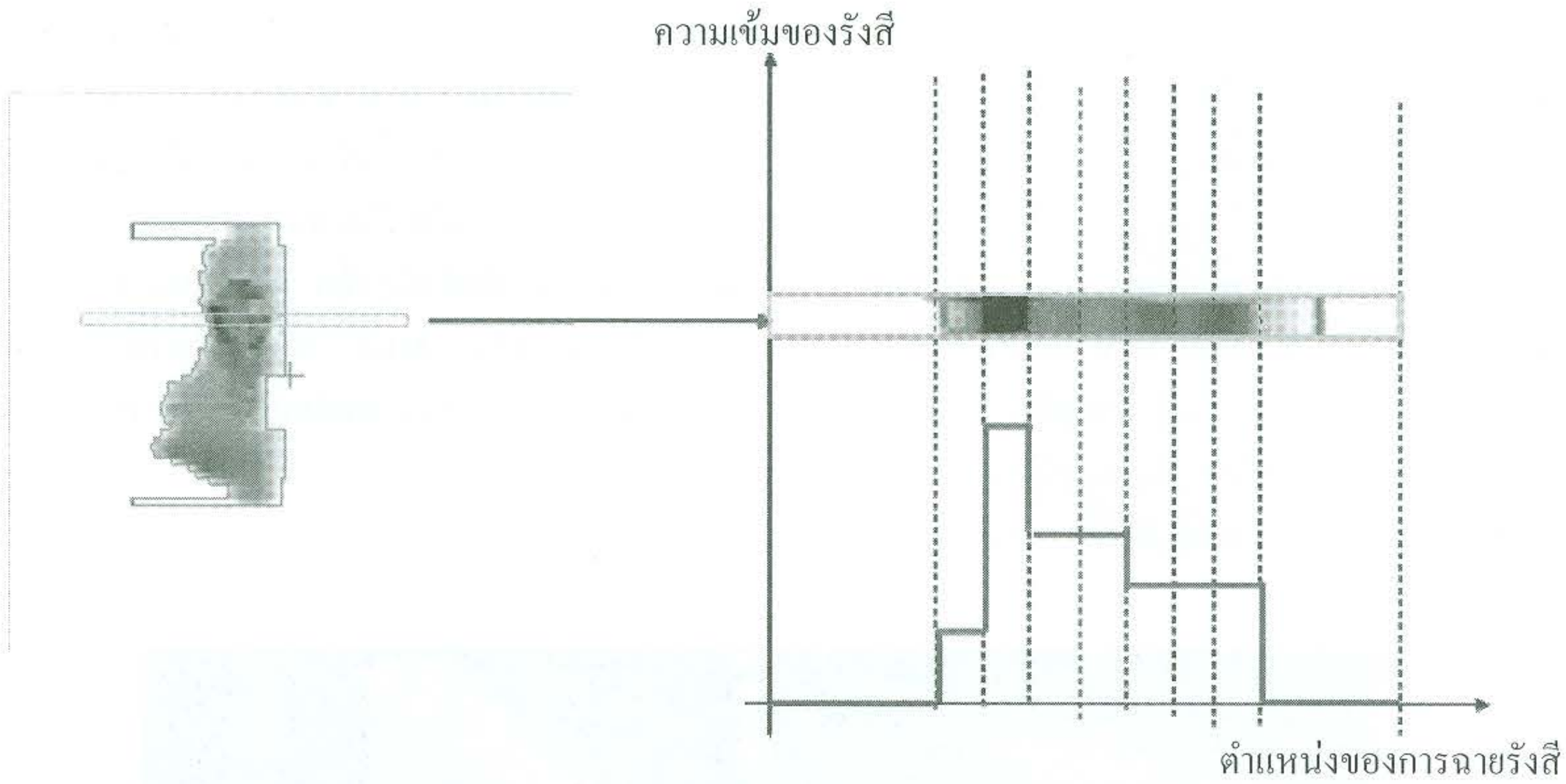
จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าบริเวณที่ลำรังสีทั้งสี่มาประสานกันจะได้บริเวณที่ได้รับปริมาณรังสีสูงๆอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งบริเวณ แต่ก็จะเห็นได้ชัดว่าในบริเวณดังกล่าวนี้มีส่วนที่เป็นเนื้อดีรวมอยู่ด้วย ซึ่งอาจถูกทำลายไปด้วย เพื่อความอยู่รอดของผู้ป่วย จึงจำเป็นต้องทำลายเซลมะเร็งให้หมดสิ้นเพื่อป้องกันการเกิดใหม่ของเซลเนื้อร้ายนี้ ในยุคก่อนหน้านี้ เป็นเรื่องที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะมีเนื้อเยื่อดีส่วนหนึ่งได้รับรังสีเกินจำเป็นในการฉายรังสีแบบดั้งเดิม การฉายรังสีบำบัดแบบ 3 มิติที่ปรับปรุงใหม่โดยผนวกระบบไอเอ็มอาร์ทีเข้ามาร่วมจะช่วยลดความเข้มรังสีต่อเนื้อเยื่อดีๆ รอบเนื้อร้าย ทำให้เกิดอาการแทรกซ้อนน้อยหรือไม่เกิดเลย ส่งผลให้โอกาสของคนไข้ในการฟื้นตัวมีสูงขึ้น การปรับการกระจายความเข้มโดยขยับ MLC ของเครื่องฉายอย่างเหมาะสมทำให้การให้รังสีต่อก้อนเนื้อร้ายแม่นยำมากขึ้นดังรูปที่ 7



**รูปที่ 7** การฉายรังสีบำบัดแบบ 3 มิติแบบใหม่ ไอเอ็มอาร์ที (MLC มีการเคลื่อนไหว)

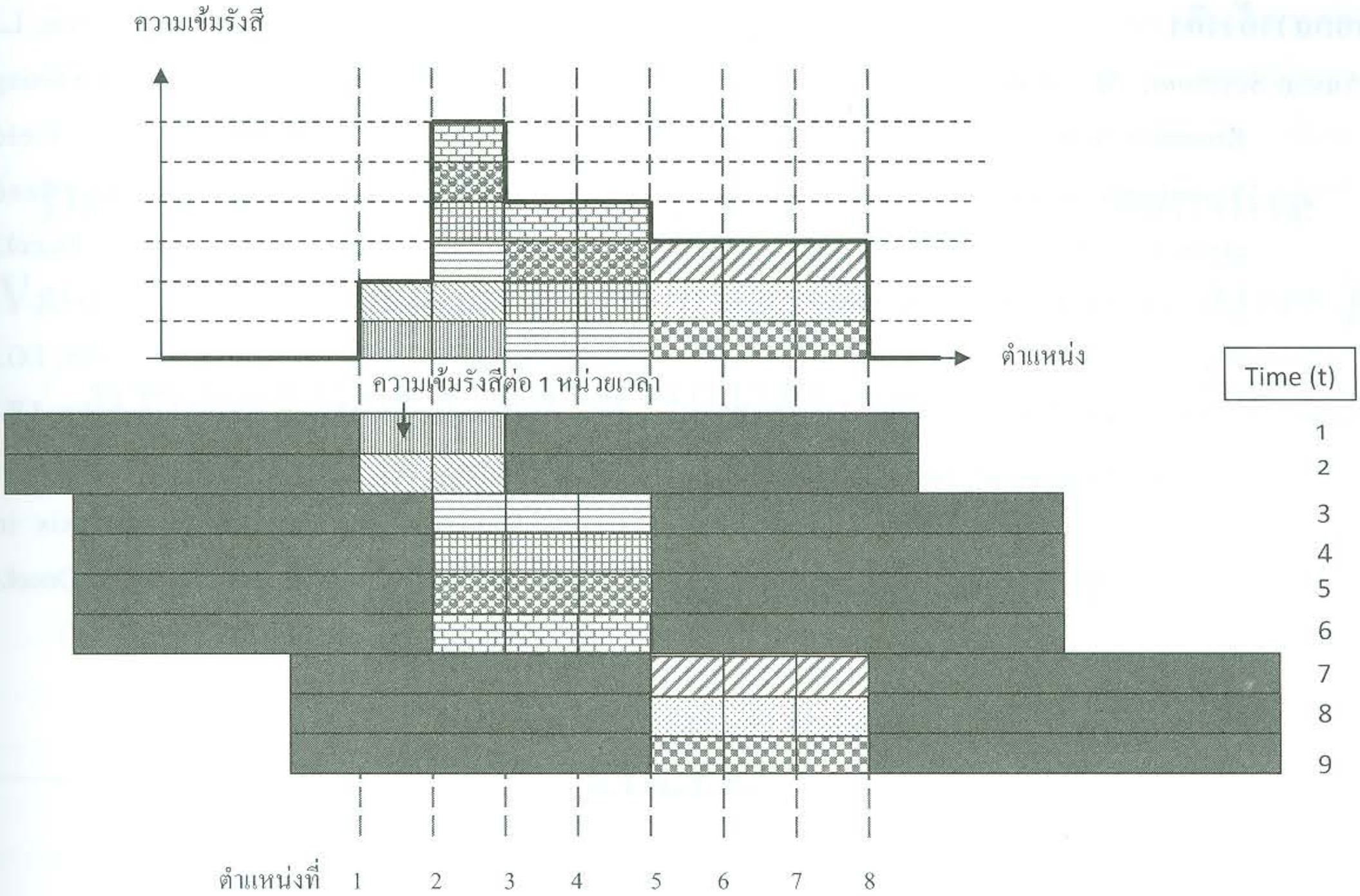
**กลไกการกระจายความเข้มรังสีของระบบไอเอ็มอาร์ที (Mechanism of IMRT)**

เพื่อแสดงให้เห็นว่าการเลื่อนของแผ่นกั้นสามารถกระจายความเข้มของรังสีที่ฉายผ่าน โดยตัดพื้นที่ที่แผ่นกั้นยอมให้รังสีผ่านเป็นช่วงๆ มาพิจารณาเป็นตัวอย่างการสร้างความเข้มดังรูปที่ 8




**รูปที่ 8** แสดงการกระจายความเข้มรังสีที่เกิดจากการเลื่อนของแผ่นกั้นรังสี 1 คู่

กลไกการกระจายความเข้มเนื่องจากการเลื่อนตัวของแผ่นกั้นตามช่วงเวลาที่เหมาะสม จะทำความเข้าใจได้จากแผนภาพด้านล่าง ความเข้มที่ได้ตามรูปที่ 8 จะได้จากการเลื่อนแผ่นกั้นทั้งหมด 9 ช่วงเวลา แต่ละช่วงใช้เวลาเท่ากันคือ t หน่วย ตามแผนผังเริ่มต้นจากแผ่นกั้นด้านซ้ายอยู่ที่ตำแหน่ง 1 ขณะที่แผ่นกั้นด้านขวาอยู่ที่ตำแหน่ง 3 เป็นช่วงเวลา 2t แล้วแผ่นกั้นด้านซ้ายขยับไปอยู่ที่ตำแหน่ง 2 ในขณะที่แผ่นกั้นด้านขวาขยับไปอยู่ที่ตำแหน่ง 5 จากช่วงเวลา t = 3 ถึง t = 6 เป็นเวลา 4t หลังจากนั้นแผ่นกั้นด้านซ้ายขยับไปอยู่ที่ตำแหน่ง 5 และ แผ่นกั้นด้านขวาขยับไปอยู่ที่ตำแหน่ง 8 เป็นเวลา 3t หลังจากครบ 9 ช่วงเวลา แผ่นกั้นจะปิดเพื่อหยุดการฉายแสง ก็จะได้การกระจายความเข้มตามต้องการ




**รูปที่ 9** แสดงความเข้มที่สะสมจากการเปิดช่องที่ตำแหน่งต่างๆ ของแผ่นกั้นใน 9 ช่วงเวลา

จากวิธีการเลื่อนแผ่นกั้นตามตัวอย่างที่กล่าวมา ถ้าผ่านการคำนวณอย่างเหมาะสมก็จะทำให้การประสานความเข้มของรังสีให้ครอบคลุมตามรูปทรงของเนื้อเยื่อได้อย่างเหมาะสมตามที่แพทย์ต้องการ ทำให้ปริมาณการรับรังสีของเนื้อเยื่อดีๆที่อยู่ล้อมรอบลดลงได้อย่างมีนัยสำคัญ

## บทสรุป

ระบบไอเอ็มอาร์ทีนี้ ในปัจจุบันกำลังเป็นวิธีการรักษาที่แพร่หลายออกไปอย่างรวดเร็วของระบบการฉายแสงในประเทศสหรัฐอเมริกา สำหรับประเทศไทยก็ได้มีการนำเข้ามาใช้บ้างแล้ว แต่ยังขาดอุปกรณ์และบุคคลากรที่เชี่ยวชาญอยู่เป็นจำนวนมาก ถ้าเราต้องการขยายรูปแบบการรักษานี้ออกไปทั่วประเทศ ในอนาคตยังจะมีการพัฒนาระบบไอเอ็มอาร์ทีให้มีความแม่นยำมากขึ้นทั้งด้านระบบควบคุมแผ่น MLC เพื่อควบคุมการกระจายรังสีให้ดีขึ้น การใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงกับกระบวนการคำนวณของการประสานรังสี 2 -5 ลำแสง ให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด และองค์ประกอบของการรักษาอื่นๆ ซึ่งผลที่ได้จะมีคุณประโยชน์ต่อคนไข้เป็นอย่างยิ่ง ข้อที่ควรคำนึงถึงก็คือ ระบบไอเอ็มอาร์ทีเป็นระบบที่ซับซ้อนมากจึงต้องการบุคคลากรในการปฏิบัติงานที่มีศักยภาพสูง และการฉายรังสีมักต้องการลำแสงหลายลำแสงมากกว่าระบบดั้งเดิม รวมทั้งต้องมีการทดสอบและวัดปริมาณรังสีในหุ่นจำลองก่อนจะฉายรังสีจริงๆให้กับผู้ป่วยในแต่ละราย เพื่อให้มั่นใจว่าการฉายรังสีด้วยวิธีไอเอ็มอาร์ทีนี้ถูกต้อง แม่นยำ ตรงกับที่ได้คำนวณและวางแผนไว้ล่วงหน้าจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

## เอกสารอ้างอิง

Austin-Seymour, M., Kalet, I., McDonald, J., Kromhout-Schiro, S., Jacky, J., Hummel, S., and unger, J. (1995). Three dimensional planning targetvolumes: a model and software tool. Int. J. Radiat. Oncol., Biol., Phys. 33: 1073 - 1080.

Nutting, C., Dearnaley, D.P., and Webb, S. (2000). Intensity modulated radiation therapy: a clinical review. Br. J. Radiol. 73: 459 - 469.

Roach, M., Pickett, B., Rosenthal, S.A., Verhey, L., and Phillips, T.L. (1994). Defining treatment margins for 6 field conformalirradiation of localized prostate-cancer. Int. J. Radiat. Oncol., Biol., Phys. 28: 267 - 275.

Urie, M.M., Goitein, M., Doppk, K., Kutcher, J.G., LoSasso, T., Mohan, R., Munzenrider, J.E., Sontag, M., and Wong, J.W. (1991). The role of uncertainty analysis in treatment planning. Int. J. Radiat. Oncol., Biol., Phys. 21: 91-107.

❑❑❑❑❑

ว.วิทย. มข. 36(4) 279-289 (2551) KKU Sci. J.36(4) 279-289 (2008)

# Determination of Antioxidant Capacity and Nutritive Values of Pak-Wanban (*Sauropus androgynus* L. Merr.)

# การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันและคุณค่าทางโภชนาการของผักหวานบ้าน (*Sauropus androgynus* L. Merr.)

*Narumon Benjapak*[1], *Prasan Swatsitang*[1*] *and Sayan Tanpanich*[2]

## Abstract

Pak-Wanban (*Sauropus androgynus* L. Merr.) is a traditional vegetable in Thailand and Southeast Asia. It has nutritive value and contains phytochemicals which can act as antioxidant. The aims of this study were to 1) determine antioxidant capacity of Pak-Wanban by using two different spectrophotometric methods (DPPH assay and 2-deoxyribose assay) 2) determine vitamin C and total phenolic contents, which were related to antioxidant capacity by using Titrimetric method and Folin-Ciocalteu assay, respectively, and 3) determine its nutritive value (moisture, protein, lipid, carbohydrate, fiber and ash). Pak-Wanban harvested during November 2005 to January 2006 exhibited antioxidant capacity giving $IC_{50}$ values of 0.14 ± 0.01 % (v/v) (by DPPH assay). Pak-Wanban harvested in January 2006 gave $IC_{50}$ values of 0.07 ± 0.01 % (v/v) determined by 2-deoxyribose assay. Vitamin C and total phenolic contents during November 2005 to January 2006 were 92.29 ± 0.13 mg/100 g and 428.26 ± 95.77 mg gallic acid equivalent/100 ml, respectively. The moisture, protein, lipid, carbohydrate, fiber and ash contents of Pak-Wanban were 88.32 ± 0.06 %, 4.84 ± 0.19 %, 0.19 ± 0.03 %, 5.36 ± 0.65 %, 1.11 ± 0.14 % and 0.17 ± 0.08 %, respectively.

## บทคัดย่อ

ผักหวานบ้าน (*Sauropus androgynus* L. Merr.) เป็นผักพื้นบ้านของไทยและประเทศเพื่อนบ้านในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งผักหวานบ้านเป็นพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการ และมีสารพฤกษเคมีซึ่งมีฤทธิ์

[1] Department of Biochemistry, Faculty of Science, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

[2] Thailand Institute of Scientific and Technological Research, Bangkok, Thailand

* corresponding author, E-mail: prasan@kku.ac.th

เป็นสารแอนติออกซิแดนท์ (antioxidant) การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึง 1) ความสามารถในการต้านออกซิเดชันของผักหวานบ้านด้วยวิธีทาง spectrophotometric 2 วิธี (DPPH assay และ 2-deoxyribose assay) 2) ศึกษาถึงปริมาณวิตามินซีและฟีโนลิคทั้งหมดโดยวิธี Titrimetric method และ Folin-Ciocalteu assay ตามลำดับ และ 3) ศึกษาถึงคุณค่าทางโภชนาการต่างๆ (ปริมาณน้ำ โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เยื่อใยและเถ้า) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการต้านออกซิเดชันของผักหวานบ้านที่วิเคราะห์ด้วย DPPH assay ในช่วงเดือนพฤศจิกายน 2548 ถึงมกราคม 2549 ให้ค่าความเข้มข้นที่ยับยั้งการเกิดออกซิเดชันที่ 50 % ($IC_{50}$) คือ 0.14 ± 0.01 % (v/v) ส่วน 2-deoxyribose assay ที่วิเคราะห์ในเดือนมกราคม 2549 พบว่ามีค่าความเข้มข้นที่ยับยั้งการเกิดออกซิเดชันที่ 50 % (IC50) คือ 0.07 ± 0.01 % (v/v) ปริมาณวิตามินซีและปริมาณฟีโนลิคทั้งหมดในช่วงเดือนพฤศจิกายน 2548 ถึงมกราคม 2549 พบว่ามีค่าปริมาณวิตามินซี คือ 92.29 ± 0.13 มก./100 ก. และ 428.26 ± 95.77 มก. gallic acid equivalent/100 มล. ตามลำดับ ส่วนคุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ ปริมาณน้ำ โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เยื่อใยและเถ้า มีค่าดังนี้ 88.32 ± 0.06 %, 4.84 ± 0.19 %, 0.19 ± 0.03 %, 5.36 ± 0.65 %, 1.11 ± 0.14 % และ 0.17 ± 0.08 % ตามลำดับ

**Keywords:** *Sauropus androgynus* L. Merr., Antioxidant capacity, Nutritive value
**คำสำคัญ:** ผักหวานบ้าน, ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน, คุณค่าทางโภชนาการ

## 1. INTRODUCTION

*Sauropus androgynus* L. Merr. (Euphorbiaceae, Thai name: Pak-Wanban) is a traditional vegetable in Thailand. The origin of this plant is uncertain. It is native to South Asia and Southeast Asia including India, Sri Lanka, Thailand, Laos, Malaysia and Indonesia etc. (Frits Stoepman GVN, 1996) In Thailand, it is cultivated for consumption and commercial purposes; many people use this plant as traditional medicine. The leaves and roots are used to relieve fever and treat urinary problems. The juice from its leaves is dropped into the ear as a remedy for earache (Frits Stoepman bNO, 2003). In addition, the young tips and leaves are a common nutritious vegetable for cooking. (Padmavathi and Rao, 1990; Kanchanapoom et al., 2003)

Vegetables and fruits commonly consist of some nutrients and phytochemicals, which can exhibit antioxidant capacity. The major antioxidants of vegetables and fruits are different compounds such as vitamin C, vitamin E, carotenoids and phenolic compounds, especially flavonoids. These antioxidants scavenge radicals and inhibit the chain initiation or break the chain propagation (Shi et al., 2001). Dietary antioxidants present in vegetables and fruits can be used against oxidative stress, to protect cells against oxidative damage and prevent chronic diseases such as cancer, cardiovascular disease and diabetes (Podsedek, 2005). Nutrient antioxidants may act together to reduce reactive oxygen species levels more effectively than single dietary antioxidants, because they can function as synergists (Eberhardt et al., 2000; Rossetto et al., 2002; Ohr, 2004; Trombino et al., 2004; Podsedek, 2005). Additionally, vegetables and fruits contain different nutrients such as water, protein, lipid, carbohydrate minerals and/or vitamins. All of these compounds and elements are essential to the human body because the human body cannot produce them

directly. Humans respond to nutrients from food including plants (vegetables and fruits) and animals. These compounds from food consist of elements such as carbon, hydrogen, oxygen, nitrogen, phosphorus, calcium, iron and zinc, which the human body uses as energy sources and as building blocks. If the body obtains an imbalance of nutrients, an excess or deficiency will occur, which affects the body function. Therefore, suitable and sufficient nutrients are needed for the human body (The Wikipedia, 2001). A few studies have been done about the nutritive value of *S. androgynus* L. Merr., but the antioxidant capacity of this plant is rarely mentioned. The objectives of this study were to determine antioxidant capacity, vitamin C, total phenolics and nutritive values of Pak-Wanban.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1 Chemicals

Chemicals such as 1,1-diphynyl-2-picrylhydrazyl (DPPH), 2-deoxyribose, L-ascorbic acid, 2,6-dichloroindophenol (DICP), 2-thiobarbituric acid (TBA), gallic acid were purchased from Sigma, USA. Acetic acid, Folin-ciocalteu's reagent, hydrogen peroxide, metaphosphoric acid, sodium hydroxide, and potassium hydroxide were purchased from Carlo Erba, France. Ethylene diaminetetraacetic acid (EDTA) and potassium dihydrogen phosphate were products from Fluka, Swizerland. Petroleum ether was from Lab-Scan, Thailand. Methanol and Acetone were products from BDH, UK. All chemicals used were of analytical grade.

### 2.2 Sample Preparation

Pak-Wanban was purchased from a local market in Udonthani, Thailand during November 2005 - January 2006. Twenty grams of young tips were cleaned and cut into small pieces then ground in a mortar. The juice was obtained by filtration through a filter cloth .The juice was freshly prepared before test. Pak-Wanban juice was used for the analysis of DPPH radical scavenging activity, $OH^{\bullet}$ radical scavenging activity and total phenolic content. Dried samples of Pak-Wanban were used for proximate analysis for nutritive values.

### 2.3 DPPH radical scavenging activity

The antioxidant capacity of the juice from *Sauropus androgynus* L. Merr. was measured on the basis of the scavenging activity of the stable 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazly (DPPH) free radical (Leong and Shui, 2002). After the juice had been diluted (2 fold serial dilution) with water, 0.2 ml of each dilution was pipetted into test tubes containing 3.0 ml of $1 \times 10^{-4}$ mM DPPH solution (in methanol), mixed well and centrifuged at 3,000 rpm for 5 min. The absorbance of the supernatant was recorded at 515 nm. Ascorbic acid was used as a standard antioxidant. Antioxidant capacity was expressed as percent inhibition and 50 % inhibitory concentration ($IC_{50}$).

### 2.4 $OH^{\bullet}$ radical scavenging activity

2-Deoxyribose is oxidized by $OH^{\bullet}$ radicals that are formed by Fenton reaction and degraded to malondialdehyde (Chung et al., 1997) which can be detected by reacting with thiobarbituric acid (TBA). A reaction mixture composed of 0.1 ml of 10 mM $FeSO_4.7H_2O$, 0.1 ml of 10 mM EDTA, 0.2 ml of 10 mM 2-deoxyribose and 0.02 ml of sample (Pak-Wanban juice) in 1.38 ml of 0.1 mM

phosphate buffer (pH 7.4) was made. The reaction was started by adding 0.2 ml of 10 mM $H_2O_2$ and incubating at 37°C for 1 hr. After incubation, 1 ml each of 2.8 % Trichloroacetic acid (TCA) solution and 1 ml of 1 % Thiobarbituric acid (TBA) solution were added to the reaction mixture, which was then boiled for 10 min, cooled in ice and its absorbance recorded at 532 nm. Antioxidant capacity was expressed as percent inhibition and 50% inhibitory concentration ($IC_{50}$).

### 2.5 Determination of Vitamin C content

The vitamin C content was determined by the titrimetric method according to the method of AOAC, 1990. Eighteen grams of sample was cleaned and cut into small pieces, ground in a mortar and extracted with 250 ml of metaphosphoric acid-acetic acid solution. The extract was filtered through a filter cloth. The filtrate was used to determine vitamin C content by adding 10 ml of distilled water to 20 ml of sample solution and titrating with 2,6-dichloroindophenol (DICP) solution. Ascorbic acid was used as a standard.

### 2.6 Determination of total phenolic content

The amount of total phenolics was determined according to the Folin-Ciocalteu assay (Torres et al., 1987). Fifty microliters of diluted sample was added to 3.0 ml of distilled water, 0.25 ml of Folin-Ciocalteu's reagent and 0.75 ml of 20 % sodium carbonate solution ($Na_2CO_3$). The reaction mixture was adjusted to 5 ml with distilled water and then incubated at 50°C for 2 hrs. After that the absorbance was read at 765 nm. Gallic acid was used as a standard. Total phenolic content was expressed as mg gallic acid equivalent per 100 ml.

### 2.7 Determination of water content

Ten grams of Pak-Wanban was cleaned and cut into small pieces and placed in an oven at 100°C for 4 hrs., and then it was cooled in a desiccator for 15 min and weighed. The weighed sample was dehydrated again at 100°C for 1 hr., cooled and weighed in order to obtain a constant dried weight. The water content was obtained by a difference of weights.

### 2.8 Determination of protein content

Protein content was determined by the Kjeldahl method (Kjeltec system, Tecator), in which 0.5 g of dried sample, Kjeltabs ($K_2SO_4$+$CuSO_4$) as a catalyst and 10 ml conc. $H_2SO_4$ were added into a digestion tube. Blanks containing all these chemicals were simultaneously processed. The tubes were placed in the heated digestion block at 420°C for 45 min, cooled at room temperature and diluted by adding 50 ml of distilled water. Then the tube was placed in a distillation unit and 50 ml of 40 % NaOH solution added. The tube was heated by vapor from boiling water for 5 min. Ammonium sulphate was degraded to ammonia. Ammonia was condensed together with water vapor into 25 ml of 4 % boric acid solution in a conical flask. Borate in a solution was titrated with 0.1 M HCl. The volume of 0.1 M HCl used for titration was directly proportional to the nitrogen content of the sample. The percentage nitrogen content was calculated by the equation below:

$$\% N = \frac{1.401 \times (\text{volume of HCl used for the sample-volume of HCl used for the blank}) \times M \text{ of HCl}}{\text{weight of sample}}$$

The percentage of protein was obtained by multiplying percent nitrogen by 6.25.

**2.9 Determination of lipid content**

Lipid content of this plant was determined by the direct extraction method. Three grams of dried sample was extracted by 50 ml of petroleum ether at 60 _C for 60 min in a soxtec system HT (series 1043 Extractor unit, Tecator). The lipid value was obtained by mean of weighing.

**2.10 Determination of fiber and ash contents**

Fiber and ash contents were determined by Fibertec system (Hot & cold extractor unit, Tecator), in which 0.5 g dried sample was hydrolyzed and boiled with 150 ml of 0.128 M $H_2SO_4$ solution for 30 min, followed by 150 ml of 0.223 M KOH solution for 30 min. The residue was washed with hot water, followed by acetone and dried in an oven, cooled in a desiccator and weighed. The residue was composed of crude fiber and ash. This residue was burned at 500°C for 3 hrs. in a muffle furnace (series 6-1350A, NEY), cooled in a desiccator and weighed in order to obtain the ash. Crude fiber and ash were calculated from the weight difference.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

The antioxidant capacity of Pak-Wanban juice was measured by two different spectrophotometric methods, DPPH assay and 2-deoxyribose assay. In DPPH assay, DPPH is a stable free radical with purple color. The antioxidants scavenge DPPH radical by donating hydrogen atoms leading to a non-radical with yellow color (Bondent et al., 1997). Figure 1 shows the DPPH radical scavenging activity of Pak-Wanban harvested during November 2005 to January 2006 expressed as percentage inhibition of four different concentrations (0.05, 0.10, 0.20 and 0.40 % (v/v)). All concentrations show dose-dependent activity. The antioxidant capacity is also expressed as 50 % inhibitory concentration ($IC_{50}$) in Figure 2. The $IC_{50}$ value was obtained from a graph plotted between sample concentration and the absorbance of the DPPH radical. A lower $IC_{50}$ value means a higher antioxidant capacity of the sample. The $IC_{50}$ value of Pak-Wanban harvested in November 2005 was lowest but not significantly different from those obtained in December 2005 and January 2006. Pak-Wanban juice exhibited $IC_{50}$ values of 0.13 - 0.15 % (v/v) (Table 1). In 2-deoxyribose assay, $OH^{\bullet}$ radicals degrade 2-deoxyribose to malodialdehyde. The oxidized products from the reaction form complexes with TBA and show a pink color. The antioxidants of Pak-Wanban decreased formation of oxidized product of 2-deoxyribose leading to less formation of thiobarbituric acid reactive substances (TBARS). Only Pak-Wanban juice harvested in January 2006 was determined for antioxidant capacity by this assay. It exhibited $IC_{50}$ value of 0.07 % (v/v) (Table 1).

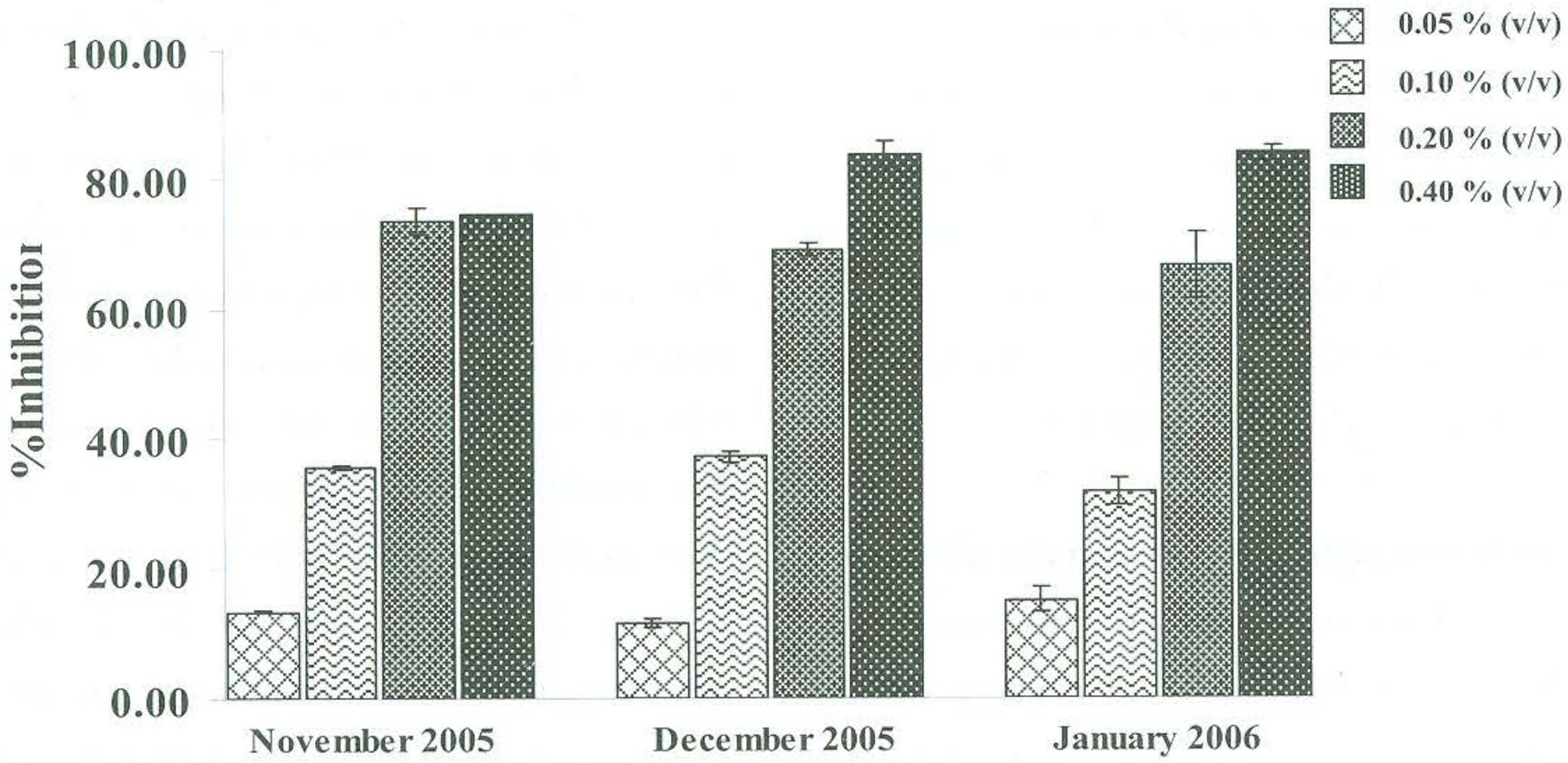



**Figure 1.** Percentage inhibition against DPPH radical of Pak-Wanban harvested in three months.

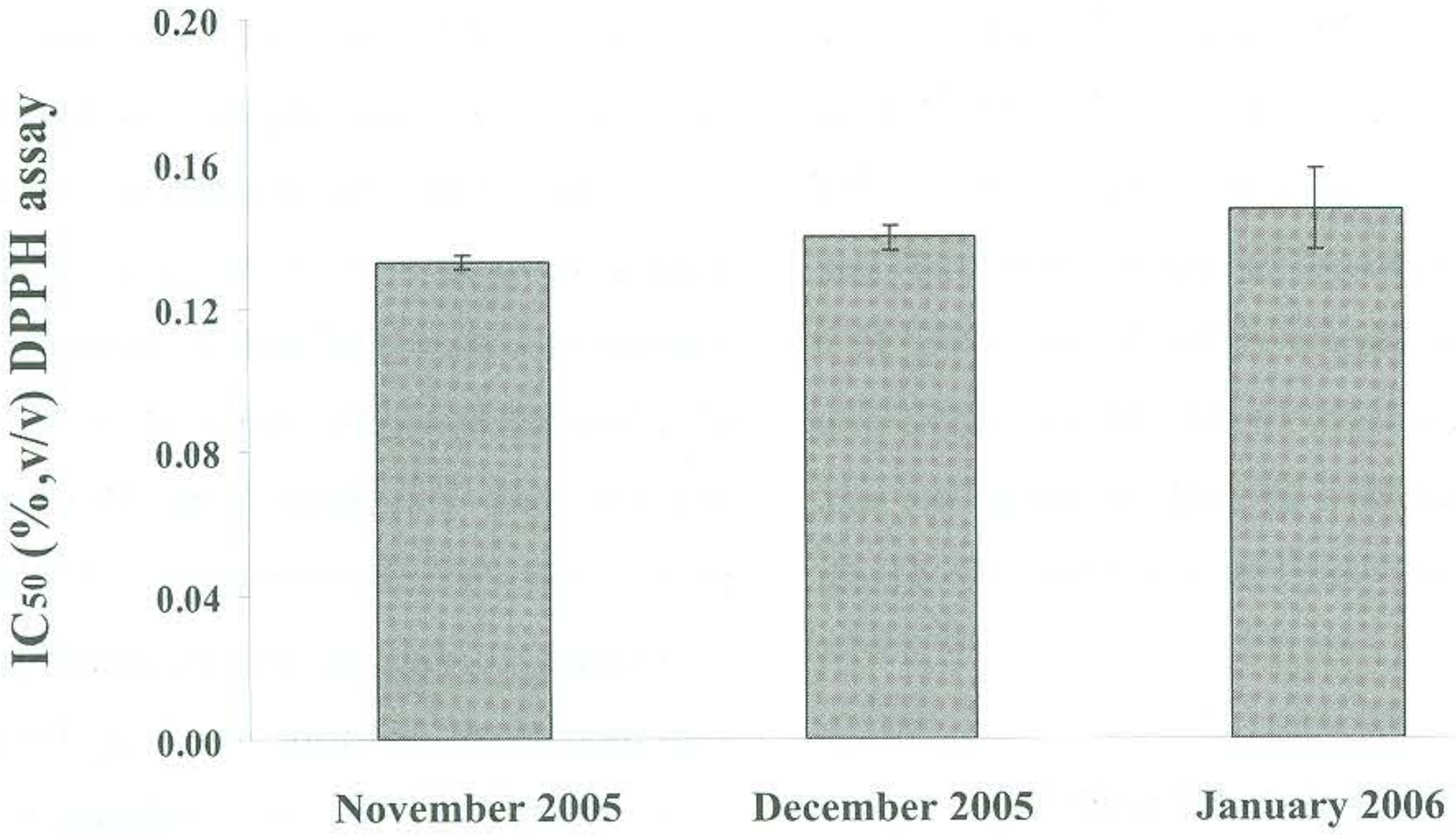



**Figure 2.** $IC_{50}$ values (%, v/v) of Pak-Wanban harvested in three months.

**Table 1.** Antioxidant capacity of *Sauropus androgynus* L. Merr.

| Month/year | DPPH assay $IC_{50}$ (%, v/v) | 2-Deoxyribose assay $IC_{50}$ (%, v/v) |
|---|---|---|
| November, 2005 | 0.13 ± 0.00 | -* |
| December, 2005 | 0.14 ± 0.00 | -* |
| January, 2006 | 0.15 ± 0.01 | 0.07 ± 0.01 |

* 2-Deoxyribose assay was not developed during that period.

Vitamin C and total phenolics are related to antioxidant capacity. Vegetables and fruits have been reported as being very good sources of vitamin C and phenols (Oboh, 2004). Vitamin C is a small molecular compound that is an essential nutrient in many multi-cellular organisms, and humans in particular. The human body cannot produce it, so it must be obtained entirely through one's diet (Kramer et al., 2005). The amount of vitamin C in a sample was determined by redox titration using reaction between ascorbic acid in a sample and DICP. Vitamin C content of Pak-Wanban was obtained from a standard curve of vitamin C. The plant harvested in November 2005 showed the highest value of vitamin C but this value was not significantly different from the rest (Figure 3). The vitamin C contents of Pak-Wanban harvested during three months were 92.43 - 92.18 mg/100 g (Table 2). Phenolic compounds are secondary metabolites that are derivatives of pentose phosphate, shikimate, and phenylpropanoid pathways in vegetables and fruits, which have been found to be strongly antioxidant against free radicals and other reactive oxygen species (ROS) (Podsedek, 2005; Balasundram et al., 2006). The amount of total phenolics was determined by using Folin-Ciocalteu's reagent. This reagent is reduced by phenolates in this plant and the color of the heteropoly acid changes to blue. Total phenolic content in the juice of this sample was expressed as milligram of gallic acid equivalent per one hundred milliliter (mg GAE/ 100 ml). Figure 4 shows total phenolic content of Pak-Wanban harvested in three months. Total phenolics of this plant harvested in November 2005 showed the highest value and was significantly higher than those harvested in December 2005 and January 2006. The values of total phenolics of this plant harvested in three months were 538.79 - 369.83 mg GAE/100 ml (Table 2). However, Pak-Wanban may have other antioxidants which are responsible for antioxidant capacity such as carotenoids (β-carotene) and vitamin E (Nutrition Division, 2001).

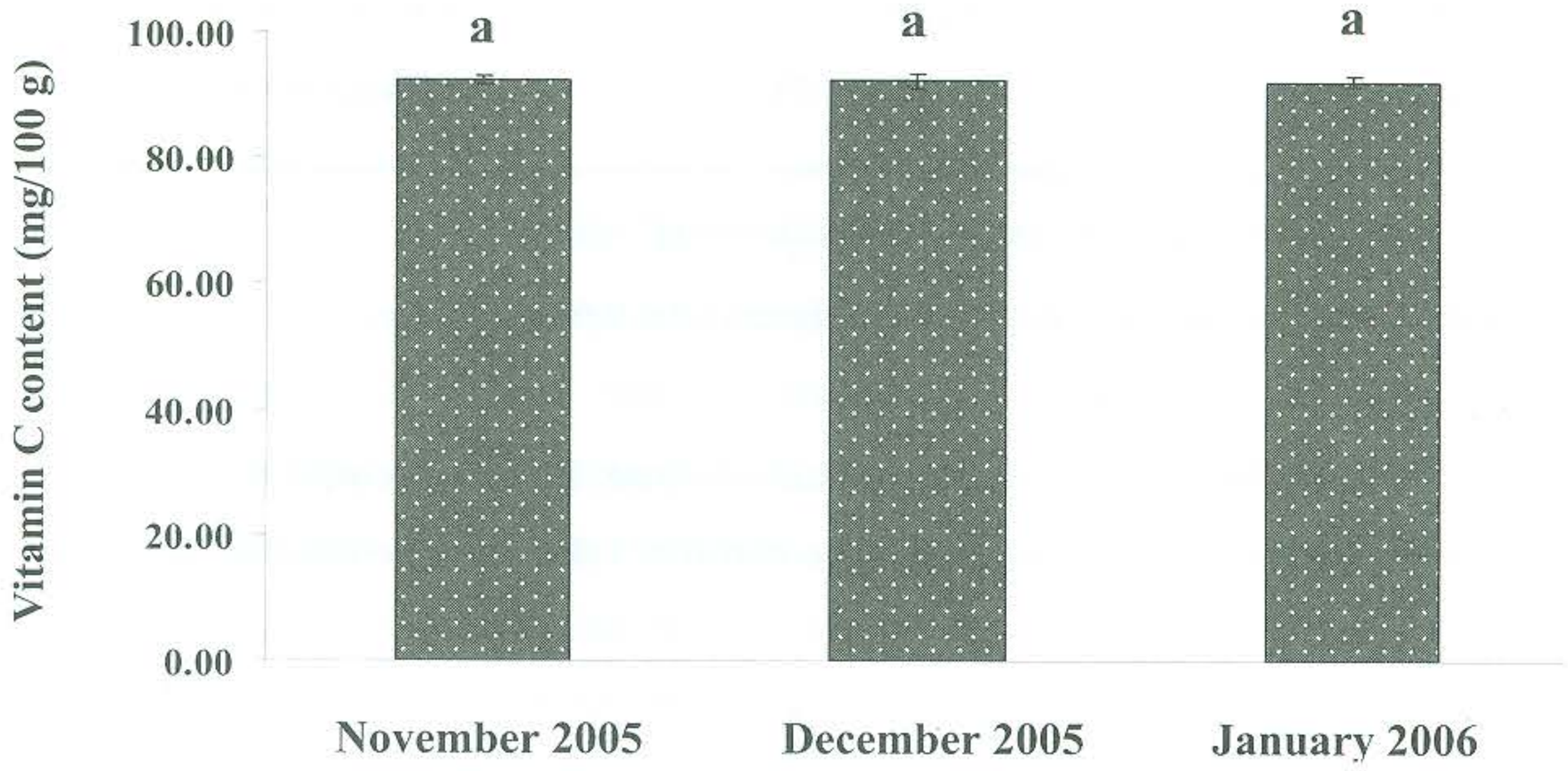



**Figure 3.** Vitamin C content of *Sauropus androgynus* L. Merr. by Titrimetric method

([a] Vitamin C content value was not significantly different ($P > 0.05$)).

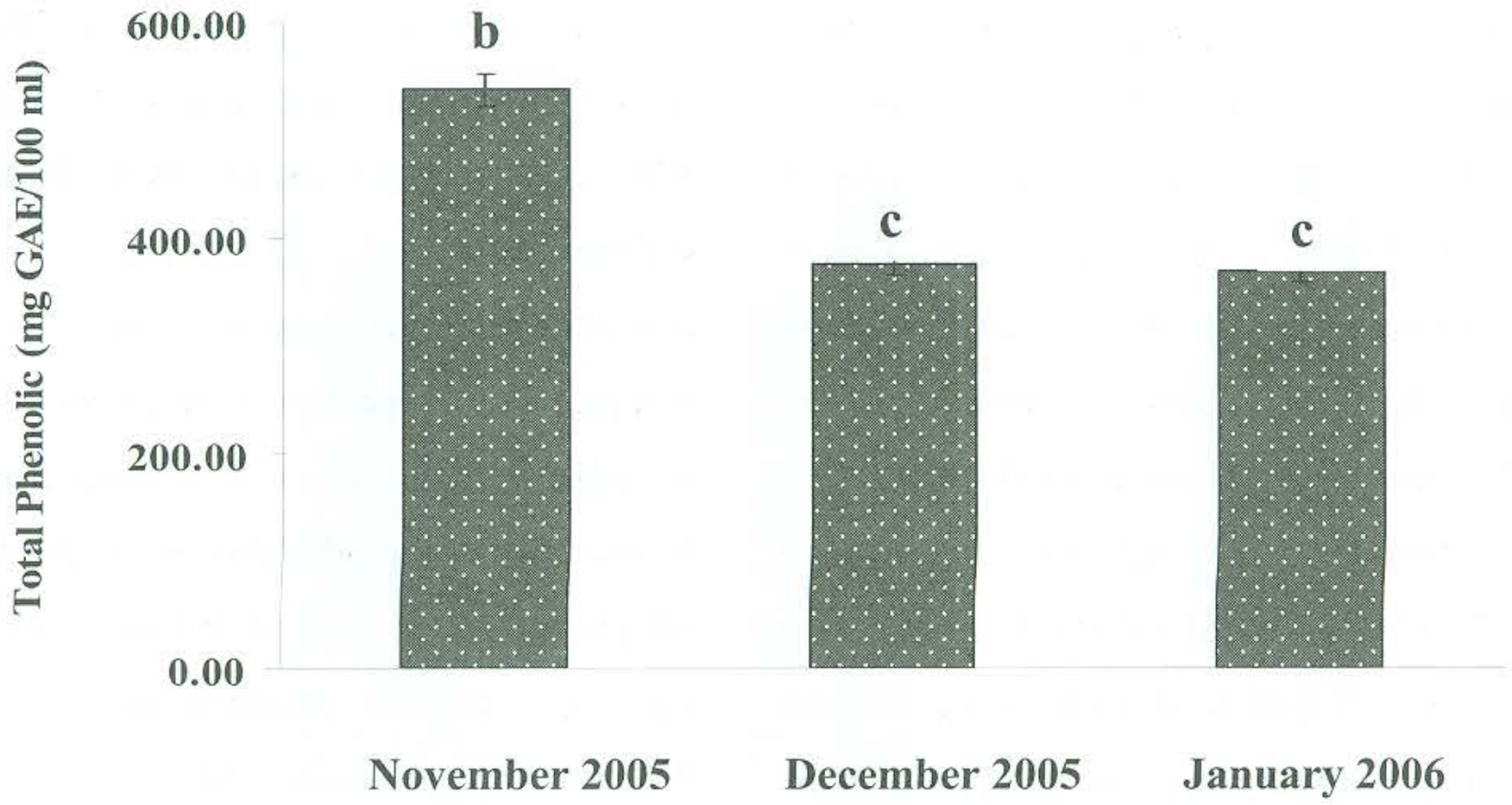



**Figure 4.** Total phenolic content of *Sauropus androgynus* L. Merr. by Folin-Ciocalteu assay ([b] total phenolic content value was significantly different ($P < 0.05$)).

**Table 2**. Vitamin C and total phenolic contents of *Sauropus androgynus* L. Merr.

| Month/Year | Vitamin C content (mg/100 g) | Total phenolic content (mg GAE/100 ml) |
|---|---|---|
| November 2005 | $92.43 \pm 0.74^{a}$ | $538.79 \pm 15.32^{b}$ |
| December 2005 | $92.261.10^{a}$ | $376.16 \pm 11.03^{c}$ |
| January 2006 | $92.18 \pm 0.71^{a}$ | $369.83 \pm 10.32^{c}$ |

[a] vitamin C content values were not significantly different ($P > 0.05$)

[b] total phenolic content value was significantly different ($P < 0.05$)

The nutrients that can give energy are carbohydrate, lipid and protein whereas the others (vitamin, mineral and water) are non-energy nutrients. The nutritive values of Pak-Wanban are shown in Table 3.

**Table 3**. The nutritive values of *Sauropus androgynus* L. Merr.

| | Nutritional values (%) |
|---|---|
| Water | 88.32 ± 0.60 |
| Protein | 4.84 ± 0.19 |
| Lipid | 0.19 ± 0.03 |
| Carbohydrate | 5.36 ± 0.65 |
| Fiber | 1.11 ± 0.14 |
| Ash | 0.17 ± 0.08 |

Values are mean ± standard deviation ($n$ = 20).

Pak-Wanban contains high water content as other vegetables do. The water present in vegetables may be held as free liquid (substances are dissolved or dispersed), as hydrates, as imbibed water in gels, or by adsorption on the surfaces of solids. The protein, lipid and fiber contents obtained from this study were crude values. In the case of protein content, many proteins occurring in cells of vegetables are conjugated with lipid, carbohydrate and other molecules (Meyer, 1982). Thus crude proteins were obtained from an oxidation of organic compounds (N-containing compounds) by acid. The lipid was extracted with organic solvent which can dissolve other non-polar organic compounds from the sample. The crude fiber consisted of organic components of the vegetable cell wall and supporting structures, after removal of crude protein, carbohydrate and fat by acid, alkaline and organic solvent. Thus the crude fiber should be composed of the cellulose, hemicellulose and some of the materials that encrust the cell wall such as lignins and pectic substances. The carbohydrate content was calculated by subtracting percentage of water, protein, lipid, fiber and ash from 100 percent. The ash content was only the exact value of the sample obtained after the organic compounds were burned. Data from Nutrition Division, Department of Health, Ministry of Public Health, Thailand, shows almost the same trend of nutritive values of Pak-Wanban as this study did (Nutrition Division, 2001).

Freeze-dried samples of Pak-Wanban in this study were analyzed for coenzyme Q10 by Kettawan (2007). It was interesting that Pak-Wanban contained coenzyme Q10 about 142.66 ± 5.75 (g/100g which was approximately 6 times higher than that of Pak-Wanpa (*Melientha suavis* Pierre). The word "Pak-Wanban" may make some people confused with "Pak-Wanpa" which is another vegetable obtained from plant of different families. The Thai common name indicates that Pak-Wanban is domestic Pak-Wan whereas Pak-Wanpa is wild Pak-Wan. In fact, they are absolutely different. The coenzyme Q10 is recognized as antioxidant which has been widely used in nutraceutical products and cosmetics. It is actually an electron

receptor in the electron transport chain of animal mitochondria.

The results of this study demonstrate the antioxidant capacity and nutritive values of Pak-Wanban. Both antioxidant capacity and nutritive values can be used to promote cultivation for both domestic consumption and commercial purposes. In addition, data from this study can be used as baseline data for this plant.

## ACKNOWLEDGMENT

This research was financially supported by Thailand Institute of Scientific and Technological Research, Thailand.

## REFERENCES

Balasundram, N., Sundram, K. and Samman, S. (2006). Phenolic compounds in plant and agri-industrial by products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. Food chemistry 99(1): 191-203.

Bondent, V., Brand-Williams, W. And Bereset, C. (1997). Kinetics and mechanism of antioxidant activity using the DPPH free radical methods. Lebensmittel Wissenschaft and Technologie 30: 609-615.

Chung, S.-K., Osawa, T. and Kawakishi, S. (1997) Hydroxyl radical-scavenging effects of spices and scavengers from brown mustard (*Brassica nigra*). Biosci.Biotech.Biochem. 61: 118-123.

Eberhardt, M.V., Lee, C.Y. and Liu, R.H. (2000). Nutrition-Antioxidant activity of fresh apples. Nature 405: 903-904.

Frits Stoepman bNO. (2003). Plant Resources of South-East Asia 12:(3) Medicinal and poisonous plants 3. Prosea Foundation. Bogor: Indonesia.

Frits Stoepman GVN. (1996). Plant Resources of South-East Asia 8:Vegetables. (2nd ed). Prosea Foundation. Bogor: Indonesia.

Kanchanapoom, T., Chumsri, P., Kasai, R., Otsuka, H. and Yamasaki, K. (2003). Lignan and megastigmane glycosides from *Sauropus androgynus*. Phytochemistry 63: 985-988.

Kettawan, A. (2007). Institute of Nutrition, Mahidol University. (private communication).

Kramer, B.K., Pultz, V.M. and McCormick, J.M. (2005). Vitamin C analysis 1. [online] [Cited 4 September 2006]. Available from: http://chemlab.truman.edu/chem120labs/vitaminC .html.

Leong, L.P. and Shui, G. (2002). An investigation of antioxidant capacity of fruits in Singapore. Food Chemistry 76: 69-75.

Meyer, L.H. (1982). Food Chemistry. (4th ed). USA: Lition Educational Publishing.

Nutrition Division. (2001). Nutritive values of Thai Foods. Bangkok: Nutrition Division Department of Health Ministry of Public Health.

Oboh, G. (2004). Effect of blanching on the antioxidant properties of some tropical green leafy vegetables. LWT 38: 513-517.

Ohr, L.M. (2004). Dietary antioxidants. Food technology 58(10): 67-74.

Padmavathi, P. and Rao, M.P. (1990). Nutritive value of *Sauropus androgynus* leaves. Plant Foods for Human Nutrition 40: 107-113.

Podsedek, A. (2005). Natural antioxidants and antioxidant capacity of Brassica vegetables: A review. LWT 40: 1-11.

Rossetto, M., Vanzani, P., Mativi, F., Lunelli, M., Scarpa, M. and Rigo, A. (2002). Synergistic antioxidant effect of catechin and malvidin 3-glucoside on free radical-initiated peroxidation of linoleic acid inmicelles. Archives of Biochemistry and Biophysics 408: 239-245.

Shi, H., Noguchi, N. and Niki, E. (2001). Natural antioxidants. In: Antioxidants in food: Practical application. J. Pokorny, N. Yanishlieva and M. Gordon (Eds.), (1st ed). Cambridge: CRC Press Woodhead Publishing Ltd.

The association of official analytical chemists. (1990). Official methods of analysis, AOAC. In: Food Composition, additives, natural contaminants. K. Helrich (Ed.), Vol. 2, (15th ed.), pp. 993-994, 1058-1059. Virginia: The AOAC Inc.

The Wikipedia. (2001). Nutrition. [online] [Cited 4 September 2006]. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Nutrition.

Torres, A.M., Mau Lastovicka, T. and Rezaaiyan, R. (1987). Total phenolics and high-performance liquid chromatography of phenolic acids of avocado. J Agric Food Chem 35: 921-925.

Trombino, S., Serini, S., Di Nicuolo, F., Celleno, L., Ando, S., Picci, N., Calviello, G. and Palozza, P. (2004). Antioxidant effect of ferulic acid in isolated membranes and intact cells: Synergistic interactions with β-tocopherol, β-carotene and ascorbic acid. Journal of Agriculture and Food Chemistry 52: 2411-2420.

❑❑❑❑❑

ว.วิทย. มข. 36(4) 290-301 (2551) KKU Sci. J.36(4) 290-301 (2008)

# Characterization of a Fragrant Gene and Enzymatic Activity of Betaine Aldehyde Dehydrogenase in Aromatic and Nonaromatic Thai Rice Cultivars

*Pichedsak Srivong*[1], *Preeya Wangsomnuk*[2], *Paweena Pongdontri*[1*]

A number of Thai rice (*Oryza sativa indica* L.) cultivars have not been characterized for the *Badh2* gene. In addition, there has also been no report on rice betaine aldehyde dehydrogenase activity previously. Therefore, the objectives of this study were (1) to characterize the partial *Badh2* gene in other aromatic and non-aromatic of Thai rice cultivars and (2) to determine betaine aldehyde dehydrogenase activity. Sequence analysis of exon 7 of *Badh2* gene of the aromatic rice cultivars, KDML105 and RD6, revealed significant sequence polymorphisms containing a total of 3 SNPs and 8-bp deletion, whereas, non-aromatic rice; SMJ and NST did not. Deduced amino acid of the partial *Badh2* genes of Thai rice predicted the mutation at exon 7 of aromatic rice, which would lead to an early stop codon, result in production of truncated BADH2 and possibly loss of its function. Determination of BADH activity from partially purified leaf extracts indicated that BADH activities of nonaromatic rice were higher than aromatic rice by means of Km, $V_{max}$ and $V_{max}/K_m$. This kinetic analysis indirectly suggested loss of BADH2 function in aromatic rice, which plays important role in aroma synthesis in rice.

**Keywords:** BADH2, Fragrant gene, BADH activity, aromatic Thai rice, nonaromatic Thai rice

**Abbreviations:** BADH, betaine aldehyde dehydrogenase; KDML105, Khao Dok Mali105; RD6, Kor Khor 6; SMJ, Sew-Mae-Jan; NST, Niew-San-Pah-Tawng; AB-ald, 4-aminobutyraldehyde

[1] Department of Biochemistry, Faculty of Science, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002 Thailand

[2] Department of Biology, Faculty of Science, Khon Kean University, Khon Kaen 40002 Thailand

* corresponding author, Email address: paweena@kku.ac.th

## Introduction

A total of 114 different volatile compounds have been detected in the flavor of Japanese cooked rice (Yajima et al., 1978). Among those volatile compounds, 2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) is a potent flavor component that gives distinctive fragrances of *indica* rice cultivars, basmati and jasmine (Buttery et al., 1982). Radio-active tracing experiment suggests proline is nitrogen source for 2-AP synthesis (Yoshihashi et al., 2002).

2-AP accumulation in rice is associated to genetic inheritance. Verification of fragrant gene(s), *fgr*, responsible to aroma level using genetic mapping approaches, suggests *fgr* regions on chromosome 8 were associated with the aromatic character in rice (Ahn et al., 1992; Lorieux et al., 1996; Cordeiro et al. 2002; Jin et al, 2003). Sequencing analysis of 17 genes in the *fgr* regions from 64 nonaromatic rice and 14 aromatic rice, including Thai aromatic rice KDML105, indicated a gene encoded a betaine aldehyde dehydrogenase isoform 2 (BADH2) is the most likely to be *fgr* gene (Bradbury et al., 2005), due to its sequence divergence between fragrant and non-fragrant rice cultivars. Furthermore, the *badh2* alleles from fragrant rice cultivars all have common insertions/deletions and single nucleotide polymorphisms (SNPs) compared with those from non-fragrant genotypes, an 8-bp deletion and 3 SNPs in its exon 7. Recently, Chen et al. (2008) reported that the *Badh2* of Chinese aromatic rice cv. Wuxiangjing and SuYuNuo have also 8-bp deletion and 3 SNPs at exon 7 and not found in nonaromatic rice cv. Nanjing11.

Gene structure of *Badh2* contains 15 exons and 14 introns. The *Badh2* in aromatic rice has an 8-bp deletion and 3 SNPs in exon 7 (Bradbury et al., 2005). The *Badh2* gene product, BADH2, it is suggested to be responsible to 4-aminobutyraldehyde (AB-ald) conversion to 4-aminobutyric acid (GABA). The 8-bp deletion and 3 SNPs at exon 7 of *Badh2* gene in aromatic rice resulted in truncated BADH2 of 251 residues and loss of its function, which is suggested to be associated with 2-AP accumulation in aromatic rice, although indirectly by switching the AB-ald accumulation to 2-AP via nonenzymatic pathway (Vanavichit et al., unpublished data; Chen et al., 2008). Therefore, mutation at exon 7 of *Badh2* in aromatic rice related to 2AP accumulation. Apart from BADH2, another homologous protein, BADH1, where *Badh1* gene is located at chromosome 4, and rather involved in conversion of betaine aldehyde to glycine betaine that protects rice to salt stress (Nakamura et al., 1997). Based on genetic mapping experiments, it is predicted that the BADH1 will show a low affinity for AB-ald but high affinities for other aldehyde substrates, therefore, *Badh2* gene clearly effect on nonaromatic trait and the loss of 2-AP accumulation.

2-AP accumulation is also associated to expression of *Badh2* gene at transcriptional level. Suppression of *Badh2* transcript, namely *Os2AP* transcript by RNAi in a nonaromatic *japonica* rice callus (*O. sativa japonica* cv. Nipponbare) increases 2-AP level (Vanavichit et al., 2006). By contrast, reduction of 2-AP level is detected in a transgenic aromatic rice line when it was transformed with functional *Badh2* gene (Chen et al., 2008). This finding fully supports genetic mapping evidence to indicate role of BADH2 in 2-AP accumulation in rice. In addition, *Badh2* transcripts are found in all

tissues tested except for roots, in which correspond to accumulation of 2-AP in rice tissues as reported by Buttery et al. (1983). Moreover, the transcripts are abundant in young and healthy leaves (Chen et al. 2008). Levels of partial *Badh2* transcripts of aromatic Thai rice cv. KDML105 and its mutants of different aroma levels (Patwibool et al., 2001) also corresponds to sensory-tested aroma levels of the rice when analyzed by RT-PCR, which the lower aroma level, the higher transcript level (Srivong et al., 2006 and 2007). The *Badh2* expression at translation level using Western blot analysis has recently been reported that the BADH2 protein was not detectable in Chinese aromatic rice, cv. Wuxiangjing, but nonaromatic rice, cv. Nanjing11 (Chen et al., 2008). However, none of rice extract has been assayed for the BADH2 activity earlier.

Two aromatic cultivars widely grown in the Northeast of Thailand are KDML105 and Kor Khor 6 (RD6), which are nonsticky and sticky rice, respectively. This also includes two nonaromatic and sticky rice cultivars, Niew-San-Pah-Tawng (NST) and Sew-Mae-Jan (SMJ), which are domestic cultivars and favored by North and Northeast people. Only KDML105 has been characterized for the *Badh2* gene sequence (Bradbury et al., 2005), although its nucleotide sequence is not found in rice databases. In addition, to indirectly determine the loss of BADH2 function in aromatic rice, it was of interest to assay BADH activity in rice extracts of aromatic and nonaromatic rice using BADH2 specific substrate, AB-ald.

In present study, we report partial *Badh2* sequences of seed genomic DNA of KDML105, RD6, NST and SMJ. Comparison of the sequences was made and able to indicate differences between aromatic and nonaromatic Thai rice cultivars, which was focused within exon 7 and their partial deduced amino acid sequences. Moreover, partially purified young leaves BADH from those cultivars were assayed for enzymatic activity using AB-ald as substrate and also showed different kinetic characteristics.

## Materials and Methods

### Plant materials

Four cultivars of Thai rice (*Oryza sativa* L. *indica*) seeds; of which Khao Dawk Mali 105 (KDML105) and Kor Khor 6 (RD6) are fragrant rice while Niew-San-Pah-Tawng (NST) and Sew-Mae-Jan (SMJ) are non fragrance, were kindly provided by Germplasm Center of Bureau of Rice Research and Development, Ministry of Agriculture, Khon Kaen, Thailand. Rice seeds were soaked in distilled water overnight before germinated in water chambers under ambient conditions. Fourteen-day-old seedlings were collected to partially purified BADH for BADH activity assay.

### Seed genomic DNA extraction

Seed genomic DNA extraction was modified from Tai and Tanskey (1990) in order to remove starch prior to the DNA extraction. In detail, 15 rice seeds of each cultivar were soaked in 600 µl of extraction buffer [10 mM Tris-HCl, 50 mM EDTA, 500 mM NaCl, 12% (w/v) SDS, 8.3 mM NaOH, 0.38% $NaHSO_3$, pH 8.0] for 12 hr and ground in mortar and pestle at room temperature before transferred into 1.5-ml microtubes. The homogenates were heated at 55°C for 10 min, with which carefully avoid gelatinization, before added 220 µl of 5M $CH_3COOK$ and left on ice for 30

min, centrifuged at 12,000 rpm for 3 min. Supernatants were transferred to new tubes and added 400 µl of isopropanol, centrifuged at 12,000 rpm for 3 min to collect pellets and washed by 70% ethanol. Air-dried pellets were dissolved in 300 µl of T5E buffer containing 50 mM Tris-HCl, pH 8.0, and 10 mM EDTA, vortexed and centrifuged at 12,000 rpm for 3 min. Then, 150 µl of 7.4 M $CH_3COONH_4$ was added, mixed well before centrifuged at 12,000 rpm for 3 min. Supernatants were transferred to new tubes and added 330 µl isopropanol, centrifuged at 12,000 rpm for 3 min. Pellets were washed by 70% ethanol, dried and dissolved in 100 µl of T5E, heated at 65°C for 5 min and vortexed. 3M $CH_3COOK$ (10(l) and 75 µl of isopropanol were subsequently added and mixed gently. Pellets were collected after centrifuged at 12,000 rpm for 3 min and washed with 70% ethanol and finally dissolved pellet in TE buffer containing 10 mM Tris-HCl, pH 8.0, and 1 mM EDTA. To remove contaminated RNA, each isolated genomic DNA was digested with 2 µl of 5mg/ml RNaseA at 37°C for 2 hr.

**Primer design**

The primers were designed on the basis of sequence differences of the *Badh1* and *Badh2* gene that flank 8-bp deletion and 3 SNPs in exon 7 in order to generate specific primers for *indica* rice *Badh2* gene. Sequence comparison of highly homolog genes, Badh1 gene on chromosome 4 (GenBank, AB001348), and *Badh2* gene on chromosome 8 (GenBank, AP005537) of *japonica* rice (*Oryza sativa japonica* cultivar Nipponbare) was made using ClustalW (1.83) program. Differences detected within exon 6 and exon 9 were used to design a forward primer (BADH2_F, 5'-GCTGATGTGTGTAAAGAGG-3') and a reverse primer (BADH2_R, 5'-CAAATCTGGCCATTGGTCC-3'), respectively (Fig. 1). The PCR product contains a partial *Badh2* gene of approximate 1,250 bp. All primers were synthesized by Pacific science. CO., LTD (Thailand).

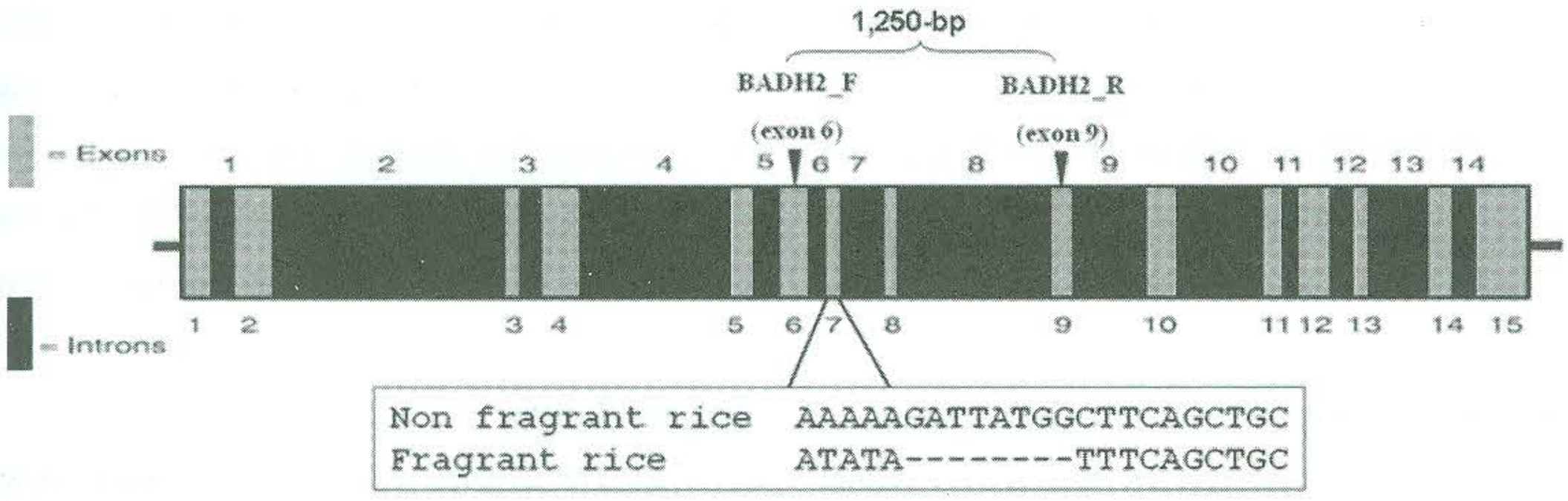



**Fig. 1** Schematic representation shown position of primers on *Badh2* gene of rice and 8-bp deletion region modified from Bradbury et al. (2005).

**PCR amplification and sequencing**

PCR reactions using each genomic DNA as templates were carried out to amplify partial *Badh2* sequences using primers, BADH2_F and BADH2_R (Fig. 1). In detail, a total of 50 µl PCR reaction mixture was composed of 1x *Taq* buffer (200 mM Tris-HCl (pH 8.4), 500 mM KCl, 15 mM $MgCl_2$), 0.2 mM dNTP mix, 1.5 mM $MgCl_2$, 0.1 µM of each primer, 1.25 U/ 50 (l of Taq DNA polymerase (Fermentas, U.S.A), and 40 ng of template DNA. PCR amplification was carried out in a the Gradient Palm Cycler PCR machine (Corbett Research, Australia) programmed for pre-denaturalization of 3 min at 95°C and 35 cycles of 30 s at 95°C, 30 s at 55°C, and 2 min at 72°C, followed by one cycle of 5 min at 72°C. The partial *Badh2* gene, PCR products, were analyzed by 1% agarose gel electrophoresis using 100 bp DNA ladder Plus (Fermentas, U.S.A) and visualized by Electrophoresis Gel Photodocumentation System (Vilber Lourmat, Japan). The PCR products were analyzed for nucleotide sequences in both directions using BADH2_F and BADH2_R primers. Sequencing was conducted at the Department of Biochemistry, Faculty of Medicine, Khon Kaen University, Thailand by using the ALF express automatic DNA sequencer (Pharmacia Biotech, Sweden). Sequence analysis was performed using the BioEdit 7.0.4.1 (http://www.mbio.ncsu.edu/BioEdit).

**Preparation of partially purified leaf BADH**

Seeds were grown under the same conditions in water chambers. The young leaves of 14-day-old were harvested and subjected to partial purification of BADH using 55-70% ammonium sulfate fractionation according to Trossat et al. (1997). All following steps were carried out on ice. The young leaves tissue (5.0 g) was ground in a cold mortar and pestle and added 15 ml of buffer containing 50 mM Hepes-KOH, pH 8.0, 1 mM EDTA, 20 mM sodium metabisulfite, 10 mM sodium borate, 5 mM sodium ascorbate, and 5 mM DTT. After centrifugation at 10,000 rpm for 10 min, the supernatant was precipitated with 55-70% ammonium sulfate and dissolved in 1 ml of 50 mM Hepes-KOH, pH 8.0, containing 5 mM DTT and 1 mM EDTA, and dialyzed against 10 mM Tris-HC1, pH 7.8, containing 1 mM DTT and 10% glycerol. Protein was quantitated according to Bradford (1976) using BSA as a standard.

**Preparation of 4-aminobutyraldehyde**

Preparation of 4-aminobutyraldehyde (AB-ald) was carried out according to Trossat et al. (1997). An aliquot (10 (l about 50 (mol) of diethylacetal of AB-ald (Fluka, Germany) was hydrolyzed with approximately 0.60 ml of 1 M HCl heated at 70°C for 1 hr. The hydrolyzate was stored on ice and used within 4 hr. The AB-ald product was analyzed by TLC using silica gel as stationary phase and methanol:acetone:concentrated HC1 (90:10:4, v/v) as mobile phase and detected with 4% ninhydrin in alcohol. The hydrolyzate was neutralized by KOH just before the assay. The final concentration of the prepared AB-ald was 37 mM.

**Enzyme Assays**

The BADH enzyme activity was determined using the reaction mixture (1 ml) containing 50 mM Hepes-KOH, pH 8.0, 10 mM DTT, AB-ald substrate. The reactions were started by adding 1.5 mM $NAD^+$. Blank was set in the absence of $NAD^+$.

Each freshly prepared partially purified BADH (10 μg) was examined for BADH activity against a series of AB-ald substrate concentration (1.85 - 3.33 (M). Increase of NADH was measured by A340 within 10 min. Conversion of $A_{340}$ to NADH concentration was performed by NADH extinction coefficient of 6220 $M^{-1}.cm^{-1}$. $K_m$ and $V_{max}$ were determined using Line-Weaver Burk's Plot of $1/V_0$ against 1/[S].

## Results and Discussion

### Partial *Badh2* gene sequence of Thai rice cultivars

Genomic DNA of Thai rice (Oryza sativa indica) was extracted from rice seeds cultivars KDML105, RD6, SMJ and NST. PCR reactions using each genomic DNA as templates were carried out to amplify partial *Badh2* sequences using PCR primers as described in materials and methods. The approximate 1,250-bp PCR products were detected in all 4 cultivars (Fig. 2).

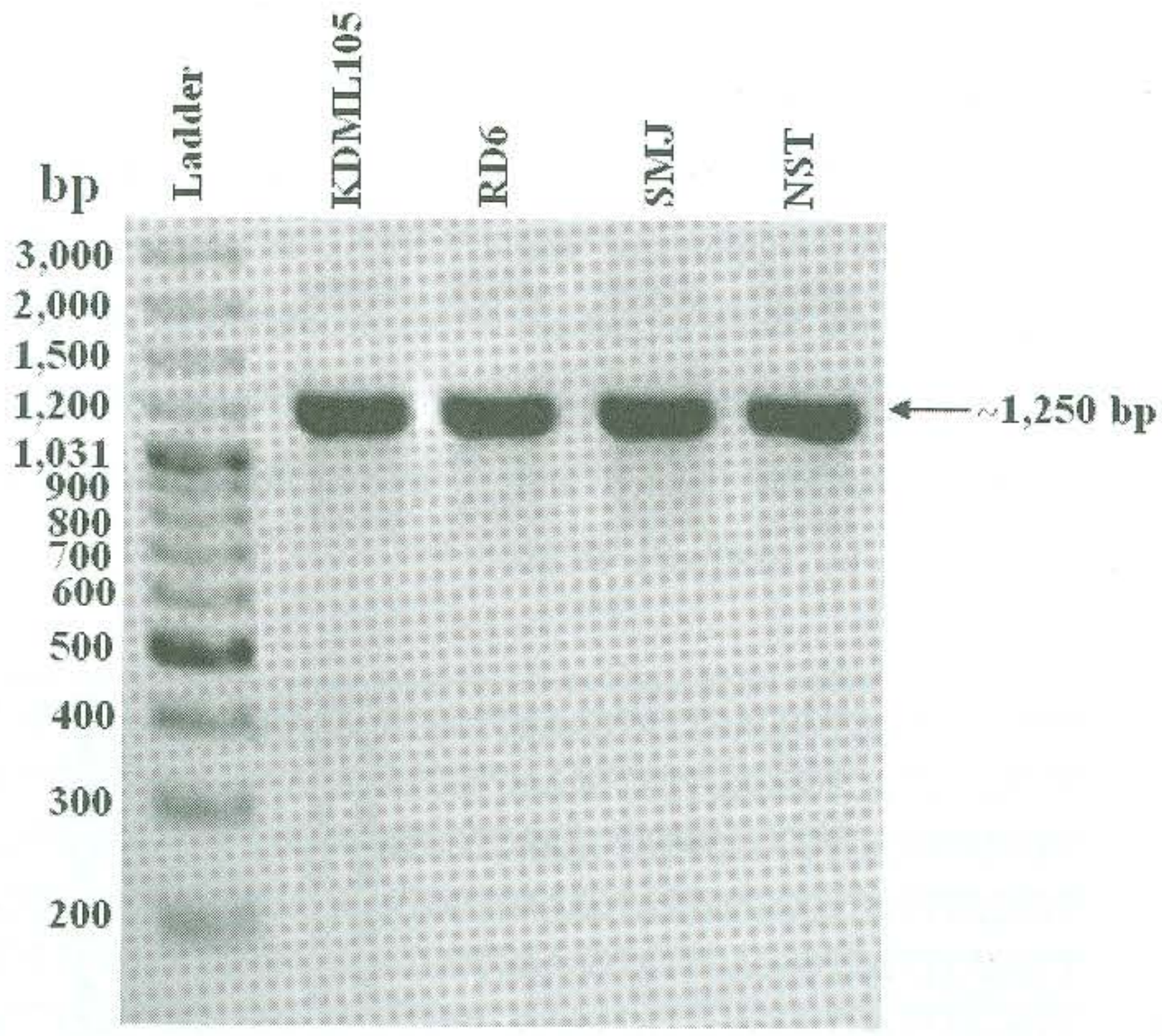



**Fig. 2** Agarose gel electrophoresis of partial *Badh2* gene fragments amplified by PCR. Genomic DNA from 4 Thai rice cultivars were used as templates. Aromatic rice; Khao Dawk Mali 105 (KDML105) and Kor Khor 6 (RD6) and nonaromatic rice; Sew-mae-jan (SMJ) and Niaw san-pah-tawng (NST). Sizes of the PCR fragments were compared with 100 bp DNA ladder plus (Fermentas, U.S.A).

Nucleotide sequences of the PCR products were analyzed and aligned to partial *Badh1* and *Badh2* genes from japonica rice cv. Nipponbare and partial *Badh2* from indica rice cv. Nanjing11 as shown in Table 1. The partial *Badh2* sequences of Thai rice showed 99% identity to partial *Badh2* gene of japonica rice and 25% identity to partial Badh1 gene. When compared to the *Badh2* sequences of indica rice, *Badh2* of KDML105, RD6 and SMJ shared 99% identity, except for NST was 100% identity.

**Table 1** Nucleotide sequence identities of partial *Badh2* genes of 4 Thai rice cultivars to partial *Badh2* and *Badh1* genes from japonica rice (Nipponbare) and partial *Badh2* of indica rice (Nanjing 11).

| **Partial *Badh2* gene** | **Length (bp)** | **Identity (%)** | | |
|---|---|---|---|---|
| | | ***Japonica* cv. Nipponbare** | | ***Indica* cv. Nanjing11** |
| | | ***Badh2* (2876..3996)** | ***Badh1* (2302..3451)** | ***Badh2* (2716..3837)** |
| KDML105 | 1,113 | 99 | 25 | 99 |
| RD6 | 1,115 | 99 | 25 | 99 |
| SMJ | 1,121 | 99 | 25 | 99 |
| NST | 1,121 | 99 | 25 | 100 |

When focused within 68-bp of exon 7, the nucleotide sequences of SMJ and NST shared 100% identity to that of *japonica* cv. Nipponbare and *indica* cv. Nanjing11. However, the 68-bp sequences of KDML105 and RD6 showed sequence characteristic of aromatic rice that 8-bp was deleted and possessed 3 SNPs as reported by Bradbury et al. (2005). This mutation also similar to *Badh2* exon 7 sequence of japonica cv. SuYuNuo (Chen et al., 2008), as shown in Fig. 3. The mutation in this exon introduces an early stop codon (TAA), which is resulted in truncated BADH2 protein and loss its function (Bradbury et al., 2005).

```
KDML105      TTGCATTTACTGGGAGTTATGAAACTGGTATATA--------TTTCAGCTGCTCCTATGGTTAAGG
RD6          TTGCATTTACTGGGAGTTATGAAACTGGTATATA--------TTTCAGCTGCTCCTATGGTTAAGG
SuYuNuo      TTGCATTTACTGGGAGTTATGAAACTGGTATATA--------TTTCAGCTGCTCCTATGGTTAAGC
SMJ          TTGCATTTACTGGGAGTTATGAAACTGGTAAAAGATTATGGCTTCAGCTGCTCCTATGGTTAAGG
NST          TTGCATTTACTGGGAGTTATGAAACTGGTAAAAGATTATGGCTTCAGCTGCTCCTATGGTTAAGG
Nipponbare   TTGCATTTACTGGGAGTTATGAAACTGGTAAAAGATTATGGCTTCAGCTGCTCCTATGGTTAAGG
Nanjing11    TTGCATTTACTGGGAGTTATGAAACTGGTAAAAGATTATGGCTTCAGCTGCTCCTATGGTTAAGG
             ********************************* * *        ************************
```

**Fig. 3** Nucleotide sequence comparison of *Badh2* gene of aromatic and non-aromatic rice. Comparison is focused on *Badh2* gene within exon 7 of aromatic rice of KDML105 and RD6 and non-aromatic rice of SMJ and NST to that of *japonica* rice cv. SuYuNuo (GenBank, EU770323), Nipponbare (GenBank, AP005537) and *indica* rice cv. Nanjing11 (GenBank, EU770322). The aromatic variety shows 8-bp deletion, indicated by dash and shaded background, and 3 single nucleotide polymorphisms (SNPs) (dark columns). Underlined letters indicate stop codon (TAA).

Fig. 4 shows comparison of deduced amino acid sequences of partial *Badh2* genes of SMJ and NST that the deduced amino acids, in range of 220-277, were similar to the partial BADH2 protein of nonaromatic Nipponbare BADH2 (Chen et al., 2008), whereas the deduced amino acids of KDML105 and RD6 were similar to the partial BADH2 protein of aromatic SuYuNuo BADH2 (Chen et al., 2008). It is noted that Pro-224 of RD6 was replaced by His.

```
KDML105                EAGAPLSSHPGVDKVAFTGSYETGIYFSCSYG*-----------------------
RD6                    EAGAHLSSHPGVDKVAFTGSYETGIYFSCSYG*-----------------------
SuYuNuo BADH2          EAGAPLSSHPGVDKVAFTGSYETGIYFSCSYG*-----------------------
SMJ                    EAGAPLSSHPGVDKVAFTGSYETGKKIMASAAPMVKAVSLELGGKSPIVVFDDVDVEK
NST                    EAGAPLSSHPGVDKVAFTGSYETGKKIMASAAPMVKAVSLELGGKSPIVVFDDVDVEK
Nipponbare BADH2  220 EAGAPLSSHPGVDKVAFTGSYETGKKIMASAAPMVKAVSLELGGKSPIVVFDDVDVEK 277
Clustal Consensus      **** ********************  : .* .  ....  :   **    :..* :
                                                                E-260 in substrate binding pocket
```

**Fig. 4** Comparison of partial deduced amino acid sequences of partial *Badh2* genes of SMJ and NST that the deduced amino acids, in range of 220-277, were similar to the partial BADH2 protein of nonaromatic Nipponbare BADH2 (Chen et al., 2008), whereas the deduced amino acids of KDML105 and RD6 were similar to the partial BADH2 protein of aromatic SuYuNuo BADH2 (Chen et al., 2008). It is noted that Pro-224 of RD6 was replaced by His.

This might suggest that the truncated BADH2 proteins of Thai aromatic rice, KDML105 and RD6, had 251 amino acid residues and lacked of several substrate binding sites, which three dimensional structure analyses annotates active sites of BADH2 at Asn-162 and Cys-294 as catalytic residues to interact with substrate oxygen and Tyr-163, Leu-166, Trp-170, Glu-260, Cys-453 and Trp-459 belong to substrate binding pocket (Chen et al., 2008). This can be implied that the truncated BADH2 could not fully function. KDML105 and RD6, therefore, were predicted to lack of BADH2 activity since they would loss their substrate binding capacity. On the other hand, partial BADH2 of nonaromatic SMJ and NST showed 100% similarity to Nipponbare BADH2 and predicted to function appropriately. To prove this, partially purified rice BADH was determined to verify the activity of BADH in those rice cultivars.

**Determination of partially purified rice BADH**

In order to prove function of BADH2 of aromatic (KDML105 and RD6) and nonaromatic rice (SMJ and NST), we indirectly examined enzymatic activity of rice BADH in this study. Seeds were grown under same conditions, light, water and temperature during the same time in water chambers. This was to avoid differences of environmental factors, which might affect BADH activity of each cultivar. Based on plant BADH preparation and activity assay of Trossat et al. (1997), young leaves of 14-day-old were harvested and

partially purified BADH as described in materials and methods. Freshly prepared AB-ald was used as substrate. Principally, AB-ald is reduced to GABA (4-aminobutyric acid) by $NAD^+$ (nicotinamide adenine dinucleotide), which catalyzed by BADH. The activity was observed by increase of NADH at $A_{340}$. Although the BADH is a member of $NAD^+$-binding protein family, which many of $NAD^+$-binding proteins exist in rice databases as well as aldehyde dehydrogenases; however, those proteins require substrate selectivity. To identify the BADH2 substrate selectivity, Chen et al. (2008) have compared the bacterial recombinant rice BADH2 activity among 3 substrates; AB-ald, 3-aminopropionaldehyde (AP-ald) and betaine aldehyde and found that AB-ald gave best activity. Therefore, loss function of BADH2 in aromatic rice would direct to 2AP synthesis via nonenzymatic conversion of AB-ald to (-1-pyrroline, 2AP substrate (Vanavichit et al., unpublished data). In addition, isoforms of BADH exist in rice, at least BADH1 and BADH2, as mentioned earlier. The BADH1 seems to select betaine aldehyde as its substrate (Nakamura et al., 1997), rather than AB-ald. Therefore, the AB-ald was selected for BADH activity assay in this study.

Preliminary tested for the enzyme activity using crude leaf extracts gave no change of $A_{340}$ when observed for 10 min. Partial purification of BADH was then performed using ammonium sulfate precipitation. Although neither purification fold was calculated nor purity was checked by SDS-PAGE, equal amount of protein (10 μg) from equal starting leaf materials was used for the assay and able to detect increase of $A_{340}$ in the presence of AB-ald substrate ranged 1.85-3.33. No activity was detected in the presence of 1 mM bataine-aldehyde substrate. This suggested that the partially purified fractions preferred AB-ald rather than betaine aldehyde. In addition, no change of A340 in the absence of AB-ald but presence of $NAD^+$, suggesting there was no detectable activity of other $NAD^+$-binding proteins or other dehydrogenases such as aldehyde or alcohol dehydrogenases in the partially purified fractions. Moreover, the activity was not detectable in the absence of $NAD^+$, suggested that indigenous $NAD^+$ in the partially purified fraction was not enough to drive any $NAD^+$-binding protein reactions. Therefore, it was able to say that detectable activity was performed by AB-ald dehydrogenase, which was likely to be BADH2 in the fractions. Nevertheless, these reactions were not able to distinguish the BADH activities of aromatic rice from nonaromatic rice by means of.$A_{340}$/min. Since partially purified BADH followed Michaelis-Menten characteristic, which was gradually increased initial velocity ($A_{340}$/min, $v_0$) of NADH production upon increase of AB-ald, enzyme kinetics were then determined in order to see how the enzyme bound to substrate by mean of Michaelis-Menten constant ($K_m$) and how fast of reaction was occurred by mean of maximum velocity ($V_{max}$) as well as catalytic efficiency ($V_{max}$/ $K_m$) using Lineweaver-Burk plot (Fig. 5) to determine those kinetic parameters (Table 2). The nonaromatic rice, SMJ, showed higher affinity (lower Km) than that from aromatic rice, KDML105 and RD6, except for NST. However, maximal reaction velocities ($V_{max}$) of the BADH from both nonaromatic cultivars were higher. To determine catalytic efficiency of AB-ald enzymatic conversion, $V_{max}/K_m$ suggested catalytic efficiency of both

nonaromatic rice BADH were higher than that of the aromatic rice. This kinetic analysis suggested that lower BADH activity in aromatic rice might relate to loss of BADH2 function in aromatic rice.

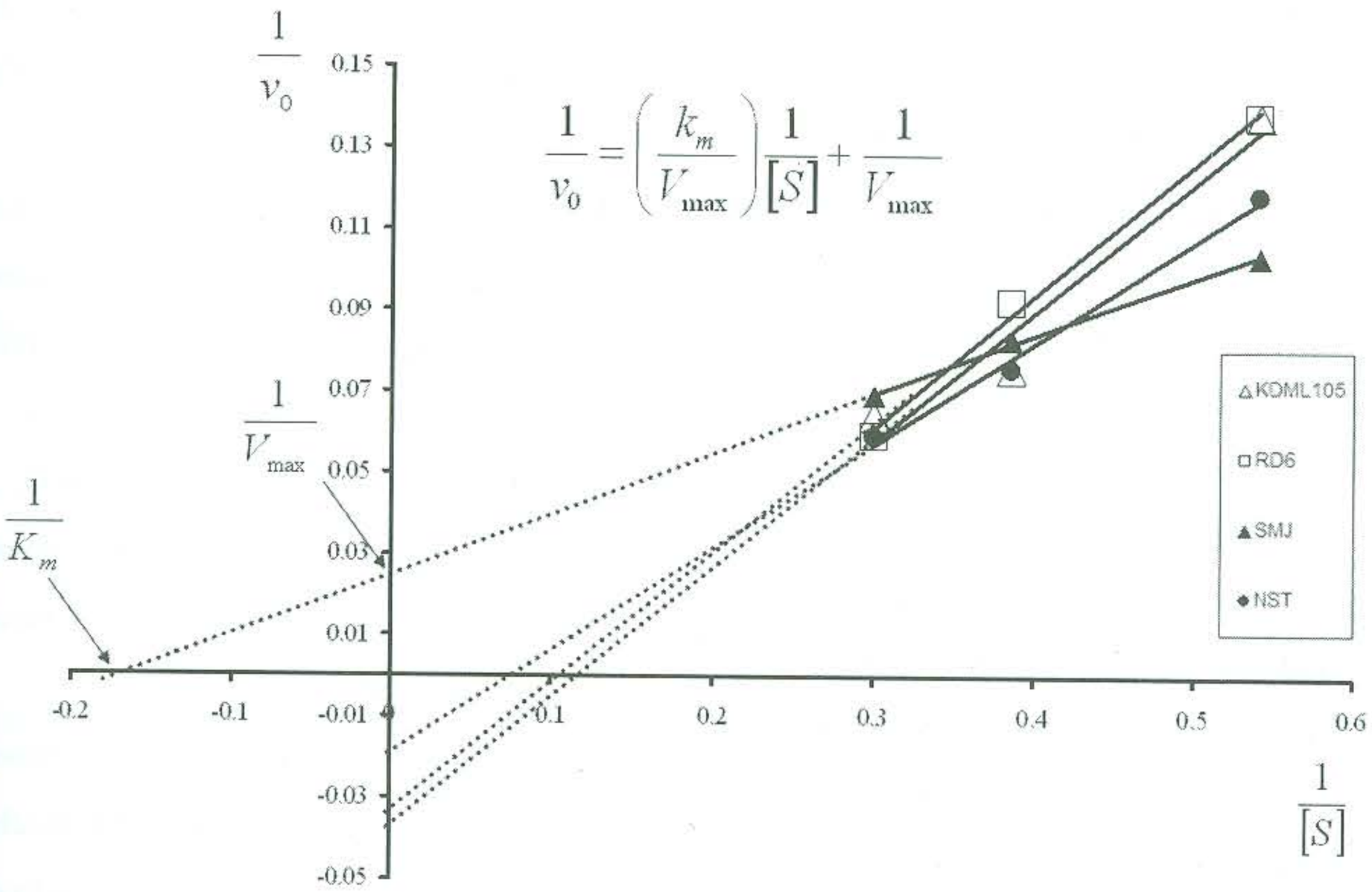



**Fig. 5** Lineweaver-Burk plot of $\frac{1}{v_0}$ against $\frac{1}{[S]}$ of BADH of partial purified (10 μg) from aromatic rice; KDML105 (Δ) and RD6 (□), and non-aromatic rice; SMJ (▲) and NST (●).$K_m$ and $V_{max}$ were determine by extrapolated lines lines to x axis and y axis, respectively.

**Table 2** Michaelis constants ($K_m$) and maximal reaction velocity ($V_{max}$) for the oxidation reaction of AB-ald by $NAD^+$ catalyzed by partial purified BADH from leaves of aromatic rice (KDML105 and RD6) and nonaromatic rice (SMJ and NST).

| **Partially purified BADH** | $K_m$ (nM) | $V_{max}$ (nmol $min^{-1}$ mg $protein^{-1}$) | $V_{max}/K_m$ |
|---|---|---|---|
| KDML105 | 8.24±0.97 | 25.64±4.55 | 3.11 |
| RD6 | 8.93±2.56 | 27.47±6.78 | 3.08 |
| SMJ | 5.31±0.70 | 37.18±3.56 | 7.01 |
| NST | 13.83±1.95 | 55.25±10.58 | 3.99 |

## Conclusions

Part of *Badh2* genes of 4 Thai rice cultivars were amplified by PCR. Nucleotide sequences of the partial *Badh2* genes were analyzed. The partial sequence of *Badh2* genes of either aromatic or nonaromatic rice cultivars shared 99-100% identity to that of *indica* rice cv. Nanjing11 while 99% identity was seen when compared to *Badh2* gene of *japonica* rice cv. Nipponbare. Focusing on 68-bp in the exon 7 of *Badh2* gene, the 2 nonaromatic rice cultivars SMJ and NST showed 100% identity to that of nonaromatic *japonica* rice cv. Nipponbare and *indica* rice cv. Nanjing11. But in aromatic rice cultivars, KDML105 and RD6 showed a deletion of 8-bp and 3 SNPs, similar to *Badh2* genes of other aromatic rice, including SuYuNuo, Chinese aromatic rice. Mutation at exon 7 of aromatic rice would lead to production of truncated BADH2 and loss of its activity. Kinetic parameters of partially purified leaf BADH showed that BADH catalytic activities of nonaromatic rice SMJ and NST were higher than those of aromatic rice in the presence of selective substrate of BADH2, AB-ald. The kinetic analysis supported loss of BADH2 function in aromatic rice and this could relate to the accumulation of rice aroma, 2-AP.

## References

Ahn, S.N., Bollich, C.N., Tanksley, S.D. (1992). RFLP tagging of a gene for aroma in rice. Theoretical and Applied Genetics 84: 825-828.

Bradbury, L.M.T., Fitzgerald, T.L., Henry, R.J., Jin, Q., Waters, D.L.E. (2005). The gene for fragrance in rice. Plant Biotechnology Journal 3: 363-370.

Bradford M.M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quanlities of protein utilizing the principal of protein-dry binding. Analytical Biochemistry 1976; 72: 248-254.

Buttery, R.G., Juliano, B.O., Ling, L.C. (1983). Identification of rice aroma compound 2-acetyl-1-pyrroline in pandan leaves. Chemical Industries (London) 20: 478.

Buttery, R.G., Ling, L.C., Juliano, (1982). B.O. 2-Acetyl-1-pyrroline: an important aroma component of cooked rice. Chemical Industries (London) 19: 958.

Chen, S., Yang, Y., Shi, W., Ji, Q., He, F., Zhang, Z., Cheng, Z., Liu, X., Xua, M. Badh2, (2008). encoding betaine aldehyde dehydrogenase, inhibits the biosynthesis of 2-acetyl-1-pyrroline, a major component in rice fragrance. Plant Cell.

Cordeiro, G.M., Christopher, M.J., Henry, R.J., Reinke, R.F., (2002). Identification of microsatellite markers for fragrance in rice by analysis of the rice genome sequence, Molecular Breeding 9: 245-250.

Jin, Q.S., Waters, D., Cordeiro, G.M., Henry, R.J., Reinke, (2003). R.F. A single nucleotide polymorphism (SNP) marker linked to the fragrance gene in rice (*Oryza sativa* L.). Plant Science 165: 359-364.

Lorieux, M., Petrov, M., Huang, N., Guiderdoni, E., Ghesquie re, (1996). A. Aroma in rice: genetic analysis of a quantitative trait. Theoretical and Applied Genetics 93: 1145-1151.

Nakamura, T., Yokota, S., Muramoto, Y., Tsutsui, K., Oguri, Y., Fukui, K. Yakabe, T. (1997). Expression of a betaine aldehyde dehydrogenase gene in rice, a glycinebetaine nonaccumulator, and possible localization of its protein in peroxisomes. Plant Journal 11: 1115-1120.

Patwibool, W., Wittayatherarut, P., Khondaungkhaw, A. (2001). Crop improvement of Khao Dawk Mali 105 rice by fast neutron irradiation. Paper presented at conference on Nuclear Science and Technology Bangkok, Thailand. [in Thai]

Srivong, P., Waihalong, P., Pongdontri, P. and Wangsomnuk, P. (2006). Comparison of partial BADH2 transcripts of Khao Dok Mali 105 and its mutants of different aroma levels. Poster abstract P202 in Joint third AOHUPO and forth structural biology and functional genomics conference, December 4-7, 2006, University cultural centre, National University of Singapore, Singapore, p 294.

Srivong, P., Waisalong, P., Wangsomnuk, P., Pongdontri, P. (2007). Comparison of aroma level of Khao Dok Mali 105 and its mutants by expression level of partial BADH2 gene. Poster Presentation in 1st BMB conference: Biochemistry and molecular biology for the integration of life, April 26-27, 2007, Bangkok, Thailand p.48.

Tai, Q. and Tanksley, C. (1990). A rapid and inexpensive method for isolation of total DNA from dehydrated plant. Plant Molecular Biology Reporter 8:297-303.

Trossat, C., Rathinasabapathi, B., Hanson A.D. (1997). Transgenically expressed betaine aldehyde dehydrogenase efficiently catalyzes oxidation of dimethylsulfonio-propionaldehyde and ω-aminoaldehydes. Plant Physiology 113: 1457-1461.

Vanavichit, A., Yoshihashi, T., Wantana, S., Areekit, S., Kamonsukyuenyang, W., Tujinda, T., Trakulrung, S. Deciphering genes encoded rice aroma. [unpublished]. In Thai.

Vanavichit, A., Yoshihashi, T., Wanchana, S., Areekit, S., Saengsraku, D., Kamolsukyunyong, W., Lanceras, J., Toojinda, T., Tragoonrung, S. (2006). Positional cloning of *Os2AP*, the aromatic gene controlling the biosynthetic switch of 2- acetyl-1-pyrroline and gamma aminobutyric acid (GABA) in rice (abstract). In: 5th Int Rice Genet Symp. Manila, Philippines.

Yajima, I., Yanai, T., Nakamura, M., Sakakibara, H., Hayashi, K. (1978). Volatile Flavor Components of Cooked Kaorimai (Scented Rice, *O. sativa japonica*). Agricultural Biology and Chemistry 43: 2425-2429.

Yoshihashi, T., Nguyen, T.T.H., Inatomi, H. (2002). Precursors of 2-acetyl-1-pyrroline, a potent flavor compound of an aromatic rice variety. Journal of Agricultural Food Chemistry 67:619-622.

❑❑❑❑❑

ว.วิทย. มข. 36(4) 302-311 (2551) KKU Sci. J.36(4) 302-311 (2008)

# การอนุรักษ์และใช้ประโยชน์ทรัพยากรป่าชุมชนบ้านโคกประดู่ ตำบลมหาโพธิ อำเภอสระโบสถ์ จังหวัดลพบุรี

# Conservation and Utilization of Community Forest Resource of Ban Kok Pra Doo, Maha Pho Sub-district, Sa Bot District, Lop Buri Province

*ธเนศ แตงสาตร์[1], ยรรยงค์ อินทร์ม่วง[1*], มณีรัตน์ องค์วรรณดี[2]*

**บทคัดย่อ**

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์บทบาท จุดอ่อน จุดแข็ง โอกาส และอุปสรรค ของชุมชนหมู่บ้านโคกประดู่ในการบริหารจัดการป่าชุมชน ประเมินสถานภาพทรัพยากรชีวภาพของป่าชุมชน และการใช้ประโยชน์ผลิตผลป่าไม้ของชุมชน ดำเนินการศึกษาระหว่าเดือนพฤศจิกายน 2549 - มีนาคม 2550 การเก็บข้อมูลโดยการสำรวจ จดบันทึก สังเกต ทรัพยากรชีวภาพภาคสนาม การสัมภาษณ์ และการสนทนากลุ่มผู้นำชุมชนหมู่บ้านโคกประดู่ อำเภอสระโบสถ์ จังหวัดลพบุรี ผลการวิจัยพบว่าระบบนิเวศเดิมของป่าชุมชนบ้านโคกประดู่มีความสมบูรณ์มีทรัพยากรสัตว์ป่าและพันธุ์พืชหลากหลาย ผลกระทบจากนโยบายการเปิดสัมปทานป่าไม้เมื่อ 30 ปีต่อมาทำให้ระบบนิเวศป่าชุมชนเสื่อมโทรมเกิดผลกระทบต่อวิถีชีวิตชุมชนท้องถิ่นอย่างรุนแรง ปัจจุบันชุมชนได้ร่วมกันฟื้นฟูป่าชุมชนโดยการแบ่งพื้นที่อนุรักษ์ พื้นที่ใช้ประโยชน์ และพื้นทีเสื่อมโทรม มีการออกกฎระเบียบการใช้ประโยชน์ป่าชุมชน และจัดกิจกรรมการอนุรักษ์ทรัพยากรชีวภาพอย่างหลากหลายและต่อเนื่อง สภาพป่าได้เริ่มฟื้นสภาพทำให้พันธุ์พืชและสัตว์ที่หายากในท้องถิ่นเริ่มกลับมาและขยายพันธุ์มากขึ้น สามารถเป็นแหล่งอาหารของชุมชน ปัจจุบันพบชนิดพันธุ์พืช 30 ชนิด และสัตว์ 10 ชนิด แนวทางการบริหารจัดการการอนุรักษ์และการใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืนของป่าชุมชนแห่งนี้นับเป็นตัวอย่างที่ดีแห่งหนึ่งที่สนองแนวพระราชดำริของสมเด็จพระบรมราชินีนาถที่ทรงตรัสว่า “คนอยู่ร่วมกับป่า”

**คำสำคัญ :** การจัดการป่าชุมชน ทรัพยากรชีวภาพป่าชุมชน การใช้ประโยชน์ทรัพยากรป่าไม้

[1] คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต.ตลาด อ.เมือง จ.มหาสารคาม 44000

[2] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต.ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

[*] correspondening author, E-mail: arm_t03@hotmail.com

## Abstract

This research aims to analyze roles, weaknesses, strength, opportunities and threats of Ban Kok Pra Doo community for local forest administration and management, assess community forest biological resource status and utilization of forest products by the community. The study prriod was done during November 2006 - March 2007. Field data collection was conducted by surveying biological resources, interviewing household representatives and organizing focus-group interview of Ban Kok Pra Doo community leaders, Sa Bot District, Lopburi Province. The research results illustrate that historically the ecosystem of Ban Kok Pra Doo community forest was very healthy with diverse wild plant and animal species. The logging concession permitted 30 years ago severely affectied community forest ecosystems while further adversely impacting local community well-being. At present, the community has initiated active forest rehabilitation activities by zoning forestlands as strictly reserve, utilization under controlled condition and rehabilitation areas. The community established rule and regulations for forest utilization, and organizing diverse and continuous conservation activities. Rare native vegetation and wildlife were reovered and became more colonized. An origin local food. The present plant 30 species and fauna 10 species This community forest management practice on sustainable community forest conservation and utilization can be one of the best practice models, especially in support the notion of Her Majesty the Queen as said "human harmonizing with nature".


**Keywords:** 1 community forest management, community forest biological resources, forest resource utilization

## บทนำ

ป่าชุมชน (Community forest) เป็นทรัพยากรที่สำคัญสำหรับชุมชนบทของไทย โดยวิถีชีวิตของชุมชนชนบทพึ่งพาป่าชุมชนทั้งเป็นแหล่งอาหาร แหล่งไม้ใช้สอย รวมทั้งการเชื่อมโยงประเพณีวัฒนธรรม ความผูกพันจิตวิญญาณเชิงพุทธกับสภาวะแวดล้อมทางธรรมชาติโดยเฉพาะทรัพยากรป่าไม้ อย่างไรก็ตามประเทศไทยยังขาดการพัฒนาเชิงสถาบันและระบบกฎหมายที่รองรับอย่างเป็นทางการเกี่ยวกับการจัดการป่าชุมชน (Salam et al., 2006) แม้ไม่มีกฎหมายรองรับแต่กรมป่าไม้ก็ได้ผ่อนปรนให้ประชาชนมีสิทธิและใช้ประโยชน์จากป่าชุมชนได้โดยการยื่นขอจดทะเบียนเป็นป่าชุมชน โดยสนับสนุนให้ชุมชนสร้างกฎกติกาที่เหมาะสมใช้บริหารจัดการป่าชุมชน โดยป่าชุมชนส่วนใหญ่ได้ออกข้อกำหนดที่หลากหลายและมีความยืดหยุ่นเหมาะสมกับสภาพเศรษฐกิจสังคมและวิถีชีวิตของแต่ละท้องถิ่น (Sharp and Nakagoshi, 2006)

ชุมชนชนบททั่วโลกได้ใช้ประโยชน์ผลิตผลจากป่าชุมชนทั้งผลิตผลที่เป็นไม้และมิใช่ไม้ (Non-timber forest products : NTFPs) การพึ่งพิงป่าชุมชนทั้งด้านการใช้ผลิตผลเพื่อการดำรงชีวิตประจำวันและสร้างรายได้ ตลอดจนบรรเทาความยากจน Harrison and Sue (2004) ได้ทบทวนรูปแบบและแนวทางการบริหารจัดการป่าชุมชนพบว่ามีหลายรูปแบบ สำหรับป่าชุมชนในประเทศไทยมีรูปแบบแนวทางเน้นเพื่อการดำรงชีพชุมชน เพื่อเศรษฐกิจและสังคมท้องถิ่นและให้ชุมชนมีส่วนร่วมวางแผนการจัดการทรัพยากรป่าไม้ ยังมิได้เน้นการนำหลักการจัดการยุคใหม่โดยการให้ชุมชนเช่าที่ปลูกป่าเพื่อการทำป่าเศรษฐกิจเป็นป่าครัวเรือนเช่นในประเทศจีนที่ได้ริเริ่มการสร้างป่าชุมชนให้มีมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจ (Xu et al.,2004) หรือในทวีปอเมริกาเหนือโดยเฉพาะแคนาดาที่เน้นการใช้หลักการ

จัดการด้วยวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีสมัยใหม่รวมทั้งการออกใบอนุญาตการใช้ป่าชุมชนโดยชุมชนและจ้างนักวิชาการป่าไม้เฉพาะมาจัดการป่าชุมชนเพื่อประโยชน์ทางเศรษฐกิจ (Gunter and Von Der Gonna, 2004) ซึ่งในหลายพื้นที่ของประเทศไทยเริ่มมีแนวคิดในทางปฏิบัติเช่นเดียวกันโดยเฉพาะเมื่อมีแรงกดดันความต้องการด้านการใช้กระดาษที่เพิ่มมากขึ้น

ป่าชุมชนมีบทบาทสำคัญในการบรรเทาความยากจนในชุมชนชนบท โดยชุมชนได้บริโภคขายผลิตภัณฑ์จากป่าเป็นรายได้หลักและเสริมของครัวเรือน การดำรงศักยภาพการผลิตของป่า การควบคุมการใช้ประโยชน์ แนวทาง กฎระเบียบการจัดการป่าชุมชนที่ทั้งภาครัฐและชุมชนยอมรับได้ยังคงเป็นสิ่งท้าทาย โดยเฉพาะการค้นหาแนวทางการบริหารจัดการป่าชุมชนอย่างยั่งยืนบนความขัดแย้งหลักคิดการพัฒนา คือ การเพิ่มรายได้จากการขายผลิตป่าเพื่อลดความยากจนกับการสูญเสียทรัพยากรชีวภาพในป่าชุมชนที่ยากจะกลับคืนสภาพเดิมได้ (Ngwa and Fonjong, 2002)

ป่าชุมชนบ้านโคกประดู่ ตำบลมหาโพธิ อำเภอสระโบสถ์ จังหวัดลพบุรี เป็นหมู่บ้านป่าชุมชนแห่งหนึ่งของกรมป่าไม้ ซึ่งในอดีต พ.ศ. 2518 พื้นที่ป่าไม้หมู่บ้านโคกประดู่และบริเวณพื้นที่ตำบลมหาโพธิ์ได้รับผลกระทบอย่างรุนแรงจากนโยบายภาครัฐที่ให้สัมปทานเอกชนตัดไม้ ทำให้ระบบนิเวศล่มสลายทั้งพันธุ์พืชและสัตว์ป่า ความชุ่มชื้นลดลงอย่างมาก ในปี พ.ศ. 2547 ชุมชนได้ตระหนักเห็นความสำคัญของทรัพยากรป่าไม้ จึงเสนอจังหวัดลพบุรีขออนุมัติกรมป่าไม้จัดตั้งป่าชุมชน รวมทั้งการจัดทำโครงการหมู่บ้านป่าไม้แผนใหม่เฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระนางเจ้าพระบรมราชินีนาถ โดยเปลี่ยนจากแนวคิดดั้งเดิมที่ประชาชนเป็นลูกจ้างของหน่วยงานป่าไม้ของรัฐ เปลี่ยนเป็นให้ชุมชนเป็นเจ้าภาพร่วมดำเนินการอนุรักษ์ ฟื้นฟู และใช้ประโยชน์ตามแนวพระราชดำริของสมเด็จพระนางเจ้าบรมราชินีนาถ ปัจจุบันผลการดำเนินงานในหลายพื้นที่ทำให้สภาพป่าฟื้นตัวขึ้นอย่างมาก และหลายแห่งสามารถเป็นแบบอย่างที่ดีในมิติของชุมชนร่วมกันจัดการทรัพยากรป่าไม้อย่างยั่งยืน

คณะผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาป่าชุมชนบ้านโคกประดู่แห่งนี้ เพื่อเป็นการถอดบทเรียนด้านบทบาทกิจกรรม ของชุมชน ในการอนุรักษ์และการใช้ประโยชน์ป่าชุมชน เพื่อสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการบริหารจัดการป่าชุมชนแห่งอื่นต่อไป

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาบทบาท กิจกรรม การมีส่วนร่วมและจุดอ่อน จุดแข็ง ของชุมชนในการบริหารจัดการป่าชุมชน

2. เพื่อศึกษาและประเมินสถานภาพทรัพยากรชีวภาพของป่าชุมชน

3. เพื่อศึกษาการอนุรักษ์และการใช้ประโยชน์ทรัพยากรป่าไม้ของชุมชน

## วิธีการศึกษา

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงสำรวจ (Survey based research) เก็บข้อมูลทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพจากกลุ่มประชากรสองกลุ่ม คือ ผู้แทนครัวเรือนที่อาศัยอยู่ ณ บ้านโคกประดู่ หมู่ที่ 8 ตำบลมหาโพธิ อำเภอสระโบสถ์ จังหวัดลพบุรี จำนวนทั้งสิ้น 53 คน (เนื่องจากบ้านโคกประดู่มีจำนวน 53 หลังคาเรือน) และกลุ่มองค์กรชุมชนที่มีส่วนร่วมในกิจกรรมการบริหารจัดการป่าชุมชนบ้านโคกประดู่ ได้แก่ ผู้ใหญ่บ้าน ประธานกลุ่มอนุรักษ์ป่าชุมชน กลุ่มสตรีอาชีพ วัด โรงเรียน สถานีอานามัย และองค์การบริหารส่วนตำบล องค์กรละ 1 คน รวม 7 คน

เครื่องมือและวิธีการที่ใช้ในการเก็บข้อมูล คือ

1. การสำรวจพื้นที่ป่าชุมชน โดยการสังเกตและจดบันทึกสังคมของสิ่งมีชีวิต แหล่งอาหาร พืชสมุนไพร และความสมบูรณ์ของพื้นที่ป่าชุมชน โดยการเดินสำรวจ (Walk through survey) ร่วมกับ

ผู้นำ ปราชญ์ชาวบ้าน หมอภูมิปัญญาชาวบ้าน ผู้แทนคณะกรรมการป่าชุมชน รวมทั้งการใช้แบบสำรวจครัวเรือนการใช้ประโยชน์ทรัพยากรจากป่าชุมชน (60 คน)

2. แบบสัมภาษณ์กึ่งโครงสร้าง (Semi-structured interview) เป็นการสัมภาษณ์รายบุคคลผู้นำองค์กร เกี่ยวกับแนวคิด บทบาท กิจกรรมการบริหารจัดการป่าชุมชนบ้านโคกประดู่ (7 คน)

3. การจัดประชุมกลุ่มย่อย (Focus group) ผู้นำองค์กรที่มีส่วนร่วมในการบริหารจัดการป่าชุมชนบ้านโคกประดู่ ได้แก่ ผู้ใหญ่บ้าน ประธานกลุ่มอนุรักษ์ป่าชุมชน กลุ่มสตรีอาชีพ วัด โรงเรียน สถานีอานามัย องค์การบริหารส่วนตำบล นักวิชาการ เจ้าหน้าที่สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัด และประชาชน เพื่อวิเคราะห์จุดอ่อน (Weakness) จุดแข็ง (Strength) โอกาส (Opportunity) และข้อจำกัด/อุปสรรค (Threat) ในการอนุรักษ์และการใช้ประโยชน์ป่าชุมชนโคกประดู่ โดยจัดประชุม 3 ครั้ง มีสมาชิกร่วมประชุมครั้งละ 35 คน

4. การวิเคราะห์ข้อมูลใช้สถิติพื้นฐานและการวิเคราะห์เนื้อหา (Content analysis) ชุดข้อมูลเชิงคุณภาพและหลักฐานการจดบันทึกจากการสำรวจภาคสนาม

## ผลการศึกษา

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการสัมภาษณ์บุคคล เอกสาร ที่เกี่ยวข้องและการสำรวจพื้นที่ภาคสนามสรุปได้ดังนี้

### 1. การสำรวจสภาพพื้นที่ป่าชุมชนบ้านโคกประดู่

สภาพดั้งเดิมของป่าชุมชนโคกประดู่ก่อนปี พ.ศ. 2518 เป็นป่าเบญจพรรณที่มีความอุดมสมบูรณ์ เนื่องจากมีพันธุ์ไม้เด่นที่สำคัญ คือ สัก *(Tectona grandis)* ประดู่ (*Pterocarpus macrocarpus*) แดง (*Xylia xylocarpa*) ตะแบก (*Lagerstroemia calyculata*) มะค่าโมง (*Afzelia xylocarpa*) ที่มีขนาดสูงเกิน 2 เมตรขึ้นไปกระจายอยู่ทั่วพื้นที่ไร่ละ 30 ต้น โดยใช้หลักเกณฑ์และเงื่อนไขในการกำหนดสภาพป่าเสื่อมโทรมของมติคณะรัฐมนตรี เมื่อวันที่ 2 กันยายน 2529 ระบุว่า ป่าที่มีไม้มีค่าที่มีลักษณะสมบูรณ์เหลืออยู่เป็นส่วนน้อยหรือยากที่จะกลับคืนดีได้ตามธรรมชาติโดยมีลูกไม้ขนาดความสูงเกิน 2 เมตรขึ้นไปกระจายอยู่ทั่วพื้นที่ ไม่เกินไร่ละ 20 ต้น ถือว่าเป็นป่าเสื่อมโทรม ซึ่งป่าชุมชนบ้านโคกประดู่มีไม้มีค่าเกิน 20 ต้นต่อไร่ จึงถือได้ว่าเป็นพืนที่ป่าเบญจพรรณที่สมบูรณ์ ประกอบกับมีไม้พื้นล่างเด่น ได้แก่ ปลง (*Cycas revolute* Thumb) สาบเสือ (*Chromolaena odorata* L.) ว่านจูงนาง (*Geodorum recurvum (Roxb.)* Alston) หญ้าคา (*Pennisetum polystachyon* (L.) Schult) และไม้ตระกูลไผ่เกือบทุกประเภท เช่น ไผ่ซาง (*Dendrocalamus* strictus Nees) ไผ่รวก (*Thyrsostachys siamensis* Gamble) ไผ่ไร่ (*Gigantochloa albociliata* Munro) เป็นต้น และพันธุ์สัตว์ป่าเด่น ได้แก่ หมูป่า (*Scorpaena Scrofa*) เก้ง (*Muntiacus muntjac*) เสือปลา (*Prionailurus viverrinus*) บ่าง (*Cynocephalus variegatus*) กระรอกสามสี (*Callosciurus prevostii*) ไก่ป่า (*Pheasaenidae*) เม่น (*Atherurus macrourus*) เป็นต้น เมื่อรัฐบาลเปิดสัมปทานให้เอกชนตัดไม้และปลูกสวนส้ม จนทำให้ระบบนิเวศป่าเสื่อมโทรมอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดวาตภัยอย่างรุนแรงบ่อยครั้ง ชุมชนในหมู่บ้านเกิดความเกรงกลัวภัยธรรมชาติเพราะไม่เคยเกิดขึ้นมาก่อน ปี พ.ศ. 2522 ชุมชนได้ร่วมกันจัดตั้งกลุ่มอนุรักษ์ป่าชุมชนบ้านโคกประดู่ โดยเริ่มปลูกฟื้นฟูป่าในพื้นที่ป่าเสื่อมโทรมก่อนและพัฒนามาโดยตลอด ในปี พ.ศ. 2547 จังหวัดลพบุรีได้ประกาศให้เป็นป่าชุมชนบ้านโคกประดู่ มีการบริหารจัดการโดยชุมชนบ้านโคกประดู่ และจัดทำโครงการหมู่บ้านป่าไม้แผนใหม่ตามแนวพระราชดำริฯ ประกอบกับขยายกิจกรรมส่งเสริมด้านการอนุรักษ์ทรัพยากรป่าไม้ให้แก่เยาวชนในพื้นที่ เพื่อสร้างความตระหนักและปลูกฝังให้เยาวชนเกิดความรักและหวงแหนป่าของชุมชน

ผลการสำรวจสภาพป่าในปัจจุบันโดยการถ่ายภาพ จดบันทึก สังเกต และเน้นการเห็นชนิดพืชและสัตว์จริงเป็นหลัก ประกอบกับการสอบถามจากปราชญ์ชาวบ้าน หมอภูมิปัญญาที่ร่วมสำรวจ พบว่าพื้นที่ป่าเริ่มกลับคืนสู่ความสมบูรณ์อีกครั้งมีความหลากหลายของพันธุ์พืชสัตว์ และสมุนไพร พันธุ์พืชที่สำคัญ ได้แก่ ประดู่ (*Pterocarpus macrocarpus*) มะค่าโมง (*Afzelia xylocarpa*) แดง (*Xylia xylocarpa*) ตะแบก (*Lagerstroemia floribunda* Jack) รัง (*Shorea siamensis*) ตะคร้อ (*Schleichera oleosa*) สะเดา (*Azadirachta indica* A. Juss.) โพธิ์ (*Ficus religiosa* Linn.) สวองต้นเป็ด (*Vitex limonifolia* Wall) กระถินณรงค์ (*Acacia auriculaeformis* Cunn.) โมกมัน (*Wrightia pubescens* R.br.) แต้ว (*Cratoxylum maingayi* Dyer) มะขามป้อม (*Phyllanthus emblica* Linn.) ขี้เหล็ก (*Senna siamea* (Lam.) *Irwin et* Barneby) ติ้ว (*Clusiaceae*) อีนูน (*Passifloraceae*) จิก (*Barringtonia acutangula* (L.) Garetn) ผักหวาน (*Melientha suavis* Pierre) อบเชย (*Cinnamomum bejolghota* Sweet) กระชายป่า (*Boesenbergia* sp.) เห็ดขอนขาว (*Lentinus sguarrosulus* Mont) เห็ดตับเต่า (*Thaeogyroporus porentosus*) เห็ดกระด้าง (*Lentinus polychrous* Lev.) ปลง (*Cycas revolute* Thumb) พันธ์พืชสมุนไพรที่สำคัญได้แก่ หนอนตายหยาก (*Stemonaceae*) หัวยาข้าวเย็น (*Smilacaceae*) ประคำดีควาย (*Sapindus emarginatus* Wall) สาบเสือ (*Chromolaena odorata* L.) ฟ้าทลายโจร (*Andrographis paniculata* (Burm. f.) Nees) ไพล (*Zingiber montanum (Koen.)* Thelade) เสลดพังพอน (*Barleria lupulina* Lindl.) เจตมูลเพลิงแดง (*Plumbago indica* L.) บอระเพ็ด (*Tinospora crispa*) พันธุ์สัตว์ที่สำคัญที่พบได้แก่ เสือปลา (*Prionailurus viverrinus*) บ่าง (*Cynocephalus variegatus*) ตุ่น (*Talpa micruca*) กระรอกสามสี (*Callosciurus prevostii*) ไก่ป่า (*Pheasaenidae*) งูเหลือม (*Python reticulatus*) งูสิง (*Ptyas carinatus*) นกเป็ดน้ำ (*Callonetta leucophrys*) นกกาเหว่า (*Eudynamys scolopacea*) นกคุ้ม (*Eurycle ambeinensis*) เป็นต้น โดยเฉพาะเสือปลาถือเป็นสัตว์ป่าคุ้มครองและเป็นสัตว์ป่าที่ชี้วัดความชุ่มชื้นและแหล่งน้ำของพื้นที่ป่าชุมชนบ้านโคกประดู่ เนื่องจากโดยธรรมชาติของเสือปลาเป็นสัตว์ที่หากินอยู่ตามพุ่มไม้ใกล้แหล่งน้ำโดยเฉพาะแหล่งน้ำที่ไหลช้าหรือนิ่ง เช่น หนอง บึง ป่าริมลำธาร และจับสัตว์น้ำเป็นอาหาร เช่น ปลา กบ คางคก นอกจากสัตว์น้ำแล้วยังจับนก งู กับสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็ก เช่น หนู กระต่าย กินเป็นอาหาร

**2. การวิเคราะห์บทบาทกิจกรรมการอนุรักษ์**

ผลการวิเคราะห์กิจกรรมการอนุรักษ์ป่าชุมชนโคกประดู่ที่สำคัญประกอบด้วย 8 กิจกรรมหลัก คือ (1) การประกาศแบ่งพื้นที่ป่าชุมชน 1,900 ไร่ ออกเป็น 3 ส่วน คือ ป่าอนุรักษ์ (ห้ามใช้ประโยชน์) ป่าใช้ประโยชน์ (ใช้ประโยชน์ได้แต่ต้องขออนุญาต) และป่าเสื่อมโทรม (เน้นการปลูกป่าทดแทน) (2) การปลูกป่าในวันพ่อและวันแม่แห่งชาติ (3) การรณรงค์การอนุรักษ์ผ่านการประชุมหมู่บ้านประจำเดือนและเสียงตามสายตอนเช้าเพื่อให้เกิดความตระหนัก (4) การจัดชุดสำรวจพื้นที่เฝ้าระวังดูแลรักษาป่าชุมชนออกสำรวจทุกๆ คืนละ 5 คน (5) การทำสัญญาต่อหน้าพระพุทธรูป "ไม่ตัดไม้" (6) การจัดพิธีเลี้ยงผีปู่ตา (7) การปิดป่าช่วงเดือน ธันวาคม-กุมภาพันธ์ และ (8) การจัดพิธีบวชป่า 1 คน 1 ต้น และจัดเขตอภัยทานในป่าชุมชน ในแต่ละกิจกรรมสำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดลพบุรี คณะกรรมการกลุ่มอนุรักษ์ป่าชุมชน องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น วัด โรงเรียน และประชาชน มีส่วนร่วมในการดำเนินกิจกรรมร่วมกันทุกครั้ง ซึ่งมีปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้ชุมชนบ้านโคกประดู่ตระหนักถึงความสำคัญของทรัพยากรป่าชุมชนนอกจากเป็นแหล่งอาหาร คือ เดิมชุมชนแห่งนี้ได้รับผลกระทบรุนแรงจาก วาตภัยในอดีตหลายครั้งเมื่อสภาพป่าเสื่อมโทรม ปัจจุบันพบว่าชุมชนเกิดความมั่นใจป่าชุมชนที่สมบูรณ์ขึ้นสามารถป้องกันวาตภัยที่จะเกิดขึ้นภายในหมู่บ้านได้

**3. การวิเคราะห์จุดอ่อน /จุดแข็ง**

ผลการวิเคราะห์จุดอ่อน (Weakness) จุดแข็ง (Strength) โอกาส (Opportunity) และข้อจำกัด/อุปสรรค (Threat) การบริหารจัดการป่าชุมชนบ้านโคกประดู่ ผลการศึกษาพบว่า

จุดอ่อน ชุมชนส่วนใหญ่ทั้งในเขตตำบลมหาโพธิและบ้านโคกประดู่ ขาดที่ดินเพื่อการเพาะปลูก ขาดโครงสร้างทางเศรษฐกิจที่เอื้อต่อการสร้างรายได้เพิ่ม เช่น แหล่งท่องเที่ยว ทำให้ชุมชนส่วนใหญ่ต้องพึ่งพิงทรัพยากรจากป่าชุมชนเป็นอย่างมาก เกิดการลักลอบหาของป่า ตัดไม้ ล่าสัตว์ จากบุคคลภายนอกชุมชน ทำให้หมู่บ้านจำเป็นต้องจัดชุดลาดตะเวนดูแลป้องกันป่าชุมชนเป็นประจำทุกคืน

จุดแข็ง พบว่า ชุมชนมีความเข็มแข็ง ที่สามารถบริหารจัดการพื้นที่ทั้ง 1,900 ไร่ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สมาชิกในหมู่บ้านทุกครัวเรือนมีความตระหนักและให้ความสำคัญความจำเป็นในการอนุรักษ์และใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืนของป่าชุมชน มีการกำหนดกฎระเบียบกติกาการอนุรักษ์และการใช้ประโยชน์ป่าชุมชนอย่างเคร่งครัด การจัดตั้งกลุ่มอนุรักษ์ป่าชุมชนโคกประดู่ ซึ่งเป็นกลุ่มอาสาสมครพื้นบ้านที่จัดกิจกรรมการอนุรักษ์ป่าเป็นประจำ

**4. การวิเคราะห์ โอกาส /ข้อจำกัด**

โอกาส พบว่าจากจุดแข็งดังกล่าวหมู่บ้านโคกประดู่ ประกอบกับการฟื้นตัวของสภาพป่าที่มีความหลากหลายของไผ่ชนิดต่างๆ รวมทั้งความชุ่มชื้น การริเริ่มการปรับโครงสร้างการใช้ประโยชน์จากป่าชุมชนอย่างยั่งยืน เช่น การทำวนเกษตร การริเริ่มผลิตภัณฑ์ชุมชนในลักษณะหัตกรรมพื้นบ้านในรูปแบบของระบบเศรษฐกิจพอเพียงควบคู่การอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชุมชนนับเป็นสิ่งที่ท้าทายของชุมชนแห่งนี้ โดยเฉพาะการพัฒนาโครงการ กิจกรรมลักษณะนี้โดยการขอรับงบประมาณสนับสนุนจากองค์การบริหารส่วนตำบล

ข้อจำกัด/อุปสรรค พบว่ายังคงมีการลุกล้ำและใช้ประโยชน์จากทรัพยากรป่าชุมชนในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ ส่งผลให้เกิดการแตกสามัคคีในชุมชนหมู่บ้านโคกประดู่และหมู่บ้านใกล้เคียง เป็นประเด็นที่เปราะบางและละเอียดอ่อนซึ่งผู้นำชุมชนและกลุ่มอนุรักษ์จำเป็นต้องมีมาตรการเสริมเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว

**5. การใช้ประโยชน์ป่าชุมชนบ้านโคกประดู่**

ผลการวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ทรัพยากรป่าชุมชนบ้านโคกประดู่ พบว่าประชาชนส่วนใหญ่ใช้เป็นแหล่งอาหารเพื่อการดำรงชีวิตประจำวัน ซึ่งมีปริมาณการใช้ครั้งละ 1 - 2 กิโลกรรม รองลงมาเป็นแหล่งสมุนไพรใช้เป็นยารักษาโรค และในหลายครัวเรือนเริ่มมีการใช้ประโยชน์เพื่อการเลี้ยงสัตว์และใช้เป็นแหล่งไม้ใช้สอยในครัวเรือน (ตารางที่ 1) การใช้ประโยชน์ของชุมชนเป็นไปตามกฎระเบียบคณะกรรมการป่าชุมชนโคกประดู่ ชุมชนใช้ประโยชน์ได้เฉพาะพื้นที่ป่าชุมชนที่คณะกรรมการกำหนดเขตการใช้ประโยชน์ไว้เท่านั้น ส่วนป่าอนุรักษ์จะไม่อนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ ในขณะเดียวกันพื้นที่ป่าเสื่อมโทรมก็จะมีการปลูกไม้โตเร็วที่สามารถใช้ประโยชน์ได้แทน เช่น มะขามป้อม ขี้เหล็ก ไผ่ เพื่อเป็นแนวป้องกันการบุกรุกพื้นที่ป่าอนุรักษ์

**ตารางที่ 1** การใช้ประโยชน์จากทรัพยากรป่าชุมชนบ้านโคกประดู่ จังหวัดลพบุรี

| ประเภทการใช้ประโยชน์ | จำนวนครัวเรือน (ร้อยละ) | |
|---|---|---|
| | เคย | ไม่เคย |
| 1. เป็นแหล่งอาหาร | | |
| -ผัก เช่น ผักหวาน อีนูน จิก แต้ว | 53 (100 %) | 0 |
| -เห็ด เช่น เห็ดโคน เห็ดกระด้าง เห็ดขอนขาว เห็ดตับเต่า | 53 (100 %) | 0 |
| -ผลไม้ป่า เช่น กล้วยหวี ชำมะเลียง | 53 (100 %) | 0 |
| -สัตว์/แมลง เช่น แมงดา กระต่าย ไก่ป่า หนู | 53 (100 %) | 0 |
| -หน่อไม้ เช่น หน่อไม้รวก หน่อไม้ซาง | 53 (100 %) | 0 |
| 2. เป็นพื้นที่ประกอบอาชีพทางการเกษตร | 20 (37.74%) | 33 (62.26%) |
| -เลี้ยงสัตว์ เช่น วัว ควาย แพะ | 13 (24.53%) | 33 (62.26%) |
| -เพาะปลูก เช่น มัน พริก | 5 (9.43%) | 48 (90.57%) |
| -เป็นที่ตากผลผลิตทางการเกษตร เช่น มัน พริก ข้าวโพด | 0 | 53 (100%) |
| -ใช้ปลูกไม้เศรษฐกิจ เช่น สัก ยูคาลิปตัส | 0 | 53 (100 %) |
| 3. เป็นแหล่งไม้ใช้สอย | | |
| -เป็นไม้เชื้อเพลิง เช่น มะขามเทศ ตะโก | 6 (11.32%) | 47 (88.68%) |
| -เป็นไม้ใช้สอย เช่น สะเดา ไผ่ ตะแบก รัง | 3 (5.66%) | 50 (94.34%) |
| -ใช้เป็นวัสดุอุปกรณ์ เช่น ไผ่ โมกมัน | 5 (9.43%) | 48 (90.57%) |
| -ใช้สร้างบ้าน เช่น ไผ่ ประดู่ มะค่า | 3 (5.66%) | 50 (94.34%) |
| 4. เป็นแหล่งสมุนไพรรักษาโรค เช่น หัวยาข้าวเย็น หนอนตาย หยาก อบเชย ประคำดีควาย | 48 (90.57%) | 5 (9.43%) |

## อภิปรายผล

การศึกษาครั้งนี้ได้พบประเด็นสำคัญหลายประการ

ประการแรก คือ แนวทางการบริหารจัดการทรัพยากรป่าไม้โดยให้ชุมชนดำเนินการเองในกรณีศึกษาป่าชุมชนบ้านโคกประดู่ พบว่าเป็นแนวทางที่ชุมชนได้คิดริเริ่มเองและมีหน่วยงานของกรมป่าไม้สนับสนุนภายหลัง มีความสอดคล้องกับวิถีชีวิตและสภาพเศรษฐกิจสังคมและสิ่งแวดล้อมท้องถิ่น นับเป็นการพิสูจน์หลักการและแนวคิดที่เสนอต่อประเทศไทยของ Sharp and Nakagoshi (2006) ที่เสนอหลักการการอนุรักษ์ ฟื้นฟู และการใช้ประโยชน์ทรัพยากรป่าไม้ในประเทศไทยควรใช้หลักการบริหารทรัพยากรชีวภาพที่สอดคล้องกับสภาพเศรษฐกิจชุมชนท้องถิ่น และสนับสนุนกิจกรรมชุมชนในการริเริ่มดำเนินการเองโดยส่วนภาครัฐและวิชาการควรมีบทบาทในการให้คำแนะนำชี้แนะชุมชน Suyanto et al. (2005) ได้ศึกษาการจัดการป่าในประเทศอินโดนีเซีย และ Nagendra and Gokhale (2008) ในประเทศอินเดียและเนปาล ที่พบข้อเท็จจริงเหมือนกันว่าถ้าภาครัฐเน้นการใช้ข้อบังคับและระเบียบของทางราชการพบว่าเกิดความล้มเหลวในการจัดการทรัพยากรป่าไม้ แต่ถ้าภาครัฐเข้าไปยุ่งเกี่ยวน้อยลงจะเกิดการจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ เพราะชุมชนเห็นความสำคัญทรัพยากรป่าไม้เป็นแหล่งเพิ่มรายได้ ชุมชนจะร่วมกันจัดการอย่างยั่งยืน

เช่น ร่วมกันป้องกันไฟป่าเพื่อพิทักษ์แหล่งรายได้จากทรัพยากรป่าไม้ของชุมชน

ประการที่สอง คือ การกลับมาของพืชและสัตว์บางชนิดในเขตอนุรักษ์ เช่น กรณีอบเชย (Cinnamomum bejolghota Sweet) ซึ่งเป็นพันธ์พืชที่ขึ้นในป่าดงดิบ และเสือปลา (Prionailurus viverrinus) ซึ่งชอบอาศัยอยู่ใกล้แหล่งน้ำที่มีความชุ่มชื้นสูง ทรัพยากรชีวภาพประจำถิ่นเหล่านี้สามารถใช้เป็นดัชนีชี้วัดความสมบูรณ์ของระบบนิเวศป่าพื้นบ้าน ซึ่ง Hierl et al. (2008) เสนอว่าการค้นพบชนิดของพืชและสัตว์ที่แสดงความสัมพันธ์กับถิ่นอาศัยนับเป็นข้อมูลที่สำคัญอย่างยิ่ง เพราะสามารถใช้เป็นสิ่งมีชีวิตที่เป็นตัวแทน (Representativeness) ในการกำหนดเป้าหมายการอนุรักษ์และการตรวจสอบความสำเร็จของการฟื้นตัวสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี

ประการที่สาม คือ การออกกฎระเบียบและการแบ่งพื้นที่ป่าเพื่อการวางแผนการอนุรักษ์และการใช้ประโยชน์อย่างเคร่งครัด แต่ก็ยังมีการลักลอบหาของป่าจากบุคคลภายนอกชุมชน นับเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อความสำเร็จของการอนุรักษ์ป่าชุมชนแห่งนี้ แนวคิดการแบ่งพื้นป่าผืนเดียวกันเป็นพื้นที่อนุรักษ์แยกออกจากพื้นที่การใช้ประโยชน์ของชุมชนมีการทำอย่างแพร่หลายเริ่มตั้งแต่ทศวรรษที่ผ่านมา Rowe (1996) โดยเฉพาะในประเทศที่มีการใช้ประโยชน์ทรัพยากรป่าไม้ร่วมกับการอนุรักษ์ เช่น ประเทศออสเตรเลีย Lindenmayer and Cunningham (1996) มีการจัดแบ่งพื้นที่ป่าออกเป็นแปลงย่อยเพื่อการอนุรักษ์พันธุ์พืชและสัตว์ และผลการศึกษาในตุรกีพบว่าการแบ่งพื้นที่ดังกล่าวจำเป็นต้องมีการสื่อสารและให้ความรู้กับชุมชนไม่ควรใช้วิธีการดั้งเดิมคือการประกาศและแจ้งบอก ชุมชนจะไม่เห็นความสำคัญ ไม่ร่วมมือ และสุดท้ายการจัดการป่าชุมชนไม่ประสบความสำเร็จ Baskent et al.(2008)

ประการที่สี่ คือ จากการสำรวจพบว่าทุกครัวเรือนในหมู่บ้านโคกประดู่พึ่งพาและใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์จากป่าที่มิใช่เนื้อไม้ (NTFPs) เพื่อเป็นแหล่งอาหารและสมุนไพร สอดคล้องกับผลการศึกษาของ นันทนา บุญยานันต์ (2549) และ ปรีชา คุ้มสีไวย์ และฝากสวาสดิ์ ภูผาใจ (2549) ที่พบว่าชุมชนที่อาศัยใกล้ป่าชุมชนใช้ NTFPs เป็นแหล่งอาหาร ซึ่งสามารถบรรเทาความยากจนและรักษาโรคในท้องถิ่น ผลการศึกษาในประเทศเวียดนามพบว่าชุมชนชนบทที่อาศัยใกล้ป่ามีรายได้จากผลิตภัณฑ์จากป่าถึงมากกว่าร้อยละ 75 ของรายได้ครัวเรือน Quang and Noriko (2008) ยิ่งกว่านั้น Tong and Zhi-qiang (2006) และ Melick et al. (2007) ได้เสนอแนะว่าการแสวงหาจุดสมดุลย์ระหว่างการบริหารจัดการการใช้ประโยชน์ NTFPs กับการอนุรักษ์กำลังเป็นสิ่งท้าทายในการจัดการป่าไม้อย่างยั่งยืนในประเทศจีน อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาหมู่บ้านนี้ที่พบว่าคณะกรรมการป่าชุมชนบ้านโคกประดู่ได้มีการปิดป่าตามฤดูกาลทุกปี มีการแบ่งพื้นที่เป็นป่าอนุรักษ์ห้ามใช้ประโยชน์ถือเป็นมาตรการที่สำคัญที่เป็นปัจจัยสู่ความสำเร็จเบื้องต้นในการสร้างความสมดุลย์ระหว่างการใช้ประโยชน์และการอนุรักษ์ที่ทุกฝ่ายในชุมชนยอมรับได้ Kim et al. (2008) ยังได้ระบุว่าเนื่องจากชาวเอเชียส่วนใหญ่ใช้ประโยชน์จาก NTFPs การให้ความรู้แก่ชุมชนอย่างต่อเนื่องเกี่ยวกับการอนุรักษ์เป็นสิ่งสำคัญจะทำให้เกิดความยั่งยืนของการจัดการทรัพยากรป่าไม้ในชุมชน

สรุปผลการศึกษาการถอดบทเรียนการบริหารจัดการทรัพยากรป่าไม้ของป่าชุมชนบ้านโคกประดู่พบว่ารูปแบบและแนวทางการจัดการทรัพยากรป่าไม้ของชุมชนแห่งนี้สามารถใช้เป็นแนวทางแก่ชุมชนแห่งอื่นได้ โดยเฉพาะชุมชนที่มีข้อขัดแย้งทางความคิดระหว่างการใช้ประโยชน์และการอนุรักษ์ การกลับคืนมาของความชุ่มชื้น พันธุ์พืชและสัตว์ที่ใช้เป็นดัชนีชี้วัดการฟื้นตัวระบบนิเวศ นับเป็นประเด็นที่น่าศึกษาในรายละเอียดต่อไป รวมทั้งการศึกษาชนิดของพันธุ์ไม้ที่เหมาะสมในการปลูกในพื้นที่แนวกันชน (Buffer zone) ระหว่างป่าอนุรักษ์และป่าใช้ประโยชน์ ประเด็นด้านเพศที่เก็บหาผลิตภัณฑ์ NTFPs

จากป่าชุมชนดังที่ Marshall and Newton (2003) พบว่าชุมชนท้องถิ่นในเม็กซิโกเพศหญิงมีบทบาทสำคัญมากกว่าเพศชาย การสังเคราะห์การมีส่วนร่วมของชุมชนที่เหมาะสมว่าควรมีรูปแบบอย่างไร Fleeger and Becker (2008) ศึกษาทรัพยากรพื้นที่ลุ่มน้ำในมลรัฐโอเรกอนสหรัฐอเมริกาพบว่า ชุมชนต้องการมีส่วนร่วมมากกว่าการเข้าร่วมประชุมฟังคำชี้แจงจากภาครัฐ หรือ เพียงการยื่นข้อเสนอแนะต่อหน่วยงานภาครัฐ มาเป็นมีส่วนร่วมในกระบวนการตัดสินใจในการจัดการทรัพยากรชีวภาพท้องถิ่น

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณทุกครัวเรือนในหมู่บ้านโคกประดู่ ท่านผู้ใหญ่บ้าน ท่านคณะกรรมการหมู่บ้านโคกประดู่ คณะกรรมการอนุรักษ์ป่าชุมชนบ้านโคกประดู่ คุณธีระศักดิ์ บุญชูดวง ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดลพบุรี นายกานดิษฎ์ สิงหากัน สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดลพบุรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์วาสนา วราภักต์ หัวหน้าภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

## เอกสารอ้างอิง

ปรีชา คุ้มสีไวย์ และฝากสวาสดิ์ ภูผาใจ. (2549). กำลังผลิตพืชอาหารในพื้นที่ป่าชุมชนจังหวัดอุดรธานี. กรุงเทพฯ : กรมป่าไม้. 1-5.

นันทนา บุณยานันต์. (2549). การประเมินมูลค่าของของป่าในพื้นที่ป่าชุมชน กรณีศึกษา : ป่าชุมชนบ้านยางโทนและป่าชุมชนบ้านห้วยสะพานสามัคคี จังหวัดกาญจนบุรี. กรุงเทพฯ : กรมป่าไม้. 445-451.

Baskent, E.Z., Terzioglu, S., and Baskaya, S. (2008). Developing and implementing multiple-use forest management planning in Turkey. Environmental Management. 42(1): 37-48.

Fleeger, W.E., and Becker, M.L. (2008). Creating and sustaining community capacity forecosystem-based management: Is local government the key? Journal of Environmental Management. 88: 1396-1405.

Gunter, J., and Von Der Gonna, M. (2004). Before you begin: What all communities need to know. In Gunter, J. (Ed.) The community forestry guidebook: Tools and techniques for communities. British Columbia British Forest Association, Canada. 9-17.

Harrison, S., and Suh, J. (2004). Progress and prospects of community forestry in developing and developed countries. Small-Scale Forest Economics, Management and Policy. 3(3): 287-302.

Hierl, L.A., Franklin, J., Deutschman, H.D., Regan, H.M., and Johnson, B.S. (2008). Assessing and prioritizing ecological communities for monitoring in a regional habitat conservation plan. Environmental Management. 42(1): 165-179.

Kim, S., Sasaki, N., and Koike, M. (2008). Assessment of non-timber forest products in Phnom Kok community forest, Cambodia. Asia Europe Journal. 6(2): 345-354.

Lindenmayer, D.B., and Cunningham, R.B. (1996). A habitat-based microscale forest classification system for zoning wood production areas to conserve a rare species threatened by logging operations in south-eastern Australia. Environmental Monitoring and Assessment. 39(1-3): 543-557.

Marshall, E., and Newton, A.C. (2003). Non-timber forest products in the community of El Terrero, Sierra de Manantl_n Biosphere Reserve, Mexico: Is their use sustainable? Economic Botany. 57(2): 262-278.

Melick, D., Yang, X., and Xu, J. (2007). Seeing the wood for the trees: How conservation policies can place greater pressure on village forests in southwest China. Biodiversity and Conservation. 16(6): 1959-1971.

Nagendra, H., and Gokhale, Y. (2008). Management regimes, property rights, and forest biodiversity in Nepal and India. Environmental Management. 41(5): 719-733.

Ngwa, N.s., and Fonjong, L.N. (2002). Actors, options and the challenges of forest management in Anglophone Cameroon. GeoJournal. 57: 95-111.

Quang, N.V., and Noriko, S. (2008). Forest allocation policy and level of forest dependency of economic household groups: A case study in Northern Central Vietnam. Small-Scale Forest Economics, Management and Policy. 7(1): 49-66.

Rowe, J.S. (1996). Land classification and ecosystem classification. Environmental Monitoring and Assessment. 39 (1-3): 11-20.

Salam, Md.A., Noguchi, T., and Pothitan, R. (2006). Community forest management in Thailand: Current situation and dynamics in the context of sustainable development. New Forests, 31 (2): 273-291.

Sharp, A., and Nakagoshi, N. (2006). Rehabilitation of degraded forests in Thailand: policy and practice. Landscape and Ecological Engineering. 2(2): 139-146.

Suyanto, S., Permana, R.P., Khususiyah, N., and Joshi, L. (2005). Land tenure, agroforestry adoption, and reduction of fire hazard in a forest zone: A case study from Lampung, Sumatra, Indonesia. Agroforestry Systems. 65(1): 1-11.

Tong, L., and Zhi-qiang, Z. (2006). Analysis of developing non-timber forest products of Sanjiang Plain, Northeast China. Forestry Research. 17(4): 339-341.

Xu, J., Zhao Y., and Suh, J. (2004). Community forestry for poverty alleviation in China with reference to Huoshan County, Anhui Province. Small-scale Forest Economics, Management and Policy. 3(3): 385-400.

ว.วิทย. มข. 36(4) 312-326 (2551) KKU Sci. J.36(4) 312-326 (2008)

# การประยุกต์ใช้หญ้าอาหารสัตว์ในการบำบัดน้ำเสียในระบบบึงประดิษฐ์

# Application of Pasture for Wastewater Treatment in Constructed Wetland

*พันธ์ทิพย์ กล่อมเจ๊ก* [1]


## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการประยุกต์ใช้หญ้าอาหารสัตว์ในการบำบัดน้ำเสียของระบบบึงประดิษฐ์ โดยศึกษาการเจริญเติบโตของหญ้าอาหารสัตว์ 3 ชนิด คือ หญ้าขน (Brachiaria mutica) หญ้าอะตราตั้ม (Paspalum atratum) และหญ้าแพงโกล่า (*Digitaria decumbens*) ในระบบบึงประดิษฐ์ และประสิทธิภาพของระบบในการบำบัดน้ำเสียชุมชน ซึ่งถูกกักพักอยู่ในระบบเป็นระยะเวลา 5 วัน ผลการศึกษาพบว่า หญ้าอาหารสัตว์ทั้ง 3 ชนิด สามารถอยู่รอดและเจริญเติบโตได้ในระบบบึงประดิษฐ์ที่ทำการศึกษา โดยมีอัตราการเติบโตสัมพัทธ์เฉลี่ยในระยะที่ 1 (60 วัน หลังเริ่มดำเนินระบบ) และระยะที่ 2 ของการเก็บเกี่ยว (40 วัน หลังการเก็บเกี่ยวครั้งแรก) เท่ากับ 0.0980-0.1305 และ 0.1475-0.1807 ต่อวัน ตามลำดับ ผลผลิตมวลชีวภาพของหญ้าอะตราตั้ม หญ้าขน และหญ้าแพงโกล่า ในระยะที่ 1 และ 2 ของการเก็บเกี่ยว มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2,585.6, 768.9 และ 393.0 kg/rai และ 1,406.3, 838.7 และ 383.6 kg/rai ตามลำดับ โดยหญ้าอะตราตั้มมีอัตราการเติบโตสัมพัทธ์และมีการผลิตมวลชีวภาพสูงที่สุด ผลการศึกษาพบว่า แปลงหญ้าอาหารสัตว์มีประสิทธิภาพสูงกว่าแปลงควบคุมในการบำบัดมลสารประเภทสารอินทรีย์ ขณะที่แปลงควบคุมบำบัดธาตุอาหารได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยประสิทธิภาพการบำบัด $BOD_5$, COD, $NH_3$-N และ TP ของแปลงหญ้าอาหารสัตว์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 53.4-64.4, 36.3-42.9, 77.1-82.8 และ 11.9-21.7 % ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าแปลงหญ้าอาหารสัตว์มีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งสูงกว่าแปลงควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $P < 0.05$ โดยเฉพาะการบำบัด TSS ซึ่งหญ้าอะตราตั้มมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการบำบัดของแข็ง อย่างไรก็ตาม พบว่าประสิทธิภาพของระบบในการบำบัดของแข็งยังอยู่ในเกณฑ์ต่ำ เนื่องจากการเติบโตและเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วของสาหร่ายในระบบ ซึ่งทำให้ปริมาณของของแข็งแขวนลอยและสารอินทรีย์ในระบบมีค่าสูงขึ้น นอกจากนั้น ยังพบว่า TDS และ EC ในน้ำหลังการบำบัดมีค่าสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ไปเป็นสารอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบ


**คำสำคัญ:** บึงประดิษฐ์, การบำบัดน้ำเสีย, หญ้าอาหารสัตว์

[1] ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

E-mail : pantipk@yahoo.com

## Abstract

The objective of this study was to investigate application of pasture for wastewater treatment in constructed wetland (CW). Growth of 3 grass species (Para grass: *Brachiaria mutica*, Atratum: *Paspalum atratum* and Pangola grass: *Digitaria decumbens*) in CW and their efficiency for domestic wastewater treatment were analyzed. During system operation, the wastewater was retained and treated in the system for 5 days. The result revealed that all tested species could survive and grow in CW receiving domestic wastewater. Average relative growth rate (RGR) of tested species at first (60 days after system operation) and second harvest (40 days after first harvest) were 0.0980-0.1305 per day and 0.1475-0.1807 per day, respectively. Average dry biomass production of Atratum, Para grass and Pangola grass was 2,585.6, 768.9 and 393.0 kg/rai for first harvest and 1,406.3, 838.7 and 383.6 kg/rai for second harvest. Atratum showed the highest RGR and dry mass production. In case of treatment performance, CW planted with pasture indicated high efficiency for organic matter removal. Meanwhile, control unit showed good performance for nutrient removal. However, the efficiency for those was not significantly different between planted unit and control unit ($P < 0.05$). Average removal efficiency of $BOD_5$, COD, $NH_3$-N and TP for CW planted with pasture was 53.4-64.4, 36.3-42.9, 77.1-82.8 and 11.9-21.7 %, respectively. Efficiency for solid removal of CW planted with pasture was significantly higher than control unit at $P < 0.05$ especially TSS removal. Atratum provided the highest efficiency for solid removal. However, potential for solid removal of both planted and control unit was slightly poor. This may due to algae bloom that caused increasing of TSS and organic matter in the system. Furthermore, transformation of organic matter to inorganic matter may cause increasing of TDS and EC in effluent.


**Key words:** Constructed wetland, Wastewater treatment, Pasture

## บทนำ

น้ำเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีความสำคัญต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เป็นอย่างมาก นอกจากน้ำจะเป็นปัจจัยพื้นฐานในการดำรงชีวิตแล้ว น้ำยังเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในกระบวนการผลิตทั้งในภาคการเกษตรและภาคอุตสาหกรรม และเนื่องจากน้ำมีการหมุนเวียนอยู่ในวัฏจักรของน้ำ (Hydrological cycle) อย่างไม่หมดสิ้น อีกทั้งเป็นทรัพยากรที่มีต้นทุนในการนำมาใช้ต่ำ จึงทำให้ทรัพยากรน้ำถูกนำมาใช้โดยขาดความตระหนักและขาดการจัดการอย่างเหมาะสม ในปัจจุบันจึงพบว่า ปัญหาทรัพยากรน้ำเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตมนุษย์และสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ที่ทวีความรุนแรงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งจากปัญหาการขาดแคลนและปัญหาความเสื่อมโทรมของคุณภาพน้ำ ซึ่งทำให้น้ำที่มีคุณภาพที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มีปริมาณลดลงด้วย ทั้งนี้พบว่ากิจกรรมมนุษย์เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้น้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติมีคุณภาพลดต่ำลง โดยเฉพาะการระบายน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำโดยไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงหรือบำบัด ซึ่งอาจส่งผลให้น้ำในแหล่งน้ำเกิดการปนเปื้อนมลสารและเสื่อมคุณภาพลง จนไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศน้ำหรือแหล่งน้ำนั้นๆ

การบำบัดน้ำเสีย ซึ่งเป็นของเสียในรูปของเหลวที่มีการผลิตอย่างต่อเนื่องในปริมาณที่มาก

โดยการทำให้น้ำเสียนั้นมีคุณภาพดี ก่อนการระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เป็นหลักการสำคัญในการลดปัญหาการเสื่อมโทรมของคุณภาพน้ำและแหล่งน้ำ ซึ่งการบำบัดน้ำเสียนั้น สามารถดำเนินการได้หลายวิธีการด้วยกัน โดยแต่ละวิธีการจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป ทั้งนี้พบว่าการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบบึงประดิษฐ์เป็นวิธีการหนึ่งที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นระบบบำบัดที่มีประสิทธิภาพ ที่มีต้นทุนในการก่อสร้างและดำเนินการต่ำ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมข้างเคียง การดูแลและการดำเนินระบบไม่ยุ่งยาก นอกจากนั้น ในบางกรณียังสามารถนำพืชที่ปลูกในระบบมาใช้ประโยชน์ได้อีกด้วย ทั้งนี้ หลักเกณฑ์เบื้องต้นที่ใช้ในการคัดเลือกพืชเพื่อใช้ในระบบบึงประดิษฐ์โดยทั่วไป คือ การทนต่อภาวะน้ำท่วมขัง และทนต่อมลสารที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย (Davis, 1995) การพิจารณาถึงการนำพืชมาใช้ประโยชน์ยังมีไม่มากนัก และพบว่าชนิดของพืชที่นิยมใช้ในระบบบึงประดิษฐ์โดยส่วนใหญ่ คือ กก ธูปฤาษี หญ้าทรงกระเทียม อ้อ และผักตบชวา (U.S. EPA, 2000; กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

งานวิจัยในครั้งนี้ นอกจากจะทำการศึกษาเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ บึงประดิษฐ์แล้ว ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแนวทางในการลดปัญหามลพิษควบคู่กับความเป็นไปได้เบื้องต้นในการก่อประโยชน์ของพืชที่ใช้ในระบบในรูปของผลผลิตหญ้าอาหารสัตว์ ประเภทหญ้าขน หญ้าอะตราตั้ม และหญ้าแพงโกล่า จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของระบบบึงประดิษฐ์ ภายใต้การศึกษาการประยุกต์ใช้หญ้าอาหารสัตว์ในการบำบัดน้ำเสียในระบบบึงประดิษฐ์

## วิธีดำเนินงาน

เตรียมหน่วยทดลองบึงประดิษฐ์ (Constructed wetland) ขนาด กว้าง 1 m. ยาว 3 m. และสูง 1 m. ระดับความลาดชันของพื้นแปลง 1 % จำนวน 7 หน่วย บรรจุดินปนทราย ลงในแต่ละหน่วยทดลอง จนสูง 50 cm. จากพื้นแปลง เพื่อใช้เป็นวัสดุในการปลูกหญ้าอาหารสัตว์ บริเวณหัวแปลงทำการติดตั้งท่อและรางรับน้ำเข้าสู่ระบบ สูงจากผิวหน้าวัสดุปลูก 15 cm. บริเวณท้ายแปลง ติดตั้งท่อระบายน้ำออกจากแปลงที่ระดับผิวหน้าวัสดุปลูก 10 cm. เหนือวัสดุปลูก และทำการปลูกหญ้าอาหารสัตว์ 3 ชนิด คือ หญ้าขน (*Brachiaria mutica*) หญ้าอะตราตั้ม (*Paspalum atratum*) และหญ้าแพงโกล่า (*Digitaria decumbens*) ซึ่งทั้งหมดสามารถเติบโตได้ในพื้นที่ลุ่มที่มีน้ำท่วมขังในช่วงระยะเวลาหนึ่ง โดยทำการปลูกชนิดละ 2 แปลง ที่ระยะปลูก 50x50 cm. ใส่ปุ๋ยในแปลงหญ้าอาหารสัตว์ โดยให้ปุ๋ยยูเรีย 40 kg/rai สำหรับหญ้าขน ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 25 และ 100 kg/rai สำหรับหญ้าแพงโกล่าและหญ้าอะตราตั้ม ตามเอกสารคำแนะนำของกรมปศุสัตว์ (กรมปศุสัตว์, 2539; กรมปศุสัตว์, 2545ก; กรมปศุสัตว์, 2545ข) รดพืชด้วยน้ำประปาจนกระทั่งพืชเจริญเติบโตได้ดีในระบบ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 เดือน จึงตัดพืชให้มีความสูงเท่ากันที่ระดับ 25 cm. แล้วจึงเริ่มดำเนินระบบ โดยระบบที่ศึกษาได้ทำการบำบัดน้ำเสียระหว่างเดือนพฤศจิกายน 2550 ถึง กุมภาพันธ์ 2551 โดยการระบายน้ำเสียที่รวบรวมจากโรงอาหารลงสู่หน่วยทดลอง จนมีความสูง (Water depth) 15 cm. เหนือวัสดุปลูก กักพักน้ำเสียไว้ในระบบเป็นเวลา 5 วัน จึงระบายน้ำออก จากนั้นพักระบบไว้ให้แห้ง (air dry) เป็นระยะเวลา 2 วัน ก่อนการบำบัดน้ำเสียรอบถัดไป ซึ่งทำให้บึงประดิษฐ์มีอัตราการรองรับน้ำเสีย (Hydraulic loading rate: HLR) เท่ากับ 0.09 m3/d มีระยะกักพัก (Hydraulic retention time: HRT) 5 วัน ดำเนินระบบอย่างต่อเนื่อง โดยระหว่างดำเนินระบบได้ทำการเก็บเกี่ยวพืช 2 ครั้ง เก็บเกี่ยวครั้งแรกที่ระยะ 60 วัน หลังเริ่มดำเนินระบบ และเก็บเกี่ยวครั้งที่สองที่ระยะ 40 วัน หลังการตัดพืชครั้งแรก ซึ่งเป็นช่วงเวลาในการเก็บเกี่ยวหญ้าอาหารสัตว์ตามปกติของเกษตรกร

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียก่อน (Influent) และหลังการบำบัด (Effluent) ทุกๆ สัปดาห์ ตลอด

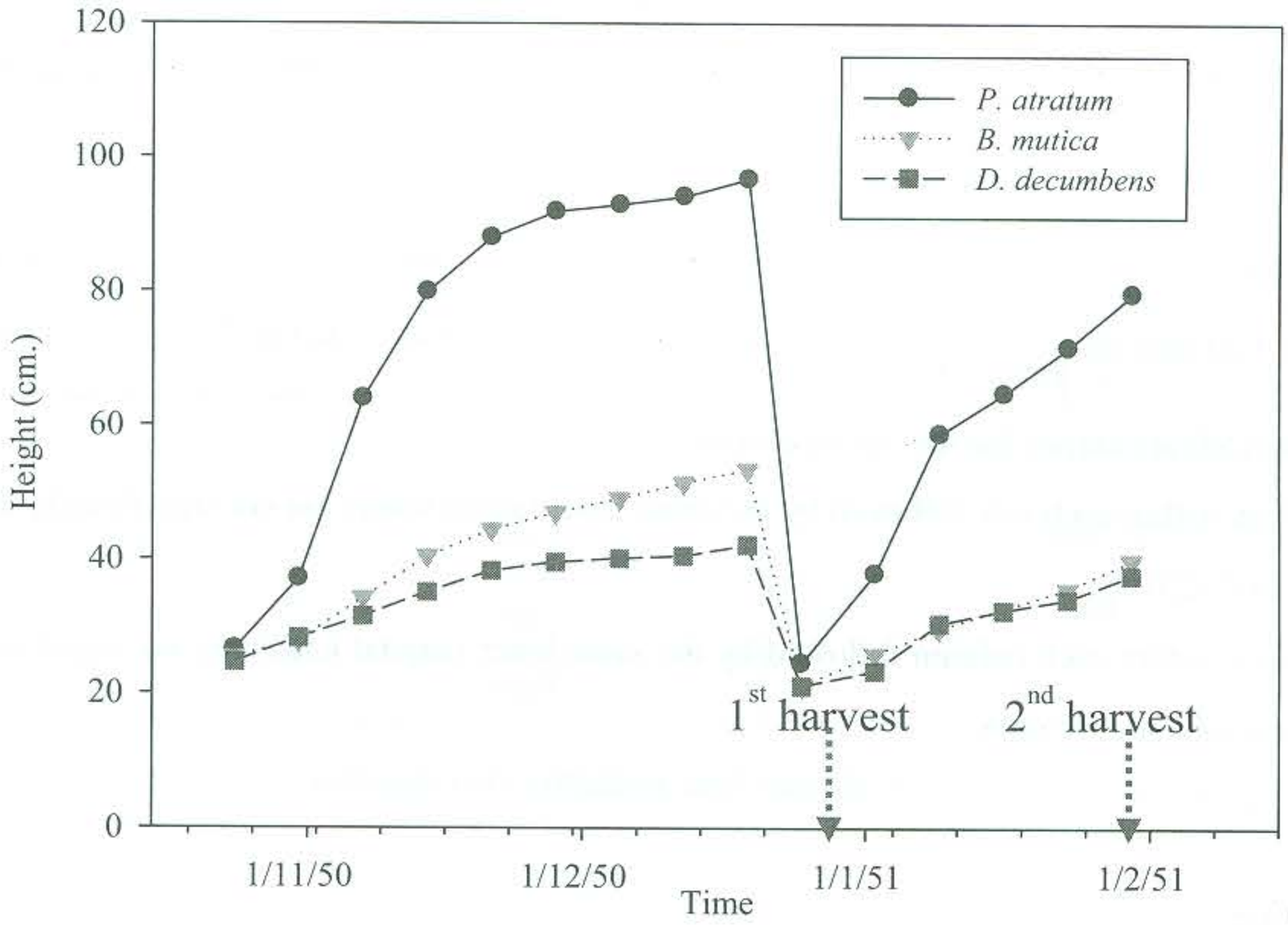
ระยะเวลาดำเนินระบบ และทำการวิเคราะห์ค่าดัชนีคุณภาพน้ำ ได้แก่ COD, $BOD_5$, TSS, TDS, $NH_3$-N, TP, DO, EC, pH และอุณหภูมิ ตามวิธีการที่กำหนดไว้ใน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WPCF, 1992) และทำการวิเคราะห์ Chlorophyll a ในน้ำเสียทั้งก่อนและหลังการบำบัดเพิ่มเติม เนื่องจากพบการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนของสาหร่ายภายในระบบ โดยตรวจวิเคราะห์ทุกๆ สัปดาห์ ทำการวัดความสูงของพืชทุกสัปดาห์ และเก็บตัวอย่างพืชเพื่อตรวจวัดมวลชีวภาพ จำนวน 3 ครั้ง คือ ก่อนเริ่มการบำบัดของระบบ เมื่อเก็บเกี่ยวพืชครั้งแรกและครั้งที่สอง ด้วยกรอบสุ่มตัวอย่างพืช ขนาด 50x50 cm. นำผลการตรวจวัดมาทำการวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพของระบบในการบำบัดน้ำเสียแต่ละดัชนีคุณภาพน้ำและคุณภาพน้ำหลังการบำบัด วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติระหว่างประสิทธิภาพในการบำบัดของพืชแต่ละชนิด และการบำบัดของหน่วยควบคุม (Control unit) ซึ่งไม่มีการปลูกพืชในระบบ และวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติระหว่างอัตราการเติบโตสัมพัทธ์และมวลชีวภาพของพืชแต่ละชนิด ด้วย T-test analysis

## ผลการวิเคราะห์

### 1. การเจริญเติบโตของพืชในระบบบึงประดิษฐ์

#### 1.1 ความสูง

ผลการตรวจวัดความสูงของหญ้าอาหารสัตว์ทั้ง 3 ชนิด ตั้งแต่เริ่มระบายน้ำเสียลงสู่ระบบ พบว่าความสูงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ โดยความสูงของหญ้าอะตราตั้ม หญ้าขน และหญ้าแพงโกล่า เมื่อทำการเก็บเกี่ยวครั้งแรก มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 96.7, 53.5 และ 42.1 cm. ตามลำดับ และพบว่าภายหลังการเก็บเกี่ยวหญ้าทั้ง 3 ชนิด มีการเจริญเติบโตด้านความสูงด้วยอัตราเพิ่มที่สูงขึ้น (ภาพที่ 1) โดยความสูงของหญ้าอะตราตั้ม หญ้าขน และหญ้าแพงโกล่า เมื่อทำการเก็บเกี่ยวครั้งที่สอง มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 79.6, 39.9 และ 37.6 cm. ตามลำดับ (รูปที่ 1)




**รูปที่ 1** Height of tested species during experimental period

อัตราการเติบโตสัมพัทธ์ (RGR) และมวลชีวภาพ (Biomass)

RGR ของหญ้าอะตราตั้ม หญ้าขน และหญ้าแพงโกล่า ในระยะแรกและระยะที่ 2 ของการเก็บเกี่ยว มีค่า 0.1240-0.1380, 0.0990-0.1200 และ 0.0860-0.1060 per day และ 0.1720-0.1860, 0.1540-0.1770 และ 0.1380-0.1630 per day ตามลำดับ ซึ่งพบว่า RGR ในระยะที่ 2 มีค่าสูงกว่าระยะแรกของ การเก็บเกี่ยว อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $P < 0.05$ และ RGR ของหญ้าทั้ง 3 ชนิด มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) ในทั้งสองระยะเก็บเกี่ยว (ตารางที่ 1) ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการผลิต มวลชีวภาพของหญ้าอาหารสัตว์ทั้ง 3 ชนิด ซึ่งพบว่ามีความแตกต่างกัน ($P < 0.05$) โดยอัตราการผลิต มวลชีวภาพของหญ้าอะตราตั้มสูงกว่าหญ้าขน และหญ้าแพงโกล่า ในทั้งสองระยะเก็บเกี่ยว โดยมวลชีวภาพของหญ้าอะตราตั้ม หญ้าขน และหญ้าแพงโกล่า ในระยะแรกและระยะที่ 2 ของการเก็บเกี่ยว มีค่า 1753.60-3842.56, 378.88-1354.24 และ 179.20-593.92 kg/rai และ 975.36-1730.56, 476.16-1200.64 และ 248.32-668.16 kg/rai ตามลำดับ (ตารางที่ 1) อย่างไรก็ตาม พบว่าการผลิตมวลชีวภาพของหญ้าขน และหญ้าแพงโกล่าในระยะแรกและระยะที่ 2 ของการเก็บเกี่ยวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ขณะที่หญ้าอะตราตั้มให้มวลชีวภาพสูงกว่าในการเก็บเกี่ยวครั้งแรก (ตารางที่ 1)

**ตารางที่ 1** Relative growth rate (RGR) and biomass production of tested species

| Parameters | Unit | Plants | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Atratum (*Paspalum atratum*) | Para grass (*Brachiaria mutica*) | Pangola grass (*Digitaria decumbens*) |
| RGR | per day | | | |
| - first harvest | | 0.1305±0.0045 $^{aB}$ | 0.1095±0.0071 $^{bB}$ | 0.0980±0.0076 $^{cB}$ |
| - 40 d after first harvest | | 0.1807±0.0055 $^{aA}$ | 0.1668±0.0098 $^{bA}$ | 0.1475±0.0086 $^{cA}$ |
| Dry biomass | kg/rai | | | |
| - first harvest | | 2585.6±685.1 $^{aA}$ | 768.9±337.5 $^{bA}$ | 393.0±167.2 $^{bA}$ |
| - 40 d after first harvest | | 1406.3±297.3 $^{aB}$ | 838.7±303.0 $^{bA}$ | 383.6±148.7 $^{cA}$ |

Note: Mean values±SD are shown for species treatment.

Mean values within each row followed by the same letter (small letter) are not significantly different for tested species at $P \geq 0.05$.

Mean values within each column followed by the same letter (capital letter) are not significantly different for each parameter at $P \geq 0.05$.

Sample size (n) = 6

## 2. การบำบัดน้ำเสีย

### 2.1 ลักษณะน้ำเสียก่อนการบำบัด

น้ำเสียที่ทำการบำบัด เป็นน้ำเสียจากอาคารโภชนาการ ซึ่งเกิดจากกิจกรรมการประกอบอาหารเป็นหลัก ผลการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียก่อนการบำบัด พบว่าน้ำเสียมีอุณหภูมิ 26.1-30.9 ˚C น้ำค่อนข้างเป็นกรด มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) 4.3-5.1

ค่าความนำไฟฟ้า (EC) เท่ากับ 533.5-1172.0 (S/cm ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ต่ำจนไม่สามารถตรวจวัดได้ ความเข้มข้นของ COD, $BOD_5$, TSS, TDS, $NH_3$-N และ TP ในน้ำเสีย มีค่า 530.1-1,669.4 mg/L, 495.0-1,500.0 mg/L, 30.0-216.7 mg/L, 350.0-641.0 mg/L, 0.36-9.38 mg/L และ 0.22-1.03 mg/L ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

**2.2 คุณภาพน้ำหลังการบำบัดและประสิทธิภาพการบำบัด**

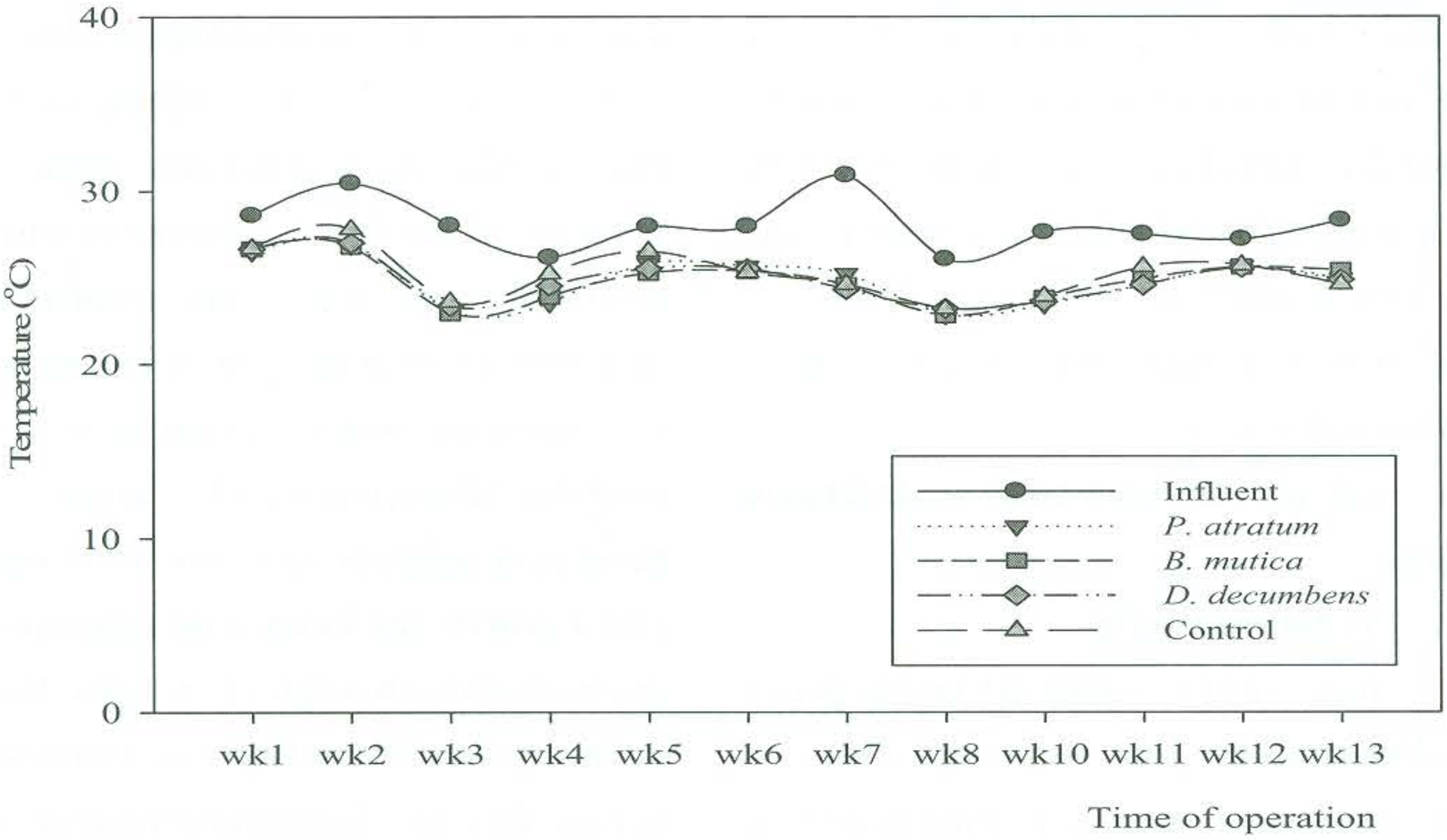
**1) คุณภาพน้ำทั่วไป**

ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา พบว่า น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบึงประดิษฐ์ มีอุณหภูมิต่ำกว่าน้ำเสียที่ผ่านแปลงควบคุมเล็กน้อย (ภาพที่ 2) pH ของน้ำหลังบำบัด มีค่าระหว่าง 6.72-8.57 ซึ่ง pH ของน้ำจากแต่ละแปลงมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยค่าเฉลี่ย pH ของน้ำจากแปลงควบคุม (8.16) สูงกว่าแปลงหญ้าแพงโกล่า (7.45) หญ้าขน (7.28) และหญ้าอะตราตั้ม (6.95) ตามลำดับ และพบว่าตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา น้ำเสียหลังการบำบัดจากทุกแปลงมีค่า pH สูงกว่า pH ของน้ำก่อนบำบัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (รูปที่ 3) DO ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบึงประดิษฐ์และแปลงควบคุมมีค่าสูงขึ้น โดยมีค่าระหว่าง 0.75-3.60 mg/L (รูปที่ 4) ทั้งนี้พบว่าค่าเฉลี่ยของ DO ในน้ำหลังบำบัดทั้งจากแปลงหญ้าอาหารสัตว์และหน่วยควบคุมยังคงมีค่าต่ำและไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) น้ำเสียหลังผ่านการบำบัดด้วยแปลงหญ้าอาหารสัตว์และหน่วยควบคุม มีค่า EC ไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าระหว่าง 588.0-1,543.0 (S/cm (ภาพที่ 5) ซึ่งพบว่า EC ของน้ำหลังบำบัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

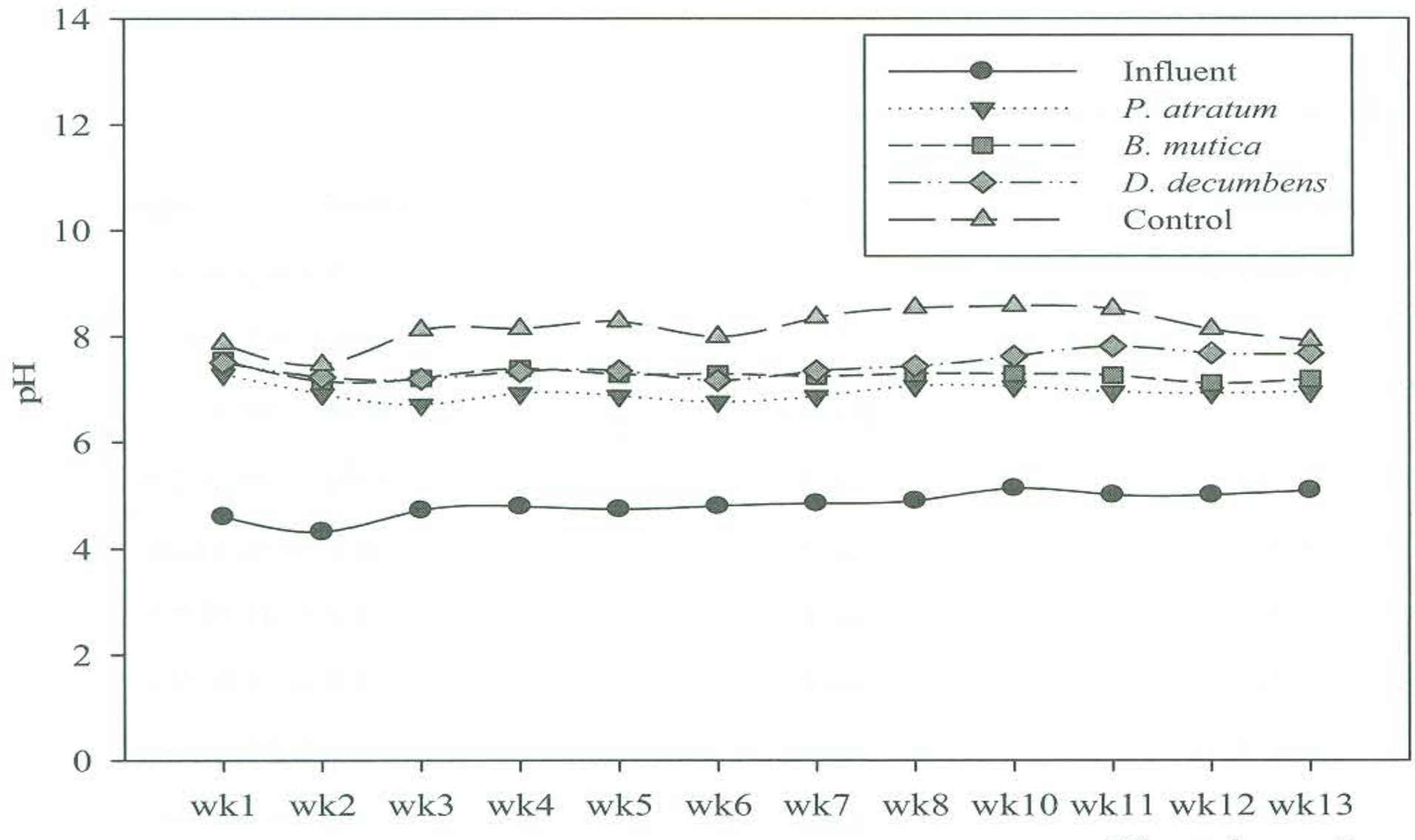
**ตารางที่ 2** Wastewater characteristics

| Parameters | Unit | Influent concentration |
|---|---|---|
| Temperature | °C | 28.1±1.5 (12) |
| pH | - | 4.8±0.2 (12) |
| EC | μS/cm | 974.1±188.8 (12) |
| COD | mg/L | 1191.3±306.5 (24) |
| $BOD_5$ | mg/L | 869.8±286.6 (16) |
| TSS | mg/L | 116.5±43.5 (22) |
| TDS | mg/L | 498.0±75.9 (24) |
| $NH_3$-N | mg/L | 3.69±2.71 (24) |
| TP | mg/L | 0.52±0.26 (24) |

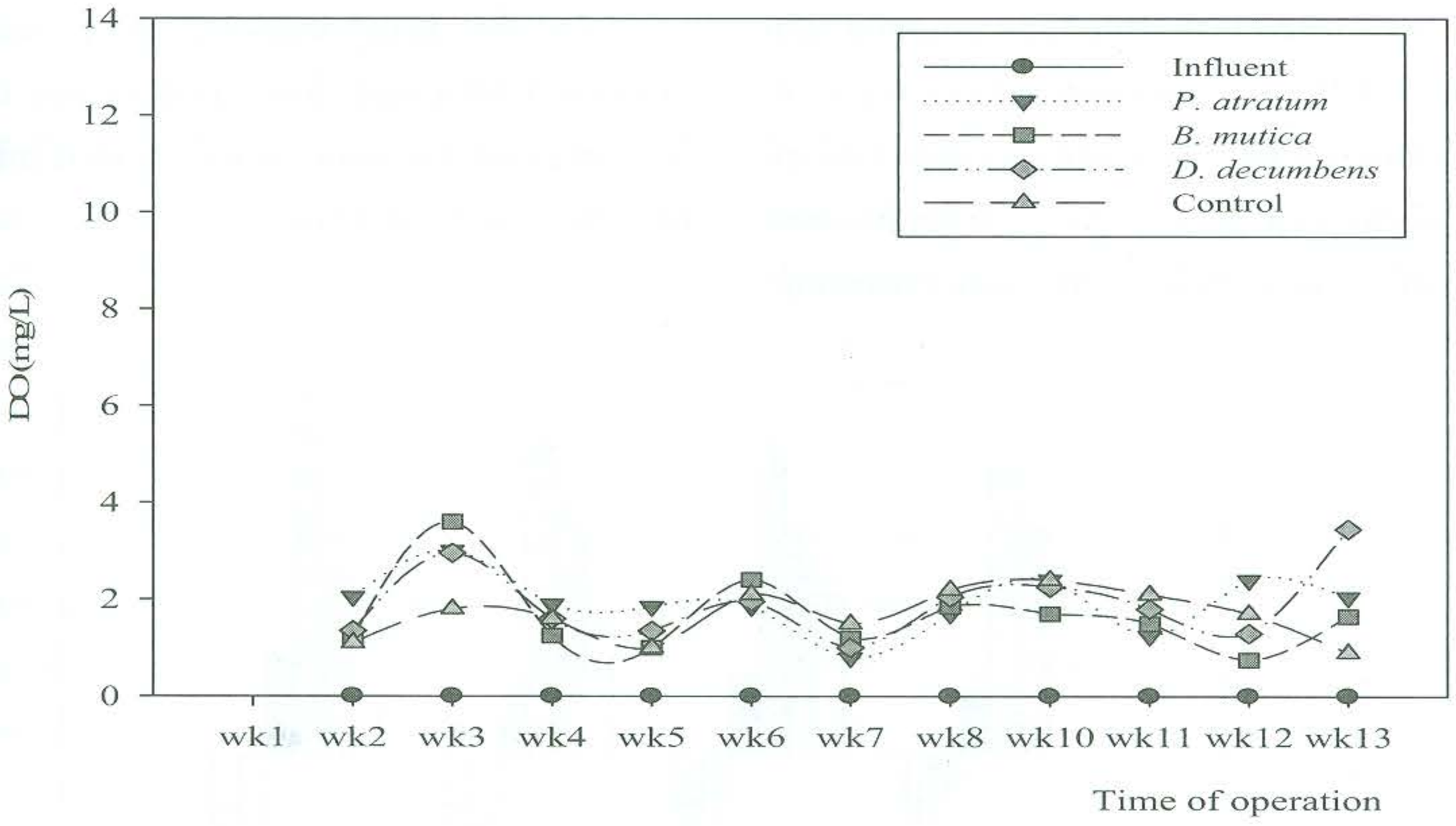
Note: Mean±SD are shown for influent concentration and sample size (n) are in parenthesis.



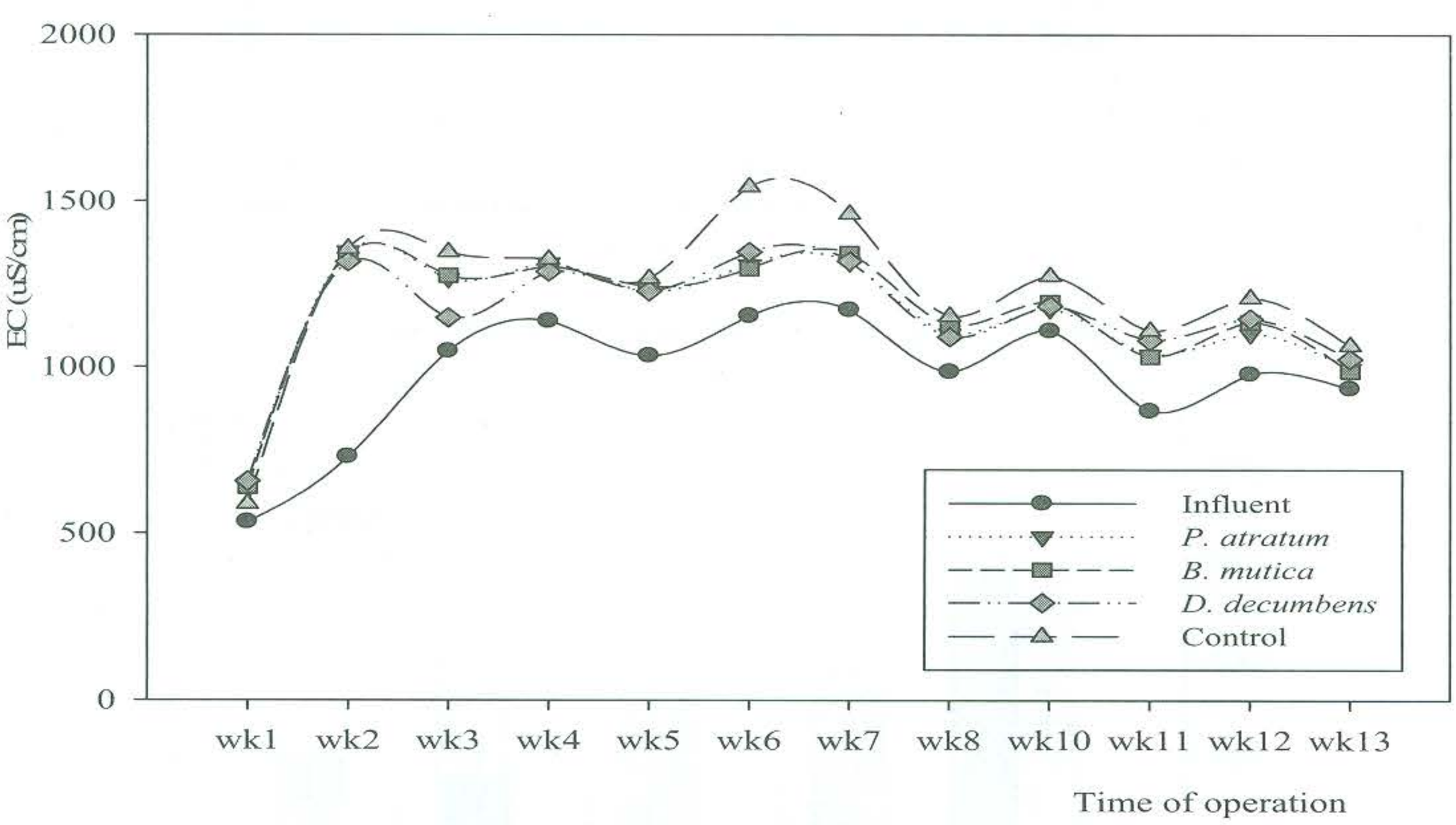

**รูปที่ 2** Temperature of influent and effluent of tested units




**รูปที่ 3** pH of influent and effluent of tested units




**รูปที่ 4** DO of influent and effluent of tested units

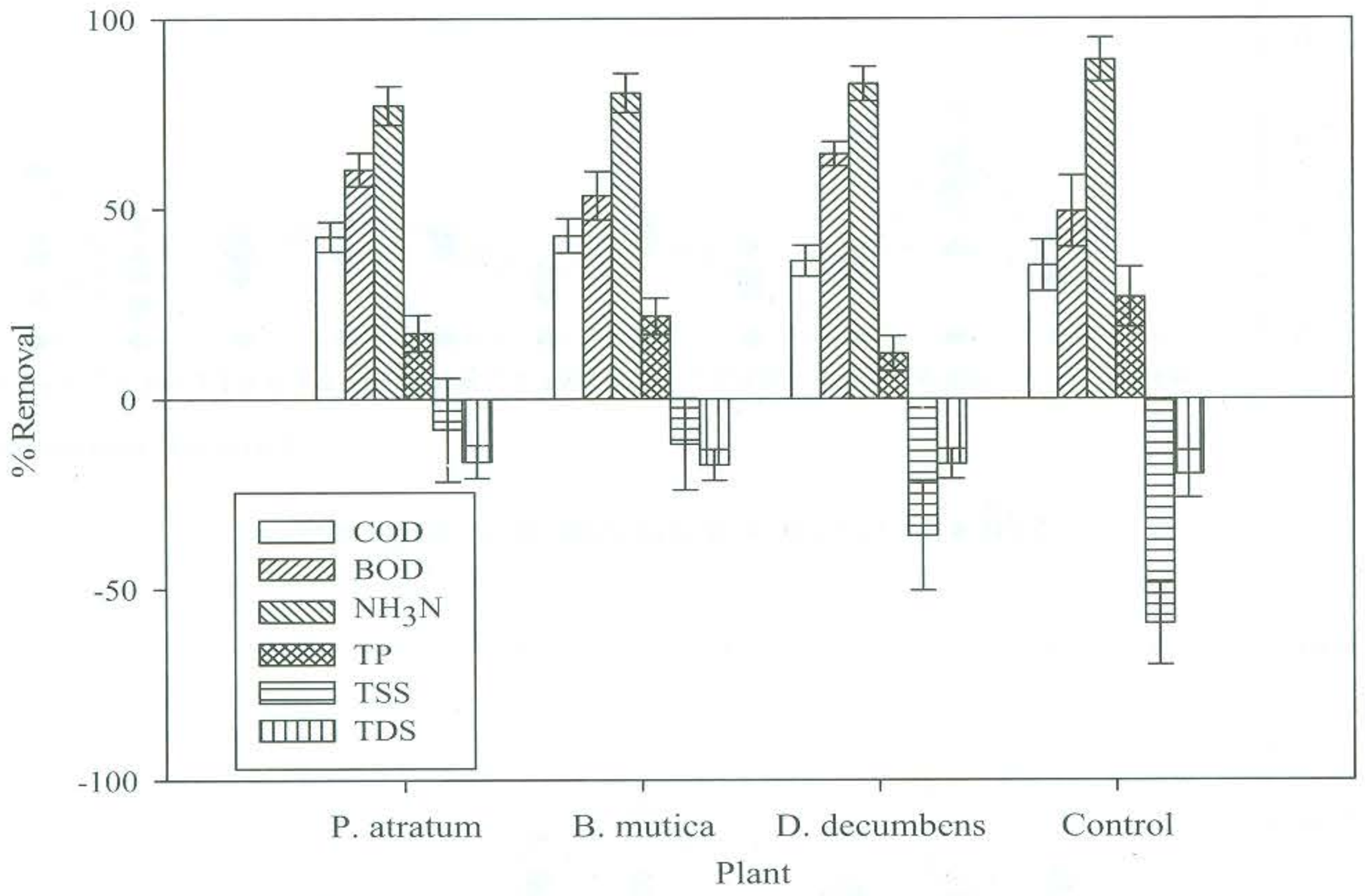



**รูปที่ 5** EC of influent and effluent of tested units

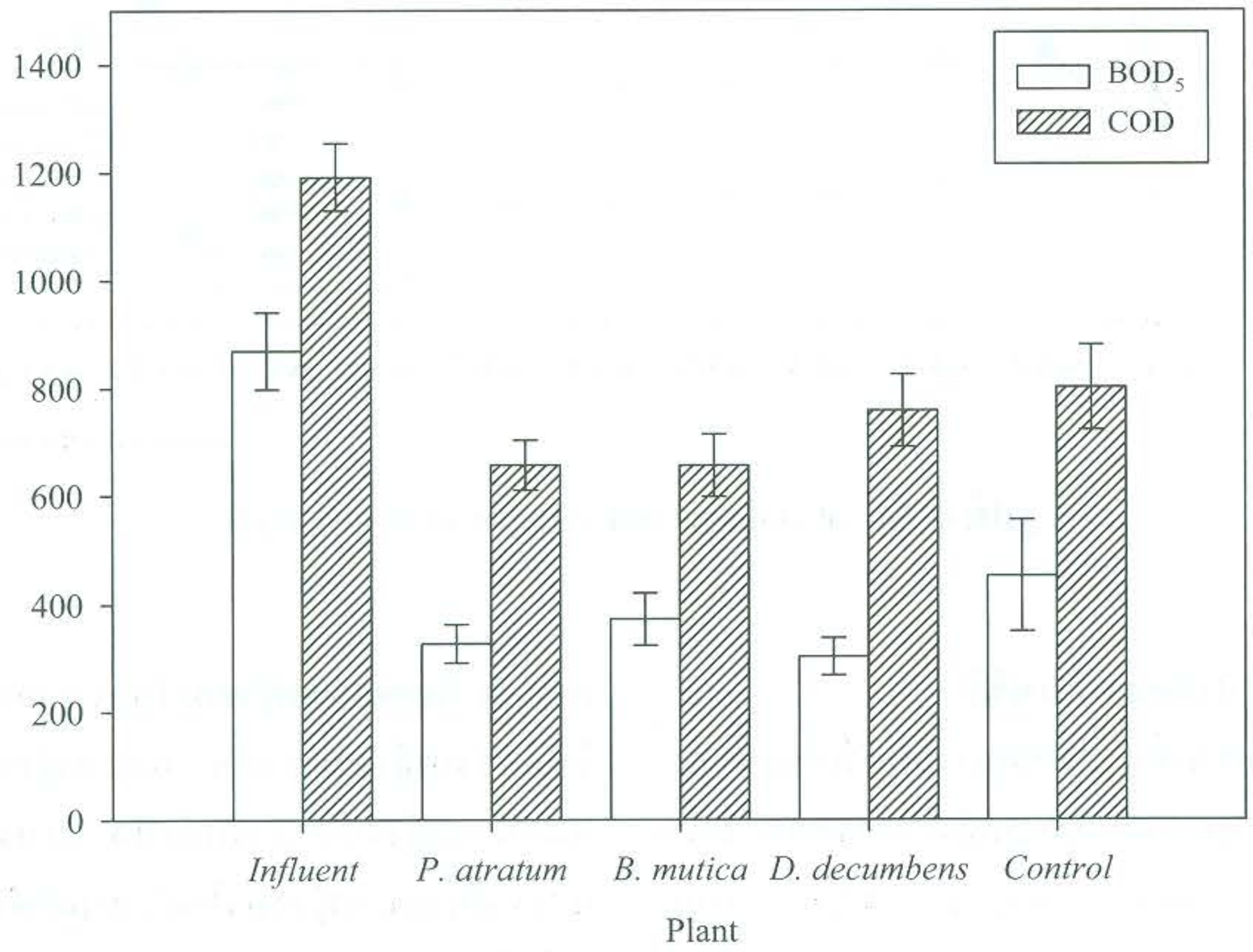
**2) การบำบัดสารอินทรีย์**

ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปของ $BOD_5$ และ COD โดยแปลงหญ้าอาหารสัตว์ มีค่าเฉลี่ยระหว่าง 53.4-64.4 % และ 36.3-42.9 % ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าประสิทธิภาพการบำบัดของแปลงควบคุม โดยพบว่าหญ้าแพงโกล่า สามารถบำบัด $BOD_5$ ได้ดีกว่าหญ้าอะตราตั้ม และหญ้าขน ตามลำดับ ขณะที่ หญ้าขนสามารถบำบัด COD ได้ดีกว่าหญ้าอะตราตั้ม และหญ้าแพงโกล่า ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการบำบัด $BOD_5$ และ COD ของ

ทุกแปลงรวมทั้งแปลงควบคุมไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (รูปที่ 6) ความเข้มข้นของ $BOD_5$ และ COD ในน้ำเสียหลังการบำบัดมีค่าลดลงและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับน้ำเสียก่อนบำบัด โดยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากแปลงหญ้าอาหารสัตว์ มีค่า $BOD_5$ 302.8-372.2 mg/L และมีค่า COD 656.3-758.4 mg/L ซึ่งต่ำกว่า $BOD_5$ และ COD ในน้ำเสียจากแปลงควบคุม (ภาพที่ 7) อย่างไรก็ตามพบว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ



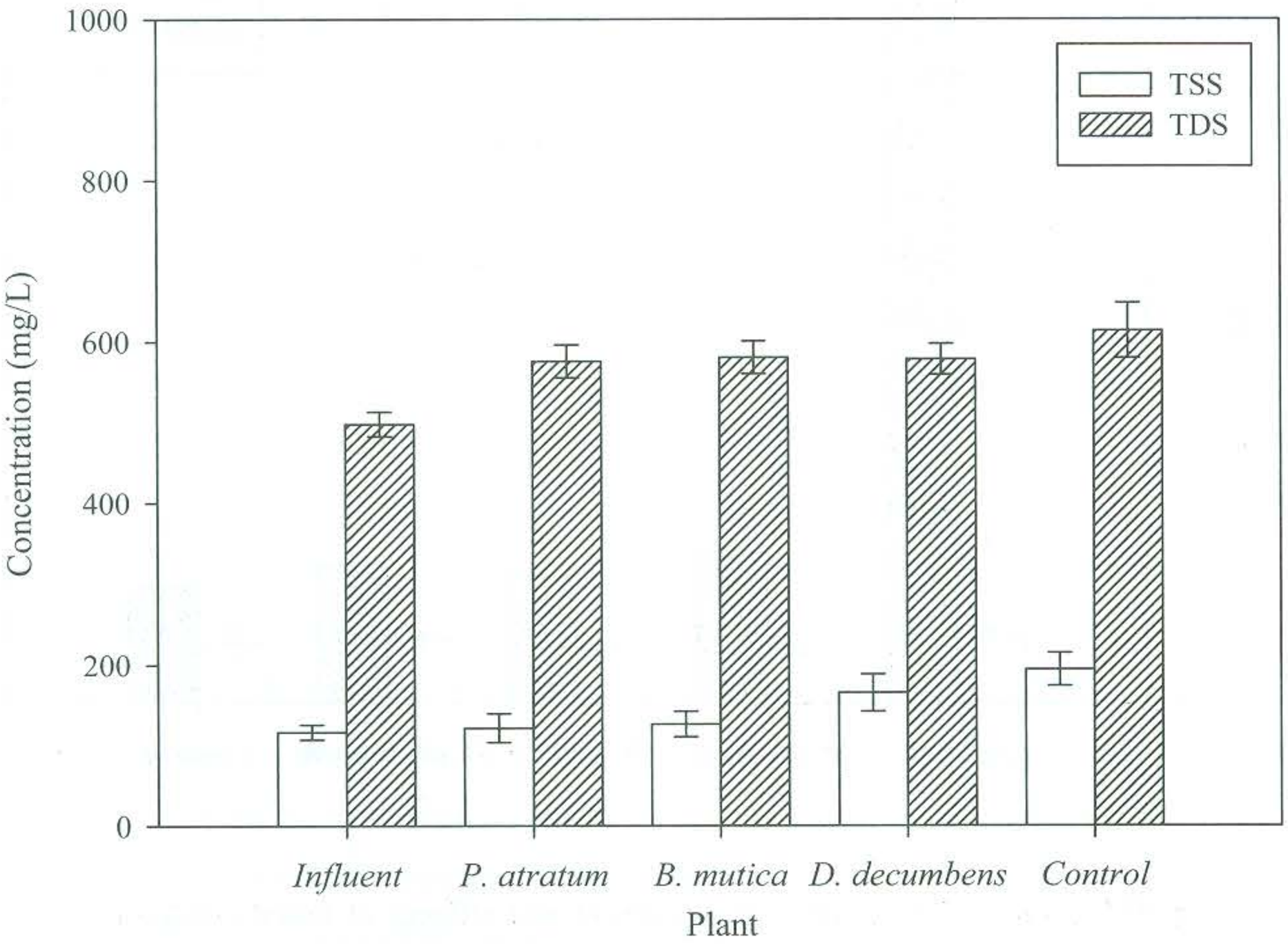

**รูปที่ 6** Average removal efficiency of tested condition




**รูปที่ 7** Average $BOD_5$ and COD in influent and effluent of tested condition

**3) การบำบัดของแข็ง**

ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งทั้งในรูปสารแขวนลอย (TSS) และสารละลาย (TDS) มีค่าเป็นลบ โดยของแข็งในน้ำหลังการบำบัดมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม พบว่าประสิทธิการบำบัด TSS มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ $P < 0.05$ โดยหญ้าอะตราตั้มบำบัด TSS ได้ดีกว่าหญ้าขน หญ้าแพงโกล่า และแปลงควบคุม ตามลำดับ (รูปที่ 6) ทั้งนี้หญ้าแพงโกล่าและแปลงควบคุมมีประสิทธิภาพการบำบัดไม่แตกต่างกัน สำหรับการบำบัด TDS นั้น พบว่าทุกแปลงมีประสิทธิภาพในการบำบัดไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยหญ้าอะตราตั้ม หญ้าแพงโกล่า หญ้าขน และแปลงควบคุม มีประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ยเท่ากับ -16.5, -17.1, -17.4 และ -19.8 % ตามลำดับ (รูปที่ 6) ผลการวิเคราะห์ พบว่าความเข้มข้นของ TSS ในน้ำหลังการบำบัดจากแปลงหญ้าอาหารสัตว์ทั้ง 3 ชนิด ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 121.4-165.0 mg/L ไม่มีความแตกต่างทางสถิติจากความเข้มข้นของ TSS ในน้ำเสียก่อนบำบัด (รูปที่ 8) ขณะที่ TSS ในน้ำเสียจากแปลงควบคุม ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 194.1 mg/L มีค่าสูงกว่า TSS ในน้ำเสียก่อนบำบัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ทั้งนีพบว่า TSS ในน้ำเสียจากแปลงหญ้าแพงโกล่าและแปลงควบคุมไม่แตกต่างกัน สำหรับ TDS ในน้ำเสียหลังการบำบัดนั้นพบว่ามีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 575.9-613.8 mg/L และมีค่าสูงที่สุดในน้ำเสียจากแปลงควบคุม (ภาพที่ 8) ซึ่งพบว่าไม่แตกต่างทางสถิติเมื่อเทียบกับ TDS ในน้ำเสียจากแปลงหญ้าอาหารสัตว์ทั้ง 3 ชนิด

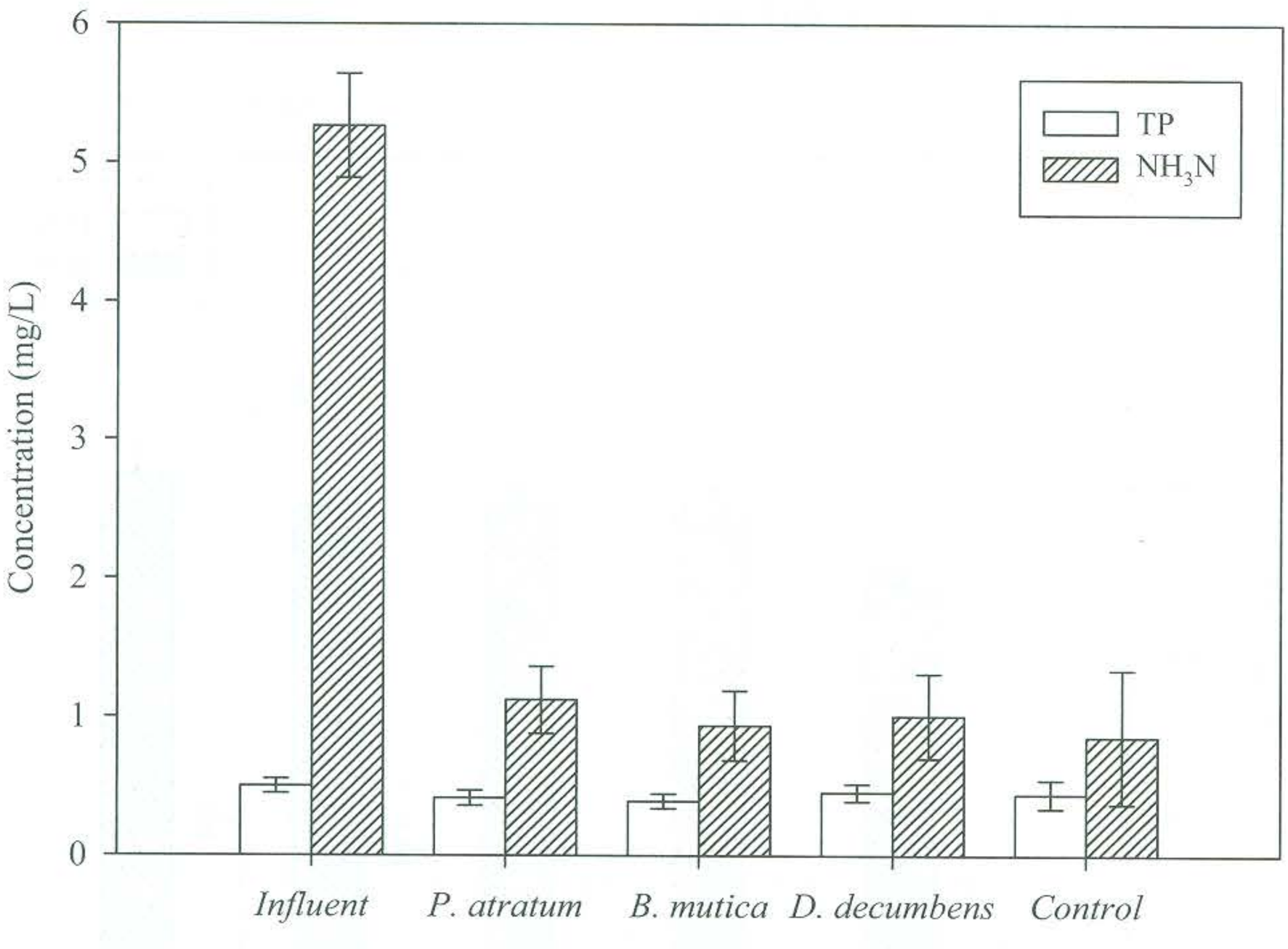



**รูปที่ 8** Average TSS and TDS in influent and effluent of tested condition

**4) การบำบัดธาตุอาหาร**

ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ($NH_3$-N) และการบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ของแปลงหญ้าอาหารสัตว์ ทั้ง 3 ชนิด และแปลงควบคุมไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยการบำบัด $NH_3$-N และ TP เท่ากับ 77.1-89.1 % และ 11.9-26.7 % (รูปที่ 6) โดยแปลงควบคุมมีประสิทธิภาพในการบำบัดธาตุอาหารทั้งสองประเภทสูงกว่าแปลงหญ้าอาหารสัตว์ ความเข้มข้นของ $NH_3$-N ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าเฉลี่ย 0.85-1.12 mg/L (รูปที่ 9)

ซึ่งต่ำกว่า $NH_3$-N ในน้ำเสียก่อนการบำบัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยพบ $NH_3$-N ในน้ำเสียจากแปลงควบคุมต่ำกว่า แปลงหญ้าขน หญ้าแพงโกล่า และหญ้าอะตราตั้ม ตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ขณะที่ความเข้มข้นของ TP ในน้ำเสียหลังการบำบัดมีค่าลดลง โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.39-0.46 mg/L (รูปที่ 9) ซึ่งพบว่าไม่มีความแตกต่างกันระหว่างหน่วยทดลอง ($P < 0.05$) และไม่มีความแตกต่างทางสถิติจากค่า TP ในน้ำเสียก่อนการบำบัด โดย TP ในน้ำเสียจากแปลงหญ้าขน มีค่าต่ำกว่าแปลงหญ้าอะตราตั้ม แปลงควบคุม และแปลงหญ้าแพงโกล่า ตามลำดับ (รูปที่ 9)




**รูปที่ 9** Average $NH_3$-N and TP in influent and effluent of tested condition.

## สรุปและวิจารณ์

### 1. การเจริญเติบโตของหญ้าอาหารสัตว์

ผลการตรวจวัดความสูงและมวลชีวภาพพบว่าหญ้าอาหารสัตว์ทั้ง 3 ชนิด สามารถเจริญเติบโตได้ในระบบบึงประดิษฐ์ เนื่องจากเป็นพืชที่สามารถทนต่อสภาพน้ำท่วมขังได้ระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม พบว่าหญ้าแพงโกล่า เจริญเติบโตได้ไม่ดีนัก ทั้งนี้เนื่องจากหญ้าแพงโกล่าทนต่อสภาพชื้นแฉะหรือพื้นที่น้ำท่วมขังได้ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ (สายัณห์ ทัดศรี, 2548) ขณะที่หญ้าอะตราตั้มและหญ้าขนเจริญเติบโตได้ดี ซึ่งหญ้าขนนั้น สายัณห์ ทัดศรี (2540), สายัณห์ ทัดศรี (2548) และ กอบแก้ว ตรงคงสิน (2535) ได้ระบุว่าเป็นหญ้าอาหารสัตว์ที่สามารถทนต่อสภาพน้ำท่วมขังเป็นระยะเวลานานๆ ได้ดีกว่าหญ้าชนิดอื่นๆ ขณะที่หญ้าอะตราตั้มสามารถปรับตัวในดินที่มีความชื้นสูงได้ดีเช่นเดียวกับหญ้าขน (สายัณห์, 2548) การขาดอากาศของ รากพืชภายใต้สภาพน้ำท่วมขัง โดยเฉพาะการท่วมขังจากน้ำที่มีมลสารปนเปื้อน ซึ่งทำให้ออกซิเจนในน้ำและดินบริเวณดังกล่าวถูกนำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายมลสารเหล่านั้น ทำให้สภาพการขาดอากาศของรากมีความรุนแรงมากขึ้นและส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ นอกจากนั้นสภาพความเป็นกรดของน้ำเสียก่อนการบำบัดอาจส่งผลต่อพืชด้วย ดังนั้นพืชที่สามารถเติบโตได้ในระบบจึงต้องเป็นพืชที่ทนต่อสภาพดินอุ้มน้ำและสามารถปรับตัวทนทานต่อมลสารที่ปนเปื้อนในน้ำเสียนั้น ทั้งนี้พบว่าหญ้าอะตราตั้มเจริญเติบโตได้ดีกว่าหญ้าขน และหญ้าแพงโกล่า ตามลำดับ ทั้งในระยะแรกและระยะที่ 2 ของการเก็บเกี่ยว โดยพบว่าภายหลังการเก็บเกี่ยวครั้งแรกนั้น พืชทั้ง 3 ชนิด มีอัตราการเติบโตด้านความสูงเพิ่มขึ้น และมีค่า RGR สูงขึ้นด้วย เนื่องจากพืชมีการผลิตมวลชีวภาพด้วยการแตกกอหรือแทงยอดใหม่เพิ่มขึ้นด้วย โดยพบว่ามวลชีวภาพของหญ้าขนและหญ้าแพงโกล่าในทั้งสองระยะเก็บเกี่ยวไม่แตกต่างกันทางสถิติ แม้ในระยะที่ 2 ของการเก็บเกี่ยว พืชจะมีระยะเวลาในการเจริญเติบโตที่สั้นกว่า ทั้งนี้เนื่องจากพืชมีการปรับตัวคุ้นเคยกับระบบ รวมถึงได้รับธาตุอาหารเพิ่มเติม จากธาตุอาหารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียที่ทำการบำบัด และเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตหญ้าอาหารสัตว์ในรอบ 1 ปี ของเกษตรกรทั่วไปที่ทำการปลูกในลักษณะเดียวกัน แต่ให้น้ำจากระบบชลประทานปกติ พบว่าหญ้าอะตราตั้มในระบบบึงประดิษฐ์ให้ผลผลิตน้ำหนักแห้งสูงกว่าการผลิตของเกษตรกร ขณะที่หญ้าขนให้ผลผลิตใกล้เคียงกับการผลิตของเกษตรกร แม้จะมีช่วงเวลาการผลิตที่สั้นกว่า (ประมาณ 3.5 เดือน) อย่างไรก็ตาม พบว่าหญ้าแพงโกล่าให้ผลผลิตต่ำกว่าการผลิตของเกษตรกรอย่างชัดเจน ทั้งนี้ ผลผลิตน้ำหนักแห้งของหญ้าอะตราตั้มของเกษตรกร มีค่าเฉลี่ย 3,000 kg/rai/yr (ศูนย์วิจัยอาหารสัตว์นครศรีธรรมราช, 2545 อ้างใน กรมปศุสัตว์, 2545ก) หญ้าขน มีค่าเฉลี่ย 1,827 kg/rai/yr (ทิพาและคณะ, 2532ข อ้างใน กรมปศุสัตว์, 2539) และหญ้าแพงโกล่า มีค่าเฉลี่ย 5,650 kg/rai/yr (สถานีอาหารสัตว์สุพรรณบุรี, 2545 อ้างใน กรมปศุสัตว์, 2545ข)

### 2. การบำบัดน้ำเสีย

น้ำเสียที่ทำการบำบัดเป็นน้ำเสียชุมชนที่ระบายจากโรงอาหารที่มีขนาดพื้นที่ 1,240 $m^2$ ซึ่งจัดเป็นน้ำทิ้งจากอาคารประเภท ข (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2547) เป็นน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ ของแข็งแขวนลอย ของแข็งละลาย และธาตุอาหารในปริมาณสูง ทำให้จุลินทรีย์กลุ่ม aerobic microorganism มีความต้องการใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสิ่งปนเปื้อนในปริมาณมาก จึงตรวจไม่พบ DO ในน้ำเสียก่อนบำบัด ขณะที่ค่า DO ของน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าสูงขึ้นแต่ยังคงอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งบ่งชี้ว่ายังคงมีมลสารปนเปื้อนในน้ำ โดยเฉพาะสารอินทรีย์ ซึ่งสัมพันธ์กับค่า $BOD_5$ ที่ตรวจพบในน้ำหลังการบำบัด น้ำเสียก่อนบำบัดมีค่า pH ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง แต่เมื่อผ่านการบำบัดค่า pH ของน้ำเพิ่มสูงขึ้น และอยู่ภายใต้เกณฑ์

มาตรฐานน้ำทิ้ง (pH = 5-9) ค่า EC ในน้ำหลังการบำบัดเพิ่มสูงขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของไอออนที่นำไฟฟ้าได้ ซึ่งได้จากการย่อยสลายเปลี่ยนรูปมลสาร โดยเฉพาะการเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์เป็นสารอนินทรีย์ ซึ่งค่า EC ที่สูงขึ้นนี้สอดคล้องกับค่า TDS ซึ่งมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน อุณหภูมิของน้ำเสียมีค่าผันแปรตามอุณหภูมิอากาศเป็นหลัก อย่างไรก็ตาม การบดบังแสงของพืชในระบบบึงประดิษฐ์ ทำให้น้ำเสียจากบึงประดิษฐ์มีอุณหภูมิต่ำกว่าน้ำเสียจากแปลงควบคุมเล็กน้อย

น้ำเสียหลังการบำบัดมีค่า $BOD_5$ และ COD ลดลง แต่ยังคงสูงเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งชุมชน ประเภทน้ำทิ้งจากอาคารประเภท ข ซึ่งกำหนดให้มี $BOD_5$ ได้ไม่เกิน 30 mg/L (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2547) โดยแปลงหญ้าอาหารสัตว์มีประสิทธิภาพการบำบัด $BOD_5$ และ COD สูงกว่าแปลงควบคุม แต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็ง ของทั้งแปลงหญ้าอาหารสัตว์ และแปลงควบคุมที่ทำการศึกษา พบว่ามีค่าเป็นลบ เนื่องจากการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนของสาหร่ายในระบบซึ่งทำให้น้ำหลังการบำบัดมีสีเขียว และผลการตรวจวัด Chlorophyll a ในน้ำหลังการบำบัดพบว่ามีค่าสูงขึ้น เมื่อเทียบกับ Chlorophyll a ในน้ำเสียก่อนบำบัด (0-42.7 mg/L) โดยมีค่าเฉลี่ย 143.2-185.4 mg/L ทั้งนี้พบว่าน้ำจากแปลงควบคุม มีค่า Chlorophyll a สูงที่สุด รองลงมาคือน้ำที่ผ่านการบำบัดจากแปลงหญ้าแพงโกล่า หญ้าขน และหญ้าอะตราตั้ม ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการตรวจวัด TSS ในน้ำเสียหลังบำบัด และประสิทธิภาพการบำบัด TSS ของแต่ละแปลง ซึ่งพบว่าแปลงควบคุมมีประสิทธิภาพการบำบัด TSS ต่ำที่สุด และน้ำเสียจากแปลงควบคุมมีค่า TSS สูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากแปลงควบคุมไม่มีพืชช่วยกำบังลม ซึ่งจะช่วยลดการฟุ้งกระจายของ TSS จากพื้นท้องน้ำ นอกจากนั้นสาหร่ายในแปลงควบคุมยังได้รับแสงแดดและใช้ธาตุอาหารจากน้ำเสียได้อย่างเต็มที่ จึงเติบโตและเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว ขณะที่พืชในบึงประดิษฐ์ช่วยบดบังลมและแสงแดด และช่วยดูดซึมธาตุอาหารไปใช้ในการเจริญเติบโต (Brix, 1997) การเพิ่มจำนวนของสาหร่าย นอกจากจะเพิ่มปริมาณ TSS แล้ว ยังเพิ่มสารอินทรีย์ให้กับระบบด้วย (Klomjek and Nitisoravut, 2005) นอกจาก TSS แล้ว ยังพบว่า TDS ในน้ำหลังการบำบัดมีค่าสูงขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลจากการย่อยสลายเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ไปเป็นสารอนินทรีย์ ทั้งนี้พบว่าทั้ง TSS และ TDS ในน้ำเสียหลังการบำบัด ยังคงมีค่าสูงเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งชุมชน ประเภทน้ำทิ้งจากอาคารประเภท ข ซึ่งกำหนดให้มี TSS ไม่เกิน 40 mg/L และให้ TDS มีค่าเพิ่มขึ้นจากปริมาณในน้ำตามปกติ ไม่เกิน 500 mg/L สำหรับการบำบัดมลสารประเภทธาตุอาหารนั้น พบว่าแปลงหญ้าอาหารสัตว์สามารถบำบัด $NH_3$-N ได้ดี แม้ระบบจะเคยได้รับปุ๋ยไนโตรเจนในขณะทำการปลูก โดยประสิทธิภาพการบำบัด $NH_3$-N ของแปลงหญ้าอาหารสัตว์ทั้ง 3 ชนิด และแปลงควบคุมไม่แตกต่างกันทางสถิติ ทั้งนี้ในระบบบึงประดิษฐ์นั้นมีกระบวนการในการบำบัดธาตุอาหารหลายกระบวนการด้วยกัน ได้แก่ กระบวนการ Nitrification กระบวนการ Denitrification และ Plant assimilation เป็นต้น (Vymaza, 2007) จึงทำให้ระบบสามารถบำบัดธาตุอาหารได้ดี สำหรับกระบวนการบำบัดธาตุอาหารของบึงประดิษฐ์ที่แตกต่างจากระบบบำบัดอื่น คือการดูดซึมธาตุอาหารไปใช้โดยพืชในระบบ (Brix, 1994) ซึ่งส่งผลให้หญ้าอาหารสัตว์ภายในระบบสามารถเจริญเติบโตและสร้างมวลชีวภาพได้สูง แม้ไม่ได้รับปุ๋ยซ้ำทั้งในระหว่างปลูกและภายหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งต่างจากการปฏิบัติของเกษตรกร อย่างไรก็ตามกระบวนการบำบัด $NH_3$-N ที่พบในบึงประดิษฐ์ ยกเว้นการดูดซึมโดยพืช สามารถเกิดขึ้นในแปลงควบคุมได้เช่นกัน ส่วนการบำบัด TP ซึ่งเป็นธาตุอาหารพืชที่สำคัญประการหนึ่งนั้น พบว่าแม้แปลงหญ้าอาหารสัตว์ โดยเฉพาะแปลงหญ้าแพงโกล่า และหญ้าอะตราตั้ม จะได้รับปุ๋ยฟอสฟอรัสระหว่างการปลูก แต่พบว่าประสิทธิภาพการบำบัด TP

ของแปลงหญ้าอาหารสัตว์และแปลงควบคุมไม่แตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งบ่งชี้ได้ว่า แปลงหญ้าอาหารสัตว์สามารถบำบัด TP ได้ดีกว่าแปลงควบคุม ซึ่งไม่มีการเติมปุ๋ยฟอสฟอรัส ทั้งนี้ ประสิทธิภาพการบำบัด TP ของแปลงหญ้าอาหารสัตว์ทั้ง 3 ชนิด และแปลงควบคุมมีค่าไม่สูงนัก ทำให้ค่าของ TP ในน้ำเสียหลังการบำบัดต่ำกว่าค่าของ TP ในน้ำเสียก่อนบำบัดไม่มากนัก และไม่แตกต่างกันทางสถิติ อย่างไรก็ตาม TP ที่ถูกบำบัดในระบบบึงประดิษฐ์อาจถูกปลดปล่อยกลับคืนให้กับน้ำเสียได้ บึงประดิษฐ์จึงเป็นระบบที่ไม่เสถียรนักในการบำบัด TP (U.S. EPA, 2000; Kadlec and Knight, 1996)

จากการศึกษา พบว่าหญ้าอาหารสัตว์ที่ศึกษาสามารถเจริญเติบโตได้ในระบบบึงประดิษฐ์ โดยหญ้าอะตราตั้มสามารถเจริญเติบโตและผลิตมวลชีวภาพได้ดีกว่าหญ้าขน และหญ้าแพงโกล่า ซึ่งผลผลิตที่ได้จากระบบสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเลี้ยงสัตว์ได้ ในส่วนของการบำบัดนั้น พบว่าบึงประดิษฐ์ที่ทำการศึกษา สามารถบำบัดสารอินทรีย์ในรูป $BOD_5$ และ COD และธาตุอาหารในรูป $NH_3$-N และ TP ได้ โดยประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของแปลงหญ้าอาหารสัตว์ มีค่าสูงกว่าแปลงควบคุม ขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหารของแปลงควบคุมสูงกว่าแปลงหญ้าอาหารสัตว์ ทั้งนี้ส่วนหนึ่งเป็นผลจากแปลงหญ้าอาหารสัตว์เคยได้รับปุ๋ยขณะทำการปลูกก่อนแล้ว โดยเฉพาะแปลงหญ้าอะตราตั้มและหญ้าแพงโกล่า ซึ่งได้ปุ๋ยสูตร 15-15-15 ที่มีทั้งไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม เป็นองค์ประกอบ ทั้งนี้พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์และธาตุอาหารของทุกหน่วยทดลองไม่แตกต่างกันทางสถิติ และประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งของทุกหน่วยทดลองมีค่าเป็นลบ โดยหญ้าอะตราตั้มสามารถบำบัดของแข็งทั้ง TSS และ TDS ได้ดีกว่าหญ้าขน หญ้าแพงโกล่า และแปลงควบคุม ทั้งนี้พบว่าประสิทธิภาพการบำบัด TSS มีความแตกต่างกันทางสถิติ ขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัด TDS ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งผลการศึกษาที่พบนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการจัดการน้ำเสียตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้การสนับสนุนด้านงบประมาณ และพื้นที่ศึกษาวิจัย และขอขอบคุณ ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม และคณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม ที่เอื้อเฟื้อให้การสนับสนุนห้องปฏิบัติการและอำนวยความสะดวกอื่นๆ อันทำให้การศึกษาวิจัยนี้สามารถดำเนินการจนสำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2546). เล่ม 4 เทคนิคการบำบัดน้ำเสียบางวิธี การนำน้ำทิ้งมาใช้ประโยชน์และการทดสอบพิษวิทยาสำหรับน้ำทิ้ง. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 1-33.

กรมปศุสัตว์. (2539). หญ้าขน. รายงานผลงานวิชาการ กองอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

กรมปศุสัตว์. (2545ก). หญ้าอะตราตั้ม. เอกสารคำแนะนำ กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด

กรมปศุสัตว์. (2545ข). หญ้าแพงโกล่า. เอกสารคำแนะนำ กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด

กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม. (2547). พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. ๒๕๓๕ และกฎกระทรวง ประกาศกฎกระทรวง ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ออกตาม

ความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. ๒๕๓๕ เล่มที่ ๑ (พ.ศ. ๒๕๓๕ - พ.ศ. ๒๕๔๑). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ดอกเบี้ย. 41-44.

กอบแก้ว ตรงคงสิน. (2535). พืชอาหารสัตว์เขตร้อน. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 88-94.

สายัณห์ ทัดศรี. (2540). พืชอาหารสัตว์เขตร้อน: การผลิตและการจัดการ. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ลินคอร์น. 76-91.

สายัณห์ ทัดศรี. (2548). หญ้าอาหารสัตว์และหญ้าพื้นเมืองในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 87-208.

APHA, AWWA, WPCF. (1992). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th edition. American Public Health Association Inc., Washington D.C, USA.

Brix, H. (1994). Functions of macrophytes in constructed wetland. Water Science and Technology. 29(4): 71-78.

Brix, H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetland? Water Science and Technology. 35(5): 11-17.

Davis, L. (1995). A Handbook of Constructed Wetlands: A Guide to Creating Wetlands for Agricultural Wastewater, Domestic Wastewater, Coal Mine Drainage, Stormwater in the Mid-Atlantic Region 3. US Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service. 31-37.

Kadlec, R.H. and Knight, R.L. (1996). Treatment Wetlands. Lewis Publishers, Florida. 456-457.

Klomjek, P. and Nitisoravut, S (2005). Constructed wetland: a study of eight plant species under saline conditions. Chemosphere. 58(5): 585-593.

U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency). (2000). Constructed Wetland Treatment of Municipal Wastewaters. Cincinnati, Ohio. 12-48.

Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. Science of The Total Environment. 380(1-3):48-65.

ว.วิทย. มข. 36(4) 327-337 (2551) KKU Sci. J.36(4) 327-337 (2008)

# ประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียด้วยถ่านกัมมันต์กะลามะพร้าว

# Adsorption Effectiveness of Sulfide Ion in Wastewater by Coconut-Shell Activated Carbons

*สรัญญา ธนสัมฤทธิ์[1*], นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์[1], วิทยา ปั้นสุวรรณ[2]*


## บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการศึกษาการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียด้วยถ่านกัมมันต์ 2 ชนิดคือ ถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนที่ผลิตจากกะลามะพร้าวและถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนที่ผลิตจากถ่านกะลามะพร้าว โดยทำการทดลองแบบแบทช์ในห้องปฏิบัติการเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่างๆ ในการดูดซับ ได้แก่ พีเอช ระยะเวลาปั่นกวน ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนและปริมาณของถ่านกัมมันต์ พร้อมทั้งศึกษาการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยผ่านคอลัมน์ และการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์หลังจากผ่านการใช้งานแล้ว ผลการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดมีสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนที่พีเอช 4 ระยะเวลาปั่นกวนและระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 30 นาที ความเข้มข้นของซัลไฟด์ 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณของถ่านกัมมันต์ 1 กรัม ซึ่งผลการศึกษานี้ใช้ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทั้งนี้ข้อมูลดังกล่าวยังแสดงสภาวะสมดุลที่สอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์อีกด้วย เมื่อนำถ่านกัมมนต์ทั้ง 2 ชนิดมาดูดซับโดยให้ไหลผ่านคอลัมน์ตลอด พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนสามารถดูดซับซัลไฟด์ไอออนได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนที่ร้อยละ 94.63 และ 89.91 ตามลำดับ และผลของการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานแล้ว พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนสามารถฟื้นฟูสภาพได้ดีกว่า ถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุน จึงเหมาะสมที่จะนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้อีก

## ABSTRACT

This study was performed in order to examine sulfide ion adsorption using two types of activated carbon. The general carbon was made from coconut shell whereas the activated carbon was made from coconut charcoal. Laboratory experiment was conducted in batch process to define the adsorption optimum


[1] วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ 10900

[2] ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ 10900

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

condition. There were factors affected the condition involving pH, shaking time, contact time, concentration of sulfide ion and quantity of adsorption carbon. Together with adsorption through column and recovery of carbon. The results with the 95 percent confident interval revealed that both types of carbons had optimum condition with the pH 4, 30 minutes of shaking time and contact time, 1,000 milligram per liter of sulfide ion in 100 milliliter solution, and 1 gram of carbon.

In addition, the observed optimum condition also conformed to the Langmuir equation. In case of column adsorption, activated carbon with the 94.63 percent performed greater adsorption than the general one with the 89.91 percent. Meanwhile, recovery of used carbon shown that activated carbon recovered easier than of general one. Thus, this is considered to be renewable type of adsorption agent.

## บทนำ

ในปัจจุบันความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีและการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจ ทำให้มนุษย์นำทรัพยากรมาใช้อย่างรวดเร็วเพื่อสนองตอบต่อความต้องการพื้นฐานของมนุษย์ในการดำรงชีวิต จากจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้นนั้นส่งผลทำให้มีการใช้ทรัพยากรที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย น้ำเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีความสำคัญและจำเป็นสำหรับใช้ในการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมาก เนื่องจากมนุษย์ต้องใช้น้ำในการอุปโภคบริโภค การเกษตรกรรม การอุตสาหกรรม การคมนาคม ตลอดจนเป็นแหล่งรองรับของเสียจากกิจกรรมต่างๆ ทำให้น้ำที่ผ่านการใช้ประโยชน์นั้นเกิดสิ่งสกปรกและสารเคมีตกค้างอยู่เป็นจำนวนมาก และถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ทำให้สภาพน้ำในแหล่งน้ำเสื่อมคุณภาพจนไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้

ปัญหามลพิษทางน้ำที่เกิดจากซัลไฟด์ไอออนก็เป็นปัญหาหนึ่งที่มักเกิดขึ้นในน้ำเสียชุมชน ซึ่งเมื่อซัลไฟด์ไอออนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนในน้ำจะเกิดเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ หรือที่เรียกกันว่าแก๊สไข่เน่า จะทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบท่อรวบรวมน้ำเสียและมีกลิ่นไม่พึงประสงค์เกิดขึ้น (มั่นรักษ์ ตัณฑุลเวศม์, ม.ป.ป.) ในการแก้ไขปัญหาที่สำคัญของการเกิดปัญหามลพิษทางน้ำจำเป็นต้องบำบัดคุณภาพน้ำให้ต่ำกว่าหรืออยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติโดยความร่วมมือของทุกคน

วิธีการบำบัดคุณภาพน้ำเสียโดยทั่วไปแล้วมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น การตกตะกอนทางธรรมชาติ การเติมสารเคมี การแลกเปลี่ยนไอออน การใช้เทคโนโลยีหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อช่วยดูดซับสารพิษที่เจือปนในน้ำ ทั้งช่วยเพิ่มแก๊สออกซิเจนในน้ำ เป็นต้น แต่เนื่องจากวิธีการเหล่านี้ต้องใช้เทคโนโลยีและต้นทุนสูง ถ้าสามารถหาทางเลือกอื่นในการบำบัดคุณภาพน้ำเสียได้โดยการนำวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์ก็จะเป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียโดยไม่มีผลตกค้างในเรื่องของสารเคมีและใช้ต้นทุนต่ำกว่าอีกด้วย

การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย เป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) ซึ่งกลไกในการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ การแพร่

ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ การแพร่ผ่านภายในเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ และปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับดูดติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ เช่น พีเอช ที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ จึงมีผลกระทบต่อการดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ดี ความปั่นป่วนที่อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ film diffusion หรือ pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ดังนั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ และเวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดติดผิว และอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิว (นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์, 2550)

ถ่านกัมมันต์มีความพรุน (porosity) มากกว่าถ่านธรรมดา ทำให้ถ่านมีพื้นที่ผิวภายใน (internal surface area) เพิ่มขึ้นสามารถดูดซับกลิ่นและสีได้มากกว่าถ่านธรรมดา การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้กระทำได้โดยไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบเสียก่อน จากนั้นจึงเผาวัตถุดิบที่แห้งให้เป็นถ่านที่อุณหภูมิประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส ถ่านที่ได้ยังมีอำนาจการดูดติดผิวต่ำเนื่องจากโพรงภายในคาร์บอนยังมีทาร์ (tar) อุดตันอยู่ ถ่านนี้ต้องเผาต่อไปที่อุณหภูมิประมาณ 700-950 องศาเซลเซียส ภายใต้ความชื้นที่เหมาะสมเพื่อไล่ทาร์ออกให้หมดจึงจะได้ถ่านกัมมันต์ วัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์มีหลายชนิด เช่น กระดูกสัตว์ ถ่านหินบางชนิด กะลามะพร้าว เมล็ดในของผลไม้บางชนิด ฯลฯ เทคโนโลยีในปัจจุบันสามารถทำให้ถ่านกัมมันต์หนัก 1 กรัม ที่พื้นที่ผิวประมาณ 600-1,000 ตารางเมตร (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538) ถ่านกัมมันต์ที่ใช้มี 2 แบบ คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powdered Activated Carbon) มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 0.8 มิลลิเมตรและถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon) มีขนาดอนุภาคมากกว่า 0.8 มิลลิเมตร โดยทั่วไปจะใช้ชนิดใดก็ได้ แล้วแต่ความเหมาะสมของการใช้งาน

ดังนั้นการที่จะนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตมาจากวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติมาบำบัดน้ำเสียจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจทางหนึ่ง

## วิธีการวิจัย

1. การเตรียมถ่านกัมมันต์

1) ถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุน (carbonated carbon) ผลิตจากถ่านกะลามะพร้าว โดยนำถ่านกัมมันต์มาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น หลังจากนั้นนำถ่านกัมมันต์มาบดให้ละเอียดเป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 425 ไมครอน เก็บผงถ่านกัมมันต์ที่ผ่านจากการร่อนไว้ใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป

2) ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุน(activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์สำเร็จรูป

3) วัดค่าพีเอชเริ่มต้นของถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิด โดยชั่งถ่านกัมมันต์ปริมาณ 5 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง แล้ววัดค่าพีเอชของสารละลาย พบว่าค่าพีเอชของถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนและถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนมีค่าเท่ากับ 9.9 และ 9.5 ตามลำดับ

2. การเตรียมกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน เตรียมกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน ($S^{2-}$) ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 5, 7 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร โดยเจือทำจางมาจากสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร หลังจากนั้นนำมา 50 มิลลิลิตร ในแต่ละความเข้มข้น เติมสารละลาย alkaline antioxidant reagent จำนวน 0.5 มิลลิลิตร (Michael. et al, 1982) คนให้เข้ากัน และนำไปตรวจวัดโดยใช้ด้วย Silver Sulfide Ion-Selective Combination Electrode ค่าที่ได้ออกมาจะเป็นค่าต่างศักย์ไฟฟ้ามีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์ และจะใช้วิธีนี้ในการศึกษาหาปริมาณซัลไฟด์ไอออน (คณิตา ตังคณานุรักษ์, 2542)

3. การเตรียมสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน เตรียมสารละลายซัลไฟด์ไอออนมาตรฐาน 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากโซเดียมซัลไฟด์ โดยการชั่งโซเดียมซัลไฟด์ 2.44 กรัม ถ่ายลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นในปริมาณพอเหมาะ เขย่าให้โซเดียมซัลไฟด์ละลาย จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร เขย่าให้เข้ากันและปิดจุก จะได้สารละลายตามต้องการ

4. ศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ด้วยการทดลองแบบแบทช์(batch process) ดังแสดงในรูปที่ 1(นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์, 2550) ได้แก่

1) พีเอชเริ่มต้นของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน ได้แก่ 3, 4 และ 5

2) ระยะเวลาปั่นกวน(shaking time) ได้แก่ 10, 30, 50, 70 และ 90 นาที

3) ระยะเวลาสัมผัส(contact time) ได้แก่ 10, 30, 50, 70 และ 90 นาที

4) ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออน ได้แก่ 800, 1,000, 1,200, 1,400 และ 1,600 มิลลิกรัม/ลิตร

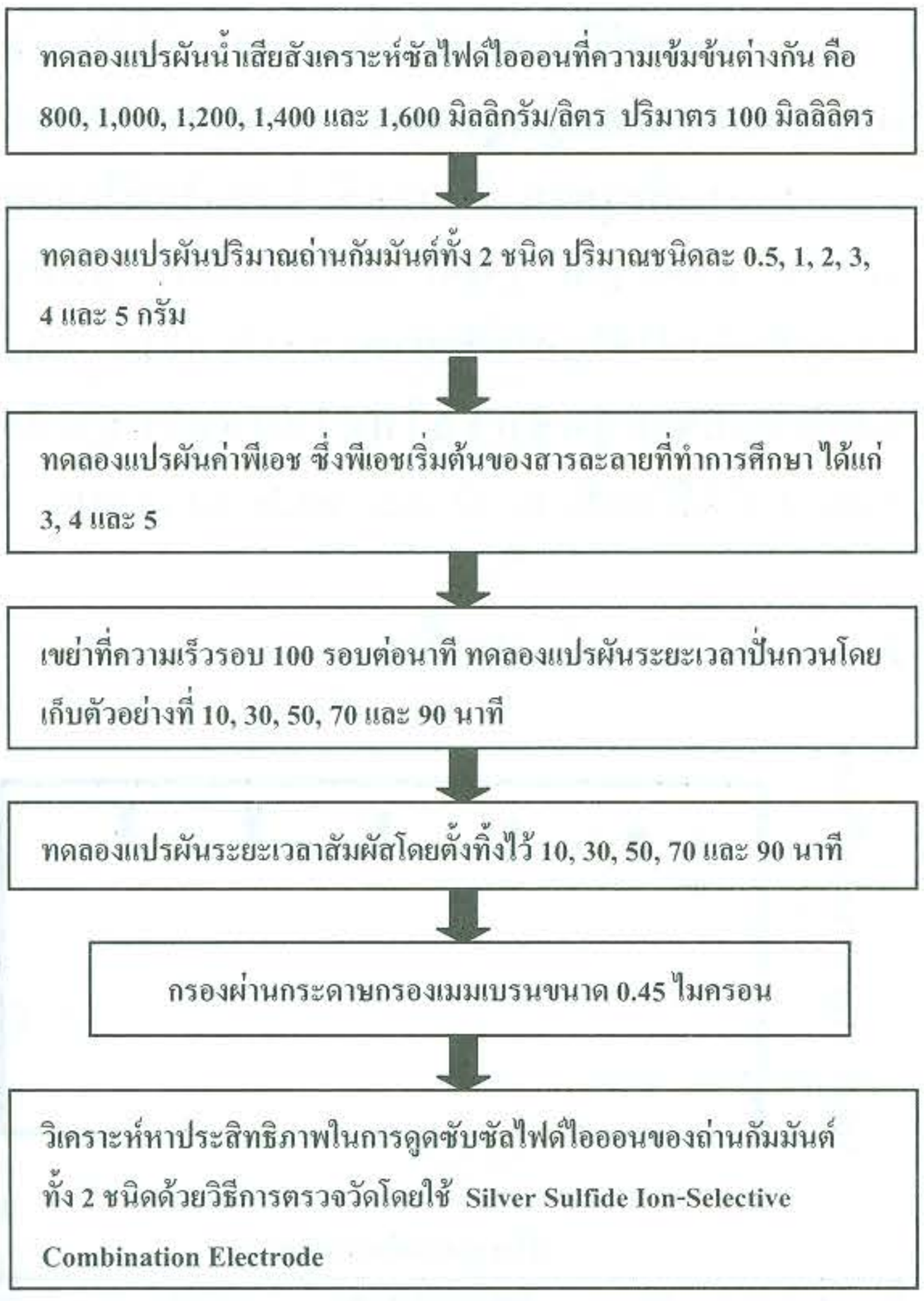
5) ปริมาณถ่านกัมมันต์ ได้แก่ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม

6) ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยใช้สมการการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดิช (Babu and Ramakrishna, 2002)

5. นำสภาวะที่เหมาะสมที่ได้ไปศึกษาการดูดซับในน้ำเสียจริงจากเทศบาลเมืองเพชรบุรี

6. การดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์ใช้สารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลอง ให้ไหลผ่านคอลัมน์อะคริลิก ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ 20 กรัม จากนั้นปล่อยสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ไอออนให้ไหลผ่านคอลัมน์ โดยเก็บตัวอย่างสารละลายมาตรฐานจากทางออกปลายคอลัมน์ทุกๆ 50 มิลลิลิตร จนครบปริมาตร 250 มิลลิลิตร และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เหลือจากการดูดซับ

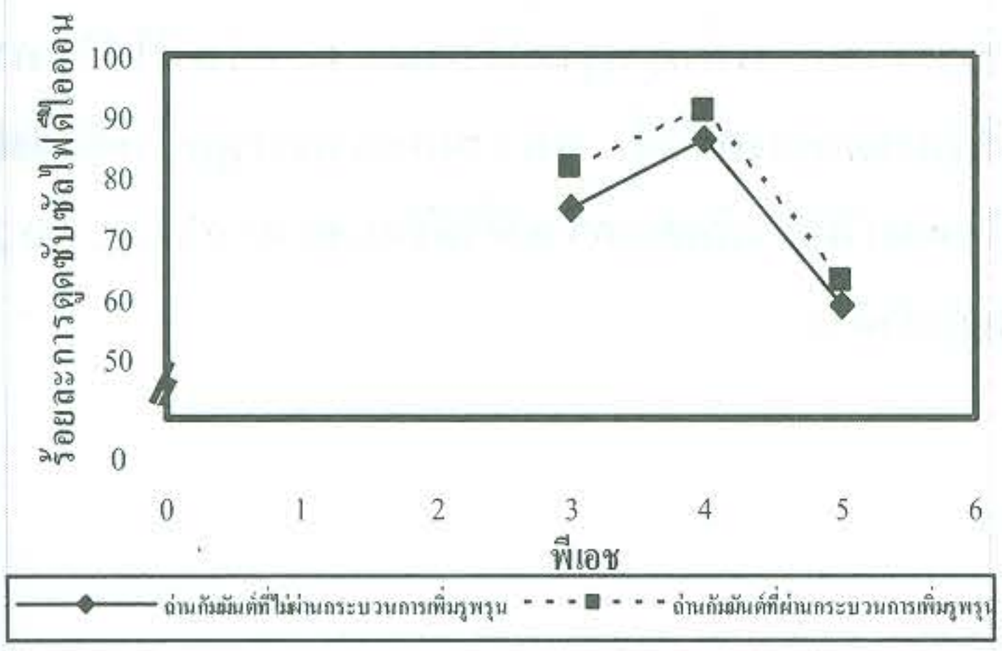
7. การฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วโดยนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วมาล้างแล้วแช่ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วล้างและนำไปอบให้แห้ง




**รูปที่ 1** ภาพแสดงกระบวนการทดลองแบบแบทช์

## ผลการวิจัย

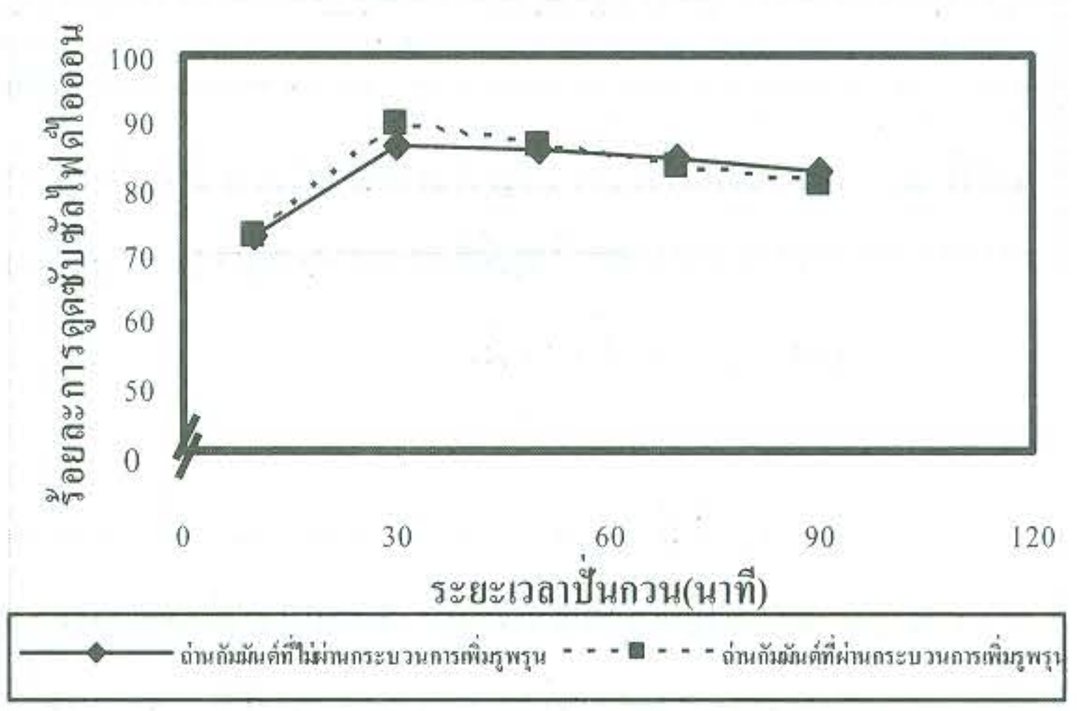
### 1. ผลของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ซัลไฟด์ไอออน




**รูปที่ 2** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของถ่านกัมมันต์และค่าพีเอช

จากรูปที่ 2 ถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนและถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนที่ พีเอช 4 ซึ่งเป็นพีเอชที่ดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ได้สูงสุด พบว่าสามารถดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ร้อยละ 86.22 และ 90.44 ตามลำดับ

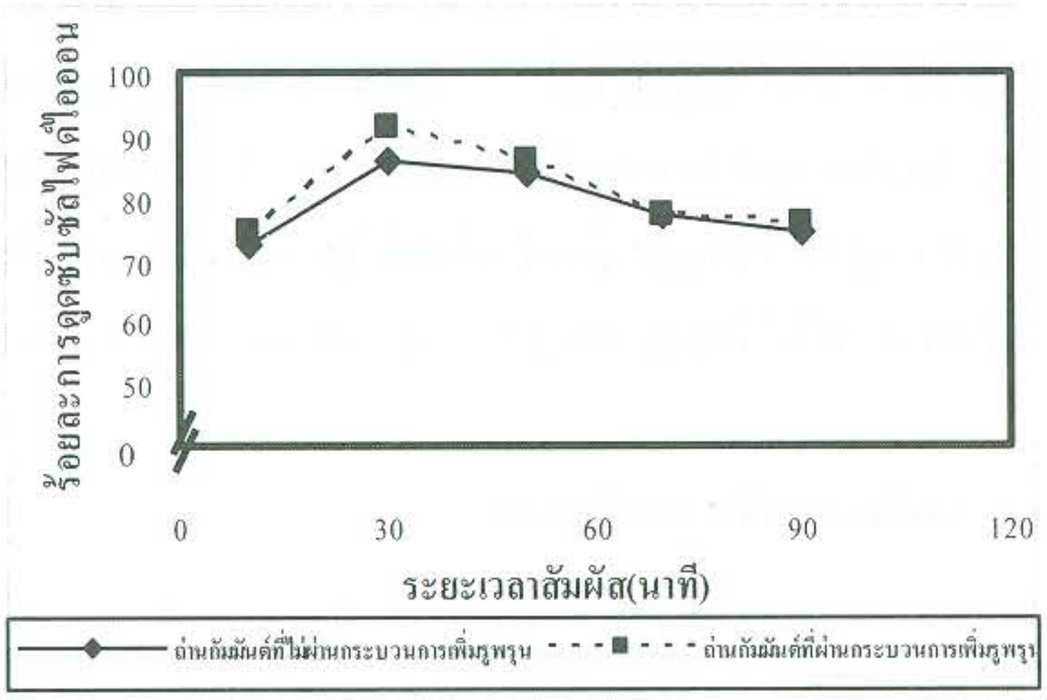
### 2. ผลของระยะเวลาปั่นกวน




**รูปที่ 3** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของถ่านกัมมันต์และระยะเวลาปั่นกวน

จากรูปที่ 3 ถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนและถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนที่ระยะเวลาปั่นกวน 30 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาปั่นกวนที่ดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ได้สูงสุด พบว่าสามารถดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ร้อยละ 86.38 และ 90.60 ตามลำดับ

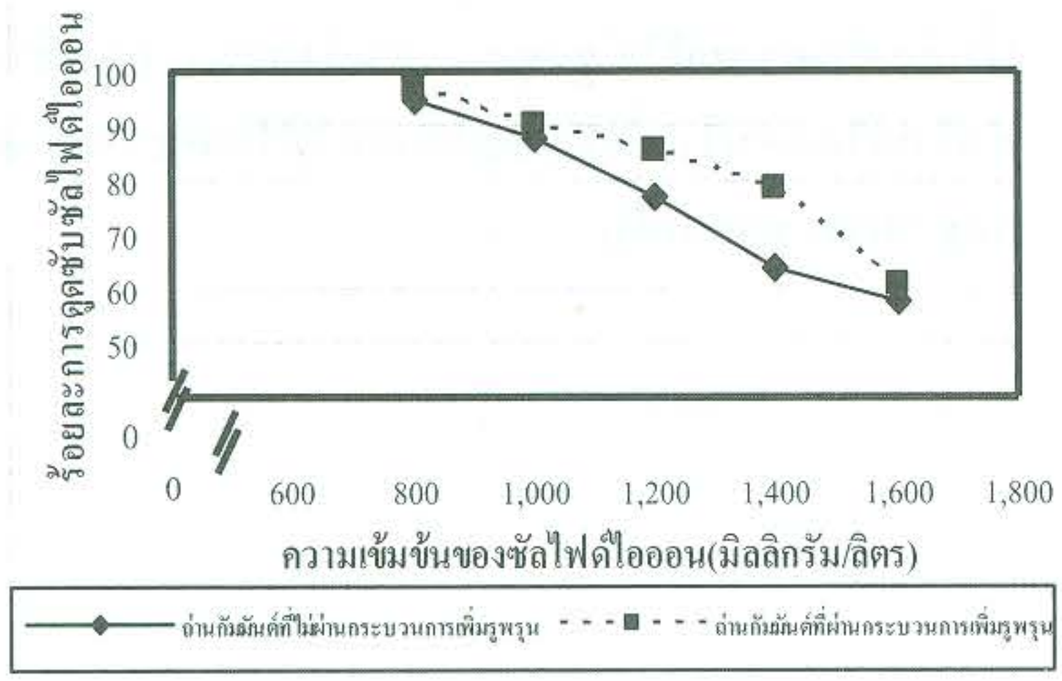
3. ผลของระยะเวลาสัมผัส




**รูปที่ 4** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของถ่านกัมมันต์และระยะเวลาสัมผัส

จากรูปที่ 4 ถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนและถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนที่ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาสัมผัสที่ดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้สูงสุด พบว่าสามารถดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ร้อยละ 86.13 และ 91.14 ตามลำดับ

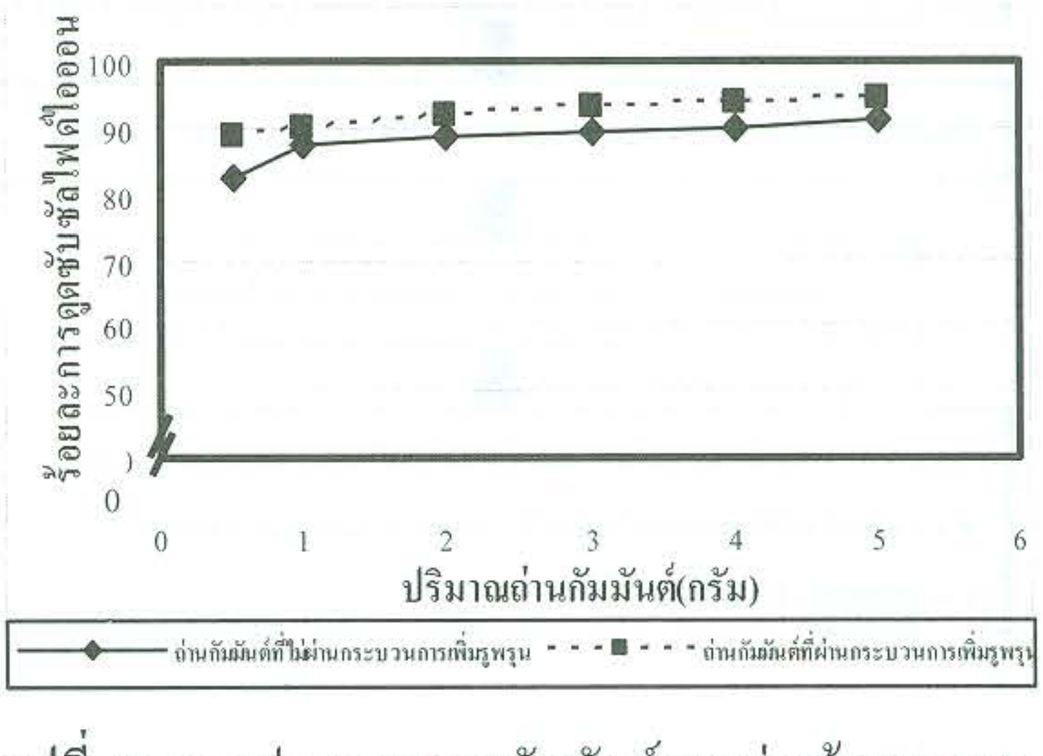
**4. ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ซัลไฟด์ไอออน**




**รูปที่ 5** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของถ่านกัมมันต์และความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออน

จากรูปที่ 5 ทั้งถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนและถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุน ที่ความเข้มข้นซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ใช้ในการศึกษาทดลองในครั้งนี้ และพบว่าสามารถดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ร้อยละ 87.77 และ 90.21 ตามลำดับ

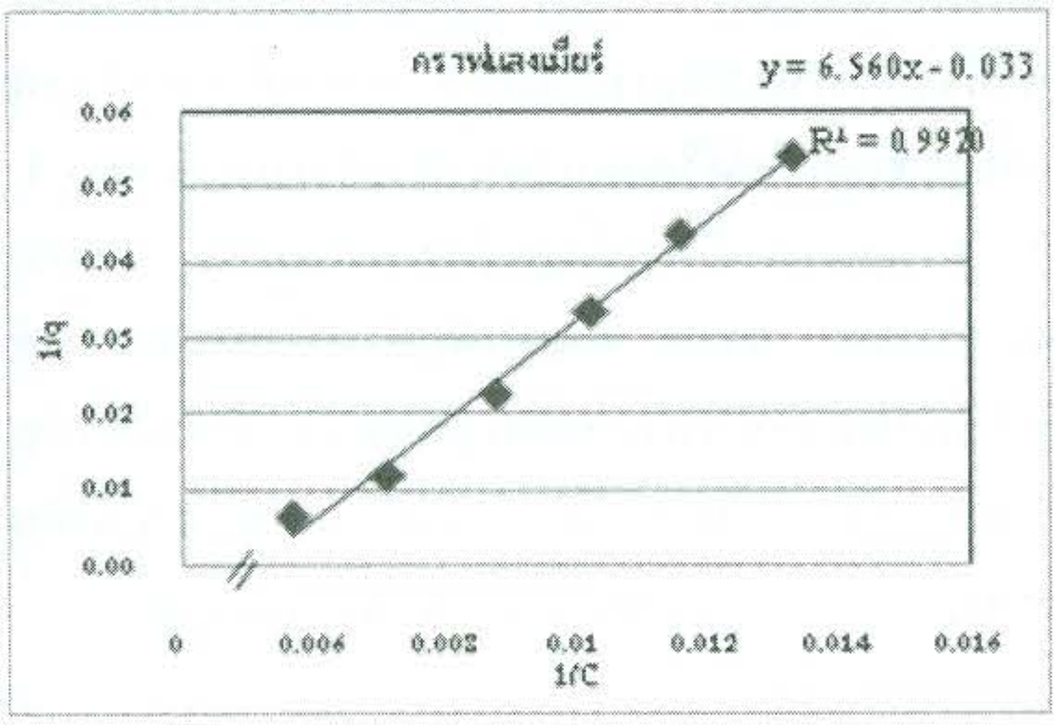
**5. ผลของปริมาณถ่านกัมมันต์**



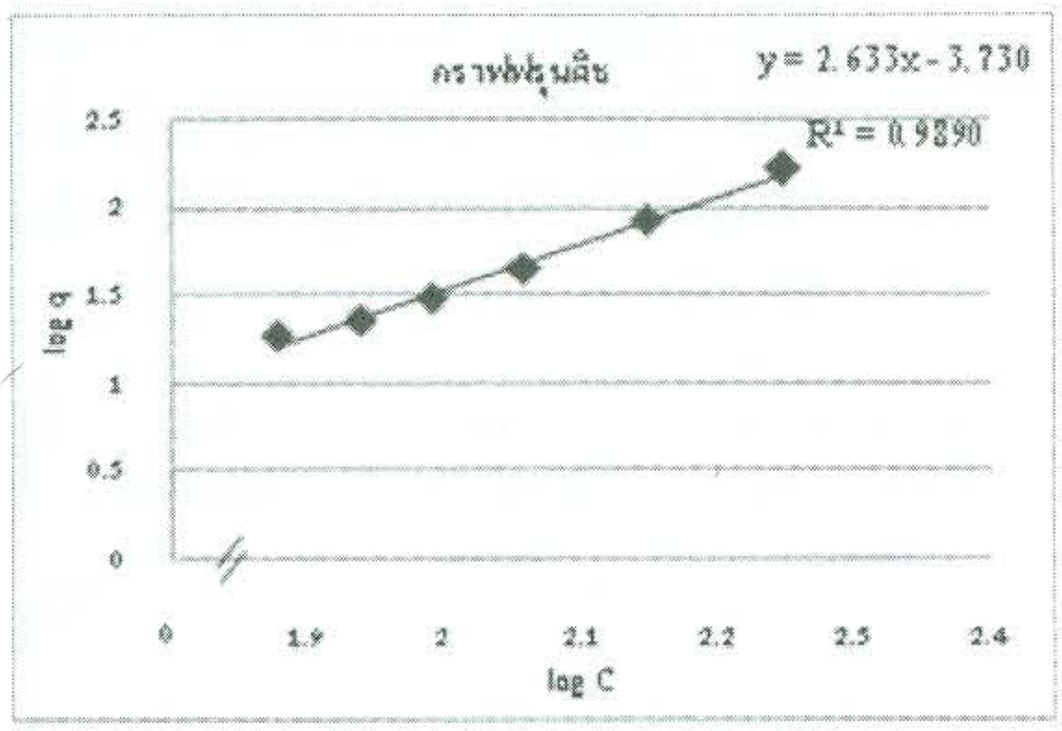

**รูปที่ 6** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของถ่านกัมมันต์และปริมาณถ่านกัมมันต์

จากรูปที่ 6 ทั้งถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนเพิ่มรูพรุนและถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนปริมาณ 1 กรัมที่ใช้ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ พบว่าผลของการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ร้อยละ 87.67 และ 90.21 ตามลำดับ

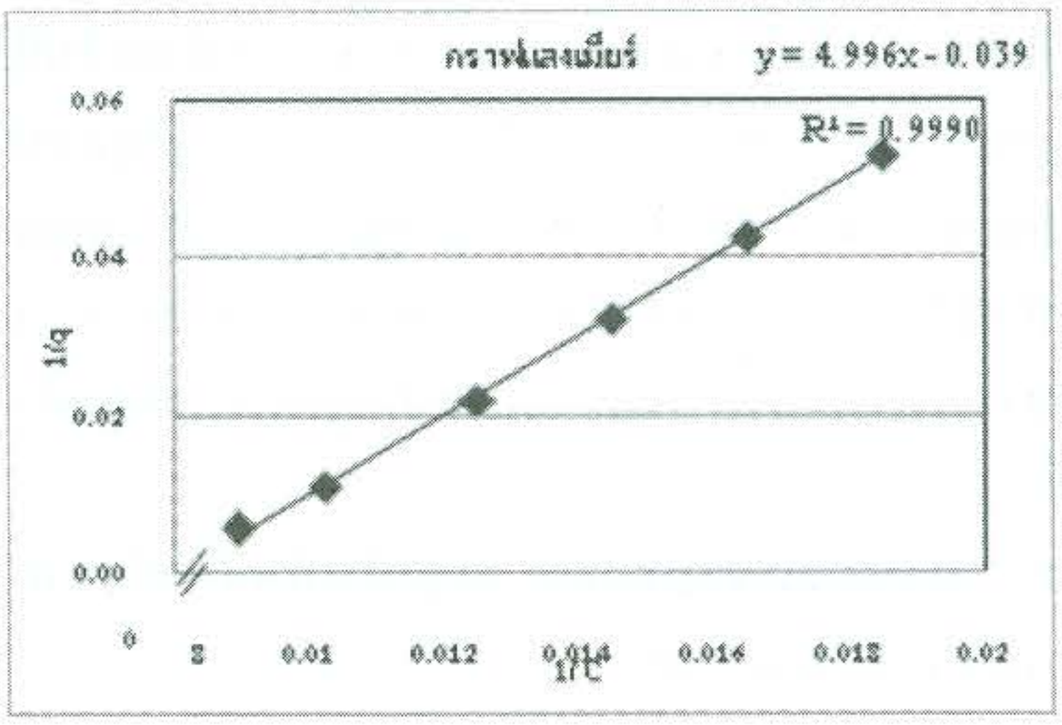
**6. ผลของการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยใช้สมการการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดิช**



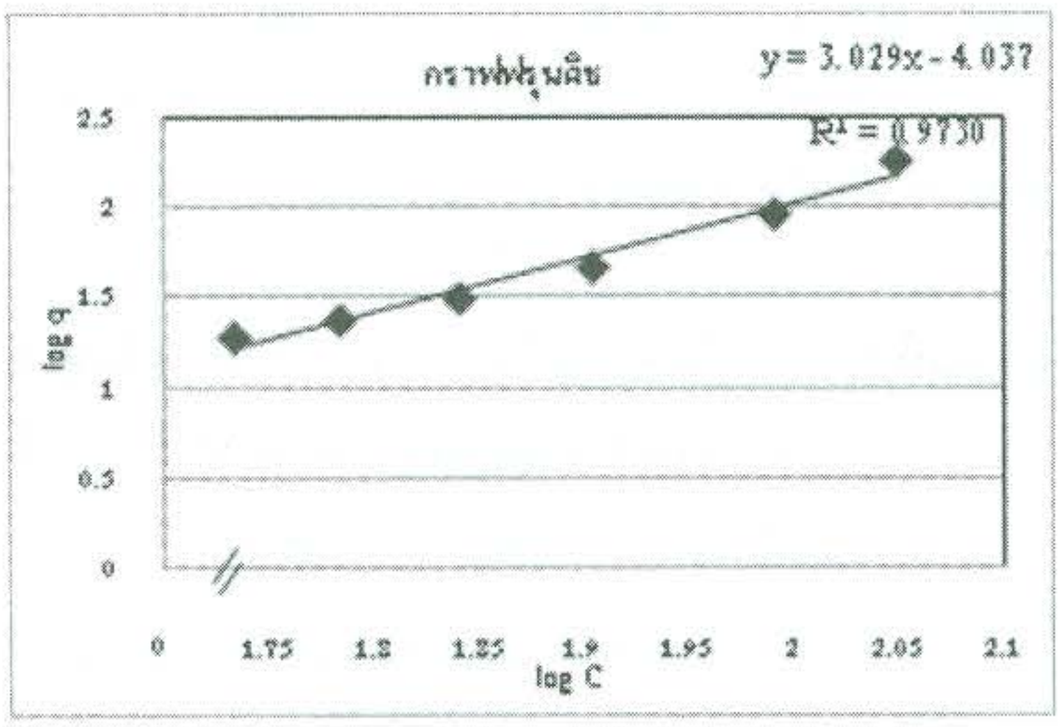

รูปที่ 7 ไอโซเทอร์มการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของแลงเมียร์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุน




รูปที่ 8 ไอโซเทอร์มการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของฟรุนดิชโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุน




รูปที่ 9 ไอโซเทอร์มการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของแลงเมียร์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุน




รูปที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของฟรุนดิชโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุน

จากรูปที่ 7-10 พบว่าทั้งถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนและถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนกลไกการดูดซับจะเป็นไปตามสมการการดูดซับของแลงเมียร์มากกว่า ฟรุนดิช เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่า ซึ่งกลไกการดูดซับของแลงเมียร์คือ พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวน

จำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการเคลื่อนที่ หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว

**7. ผลของการศึกษาการดูดซับในน้ำเสียจริงจากเทศบาลเมืองเพชรบุรี**

หลังจากที่ได้สภาวะเหมาะสมจากการทดลองแบบแบตช์แล้ว นำสภาวะเหมาะสมที่ได้นี้ศึกษากับน้ำเสียจริงจากเทศบาลเมืองเพชรบุรี โดยปรับพีเอชเท่ากับ 4 ระยะเวลาปั่นกวนและระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 30 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์เท่ากับ 1 กรัม สำหรับถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด ซึ่งผลการทดลองที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2

**ตารางที่ 1** การดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียจากเทศบาลเมืองเพชรบุรีของถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มพรุน

| จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย | ปริมาณซัลไฟด์ไอออน (มิลลิกรัม/ลิตร) | | ร้อยละของการดูดซับ |
|---|---|---|---|
| | ก่อนดูดซับ | หลังดูดซับ | |
| 1 | 2.60 | 0.35 | 86.54 |
| 2 | 2.16 | 0.41 | 81.02 |
| 3 | 8.57 | 0.16 | 98.13 |
| 4 | 3.17 | 0.22 | 93.06 |

**ตารางที่ 2** การดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียจากเทศบาลเมืองเพชรบุรีของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มพรุน

| จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย | ปริมาณซัลไฟด์ไอออน (มิลลิกรัม/ลิตร) | | ร้อยละของการดูดซับ |
|---|---|---|---|
| | ก่อนดูดซับ | หลังดูดซับ | |
| 1 | 2.60 | 0.15 | 94.23 |
| 2 | 2.16 | 0.19 | 91.20 |
| 3 | 8.57 | 0.16 | 98.13 |
| 4 | 3.17 | 0.13 | 95.90 |

จากตารางที่ 1 และ 2 น้ำตัวอย่างก่อนการดูดซับบริเวณจุดที่ 1, 2, 3 และ 4 มีซัลไฟด์ไอออนเจือปนอยู่ 2.60, 2.16, 8.57 และ 3.17 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ หลังจากทำการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนและถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนในสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์ พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำตัวอย่างบริเวณจุดที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่าเท่ากับร้อยละ 86.54, 81.02, 98.13 และ 93.06 ตามลำดับสำหรับถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนและมีค่าเท่ากับร้อยละ 94.23, 91.20, 98.13 และ 95.90 ตามลำดับสำหรับ ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุน

**8. ผลของการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์**

**ตารางที่ 3** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่ดูดซับ ร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลือของถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุน และปริมาตรซัลไฟด์ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์

| ปริมาตรซัลไฟด์ไอออนที่ไหล ผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร) | ร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่ดูดซับ | ร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลือ |
|---|---|---|
| 50 | 89.91 | 10.09 |
| 100 | 76.39 | 23.61 |
| 150 | 59.55 | 40.45 |
| 200 | 38.97 | 61.03 |
| 250 | 24.59 | 75.41 |

**ตารางที่ 4** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่ดูดซับ ร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลือของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุน และปริมาตรซัลไฟด์ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์

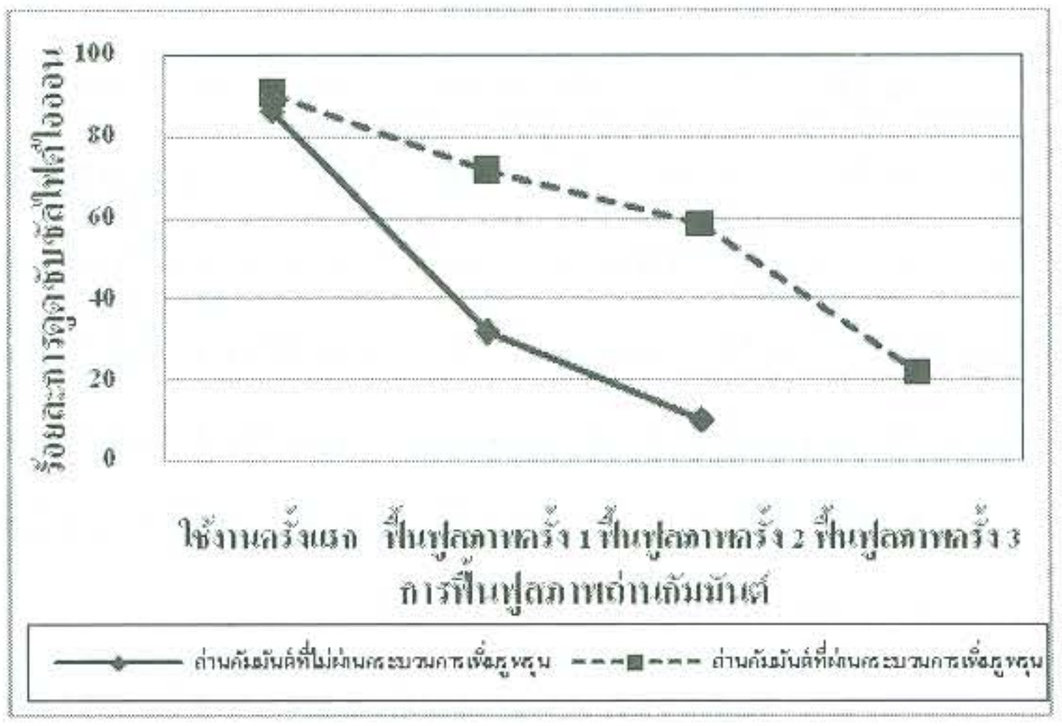
| ปริมาตรซัลไฟด์ไอออนที่ไหล ผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร) | ร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่ดูดซับ | ร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่เหลือ |
|---|---|---|
| 50 | 94.63 | 5.37 |
| 100 | 86.89 | 13.11 |
| 150 | 37.30 | 62.70 |
| 200 | 16.97 | 83.03 |
| 250 | 11.71 | 88.29 |




**รูปที่ 11** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่ดูดซับของถ่านกัมมันต์และปริมาตรซัลไฟด์ไอออนที่ไหลผ่านคอลัมน์

จากตารางที่ 3, 4 และรูปที่ 11 ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ซัลไฟด์ไอออนที่ไหลออกจากคอลัมน์ในช่วงแรกคือ 50 มิลลิลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนและถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนจะมีค่าสูงเท่ากับร้อยละ 89.91 และ 94.63 ตามลำดับ และเมื่อระยะเวลาการปล่อยน้ำเสียเพิ่มมากขึ้นและปริมาตรน้ำเสียที่ไหลผ่านคอลัมน์เพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของถ่านกัมมันต์จะมีค่าค่อยๆ ลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากในช่วงแรกบริเวณพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีการดูดซับ ซัลไฟด์ไอออนเอาไว้บางส่วนแล้ว เมื่อมีการนำน้ำเสียกรองผ่านถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ต่อไปอีก ถ่านกัมมันต์ก็จะทำการดูดซับไว้จนกระทั่งเต็มพื้นที่ผิว ถ่านกัมมันต์ก็จะเริ่มถึงจุดอิ่มตัวและหมดสภาพลง

## 9. ผลของการฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว




**รูปที่ 12** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละซัลไฟด์ไอออนที่ดูดซับของถ่านกัมมันต์และการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์

จากรูปที่ 12 พบว่าความสามารถในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดลดลงจากการใช้งานครั้งแรก ซึ่งการใช้งานครั้งแรกของถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนและถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนสามารถดูดซับซัลไฟด์ไอออนได้ร้อยละ 86.30 และ 90.19 ตามลำดับ และเมื่อผ่านการใช้งานแล้วมาฟื้นฟูสภาพ 3 ครั้ง พบว่าสามารถดูดซับซัลไฟด์ไอออนได้ร้อยละ 31.50 และ 9.65 ตามลำดับสำหรับถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนและร้อยละ 71.28, 58.45 และ

21.93 ตามลำดับสำหรับถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุน

## สรุปและวิจารณ์ผล

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในสารละลายมาตรฐานของถ่านกัมมันต์สองชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนผลิตจากกะลามะพร้าว และถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนผลิตจากกะลามะพร้าวโดยทำการทดลองแบบแบทช์และคอลัมน์ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในสารละลายมาตรฐานของถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนและถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนมีค่าเท่ากับ 4 ซึ่งเป็นพีเอชที่ดูดซับซัลไฟด์ไอออนในสารละลายมาตรฐานได้สูงสุด พบว่าสามารถดูดซับซัลไฟด์ไอออนในสารละลายมาตรฐาน ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับพีเอช 3 และ 5

2. ระยะเวลาปั่นกวนที่เหมาะสมในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในสารละลายมาตรฐานของถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนและถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนมีค่าเท่ากับ 30 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาปั่นกวนที่ดูดซับซัลไฟด์ไอออนในสารละลายมาตรฐานได้สูงสุด (Robert and Young, 1987) พบว่าสามารถดูดซับซัลไฟด์ไอออนในสารละลายมาตรฐานได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับทุกระยะเวลาปั่นกวนได้แก่ 10, 50, 70 และ 90 นาที

3. ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในสารละลายมาตรฐานของถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนและถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนมีค่าเท่ากับ 30 นาที (Robert and Young, 1987) ซึ่งเป็นระยะเวลาสัมผัสที่ดูดซับซัลไฟด์ไอออนในสารละลายมาตรฐานได้สูงสุด พบว่าสามารถดูดซับซัลไฟด์ไอออนในสารละลายมาตรฐานได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับทุกระยะเวลาสัมผัสได้แก่ 10, 50, 70 และ 90 นาที

4. ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในสารละลายมาตรฐานในการทดลองนี้เลือกที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่าสามารถดูดซับซัลไฟด์ไอออนในสารละลายมาตรฐานได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับทุกความเข้มข้นได้แก่ 800, 1,200, 1,400 และ 1,600 มิลลิกรัม/ลิตร

5. ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในสารละลายมาตรฐานในการทดลองนี้เลือกที่ปริมาณ 1 กรัม พบว่าผลของการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในสารละลายมาตรฐานไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับปริมาณ ถ่านกัมมันต์ 2 กรัม แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.5, 3, 4 และ 5 กรัม

6. การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับซัลไฟด์ไอออนโดยใช้สมการการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดิช พบว่าถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดมีไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นไปตามทฤษฎีของแลงเมียร์ (Sung and Dai, 1996)

7. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียจากเทศบาลเมืองเพชรบุรี พบว่าร้อยละการดูดซับซัลไฟด์ไอออนของจุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2 และ4 นั้นมีค่าน้อยกว่าจุดเก็บตัวอย่างที่ 3 ทั้งที่ในจุดเก็บตัวอย่างที่ 3 มีปริมาณซัลไฟด์ไอออนมากสุด ทั้งนี้เป็นเหตุมาจากลักษณะของน้ำเสียในจุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2 และ 4 จากท่อระบายน้ำเสียของเทศบาลเมืองเพชรบุรีนั้นมีการปนเปื้อนของสารอื่นๆทำให้ไปบดบังรูพรุนของถ่านกัมมันต์ การดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียจึงมีประสิทธิภาพลดลง

8. การดูดซับซัลไฟด์ไอออนในสารละลายมาตรฐานโดยทำการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่า ถ่าน

กัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนสามารถดูดซับซัลไฟด์ไอออนได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุน ทั้งนี้เป็นเพราะว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนมีพื้นผิวสัมผัสมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุน จึงทำให้เกิดการดูดซับซัลไฟด์ไอออนได้มากขึ้น

9. การฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว พบว่าถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดจะมีการดูดซับซัลไฟด์ไอออนลดลงจากถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานครั้งแรกตามจำนวนครั้งของการฟื้นฟูและพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนไม่เหมาะสมที่จะนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยจากโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ขอขอบคุณ เทศบาลเมืองเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี สำหรับการเก็บตัวอย่างน้ำเสียและวิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับอุปกรณ์และห้องปฏิบัติการวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

คณิตา ตังคณานุรักษ์. (2542). การวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 1. โครงการตำราคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์. (2550). หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 281 หน้า.

มั่นรักษ์ ตัณฑุลเวศม์. ม.ป.ป. โครงการอบรมเรื่องการดูแลระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล. แหล่งที่มา : http://www.sane68.com/, 22 สิงหาคม 2550.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. 2538. วิศวกรรมการประปา เล่ม 1. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Babu, B.V. and Ramakrishna V. (2002). Applicability of Regression Technique for Physical Modeling: A Case Study on Adsorption in Wastewater Treatment, Proceedings of International Symposium & 55th Annual Session of IIChE (CHEMCON-2002), OU, Hyderabad, December 19-22, 2002.

Michael S. L., Yousif K.K., William W.C., and Victoria A.W. (1982). Methods for Collection and Analysis of Geopressured Geothermal and Oil Field Waters. Geological Survey . U.S. Government Printing Office Washington, D.C.

Robert W.P. and Young K. (1987). Removal of sulfides from waters and wastewaters by activated carbon. Reactive Polymers, Ion Exchangers, Sorbents. 5(1): 93-104.

Sung Y.C. and Dai K.C. (1996). Langmuir parameters for adsorption of two halogenated chemicals on an activated carbon pellet. Korean Journal of Chemical Engineering. 13(4): 409-411.

ว.วิทย. มข. 36(4) 338-347 (2551) KKU Sci. J.36(4) 338-347 (2008)

# การดูดซับเสียงในยางธรรมชาติผสมดินขาว

# Acoustic Absorption of Clay Filled Natural Rubber

*สมบัติ พุทธจักร[1*] ธรณิศ นาวารัตน์[1] ดาริกา จาเอาะ[1]*

## บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้คือการศึกษาสมบัติการดูดซับเสียงของยางธรรมชาติผสมดินขาวชนิดเบนโทไนต์และชนิดคาโอลิไนต์ ในปริมาณแตกต่ากันคือ 0, 10, 20, 40, 60 และ 80 phr (per hundred rubber) ตามลำดับโดยเตรียมชิ้นตัวอย่างเป็นแผ่นที่มีความหนา 1.5 และ 5 mm นำมาทดสอบสมบัติการสูญเสียพลังงานภายในเนื้อวัสดุ (tan $\delta$ = G″/ G′) โดยการวัดสมบัติรีโอโลยีเชิงพลวัตของการบิด (G″, G′) และวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงที่ความถี่ต่าง ๆ ($\alpha$(f)) พบว่าค่า tan $\delta$ ของยางธรรมชาติผสมดินขาวชนิดเบนโทไนต์จะมีค่าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ แบบ $e^x$ ตั้งแต่ปริมาณ 30 phr ขึ้นไป กราฟ $\alpha$(f) ของยางธรรมชาติผสมดินขาวชนิดเบนโทไนต์ที่ความหนา 1.5 mm แสดงจุดสูงสุดของความถี่พ้องของการดูดซับเสียง $\alpha$ = 0.2 ที่ f = 2,000 Hz แต่ของยางธรรมชาติผสมดินขาวชนิดคาโอลิไนต์ จะมี $\alpha$ = 0.07 เท่านั้น เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นความถี่พ้องของการดูดซับเสียงและค่า $\alpha$ ก็จะเพิ่มขึ้น ส่วนชิ้นทดสอบหนา 5 mm ทั้งที่ผสมดินขาวชนิดเบนโทไนต์และผสมดินขาวชนิดคาโอลิไนต์ ความถี่พ้องจะมากกว่า 4,000 Hz ซึ่ง $\alpha$ = 0.5 และ 0.96 ตามลำดับ ดังนั้น ยางธรรมชาติผสมดินขาวชนิดเบนโทไนต์ที่มีความหนาน้อย เหมาะสำหรับใช้ดูดซับเสียงความถี่ต่ำประมาณ 2,000 Hz ส่วนยางธรรมชาติผสมดินขาวชนิดคาโอลิไนต์ที่มีความหนามาก เหมาะสำหรับใช้ดูดซับเสียงความถี่สูง ตั้ง แต่ 3,000 Hz ขึ้นไป

## Abstract

The objective of this research was to study acoustic absorption property of natural rubber filled with bentonite and kaolinite clay type, which were varied clay contents of 0, 10, 20, 40, 60 and 80 phr (per hundred rubber) respectively. The samples were prepared in thickness of 1.5 and 5 mm then tested for a loss energy property (tan $\delta$ = G″/ G′). From rheology property of torsion dynamics (G″, G′) and acoustic absorption coefficient at some frequency ($\alpha$(f)) showed that tan $\delta$ of natural rubber filled with bentonite clay type was better implicitly in form of $e^x$ at 30 phr of clay content or above. The resonance peak of natural rubber filled with bentonite clay type at 1.5 mm and f = 2,000 Hz gave $\alpha$ = 0.2 but natural rubber filled with kaolinite clay type had $\alpha$ = 0.07. The resonance frequency and $\alpha$ increased when the thickness was

[1] สาขาวิชาฟิสิกส์พอลิเมอร์ แผนกวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

* corresponding author, E-mail: psombat@bunga.pn.psu.ac.th

increased. When the thickness was 5 mm, the resonance frequency of natural rubber filled with bentonite and kaolinite clay type were more than 4,000 Hz, when $\alpha$ = 0.5 and 0.96 respectively. Therefore natural rubber filled with bentonite clay type is appropriate for acoustic absorption at low frequency about 2,000 Hz with thin sample. As for natural rubber filled with kaolinite clay type is appropriate at high frequency at 3,000 Hz or above but the sample must be thicker.

**คำสำคัญ :** ความถี่พ้อง, รีโอโลยีเชิงพลวัตของการบิด, สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง

## บทนำ

คลื่นเสียง คลื่นแสง และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแสดงสมบัติของการเป็นคลื่นได้ เช่นการสะท้อน การส่งผ่าน การหักเห การเลี้ยวเบนเป็นต้น การลดการสะท้อนและการเปลี่ยนรูปพลังงานส่งผ่านให้เป็นความร้อนนั้นเป็นกลไกของการควบคุมการลดระดับเสียงที่ใช้กันโดยทั่วไปเรียกว่าการดูดซับเสียง มีการใช้วัสดุทำเป็นผนังผนังกั้นเพื่อดูดซับเสียง เช่น โฟมโพลียูรีเทนชนิดพรุน ผนังยางเนื้อแน่น หรือระบบตัวดูดซับกับผนังกั้นแบบหลายแผ่น หลักการลดระดับเสียงเหล่านี้สามารถออกแบบให้สลายพลังงานเสียงภายในตัวโครงสร้างของวัสดุ โดยมีการสลายพลังงานเสียงภายในตัวโครงสร้างของเนื้อวัสดุ (โครงสร้างทางเคมีและโครงสร้างโซ่พอลิเมอร์ของเนื้อวัสดุ)

การดูดซับเสียงเป็นสมบัติเฉพาะของเนื้อวัสดุกับรูปร่างของวัสดุ ดังรูปที่ 1 และสัดส่วนองค์ประกอบของการผสมหลายชนิด และเกิดขึ้นเพราะเสียงถูกเปลี่ยนเป็นปริมาณความร้อนภายในเนื้อวัสดุ สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง คือ อัตราส่วนของปริมาณพลังงานเสียงดูดซับภายในและส่งผ่านวัสดุต่อปริมาณของพลังงานเสียงที่ตกกระทบบนวัสดุนั้น ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 (มิ่งและพงษ์ศักดิ์, 2549) การปรับการดูดซับเสียงยังสามารถทำได้โดยใช้วัสดุที่โมเลกุลสามารถขยับได้ง่ายขณะเกิดการสะท้อนเสียง วิธีการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงที่นิยมใช้กันอยู่มีสองวิธี คือ การใช้ห้องสะท้อนเสียง (reverberation room) และการใช้ไมโครโฟนสองตัว แต่สองวิธีที่กล่าวมานั้นจะมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ดังนั้นวิธีทดสอบโดยใช้ท่อคลื่นนิ่ง (standing wave) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากและสร้างอุปกรณ์โดยใช้ต้นทุนไม่มากนัก (มิ่งและพงษ์ศักดิ์, 2549) วัสดุที่นำมาทดสอบเป็นวัสดุที่ขึ้นรูปเป็นแผ่นกลมแบน ซึ่งมีความหนาต่าง ๆ โดยทดสอบที่ความถี่ 125, 250, 500, 1,000, 2,000 และ 4,000 Hz ตามลำดับ

เสียงถูกส่งจากลำโพงซึ่งอยู่ที่ปลายท่อด้านหนึ่งไปสะท้อนวัสดุที่กำหนดซึ่งวางไว้ที่ส่วนปลายอีกด้านหนึ่ง คลื่นไปและคลื่นสะท้อนจะเกิดการรวมกันแล้วได้สัญญาณของคลื่นนิ่งภายในท่อซึ่งสามารถตรวจวัดได้จาก microphone probe แสดงดังรูปที่ 2 เมื่อปลายท่อข้างหนึ่งติดตั้งวัสดุดูดซับเสียง พลังงานเสียงที่ตกกระทบบางส่วนจะถูกดูดซับโดยวัสดุนั้นและที่เหลือจะสะท้อนออกไป เสียงที่สะท้อนออกไปนั้นจะมีพลังงานน้อยกว่าแหล่งกำเนิดเสียงเสมอ การใช้แผ่นดูดซับเสียงเป็นวิธีการแก้ปัญหาเสียงรบกวนได้วิธีหนึ่ง เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานได้มากในการดูดซับและลดพลังงานเสียง ได้มีการพัฒนาวัสดุดูดซับเสียงซึ่งประกอบด้วยอนุภาคพอลิเมอร์ขนาดไมครอนและ PU foam โดยควบคุมให้รูพรุนมีลักษณะสมมาตรด้วยเหตุนี้เอง แผ่นพอลิเมอร์ชนิดรูพรุนจึงถูกใช้เป็นแผ่นดูดซับเสียง และนำมาใช้กันในสองลักษณะ คือ ใช้เป็นแผ่นเดี่ยว ๆ กับผิวสะท้อนเพื่อดูดซับเสียง

ความถี่ช่วงแคบ ๆ และ ใช้เป็นแผ่นดูดซับเสียงได้ในช่วงความถี่ที่กว้างขึ้นในกรณีที่ใช้เป็นผิวหน้าของวัสดุไฟเบอร์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีรู เป็นตัวดูดซับเสียง แต่ก็ยังมีข้อเสีย คือ มีราคาแพงและยังมีข้อจำกัดในการนำมาประยุกต์ใช้งานหลาย ๆ อย่าง การนำยางรีไซเคิลมาเป็นตัวดูดซับเสียงจะช่วยลดปัญหาเหล่านั้นไปได้และยังเป็นการกำจัดขยะและลดมลพิษทางเสียงได้อีกด้วย (Hong, 2007) สมบัติทางกายภาพของยางมีข้อได้เปรียบกว่าวัสดุชนิดอื่น ๆ ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน (Swift, 1998) วัสดุที่เลือกใช้เป็นผนังกั้นเสียงหรือแผ่นดูดซับเสียงนั้น จะต้องมีความทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศ โดยเฉพาะฝน ซึ่งการเลือกใช้เศษยางรีไซเคิลนี้มีข้อได้เปรียบกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ ที่ใช้กันอยู่ เช่น ใยแก้ว (fiber glass), ใยหิน (rock wool fiber) เป็นต้น เพราะลดปัญหาการดูดซับน้ำและฝุ่นไปได้ อีกทั้งยังสามารถทาด้วยสีที่เหมาะสมเพื่อความสวยงามและทำความสะอาดได้ง่าย จากเหตุผลที่กล่าวมาแล้วนั้น สำหรับงานที่ใช้กลางแจ้ง ยางรีไซเคิลถือว่าเป็นตัวเลือกที่ดีในการป้องกันเสียงรบกวนต่าง ๆ ในขณะเดียวกันก็ยังเป็นการกำจัดยางเสื่อมสภาพได้อีกด้วย (Pfretzschner and Rodriguez, 1999) แต่การนำยางรีไซเคิลมาผลิตเป็นแผ่นดูดซับเสียงนั้น ก็ยังคงมีข้อเสียคือสามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ได้ยาก โดยเฉพาะสารเคมีในเนื้อยางซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการผลิต

ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการศึกษาการดูดซับเสียงในยางธรรมชาติผสมดินขาว เพื่อให้สามารถควบคุมปริมาณสารเคมีในเนื้อวัสดุได้ง่ายขึ้น โดยตั้งสมมติฐานเบื้องต้นว่า แผ่นดูดซับเสียงจากยางธรรมชาติผสมดินขาวนี้มีสมบัติในการดูดซับเสียงสามารถเลือกดูดซับช่วงความถี่เสียงที่ต้องการได้ ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาเสียงรบกวนในสถานที่ต่าง ๆ และยังเป็นการแก้ปัญหามลพิษทางเสียงได้อีกด้วย

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและสร้างชุดทดสอบในการหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของวัสดุ

2. เพื่อศึกษาสมบัติการดูดซับเสียง (Acoustic Absorption Coefficient : $\alpha$) และสมบัติรีโอโลยีเชิงพลวัตของการบิดที่มีผลต่อการดูดซับเสียง ของแผ่นดูดซับเสียงตัวอย่างจากยางธรรมชาติผสมดินขาว

3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณของสารตัวเติมดินขาวสองชนิดคือเบนโทไนต์และคาโอลิไนต์ ความหนา ความหนาแน่นและค่า tan $\delta$ ของแผ่นดูดซับเสียงตัวอย่างที่มีผลต่อสมบัติการดูดซับเสียง

## อุปกรณ์และวิธีวิจัย

### การเตรียมชิ้นทดสอบ

วัสดุดูดซับเสียงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สร้างขึ้นจากยางธรรมชาติที่นำมาปรับปรุงสมบัติเชิงรีโอโลยีโดยการผสมสารตัวเติมดินขาวชนิดเบนโทไนต์และชนิดคาโอลิไนต์, ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ชนิด White seal, กรดสเตียริก (Stearic acid), N-Cyclohexyl-2-benzothiazolesulfenamide (Santocure CBS), N-phenyl-N/-1,3-dimethylbutyl-p-phenylenediamine (6PPD), กำมะถัน (Sulphur) (ดูตารางที่ 1) ผสมด้วยเครื่องบดผสมยางสองลูกกลิ้ง (two roll mill) เป็นเวลา 30 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ประมาณ 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเบ้า (compression molding) ที่อุณหภูมิ 150˚C ให้ได้ชิ้นทดสอบแบบกลมแบนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.8 cm ความหนา 1.5 และ 5 mm

### การหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง

ในการทดสอบนั้น ทำได้โดยการนำชิ้นทดสอบติดตั้งที่ฝาครอบปลายท่อด้านขวา โดยให้ชิ้นทดสอบตั้งฉากกับความยาวท่อ แล้วเปิดเครื่องกำเนิดความถี่เสียง ตั้งค่าความถี่เสียงที่ 125 Hz วัดค่าระดับความดันเสียงต่ำสุดและสูงสุดค่าแรก ทำการทดสอบซ้ำที่ความถี่ 250, 500, 1,000, 2,000 และ 4,000 Hz ตามลำดับ หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาค่า

สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง ($\alpha$) โดยเริ่มจากกราฟการเปลี่ยนแปลงความดันกับระยะทาง (ดูรูปที่ 4) แล้วนิยามค่า Standing wave ratio (SWR) คืออัตราส่วนของความดันสูงสุด (A + B) ต่อความดันต่ำสุด (A - B) เมื่อ A และ B คือค่าคงที่ที่กำหนดดังรูปที่ 4 (Russell, 2006)

$$SWR = \frac{A+B}{A-B}$$

ซึ่งสามารถจัดสมการอยู่ในรูปสัมประสิทธิ์การสะท้อนเสียง (Sound power reflection coefficient; R) ได้ดังนี้

$$R = \frac{B}{A} = \frac{SWR-1}{SWR+1}$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงในการทดสอบเป็นดังสมการ

$$\alpha = 1 - R^2 = 1 - \frac{(SWR-1)^2}{(SWR+1)^2}$$

**การหาค่าแฟกเตอร์ของการสูญเสีย (tan δ)**

นำยางที่ขึ้นรูปแล้วมาตัดเป็นชิ้นทดสอบขนาด 6.8 x 1 x 1.5 mm โดยประมาณ แล้วนำชิ้นทดสอบไปติดตั้งเข้ากับชุดทดสอบสมบัติเชิงพลวัตของการบิด (ดูรูปที่ 5) ทำการแกว่งชิ้นทดสอบในระนาบการบิดแนวนอนด้วยมุมน้อย ๆ หลังจากนั้นวัดคาบของการบิดและแอมปลิจูดจากจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุดของการแกว่ง วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลจะเริ่มจากการหาโมเมนต์ของความเฉื่อยของระบบที่แกว่งอย่างอิสระ (I0) โดยให้มีการบิดไปมาเมื่อระบบมีโมเมนต์ของความเฉื่อยจากมวล m ที่ปรับค่าระยะ x ต่าง ๆ แล้วหา I จากสมการ

$$I = I_0 + 2mx^2$$

หาค่า Logarithmic decrement ($\Delta$) จากการวัดแอมปลิจูดที่ลดลงต่อเนื่องกันที่เป็นผลจากการสูญเสียพลังงานจากการแกว่งแต่ละรอบ เมื่อ $A_1$, $A_2$ คือแอมปลิจูดที่ลดลงต่อเนื่อง (สมบัติ. 2550)

$$\Delta = \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)$$

จากมอดูลัสเชิงซ้อนของการเฉือน $G^* = G' + G''$

โดย $G' = \frac{I}{\kappa T^2}\left(4\pi^2 - \Delta^2\right)$

เมื่อ T คือคาบของการแกว่ง และ

$$G'' = \frac{4\pi I\Delta}{\kappa T^2}$$

เมื่อ $\kappa$ คือ Shape factor สำหรับวัตถุทดสอบที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมหาได้โดย

$$\kappa = \frac{CD^3}{16\ell}\mu$$

$$\mu = 5.33\left(1 - 0.63\frac{D}{C}\right)$$

เมื่อ C คือ ความกว้างของชิ้นทดสอบ D คือความหนาของชิ้นทดสอบ คือระยะระหว่างการยึดของชิ้นทดสอบ ดังนั้นจึงหา loss factor , tan $\delta$ ได้ คือ

$$\frac{G''}{G'} = \frac{4\pi\Delta}{4\pi^2 - \Delta^2} = \tan\delta$$

ซึ่งแสดงสัดส่วนการเกิดปริมาณความร้อนหรือการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นขณะแกว่งแต่ละรอบ (สมบัติ, 2550) จาก G′ คือ elastis modulus ที่แปรผัน โดยตรงกับพลังงานสะสม และ G″ (คือ loss modulus ที่แปรผันโดยตรงกับพลังงานสูญเสีย ภายในเนื้อวัสดุของแต่ละรอบของการบิดไปมา ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุนั้นๆ พลังงานสูญเสียในรูปของความร้อน H คือ $H = \pi G'' \varepsilon_0^2$ หรือ $H = \pi G'' \tan\delta$ เมื่อ $\varepsilon_0^2$ คือแอมปลิจูดของการเปลี่ยนรูป

**การหาค่าความหนาแน่น**

หาค่าความหนาแน่นของชิ้นทดสอบโดยใช้เครื่องวัดความหนาแน่น Electronic Densimeter รุ่น MD-300S โดยมี Minimum density resolution: 0.001

## ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

**1. tan δ กับปริมาณดินขาว**

ค่า tan $\delta$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินขาว โดย

จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อมีปริมาณดินขาวมากกว่า 30 phr (per hundred rubber ใช้ดินขาว 30 ส่วนต่อยาง 100 ส่วนโดนน้ำหนัก) และค่า tan $\delta$ จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างกันโดยแผ่นดูดซับเสียงที่ผสมดินขาวชนิดเบนโทไนต์ จะมีค่าสูงกว่าแผ่นดูดซับเสียงที่ ผสมด้วยดินขาวชนิดคาโอลิไนต์ ดังจะเห็นได้จากกราฟในรูปที่ 6

**2. ความหนาแน่นกับปริมาณดินขาว**

ความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินขาวที่ผสม โดยจะมีค่าใกล้เคียงกันที่ปริมาณดินขาว 0 - 30 phr แต่เมื่อมีปริมาณดินขาวมากกว่า 30 phr แผ่นดูดซับเสียงที่ผสมดินขาวชนิดคาโอลิไนต์จะมีความหนาแน่นมากกว่า ซึ่งจะเห็นได้จากกราฟในรูปที่ 7

**3. ค่า $\alpha$ กับความถี่**

พิจารณาค่า $\alpha$ ของแผ่นดูดซับเสียงที่ผสมดินขาวทั้งสองชนิดที่ความหนา 1.5 mm จะให้ค่า $\alpha$ ต่างกันชัดเจนเมื่อมีปริมาณดินขาวมากกว่า 40 phr ที่ความถี่ 2,000 Hz แผ่นดูดซับเสียงที่ผสมดินขาวชนิดเบนโทไนต์จะมีค่า $\alpha$ สูงกว่าแผ่นดูดซับเสียงที่ผสมดินขาวชนิดคาโอลิไนต์ 1.85 เท่า จากกราฟในรูปที่ 8 และรูปที่ 9

ส่วนที่ความหนา 5 mm ที่ความถี่ 4,000 Hz ชิ้นทดสอบที่ผสมดินขาวชนิดคาโอลิไนต์ กลับมีค่า $\alpha$ สูงกว่าชิ้นทดสอบที่ผสมดินขาวชนิดเบนโทไนต์ (เปรียบเทียบกราฟรูปที่ 10 และรูปที่ 11)) โดยที่ความถี่และปริมาณดินขาวอื่น ๆ จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยชิ้นทดสอบที่ผสมดินขาวชนิดคาโอลิไนต์มีค่า $\alpha$ = 0.96 และชิ้นทดสอบที่ผสมดินขาวชนิดเบนโทไนต์ มีค่า $\alpha$ = 0.5

กราฟของชิ้นทดสอบที่ผสมดินขาวชนิดเบนโทไนต์ (รูปที่ 10) สามารถแยกแยะความแตกต่างของสมบัติในทุกสัดส่วนปริมาณการผสมได้ ส่วนกราฟของชิ้นทดสอบที่ผสมดินขาวชนิดคาโอลิไนต์นั้นรูปร่างของกราฟ (รูปที่ 11) จะเหมือนกันทุกสัดส่วนของการผสม

## บทสรุป

การดูดซับเสียงของยางธรรมชาติผสมดินขาวนั้นแสดงสมบัติการดูดซับเสียงที่ขึ้นกับทั้งชนิด ปริมาณ และความหนาของชิ้นทดสอบ คือ ยางธรรมชาติผสมดินขาวชนิดเบนโทไนต์จะดูดซับเสียงได้ดีกว่ายางธรรมชาติผสมดินขาวชนิดคาโอลิไนต์ ประมาณ 1.85 เท่า ที่ความถี่ 2,000 Hz ซึ่งเป็นความถี่พ้องของการดูดซับเสียง เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นการดูดซับเสียงจะมากขึ้น เพียงแต่ยางธรรมชาติผสมดินขาวชนิดคาโอลิไนต์นั้น รูปร่างกราฟจะเหมือนกันทุกสัดส่วนการผสมของดินขาวและความถี่พ้องของการดูดซับเสียงจะมากกว่า 4,000 Hz ซึ่ง $\alpha$ = 0.5 และ 0.96 ตามลำดับ ดังนั้น ยางธรรมชาติผสมดินขาวชนิดเบนโทไนต์ที่มีความหนาน้อย เหมาะสำหรับใช้ดูดซับเสียงความถี่ต่ำ ประมาณ 2,000 Hz ส่วนยางธรรมชาติผสมดินขาวชนิดคาโอลิไนต์ที่มีความหนามากเหมาะสำหรับใช้ดูดซับเสียงความถี่สูง ตั้งแต่ 3,000 Hz ขึ้นไป ทั้งนี้การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

## เอกสารอ้างอิง

มิ่ง โลกิจแสงทอง และ พงษ์ศักดิ์ คำมูล. (2549). การหาสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของ วัสดุโดยใช้ท่อแบบคลื่นนิ่ง. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20. จังหวัดนครราชสีมา, 18-20 ตุลาคม 2549.

สมบัติ พุทธจักร. (2550). คู่มือปฏิบัติการ Properties of Matter and Rheology. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.

Russell, A. (2006). Absorption Coefficients and impedance (online). http://www.kettering.edu/~drussel/GMI-Acoustics/Absorption.html [6 November 2006].

Pfretzschner, J., and Rodriguez, R.M. (1999). Acoustic properties of rubber crumbs. Polymer Testing, 18: 81- 92.

Swift, M.J., Brisl, P., and Horoshenkov, K.V. (1998). Acoustics absorption in re-cycled rubber granulate. Applied Acoustics, 5: 203-212.

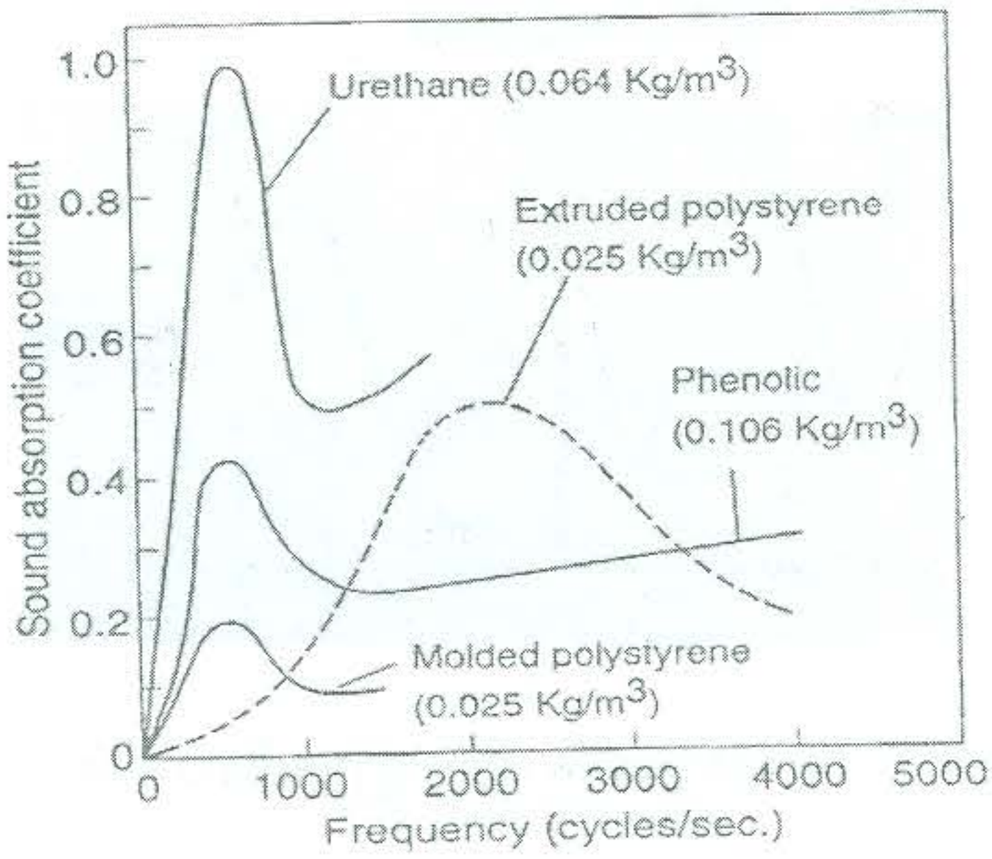
Hong, Z., Bo, L., Guangsu, H. and Jia, H. (2007). A novel composite sound absorber with recycled rubber particles. Journal of sound and vibration.

Osswald, T.A. (1996). Material Science of Polymer for Engineers, Hanser Publishera, New York.

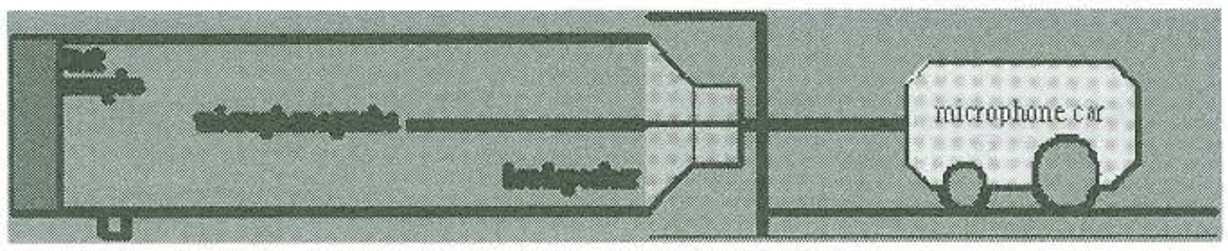
❑❑❑❑❑

**ตารางที่ 1** สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาสมบัติการดูดซับเสียง

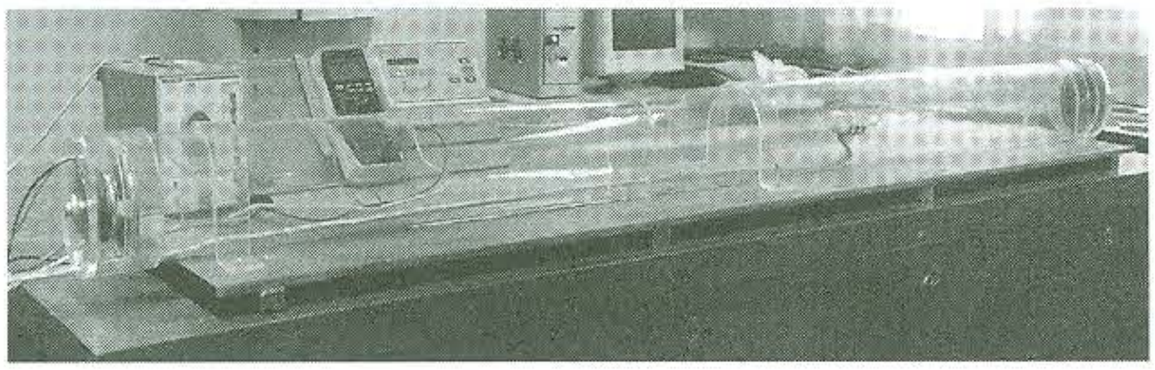
| สารเคมี | ปริมาณ (phr) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** | **11** |
| NR (STR 5L) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| ZnO | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Stearic acid | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| CBS | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 6PPD | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Bentonite | 0 | 10 | 20 | 40 | 60 | 80 | - | - | - | - | - |
| Kaolinite | 0 | - | - | - | - | - | 10 | 20 | 40 | 60 | 80 |
| Sulphur | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |



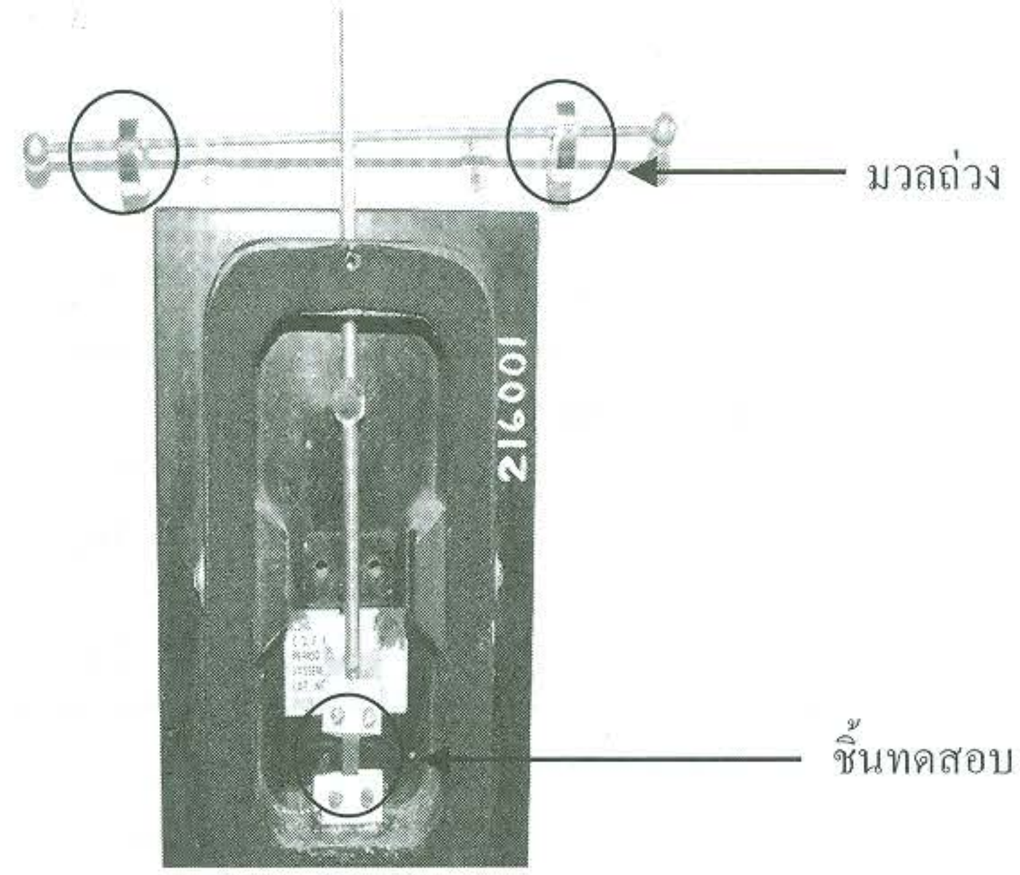

**รูปที่ 1** พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างต่างกันจะมีการดูดกลืนเสียงต่างกันด้วย (Osswald, 1996)



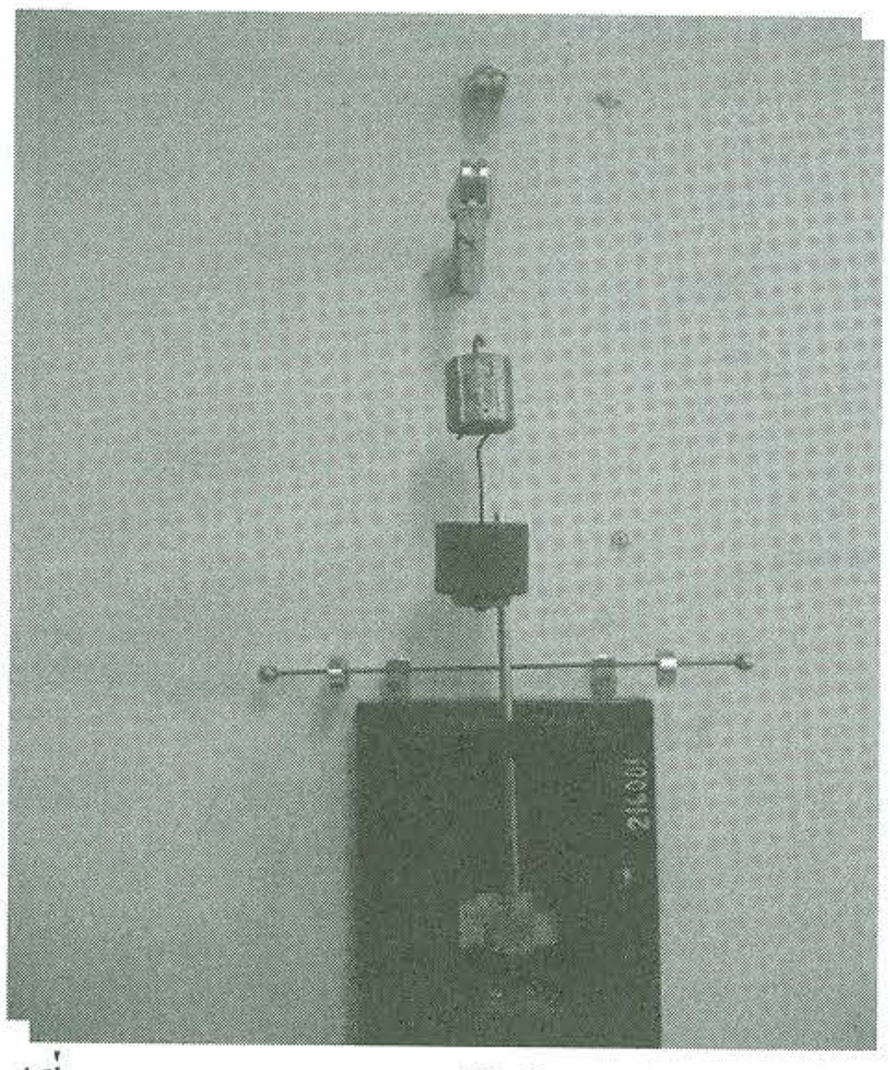

**รูปที่ 2** ท่อคลื่นนิ่ง (Russell, 2006)



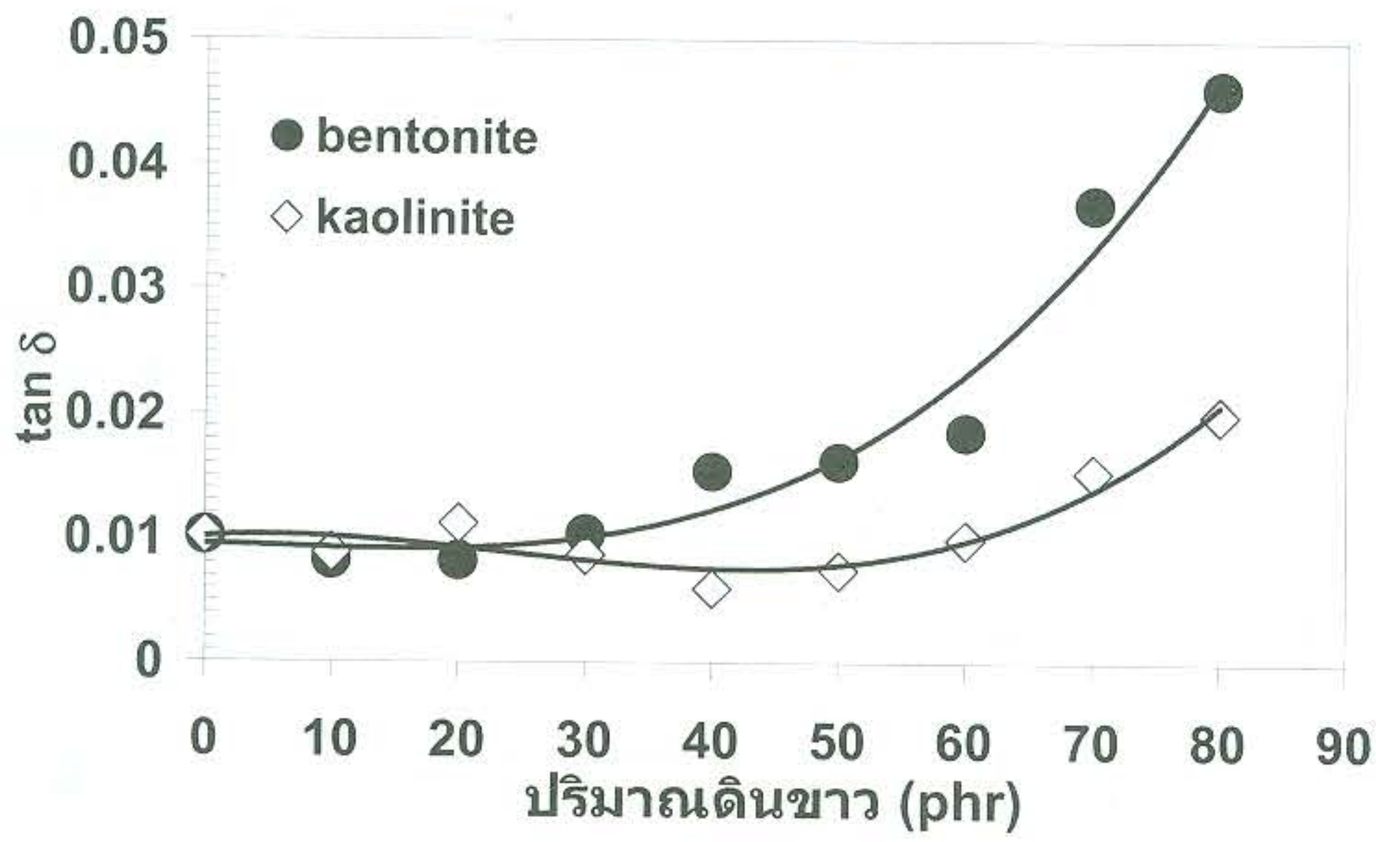
**รูปที่ 3** ชุดทดสอบสมบัติการดูดซับเสียงที่สร้างขึ้น โดยใช้เครื่องกำเนิดเสียงรุ่น LAG-120B AUDIO GENERATOR ผลิตโดย LEADER ELECTRONICS CORP. ประเทศญี่ปุ่น



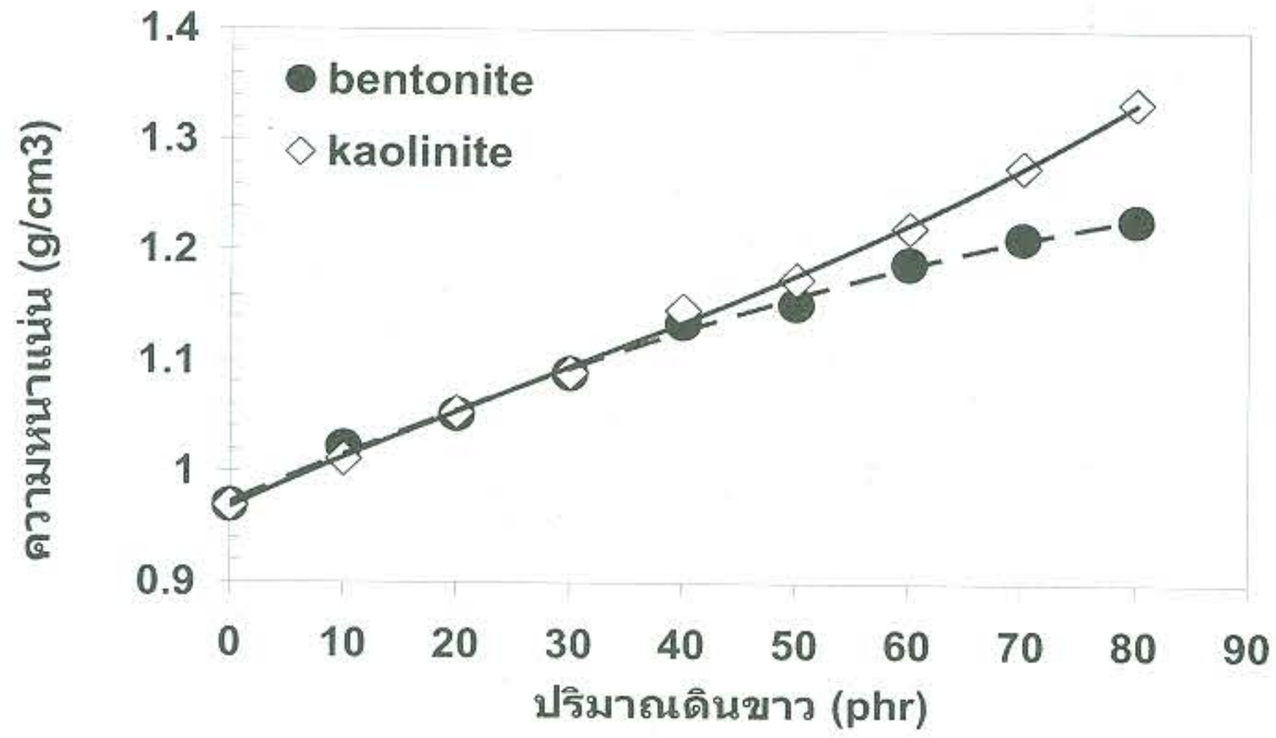

**รูปที่ 4** แสดงลักษณะความดันสูงสุดต่อความดันต่ำสุด



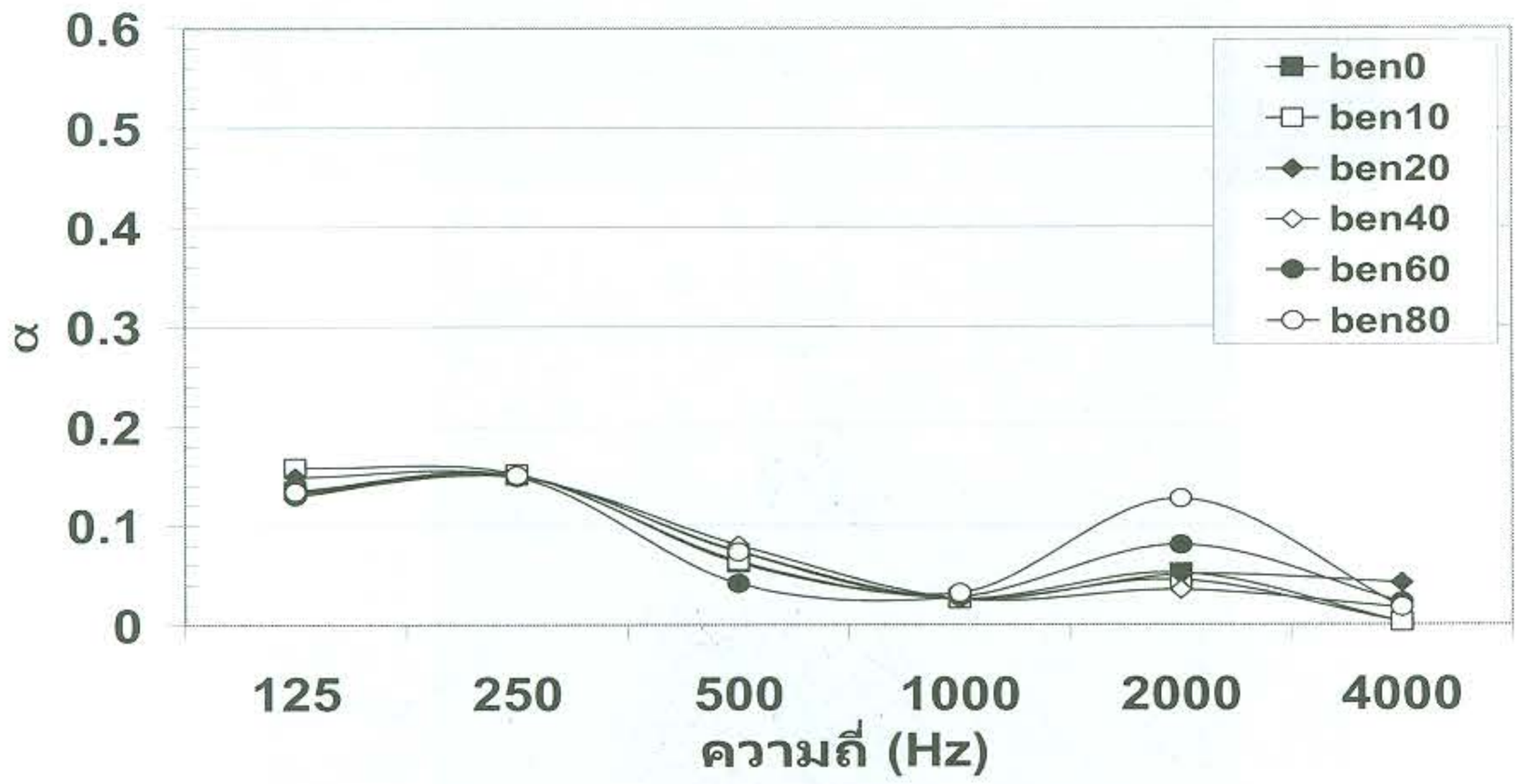
รูปที่ 5 ชุดทดสอบสมบัติเชิงพลวัตของการบิด



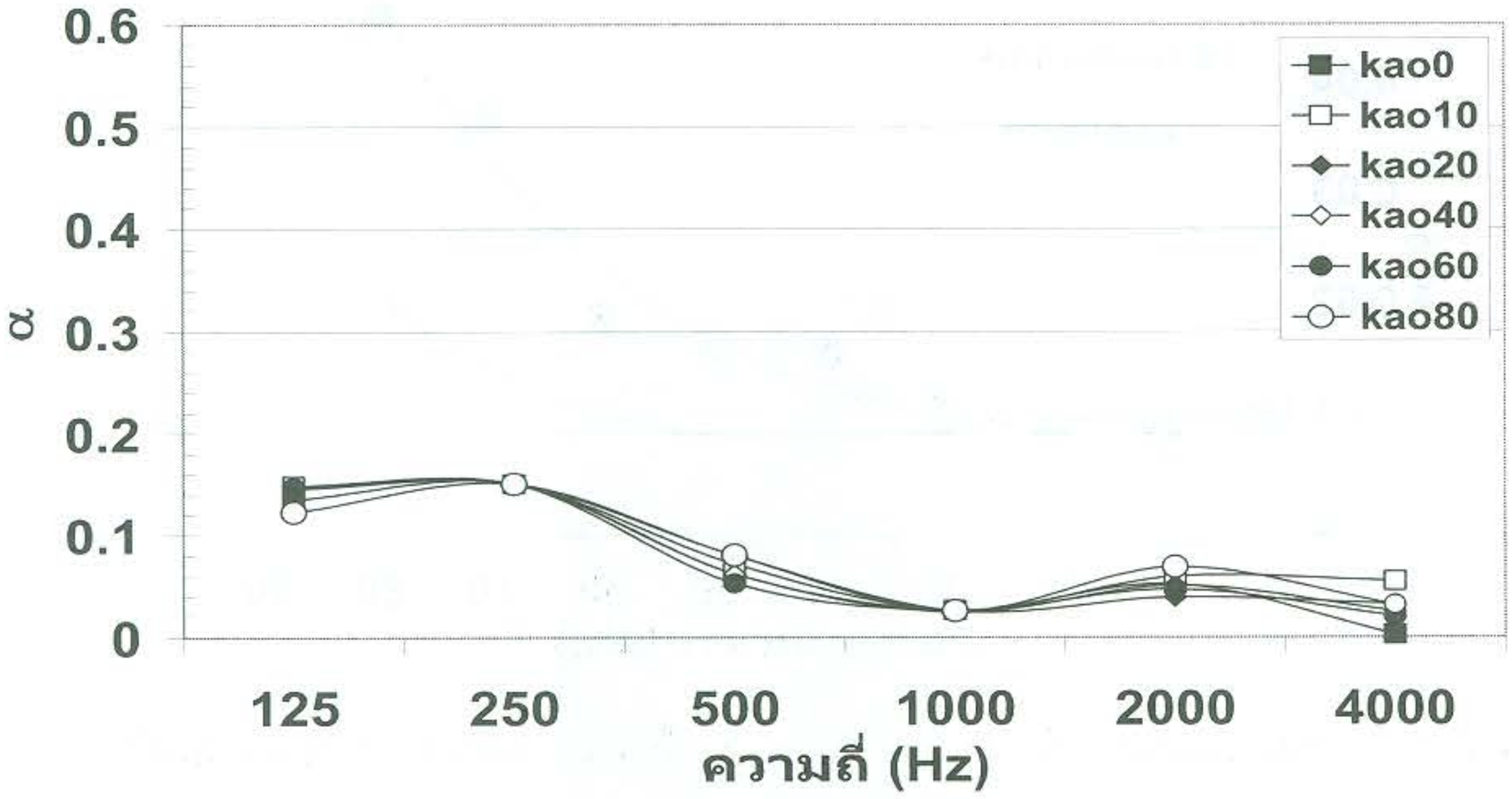

รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า tan δ กับปริมาณดินขาวของแผ่นดูดซับเสียงที่ผสมดินขาวต่างชนิดกัน



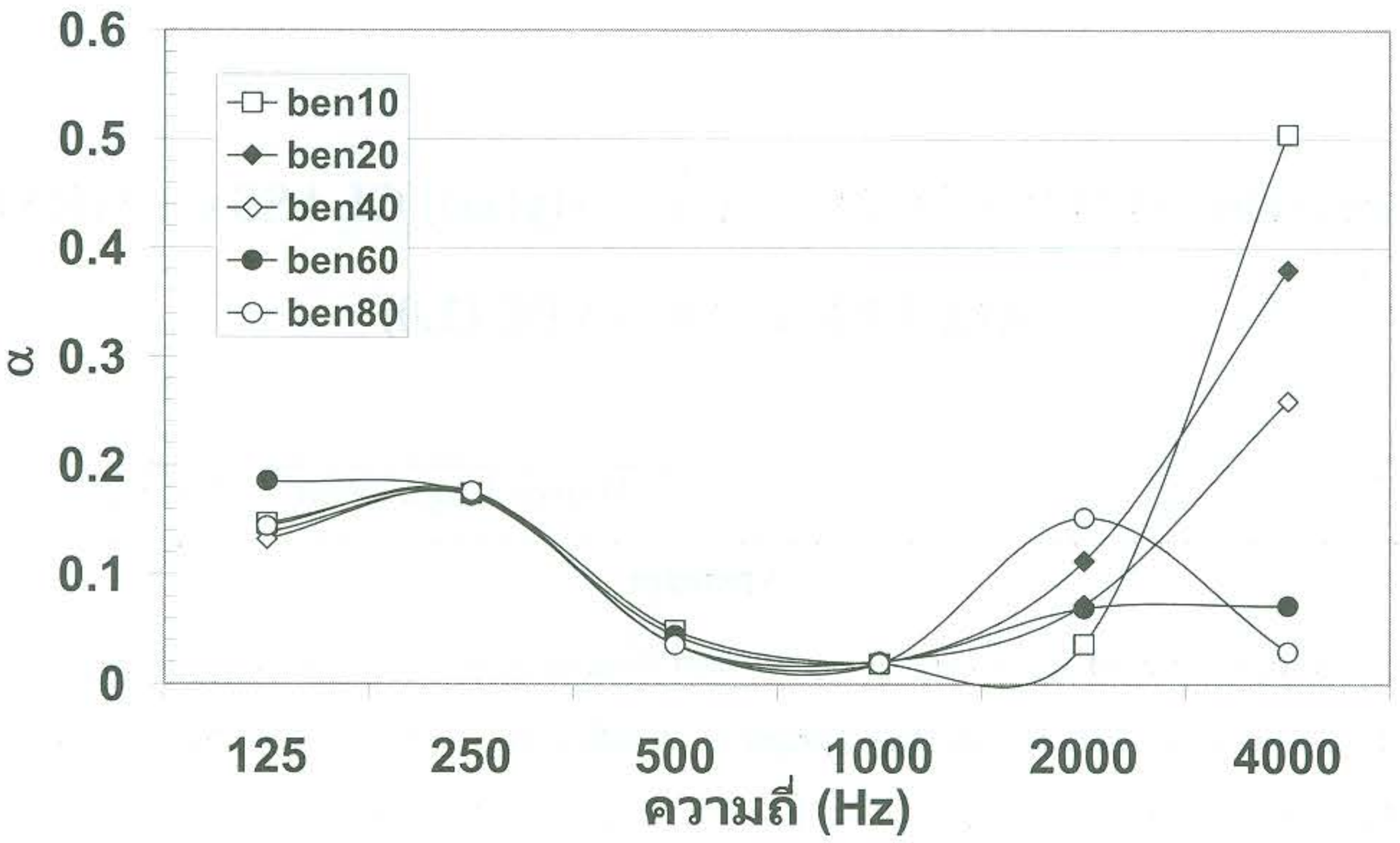

รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นกับปริมาณดินขาวของแผ่นดูดซับเสียงที่ผสมดินขาวต่างชนิดกัน



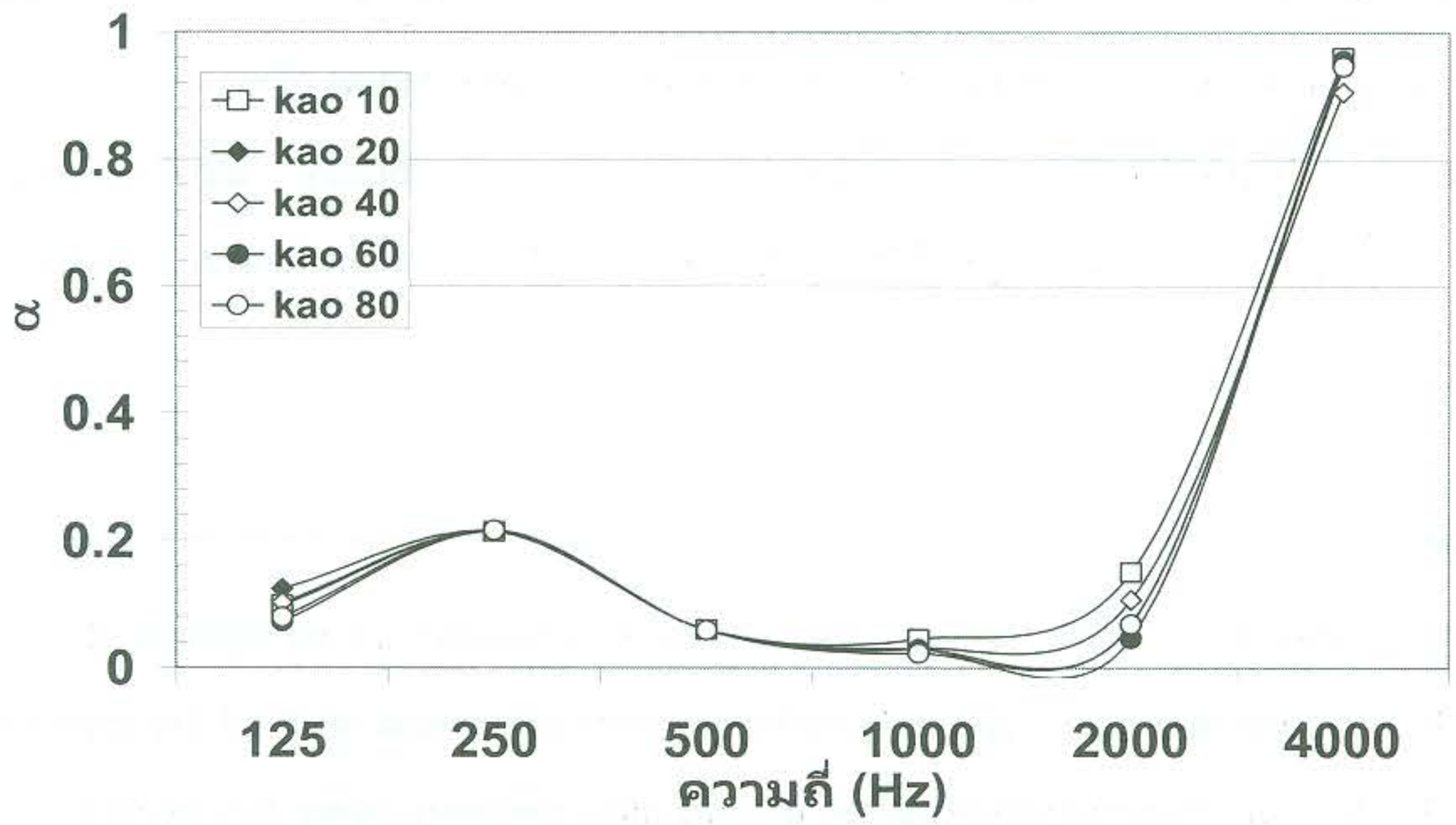

**รูปที่ 8** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\alpha$ กับความถี่ของแผ่นดูดซับเสียงความหนา 1.5 mm ที่ผสมดินขาวชนิดเบนโทไนต์ปริมาณต่างๆ




**รูปที่ 9** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\alpha$ กับความถี่ของแผ่นดูดซับเสียงความหนา 1.5 mm ที่ผสมดินขาวชนิดคาโอลิไนต์ปริมาณต่างๆ




**รูปที่ 10** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับความถี่ของแผ่นดูดซับเสียงความหนา 5 mm ที่ผสมดินขาวชนิดเบนโทไนต์ปริมาณต่างๆ




**รูปที่ 11** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับความถี่ของแผ่นดูดซับเสียงความหนา 5 mm ที่ผสมดินขาวชนิดคาโอลิไนต์ปริมาณต่างๆ

ว.วิทย. มข. 36(4) 348-363 (2551) KKU Sci. J.36(4) 348-363 (2008)

# HYPERIDENTITIES IN THE $x(yz) \approx x(y(zz))$ CLASS OF GRAPH ALGEBRAS OF TYPE (2,0)

*Mittree Krapeedang* [1] *Tiang Poomsa-ard* [1*]

**Abstract**

Graph algebras establish a connection between directed graphs without multiple edges and special universal algebras of type (2,0). We say that a graph $G$ satisfies an identity $s \approx t$ if the corresponding graph algebra $\underline{A(G)}$ satisfies $s \approx t$. A graph $G = (V, E)$ is called an $x(yz) \approx x(y(zz))$ graph if the graph algebra $\underline{A(G)}$ satisfies the equation $x(yz) \approx x(y(zz))$. An identity $s \approx t$ of terms $s$ and $t$ of any type $\tau$ is called a hyperidentity of an algebra $\underline{A}$ if whenever the operation symbols occurring in $s$ and $t$ are replaced by any term operations of $\underline{A}$ of the appropriate arity, the resulting identities hold in $\underline{A}$.

In this paper we characterize $x(yz) \approx x(y(zz))$ graph algebras, $x(yz) \approx x(y(zz))$ class, identities and hyperidentities in the $x(yz) \approx x(y(zz))$ class of graph algebras.

**Keywords.** identity, hyperidentity, term, normal form term, binary algebra, graph algebra, $x(yz) \approx x(y(zz))$ graph algebra, $x(yz) \approx x(y(zz))$ class. 2000 Mathematical Subject Classification: 05C85, 03B15

## 1. Introduction

An identity $s \approx t$ of terms $s$, $t$ of any type $\tau$ is called a *hyperidentity* of an algebra $\underline{A}$ if whenever the operation symbols occurring in $s$ and $t$ are replaced by any term operations of $\underline{A}$ of the appropriate arity, the resulting identity holds in $\underline{A}$. Hyperidentities can be defined more precisely using the concept of a hypersubstitution. We fix a type $\tau = (n_i) i \in I, n_i > 0$ for all $i \in I$, and operation symbols $(f_i) i \in I$, where $f_i$ is $n_i - ary$. Let $W_\tau(X)$ be the set of all terms of type $\tau$ over some fixed alphabet $X$, and let $A\lg(\tau)$ be the class of all algebras of type $\tau$. Then a mapping

$$\sigma : \{ f_i \mid i \in I \} \to W_T(X)$$

[1] *Department of Mathematics , Faculty of Science, Mahasarakham University, Mahasarakham 44150, Thailand*

* corresponding author, *E-mail: tiang@kku.ac.th*

which assigns to every $n_i - ary$ operation symbol $f_i$ an $n_i - ary$ term will be called a hypersubstitution of type $\tau$ (for short, a hypersubstitution). By $\widehat{\sigma}$ we denote the extension of the hypersubstitution $\sigma$ to a mapping

$$\widehat{\sigma}: W_\tau(X) \to W_\tau(X).$$

The term $\widehat{\sigma}[t]$ is defined inductively by

$(i)\ \widehat{\sigma}[x] = x$ for any variable $x$ in the alphabet $X$

and

$$(ii)\ \widehat{\sigma}\left[f_i\left(t_1,\ldots,t_{n_i}\right)\right] = \sigma\left(f_i\right)^{W_\tau(X)}\left(\widehat{\sigma}[t_1],\ldots,\widehat{\sigma}\left[t_{n_i}\right]\right).$$

Here $\sigma\left(f_i\right)^{W_\tau(X)}$ on the right hand side of $(ii)$ is the operation induced by $\sigma\left(f_i\right)$ on the term algebra $W_\tau(X)$.

Graph algebras have been invented in Shallon (1979) to obtain examples of nonfinitely based finite algebras. To recall this concept, let $G = (V, E)$ be a (directed) graph with the vertex set $V$ and the set of edges $E \subseteq V \times V$. Define the graph algebra $\underline{A(G)}$ corresponding to $G$ to have the underlying set $V \cup \{\infty\}$, where $\infty$ is a symbol outside $V$, and two basic operations, a nullary operation pointing to $\infty$ and a binary one denoted by juxtaposition, given for $u, v \in V \cup \{\infty\}$ by

$$uv = \begin{cases} u, & if\ (u,v) \in E, \\ \infty, & otherwise. \end{cases}$$

Graph identities were characterized (Kiss, Pöschel and Pösche 1990) by using the rooted graph of a term $t$ where the vertices correspond to the variables occurring in $t$. Since on a graph algebra we have one nullary and one binary operation, $\sigma(f)$ in this case is a binary term in $W_\tau(X)$, i.e., a term built up from variables of a two-element alphabet and a binary operation symbol $f$ corresponding to the binary operation of the graph algebra.

Poschel has shown that any term over the class of all graph algebras can be uniquely represented by a normal form term and that there is an algorithm to construct the normal form term to every given term $t$. Denecke and Poomsa-ard (1997), Poomsa-ard (2000), Poomsa-ard, Wetweerapong and Samartkoon (2004,2005) characterized graph hyperidentities, associative graph hyperidentities, idempotent graph hyperidentities and transitive graph hyperidentities respectively by using normal form graph hypersubstitutions.

A graph $G=(V,E)$ is called $x(yz)\approx x(y(zz))$ if the graph $\underline{AG}$ satisfied the equation $x(yz)\approx x(y(zz))$. In this paper, we characterize the class of all $x(yz)\approx x(y(zz))$ graph algebras, $x(yz)\approx x(y(zz))$ class, identities and hyperidentities in the class of all $x(yz)\approx x(y(zz))$ graph algebras.

## 2. $x(yz)\approx x(y(zz))$ graph algebras

We begin with a more precise definition of terms of the type of graph algebras.

**Definition 2.1.** The set $W_\tau(X)$ of all terms over the alphabet

$$X=\{x_1,x_2,x_3,\ldots\}$$

is defined inductively as follows:

(i) every variable $x_i, i=1,2,3,\ldots$, and $\infty$ are terms;

(ii) if $t_1$ and $t_2$ are terms, then $f=\{t_1,t_2\}$ is a term; instead of $f=\{t_1,t_2\}$ we will write $t_1t_2$, for short;

(iii) $W_\tau(X)$ is the set of all terms which can be obtained from (i) and (ii) in finitely many steps.

Terms built up from the two-element set $X_2=\{x_1,x_2\}$ of variables are thus binary terms. We denote the set of all binary terms by $W_\tau(X_2)$.The leftmost variable of a term $t$ is denoted by $L(t)$ and rightmost variable of a term $t$ is denoted by $R(t)$. A term, in which the symbol $\infty$ occurs is called a trivial term.

**Definition 2.2.** To each non-trivial term $t$ of type $\tau=(2,0)$ one can define a directed graph $G(t)=(V(t),E(t))$, where the vertex set $V(t)$ is the set of all variables occurring in $t$, and $E(t)$ is defined inductively by

$E(t)=\varnothing$ if $t$ is a variable and $E(t_1,t_2)=E(t_1)\cup E(t_2)\cup\{(L(t_1),L(t_2))\}$,

When $t=t_1t_2$ is a compound term and $L(t_1),L(t_2)$ are the leftmost variables in $t_1$ and $t_2$ respectively.

$L(t)$ is called the root of the graph $G(t)$ and the pair $(G(t),L(t))$ is the rooted graph corresponding to $t$.

Formally, to every trivial term t we assign the empty graph $\varnothing$.

**Definition 2.3.** We say that a graph $G=(V,E)$ satisfies an identity $s\approx t$ if the corresponding graph algebra $\underline{AG}$ satisfies $s\approx t$ (i.e., we have $s=t$ for every assignment $V(s)\cup V(t)\to V\cup\{\infty\}$), and in this case, we write

$G\models s\approx t$.

**Definition 2.4.** Let $G=(V,E)$ and $G'=(V',E')$ be graphs. A homomorphism h from $G$ into $G'$ is a mapping $h:V\to V'$ carrying edges to edges, that is, for which $(u,v)\in E$ implies $(h(u),h(v))\in E'$.

In Kiss, Poschel and Posche.(1990) it was proved:

**Proposition 2.1.** Let $s$ and $t$ be non-trivial terms from $W_\tau(X)$ with variables $V(s)=V(t)=\{x_0, x_1, ..., x_n\}$ and $L(s)=L(t)$. Then a graph $G=(V,E)$ satisfies $s \approx t$ if and only if the graph algebra $\underline{AG}$ has the following property:

A mapping $h: V(s) \longrightarrow V$ is a homomorphism from $G(s)$ into $G$ iff it is a homomorphism from $G(t)$ into $G$.

Proposition 2.1 gives a method to check whether a graph $G=(V,E)$ satisfies the equation $s \approx t$. Hence, we can check whether a graph $G=(V,E)$ has an $x(yz) \approx x(y(zz))$ graph algebra by the following proposition.

**Proposition 2.2.** *Let* $G=(V,E)$ be a graph. Then the following are equivalent:

(i) G has $x(yz) \approx x(y(zz))$ graph algebra,

(ii) for any $a, b, c \in V$, *if* $(a, b), (b, c) \in E$, *then* $(c, c) \in E$.

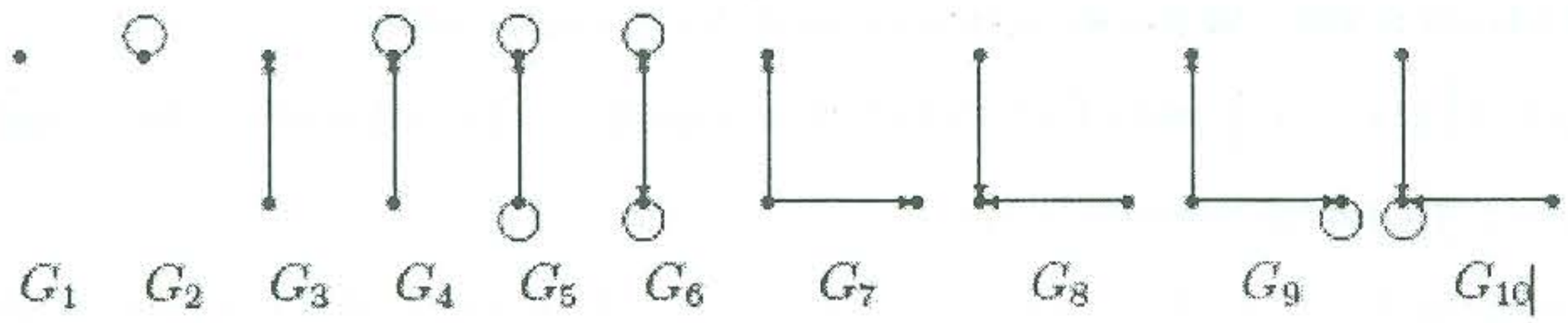
Proof. (i) $\Longrightarrow$ (ii): Suppose *Let* $G=(V,E)$ has an $x(yz) \approx x(y(zz))$ graph algebra. Let $s$ and $s$ be non-trivial terms such that $s = x(yz)$, $t = x(y(zz))$.

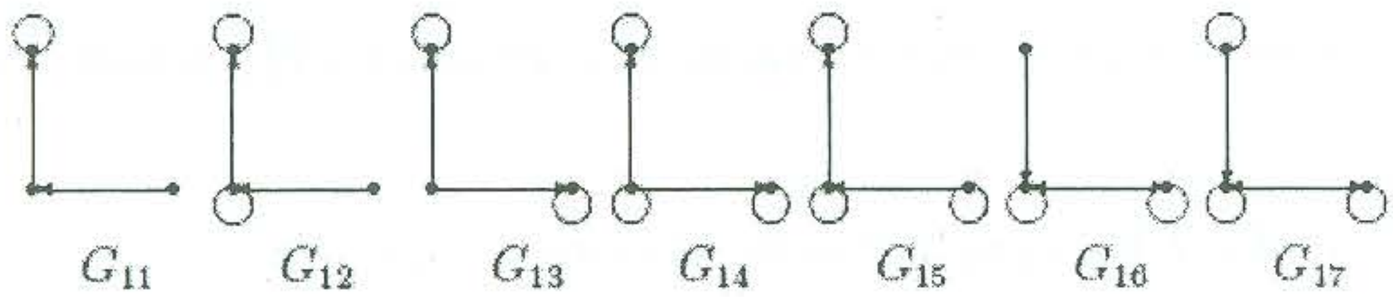
Let $(a, b), (b, c) \in E$ *and* $h : V(t) \rightarrow V$ be a function such that $h(x) = a$, $h(y) = b$, $h(z) = c$. Since $(h(x), h(y)) = (a, b) \in E$ and $(h(y), h(z)) = (b, c) \in E$, we have h is a homomorphism from $G(s)$ into $G$. By Proposition 2.1, we get h is a homomorphism from $G(t)$ into $G$. Since $(z, z) \in E(t)$, we have $(h(z), h(z)) = (c, c) \in E$.

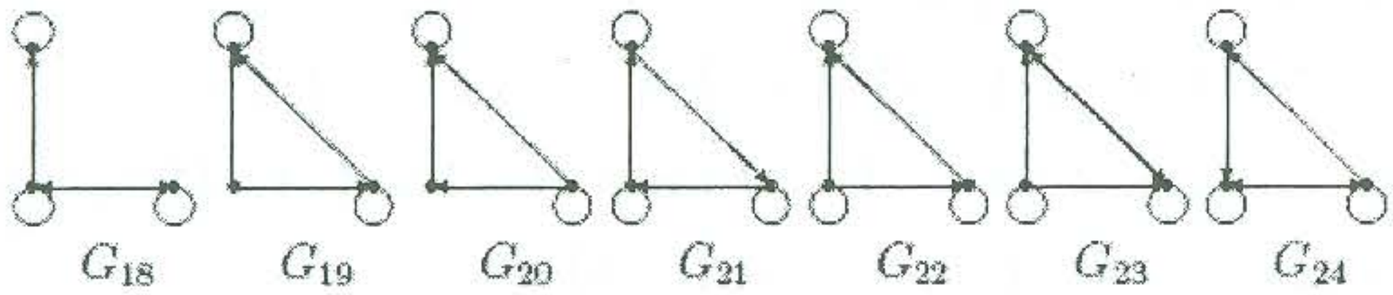
$(ii) \Longrightarrow (i)$: Suppose $G=(V,E)$ is a graph which satisfies (ii). Let $s$ and $t$ be non-trivial terms such that $s = x(yz)$ and $t = x(y(zz))$. Let $h : V(t) \rightarrow V$ be a function. Suppose that $h$ is a homomorphism from $G(s)$ into $G$. Since $(x, y), (y, z) \in E(s)$, we have $(h(x), h(y)) \in E$ and $(h(y), h(z)) \in E$. By (ii), we get $(h(z), h(z)) \in E$. Therefore, $h$ is a homomorphism from $G(t)$ into $G$. Clearly, if h is a homomorphism from $G(t)$ into $G$, then it is a homomorphism from $G(s)$ into $G$. By Proposition 2.1, we get $\underline{A(G)}$ satisfies $x(yz) \approx x(y(zz))$.

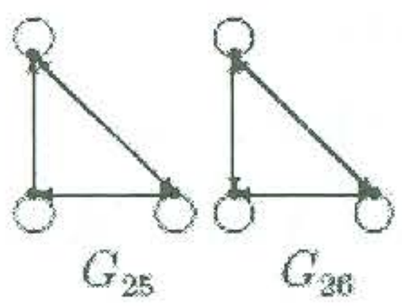
From Proposition 2.2, we see that all graphs which have $x(yz) \approx x(y(zz))$.

graph algebras are the following graphs:




and all graphs such that each component of every subgraph induced by at most three vertices is one of these graphs.

## 3. Identities in $x(yz) \approx x(y(zz))$ graph algebras

Graph identities were characterized in Kiss, Pöschel and Pösche (1990) by the following proposition:

**Proposition 3.1.** Let $G=(V,E)$ be a graph and let $h : X \cup \{\infty\} \to V \cup \{\infty\}$ *be an evaluation of the variables such that* $h(\infty)=\infty$. *Consider the canonical extension of* $h$ *to the set of all terms. Then there holds: if t is atrivial term then* $h(t)=\infty$. *Otherwise, if* $h: G(t) \to G$ *is a homomorphism of graphs, then* $h(t)=h(L(t))$, *and if h is not a homomorphism of graphs,then* $h(t)=\infty$.

In Poomsa (2000), the following lemma was proved:

**Lemma 3.1.** Let $G=(V,E)$ be a graph, let t be a term and let

$$h: X \to V \cup \{\infty\}$$

*be an evaluation of the variables. Then:*

*(i) If $h$ is a homomorphism from $G(t)$ into $G$ with the property that the*subgraph of $G$ induced by $h(V(t))$ is complete, then $h(t)=h(L(t))$;

*(ii) If $h$ is a homomorphism from $G(t)$ into $G$ with the property that the*subgraph of $G$ induced by $h(V(t))$ *is disconnected, then $h(t)=\infty$.*

Now, we apply our results to characterize all identities in the class of all $x(yz)\approx x(y(zz))$ graph algebras. Clearly, if $s$ and $t$ are trivial, then $s\approx t$ is an identity in the class of all $x\,x(yz)\approx x(y(zz))$ graph algebras and $x\approx x$ is an identity in the class of all $x(yz)\approx x(y(zz))$ graph algebras, too. So we consider the case that $s$ and $t$ are non-trivial and different from variables. Before we do this, we need some notation about neighborhood of a vertex of a graph. For any term $t$ we defined $N_0^t(x)$ is the set of all out-neighborhood of $x$ in $G(t)$ (i.e., $N_0^t(x)=\{y \mid (x,y)\in E(t)\}$) and $N_i^t(x)$ is the set of all in-neighborhood of $x$ in $G(t)$ (i.e., $N_i^t(x)=\{y \mid (y,x)\in E(t)\}$). Then all identities in the class of all $x(yz)\approx x(y(zz))$ graph algebras are characterized by the following theorem:

**Theorem 3.1.** *Let $s$ and $t$ be non-trivial terms such that $s$ $s\neq t$. Then $s\approx t$ is an identity in the class of all $x(yz)\approx x(y(zz))$ graph algebras if and only if the following conditions are satisfied:*

(i) $L(s)=L(t)$,

(ii) $V(s)=V(t)$,

(iii) *for any $x,y\in V(s)$ with $x\neq y$, $(x,y)\in E(s)$ if and only if $(x,y)\in E(t)$,*

(iv) $N_i^s(L(s))\neq\emptyset$ *if and only if* $N_i^t(L(t))\neq\emptyset$

(v) *if $N_i^s(L(s))\neq\emptyset$ then for any $x\in V(s)$ which $x\neq L(s)$ there exists $y\in N_i^s(x)$ such that $N_i^s(y)\neq\emptyset$ if and only if there exists $z\in N_i^t(x)$ such that $N_i^t(z)\neq\emptyset$*

*Proof.* Suppose that $s\approx t$ is an identity in the class $x(yz)\approx x(y(zz))$ graph algebras. Since any complete graph is an $x(yz)\approx x(y(zz))$ graph it follows that $L(s)=L(t)$ and $V(s)=V(t)$

Suppose that there exist $x,y\in V(s)$ with $x\neq y$ such that $(x,y)\in E(s)$ but $(x,y)\notin E(t)$. Consider the graph $G=(V,E)$ such that $V=\{0,1,2\}$, $E=\{(0,0),(0,1),(1,0),(1,1),(1,2),(2,1),(2,2),(2,0)\}$. By Proposition 2.2, $A(G)$ has an $x(yz)\approx x(y(zz))$ graph algebra. Let $h: V(s)\to V$ be the restriction of an evaluation of the variables such that $h(x)=0$, $h(y)=2$ and $h(z)=1$ for all other $z\in V(s)$. We see that $h(s)=\infty$, and $h(t)=h(L(t))$. Hence, $A(G)$ does not satisfy $s\approx t$. By the same way, if there

exist $x, y \in V(s)$ with x $\neq$ y such that $(x, y) \in E(t)$ but $(x, y) \notin E(s)$, then we prove there exists an $x(yz) \approx x(y(zz))$ graph such that $\underline{A(G)}$ does not satisfy $s \approx t$. Suppose that $N_i^s(L(s)) \neq \varnothing$ but $N_i^t(L(t)) \neq \varnothing$. Consider the graph $G = (V, E)$ such that $V = \{0, 1\}$, $E = \{(0, 1), (1, 1)\}$. Let $h: V(s) \rightarrow V$ be the restriction of an evaluation of the variables such that $h(L(s))) = 0$ and $h(z) = 1$ for all other $z \in V(s)$. We see that $h(s) = \infty$ and $h(t) = h(L(t))$. Hence, $\underline{A(G)}$ does not satisfy $s \approx t$. Similarly, we prove the conversely. Suppose that $N_i^s(L(s)) = \varnothing$ and there exists $x \in V(s)$ which has $y \in N_i^s(x)$ such that $N_i^s(y) \neq \varnothing$ but $N_i^t(z) = \varnothing$ for all $z \in N_i^t(x)$. For this case, we see that $x \in N_o^s(L(s))$, $x \in N_o^t(L(t))$ and $(x, x) \in E(s)$ but $(x, x) \in E(t)$. Consider the graph $G = (V, E)$ such that $V = \{0, 1, 2\}$, $E = \{(0, 1), (1, 2), (2, 2), (0, 2)\}$. Then by Proposition 2.2, $\underline{A(G)}$ has an $x(yz) \approx x(y(zz))$ graph algebra. Let $h: V(s) \rightarrow V \bigcup \{\infty\}$ be the restriction of an evaluation of the variables such that $h(L(s)) = 0$, $h(x) = 1$ and $h(z) = 2$ for all other $z \in V(s)$. We see that $h(s) = \infty$ and $h(t) = h(L(t)) = 0$. Hence, $\underline{A(G)}$ does not satisfy $s \approx t$. . Similarly, we prove the conversely.

Conversely, suppose that $s$ and $t$ are non-trivial terms satisfying (i), (ii), (iii), (iv) and (v). Let $G = (V, E)$ be an $x(yz) \approx x(y(zz))$ graph and let $h: V(s) \rightarrow V$ be a function. Suppose that h is a homomorphism from $G(s)$ into $G$ and let $(x, y) \in E(t)$. If $N_i^s(L(s)) \neq \varnothing$ and $x = y$, then by (iv), we have there exists $z \in V(s)$ such that $z, L(s)) \in E(s)$. Hence there exists $w \in V(s)$ such that $(w, z), (z, L(s)) \in E(s)$, we have $(h(w), h(z)), (h(z), h(L(s))) \in E$. By Proposition 2.2, we get $(h(L(s)), h(L(s)))) \in E$ and thus $(h(z), h(z)) \in E$ for all $z \in V(s)$. Hence $(h(x), h(x)) \in E$. If $N_i^s(L(s)) = \varnothing$ and $x = y$, then we have x $\neq$ L(s). By (v) there exists $z \in N_i^s(x)$ such that $N_i^s(z) \neq \varnothing$. Let $(w, z), (z, x) \in E(s)$, we have $(h(w), h(z)), (h(z), h(x)) \in E$. By Proposition 2.2, we get $(h(x), h(x)) \in E$. Suppose that x $\neq$ y, then by (iii), $(x, y) \in E(s)$. Therefore $(h(x), h(y)) \in E$. Hence $h$ is a homomorphism from $G(t)$ into $G$. By the same way, if $h$ is a homomorphism from $G(t)$ into $G$, then we prove that it is a homomorphism from $G(s)$ into $G$. By Proposition 2.1, we get that $\underline{A(G)}$ satisfies $s \approx t$

## 4. The $x(yz) \approx x(y(zz))$ class

Let $\varsigma$ be the class of all $x(yz) \approx x(y(zz))$ graph algebras and let $Id\varsigma$ be the set of all identities satisfied in $\varsigma$. In this section we want to characterize the equation of terms $s \approx t$ such that the class of all $s \approx t$ graph algebras is the class $\varsigma$. Now we begin with a definition of a relation between the equation of terms.

**Definition 4.1.** For any term equations $s \approx t$ and $s' \approx t'$, we said that $s \approx t$ relate to $s' \approx t'$, $\left(s \approx t \sim s' \approx t'\right)$ if and only if the class of all $s \approx t$ graph algebras and the class of all $s' \approx t'$, graph algebras are the same.

We see that this relation is an equivalence relation. If $s \approx t \sim x\left(yz\right) \approx x\left(y\left(zz\right)\right)$, then we said that $s \approx t$ is in the class $x\left(yz\right) \approx x\left(y\left(zz\right)\right)$. Clearly, if $s$ and $t$ are trivial terms, then $s \approx t$ is not belong to the class $x\left(yz\right) \approx x\left(y\left(zz\right)\right)$ and $x \approx x$ is not belong to the class $x\left(yz\right) \approx x\left(y\left(zz\right)\right)$, too. So we consider the case that $s$ and $t$ are non-trivial and different from variables. Before we do this let us introduce some notation. For any term $t$ let $L_i\left(t\right) = \left\{y \in V\left(t\right) | \vec{d}\left(L\left(t\right), y\right) = i \text{ in } G\left(t\right)\right\}$. Then all equations $s \approx t$ in the class $x\left(yz\right) \approx x\left(y\left(zz\right)\right)$ are characterized by the following theorem:

**Theorem 4.1.** *Let s and t be non-trivial terms and different from variables.*

*Then* $s \approx t$ *is belong to the* $x\left(yz\right) \approx x\left(y\left(zz\right)\right)$ *class if and only if the following conditions are satisfied:*

*(i)* $s \approx t \in Id\zeta'$

*(ii) one of* $G\left(s\right)$ *and* $G\left(t\right)$, $G\left(t\right)$ *say, has the properties that* $L_2\left(t\right) \neq \varnothing$, $L_3\left(t\right) = \varnothing$, *and for any* $x \in V\left(s\right)$ *if* $x \in L_i\left(t\right)$, *then there exists no* $x' \in L_j\left(t\right)$ which $j \geq i$ such that $\left(x', x\right) \in E\left(t\right)$,

*(iii) if* $G\left(t\right)$ *has the properties in (ii), then there exists* $z \in L_2\left(t\right)$ *such that* $\left(z, z\right) \in E\left(s\right)$.

*Proof.* Suppose that $s \approx t$ is in the class $x\left(yz\right) \approx x\left(y\left(zz\right)\right)$. Clearly, $s \approx t \in Id\zeta'$. Notice that since $s \approx t \in Id\zeta'$, by Theorem 3.1(iii), we have $L_i\left(s\right) = L_i\left(t\right)$ for all $i$.

Suppose that both of $G\left(s\right)$ and $G\left(t\right)$ have not the properties in (ii). Consider the graph $G = \left(V, E\right)$ such that $V = \left\{0, 1, 2\right\}$, $E = \left\{\left(0, 1\right), \left(1, 2\right)\right\}$. We see that $h\left(s\right) = h\left(t\right) = \infty$ for all assignment $h : V\left(s\right) \rightarrow V$ such that the range of $h$ is $V$. So $h\left(s\right) = h\left(t\right)$ for all assignment $h : V\left(s\right) \rightarrow V$. Hence $G$ has an $s \approx t$ graph algebra but $G \neq \zeta'$. Therefore $s \approx t$ does not belong to the class of $x\left(yz\right) \approx x\left(y\left(zz\right)\right)$.

Suppose that $G\left(t\right)$ has the properties in (ii). If $\left(z, z\right) \notin E\left(s\right)$ for all $z \in L_2\left(t\right)$, then consider the graph $G = \left(V, E\right)$ such that $V = \left\{0, 1\right\}$, $E = \left\{\left(0, 0\right), \left(0, 1\right)\right\}$. We see that $G \neq \zeta'$. Consider the assignment $h : V\left(s\right) \rightarrow V$ such that the range of $h$ is $V$. Since $s \approx t \in Id\zeta'$ and by the assumption, we see that $h\left(t\right) = h\left(s\right) = 0$, if $h\left(z\right) = 2$ for all $z \in L_2\left(t\right)$, and $h\left(y\right) = 0$ for all other $z \in V\left(s\right)$. Otherwise $h\left(t\right) = h\left(s\right) = \infty$. Thus, we have $h\left(s\right) = h\left(t\right)$ for all assignment $h : V\left(s\right) \rightarrow V$. Hence $G$ is an $s \approx t$ graph but $G \neq \zeta'$. Therefore $s \approx t$ does not belong to the class $x\left(yz\right) \approx x\left(y\left(zz\right)\right)$.

Conversely, suppose that $s$ and $t$ are non-trivial terms and different from variables satisfying (i), (ii) and (iii). Since $s \approx t \in Id\varsigma$', we have $\varsigma$' is a subset of the class of all $s \approx t$ graphs. So we only prove that the class of all $s \approx t$ graph algebras is a subset of $\varsigma$'. Let $G=(V,E)$ be an $s \approx t$ graph and let $(a, b), (b, c) \in E$. Further, suppose that $L_3(t)=\varnothing, L_2(t)\neq\varnothing$. and for any $x \in V(s)$ if $x \in L_i(t)$ , then there exists no $x' \in L_i(t)$ which $j \geq i$ such that $(x', x) \in E(t)$ while as there exists $z \in L_2(s)$ such that $(z, z) \in E(s)$. Let $h: V(s) \to V$ be a function such that $h(L(t)) = a$, $h(x) = b$ for all $x \in L_1(t)$ and $h(y) = c$ for all $y \in L_2(t)$ . We have $h$ is a homomorphism from $G(t)$ into $G$ . By Proposition 2.1, we get $h$ is a homomorphism from $G(s)$ into $G$ . Since there exists $z \in L_2(t)$ such that $(z, z) \in E(s)$, we have that $(h(z), h(z)) = (c, c) \in E$. Hence $G$ is an $x(yz) \approx x(y(zz))$ graph. Therefore the class of all $s \approx t$ graphs is a subset of $\varsigma$' . Similarly, we prove the case that $G(s)$ has the properties (ii).

From Theorem 4.1, we see that $(x(yz))w \approx (x(y(zz)))w$, $x((yz)w) \approx x((yz)(ww))$, $((x(yz))u)w \approx ((x(y(zz)))u)w)$, $(x((yz)w))u \approx (x((y(zz))w))u$, $(x((yz)w))u \approx (x((y(zz))(ww)))u$, $x(((yz)w))u) \approx x(((y(zz))w))u)$ are the examples of the equations of terms which belong to the $x(yz) \approx x(y(zz))$ class.

## 5. Hyperidentities in the $x(yz) \approx (x(z(yy)$ class of graph algebras

Now we want to make precise the concept of a hypersubstitution for graph algebras.

**Definition 5.1.** A mapping $\sigma: \{f, \infty\} \to W_\tau(X_2)$, where f is the operation symbol corresponding to the binary operation of a graph algebra is called graph hypersubstitution if $\sigma(\infty)=\infty$ and $\sigma(f)=s \in W_\tau(W_2)$ The graph hypersubstitution with $\sigma(f)=s$ is denoted by $\sigma_s$.

**Definition 5.2.** An identity $s \approx t$ is an $x(yz) \approx x(y(zz))$ graph hyperidentity iff for all graph hypersubstitutions $\sigma$, the equations $\hat{\sigma}[s] \approx \hat{\sigma}[t]$ are identities in $\varsigma$' .

Let $s \approx t$ belong to the class of $x(yz) \approx x(y(zz))$. By Theorem 4.1, we see that if we want to find all hyperidentities in the class of all $s \approx t$ graph algebras, it is enough to find all hyperidentities in the class of all $x(yz) \approx x(y(zz))$ graph algebras.

Further if we want to check that $s \approx t$ is a hyperidentity in in the class of $\varsigma$' , we can restrict our considerations to a (small) subset of $Hyp(\varsigma)$ - the set of all graph hypersubstitutions.

In Ploka.(1995) the following relation between hypersubstitutions was defined:

**Definition 5.3.** Two graph hypersubstitutions $\sigma_1, \sigma_2$ are called $\varsigma$ - equivalent iff $\sigma_1(f) \approx \sigma_2(f)$ is an identity in $\varsigma$. In this case we write $\sigma_1 \sim_\varsigma \sigma_2$.

In Denecke and Reichel (1995) (see also [4]) the following lemma was proved:

**Lemma 5.1.** If $\hat{\sigma}_1[s] \approx \hat{\sigma}_1[t] \in Id\varsigma$ and $\sigma_1 \sim_\varsigma \sigma_2$. then $\hat{\sigma}_2[s] \approx \hat{\sigma}_2[t] \in Id\varsigma$.

Therefore it is enough to consider the quotient set $Hyp\varsigma / \sim_\varsigma$.

In Poomsa-ard Wetweerapong, and Samartkoon (2004) it was shown that any non-trivial term $t$ over the class of graph algebras has a uniquely determined normal form term $NF(t)$ and there is an algorithm to construct the normal form term to a given term $t$. Now we want to describe how to construct the normal form term . Let $NF(t)$ be a non-trivial term. The normal form term of $t$ is the term $NF(t)$ constructed by the following algorithm:

(i) Construct $G(t) = (V(t), E(t))$.

(ii) Construct for every $x \in V(t)$ the list $l_x = \left(x_{i_1}, \ldots, x_{i_{k(x)}}\right)$ of all outneighbors $\left(i.e.\ \left(x, x_{i_j}\right) \in E(t),\ 1 \le j \le k(x)\right)$ ordered by increasing indices $i_1 \le \ldots \le i_{k(x)}$ and let $s_x$ be the term $\left(\ldots\left(\left(xx_{i_1}\right)x_{i_2}\right)\ldots x_{i_{k(x)}}\right)$.

(iii) Starting with $x := L(t), Z := V(t), s := L(t)$, choose the variable $x_i \in Z \cap V(s)$ with the least index i, substitute the first occurrence of $x_i$ by the term $s_{x_i}$ denote the resulting term again by $s$ and put $Z := Z \setminus \{x_i\}$.

While $Z \neq \varnothing$ continue this procedure. The resulting term is the normal form $NF(t)$ . The algorithm stops after a finite number of steps, since $G(t)$ is a rooted graph . Without difficulties one shows G(NF(t)) = G(t), $G(NF(t)) = G(t), L(NF(t)) = L(t)$.

In Denecke and Poomsa-ard (1997) the following definition was given:

**Definition 5.4**. The graph hypersubstitution $\sigma_{NF(t)}$, is called normal form graph hypersubstitution. Here $NF(t)$ is the normal form of the binary term $t$ .

Since for any binary term $t$ the rooted graphs of $t$ and $NF(t)$ are the same, we have $t \approx NF(t) \in Id\varsigma$. Then for any graph hypersubstitution $\sigma_t$ with $\sigma_t(f) = t \in W_\tau(X_2)$, one obtains $\sigma_t \sim_\varsigma \sigma_{NF(t)}$.

In Denecke and Poomsa-ard (1997) all rooted graphs with at most two vertices were considered. Then we formed the corresponding binary terms and used the algorithm to construct normal form terms. The result is given in the table

By Theorem 3.1, we have the following relations:

(i) $\sigma_8 \sim \varsigma' \sigma_{10}$,

(ii) $\sigma_{12} \sim \varsigma' \sigma_{14} \sim \varsigma' \sigma_{16} \sim \varsigma' \sigma_{18}$,

(iii) $\sigma_9 \sim \varsigma' \sigma_{11}$,

(iv) $\sigma_{13} \sim \varsigma' \sigma_{15} \sim \varsigma' \sigma_{17} \sim \varsigma' \sigma_{19}$,

Let MG0 be the set of all normal form graph hypersubstitutions in G0.

Then we get,

$$M\varsigma' = \{\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6, \sigma_7, \sigma_8, \sigma_9, \sigma_{12}, \sigma_{13}\}.$$

| Normal form term | graph hypers. | Normal form term | graph hypers. |
|---|---|---|---|
| $x_1x_2$ | $\sigma_0$ | $x_1$ | $\sigma_1$ |
| $x_2$ | $\sigma_2$ | $x_1x_2$ | $\sigma_3$ |
| $x_2x_2$ | $\sigma_4$ | $x_2x_1$ | $\sigma_5$ |
| $(x_1x_1)x_2$ | $\sigma_6$ | $(x_2x_1)x_2$ | $\sigma_7$ |
| $(x_1x_2)x_2$ | $\sigma_8$ | $x_2(x_1x_1)$ | $\sigma_9$ |
| $(x_1x_1)(x_2x_2)$ | $\sigma_{10}$ | $(x_2(x_1x_1))x_2$ | $\sigma_{11}$ |
| $x_1(x_2x_1)$ | $\sigma_{12}$ | $x_2(x_1x_2)$ | $\sigma_{13}$ |
| $(x_1x_1)(x_2x_1)$ | $\sigma_{14}$ | $x_2((x_1x_1)x_2)$ | $\sigma_{15}$ |
| $x_1((x_2x_1)x_2)$ | $\sigma_{16}$ | $(x_2(x_1x_2))x_2$ | $\sigma_{17}$ |
| $(x_1x_1)(x_2x_1)x_2$ | $\sigma_{18}$ | $(x_2((x_1x_2)x_2))x_2$ | $\sigma_{19}$ |

We define the product of two normal form graph hypersubstitutions in $M\varsigma$ as follows.

**Definition 5.5.** The product $\sigma_{1N}O_N\sigma_{2N}$ of two normal form graph hypersubstitutions is defined by $(\sigma_{1N}O_N\sigma_{2N})(f)=NF(\hat{\sigma}_{1N}[\sigma_{2N}(f)])$.

The table on page 12 gives the multiplication of elements in $M\varsigma$.

In Denecke and Poomsa-ard (1997) the concept of a leftmost normal form graph hypersubstitution was defined.

**Definition 5.6.** A graph hypersubstitution _ is called leftmost if $L(\sigma(f))=x_1$.

The set $M_{L(\varsigma)}$ of all leftmost normal form graph hypersubstitutions in $M\varsigma$ contains exactly the following elements:

$$M_{L(\varsigma)}=\{\sigma_0,\sigma_1,\sigma_3,\sigma_6,\sigma_8,\sigma_{12}\}.$$

| $O_N$ | $\sigma_0$ | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $\sigma_4$ | $\sigma_5$ | $\sigma_6$ | $\sigma_7$ | $\sigma_8$ | $\sigma_9$ | $\sigma_{12}$ | $\sigma_{13}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma_0$ | $\sigma_0$ | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $\sigma_4$ | $\sigma_5$ | $\sigma_6$ | $\sigma_7$ | $\sigma_8$ | $\sigma_9$ | $\sigma_{12}$ | $\sigma_{13}$ |
| $\sigma_1$ | $\sigma_1$ | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $\sigma_2$ | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ |
| $\sigma_2$ | $\sigma_2$ | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_2$ | $\sigma_4$ | $\sigma_3$ | $\sigma_5$ | $\sigma_0$ |
| $\sigma_3$ | $\sigma_3$ | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $\sigma_4$ | $\sigma_4$ | $\sigma_3$ | $\sigma_7$ | $\sigma_3$ | $\sigma_4$ | $\sigma_3$ | $\sigma_4$ |
| $\sigma_4$ | $\sigma_4$ | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $\sigma_4$ | $\sigma_3$ | $\sigma_4$ | $\sigma_4$ | $\sigma_4$ | $\sigma_3$ | $\sigma_7$ | $\sigma_6$ |
| $\sigma_5$ | $\sigma_5$ | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $\sigma_4$ | $\sigma_0$ | $\sigma_9$ | $\sigma_7$ | $\sigma_7$ | $\sigma_6$ | $\sigma_5$ | $\sigma_0$ |
| $\sigma_6$ | $\sigma_6$ | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $\sigma_4$ | $\sigma_7$ | $\sigma_6$ | $\sigma_7$ | $\sigma_8$ | $\sigma_9$ | $\sigma_{12}$ | $\sigma_{13}$ |
| $\sigma_7$ | $\sigma_7$ | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $\sigma_4$ | $\sigma_6$ | $\sigma_7$ | $\sigma_7$ | $\sigma_7$ | $\sigma_6$ | $\sigma_6$ | $\sigma_7$ |
| $\sigma_8$ | $\sigma_8$ | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $\sigma_4$ | $\sigma_9$ | $\sigma_8$ | $\sigma_9$ | $\sigma_8$ | $\sigma_9$ | $\sigma_{12}$ | $\sigma_{13}$ |
| $\sigma_9$ | $\sigma_9$ | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $\sigma_4$ | $\sigma_8$ | $\sigma_9$ | $\sigma_{13}$ | $\sigma_9$ | $\sigma_8$ | $\sigma_8$ | $\sigma_9$ |
| $\sigma_{12}$ | $\sigma_{12}$ | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $\sigma_4$ | $\sigma_{13}$ | $\sigma_{12}$ | $\sigma_{13}$ | $\sigma_{12}$ | $\sigma_{13}$ | $\sigma_{12}$ | $\sigma_{13}$ |
| $\sigma_{13}$ | $\sigma_{13}$ | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $\sigma_4$ | $\sigma_{12}$ | $\sigma_{13}$ | $\sigma_{13}$ | $\sigma_{13}$ | $\sigma_{12}$ | $\sigma_{12}$ | $\sigma_{13}$ |

In Plonka (1994) the concept of a proper hypersubstitution of a class of algebras was introduced.

**Definition 5.7.** A hypersubstitution $\sigma$ is called *proper* with *respect to a class K of algebras if* $\hat{\sigma}[s]\approx\hat{\sigma}[t]\in IdK$ *for all* $s\approx t\in IdK$.

A graph hypersubstitution with the property that $\sigma(f)$ contains both variables $x_1$ and $x_2$ is called *regular*. It is easy to check that the set of all regular graph hypersubstitutions forms a groupoid $M_{reg}$.

We want to prove that $\{\sigma_0, \sigma_6, \sigma_8, \sigma_{12}\}$ is the set of all proper normal form graph hypersubstitutions with respect to $\varsigma$.

In Denecke and Poomsa-ard (1997) the following lemma was proved.

**Lemma 5.2.** *For each non-trivial term* $s, (s \neq x \in X)$ *and for all* $u, v \in X$

we have

$$E(\hat{\sigma}_6[s]) = E(s) \cup \{(u, u) | (u, v) \in E(s)\},$$
$$E(\hat{\sigma}_8[s]) = E(s) \cup \{(v, v) | (u, v) \in E(s)\},$$

and

$$E(\hat{\sigma}_{12}[s]) = E(s) \cup \{(v, u) | (u, v) \in E(s)\}.$$

Then we obtain:

**Theorem 5.1.** $\{\sigma_0, \sigma_6, \sigma_8, \sigma_{12}\}$ *is the set of all proper graph hypersubstitution with respect to the class* $\varsigma$ *of an* $x(yz) \approx x(y(zz))$ *graph algebras.*

*Proof.* If $s \approx t \in Id\varsigma$ and $s, t$ are trivial terms, then $\hat{\sigma}_6[s], \hat{\sigma}_8[s], \hat{\sigma}_{12}[s], \hat{\sigma}_6[t], \hat{\sigma}_8[t]$ and $\hat{\sigma}_{12}[t]$ are also trivial terms and thus $\hat{\sigma}_6[s] \approx \hat{\sigma}_6[t] \in Id\varsigma$, $\hat{\sigma}_8[s] \approx \hat{\sigma}_8[t] \in Id\varsigma$, and $\hat{\sigma}_{12}[s] \approx \hat{\sigma}_{12}[t] \in Id\varsigma$.. In the same manner, we see that $\hat{\sigma}_6[s] \approx \hat{\sigma}_6[t] \in Id\varsigma$, $\hat{\sigma}_8[s] \approx \hat{\sigma}_8[t] \in Id\varsigma$, and $\hat{\sigma}_{12}[s] \approx \hat{\sigma}_{12}[t] \in Id\varsigma$, if $s = t = x$.

Now, assume that $s$ and $t$ are non-trivial terms different from variables and $s \approx t \in Id\varsigma$. Then (i) - (iv) of Theorem 3.1 hold.

For any $\sigma \in \{\sigma_6, \sigma_8, \sigma_{12}\}$, we obtain:

$$L(\hat{\sigma}[s]) = L(s) = L(t) = L(\hat{\sigma}[t]),$$

and since $\sigma$ is regular, we have;

$$V(\hat{\sigma}[s]) = V(s) = V(t) = V(\hat{\sigma}[t]).$$

By Lemma 4.2, we get;

$$E(\hat{\sigma}_6[s]) = E(s) \cup \{(u, u) | (u, v) \cup E(s)\},$$
$$E(\hat{\sigma}_6[t]) = E(t) \cup \{(u, u) | (u, v) \cup E(t)\},$$
$$E(\hat{\sigma}_8[s]) = E(s) \cup \{(v, v) | (u, v) \cup E(s)\},$$
$$E(\hat{\sigma}_8[t]) = E(t) \cup \{(v, v) | (u, v) \cup E(t)\},$$
$$E(\hat{\sigma}_{12}[s]) = E(s) \cup \{(v, u) | (u, v) \cup E(s)\},$$

and

$$E\left(\widehat{\sigma}_{12}[t]\right) = E(t)\bigcup\left\{(v, u)|(u, v)\bigcup E(t)\right\}.$$

For $\sigma_6$ and for any $x, y \in V\left(\widehat{\sigma}_6[s]\right)$, $x \neq y$ *if* $(x, y)\in E\left(\widehat{\sigma}_6[s]\right)$, then $(x, y)\in E(s)$. By Theorem 3.1(iv), we get that $(x, y)\in E(t)$. Thus $(x, y)\in E\left(\widehat{\sigma}_6[t]\right)$.

Similarly, we prove the conversely. Suppose that $N_i^{\widehat{\sigma}_6[s]}(L(s))=\varnothing$. Then there exists $x\in V(s)$ such that $(x, L(s))\in E(s)$. By Lemma 4.2, we see that there exists $y\in V(s)$ such that $(y, L(t))\in E(t)$. Hence $(y, L(t))\in E\left(\widehat{\sigma}_6[t]\right)$ and thus $N_i^{\sigma_6[t]}(L(t))\neq\varnothing$. Similarly, we prove the conversely. Suppose that $N_i^{\widehat{\sigma}_6[s]}(L(s))\neq\varnothing$. and let $x\in V(s)$ which $x\neq L(s)$. Since $G(s)$ and $G(t)$ are rooted graphs with root $L(s)=L(t)$, we have $(x, x)$ belong to both of $E\left(\widehat{\sigma}_6[s]\right)$ and $E\left(\widehat{\sigma}_6[t]\right)$. By Theorem 3.1, we get $\widehat{\sigma}_6[s]\approx\widehat{\sigma}_6[t]\in Id\zeta^{'}$.

Similarly, we prove $\widehat{\sigma}_8[s]\approx\widehat{\sigma}_8[t]\in Id\zeta^{'}$.

For $\sigma_{12}$ and for any $x, y\in V\left(\widehat{\sigma}_{12}[s]\right)$, $x\neq y$. Suppose that $(x,y)\in E\left(\widehat{\sigma}_{12}[s]\right)$. By Lemma 4.2 and Theorem 3.1(iii), we get that $(x,y)\in E\left(\widehat{\sigma}_{12}[t]\right)$. By the same way, for any $(x,y)\in V\left(\widehat{\sigma}_{12}[t]\right), x\neq y$ $(x,y)\in E\left(\widehat{\sigma}_{12}[t]\right)$, then we prove that $(x,y)\in E\left(\widehat{\sigma}_{12}[s]\right)$.

Suppose that $N_i^{\widehat{\sigma}_{12}[s]}(L(s))\neq\varnothing$. Then there exists $x\in V(s)$ such that $(x, L(s))\in E\left(\widehat{\sigma}_{12}[s]\right)$. If $x=L(s)$. then by Lemma 4.2, we have $(L(s), L(s))\in E(s)$.

By Theorem 3.1(iv), we get $N_i^{'}(L(t))\neq\varnothing$ and thus $N_i^{\widehat{\sigma}_{12}[t]}(L(t))\neq\varnothing$.

Suppose that $N_i^{\widehat{\sigma}_{12}[s]}(L(s))=\varnothing$ and let $x\in V\left(\widehat{\sigma}_{12}[s]\right), x\neq L(s)$ which there exists $y\in N_i^{\widehat{\sigma}_{12}[s]}(x)$ such that $N_i^{\widehat{\sigma}_{12}[s]}(y)\neq\varnothing$. Then there exists $w\in V(s)$ such that $(w,y),(y,x)\in E\left(\widehat{\sigma}_{12}[s]\right)$. If x ≠ y, y ≠ w and x ≠ w, then by Lemma 4.2 and Theorem 3.1(iii), we have $(w, y)$, $(y, x)\in E\left(\widehat{\sigma}_{12}[t]\right)$. If $x = y$, then we have $(x, x)\in E\left(\widehat{\sigma}_{12}[s]\right)$, and thus $(x, x)\in E(s)$. By Theorem 3.1(v), we get there exists $u\in N_i^{'}(x)$ such that $N_i^{'}(u)\neq\varnothing$. Hence $u\in N_i^{\widehat{\sigma}_{12}[t]}(x)$ and $N_i^{\widehat{\sigma}_{12}[t]}(u)\neq\varnothing$. If $x\neq y, y=w$, then $(\mathrm{x}, \mathrm{y})\in \mathrm{E}\left(\widehat{\sigma}_{12}[\mathrm{s}]\right)$. By Lemma 4.2 and Theorem 3.1(iv), we have $(x, \mathrm{y}),(y, \mathrm{x})\in E\left(\widehat{\sigma}_{12}[t]\right)$. By the same way for any $x\in V\left(\widehat{\sigma}_{12}[t]\right)$, if there exists $z\in N_i^{\widehat{\sigma}_{12}[t]}(x)$ such that $N_i^{\widehat{\sigma}_{12}[t]}(z)\neq\varnothing$, then we prove that there exists $y\in N_i^{\widehat{\sigma}_{12}[s]}(x)$ such that $N_i^{\widehat{\sigma}_{12}[s]}(y)\neq\varnothing$. Thus $\widehat{\sigma}_{12}[s]\approx\widehat{\sigma}_{12}[t]\in Id\zeta^{'}$.

For any $\sigma \notin \{\sigma_0, \sigma_6, \sigma_8, \sigma_{12}\}$, we give an identity $s \approx t$ in $\varsigma'$ such that $\hat{\sigma}[s] \approx \hat{\sigma}[t] \notin Id\varsigma'$. Clearly, if s and t are terms with different leftmost and different rightmost, then $\hat{\sigma}_1[s] \approx \hat{\sigma}_1[t] \notin Id\varsigma'$, $\hat{\sigma}_2[s] \approx \hat{\sigma}_2[t] \notin Id\varsigma'$, $\hat{\sigma}_3[s] \approx \hat{\sigma}_3[t] \notin Id\varsigma'$ and $\hat{\sigma}_4[s] \approx \hat{\sigma}_4[t] \notin Id\varsigma'$.

Now, let $s = (x_2 x_2)x_1$, $t = (x_2(x_1 x_1))x_2$. By Theorem 3.1, we get $s \approx t \in Id\varsigma'$. If $\sigma \in \{\sigma_5, \sigma_7, \sigma_9, \sigma_{13}\}$, then $L(\sigma[f]) = x_2$. We see that $L(\hat{\sigma}[s]) = x_1$, $L(\hat{\sigma}[t]) = x_2$. Thus $\hat{\sigma}[s] \approx \hat{\sigma}[t] \notin Id\varsigma'$.

Now we apply our results to characterize all hyperidentities in the class of all $x(yz) \approx x(y(zz))$ graph algebras. Clearly, if s and t are trivial terms, then $s \approx t$ is a hyperidentity in $\varsigma'$ if and only if they have the same leftmost and the same rightmost and $x \approx x$, $x \in X$ is a hyperidentity in $\varsigma'$, too. So we consider the case that $s$ and $t$ are non-trivial and different from variables.

In Denecke and Poomsa-ard (1997) the concept of a *dual* term $s^d$ of the non-trivial term $s$ was defined in the following way:

If $s = x \in X$, then $x^d = x$; if $s = t_1 t_2$, then $s^d = t_2^d t_1^d$. The dual term $s^d$ can be obtained by application of the graph hypersubstitution $\sigma_5$, namely, $\hat{\sigma}_5[s] = s^d$. Then, we prove the following theorem:

**Theorem 5.2.** An identity $s \approx t$ in $\varsigma'$, where $s$, $t$ are non-trivial and $s \neq x$, $t \neq x$, is a hyperidentity in $\varsigma'$ if and only if the dual equation $s^d \approx t^d$ is also an identity in $\varsigma'$.

*Proof.* If $s \approx t$ is a hyperidentity in $\varsigma'$, then $\hat{\sigma}_5[s] \approx \hat{\sigma}_5[t]$ is an identity in $\varsigma'$, i.e., $s^d \approx t^d$ is an identity in $\varsigma'$. Conversely, assume that $s \approx t$ is an identity in $\varsigma'$ and that $s^d \approx t^d$ is an identity in $\varsigma'$, too. We have to prove that $s \approx t$ is closed under all graph hypersubstitutions from $M\varsigma'$.

If $\sigma \in \{\sigma_0, \sigma_6, \sigma_8, \sigma_{12}\}$, then $\sigma$ is proper and we get that $\hat{\sigma}[s] \approx \hat{\sigma}[t] \in Id\varsigma'$. By assumption, $\hat{\sigma}_5[s] = s^d \approx t^d = \hat{\sigma}_5[t]$ is an identity in $\varsigma'$.

For $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ and $\sigma_4$, we have $\hat{\sigma}_1[s] = L(s) = L(t) = \hat{\sigma}_1[t]$, $\hat{\sigma}_2[s] = L(s^d) = L(t^d) = \hat{\sigma}_2[t]$, $\hat{\sigma}_3[s] = L(s)L(s) = L(t)L(t) = \hat{\sigma}_3[t]$ and $\hat{\sigma}_4[s] = L(s^d)L(s^d) = L(t^d)L(t^d) = \hat{\sigma}_4[t]$.

Because of $\sigma_6 O_N \sigma_5 = \sigma_7$, $\sigma_8 O_N \sigma_5 = \sigma_9$, $\sigma_{12} O_N \sigma_5 = \sigma_{13}$, $\hat{\sigma}_6[\hat{\sigma}_5[t']] = \hat{\sigma}_6[t'^d]$, $\hat{\sigma}_8[\hat{\sigma}_5[t']] = \hat{\sigma}_8[t'^d]$ and $\hat{\sigma}_{12}[\hat{\sigma}_5[t']] = \hat{\sigma}_{12}[t'^d]$ for all $t' \in W_\tau(X)$, we have that $\hat{\sigma}_7[s] \approx \hat{\sigma}_7[t]$, $\hat{\sigma}_9[s] \approx \hat{\sigma}_9[t]$, and $\hat{\sigma}_{13}[s] \approx \hat{\sigma}_{13}[t]$ are identities in $\varsigma'$.

## References

Denecke , K. and Poomsa-ard, T. (1997). Hyperidentities in graph algebras, Contributions to General Algebra and Applications in Discrete Mathematics,Potsdam, 59-68.

Denecke , K. and Reichel, M. (1995). Monoids of Hypersubstitutions and M-solid varieties, Contributions to General Algebra, Wien, 117-125.

Kiss, E., Pöschel , W. R. and Pröhle, P. (1990). Subvarieties of varieties generated by graph algebras, Acta Sci. Math., 54, 57-75.

Plonka, J. (1995). Hyperidentities in some of vareties, in: General Algebra and discrete Mathematics ed. by K. Denecke and O. Lüders, Lemgo,195-213.

Plonka, J. (1994). Proper and inner hypersubstitutions of varieties, in: Proceedings of the International Conference: Summer School on General Algebra and Ordered Sets, Palack´y University Olomouce 1994,106-115.

Poomsa-ard, T.(2000). Hyperidentities in associative graph algebras, Discussiones Mathematicae General Algebra and Applications 20, 169-182.

Poomsa-ard, T., Wetweerapong, J. and Samartkoon , C. (2004). Hyperidentities in idempotent graph algebras, Thai journal of Mathematics 2, 171-181.

Poomsa-ard, T., Wetweerapong, J. and Samartkoon , C. (2005) Hyperidentities in transitive graph algebras, Discussiones Mathematicae General Algebra and Applications 25, 23-37.

Pöschel, R. (1989). The equational logic for graph algebras, Zeitschr. f. math. Logik und Grundlagen d. Math. Bd. 35, S., 273-282.

Pöschel, R. (1990). Graph algebras and graph varieties, Algebra Universalis, 27, 559-577.

Shallon, C. R. (1979). Nonfinitely based finite algebras derived from lattices, Ph. D. Dissertation, Uni. of California, Los Angeles

ว.วิทย. มข. 36(4) 364-373 (2551) KKU Sci. J.36(4) 364-373 (2008)

# การปรับปรุงระบบการบริหารคงคลังของอะไหล่ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์

# Improving the Inventory Management of Spare Parts in Hard Disk Drive Business

*มัญชุพัฒน์ ฉ่ำสูงเนิน* [1]


## บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ เป็นการวิจัยเพื่อเสนอระบบการควบคุมอะไหล่คงคลัง โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดอัตราการขาดอะไหล่ (Spare parts shortage) และลดอัตราอะไหล่ที่ไม่หมุนเวียนในคลัง (Spare parts dead stock) โดยวิเคราะห์วิธีการบริหารและการจัดการพัสดุคงคลังประเภทอะไหล่ที่ไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการผลิตของโรงงานผลิตฮาร์ดดิสก์ สำหรับการกำหนดนโยบายพัสดุคงคลัง จะเริ่มจากการแบ่งกลุ่มตามความสำคัญโดยใช้เทคนิค AHP (Analytic Hierarchy Process Technique) โดยพิจารณาปัจจัย จำนวนเงินที่ใช้แต่ละรายการในรอบปี ช่วงเวลานำ และความถี่ในการใช้งานของอะไหล่ไปพร้อมๆ กัน จากการแบ่งกลุ่มพบว่าเป็นรายการที่มีความสำคัญมาก (A) 376 รายการ รายการที่ความสำคัญปานกลาง (B) 1,076 รายการ และที่เหลือ 2,255 รายการเป็นรายการที่มีความสำคัญน้อย (C) นโยบายพัสดุคงคลังที่นำมาประยุกต์ใช้กับรายการที่มีความสำคัญมาก (A) คือ นโยบายจุดสั่งซื้อ - ระดับสั่งซื้อ ในขณะที่ นโยบาย จุดสั่งซื้อ - ปริมาณสั่งซื้อ ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับรายการที่ความสำคัญปานกลาง (B) และรายการที่มีความสำคัญน้อย (C) ซึ่งสามารถลดอัตราการขาดอะไหล่ได้ 41.55% และสามารถลดเวลาในการรออะไหล่ได้จาก 38.04 วัน เป็น 24.88 วัน สามารถลดอัตราอะไหล่ที่ไม่มีการหมุนเวียนลงได้ 7.44% และสามารถลดค่าใช้คงคลังลงได้ 5.08%

## Abstract

This article is a research which proposes a spare parts inventory control system to reduce spare part shortage and their dead stock cost by analyses of equipment management. It concentrates on spare part equipment that are indirectly involved with production line of a Hard Disk Drive Factory. For the spare parts equipment policy, the study begins by classifying items based on their significance level with AHP technique (Analytic Hierarchy Process technique). The classification in based on annual cost of usage, lead time and


[1] คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Email: Mulchupat@hotmal.com

frequency simultaneously. The sequel shows 3 levels of significance; most significant (A Model), medium significant (B Model) and least significant (C Model), containing 376 items, 1,076 items and 2,255 items respectively. The Ordering Point and Order level or (s,S) policy is applied to the model A while the Ordering Point and Order Quantity or (s,Q) policy is applied to the model B and C from the classified spare parts equipment policy. These reduces 41.55% of spare parts shortage rate and also reduces spare parts waiting time from average 38.04 to 24.88 days. Spare parts dead stock cost is reduces 7.44% and spare parts inventory cost reduces 5.08%.

**Keyword:** inventory, spece part, ABC Analysis, AHP Analysis

## 1. บทนำ

จากข้อมูลของ สินค้าส่งออกสำคัญ 20 รายการแรกของไทย ปี 2546-2550 (ม.ค.-ธ.ค.) พบว่ารายการสินค้าที่มีมูลค่าส่งออกมากเป็นอันดับหนึ่งคือสินค้าประเภทเครื่องคอมพิวเตอร์อุปกรณ์และส่วนประกอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสินค้าประเภทเครื่องคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์และส่วนประกอบ มีความสำคัญมากต่อการพัฒนาเศรษฐกิจทางด้านอุตสาหกรรม เช่น ในด้าน การจ้างงาน การลงทุน การส่งออกการถ่ายทอดเทคโนโลยี และการสร้างรายได้เข้าสู่ประเทศ เป็นการสร้างความมั่นคงทางเศรษฐกิจภาคอุตสาหกรรม โดยในปัจจุบันกระบวนการผลิตสินค้าประเภทเครื่องคอมพิวเตอร์อุปกรณ์และส่วนประกอบได้นำเทคโนโลยีการผลิตแบบ Automation เข้ามาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตทั้งในแง่ของปริมาณการผลิต และคุณภาพ

ระบบพัสดุคงคลังของอะไหล่ ที่ใช้ในงานซ่อมและบำรุงรักษา เป็นงานที่จำเป็นสำหรับกิจการที่ต้องใช้เครื่องจักรเป็นฐานการผลิต เนื่องจากประสิทธิภาพของเครื่องจักรจะลดลงตามระยะเวลาใช้งาน การบำรุงรักษาตามคาบเวลา และการซ่อมแซมเปลี่ยนอะไหล่เมื่อเครื่องเสีย ต้องทำควบคู่ไปกับการเดินเครื่อง เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพสูง และดำเนินได้อย่างต่อเนื่อง สุชาติ ศุภมงคล (2547) ในงานวิจัยนี้ศึกษาถึงระบบการบริหารคงคลังของบริษัทกรณีศึกษาโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อลดอัตราการขาดอะไหล่ที่ต้องการใช้ในเวลาที่ต้องการ (Spare parts shortage) และ อัตราอะไหล่ที่ไม่มีการหมุนเวียน (Spare parts dead stock) ให้อยู่ในเป้าหมายที่กำหนด

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### ทฤษฎี

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบการจำแนกสินค้าคงคลังเป็นหมวดเอบีซี (ABC) โดยระบบนี้เป็นวิธีการจำแนกสินค้าคงคลังออกเป็นแต่ละประเภทโดยพิจารณาปริมาณและมูลค่าของสินค้าคงคลังแต่ละรายการเป็นเกณฑ์ เพื่อลดภาระในการดูแล ตรวจนับ และควบคุมสินค้าคงคลังที่มีอยู่มากมาย ซึ่งถ้าควบคุมทุกรายการอย่างเข้มงวดเท่าเทียมกัน จะเสียเวลาและค่าใช้จ่ายมากเกินความจำเป็น เพราะในบรรดาสินค้าคงคลังทั้งหลายของแต่ละธุรกิจจะมักเป็นไปตามเกณฑ์ดังต่อไปนี้

A เป็นสินค้าคงคลังที่มีปริมาณน้อย (5-15% ของสินค้าคงคลังทั้งหมด) แต่มีมูลค่ารวมค่อนข้างสูง (70-80% ของมูลค่าทั้งหมด)

B เป็นสินค้าคงคลังที่มีปริมาณปานกลาง (30% ของสินค้าคงคลังทั้งหมด) และมีมูลค่ารวมปานกลาง (15% ของมูลค่าทั้งหมด)

C เป็นสินค้าคงคลังที่มีปริมาณมาก (50-60% ของสินค้าคงคลังทั้งหมด) แต่มีมูลค่ารวม

ค่อนข้างต่ำ (5-10% ของมูลค่าทั้งหมด)

และงานวิจัยนี้การแยกกลุ่มพัสดุคงคลังตามความสำคัญ ได้นำแนวคิดจากบทความของ Prem Prakash Gjpal, L.S. Ganesh, Chandrasekharan Rajendran (1994) ที่นำเสนอวิธีการจัดกลุ่มของอะไหล่โดยใช้รูปแบบวิธีการ AHP (Analytic Hierarchy Process) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการกำหนดน้ำหนักความสำคัญที่มีการสร้างเครื่องมือ เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญหรือผู้คุ้นเคยกับการประเมินในเรื่องนั้นๆ เป็นอย่างดี เทคนิคนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาจาก Thomas L. Saaty ในปี ค.ศ.1970 เป็นเทคนิคในการตัดสินใจเลือกหรือเรียงลำดับทางเลือกของปัญหาที่ต้องใช้การตัดสินใจที่ซ้ำซ้อน โดยสร้างรูปแบบการตัดสินใจให้เป็นโครงสร้างลำดับขั้น และน้ำข้อมูลที่ได้จากความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญมาวิเคราะห์สรุปแนวทางเลือกที่เหมาะสม

การดำเนินการของวิธี AHP ประกอบด้วยหลักการสำคัญ 3 ประการคือ

1. การสร้างรูปแบบการตัดสินใจ โดยจัดโครงสร้างการตัดสินใจที่มีความซ้ำซ้อนให้อยู่ในรูปของลำดับขั้น (Hierarchy) ประกอบด้วยวัตถุประสงค์ของการตัดสินใจ องค์ประกอบในการตัดสินใจ และทางเลือก ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานสำคัญของเทคนิคนี้

2. เปรียบเทียบความสำคัญโดยเปรียบเทียบองค์ประกอบที่ใช้ในการตัดสินใจเป็น คู่ ๆ จนครบทุกคู่ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาสรุปหาน้ำหนักความสำคัญโดยการนำไอเกนเวดเตอร์ (Eigenvector) มาตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูลที่ใช้ในการตัดสินใจ วิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความสอดคล้องซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสอดคล้องของข้อมูลจากการตัดสินใจ

3. วิเคราะห์และหาผลสรุปของการตัดสินใจ

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชนินทร์ คุณรักษา (2541) ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงการบริหารระบบพัสดุคงคลังสำหรับอะไหล่ซ่อมบำรุง ที่ศึกษา ณ โรงงานผลิตปูนซีเมนต์แห่งหนึ่ง โดยมีจำนวนอะไหล่ซ่อมบำรุงที่ใช้ในกรณีศึกษานี้ 1898 รายการ งานวิจัยพิจารณาอะไหล่ 2 ประเภท คือ อะไหล่ทั่วไปและอะไหล่ที่ต้องมีไว้ใช้อยู่เสมอ (Insurance Item) สำหรับอะไหล่ทั่วไปจะเริ่มจากการจำแนกกลุ่มโดยใช้เทคนิค ABC (ABC Analysis) และจัดนโยบายเพื่อควบคุมระบบการบริหารคงคลังอะไหล่ด้วยระบบ ควบคุมแบบจุดสั่งซื้อ -ระดับสั่งซื้อ (s,S) และใช้วิธีการวางแผนความต้องการใช้วัสดุ (MRP) ตามกำหนดการในการซ่อมบำรุง สำหรับรายการที่ใช้นโยบายระบบควบคุมแบบจุดสั่งซื้อ - ระดับสั่งซื้อ โดยงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ “ทฤษฎีแถวคอยสำหรับหน่วยบริการหลายหน่วย (Finite Queue M/M/S/K Model)” ในการกำหนดระดับอะไหล่ที่เหมาะสม

ศศิธร สาดแสงจันทร์ (2547) กล่าวถึงการวิจัยวิธีการบริหารและการจัดการพัสดุคงคลังประเภทอะไหล่ ที่ไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการผลิตของ โรงงานผลิตแผงวงจรไฟฟ้ารวมสำหรับการกำหนดนโยบายพัสดุคงคลัง จะเริ่มจากการแบ่งกลุ่มตาม ความสำคัญโดยใช้เทคนิค AHP (Analytic Hierarchy Process) โดยพิจารณาปัจจัยการทดแทนกันของอะไหล่ประเภทของอะไหล่ และ เวลานำไปพร้อมๆ กัน นโยบายพัสดุคงคลังที่นำมาประยุกต์ ใช้กับรายการที่มีความสำคัญมาก ของโรงงานตัวอย่างคือ นโยบายจุดสั่งซื้อ - ระดับสั่งซื้อ ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายรวมคงคลังจากระบบเดิม ลงได้ 92,915.68 เหรียญสหรัฐฯ Ghodrati, Akersten, and Kumar, (2007) กล่าวถึงระบบการจัดการอะไหล่คงคลังของโรงงานถลุงเหล็กในประเทศอิหร่าน ด้วยการวิเคราะห์ความเสี่ยงด้วย Event tree analysis (ETA) tool ด้วยการพิจารณาสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิด แทนอุปสรรคหรือข้อจำกัดและผสมผสานกับเหตุการณ์และผลที่จะตามมาให้เป็น safety function ในการวิเคราะห์ความเสี่ยง ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ จะแสดงถึงความเสี่ยงอันเนื่องจาก losses (production and economical) ซึ่งในกรณีนี้จะไม่พิจารณาสภาพแวดล้อมในการ

ทำงานของเครื่องจักร

Ois Pe're's and Grenouilleau, (2002) ได้กล่าวถึงระบบการจัดการอะไหล่คงคลังเริ่มต้น (Initial spare parts) ในสถานีอวกาศ (Orbital system) โดยใช้วิธีการลดความเสี่ยงของการยืดเวลาการซ่อมบำรุง (The minimization of the risk of postponement of a maintenance operation) หรือเรียกว่า เหตุการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ให้เกิด (Undesirable Event) ในการประเมินความต้องการอะไหล่เริ่มต้น (Initial spare parts) จะพิจารณาความเสี่ยงของ undesirable event เป็นคู่ คือ (p, g) โดยที่ p คือโอกาสการเกิดของเหตุการณ์ E และ g คือความรุนแรงของการเกิดเหตุการณ์ E

Braglia, Grassi, and Montanari, (2004) กล่าวถึงระบบการจัดการอะไหล่คงคลังของโรงงานผลิตกระดาษ (Tissue, Kitchen Paper, Toilet Paper) โดยการจัดแบ่งประเภทของอะไหล่จึงถูกพิจารณาจากหลายคุณลักษณะ (Multi - Attributes) โดยใช้เทคนิค Reliability centered maintenance (RCM) analysis และ AHP model เพื่อสร้างแผนผังการตัดสินใจ (Decision Diagram) เพื่อช่วยให้วิเคราะห์ง่ายต่อการจัดแบ่งประเภทของอะไหล่ และในการจัดกลยุทธ์ของคงคลังให้เหมาะสมแต่ละประเภทของอะไหล่ จะมีการสร้าง matrix ของนโยบายการจัดการคงคลัง เพื่อให้การวิเคราะห์มีความสมบูรณ์และสมเหตุสมผลมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะช่วยให้การวิเคราะห์ระบบพัสดุคงคลังมีความถูกต้องและรวดเร็วยิ่งขึ้น

## 3. วิธีการดำเนินงาน วิเคราะห์และการปรับปรุงระบบอะไหล่คงคลัง

### *3.1 วิธีดำเนินงานวิจัย*

ในการจัดทำวิจัยนี้ ได้ใช้วิธีการจัดการทางด้านวิศวกรรมอุตสาหการ โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้สามารถกำหนดวิธีการในการควบคุมและดูแลการจัดเก็บอะไหล่คงคลังของโรงงานกรณีศึกษาให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยการจัดหานโยบายการสั่งซื้อที่เหมาะสมสำหรับอะไหล่แต่ละประเภท เพื่อลดอัตราการขาดอะไหล่ และลดอัตราอะไหล่คงคลังที่ไม่มีการเคลื่อนไหวในขณะที่ยังคงรักษา ต้นทุนอะไหล่คงคลัง (Inventory cost) และระยะเวลาในการรออะไหล่ในกรณีที่มีความต้องการใช้อะไหล่แต่ไม่มีอะไหล่ในเวลาที่ต้องการ โดยเริ่มจากการวิเคราะห์สภาพทั่วไปและสภาพปัจจุบันของระบบการจัดการอะไหล่คงคลังของโรงงานกรณีศึกษาเกี่ยวกับการแบ่งประเภทอะไหล่ การจัดนโยบายการสั่งซื้อ จากนั้นจะทำการวิเคราะห์พัสดุคงคลังตามความสำคัญของพัสดุ (ABC Analysis) โดยใช้เทคนิค AHP (Analytic Hierarchy Process) ซึ่งการพิจารณาแบ่ง Class ความสำคัญนั้นได้พิจารณาปัจจัยที่สำคัญในการแบ่งกลุ่มพัสดุ 3 ปัจจัย คือ 1. จำนวนเงินที่ใช้แต่ละรายการในรอบปี 2. ช่วงเวลานำของอะไหล่ 3. ความถี่ในการใช้งานของอะไหล่ ซึ่งการในคะแนนความสำคัญของแต่ละปัจจัยนั้นได้จากการสำรวจความคิดเห็นจากผู้ที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการจัดการพัสดุคงคลังของโรงงานตัวอย่างเกี่ยวกับความเหมาะสมของน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์และทางเลือก ซึ่งพบว่าผู้ที่เกี่ยวข้องในการจัดการระบบพัสดุคงคลังของโรงงานตัวอย่าง ได้ให้ความสำคัญของเกณฑ์ช่วงเวลานำเป็นสำคัญในการแบ่งกลุ่มตามความสำคัญมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 69.1 รองลงมาคือ ความถี่ในการใช้ของอะไหล่ และจำนวนเงินที่ใช้แต่ละรายการในรอบปี โดยมีน้ำหนักความสำคัญคิดเป็นร้อยละ 21.8 และ 9.1 ตามลำดับ สำหรับอัตราส่วนความไม่สอดคล้องอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ คือ มีค่า 0.05 แสดงว่าข้อมูลมีความสอดคล้องกัน

### *3.2 การวิเคราะห์และการปรับปรุงระบบอะไหล่คงคลัง*

จากรายการอะไหล่ ทั้งหมด 3,719 รายการ ที่นำมาพิจารณา 3,698 รายการ เป็นรายการที่จัดอยู่ในกลุ่ม A ทั้งหมด 376 รายการ กลุ่ม B 1,076 รายการ ที่เหลือ 2,299 รายการเป็นกลุ่ม C และอีก 21 รายการ

เป็นรายการที่มีการสั่งซื้อแบบ blanket Order โดยมีการทำสัญญากับ supplier จึงไม่ต้องนำมาพิจารณา

นโยบายอะไหล่คงคลังที่นำมาใช้ควบคุมอะไหล่ของโรงงานกรณีศึกษา จะพิจารณานโยบายตามกลุ่มความสำคัญที่ได้แบ่งไว้ในหัวข้อที่ 3.1 ทั้งนี้เนื่องจากระดับการควบคุมอะไหล่คงคลังในแต่ละกลุ่มมีความสำคัญแตกต่างกัน กล่าวคือ ระดับการควบคุมของพัสดุกลุ่ม A ต้องมีการควบคุมปริมาณซื้อและจุดสั่งซื้อของอย่างใกล้ชิด เข้มงวด และผู้ที่ได้รับหน้าที่ติดตามดูแลต้องควบคุมตรวจสอบอยู่เสมอ เมื่อเทียบกับพัสดุกลุ่ม B และ C โดยที่ระดับการควบคุมพัสดุกลุ่ม B สามารถตรวจสอบของคงคลังและพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นระยะๆ ได้ เช่น ทุก 3 เดือน เป็นต้น สำหรับระดับการควบคุมพัสดุกลุ่ม C ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีความสำคัญน้อยสุด การควบคุมดูแลจึงอาจจะไม่ต้องเข้มงวดมากนักซึ่งอาจจะเป็นการทบทวนพารามิเตอร์ทุกๆ 6 เดือน อย่างไรก็ตาม ในการพิจารณาพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณต้องพิจารณาถึงรูปแบบการกระจายตัวของอัตราการใช้ด้วยว่าเป็นแบบ Normal หรือ Poisson

ตัวแปรที่เป็นเกณฑ์

1. จำนวนเงินที่ใช้แต่ละรายการในรอบปี (Annual cost of usage)
2. ช่วงเวลานำของอะไหล่ (Lead Time)
3. ความถี่ในการใช้ของอะไหล่ (Frequency)

ตัวแปรที่เป็นทางเลือก

สำหรับเกณฑ์ที่ 1 จำนวนเงินที่ใช้แต่ละรายการในรอบปี คือ

ทางเลือกที่ 1 จำนวนเงินสะสมของคงคลังที่หมุนเวียนในคลังในรอบปีอยู่ในช่วง 0%-80%

ทางเลือกที่ 2 จำนวนเงินสะสมของคงคลังที่หมุนเวียนในคลังในรอบปีอยู่ในช่วง 80%-95%

ทางเลือกที่ 3 จำนวนเงินสะสมของคงคลังที่หมุนเวียนในคลังในรอบปีอยู่ในช่วง 95%-100%

สำหรับเกณฑ์ที่ 2 ช่วงเวลานำของอะไหล่ (หลังเปิด PO) คือ

ทางเลือกที่ 1 ช่วงเวลานำ มากกว่า 6 สัปดาห์

ทางเลือกที่ 2 ช่วงเวลานำ ตั้งแต่ 4 สัปดาห์ ขึ้นไปแต่ไม่เกิน 6 สัปดาห์

ทางเลือกที่ 3 ช่วงเวลานำ น้อยกว่าเท่ากับ 4 สัปดาห์

สำหรับเกณฑ์ที่ 3 ความถี่ในการใช้ของอะไหล่ คือ

ทางเลือกที่ 1 มีการเบิกจ่ายติดต่อกันอยู่ระหว่าง 8-12 เดือน

ทางเลือกที่ 2 มีการเบิกจ่ายติดต่อกันอยู่ระหว่าง 3-7 เดือน

ทางเลือกที่ 3 มีการเบิกจ่ายติดต่อกันอยู่ระหว่าง 0-2 เดือน

### *3.2.1 การวิเคราะห์นโยบายพัสดุคงคลังสำหรับรายการในกลุ่ม A*

เนื่องจากพัสดุกลุ่ม A เป็นพัสดุที่มีความสำคัญสูง จำเป็นที่จะต้องควบคุมอย่างเข้มงวดและติดตามอย่างต่อเนื่อง มีจำนวน 274 รายการ ดังนั้นนโยบายที่เหมาะสมในการจัดการและควบคุมพัสดุกลุ่ม A สำหรับโรงงานตัวอย่างคือ นโยบายจำนวนสำรองคลังสูงสุด-ต่ำสุด (High Limit - Low Limit) ซึ่งไม่ใช่นโยบายจุดสั่งซื้อ- ระดับสั่งซื้อ หรือ ระบบจุดต่ำสุด - สูงสุด (Min - Max) โดยตรง จะแตกต่างกันที่ต้องมีการคำนวณ และกำหนด Stockage Objective ซึ่ง Stockage Objective คือ จุดมุ่งหมายในการเก็บสต๊อกพัสดุสิ่งของนานที่สุด ที่ยังสามารถดำเนินการได้โดยไม่ต้องสั่งซื้อ หรือการกำหนดสต๊อกสูงสุดนั่นเอง ซึ่งนโยบายนี้เหมาะสำหรับอะไหล่ที่สามาถจับสถิติอัตราการใช้ได้ โดยในการพิจารณาจำนวนสำรองคลังสูงสุด - ต่ำสุดนั้นจะพิจารณาจำนวนของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตแต่ละช่วงเวลา เพื่อให้สอดคล้องกับการทำงานและพารามิเตอร์ที่สามารถหาได้จริงในการวิเคราะห์ด้วย

ซึ่งเหมาะสมกับพัสดุกลุ่ม A ที่มีลักษณะที่มีช่วงเวลานำที่นานที่สุด มูลค่าการใช้ในรอบปีสูง แต่ราคาต่อหน่วยและความถี่ในการใช้งานอยู่ในช่วงปานกลาง สามารถจับสถิติอัตราการใช้ได้ สำหรับนโยบายจำนวนสำรองคลังสูงสุด-ต่ำสุด สามารถคำนวณจำนวนสำรองคลังสูงสุด-ต่ำสุด และ Safety Stock ของแต่ละรายการในกลุ่ม A ดังรายละเอียดต่อไปนี้

การคำนวณหาปริมาณสั่งซื้อ จุดสั่งซื้อ ระดับสั่งซื้อ และ Safety Stock ตามนโยบายจำนวนสำรองคลังสูงสุด-ต่ำสุด ((s,S) System) ในกรณีที่อัตราการใช้อะไหล่มีการกระจายตัวแบบปกตินั้น ได้คำนวณหาค่าต่างๆ ตามวิธีการคือ

$$S = (\bar{d} * T) * \overline{M_Q} \qquad (1)$$

เมื่อ

$\bar{d}$ = อัตราการใช้งานเฉลี่ยต่อเดือนต่อจำนวนเครื่องจักรในอดีต 6 เดือนย้อนหลัง

T = Stockage Objective (คิดที่ 5 เดือน)

$\overline{M_Q}$ = ค่าเฉลี่ยของจำนวนเครื่องในอนาคตในช่วง stockage Objective

$$s = (\bar{d} * LT + Z\sigma_L) * \overline{M_L} \qquad (2)$$

เมื่อ

$\sigma_L$ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความต้องการใช้อะไหล่ในช่วงเวลานำ

$\overline{M_L}$ = ค่าเฉลี่ยของจำนวนเครื่องในช่วงเวลานำ

LT = เวลานำ

ปริมาณสั่งซื้อ (Q) = จำนวนสำรองคลังสูงสุด (S) - สถานะคงคลัง (Inv. Status)

***3.2.2 การวิเคราะห์นโยบายพัสดุคงคลังสำหรับรายการในกลุ่ม B และ C***

การควบคุมพัสดุคงคลังในกลุ่ม B และ C ซึ่งมีรายการอะไหลทั้งหมด 1,125 รายการ และ 2,299 รายการ ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์พัสดุกลุ่ม B มีเวลานำปานกลางคือประมาณ 5 - 7 สัปดาห์เป็นส่วนมาก มีความถี่ในการใช้งานปานกลาง ราคาต่อหน่วย และมูลค่าใช้งานแต่ละรายการในรอบปีปานกลาง และกลุ่ม C เป็นกลุ่มที่มีเวลานำสั้น มีความถี่ในการใช้งานปานกลาง - ต่ำ และราคาต่อหน่วยต่ำ สามารถใช้นโยบายการควบคุมได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับผู้ที่ดูแลระดับพัสดุคงคลัง ทั้งนี้เนื่องจากว่าในการดูแลระบบพัสดุคงคลังในกลุ่ม B และ C ไม่สามารถที่จะทำได้บ่อยครั้งเท่าเท่าพัสดุกลุ่ม A ซึ่งในกลุ่ม B อาจจะเป็นการทบทวนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการคำนวณ 3 เดือนต่อครั้ง และ 6 ครั้งสำหรับพัสดุกลุ่ม C ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกระบบการจัดการคงคลังแบบจุดสั่งซื้อและปริมาณสั่งซื้อ เนื่องจากต้องการมีจำนวนอะไหล่สำรองคลังในระหว่างจัดหาเพื่อลดโอกาสอัตราการขาดอะไหล่ รายการของซึ่งพัสดุที่อยู่ในกลุ่มนี้จะมีราคาต่อหน่วยและมูลค่าใช้งานต่อปีไม่สูงนัก ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าอัตราการขาดอะไหล่เกิดขึ้นที่พัสดุทั้ง 2 กลุ่มนี้ การคำนวณหาปริมาณสั่งซื้อ จุดสั่งซื้อ ปริมาณสั่งซื้อ และ Safety Stock ตามนโยบายจุดสั่งซื้อ - ปริมาณสั่งซื้อ ((s,Q) System) นั้น ได้คำนวณหาค่าต่างๆ ตามวิธีการคือ

$$Q = (\bar{d} * T) * \overline{M_Q} \qquad (3)$$

เมื่อ

T = Stockage Objective (คิดที่ 3 เดือน)

โดยที่จุดสั่งซื้อจะคิดวิธีการเดียวกับอะไหล่ในกลุ่ม A คือ

$$s = (\bar{d} * LT + Z\sigma_L) * \overline{M_L} \qquad (4)$$

โดยจะมีการสั่งซื้อเมื่อสถานะคงคลังของอะไหล่มีค่าน้อยกว่าจุดสั่งซื้อ และซื้อในปริมาณที่เท่ากับปริมาณสั่งซื้อที่คำนวณได้

## 4. ผลการดำเนินงาน

จากการวิเคราะห์ระบบการจัดการคงคลังของโรงงานตัวอย่าง และได้มีการแบ่งกลุ่มของอะไหล่ใหม่จากการพิจารณาความสำคัญของอะไหล่แบบหลายปัจจัย ซึ่งได้นำมาถึงการจัดระบบการจัดการอะไหล่คงคลังของงานกรณีศึกษา และมีการทำ Simulation โดยใช้ข้อมูลในอดีต เพื่อศึกษาว่านโยบายการจัดการอะไหล่คงคลังที่จัดหามานั้นมีความเหมาะสมกับลักษณะการใช้ และความต้องการของอะไหล่อย่างแท้จริง จากผลการดำเนินงานสามารถลดอัตราการขาดอะไหล่ได้ดังแสดงในตารางที่ 1 -2

**ตารางที่ 1** แสดงอัตราการขาดอะไหล่ และจำนวนวันที่รออะไหล่ก่อนการปรับปรุงระบบบริหารจัดการอะไหล่คงคลัง

| เดือน | ระบบการจัดการคงคลังแบบปัจจุบัน | | | |
|---|---|---|---|---|
| | จำนวนครั้งที่เบิก Spare part | จำนวนครั้งที่ขาดอะไหล่ | อัตราการขาดอะไหล่ (Dppm) | วันที่รอ Spare part เฉลี่ย |
| Jan-08 | 2040 | 11 | 5392 | 35.88 |
| Feb-08 | 1662 | 11 | 6619 | 44.35 |
| Mar-08 | 1785 | 15 | 8403 | 37.45 |
| Apr-08 | 1719 | 12 | 6981 | 51.35 |
| May-08 | 1552 | 10 | 6443 | 42.21 |
| Jun-08 | 1690 | 8 | 4734 | 37.00 |
| Jul-08 | 1965 | 10 | 5089 | 38.40 |
| Aug-08 | 223 | 15 | 67265 | 17.67 |
| **รวม** | **1579.5** | **11.5** | **7281** | **38.04** |

**ตารางที่ 2** แสดงอัตราการขาดอะไหล่ และจำนวนวันที่รออะไหล่หลังการปรับปรุงระบบบริหารจัดการอะไหล่คงคลัง

| เดือน | แนวคิดระบบการจัดการคงคลังแบบใหม่ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | จำนวนครั้งที่เบิก Spare part | จำนวนครั้งที่ขาดอะไหล่ | อัตราการขาดอะไหล่ (Dppm) | วันที่รอ Spare part เฉลี่ย |
| Jan-08 | 2040 | 11 | 5392 | 34.00 |
| Feb-08 | 1662 | 5 | 3008 | 25.50 |
| Mar-08 | 1785 | 3 | 1681 | 21.50 |
| Apr-08 | 1719 | 8 | 4654 | 33.00 |
| May-08 | 1552 | 2 | 1289 | 32.50 |
| Jun-08 | 1690 | 6 | 3550 | 24.00 |
| Jul-08 | 1965 | 2 | 1018 | 21.50 |
| Aug-08 | 223 | 3 | 13453 | 7.00 |
| **รวม** | **1579.5** | **5** | **4256** | **24.88** |

**ตารางที่ 3** แสดงอัตราอะไหล่ที่ไม่มีการหมุนเวียนระหว่างการจัดการอะไหล่คงคลังแบบเดิมกับแบบใหม่

| Month | Actual | New Policy |
|---|---|---|
| Jan | $3,688,296 | $3,650,788 |
| Feb | $3,710,310 | $3,721,788 |
| Mar | $3,694,654 | $3,669,111 |
| Apr | $3,694,654 | $3,703,145 |
| May | $3,693,636 | $3,682,447 |
| Jun | $3,522,249 | $3,585,867 |
| Jul | $3,551,104 | $3,496,849 |
| Aug | $3,537,404 | $3,445,093 |
| **Average** | **$3,636,539** | **$3,618,136** |

**ตารางที่ 4** แสดงอัตราอะไหล่ที่หมุนเวียนในคลังเฉลี่ยต่อเดือน ระหว่าง ม.ค. - ส.ค.

| Month | Actual | New Policy |
|---|---|---|
| Jan | $454 | $480 |
| Feb | $318 | $101 |
| Mar | $322 | $413 |
| Apr | $175 | $322 |
| May | $354 | $272 |
| Jun | $767 | $326 |
| Jul | $666 | $864 |
| Aug | $568 | $575 |
| **Average** | **$3,623** | **$3,353** |

## 5. สรุป และข้อเสนอแนะ

การดำเนินงานวิจัยเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการศึกษารวบรวมข้อมูลพัสดุคงคลังประเภท อะไหล่เครื่องจักร (Spare parts) ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการผลิตของโรงงานตัวอย่าง โดยการศึกษาคุณสมบัติของอะไหล่แต่ละประเภทเพื่อจัดหานโยบายการจัดการคงคลังที่เหมาะสม ซึ่งนโยบายการจัดการคงคลังดังกล่าวได้นำมาประยุกต์ใช้กับข้อมูลการใช้อะไหล่แต่ละรายการในอดีต เพื่อดูอัตราการขาดอะไหล่ (Spare parts shortage) และอัตราอะไหล่ที่ไม่มีการ

หมุนเวียน (Spare parts dead stork) โดยผลของงานวิจัยสามารถสรุปพร้อมข้อเสนอแนะได้ดังนี้

**5.1 สรุปผลการดำเนินงาน**

5.1.1 พัสดุคงคลังประเภทอะไหล่ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการผลิตของโรงงานตัวอย่างทั้งหมด 3,719 รายการ คิดเป็นมูลค่าการเก็บสูงถึง $3,752,217.98 จากการวิเคราะห์ระบบการจัดการคงคลังได้แบ่งอะไหล่ออกตามความสำคัญออกเป็น 3 กลุ่ม และจัดนโยบายการสั่งซื้อให้แต่ละกลุ่ม ทำให้มีมูลค่าการเก็บ ณ สิ้นวันที่ 27 สิงหาคม เท่ากับ $3,618,136.72 เทียบกับระบบการจัดการคงคลังแบบเดิม $3,363,539.33 ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายได้ถึง 18,402.61 เหรียญสหรัฐฯ

5.1.2 ในการวิเคราะห์ระบบการจัดการอะไหล่คงคลังของโรงงานกรณีศึกษา ช่วยลดอัตราการขาดอะไหล่ได้ 1,573 dppm สำหรับอะไหล่กลุ่ม Automation 7,938 dppmสำหรับอะไหล่กลุ่ม Manual และ 3,025 dppm สำหรับอะไหล่ทั้งหมด นอกจากนี้ระยะเวลาในการรออะไหล่ ยังลดได้ 10 วัน สำหรับอะไหล่กลุ่ม Automation 15.62 วัน สำหรับอะไหล่กลุ่ม Manual และ 23.24 วัน สำหรับอะไหล่ทั้งหมด

5.1.3 สำหรับการจัดกลุ่มพัสดุคงคลังตามความสำ คัญในงานวิจัยเลือก การจัดกลุ่มพัสดุคงคลังโดยใช้เทคนิค AHP (Analytic Hierarchy Process Technique) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ปัจจัยได้มากกว่าหนึ่งปัจจัย เนื่องจากอะไหล่ บางประเภทถึงแม้จะมีการใช้น้อยแต่ก็มีความสำคัญ เช่นในเรื่องเวลานำที่ยาวนาน ราคาต่อหน่วยสูง หากจะพิจารณาเพียงปัจจัยมูลค่าการใช้ต่อปีเพียงปัจจัยเดียวตามขั้นตอนของการจำแนกกลุ่มความสำคัญโดยเทคนิค ABC นั้นคงไม่เหมาะสม สำหรับปัจจัยที่งานวิจัยเลือกใช้ได้แก่ ปัจจัยมูลค่าการใช้ต่อปี ปัจจัยราคาต่อหน่วยของอะไหล่ ปัจจัยเวลานำของอะไหล่ และปัจจัยความถี่ในการใช้งานของอะไหล่ จากการจัดกลุ่มความสำคัญทำให้มีรายการที่มีความสำคัญมากที่สุด (กลุ่ม A) 376 รายการ รายการที่มีความสำคัญรองลงมา (กลุ่ม B) 1,076 รายการ และรายการที่มีความสำคัญน้อยที่สุด 2,255 รายการ ส่วนอีก 21 รายการเป็นรายการที่ไม่ได้พิจารณาการจัดกลุ่มเนื่องจากเป็นอะไหล่ที่มีการสั่งซื้อแบบ Blanket Order โดยมีการทำสัญญากับ supplier

5.1.4 นโยบายการบริหารพัสดุคงคลังที่เลือกใช้สำหรับกลุ่มอะไหล่ กลุ่ม A ที่มีคุณลักษณะเวลานำยาว มูลค่าการใช้ต่อปีสูง ราคาต่อหน่วยสูง แต่ความถี่ในการใช้อยู่ในระดับปานกลาง คือนโยบายจุดสั่งซื้อ - ระดับสั่งซื้อ โดยที่ใช้แนวคิด High Limit - Low Limit ซึ่งจะแตกต่างกับ ระบบ Max - Min ตรงที่ต้องมีการคำนวณ และกำหนด Stock Objective (จุดมุ่งหมายในการเก็บสต๊อกนานที่สุด) ซึ่งเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสำหรับอะไหล่ที่สามารถจับสถิติอัตราการใช้ได้ และเป็นระบบที่เหมาะสมกับพัสดุคงคลังที่มีความสำคัญมาก มีการตรวจนับอย่างต่อเนื่องพร้อมกับใช้ระบบคอมพิวเตอร์ในการควบคุมตรวจสอบ และนอกจากนี้การนำนโยบายจุดสั่งซื้อ - ระดับสั่งซื้อ โดยที่ใช้แนวคิด High Limit - Low Limit มาประยุกต์ใช้กับพัสดุในกลุ่ม A นั้น ทำให้มีรอบในการสั่งซื้อที่สั้นลงกว่าเดิม ซึ่งจะทำให้มีการควบคุมติดตามค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณจุดสั่งซื้อ - ระดับสั่งซื้อถี่ขึ้น เพื่อให้ตอบสนองต่อความต้องการที่แท้จริงมากขึ้น

5.1.5 นโยบายการบริหารพัสดุคงคลังที่เลือกใช้สำหรับกลุ่มอะไหล่ กลุ่ม B คือนโยบายจุดสั่งซื้อ-ปริมาณสั่งซื้อ เนื่องจากเป็นระบบที่เหมาะสมกับพัสดุที่มีอัตราการใช้อย่างต่อเนื่องสามารถจับสถิติได้ มีจำนวนพัสดุสำรองคลังระหว่างการจัดหา โดยที่ใช้แนวคิดการกำหนด Stock Objective (จุดมุ่งหมายในการเก็บสต๊อกนานที่สุด) มาประยุกต์ใช้ในการหาปริมาณสั่งซื้อ ซึ่งจะสามารถประเมินรอบในการสั่ง หรือ รอบในการควบคุมติดตามพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณได้ ซึ่งจะช่วยให้การจัดการพัสดุคงคลังมีการกำหนดจุดสั่งซื้อ -

ปริมาณสั่งซื้อสำหรับอะไหล่แต่ละชนิดได้ตอบสนองกับความต้องการมากขึ้น และด้วยการนำระบบนี้มาใช้กับพัสดุกลุ่ม B และ C ที่มีความถี่ในการใช้สูง - ปานกลาง แต่มูลค่าการใช้น้อย และมีรอบเวลานำที่สั้น สามารถลดอัตราการขาดอะไหล่ลงได้โดยที่ค่าใช้จ่ายรวมของพัสดุไม่เพิ่มขึ้นได้

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทำงานวิจัยนี้พบข้อจำกัด ปัญหา และอุปสรรค สามารถสรุปเป็นข้อเสนอแนะ ได้ดังนี้

5.2.1 เนื่องจากงานวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากในการวิเคราะห์ลักษณะของอะไหล่แต่ละรายการ ที่จะนำไปพิจารณาแต่ละปัจจัยในการพิจารณาความสำคัญของอะไหล่ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการผลิต เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่เหมาะสมกับคุณลักษณะของอะไหล่แต่ละรายการมากที่สุด จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงขั้นตอนการเก็บข้อมูลหรือการได้มาของข้อมูลให้มีความถูกต้อง เนื่องจากว่าข้อมูลบางอย่างไม่สามารถรวบรวมได้ในเวลาระยะสั้น

5.2.2 ในการหาปริมาณความต้องการใช้อะไหล่ในกรณีการบำรุงรักษาเครื่องจักร หลังเกิดเหตุขัดข้อง (Breakdown maintenance) ควรจะต้องมีการบันทึกความถี่ และ ปริมาณความต้องการใช้ของแต่ละรายการชิ้นส่วนอะไหล่ เพื่อเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ ควบคุมระบบการจัดการอะไหล่คงคลังให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

5.2.3 ในการกำหนดนโยบาย การควบคุมบริหารจัดการอะไหล่เพื่อให้เหมาะสมกับกลุ่มของอะไหล่ ที่มีคุณลักษณะที่แตกต่างกัน ควรคำนึงถึงความเป็นไปได้ในการปฏิบัติจริง ให้เหมาะสมกับสภาพของโรงงาน เช่น ในกรณีที่มีการพิจารณาจุดสั่งซื้อ ปริมาณสั่งซื้อ/ระดับสั่งซื้อ ให้เปลี่ยนแปลงตามปริมาณเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต ควรมีระบบคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการควบคุมพัสดุคงคลังเพื่อเพิ่มความสามารถใน การปรับปรุงข้อมูลให้ทันกับการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง

5.2.4 การควบคุม ตรวจนับ และปรับปรุงพารามิเตอร์ในการคำนวณจุดสั่งซื้อ จำนวนสั่งซื้อ พัสดุคงคลังในกลุ่ม A ควรมีการติดตามอย่างต่อเนื่อง และ เข้มงวด เช่น ตรวจติดตามทุกเดือน สำหรับพัสดุคงคลังในกลุ่ม B มีการตรวจติดตามทุก 3 เดือน และ 6 เดือน สำหรับพัสดุคงคลังในกลุ่ม C

5.2.5 สำหรับอะไหล่ เริ่มต้น ไม่สามารถที่จะคำนวณหาอัตราการใช้ได้ ต้องให้ผู้ที่มีความเชี่ยวชาญทั้งการวางแผนการสั่งซื้อ (Planner) และวิศวกรที่ดูแลเครื่องจักรเป็นผู้กำหนดระดับสั่งซื้อและปริมาณสั่งซื้อเริ่มต้นก่อน หลังจากที่สามารถจับอัตราการใช้พัสดุได้จึงสามารถนำมาคำนวณตามวิธีที่ได้เสนอในงานวิจัยนี้

5.2.6 ควรมีการจัดอบรมพนักงานที่เกี่ยวข้องกับระบบพัสดุคงคลัง เช่น ฝ่ายวางแผน ฝ่ายควบคุมคงคลัง เกี่ยวกับการปฏิบัติงานในการควบคุมพัสดุคงคลัง และการเก็บรวมรวมข้อมูลให้ถูกต้องอยู่เสมอ เพื่อให้ระบบการจัดการคงคลังมีความถูกต้อง และเพื่อนำไปสู่การพัฒนาปรับปรุงนโยบายพัสดุคงคลังต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

ชนินทร์ คุณรักษา, 2541. ระบบพัสดุคงคลังสำหรับอะไหล่ซ่อม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มนิสสา รัตนพลแสน, 2547. Information system for maintenance planning and control in a blood transfer set manufacturer. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิฑูรย์ ตันสิริมงคล, 2542. AHP กระบวนการตัดสินใจที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในโลก. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น.

ศศิธร สาดแสงจันทร์, 2547. การวิเคราะห์เพื่อลดระดับสินค้าคงคลังประเภทชิ้นส่วนอะไหล่เครื่องมือในโรงงาน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ, 2542. ระบบพัสดุคงคลัง. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุชาติ ศุภมงคล, 2547. การจัดการอะไหล่ให้เพิ่มผลผลิต. Industrial Management & Technical Series. ซีเอ็ดยูเคชั่น

Braglia, M., Grassi, A., Montanari, R. (2004). Multi-attribute classification method for spare parts inventory management. Journal of Quality in Maintenance Engineering, Volume 10 Number 1 pp. 55-65

Ghodrati, B., Akersten, P., Kumar, U. (2007). Spare parts estimation and risk assessment conducted at Choghart Iron Ore Mine : A case study. Journal of Quality in Maintenance Engineering, Volume 13 Number 4 pp. 353-363

Ois Pe′re′s, F. and Grenouilleau, J. (2002). Initial spare parts supply of an orbital system.Aircraft Engineering and Aerospace Technology. Volume 74 Number 3 pp. 252-262

# ดัชนีนุกรมวารสารวิทยาศาตร์ มข.
# (เรียงตามชื่อผู้เขียน)
# ปีที่ 36 (พ.ศ. 2551)


| ผู้เขียน | ชื่อเรื่อง | ฉบับที่ | หน้า |
|---|---|---|---|
| กัญญา จิระเจริญรัตน์<br>ฐาปนา เขมนิพิฐพนธ์<br>จุฑารัตน์ เศรษฐกุล | การจำแนกสปีชีส์ของสัตว์ในส่วนผสมเนื้อสัตว์ด้วยเทคนิคพีซีอาร์เชิงซ้อน<br>(Identification of Animal Species in Meat Mixtures by Multiplex PCR Technique) | 2 | 121-128 |
| เกียรติศักดิ์ ดวงมาลย์ | พอลิฟีนอลออกซิเดสและการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในผักผลไม้ | 2 | 97-105 |
| จันทรพร ทองเอกแก้ว | บทบาทของคาเทชินในชาเขียวต่อการลดปริมาณโคเลสเตอรอลในเลือด<br>(Role of Green tea Catechins on Lower Plasma Cholesterol) | 2 | 91-96 |
| จารุวรรณ ศิริเทพทวี | การประยุกต์ใช้แสงซินโครตรอนในวิทยาศาสตร์การแพทย์<br>(Application of synchrotron radiation in medical sciences) | 2 | 81-90 |
| ชาญเรืองฤทธิ์ จันทร์นอก | การจำลองสเปกตรัมพลังงานของอนุภาคพลังงานสูงจากเหตุการณ์พายุสุริยะวันที่ 22 มิถุนายน ค.ศ. 2000<br>(Simulation of Energy Spectra of Energetic Particles from Solar Storm Event on June 22,2000) | 1 | 67-75 |
| ชุติมา หาญจวณิช<br>ปรัชญา สนิท | พัฒนาการของลูกปลานวลจันทร์ (*Cirrhinus microlepis*) วัยอ่อน<br>(Development of *Cirrhinus microlepis* larvae) | 2 | 139-150 |
| ธเนศ แตงสาตร์<br>ยรรยงค์ อินทร์ม่วง<br>มณีรัตน์ องค์วรรณดี | การอนุรักษ์และใช้ประโยชน์ทรัพยากรป่าชุมชนบ้านโคกประดู่ ตำบลมหาโพธิ อำเภอสระโบสถ์ จังหวัดลพบุรี<br>(Conservation and Utilization of Community Forest Resource of Ban Kok Pra Doo, Maha Pho Sub-district, Sa Bot District, Lop Buri Province) | 4 | 302-311 |

| ผู้เขียน | ชื่อเรื่อง | ฉบับที่ | หน้า |
|---|---|---|---|
| ธีรนุช บุนนาค | คณิตศาสตร์และการทำนายความรัก (Mathematics and Love Forecast) | 3 | 182-187 |
| นวภา ปลุกปลื้ม<br>ชัชวาลย์ เรืองประพันธ์<br>อโนทัย ตรีวานิช | ประสิทธิภาพของวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบทั่วไปของการเลือก ลำดับที่ของชุดตัวอย่างเมื่อจัดลำดับแบบสมบูรณ์ (Efficiency of General Ranked Set Sampling with Perfect Ranking) | 2 | 151-161 |
| ปรัชญากร ฮดมาลี<br>อัมพร อนันต์พินิจวัฒนา | ฟิลด์ของเมทริกซ์ปาสกาล (Field of Pascal Matrices) | 1 | 37-46 |
| ปิยะ บัณฑิตสกุลชัย | เมตริกสมมูลระหว่างการส่งนอนเอกแพนซีฟแบบวงกว้างและเฉพาะที่บนปริภูมิอิงระยะทางแบบเชื่อมโยงที่กระชับ (Equivalent Metric between Global and Local Nonexpansive Mappings on a Compact Connected Metric Space) | 3 | 206-213 |
| พัฒนา ภู่วณิชย์ | การฉายรังสีบำบัดแบบผสานความเข้ม (Intensity Modulated Radiation Therapy) | 4 | 270-278 |
| พันธ์ทิพย์ กล่อมเจ๊ก | การประยุกต์ใช้หญ้าอาหารสัตว์ในการบำบัดน้ำเสียในระบบบึงประดิษฐ์ (Application of Pasture for Wastewater Treatment in Constructed Wetland) | 4 | 312-326 |
| ไพโรจน์ ประมวล | บทบาทของการจัดเรียงตัวใหม่ของโครโมโซมกับการแตกแขนงของสปีชีส์ (The Role of Chromosome Rearrangements in Speciation) | 4 | 253-261 |
| มัญชุพัฒน์ ฉ่ำสูงเนิน | การปรับปรุงระบบการบริหารคงคลังของอะไหล่ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ (Improving the Inventory Management of Spare Parts in Hard Disk Drive Business) | 4 | 364-373 |
| มารุต ตั้งวัฒนาชุลีพร<br>ภูริชญา สมภาร | บทบาทของอินเตอร์ลิวคิน-10 ในโรคซิลเต็มมิค ลูปัส อีริธีมาโทซัส (The Role of Interleukin-10 in Systemic Lupus Erythematosus) | 1 | 7-15 |
| ยรรยงค์ อินทร์ม่วง<br>ยุพเยาว์ โตคีรี<br>วงศ์ชนก จำเริญสาร | การจัดการระบบนิเวศฟาร์มเกษตรอินทรีย์ชนบทต้นแบบของไทย (Agroecosystem Management in an Organic Farm Model Rural Thailand) | 3 | 214-225 |

| ผู้เขียน | ชื่อเรื่อง | ฉบับที่ | หน้า |
|---|---|---|---|
| รัตนภรณ์ ลีสิงห์ | การผลิตลิปิดจากจุลินทรีย์โดยยีสต์พื้นถิ่นไขมันสูง (Microbial lipid production by locally isolated oleaginous yeast) | 2 | 129-138 |
| รัตนา มหาชัย<br>ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง<br>ชุติมา คูคู่สมุทร<br>นาถ ภูวงศ์ผา<br>ชาญเชาว์ พรหมราษฎร์ | การพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียจากการฟอกย้อมสีสังเคราะห์เคมี (Development of Synthetic Chemical Dyeing Wastewater Treatment System) | 3 | 188-196 |
| วรชาติ โตแก้ว<br>ประนอม จันทรโณทัย<br>อัจฉรา ธรรมถาวร | การสำรวจเบื้องต้นของพืชวงศ์กล้วยไม้ในอุทยานแห่งชาติภูเรือ จังหวัดเลย (Preliminary Survey of the Family Orchidaceae in Phu Rua National Park, Loei Province) | 3 | 197-205 |
| วิจารณ์ สดศิริ | การหาจุดสะท้อนโดยการใช้แกนหมุนและการเลื่อนแกนทางขนาน | 3 | 233-242 |
| ศักดิ์สิทธิ์ จันทร์ไทย | การวิเคราะห์สปีชีย์โลหะหนักที่ปนเปื้อนในตัวอย่างอาหารและเครื่องดื่ม และตัวอย่างจากสิ่งแวดล้อม (Speciation Analysis of Heavy Metals Contaminated in Foods and Drinks, and from Environmental Samples) | 1 | 16-28 |
| สมจิต โชติชัยสถิตย์<br>ธัญญารัตน์ จูมแพง | การจำแนกสมาชิกนิจพล สมาชิกที่หาตัวผกผันได้และสมาชิกปกติในริง M2(Z9) (Characterization of Idempotent, Invertible and Regular Elements in Ring M2(Z9)) | 1 | 29-36 |
| สมจิต โชติชัยสถิตย์<br>พงศกร ยศแก้ว | การจำแนกสมาชิกนิจพล สมาชิกที่หาตัวผกผันได้และสมาชิกปกติในริง M2(Zp2) (Characterization of Idempotent, Inertivble and Regular Elements in Rings M2(Zp2)) | 3 | 226-232 |
| สมบัติ พุทธจักร<br>ธรณิศ นาวารัตน์<br>ดาริกา จาเอาะ | การดูดซับเสียงในยางธรรมชาติผสมดินขาว (Acoustic Absorption of Clay Filled Natural Rubber) | 4 | 338-347 |
| สรัญญา ธนสัมฤทธิ์<br>นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์<br>วิทยา ปั้นสุวรรณ | การดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียด้วยถ่านกัมมันต์ (Adsorption Sulfide Ion in Wastewater by Activated Carbons) | 4 | 327-337 |
| สำลี บุญสิทธิ์<br>สุพจน์ ไวท์ยางกูร | วิธีสมาชิกจำกัดสำหรับปัญหาการไหลผ่านของไหลอุดมคติที่อัดไม่ได้ด้วยโปรแกรม FlexPDE | 3 | 243-252 |
| สุธรรม ศรีหล่มสัก | ประจุบนผิวอนุภาคดินขาว (Surface Charges on Kaolinite Particles) | 4 | 262-269 |

| ผู้เขียน | ชื่อเรื่อง | ฉบับที่ | หน้า |
|---|---|---|---|
| สุปิยนิตย์ ไม้แพ | การศึกษาคลาโดเซอราในประเทศไทย และแนวทางการศึกษาในอนาคต (Study of Cladochera in Thailand and Trends in Future) | 3 | 171-181 |
| หนูเดือน เมืองแสน<br>จิตติพร สุวรรณาลัย | การใช้ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rRNA ในการระบุชนิดของแบคทีเรียที่แยกจากไรน้ำนางฟ้า (The Use of 16S rRNA Gene Sequences in Identification of Bacteria Isolated From Fairy shrimps) | 1 | 59-66 |
| อำนวย มณีศรีวงศ์กูล | สูตรค่าสัมประสิทธิ์แอลฟา (Coefficient Alpha Formula) | 1 | 1-6 |
| Anamai Na-udom | Review of Design and Analysis of Computer Simulated Experiments | 2 | 106-120 |
| Mittree Krapeedang<br>Tiang Poomsa-ard | HYPERIDENTITIES IN THE x(yz) ≈ x(y(zz)) CLASS OF GRAPH ALGEBRAS OF TYPE (2,0) | 4 | 348-363 |
| Narumon Benjapak<br>Prasan Sawatsitang<br>Sayan Tanpanich | การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันและคุณค่าทางโภชนาการของผักหวานบ้าน (*Sauropus androgynus* L. Merr.)<br>Determination of Antioxidant Capacity and Nutritive Values of Pak-Wanban (*Sauropus androgynus* L. Merr.) | 4 | 279-289 |
| Pichedsak Srivong<br>Preeya Wangsomnuk<br>Paweena Pongdontri | Characterization of a Fragrant Gene and Enzymatic Activity of Betaine Aldehyde Dehydrogenase in Aromatic and Nonaromatic Thai Rice Cultivars | 4 | 290-301 |
| Siriporn Bassadorn<br>Tiang Poomsa-ard | HYPERIDENTITIES IN (xx)(yx) = xy GRAPH ALGERAS OF TYPE (2,0) | 1 | 47-58 |

# ดัชนีนุกรมวารสารวิทยาศาตร์ มข.
# (เรียงตามชื่อเรื่อง)
# ปีที่ 36 (พ.ศ. 2551)


| ชื่อเรื่อง | ผู้เขียน | ฉบับที่ | หน้า |
|---|---|---|---|
| การจำแนกสมาชิกนิจพล สมาชิกที่หาตัวผกผันได้และสมาชิกปกติในริง M2(Z9)<br>(Characterization of Idempotent, Invertible and Regular Elements in Ring M2(Z9)) | สมจิต โชติชัยสถิตย์<br>ธัญญารัตน์ จูมแพง | 1 | 29-36 |
| การจัดการระบบนิเวศฟาร์มเกษตรอินทรีย์ชนบทต้นแบบของไทย<br>(Agroecosystem Management in an Organic Farm Model Rural Thailand) | ยรรยงค์ อินทร์ม่วง<br>ยุพเยาว์ โตคีรี<br>วงศ์ชนก จำเริญสาร | 3 | 214-225 |
| การจำแนกสปีชีส์ของสัตว์ในส่วนผสมเนื้อสัตว์ด้วยเทคนิคพีซีอาร์เชิงซ้อน<br>(Identification of Animal Species in Meat Mixtures by Multiplex PCR Technique) | กัญญา จิระเจริญรัตน์<br>ฐาปนา เขมนิพิฐพนธ์<br>จุฑารัตน์ เศรษฐกุล | 2 | 121-128 |
| การจำแนกสมาชิกนิจพล สมาชิกที่หาตัวผกผันได้และสมาชิกปกติในริง M2(Zp2)<br>(Characterization of Idempotent, Inertivble and Regular Elements in Rings M2(Zp2)) | สมจิต โชติชัยสถิตย์<br>พงศกร ยศแก้ว | 3 | 226-232 |
| การจำลองสเปกตรัมพลังงานของอนุภาคพลังงานสูงจากเหตุการณ์พายุสุริยะวันที่ 22 มิถุนายน ค.ศ. 2000<br>(Simulation of Energy Spectra of Energetic Particles from Solar Storm Event on June 22,2000) | ชาญเรืองฤทธิ์ จันทร์นอก | 1 | 67-75 |
| การฉายรังสีบำบัดแบบผสานความเข้ม<br>(Intensity Modulated Radiation Therapy) | พัฒนา ภู่วณิชย์ | 4 | 270-278 |
| การใช้ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rRNA ในการระบุชนิดของแบคทีเรียที่แยกจากไรน้ำนางฟ้า<br>(The Use of 16S rRNA Gene Sequences in Identification of Bacteria Isolated From Fairy shrimps) | หนูเดือน เมืองแสน<br>จิตติพร สุวรรณาลัย | 1 | 59-66 |

| ชื่อเรื่อง | ผู้เขียน | ฉบับที่ | หน้า |
|---|---|---|---|
| การดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียด้วยถ่านกัมมันต์ (Adsorption Sulfide Ion in Wastewater by Activated Carbons) | สรัญญา ธนสัมฤทธิ์<br>นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์<br>วิทยา ปั้นสุวรรณ | 4 | 327-337 |
| การดูดซับเสียงในยางธรรมชาติผสมดินขาว (Acoustic Absorption of Clay Filled Natural Rubber) | สมบัติ พุทธจักร<br>ธรณิศ นาวารัตน์<br>ดาริกา จาเอาะ | 4 | 338-347 |
| การประยุกต์ใช้แสงซินโครตรอนในวิทยาศาสตร์การแพทย์ (Application of synchrotron radiation in medical sciences) | จารุวรรณ ศิริเทพทวี | 2 | 81-90 |
| การประยุกต์ใช้หญ้าอาหารสัตว์ในการบำบัดน้ำเสียในระบบบึงประดิษฐ์ (Application of Pasture for Wastewater Treatment in Constructed Wetland) | พันธ์ทิพย์ กล่อมเจ๊ก | 4 | 312-326 |
| การปรับปรุงระบบการบริหารคงคลังของอะไหล่ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ (Improving the Inventory Management of Spare Parts in Hard Disk Drive Business) | มัญชุพัฒน์ ฉ่ำสูงเนิน | 4 | 364-373 |
| การผลิตลิปิดจากจุลินทรีย์โดยยีสต์พื้นถิ่นไขมันสูง (Microbial lipid production by locally isolated oleaginous yeast) | รัตนภรณ์ ลีสิงห์ | 2 | 129-138 |
| การพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียจากการฟอกย้อมสีสังเคราะห์เคมี (Development of Synthetic Chemical Dyeing Wastewater Treatment System) | รัตนา มหาชัย<br>ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง<br>ชุติมา คูคู่สมุทร<br>นาถ ภูวงศ์ผา<br>ชาญเชาว์ พรหมราษฎร์ | 3 | 188-196 |
| การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันและคุณค่าทางโภชนาการของผักหวานบ้าน (*Sauropus androgynus* L. Merr.) Determination of Antioxidant Capacity and Nutritive Values of Pak-Wanban (*Sauropus androgynus* L. Merr.) | Narumon Benjapak<br>Prasan Sawatsitang<br>Sayan Tanpanich | 4 | 279-289 |
| การวิเคราะห์สปีชีย์โลหะหนักที่ปนเปื้อนในตัวอย่างอาหารและเครื่องดื่ม และตัวอย่างจากสิ่งแวดล้อม (Speciation Analysis of Heavy Metals Contaminated in Foods and Drinks, and from Environmental Samples) | ศักดิ์สิทธิ์ จันทร์ไทย | 1 | 16-28 |

| ชื่อเรื่อง | ผู้เขียน | ฉบับที่ | หน้า |
|---|---|---|---|
| การศึกษาคลาโดเซอราในประเทศไทยและแนวทางการศึกษาในอนาคต (Study of Cladochera in Thailand and Trends in Future) | สุปียนิตย์ ไม้แพ | 3 | 171-181 |
| การสำรวจเบื้องต้นของพืชวงศ์กล้วยไม้ในอุทยานแห่งชาติภูเรือ จังหวัดเลย (Preliminary Survey of the Family Orchidaceae in Phu Rua National Park, Loei Province) | วรชาติ โตแก้ว<br>ประนอม จันทรโณทัย<br>อัจฉรา ธรรมถาวร | 3 | 197-205 |
| การหาจุดสะท้อนโดยการใช้แกนหมุนและการเลื่อนแกนทางขนาน | วิจารณ์ สดศิริ | 3 | 233-242 |
| การอนุรักษ์และใช้ประโยชน์ทรัพยากรป่าชุมชนบ้านโคกประดู่ ตำบลมหาโพธิ อำเภอสระโบสถ์ จังหวัดลพบุรี (Conservation and Utilization of Community Forest Resource of Ban Kok Pra Doo, Maha Pho Sub-district, Sa Bot District, Lop Buri Province) | ธเนศ แตงสาตร์<br>ยรรยงค์ อินทร์ม่วง<br>มณีรัตน์ องค์วรรณดี | 4 | 302-311 |
| คณิตศาสตร์และการทำนายความรัก (Mathematics and Love Forecast) | ธีรนุช บุนนาค | 3 | 182-187 |
| บทบาทของการจัดเรียงตัวใหม่ของโครโมโซมกับการแตกแขนงของสปีชีส์ (The Role of Chromosome Rearrangements in Speciation) | ไพโรจน์ ประมวล | 4 | 253-261 |
| บทบาทของคาเทชินในชาเขียวต่อการลดปริมาณโคเลสเตอรอลในเลือด (Role of Green tea Catechins on Lower Plasma Cholesterol) | จันทรพร ทองเอกแก้ว | 2 | 91-96 |
| บทบาทของอินเตอร์ลิวคิน-10 ในโรคซิลเต็มมิคลูปัส อีริธีมาโทซัส (The Role of Interleukin-10 in Systemic Lupus Erythematosus) | มารุต ตั้งวัฒนาชุลีพร<br>ภูริชญา สมภาร | 1 | 7-15 |
| ประจุบนผิวอนุภาคดินขาว (Surface Charges on Kaolinite Particles) | สุธรรม ศรีหล่มสัก | 4 | 262-269 |
| ประสิทธิภาพของวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบทั่วไปของการเลือก ลำดับที่ของชุดตัวอย่างเมื่อจัดลำดับแบบสมบูรณ์ (Efficiency of General Ranked Set Sampling with Perfect Ranking) | นวภา ปลุกปลื้ม<br>ชัชวาลย์ เรืองประพันธ์<br>อโนทัย ตรีวานิช | 2 | 151-161 |

| ชื่อเรื่อง | ผู้เขียน | ฉบับที่ | หน้า |
|---|---|---|---|
| พอลิฟีนอลออกซิเดสและการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในผักผลไม้ | เกียรติศักดิ์ ดวงมาลย์ | 2 | 97-105 |
| พัฒนาการของลูกปลานวลจันทร์ (*Cirrhinus microlepis*) วัยอ่อน (Development of *Cirrhinus microlepis* larvae) | ชุติมา หาญจวณิช<br>ปรัชญา สนิท | 2 | 139-150 |
| ฟิลด์ของเมทริกซ์ปาสกาล (Field of Pascal Matrices) | ปรัชญากร ฮดมาลี<br>อัมพร อนันต์พินิจวัฒนา | 1 | 37-46 |
| เมตริกสมมูลระหว่างการส่งนอนเอกแพนซีฟแบบวงกว้างและเฉพาะที่บนปริภูมิอิงระยะทางแบบเชื่อมโยงที่กระชับ (Equivalent Metric between Global and Local Nonexpansive Mappings on a Compact Connected Metric Space) | ปิยะ บัณฑิตสกุลชัย | 3 | 206-213 |
| วิธีสมาชิกจำกัดสำหรับปัญหาการไหลผ่านของไหลอุดมคติที่อัดไม่ได้ด้วยโปรแกรม FlexPDE | สำลี บุญสิทธิ์<br>สุพจน์ ไวท์ยางกูร | 3 | 243-252 |
| สูตรค่าสัมประสิทธิ์แอลฟา (Coefficient Alpha Formula) | อำนวย มณีศรีวงศ์กูล | 1 | 1-6 |
| Characterization of a Fragrant Gene and Enzymatic Activity of Betaine Aldehyde Dehydrogenase in Aromatic and Nonaromatic Thai Rice Cultivars | Pichedsak Srivong<br>Preeya Wangsomnuk<br>Paweena Pongdontri | 4 | 290-301 |
| HYPERIDENTITIES IN THE x(yz) ≈ x(y(zz)) CLASS OF GRAPH ALGEBRAS OF TYPE (2,0) | Mittree Krapeedang<br>Tiang Poomsa-ard | 4 | 348-363 |
| HYPERIDENTITIES IN (xx)(yx) = xy GRAPH ALGERAS OF TYPE (2,0) | Siriporn Bassadorn<br>Tiang Poomsa-ard | 1 | 47-58 |
| Review of Design and Analysis of Computer Simulated Experiments | Anamai Na-udom | 2 | 106-120 |


อนุญาตให้ใช้ได้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มหาวิทยาลัยขอนแก่น คณะวิทยาศาสตร์ ห้องสมุดสตางค์ มงคลสุ

# ข้อแนะนำในการเขียนบทความลงวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

## ประเภทของเรื่องที่จะตีพิมพ์

1. รายงานผลการวิจัยและค้นคว้าหรือการสำรวจที่ยังไม่เคยตีพิมพ์ในวารสารหรือหนังสืออื่นมาก่อน

2. บทความปริทัศน์ ได้แก่ งานเขียนที่รวบรวมหรือเรียบเรียงจากเอกสารหรือหนังสือต่าง ๆ เพื่อเผยแพร่และฟื้นฟูงานด้านวิชาการระดับต่าง ๆ

3. บทความแสดงข้อคิดเห็นหรือข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในด้านวิชาการ เรื่องแปล ข่าววิชาการ ย่อความจากงานวิจัยหรือหนังสือใหม่ที่น่าสนใจ

## รูปแบบของการเขียนและเตรียมต้นฉบับ

1. ต้นฉบับ ต้องเป็นตัวพิมพ์ Angsana New

1.1 ชื่อเรื่อง ขนาดตัวอักษร 20 ตัวเข้ม ตำแหน่งตรงกลาง มีทั้งชื่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

1.2 ชื่อผู้เขียน ขนาดตัวอักษร 16 เอน ตำแหน่งขวาสุด และใส่หมายเลขไว้ท้ายนามสกุล เพื่อการระบุที่อยู่ด้านล่าง

1.3 หัวข้อใหญ่ในแต่ละส่วน ขนาดตัวอักษร 16 ตัวเข้ม ตำแหน่งซ้ายสุด ยกเว้น บทคัดย่อ และ Abstract อยู่ตรงกลาง หัวข้อย่อยตามความเหมาะสม

1.4 เนื้อความ ขนาดตัวอักษร 14

1.5 คำว่า รูปที่ x และตารางที่ x ขนาดตัวอักษร 14 ตัวเข้ม ส่วนข้อความบรรยายต่อท้ายตัวปกติ

1.6 ที่อยู่ ขนาดอักษร 12

1.7 ช่องห่างระหว่างบรรทัดตามมาตรฐาน

1.8 พิมพ์ลงในกระดาษขาว A4 (โรเนียวสั้น) โดยใช้กระดาษหน้าเดียว ความยาวไม่เกิน 10 หน้า ส่งต้นฉบับ 2 ชุด (ไม่ต้องส่งแผ่นดิสก์ หรือแผ่นซีดีในขั้นตอนนี้ เมื่อได้รับแจ้งว่าได้ลงพิมพ์แล้ว ผู้เขียนส่งฉบับแก้ไข 1 ชุด พร้อมแผ่นดิสก์ หรือแผ่นซีดี)

2. ต้นฉบับ จะถูกพิจารณาโดยกองบรรณาธิการ และจะตอบรับการได้รับบทความโดยไม่ส่งต้นฉบับคืน ผู้เขียนควรจะอัดสำเนาเก็บไว้เป็นหลักฐานของตัวเอง 1 ฉบับ

3. ต้นฉบับ จะต้องมีความถูกต้องทั้งในด้านเนื้อหา และการใช้ภาษา รวมทั้งมีความสมบูรณ์ในรูปแบบพร้อมที่จะนำลงตีพิมพ์ได้

4. ชื่อเรื่อง ให้ใช้ภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ **ไม่ยาวเกินไป** และหลีกเลี่ยงการใช้คำย่อโดยไม่จำเป็น

5. ชื่อผู้เขียน เขียนชื่อภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษพร้อมทั้งบอกสถานที่ทำงานให้ชัดเจน

6. เนื้อเรื่อง ใช้ได้ทั้งภาษาไทยล้วนและภาษาอังกฤษล้วน ถ้าใช้ภาษาไทย ภาษาอังกฤษที่ใช้ปนกับภาษาไทยนั้นให้พยายามแปลเป็นไทยเท่าที่จะทำได้ และให้เขียนคำเดิมกำกับในวงเล็บ การทับศัพท์ภาษาอังกฤษตลอดทั้งการเขียนตัวสะกด การันต์ ในภาษาไทยให้ใช้ตามแบบราชบัณฑิตยสถาน

# ข้อแนะนำในการเขียนบทความลงวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

7. ในกรณีของบทความวิจัย **ต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ** และแบ่งเนื้อหาของบทความเป็นบทนำ วิธีดำเนินงาน ผลการวิเคราะห์ บทสรุปและวิจารณ์

8. เชิงอรรถ (footnote) ใช้เฉพาะที่จำเป็นเพื่อขยายหรือให้รายละเอียดเพิ่มเติมแก่ใจความเฉพาะตอนในบทความ

9. ตารางและภาพประกอบ คำบรรยายประกอบตารางหรือภาพประกอบควรจะสั้นและชัดเจน ถ้าเป็นภาพถ่ายให้ใช้ภาพขาว-ดำ ขนาดโปสการ์ด ภาพเขียนลายเส้นควรเขียนด้วยหมึกดำ ภาพที่เขียนต้องชัดเจนและมีขนาดที่เหมาะสม

10. เอกสารอ้างอิง หรือบรรณานุกรม แนะนำให้เขียนตามแบบที่ทางวารสารกำหนด

**ส่งต้นฉบับมาที่**

**กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข.**
**คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002**

**อภินันทนาการสำหรับผู้เขียน**

เรื่องที่ได้รับการตีพิมพ์ ผู้เขียนจะได้รับวารสารฉบับนั้น 2 เล่ม และสำเนาพิมพ์อีก 15 ชุด

# ตัวอย่าง

# การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันและกรดไขมันของจิ้งหรีดทองลาย (*Gryllus* sp.) ที่เลี้ยงเพื่อการค้า

*บรรจง เชื้อเมืองพาน[1] วิรัช ว่องพัฒนากุล[2] และ ปวีณา พงษ์ดนตรี [1*]*

## บทคัดย่อ

Xxxx

# การเขียนเอกสารอ้างอิงในวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

**เอกสารอ้างอิง (Reference)** หมายถึง เอกสารหรือส่วนหนึ่งของเอกสารที่อ้างอิงถึงหรือแปลมาโดยตรง การเขียนเอกสารอ้างอิงในเนื้อหานั้น ให้ใช้ระบบชื่อและปี เช่น Williams (2001) รายงานว่า... หรือ... (Williams, 2001) การเขียนเอกสารอ้างอิงในตอนท้ายบทความนั้น ให้ใส่เฉพาะเล่มที่มีการอ้างไว้แล้วในเนื้อหาเท่านั้น หากอ้างจากเล่มภาษาไทย ต้องเขียนทั้งชื่อและนามสกุล

**บรรณานุกรม (Bibliography)** หมายถึง เอกสารที่ใช้อ้างถึงในลักษณะที่สรุปเป็นหลักการหรือทฤษฎีโดยมิได้อ้างอิงหรือแปลมาโดยตรง

## การเขียนเอกสารอ้างอิง หรือบรรณานุกรม มีแนวทางการเขียนดังนี้

### 1. หนังสือ

ก. ภาษาไทย

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

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

พิมพ์ที่ หจก. ขอนแก่นการพิมพ์ โทร. (043) 221938, 220128
64 - 66 ถนนรื่นรมย์ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 2552
**E-mail** : kk_p902@hotmail.com
**E-mail** : khonkaenprint@yahoo.com

# หนังสือในโครงการผลิตตำรา คณะ[illegible]
# มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Date Due
(กำหนดคืน)




## สถิติพื้นฐาน

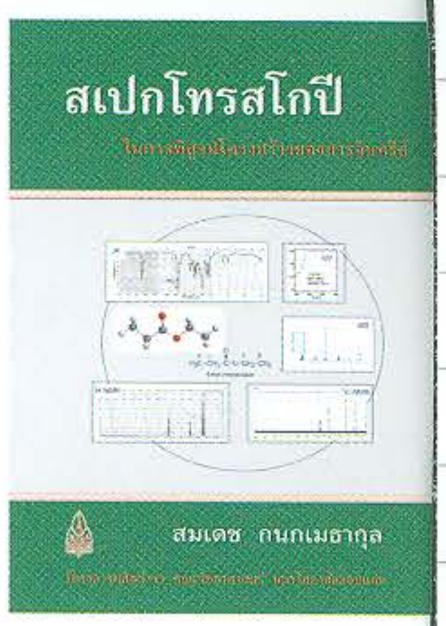
พร้อมตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม
MINITAB SPSS และ SAS

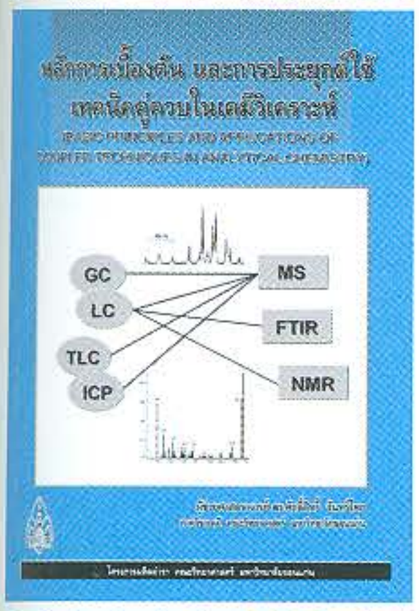
รองศาสตราจารย์ชัชวาลย์ เรืองประพันธ์

พิมพ์ครั้งที่ 5 2543 • 510 หน้า

ISBN 974-675-666-4

ราคา 180 บาท



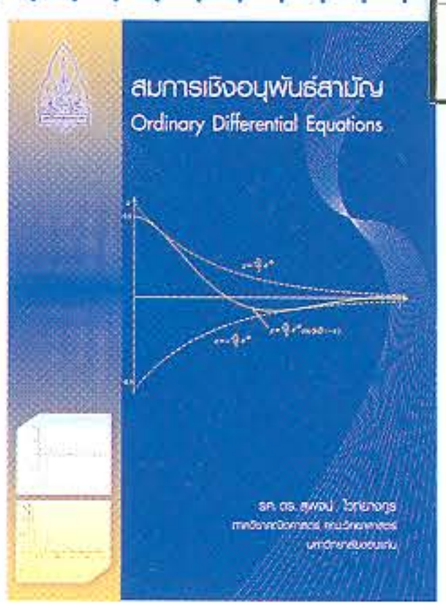

## หลักการเบื้องต้นและการประยุกต์ใช้เทคนิคคู่ควบในเคมีวิเคราะห์

รองศาสตราจารย์ ดร. ศักดิ์สิทธิ์ จันทร์ไทย

2543 • 202 หน้า

ISBN 974-678-333-2

ราคา 150 บาท




## สมการเชิงอนุพันธสามัญ

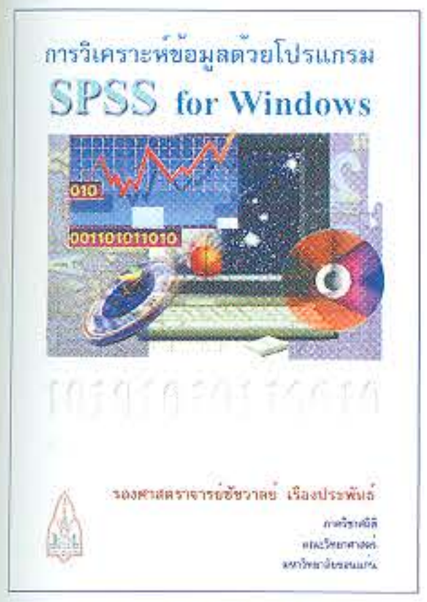
**Ordinary Differential Equations**

รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ ไวท์ยางกูร

2550 • 470 หน้า

ISBN 978-974-7707-55-7

ราคา 240 บาท



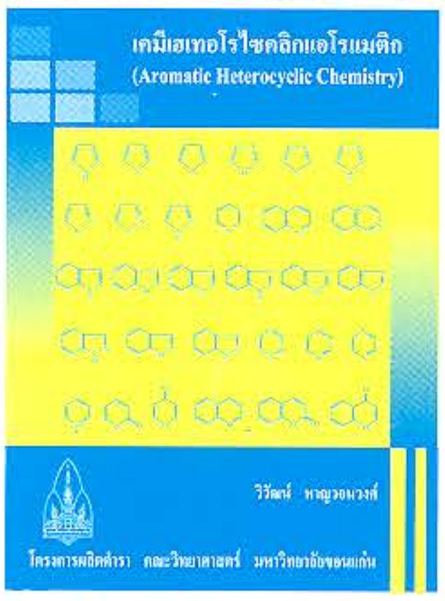

## การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม SPSS for Windows

รองศาสตราจารย์ชัชวาลย์ เรืองประพันธ์

2544 • 620 หน้า

ISBN 974-654-608-2

ราคา 300 บาท




## เคมีเฮเทอโรไซคลิกแอโรแมติก

**Aromatic Heterocyclic Chemistry**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ หาญวจนวงศ์

2550 • 122 หน้า

ISBN 978-974-7707-71-7

ราคา 90 บาท



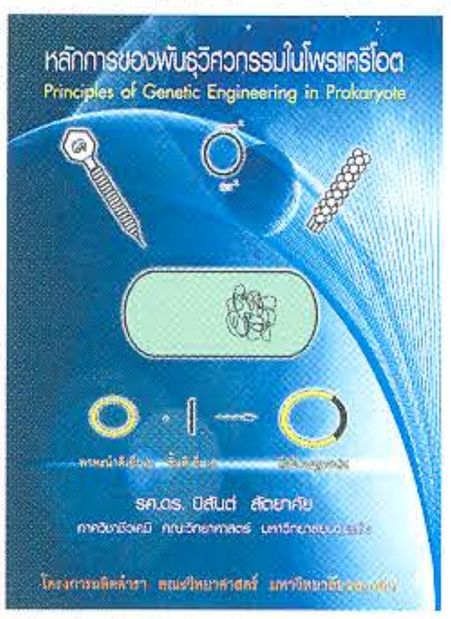

## การวิเคราะห์ฟังก์ชันนัลขั้นแนะนำ

รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ ไวท์ยางกูร

2547 • 344 หน้า

ISBN 974-367-958-8

ราคา 200 บาท




## หลักการของพันธุวิศวกรรมในโพรแคริโอต

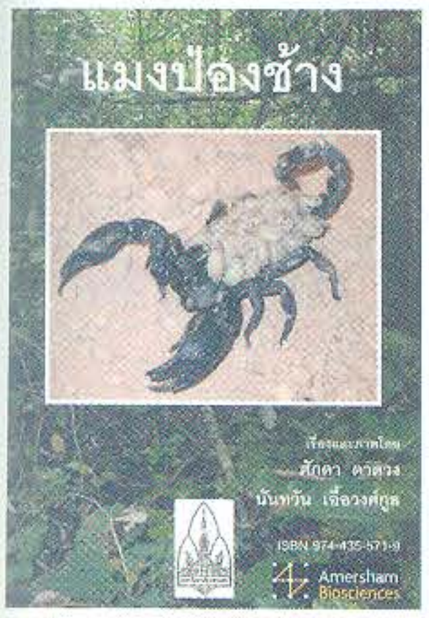
**Principles of Genetic Engineering in Prokaryote**

รองศาสตราจารย์ ดร. นิสันต์ สัตยาศัย

2551 • 164 หน้า

ISBN 978-974-10-2673-9

ราคา 120 บาท




## แมงป่องช้าง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศักดา ดาดวง
นางสาวนันทวัน เอื้อวงศ์กูล

2547 • 64 หน้า

ISBN 974-435-571-9

ราคา 160 บาท

**ท่านที่สนใจหนังสือในโครงการผลิตตำรา** ติดต่อสั่งซื้อได้ที่... **รองศาสตราจารย์ชัชวาลย์ เรืองประพันธ์**
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002 โทรศัพท์/โทรสาร 04320-2375 E-mail: chatchav@kku.ac.th



