

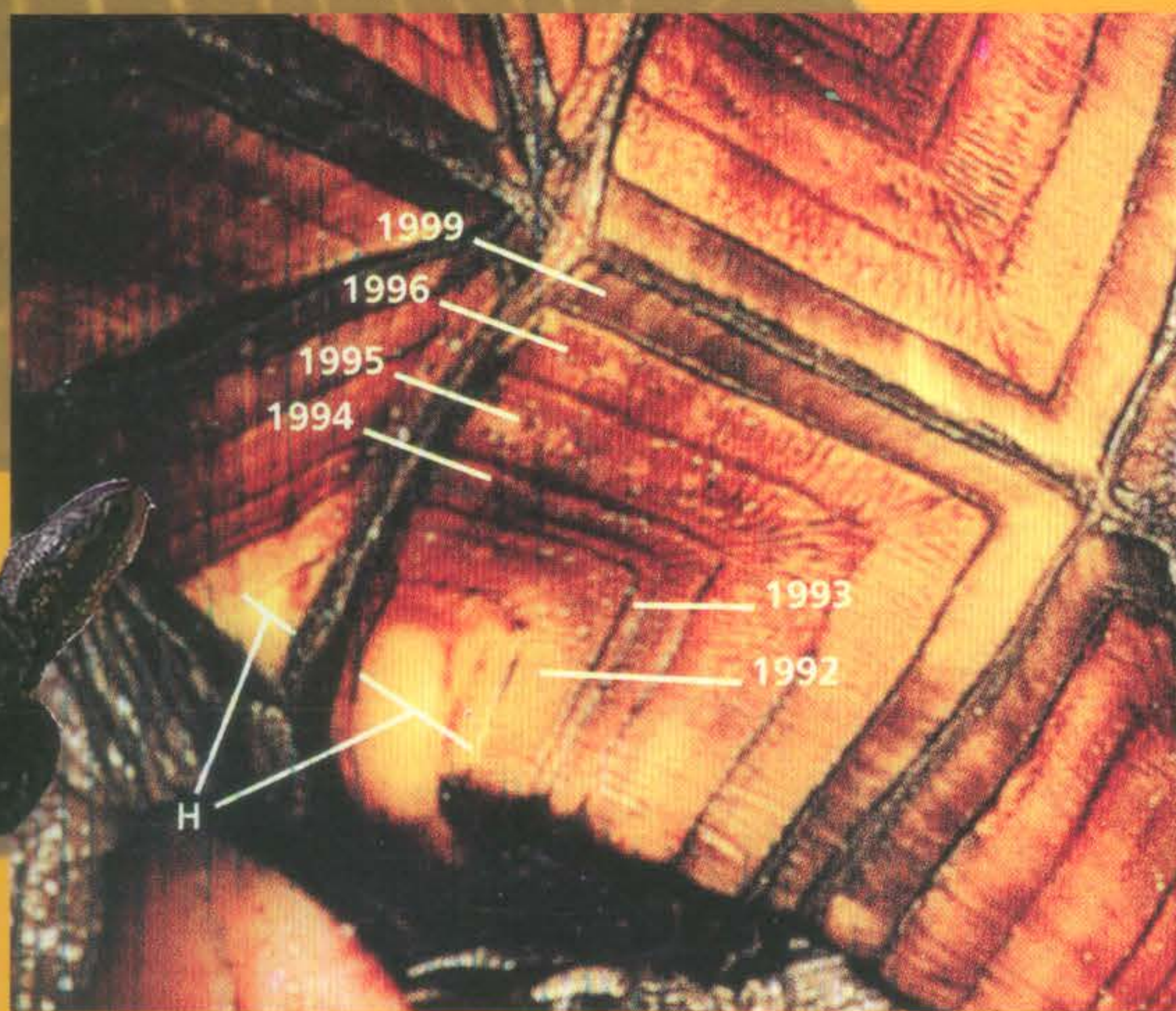


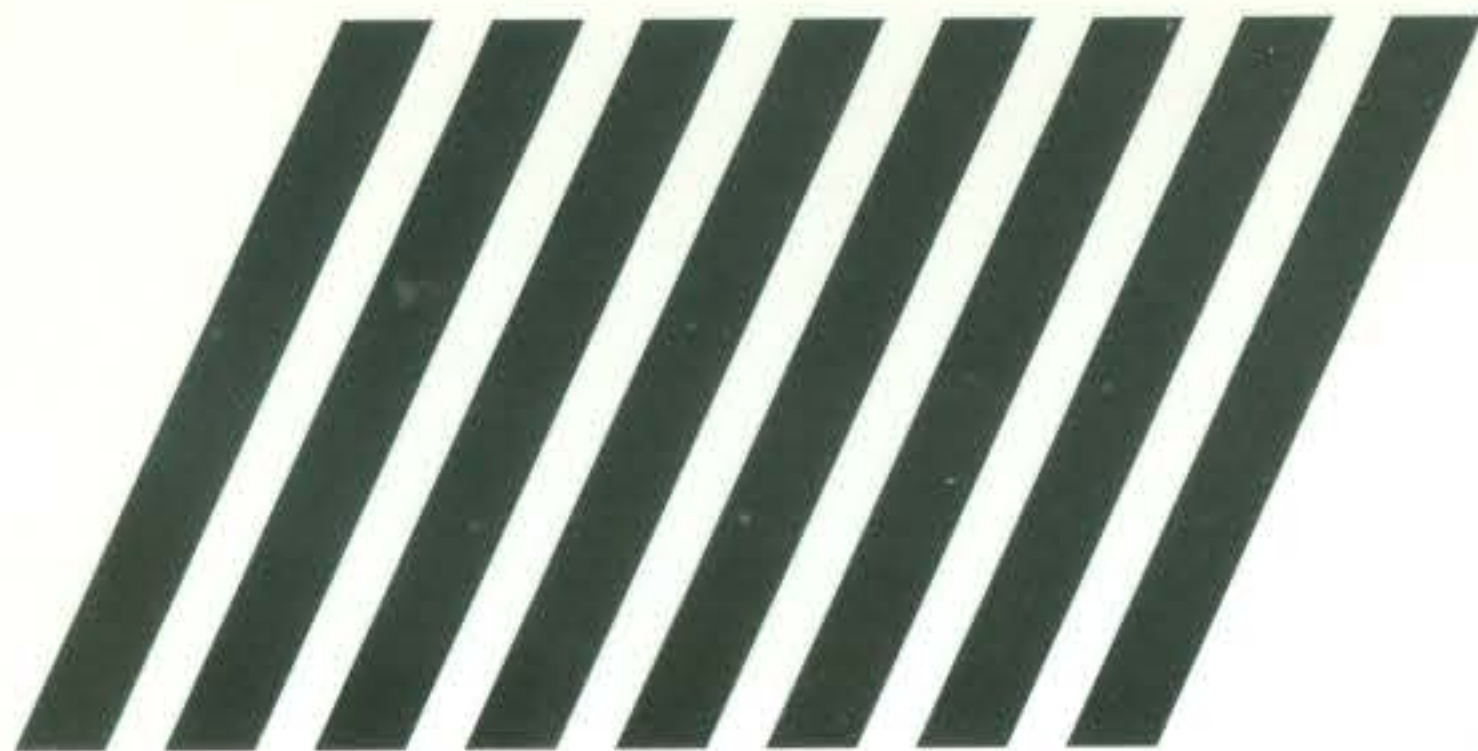
วารสาร

วิทยาศาสตร์มข.

KKU SCIENCE JOURNAL

ปีที่ 34 ฉบับที่ 1 (ม.ค.-มี.ค. 49) Vol. 34 No. 1 (Jan.-Mar.'06)





วารสาร
วิทยาศาสตร์ปูช.
KKU SCIENCE JOURNAL

เจ้าของ

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สำนักงาน

คณะวิทยาศาสตร์ ตึก 6 มหาวิทยาลัยขอนแก่น

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

ค่าบำรุง ปีละ 75 บาท ขายปลีกเล่มละ 20 บาท

การบอกรับเป็นสมาชิก

แจ้งความจำนงค์เป็นจดหมายหรือกรอกใบสมัครเป็นสมาชิก พร้อมค่าบำรุงเป็นธนาคัตติ หรือเช็คไปรษณียัตติ ในนามของนางบุญคุ้ม เหลือลัน ฝ่ายจัดการส่งจ่าย ป.ท. มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

ที่ปรึกษา

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
รองคณบดีฝ่ายวิชาการ

บรรณาธิการ

นฤมล แสงประดับ

กองบรรณาธิการ

กิตติกร นาคประสิทธิ์
งามนิจ อาจอินทร์
ชุติมา หาญจวนิช
ประเสริฐ แข่งขัน
สมปอง ธรรมศิริรักษ์
สมเดช กนกเมธากุล
สุพรรณิ อึ้งปัญสัตวงศ์
เสาวนิต ทองพิมพ์
อัจฉราภรณ์ ภัคดี

ฝ่ายศิลป์และภาพ

กิเลน ดิฉนรเศรษฐ์
สุชาติ เทพภูเขียว

ฝ่ายเหรียญณิก

บุญคุ้ม เหลือลัน

ฝ่ายจัดการและ เลขานุการ

ศุภลัทธิษณัฏ์ ทองปิ่น
สมศักดิ์ อุ่นจันท์

**บทความและงานวิจัย
ได้รับการกลั่นกรอง
จากผู้ทรงคุณวุฒิ**

บทความหรือข้อคิดเห็นใด ๆ ในวารสารนี้เป็นของผู้เขียน ไม่จำเป็นต้องสอดคล้องกับทัศนะของกองบรรณาธิการ

วารสาร

วิทยาศาสตร์ชุมชน

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

ปีที่ 34 ฉบับที่ 1

Volume 34 Number 1

บรรณาธิการแถลง

บทความ



- ☐ โหมบายไอพี
บุญทรัพย์ ไวกำ..... 1
2 พ.ย. 2549
- ☐ การหารลงตัวของ $x^n - y^n$ ด้วย $x - y$
มิตรี กระพีแดง..... 11
- ☐ กระดองของเต่ากับตะพานน้ำ
ปรียะวุฒิ วัชรานนท์..... 15
- ☐ การประเมินคุณภาพน้ำด้วยวิธีทางชีวภาพ
นฤมล แสงประดับ..... 24
- ☐ เมตริกซ์กับจำนวนเส้นทาง
ธวัช ช่างฝัส 37

วารสาร

วิทยาศาสตร์ชุมชน

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

ปีที่ 34 ฉบับที่ 1

Volume 34 Number 1

งานวิจัย

- ☐ ความทุกข์ของการถนัดมือซ้ายในนักเรียนไทย:
การศึกษานำร่อง

สมทรง ณ นคร และคณะ.....

41
- ☐ ผลกระทบของการชะล้างเกลือตามธรรมชาติ และการผลิต
เกลือต่อคุณภาพน้ำในแม่น้ำสงคราม

ชุดิมา อุอู่สมุทร, ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง
และศุภลักษณ์ ศรีจารนัย.....

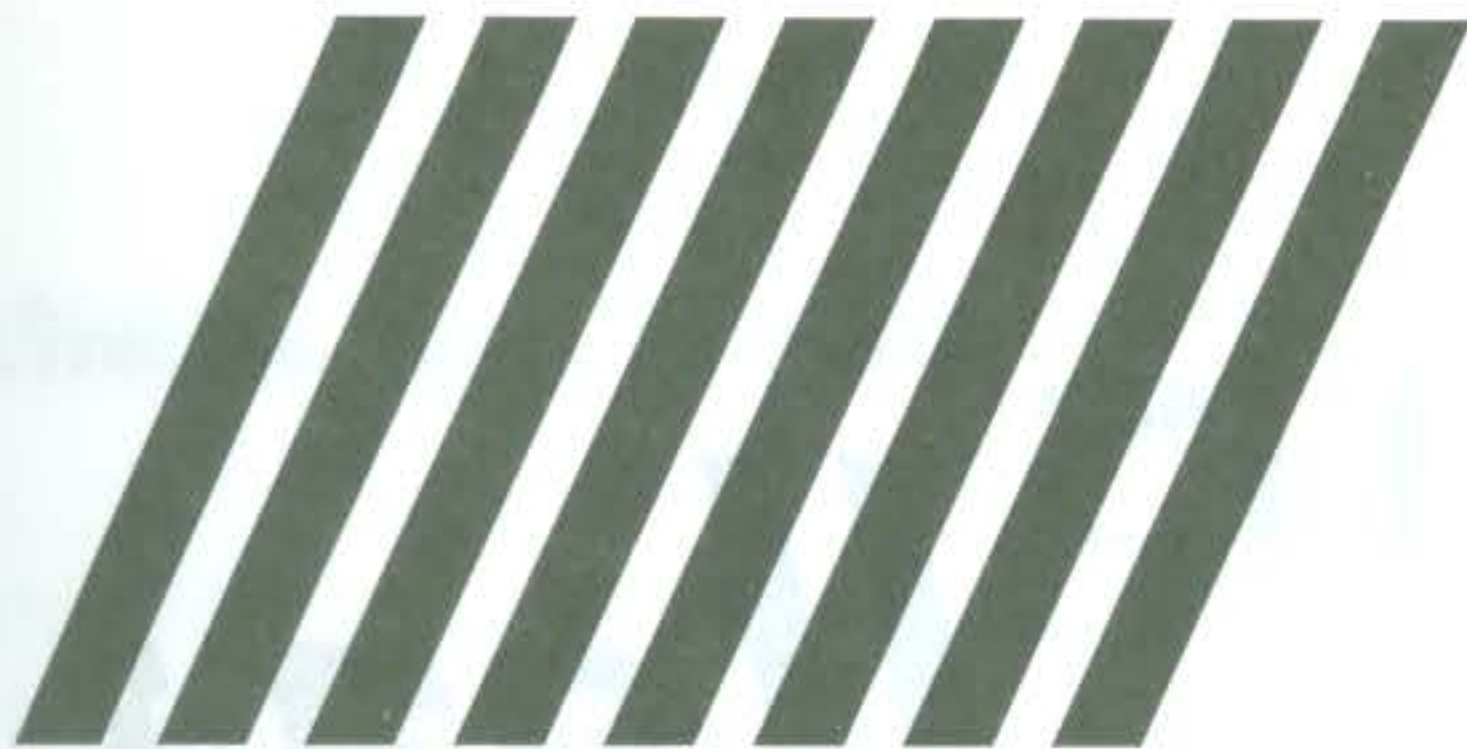
47
- ☐ แบคทีเรียที่ใช้ toluene เป็นแหล่งต้นตอคาร์บอนและ
สามารถสลาย trichloroethylene (TCE) ได้ที่แยกได้จาก
ธรรมชาติและแหล่งปนเปื้อน และความสามารถในการใช้
สารต้นตอคาร์บอนตัวอื่น

นิภา มลิณทวีสัมย์ และสุวรรณา เนียมสนิท

59
- ☐ ความหลากหลายของโพรโทซัวในบ่อบำบัดน้ำเสีย
บึงทุ่งสร้าง

พินิจ หวังสมนึก และคณะ.....

72



วิทยาจารย์
KKU SCIENCE JOURNAL

Publisher

Faculty of Science, Khon Kaen University,
Thailand.

Office

Faculty of Science, Building 6, Khon Kaen
University.

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 student 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

Subscription rate

75 baht per annum. Single issue price 20 baht.

Membership

Membership request can be made by letter or by completing the membership form, with the fee paid in the form of a postal order or postal cheque sent to Mrs. Boonkoom Lualon, Managing Staff, Khon Kaen University Post Office, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002

Advisory Committee Dean, Faculty of Science
Associate Dean for Academic
Affairs

Editor Narumon Sangpradub

Editorial Board Kittikorn Nakpasit
Ngamnij Arch-int
Chutima Hanjavanit
Prasert Kaengkan
Sompong Thammassirak
Somdej Kanokmedhakul
Supunnee Ungpansattawong
Soawanit Tongpim
Adcharaporn Pagdee

Artists Kilen Tinnoraset
Suchart Thepphukhieo

Treasurer Boonkoom Lualon

Manging Staff Suphaluk Tongpun
And Secretary Somsak Unjantee

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

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

บรรณาธิการ *แฉ*

สวัสดีปีใหม่ค่ะ ท่านสมาชิกและท่านผู้อ่านที่เคารพ

ปีใหม่นี้พลาดไม่ได้กับ Mobile IP ที่กำลังมาแรง และขอเอาใจท่านที่ชื่นชอบคณิตศาสตร์ด้วยบทความ การหารลงตัวของ $x^n - y^n$ ด้วย $x - y$ เครื่องใช้ต่างๆ มักออกแบบสำหรับคนถนัดมือขวา ท่านที่ถนัดมือซ้ายไม่ต้องน้อยใจนะคะ ลองพลิกไปอ่านความชุกของความถนัดมือซ้าย

วารสารวิทยาศาสตร์ มข. ปีที่ 34 เปิดศักราชด้วยเรื่องเกี่ยวกับน้ำ อันได้แก่งานวิจัย การปนเปื้อนของเกลือ และโลหะหนัก จากการผลิตเกลือที่มีผลต่อคุณภาพ น้ำในแม่น้ำสงคราม ตามด้วยการศึกษาแบคทีเรียที่ใช้ toluene เป็นแหล่ง คาร์บอน ซึ่งอาจมีประโยชน์ในการบำบัดสารมลพิษโดยชีววิธีในบริเวณที่มีการปนเปื้อนทั้งในดินและแหล่งน้ำ และโพรโทซัวในบ่อบำบัดน้ำเสียบึงทุ่งสร้าง เชื่อมโยงงานวิจัยทั้ง 3 เรื่องด้วยบทความ การประเมินคุณภาพแหล่งน้ำจืดด้วยสัตว์ ไม่มีกระดูกสันหลังหน้าดิน และท่านที่เคยสงสัยว่า กระดองของเต่ากับตะพาบน้ำ เหมือนกันหรือไม่ หากคำตอบได้ในวารสารฯ เล่มนี้ค่ะ

ขอเชิญทุกท่านส่งบทความและบทวิจัยมาอย่างต่อเนื่องนะคะ พบกันใหม่ ฉบับฉลองสงกรานต์ค่ะ

บรรณาธิการ

โมบายไอพี (Mobile IP)

บุญทรัพย์ iva คำ'

1) บทนำ

แนวโน้มราคาที่ถูกลงและความสามารถที่เพิ่มมากขึ้นเป็นปัจจัยที่ทำให้คอมพิวเตอร์กระเป๋ามีแนวโน้มการใช้งานมากขึ้น และกระจายตัวไปในผู้ใช้งานในหลายระดับ ไม่ว่าจะเป็น นักเรียน คนทำงาน นักธุรกิจ หรือแม้กระทั่งบุคคลทั่วไป ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดลักษณะการใช้งานที่หลากหลาย และไม่ถูกจำกัดด้วยสถานที่และเวลาในการใช้งาน เหมือนเครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะอีกต่อไป นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์อื่นๆ ที่สามารถให้ความสะดวกสบาย ไม่ว่าจะเป็นเพื่อการสื่อสาร การเรียน หรือความบันเทิง ได้แก่ พีดีเอ โทรศัพท์มือถือ และอุปกรณ์อื่นๆ ที่จะปรากฏขึ้นในอนาคต ทั้งนี้เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ที่ต้องการใช้อุปกรณ์เหล่านี้ได้ ทุกที่ ทุกเวลา จากลักษณะพิเศษที่อุปกรณ์เหล่านี้มีร่วมกัน คือ น้ำหนักเบาซึ่งทำให้ผู้ใช้สามารถนำติดตัวไปได้ทุกที่ และความสามารถในการเข้าถึงแหล่งข้อมูลขนาดใหญ่ที่สุด อย่างเช่น อินเทอร์เน็ตได้ อีกทั้งด้วยการทำงานแบบไร้สาย จึงทำให้การใช้งานในรูปแบบใหม่มีความเป็นไปได้มากขึ้น ที่ผู้ใช้สามารถใช้อุปกรณ์ในขณะที่เคลื่อนที่โดยไม่สูญเสียความต่อเนื่องในการติดต่อและเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตได้ตลอดเวลาการใช้งานรูปแบบใหม่นี้เรียกว่า อินเทอร์เน็ตเคลื่อนที่ หรือโมบายอินเทอร์เน็ต (Mobile

Internet) แต่ทั้งนี้อุปกรณ์ที่จะเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตได้จะต้องอาศัยเลขที่อยู่ที่เรียกว่า เลขที่อยู่ไอพี หรือ ไอพีแอดเดรส (IP Address) ซึ่งเป็นหมายเลขประจำอุปกรณ์ที่ไม่ซ้ำกัน และจะเปลี่ยนแปลงไปตามเครือข่ายที่อุปกรณ์นั้นเชื่อมต่อ เนื่องจากลักษณะการใช้งานอุปกรณ์แบบหิ้วของผู้ใช้ ที่ต้องการเคลื่อนที่จากเครือข่ายหนึ่งไปยังอีกเครือข่ายหนึ่งได้ตลอดเวลา ซึ่งจะทำให้เลขที่อยู่เปลี่ยนไปด้วยเพื่อสามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายใหม่ได้ แต่การทำเช่นนี้ทำให้เกิดปัญหาใหญ่ขึ้นมานั่นคือข้อกำหนดของชุดโพรโทคอลทีซีพีไอพี (TCP/IP) ณ ปัจจุบันที่ไม่สนับสนุนการรักษาการเชื่อมต่อกับเครือข่ายเดิมเมื่ออุปกรณ์เปลี่ยนเครือข่ายใหม่ ดังนั้นการสื่อสารใดๆที่กำลังดำเนินอยู่จะถูกตัดขาด เมื่อเลขที่อยู่เปลี่ยนไป การศึกษาเพื่อหาแนวทางในการแก้ไขปัญหาก็เพื่อรักษาการติดต่อในขณะที่เครื่องเปลี่ยนเครือข่ายเป็นหัวข้อที่อยู่ในความสนใจของผู้ศึกษาและนักวิจัยด้านเครือข่าย ซึ่งได้เรียกหัวข้อใหม่ว่า ไอพีเคลื่อนที่ หรือโมบายไอพี (Mobile IP)

2) แนวคิดของโมบายไอพี

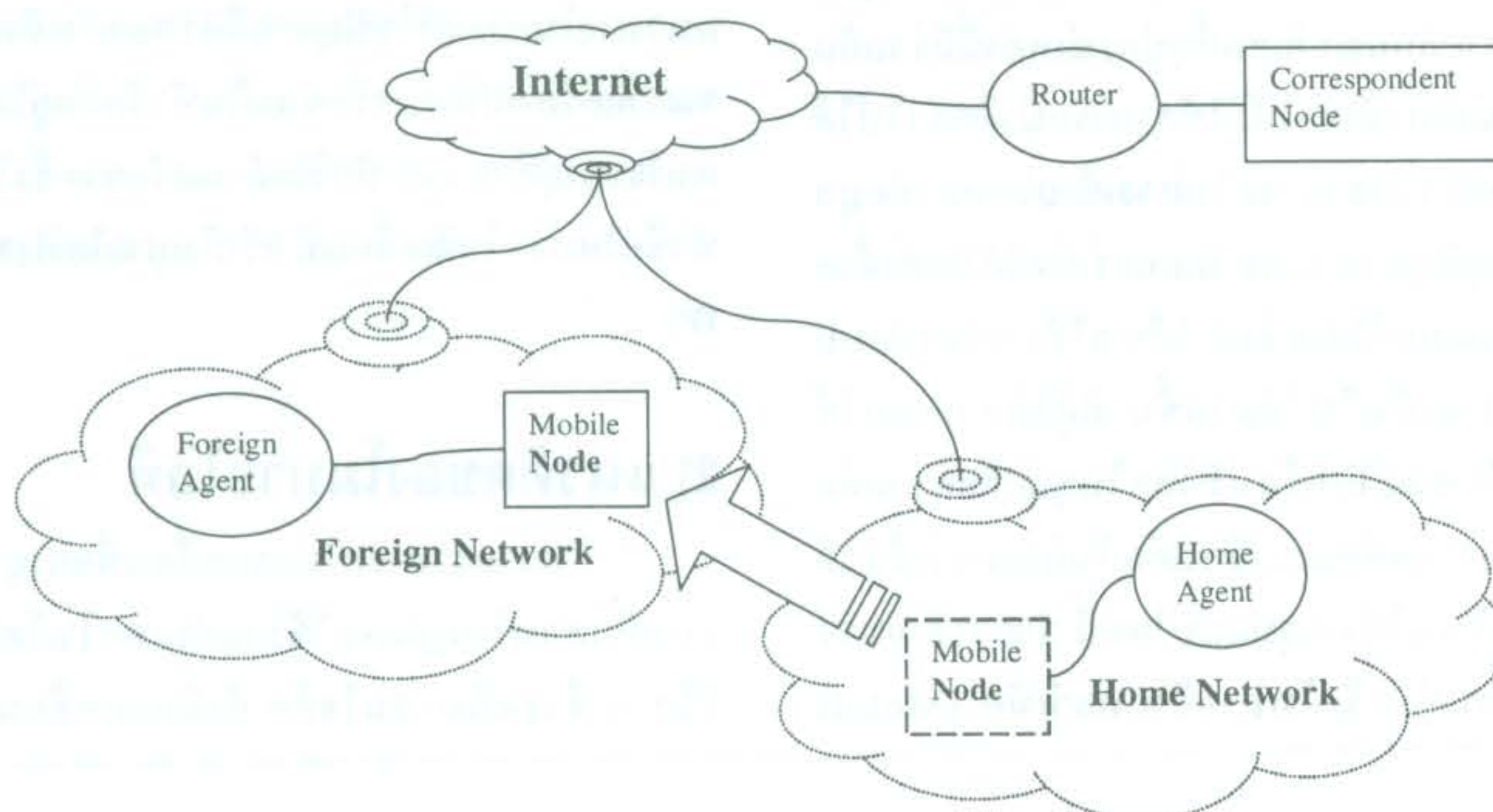
ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์แบบหิ้วส่วนใหญ่มักจะใช้ร่วมกับเทคโนโลยีแบบไร้สาย ซึ่งจุดที่น่าสนใจคือ ถ้ามีการเคลื่อนที่จาก

เครือข่ายเดิมไปยังเครือข่ายใหม่ เลขที่อยู่ไอพีของ โบบายโหนด (Mobile Node, MN) จะต้องเปลี่ยนไปด้วย และอุปกรณ์จัดเส้นทาง หรือเราเตอร์ (Router) ซึ่งทำหน้าที่ตัดสินใจจัดเส้นทางให้กับแต่ละกลุ่มข้อมูล หรือแพ็คเกจ (Packet) จะต้องบอกเส้นทางใหม่ที่จะส่งข้อมูลให้ถูกต้องตามเลขที่อยู่ไอพีของ โบบายโหนดที่เปลี่ยนใหม่ด้วย

โดยปกติเมื่อเลขที่อยู่ไอพีของ โบบายโหนดเปลี่ยนแปลงไป โบบายโหนดต้องสิ้นสุดการติดต่อเดิมทั้งหมดและเริ่มการติดต่อใหม่กับแม่ข่าย (Host) ที่เคยติดต่อผ่านเลขที่อยู่ไอพีใหม่ ซึ่งแม่ข่ายจะเข้าใจว่าเป็นการติดต่อมาจากโบบายโหนดใหม่ ดังนั้นเพื่อให้แม่ข่ายสามารถจดจำโบบายโหนดเดิมได้ต้องอาศัยบริการของดีเอ็นเอส (DNS - Domain Name Service) ซึ่งมีหน้าที่แปลงชื่อโดเมน (domain name) เป็นเลขที่อยู่ไอพีของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยดีเอ็นเอสจะต้องเปลี่ยนเลขที่อยู่ไอพีเดิมเป็นเลขที่อยู่ไอพีใหม่ของโบบายโหนดในฐานข้อมูลของดีเอ็นเอส นอกจากนี้ยังอาจต้องอาศัยการจัดเส้นทางแบบเจาะจงสำหรับเลขที่อยู่ของโบบายโหนด โดยใช้หลักการจับคู่ที่ยาวที่สุด (Longest match) ของเลขที่อยู่ไอพี แต่วิธีการนี้ก็ไม่สามารถ

นำไปใช้ทั้งอินเทอร์เน็ตได้เพราะ คาดว่าจะมีโบบายโหนดในอินเทอร์เน็ตเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะต้องใช้ตารางเส้นทาง (Routing table) ที่ใหญ่มาก และเพิ่มปริมาณข้อมูลเพื่อปรับปรุงตารางเส้นทางของ เราเตอร์ต่าง ๆ ที่อยู่ระหว่างเครือข่ายท้องถิ่น (Home Network) และเครือข่ายต่างถิ่น (Foreign Network) ซึ่งเป็นเหตุให้การจัดเส้นทางต้องใช้แบนด์วิดท์ (bandwidth) ที่สูงด้วย

จากรูปที่ 1 แสดงการย้ายเครือข่ายของโบบายโหนด โดยเริ่มแรกโบบายโหนดอยู่ในเครือข่ายท้องถิ่น และเชื่อมต่อเข้ากับอินเทอร์เน็ตผ่านตัวแทนท้องถิ่น (Home Agent, HA) จากนั้นโบบายโหนดได้เปลี่ยนตำแหน่งจากเครือข่ายท้องถิ่นไปยังเครือข่ายต่างถิ่น ซึ่งการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตต้องอาศัยตัวแทนต่างถิ่น (Foreign Agent, FA) แทนตัวแทนท้องถิ่น การเปลี่ยนเครือข่ายของโบบายโหนดทำให้เลขที่อยู่ไอพีของโบบายโหนดเปลี่ยนไปด้วย และถ้าโหนดอื่น (Correspondent Node, CN) ต้องการจะติดต่อกับโบบายโหนด เราจะมีวิธีการติดต่อได้อย่างไร และจะต้องจัดเส้นทางอย่างไร เพื่อให้โบบายโหนดยังได้รับข้อมูลการติดต่อเดิมอย่างต่อเนื่องและไม่ขาดการติดต่ออีกต่อไป



รูปที่ 1 แสดงการย้ายเครือข่ายของโบบายโหนด

3) สถาปัตยกรรมของโมบายไอพี

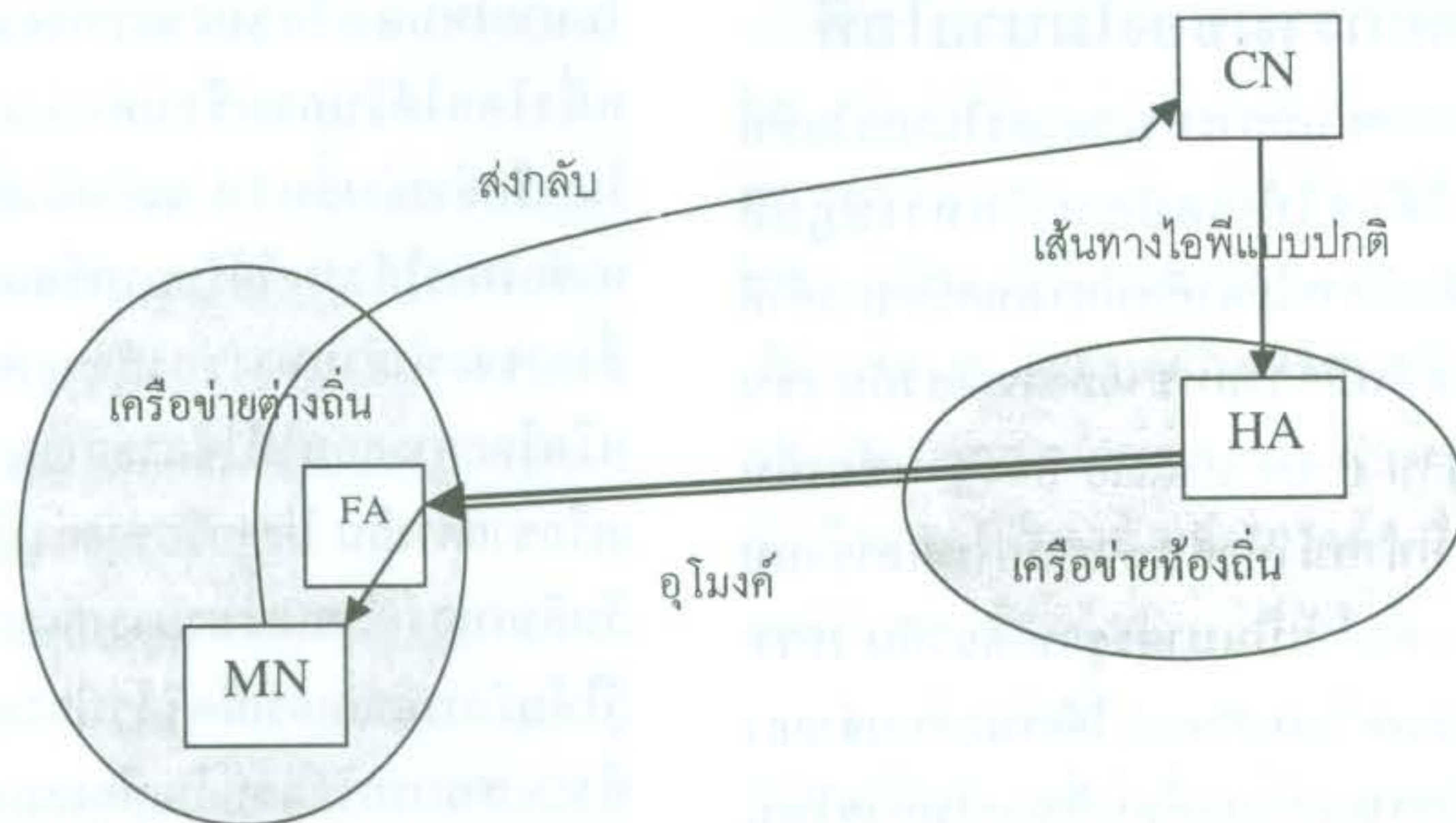
การออกแบบการทำงานของโมบายไอพีที่หลากหลายได้ก่อให้เกิดปัญหาในทางปฏิบัติหลายอย่าง ได้แก่ การใช้คำศัพท์ทางเทคนิคบางคำที่แตกต่างกันแต่กลับมีความหมายอย่างเดียวกัน เช่น คำว่า สถานีฐาน (base station) และฐานท้องถิ่น (home base) ที่ทำหน้าที่อย่างเดียวกันในหลายแบบจำลอง ดังนั้นเพื่อให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน IETF (Internet Engineer Task Force) ได้เสนอแบบจำลองพื้นฐานที่สนับสนุนการเคลื่อนที่ของโมบายโหนดบนอินเทอร์เน็ต ดังที่ปรากฏในเอกสาร RFC 3344 (Perkins, 2002) ซึ่งแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1) แบบจำลองพื้นฐาน (Basic Model)

แบบจำลองพื้นฐานได้อธิบายคำศัพท์ทางเทคนิค ได้แก่ โมบายโหนด (Mobile Node, MN) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ ซึ่งมีเลขที่อยู่ลงทะเบียนในเครือข่ายท้องถิ่น และจะได้รับการดูแลเลขที่อยู่ (Care of Address, COA) เมื่อเคลื่อนย้ายเข้าไปในเครือข่ายต่างถิ่น ตัวแทนท้องถิ่น (Home Agent, HA) เป็นอุปกรณ์พิเศษที่อยู่ในเครือข่ายท้องถิ่น ที่มีหน้าที่รับลงทะเบียนเลขที่อยู่ของ MN ตัวแทนต่างถิ่น (Foreign Agent, FA) เป็นอุปกรณ์พิเศษที่อยู่ในเครือข่ายต่างถิ่น ที่คอยให้บริการ โมบายโหนดที่เข้ามาเยี่ยมชม โดยการทำงานร่วมกับ HA โหนดอื่น (Corresponding Node, CN) อาจเป็นอุปกรณ์ที่เคลื่อนที่ได้หรืออยู่กับที่ ที่เชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต โดยจะแลกเปลี่ยนข้อมูลกับโมบายโหนด และอาจกำลังติดต่อกับโมบายโหนดหลายตัวพร้อมๆ กัน

โมบายโหนด หรือ MN จะท่องเที่ยวจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง โดยได้รับการเชื่อมต่อผ่านเครือข่ายต่างถิ่น ในเครือข่ายต่างถิ่น FA จะมีหน้าที่คอยช่วยเหลือเพื่อหาช่องทางให้ MN ได้รับการเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต ซึ่งอาจจะทำผ่านทางช่องสัญญาณวิทยุ อินฟราเรด หรือโดยการยอมให้ใช้สายสัญญาณต่อโดยตรงกับเครือข่ายต่างถิ่น โดยเครือข่ายต่างถิ่นจะต้องเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตและสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลกับผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตได้ เนื่องจากไม่มีข้อกำหนดที่ MN สามารถโต้ตอบกับเพียงสถานีเดียวในอินเทอร์เน็ตเท่านั้น เราจะใช้คำว่า โหนดอื่น หรือ CN แทนที่จะเป็นโหนดประจำสำหรับคู่ของ MN เมื่อ CN ต้องการส่งข้อมูลไปยัง MN จะห่อหุ้มข้อมูลในรูปแบบของ ไอพีแพ็คเกจโดยใช้เลขที่อยู่ของ CN เป็นต้นทาง (Source) และใช้เลขที่อยู่ถาวรหรือเลขที่อยู่ท้องถิ่นของ MN เป็นปลายทาง (Destination) แพ็คเกจที่เกิดจาก CN จะมาถึง MN โดยใช้การจัดเส้นทาง ไอพีแบบปกติไปยังอุปกรณ์พิเศษที่เรียกว่า ตัวแทนท้องถิ่น หรือ HA ดังรูปที่ 2

ในแง่ของโพรโทคอลจัดเส้นทางแล้ว HA จะทำหน้าที่เสมือนได้ติดต่อกับ MN โดยตรง นั่นคือเป็นส่วนหนึ่งของ อินเทอร์เน็ตเดียวกันที่อยู่ภายใต้ HA ดังนั้นเลขที่อยู่ท้องถิ่น (Home Address) ของ MN จะถูกกำหนดจากช่วงที่อยู่ของเครือข่ายย่อยของอินเทอร์เน็ตเสมือน โดยปกติ HA จะให้บริการกับ MN หลายๆ ตัวโดยจดจำตำแหน่งปัจจุบันของ MN แต่ละตัวที่ให้บริการ ค่าตำแหน่งนี้จะถูกเก็บในรูปแบบ COA ซึ่งเป็นเลขที่อยู่ของ FA ที่ให้บริการแก่ MN ในเครือข่ายต่างถิ่น เมื่อ HA ได้รับแพ็คเกจที่ส่งจาก CN ไปยัง MN จะมีการห่อหุ้มแพ็คเกจที่ได้รับในรูปแบบของ ไอพีแพ็คเกจใหม่ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 การทำอุโมงค์ติดต่อ (Huitema, 2000)

ต้นทาง=HA,ปลายทาง=COA, protocol=ไอพีในไอพี(4)	ต้นทาง=CN,ปลายทาง=MN, protocol=ทีซีพี	ส่วนหัวที่ซีพี + ข้อมูล
ส่วนหัวของไอพีแพกเก็ตใหม่	ไอพีแพกเก็ตเดิม	

รูปที่ 3 การห่อหุ้มแพกเก็ตของโมบายไอพี (Huitema, 2000)

ในส่วนหัวของไอพีแพกเก็ตใหม่ เลขที่อยู่ของ HA จะเป็นต้นทางและเลขที่อยู่ของ COA เป็นปลายทาง ส่วนข้อมูลของไอพีแพกเก็ตใหม่จะเป็นไอพีแพกเก็ตเดิมที่มี CN เป็นต้นทางและ MN เป็นปลายทางและส่วนของข้อมูลเดิมสำหรับค่าโปรโตคอลในแพกเก็ตใหม่จะระบุเป็น ไอพีในไอพี (IP in IP) ซึ่งก็คือ การทำอุโมงค์ของแพกเก็ต (Tunneling) นั่นเอง แพกเก็ตใหม่จะถูกส่งผ่านเครือข่ายไปยัง FA ได้ โดยที่เครือข่ายต่างถิ่น FA จะรู้จักเลขที่อยู่ของ COA และรู้ได้จากค่าโปรโตคอลว่าจะแกะแพกเก็ตที่ถูกห่อหุ้มที่ได้รับเพื่อให้ได้แพกเก็ตเดิมกลับมา ถ้า MN ยังไม่เคลื่อนที่ไปจากเครือข่ายต่างถิ่น FA ก็สามารถส่งแพกเก็ตไปยัง MN ได้ ในกรณีที่ MN ต้องการสื่อสาร

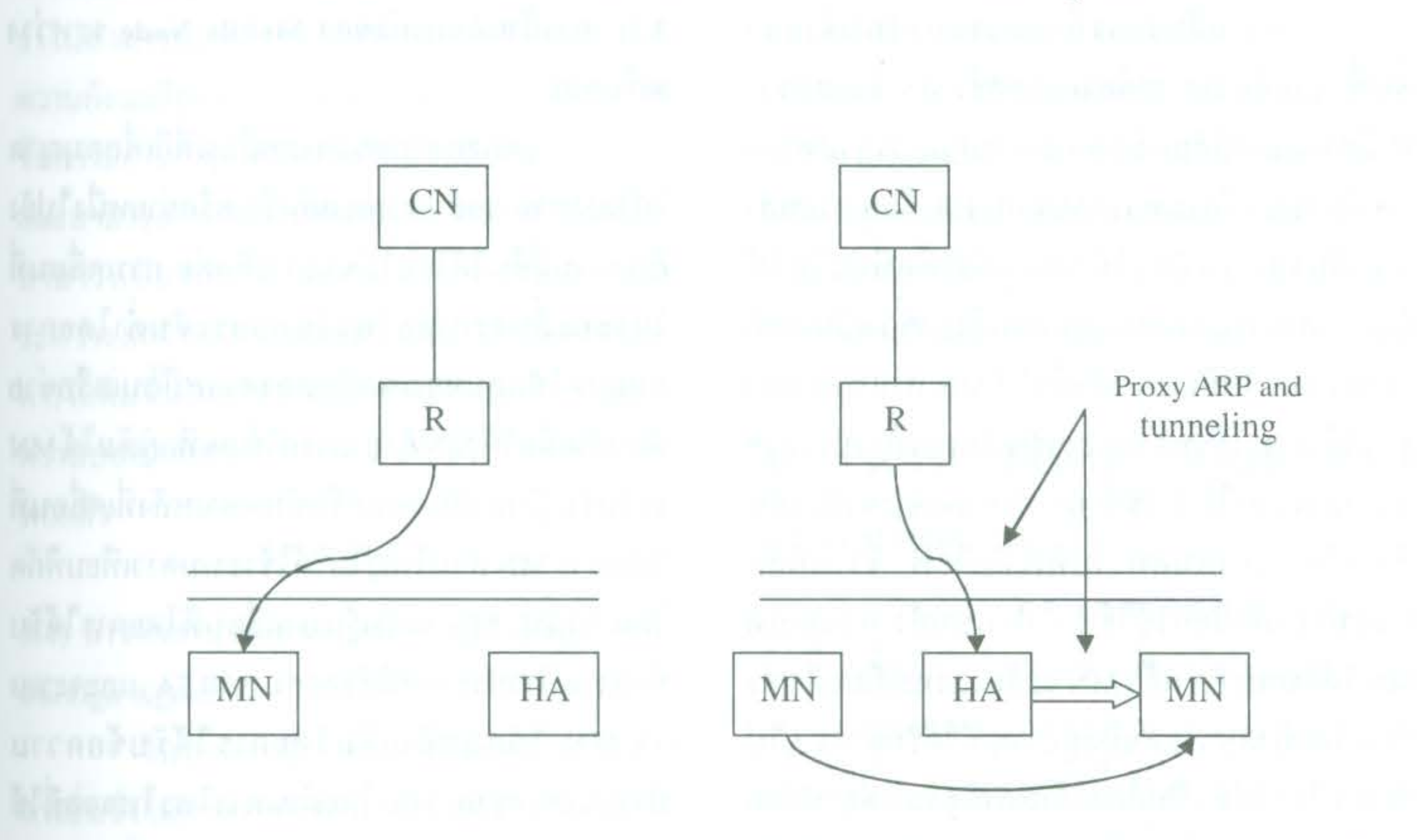
กับ CN MN จะห่อหุ้มไอพีแพกเก็ตที่ต้องการส่งด้วยเลขที่อยู่ต้นทางของตัวเองและเลขที่อยู่ปลายทางของ CN ซึ่งจะส่งไปยังที่สถานีฐานของเครือข่ายต่างถิ่น และถูกส่งต่อผ่านอินเทอร์เน็ตไปยัง CN ได้โดยอาศัยการจัดเส้นทางของไอพีแบบปกติ เส้นทางจาก MN ไปยัง CN เป็นระยะทางที่สั้นกว่าเส้นทางจาก CN ไปยัง MN ซึ่งจะต้องผ่าน HA เสมอ ในกรณีที่เลวร้ายที่สุด สมมุติ MN ซึ่งมีฐานอยู่ที่กรุงเทพฯ ได้ย้ายไปใช้งานที่นิวยอร์ก และต้องการสื่อสารกับ CN ที่กรุงเทพฯ ดังนั้นแพกเก็ตจาก CN ไปยัง MN จะต้องไปเดินทางไปกลับระหว่างกรุงเทพฯ กับนิวยอร์ก วิธีการที่ไม่สมมูลแบบนี้เรียกว่าการจัดเส้นทางแบบ dogleg (Perkins, 2002)

3.2) ความต้องการของแบบจำลองพื้นฐาน

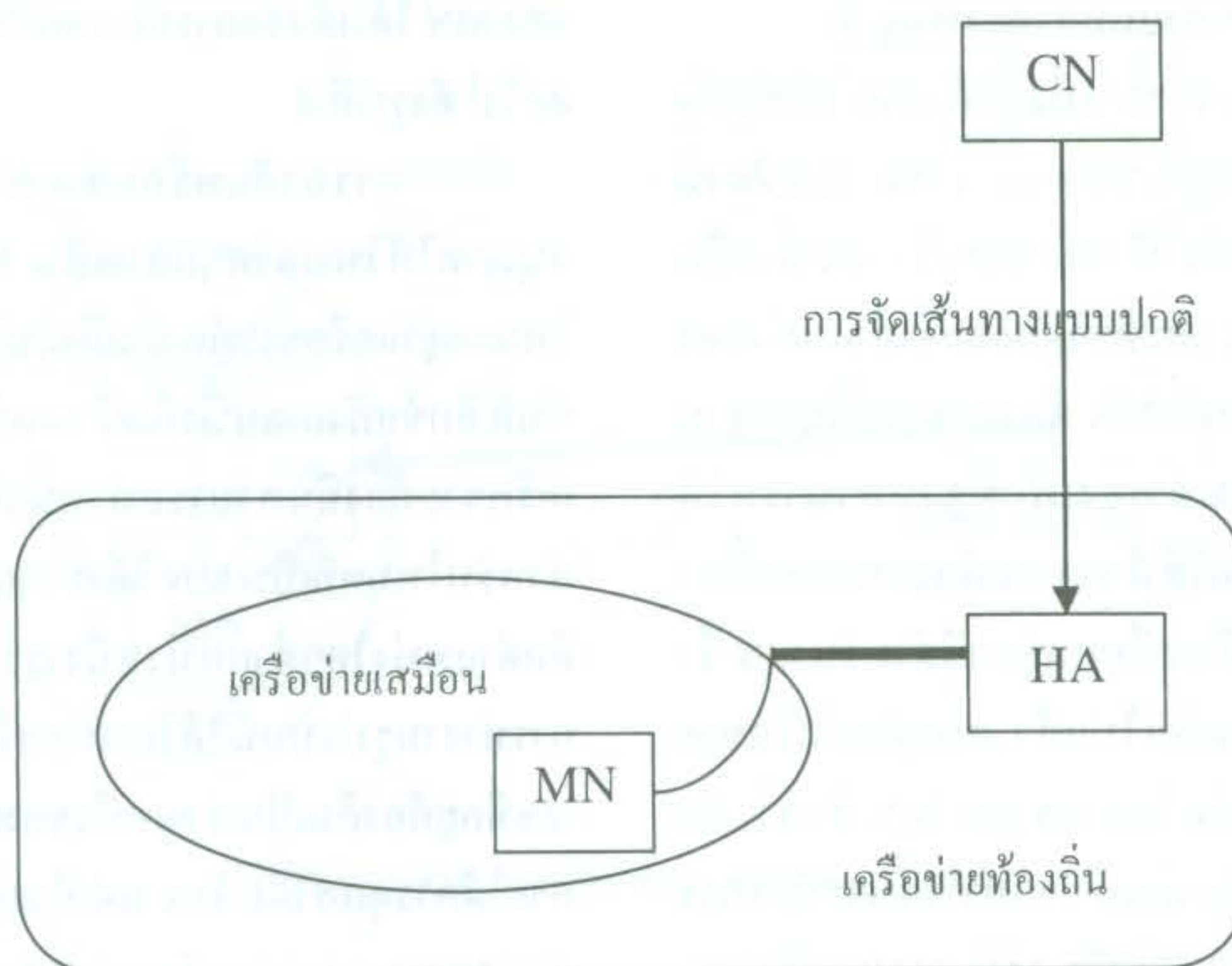
แบบจำลองก่อนหน้านี้ได้แสดงให้เห็นถึงความต้องการขั้นพื้นฐานหลายอย่าง เช่น HA ต้องมีความสามารถที่จะแจ้งให้ MN ทราบว่า HA นั้นเป็นเราเตอร์สำหรับ MN และต้องคอยจดจำตำแหน่งของ MN ไว้ด้วย นอกจากนี้ MN ต้องสามารถค้นหาฐานและต้องลงทะเบียนตัวเองเพื่อที่ฐานสามารถให้บริการส่งต่อแพคเกจได้ด้วยความต้องการเหล่านี้เราจะปล่อยให้ HA ทำตัวเสมือนพร็อกซีสำหรับ MN ซึ่งได้ออกจากตำแหน่งเดิมไปแล้ว สมมุติว่าเครือข่ายท้องถิ่นเป็นอีเทอร์เน็ต โดย HA และ MN สื่อสารกันได้ภายในเครือข่ายท้องถิ่นเดียวกัน ดังนั้นจะมีวิธีการติดต่อกันได้ 2 แบบ คือเมื่อ MN อยู่บนเครือข่ายท้องถิ่น MN จะได้รับแพคเกจโดยตรงจากเครือข่ายท้องถิ่นโดยไม่ผ่าน HA และเมื่อ MN อยู่ที่เครือข่ายต่างถิ่น HA จะตอบรับการร้องขอเลขที่อยู่จากเราเตอร์ R แทน MN โดยอาศัยพร็อกซีเออาร์พี (Proxy ARP) (Perkins, 2002)) และจะตรวจจับแพคเกจที่เป็น

ของ MN ได้แล้วจัดการกับแพคเกจที่จะส่งไปยัง MN ต่อไป ดังรูปที่ 4

การอาศัยพร็อกซีเออาร์พีมีข้อดีคือการอนุญาตให้โหนดใดๆกลายเป็น MN ได้ ในขณะที่ถ้าโหนดอยู่ที่เครือข่ายท้องถิ่นก็จะทำตัวเป็นโหนดที่อยู่กับที่ อีกข้อสังเกตหนึ่งคือเราเตอร์ใดๆที่เชื่อมต่อกับเครือข่ายท้องถิ่นสามารถทำหน้าที่ในฐานะ HA ได้ สำหรับโหนดที่เป็น MN ได้จริงๆและมีลักษณะไม่อยู่ติดตำแหน่งใดๆตำแหน่งหนึ่งเราสามารถสนับสนุนการทำงานรูปแบบนี้ได้โดยการสร้างเครือข่ายเสมือนเลขที่อยู่ท้องถิ่นเป็นส่วนหนึ่งของเครือข่ายย่อยซึ่งอยู่ภายใต้การดูแลโดย HA แต่เป็นเครือข่ายย่อยที่ไม่มีลักษณะทางกายภาพจริง แต่อาศัยความสามารถของ HA ที่จะประกาศให้ MN ได้ทราบผ่านทางโพรโทคอลจัดเส้นทางอย่างเช่น โอเอสพีเอฟ (OSPF) (Moy, 1991) หรือ อาร์ไอพี (RIP) (Malkin, 1998) ทุกโหนดจะสื่อสารถึงกันได้เสมือนว่า HA เป็นประตูผ่านไปยังอีเทอร์เน็ตเสมือน ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 การทำอุโมงค์และพร็อกซีเออาร์พี (Huitema, 2000)



รูปที่ 5 การสื่อสารระหว่าง HA กับ MN ภายในเครือข่ายเสมือน (Huitema, 2000)

ความต้องการอีกอย่างของแบบจำลองขั้นพื้นฐานคือ HA จะต้องคอยจดจำ MN ซึ่งแสดงว่า จะมีการแลกเปลี่ยนข้อความควบคุมต่างๆ ระหว่าง FA กับ HA หรือระหว่าง MN กับ HA ข้อความเหล่านี้จะต้องถูกปกป้องให้ปลอดภัยเพื่อที่จะไม่ให้ผู้บุกรุกสามารถส่งเลขที่อยู่ปลอมซึ่งบ่งชี้ว่าเป็นเลขที่อยู่ของ MN ไปยัง HA ได้ เพื่อให้ MN สามารถค้นหาฐานได้เราจะใช้โปรโทคอลสำหรับการป่าวประกาศซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธีคือการกำหนดเจาะจงที่ระดับสื่อ หรือการกำหนดทั่วไปที่ระดับไอพี ซึ่งในที่สุดคณะทำงานก็เลือกใช้วิธีทั่วไปแบบหลัง หลังจาก MN ได้ค้นพบ FA แล้ว MN จะต้องลงทะเบียนตัวเองก่อน โดยที่ MN ส่งเลขที่อยู่ COA ที่ได้รับจาก FA ไปยัง HA โดยไม่จำเป็นต้องแจ้งสถานี่ฐาน แต่จะปล่อยให้ HA เป็นหน้าที่ของ HA ที่จะส่งแพ็คเกจที่ถูกห่อหุ้มไปยังฐาน ซึ่งจะแกะแพ็คเกจออกแล้วถึงส่งกลับไปยัง HA โดยอาศัยการจัดเส้นทางแบบปกติ

3.3) การย้ายตำแหน่งของ Mobile Node ระหว่างเครือข่าย

จุดมุ่งหมายของการเคลื่อนที่ก็เพื่ออนุญาตให้ MN สามารถย้ายจากเซลล์หรือเครือข่ายหนึ่งไปยังอีกสถานที่อื่นได้โดยไม่ขาดการติดต่อ การเคลื่อนที่ในระยะสั้นจะอาศัยโปรโทคอลระดับต่ำโดยการอนุญาตให้กลุ่มของเซลล์แสดงตนเสมือนเครือข่ายเดียวกันเพื่อให้ MN ยังสามารถใช้เลขที่อยู่เดิมได้ MN จะไม่รับรู้ถึงลำดับของเครือข่ายก่อนหลังที่เคลื่อนที่ไปเพราะ MN ส่วนใหญ่ไม่ได้ใช้ระบบดาวเทียมพิภคโลก ดังนั้น MN จะรับรู้การเคลื่อนที่โดยการได้รับข้อความป่าวประกาศที่ส่งออกมาจาก FA และจะพบว่า MN ได้กลับถิ่นเดิมโดยการได้รับข้อความป่าวประกาศจาก HA โดยผ่านทางโปรโทคอลที่ใช้ป่าวประกาศ MN สามารถค้นพบเลขที่อยู่ระดับไอพีและเลขที่อยู่ระดับสื่อของ FA ใหม่ ซึ่ง MN ต้องลงทะเบียนกับ FA ใหม่ก่อนถึงจะได้รับเลขที่อยู่

COA และได้ตอบรับการส่งต่อแพ็คเกจของ MN จากนั้น MN จะติดต่อไปยัง HA ให้ทราบถึง COA ใหม่ ซึ่งในที่สุดแพ็คเกจต่างๆจะได้รับการส่งต่อผ่านฐานใหม่ อย่างไรก็ตามเราต้องสนใจแพ็คเกจที่กำลังเดินทางอยู่ระหว่าง HA และฐานเดิมด้วย ถ้าเซลล์ครอบคลุมพื้นที่แคบๆเพียงพอที่ MN จะยังคงรับฟังสัญญาณจากฐานเดิมได้และอาจจะยังได้รับแพ็คเกจเหล่านี้ได้อย่างครบถ้วน ถึงอย่างไรการย้ายเซลล์อาจหมายถึงการเปลี่ยนความถี่ใหม่ การที่ MN เคลื่อนที่เร็วขึ้น หรือสัญญาณของฐานใหม่อาจมีกำลังแรงกว่าฐานเดิมมาก โดยทั่วไปแล้วเราสามารถสันนิษฐานได้ว่าแพ็คเกจที่ไม่ได้จัดเส้นทางไปยัง FA ใหม่จะไม่ถึงปลายทาง

ข้อกำหนดของโมบายไอพีรุ่นแรกๆได้รวมขั้นตอนการกำหนดทิศทางใหม่ไว้ด้วย MN จะเก็บรายการของ FA ที่เข้าเยี่ยมชมล่าสุดและจะแจ้งเลขที่อยู่ของตัวเองให้ FA เหล่านั้นทราบด้วย แต่ขณะทำงานไม่สามารถตกลงกันในการกำหนดทิศทางใหม่เพราะว่าไม่สามารถลดความเสี่ยงของการเกิดลูปได้และความกังวลเรื่องความปลอดภัย ซึ่งผู้บุกรุกสามารถส่งข้อความการกำหนดทิศทางใหม่ไปยัง FA ณ ปัจจุบัน และสามารถดักจับการสัญจรของ MN ได้ สิ่งเหล่านี้สามารถป้องกันได้โดยการตั้งค่าความปลอดภัยระหว่าง MN กับ FA แต่ละตัว แต่ทำให้เกิดความต้องการที่เพิ่มขึ้นโดยไม่จำเป็น ส่วนใหญ่แล้วการตั้งค่าความปลอดภัยระหว่าง MN กับ FA เท่านั้นก็เพียงพอแล้ว

3.4) การทำงานของ Mobile Node เมื่อปราศจาก Foreign Agent

ในบางกรณี MN อาจติดต่อกับเครือข่ายต่างถิ่นซึ่งไม่สามารถทำงานสอดคล้องกับข้อกำหนดของโมบายไอพี (Mobile IP) และไม่ได้สนับสนุนการทำงานของ FA ถึงกระนั้น MN อาจรับการเชื่อมต่อโดยอาศัยโปรโตคอลอย่างดีเอชซีพี (DHCP) หรือ

พีพีพี (PPP) เพื่อได้รับเลขที่อยู่ไอพีชั่วคราวจากเครือข่ายต่างถิ่น MN สามารถใช้เลขที่อยู่ชั่วคราวนี้เป็นเลขที่อยู่ COA ชั่วคราวของตัวเอง ซึ่งสามารถทำงานเสมือน FA ได้ แพ็คเกจที่ส่งโดย HA จะผ่านอุโมงค์ไปยัง MN การทำที่ไม่ครบถ้วนแบบนี้ของโมบายไอพีมีข้อกังวลบางอย่าง ได้แก่ การส่งผ่านอุโมงค์ไปยัง MN ไม่มีประสิทธิภาพเมื่อจุดเชื่อมต่อสุดท้ายของการส่งเป็นจุดเชื่อมแบบวิธyclื่นแคบแต่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพมากกว่านี้สำหรับ FA ถ้าสามารถตัดขั้นตอนการส่งผ่านอุโมงค์ออกก่อนที่จะมีการส่งข้อมูลไปยังปลายทาง การจองเลขที่อยู่ไว้สำหรับโมบายโหนดที่จะย้ายเข้ามาชั่วคราวนั้นหมายถึงมีอัตราการใช้งานเลขที่อยู่ที่สูงกว่าปกติ ดังนั้นจึงอาจทำให้จำนวนของเลขที่อยู่ไอพีหมดอย่างรวดเร็ว อีกทั้งการอาศัย MN ทำหน้าที่แทน FA หมายความว่า FA จะหายตัวไปจากอินเทอร์เน็ตเมื่อมีการย้ายไปตำแหน่งใหม่ของ MN ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญหายของแพ็คเกจเป็นจำนวนมากที่อยู่ระหว่างการส่ง ด้วยเหตุผลเหล่านี้ MN ควรพยายามค้นหา FA ก่อน ถึงแม้ว่าจะสามารถได้รับเลขที่อยู่ในเครือข่ายต่างถิ่นมาแล้วก็ตาม อย่างไรก็ตามการทำงานในลักษณะนี้จะใช้ได้ดีเมื่อจุดสุดท้ายเป็นจุดเชื่อมต่อที่มีความเร็วสูงเช่นเครือข่ายท้องถิ่นแบบมีแบนด์วิดท์สูง หรือเมื่อ MN ต้องทำงานเป็นเวลานานในเครือข่ายต่างถิ่น

4) แนวทางในการพัฒนาแบบจำลองพื้นฐาน

การปรับปรุงโมบายไอพีให้ดีขึ้นจะเกิดในรุ่นที่สูงขึ้นไป การทำเช่นนี้จะทำให้โมบายไอพีมีความทนทาน ประสิทธิภาพ และความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น แบบจำลองพื้นฐานได้นิยามการส่งข้อความระหว่างตัวแทนตัวหนึ่งกับโมบายโหนดอีกตัวหนึ่ง วิธีการนี้ไม่ค่อยจะทนทานต่อความผิดพลาดที่เรียกว่า ความล้มเหลวแบบจุดเดียว (Single Point

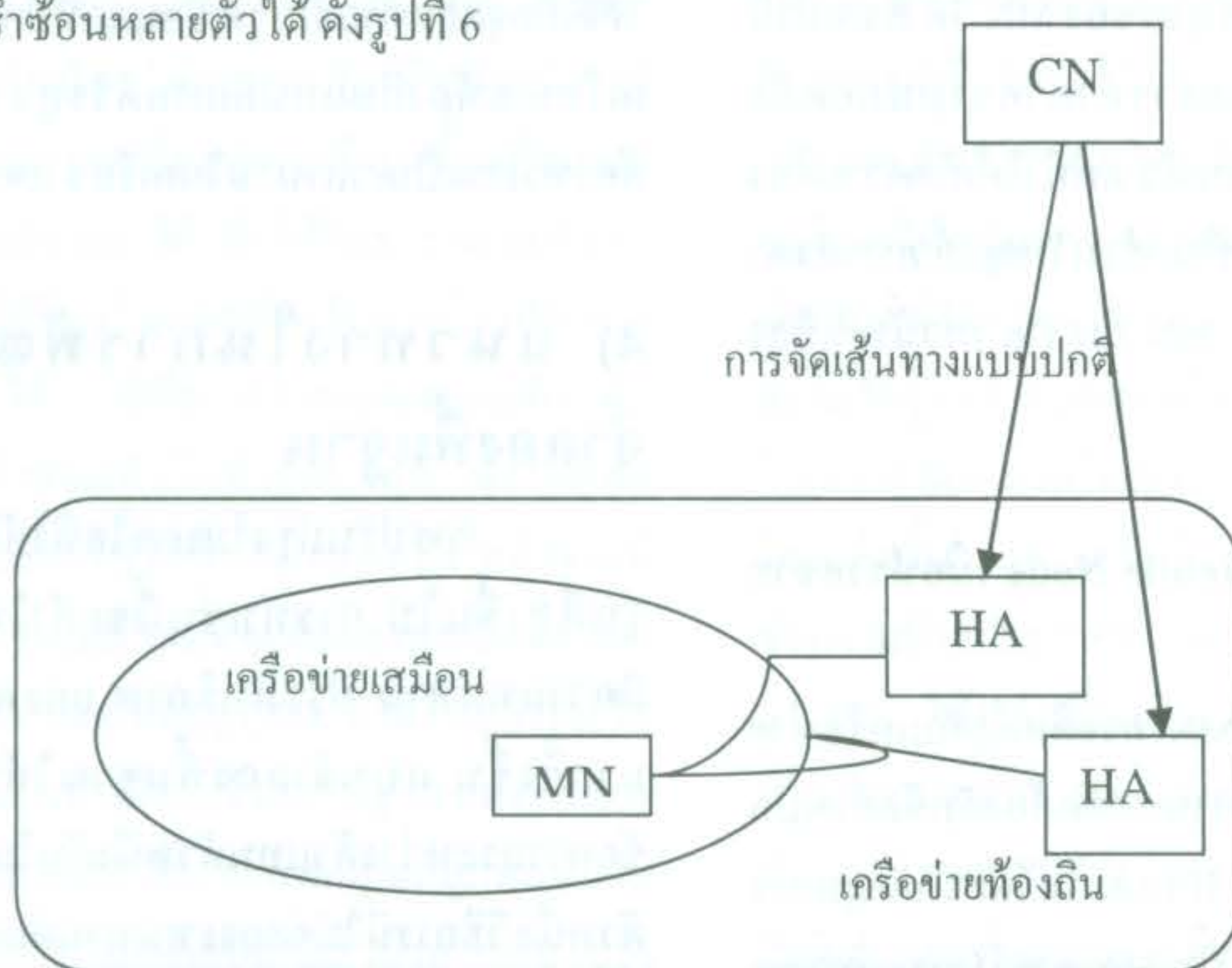
Failure) เนื่องจาก HA มีแค่ตัวเดียวในแบบจำลองดังกล่าว แต่เราสามารถแก้ไขแบบจำลองให้ดีขึ้นได้ โดยเพิ่มจำนวน HA ให้มากกว่าหนึ่ง หรือโดยการกระจายหน้าที่ต่างๆ ไปยังส่วนของเครือข่ายแทน แต่อย่างไรก็ตามวิธีเหล่านี้ยังไม่มีประสิทธิภาพมากนัก เพราะว่าการเปลี่ยนแปลงใดๆ ของฐานในเครือข่ายท้องถิ่นต้องรายงานการย้ายเครือข่ายของ MN กลับไปยัง HA เสมอ แต่เนื่องจากเราสามารถรวมกลุ่มของฐานให้เป็นคลัสเตอร์เพื่อลดจำนวนการรายงานได้ ดังนั้นถ้ามีการย้ายของโมบายโหนดจากคลัสเตอร์หนึ่งไปยังอีกคลัสเตอร์หนึ่งถึงจะรายงานการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวไปยัง HA

4.1) การทำงานของ Home Agent หลายตัว

แบบจำลองของ HA ตัวเดียวมีข้อดีคือการนำไปใช้งานง่าย แต่ข้อเสียคือความไม่ทนทานต่อความผิดพลาด อย่างเช่น ถ้า HA ตัวเดียวล้มเหลวจะทำให้โหนดอื่นที่อยู่ในอินเทอร์เน็ตไม่สามารถเข้าถึง MN ได้ ทั้งนี้โดยการพิจารณาแบบจำลองพื้นฐานที่ใช้รูปแบบอินเทอร์เน็ตเสมือน ถ้าอินเทอร์เน็ตเสมือนมีลักษณะทุกอย่างเหมือนอินเทอร์เน็ตจริง เราจะสามารถติดตั้ง HA ที่ซ้ำซ้อนหลายตัวได้ ดังรูปที่ 6

ในกรณีปกติ ถ้าเราเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งล้มเหลว โพรโทคอลจัดเส้นทางสามารถส่งข้อมูลต่างๆ ไปปรับปรุงตารางเส้นทางของเราเตอร์ตัวอื่นๆ อย่างรวดเร็ว แต่ถ้าเราลอกเลียนแบบดังกล่าวโดยการเพิ่ม HA หลายตัวที่จะไปยังอินเทอร์เน็ตเสมือน เราก็จะพบปัญหาของวิธีการส่งข้อความลงทะเลเบียนไปยัง HA ต่างๆ เพราะข้อความลงทะเลเบียนอนุญาตให้มีเลขที่อยู่ของ HA ได้เพียงหมายเลขเดียวเท่านั้น

ปัญหาแบบนี้มีลักษณะคล้ายการทำงานของโพรโทคอล OSPF ที่มีรูปแบบการทำงานหลายรูปแบบที่แตกต่างกันได้ ซึ่งเราสามารถนำมาใช้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับการทำงานของ HA หลายตัวในโมบายไอพี ดังนั้นกลุ่มของ HA อาจจะเลือกตั้ง HA ออกมาหนึ่งตัวเพื่อเป็น HA หลักที่ทำหน้าที่แทน HA ตัวอื่นๆ HA หลักจะรับผิดชอบที่ดักจับแพคเกจที่ส่งไปยัง เลขที่อยู่ของ HA ตัวเดิม และจะคอยปรับปรุงข้อมูลตำแหน่งของโมบายโหนดที่เปลี่ยนไปลงในฐานข้อมูลประพจน์ที่ของเครือข่ายนั้นๆ ข้อมูลนี้จะถูกส่งไป HA ทุกตัวที่อยู่ในพื้นที่เดียวกัน เพื่อให้ HA ทุกตัวรับรู้ตำแหน่งของ MN และสามารถตรวจจับ



รูปที่ 6 การทำงานของโมบายไอพีเมื่อมี HA หลายตัว (Huitema, 2000)

ข้อมูลไปส่งไปยัง MN และส่งข้อมูลผ่านอุโมงค์ไปยังตัวแทนใดๆได้แบบจำลองของโมบายไอพีรุ่นแรกๆ ได้รวมแนวคิดเรื่องเครือข่ายย่อยเสมือนและ HA หลายตัวไว้ด้วย

4.2) กลัสเตอร์ของ Foreign Agent

เหตุผลหลักที่เราต้องการสนับสนุนการรวมกลุ่มของตัวแทน (Agent Clustering) เพื่อสนับสนุนการทำงานในลักษณะการรักษาการเชื่อมต่อในขณะที่กำลังปั่นจักรยานไปบนทางเดิน ลองนึกภาพถึงมหาวิทยาลัยที่ใหญ่ที่มีทางเดินเล็กๆระหว่างตึกเรียนมากมายและมีนักเรียนชาวลาวคนหนึ่งได้มาเยี่ยมเยือนที่มหาวิทยาลัยขอนแก่น เขาพกคอมพิวเตอร์แบบหิ้วมาด้วยในกระเป๋าสะพาย ในขณะที่เขาขี่จักรยาน คอมพิวเตอร์ของเขาก็กำลังรับข่าวสารล่าสุดจากประเทศลาวผ่านไอพีบนอินฟราเรดการสื่อสารทางอินฟราเรดมีระยะสั้นเพียง 3 เมตร ดังนั้นทุกๆ 3 เมตรต้องเปลี่ยนการเชื่อมต่อไปยังเซลล์ใหม่เสมอ ถ้าเราอาศัยแบบจำลองพื้นฐานอย่างเดียวเราจะสังเกตว่าเราต้องเริ่มการเชื่อมระหว่างจักรยานและฐานในประเทศไทย และ HA ในประเทศลาวทุกๆ 3 เมตร ซึ่งเราไม่อยากจะเกิดภาพการทำงานเช่นนั้น

อย่างไรก็ตามมีแนวคิดที่สามารถแก้ปัญหานี้ได้ สมมุติว่าแทนที่จะกำหนดให้เลขที่อยู่ของ COA หนึ่งหมายเลขสัมพันธ์กับเลขที่อยู่ของตัวแทนหนึ่งหมายเลขเท่านั้น เราอาจใช้เลขที่อยู่พิเศษของ COA ที่ทำหน้าที่เป็นเลขที่อยู่ของตัวแทนทุกตัวในพื้นที่นั้น และให้ตัวแทนทุกตัวสามารถส่งแพคเกจต่อไปยัง MN ได้ ในกรณีนี้เราไม่จำเป็นต้องแจ้ง HA ให้ทราบถึงการเปลี่ยนตำแหน่งตราใบใดที่โมบายโหนดยังคงอยู่ในบริเวณพื้นที่เดียวกัน การทำงานเช่นสามารถเกิดขึ้นได้ ถ้าเราเตอร์ที่อยู่ในพื้นที่เดียวกันจัดเส้นทางโดยอาศัยโปรโตคอล OSPF ซึ่งเราสามารถออกแบบระเบียบสถานะของจุดเชื่อมต่อใหม่ (New Link State

Record) ที่บอกตำแหน่งของหน่วยเครื่องที่ได้ไม่ยากนัก ค่าของระเบียบนี้จะส่งไปทุกทิศทางทุกครั้งที่หน่วยเคลื่อนที่เปลี่ยนฐาน ผลกระทบของการปรับปรุงโปรโตคอลอาจต้องใช้เวลาในการศึกษา โดยต้องคำนึงถึงว่า HA ยังคงได้รับข้อความที่บอกตำแหน่งอยู่ตลอดเวลา และปัญหาเรื่องหมายเลขประจำของหน่วยเคลื่อนที่ที่สามารถตรวจสอบได้โดย HA ในแบบจำลองพื้นฐาน

5) อนาคตของโมบายไอพี

ณ ปัจจุบัน เป็นแค่การเริ่มต้นของการคำนวณแบบเคลื่อนที่ (Mobile Computing) ส่วนต่อเติมของไอพีสำหรับการเคลื่อนที่กำลังได้รับการพัฒนาไปสู่ความเป็นมาตรฐาน และได้เริ่มนำไปใช้งานจริงได้แล้วบางส่วน ได้มีการเปิดให้บริการข้อมูลไร้สายในพื้นที่กว้างๆมากขึ้น ดังนั้นเทคโนโลยีดังกล่าวจึงมีความเป็นไปได้มาก นอกจากนี้ผู้เชี่ยวชาญหลายคนเชื่อว่าคอมพิวเตอร์ในอนาคตส่วนใหญ่จะกลายเป็นคอมพิวเตอร์เคลื่อนที่ โปรโตคอล ณ ปัจจุบันถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อให้ใช้งานได้กับอินเทอร์เน็ตที่อยู่กับที่ เพื่อที่จะได้ใช้ประโยชน์ของการเคลื่อนที่ที่เราต้องปรับปรุงโปรโตคอลจัดเส้นทางเพื่ออนุญาตให้มี HA หลายตัวและมีกลุ่มของฐานหลายกลุ่ม อีกทั้งต้องมีการเพิ่มความปลอดภัยให้อินเทอร์เน็ตเพื่อให้ MN ได้รับความไว้วางใจมากขึ้น การปรับปรุงให้ดีขึ้นเหล่านี้อาจได้มาจากการเปลี่ยนไปใช้ไอพีรุ่นหกซึ่งจะมีส่วนสนับสนุนที่ครอบคลุมทั้งการเคลื่อนที่และความปลอดภัย

ปัญหาบางอย่างที่มีผลกระทบมากสำหรับทีซีพี ที่ถูกจำกัดโดยสภาพแวดล้อมของการเคลื่อนที่ อาจต้องแก้ไขให้สำเร็จคือ ทีซีพีได้รวมขั้นตอนวิธีสำหรับการคำนวณการหน่วงเวลาหรือการหลีกเลี่ยงความแออัดไว้ ซึ่งพยายามคาดการณ์ประสิทธิภาพของการติดต่อและการหน่วงเวลาการขนส่งจาก

เกณฑ์วัดที่ผ่านมา ในทางตรงกันข้ามประสิทธิภาพ และการหน่วงเวลาอาจแตกต่างกันอย่างมากในสถานะของการเคลื่อนที่ การท่องเที่ยวจากเซตหนึ่งไปยังที่อื่นๆเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการขาดการติดต่อแบบชั่วคราวบ่อยๆ ทีซีพีจะตอบสนองโดยการลดอัตราการส่งให้ต่ำที่สุด หลังจากการติดต่อได้ถูกสร้างขึ้นใหม่ อัตราการส่งจึงจะเพิ่มขึ้นแต่เพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้าลง ถ้าทีซีพีไม่สามารถสร้างการติดต่อใหม่ได้เร็วเพียงพอ ก็จะเกิดความเสี่ยงที่การติดต่อต้องหยุดลง การนำโมบายไอพีไปใช้งานเป็นเพียงขั้นตอนแรกเท่านั้น ถ้าจะให้โมบายไอพีใช้งานได้ดีขึ้นเราจำเป็นต้องปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงขั้นตอนวิธีของการควบคุมการขนส่งของทีซีพีตามไปด้วย

บรรณานุกรม

- ณัฐศุภางค์ ปิตะตาพันธ์. (2545). โมบายไอพี. ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบโทรคมนาคม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บุญทรัพย์ ไวกำ. (2548). การเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ต. คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- Huitema, C. (2000). Routing in the Internet. 2nd ed. Singapore: Prentice Hall. p.309-331.
- Malkin, G. (1998). RIP Version 2. RFC 2453. Massachusetts: Bay Networks.
- Moy, J. (1991). OSPF Version 2. RFC 1247. Massachusetts: Proteon Inc.
- Perkins, C. (2002). IP Mobility Support for IPv4. RFC 3344. California: Nokia Research Center.
- Postel, J. (1981). Internet Protocol. RFC 791. California: Information Sciences Institute.



การหารลงตัวของ $x^n - y^n$ ด้วย $x - y$

มิตรี กระพีแแดง¹

บทความนี้เป็นเรื่องเกี่ยวกับการหารลงตัว ซึ่งคือ $(x - y)|(x^n - y^n)$ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็มบวกและ x, y เป็นจำนวนเต็มใดๆ โดยที่ $x \neq y$ ซึ่งตอนแรกเริ่มด้วยการแทนค่าจำนวนเต็มใดๆ ตามเงื่อนไขที่กำหนด เติมลงในตารางที่ 1 ตอนต่อไปแสดงภาพประกอบการ $(x - y)|(x^n - y^n)$ เมื่อ $n = 2, 3$ ตอนที่ 3 ใช้การแยกตัวประกอบช่วยในการพิจารณา $(x - y)|(x^n - y^n)$ เมื่อ $n = 2, 3, 4, 5$ และตอนสุดท้ายเป็นการแสดงการพิสูจน์ $(x - y)|(x^n - y^n)$ ให้เห็นจริง บทความนี้จึงแบ่งเป็น 4 ตอน

ความรู้พื้นฐาน

ทฤษฎีบท* กำหนดให้ a, b, c เป็นจำนวนเต็มใดๆ ถ้า $c|a$ และ $c|b$ แล้ว $c|(a + b)$

เนื้อหา

ตอนที่ 1 ให้ผู้อ่านหา จำนวนเต็ม x, y มาเติมลงไปโดยเติมลงในช่องว่างในตารางที่ 1 แล้วตรวจสอบดูว่าเมื่อแทนค่าตามเงื่อนไขที่กำหนดแล้ว จะพบว่า $(x - y)|(x^n - y^n)$ เป็นจริงหรือไม่เป็นจริง

ตารางที่ 1

x	y	$x - y$	$x^2 - y^2$	$\frac{x^2 - y^2}{x - y}$	$x^3 - y^3$	$\frac{x^3 - y^3}{x - y}$	$x^4 - y^4$	$\frac{x^4 - y^4}{x - y}$
12	7	5	95	19	1385	277	18335	3667
19	2	17	357		6851		130305	
12	-3	15	135		1755		20655	
-11	8	-19	57	-3	-1843			
-19	-4	-15						

สามารถใช้เครื่องคำนวณช่วยในการหาค่าได้

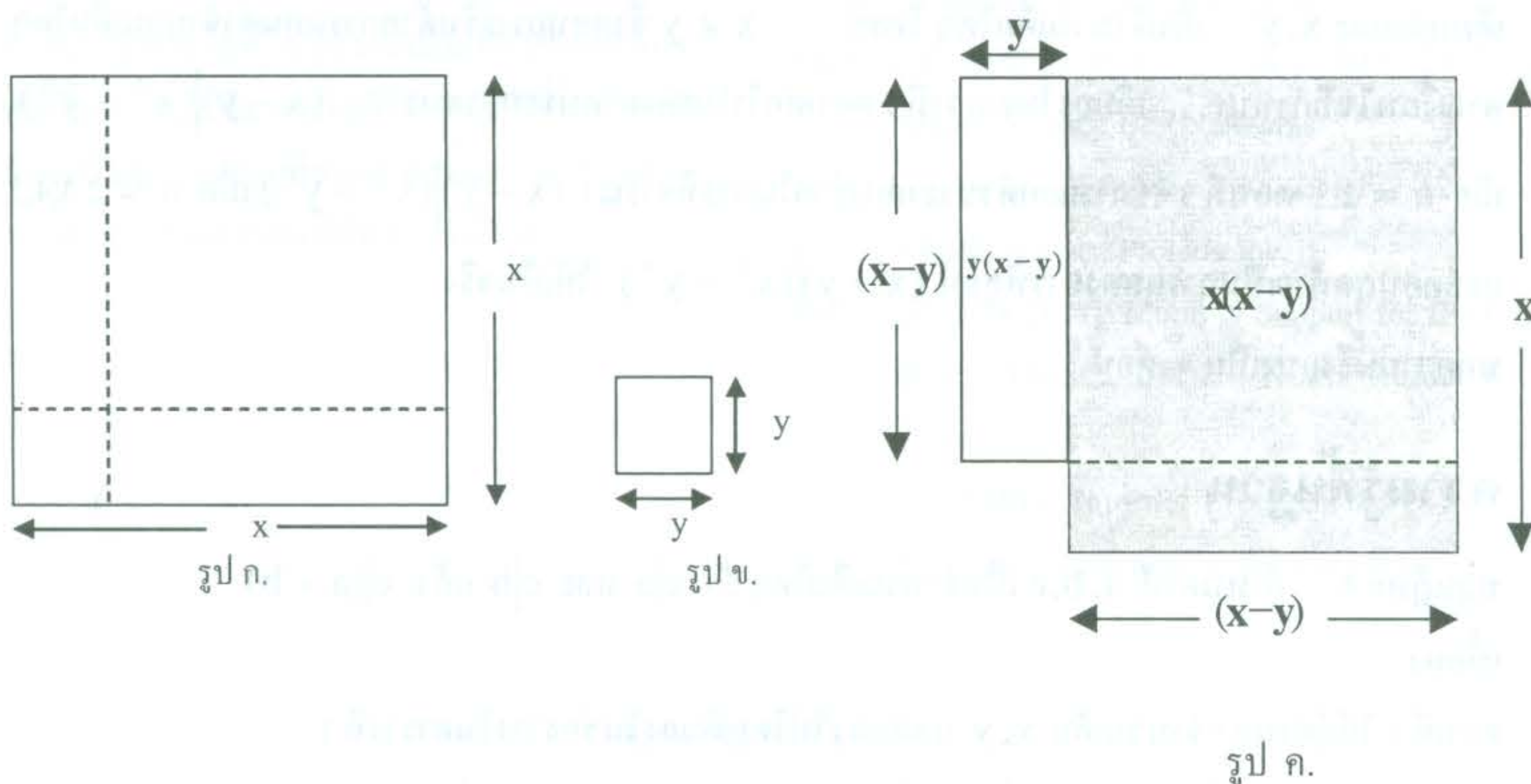
¹ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต.ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

เมื่อผู้อ่านเติมจำนวนตามเงื่อนไขครบทุกช่องในตารางแล้วจะเห็นจริงว่า $(x-y)|(x^n - y^n)$
 เมื่อ x, y เป็นจำนวนเต็มใดๆ โดยที่ $x \neq y$ และ $n = 1, 2, 3, 4$ เมื่อต้องการให้ n เป็นจำนวนเต็มบวก
 ถ้าใช้ตารางต้องเพิ่มตารางอีกไม่มีที่สิ้นสุดจะทำให้ใช้เวลามาก และการคำนวณก็ใช้เวลามากเช่นกัน

ดังนั้นจึงต้องมีตอนที่ 4 มาช่วยพิสูจน์ให้เป็นจริงทุกจำนวนเต็มบวก n

ตอนที่ 2 รูปประกอบของ $(x-y)|(x^n - y^n)$

เมื่อ $n = 2$ ใช้พื้นที่ของรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าประกอบการพิจารณา $(x-y)|(x^2 - y^2)$



รูป ก. มีพื้นที่เท่ากับ x^2 ตารางหน่วย

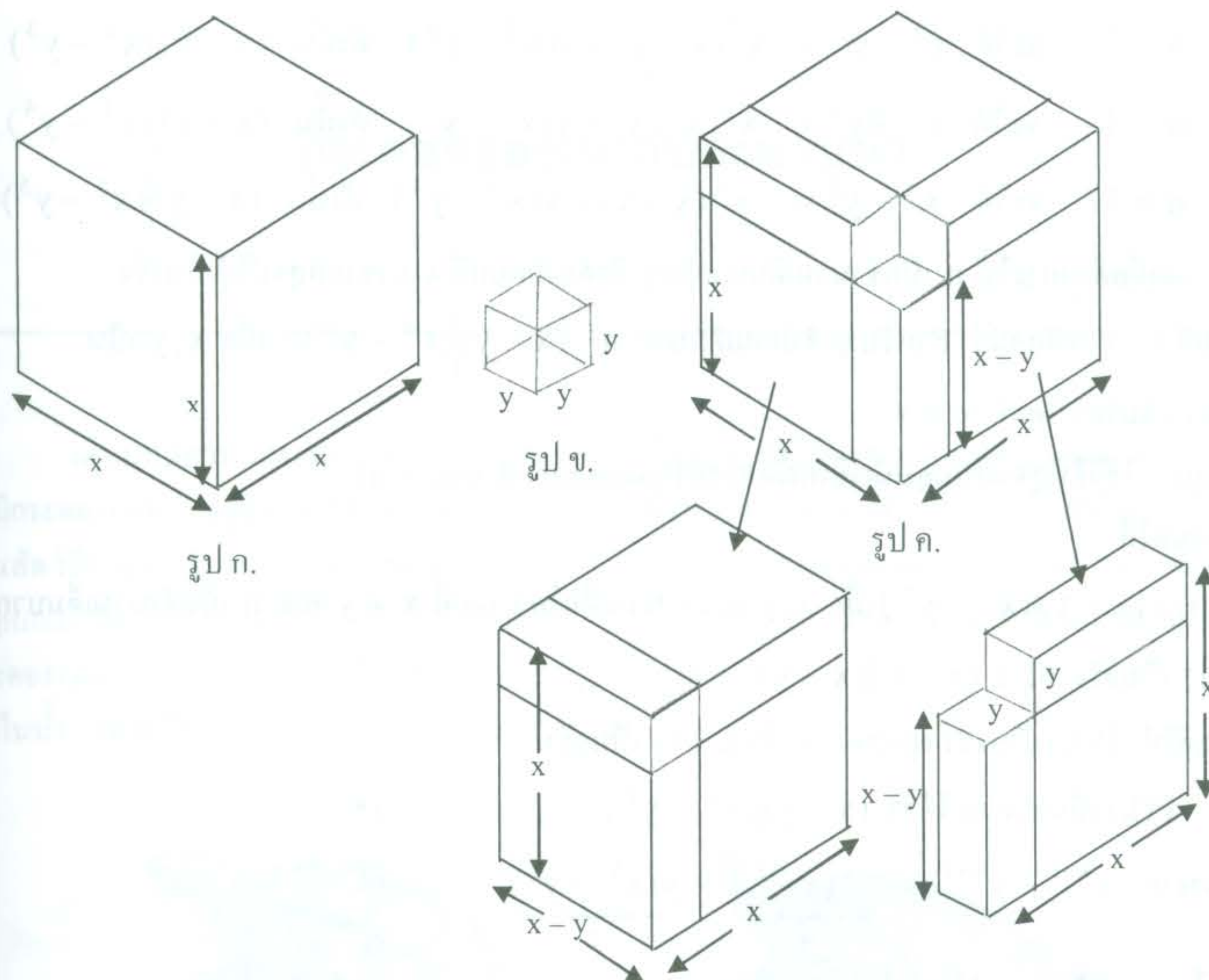
รูป ข. มีพื้นที่เท่ากับ y^2 ตารางหน่วย

รูป ค. มีพื้นที่เท่ากับ $x^2 - y^2$ ตารางหน่วย

หรือ รูป ค. มีพื้นที่เท่ากับ $y(x-y) + x(x-y)$ ตารางหน่วย

ดังนั้น $x^2 - y^2 = y(x-y) + x(x-y)$ ทำให้ $(x-y)|(x^2 - y^2)$

เมื่อ $n = 3$ ใช้ปริมาตรของรูปปริซึมประกอบการพิจารณา $(x-y)|(x^3 - y^3)$



รูป ก. มีปริมาตร x^3 ลูกบาศก์หน่วย

รูป ข. มีปริมาตร y^3 ลูกบาศก์หน่วย

รูป ค. มีปริมาตร $x^3 - y^3$ ลูกบาศก์หน่วย

หรือรูป ค. มีปริมาตร $x^3 - x^2y + x^2y - y^3 = x^2(x-y) + y(x^2 - y^2)$ ลูกบาศก์หน่วย

ดังนั้นรูป ค. มีปริมาตร $x^3 - y^3 = x^2(x-y) + y(x^2 - y^2)$ ลูกบาศก์หน่วย

ทำให้ $(x-y)|(x^3 - y^3)$

เมื่อ $n = 4$ เราไม่สามารถใช้รูปประกอบได้ แต่เราสามารถเขียนในรูป $n = 3$ ช่วยพิจารณาได้

นั่นคือ $x^4 - y^4 = x^3(x-y) + y(x^3 - y^3)$ จะเห็นว่า $(x-y)|(x^4 - y^4)$

เมื่อต้องการให้ n เป็นจำนวนเต็มบวกใดๆ จึงต้องมีตอนที่ 4 มาช่วยพิสูจน์ให้เป็นจริง

ตอนที่ 3 ใช้การแยกตัวประกอบ และใช้ทฤษฎีบท * ในการพิจารณาว่าสำหรับทุกจำนวนเต็มบวก n

$(x-y)|(x^n - y^n)$ เมื่อ x, y เป็นจำนวนเต็มใดๆ โดยที่ $x \neq y$

เมื่อ $n = 1$ จะได้ $x^1 - y^1 = x - y$ ดังนั้น $(x-y)|(x - y)$

$n = 2$ จะได้ $x^2 - y^2 = x(x-y) + y(x-y)$ ดังนั้น $(x-y)|(x^2 - y^2)$

$$n = 3 \quad \text{จะได้} \quad x^3 - y^3 = x^2(x - y) + y(x^2 - y^2) \quad \text{ดังนั้น} \quad (x - y) \mid (x^3 - y^3)$$

$$n = 4 \quad \text{จะได้} \quad x^4 - y^4 = x^3(x - y) + y(x^3 - y^3) \quad \text{ดังนั้น} \quad (x - y) \mid (x^4 - y^4)$$

$$n = 5 \quad \text{จะได้} \quad x^5 - y^5 = x^4(x - y) + y(x^4 - y^4) \quad \text{ดังนั้น} \quad (x - y) \mid (x^5 - y^5)$$

แต่เมื่อต้องการให้ n เป็นจำนวนเต็มบวกใดๆ จึงต้องมีตอนที่ 4 มาช่วยพิสูจน์ให้เป็นจริง

ตอนที่ 4 การพิสูจน์ว่า สำหรับทุกจำนวนเต็มบวก n $(x - y) \mid (x^n - y^n)$ เมื่อ x, y เป็น

จำนวนเต็มใดๆ โดยที่ $x \neq y$

พิสูจน์ ใช้วิธีพิสูจน์แบบอุปนัยเชิงคณิตศาสตร์ (mathematical induction)

กำหนดให้

$P(n) : (x - y) \mid (x^n - y^n)$ เมื่อ x, y เป็นจำนวนเต็มใดๆ โดยที่ $x \neq y$ และ n เป็นจำนวนเต็มบวก

$P(1)$ เป็นจริงเพราะ $(x - y) \mid (x - y)$

สมมติให้ $P(k)$ เป็นจริง จะแสดงว่า $P(k + 1)$ เป็นจริง

จาก $P(k)$ เป็นจริง จะได้ว่า $(x - y) \mid (x^k - y^k) \dots\dots\dots (*)$

$$\text{เนื่องจาก} \quad x^{k+1} - y^{k+1} = \underbrace{x^k(x - y)}_1 + \underbrace{y(x^k - y^k)}_2$$

จะเห็นว่า $x^{k+1} - y^{k+1}$ ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

ส่วนที่ 1 $x^k(x - y)$ ซึ่ง $(x - y) \mid x^k(x - y)$

ส่วนที่ 2 $y(x^k - y^k)$ ซึ่ง $(x - y) \mid y(x^k - y^k)$

โดยทฤษฎีบท* จะได้ $(x - y) \mid x^k(x - y) + y(x^k - y^k)$

ดังนั้น $(x - y) \mid (x^{k+1} - y^{k+1})$ ทำให้ $P(k + 1)$ เป็นจริง

จาก 1. และ 2. สรุปได้ว่า สำหรับจำนวนเต็มบวก n ใดๆ $(x - y) \mid (x^n - y^n)$ เมื่อ x, y เป็น

จำนวนเต็มใดๆ โดยที่ $x \neq y$

เมื่อผู้อ่านได้ศึกษาครบทั้ง 4 ตอนแล้วจะพบว่า $(x - y) \mid (x^n - y^n)$ เป็นจริงตามเงื่อนไขที่กำหนด

บรรณานุกรม

ชะเอม สายทอง. (2532). ระบบจำนวนจริง. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

French, G.F. (1998). The divisibility of $(x^n - y^n)$ by $(x - y)$: a constructive example.

The Mathematics Teacher. 91(4):342-345.

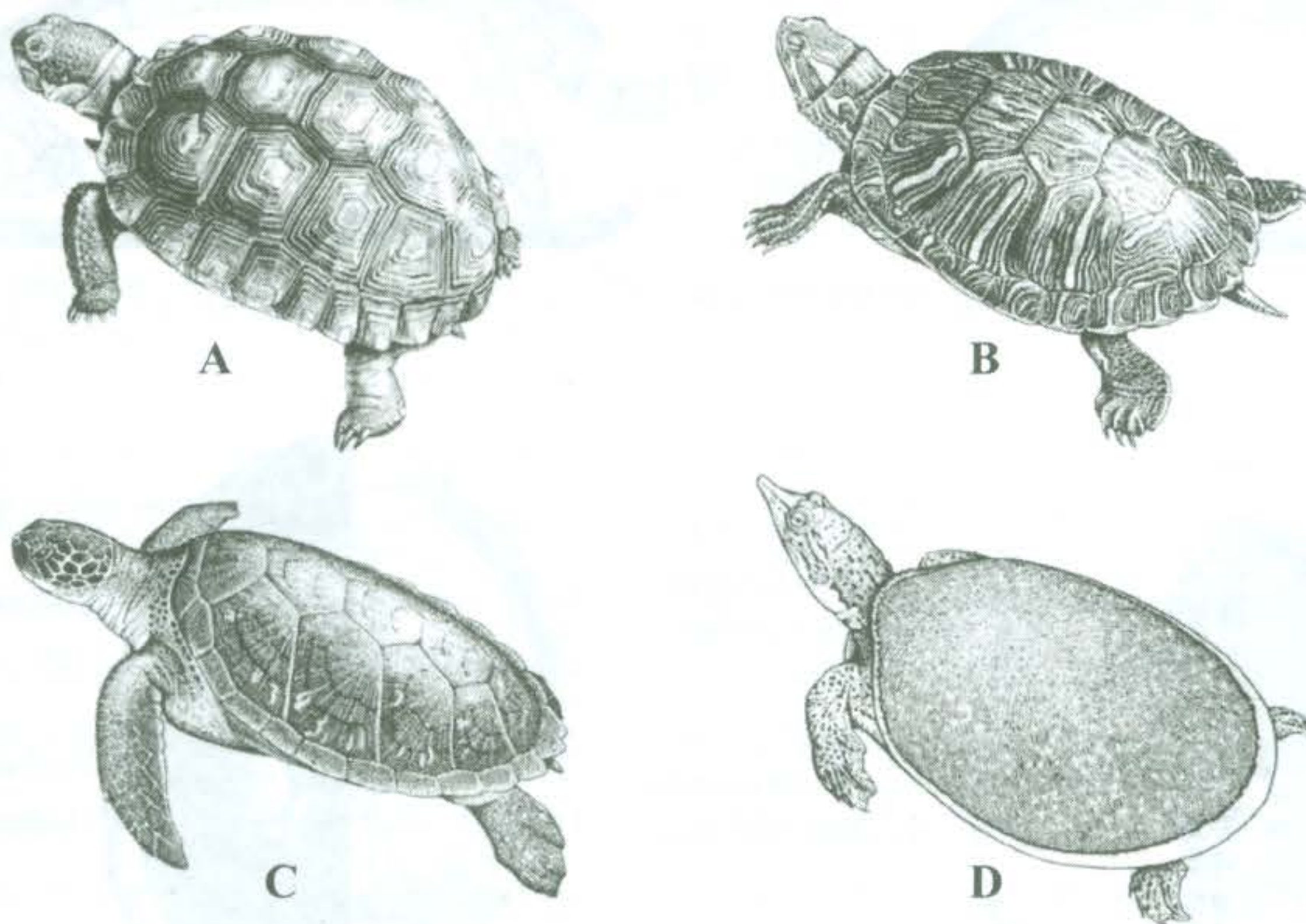


กระดองของเต่ากับตะพาบน้ำ

ปรียะวุฒิ วัชรานนท์¹

เต่าเป็นสัตว์ที่มีกระดองแข็ง ส่วนตะพาบน้ำมีกระดองอ่อน ทั้งคู่จัดเป็นสัตว์พวกเดียวกัน คือ เป็นสัตว์มีกระดูกสันหลังจำพวกสัตว์เลื้อยคลาน (reptiles) ซึ่งต่างจากสัตว์เลื้อยคลานอื่นตรงที่มีกระดอง (shell) หุ้มส่วนลำตัวเอาไว้และส่วนใหญ่หากินในน้ำ เต่ามีชื่อเรียกแยกย่อยตามลักษณะความ

เป็นอยู่อาศัยได้อีกเช่น เต่าบก (tortoises) หากินพวกพืชบนบก เต่าน้ำจืด (turtles) หากินในน้ำหรือกึ่งน้ำ เต่าทะเล (sea turtles) หากินในทะเล และตะพาบน้ำ (soft-shell turtles) มีกระดองอ่อนหากินในน้ำ (ภาพที่ 1)

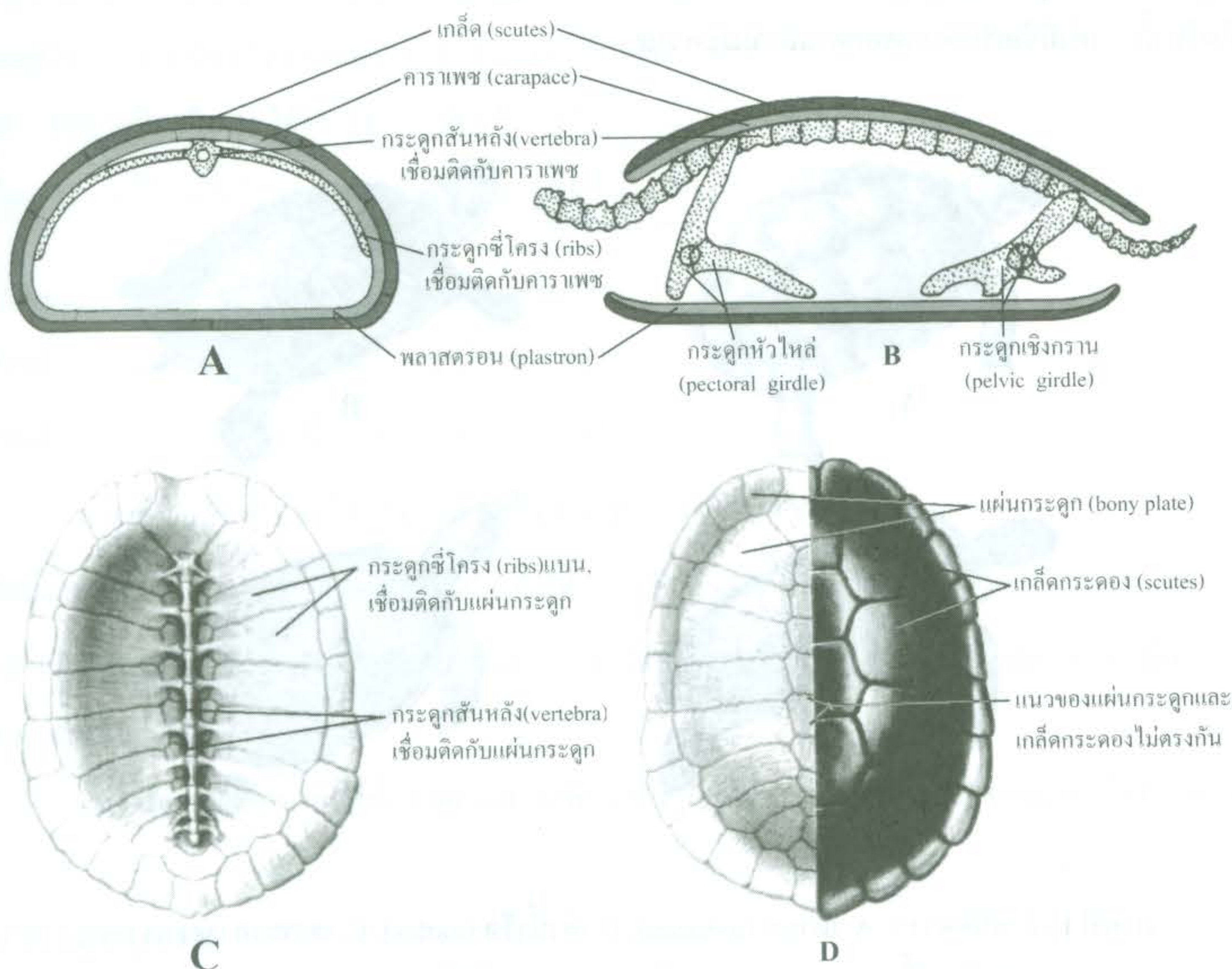


ภาพที่ 1 เต่าชนิดต่างๆ A. เต่าบก (tortoises), B. เต่าน้ำจืด (turtles), C. เต่าทะเล (sea turtles), D. ตะพาบน้ำ (softshell turtles) (จาก Stebbins, 1985)

กระดองเต่า (shell) ที่เห็นกันนั้น ประกอบด้วย โครงสร้างแข็ง 2 ชั้น ชั้นนอกสร้างจากผิวของชั้นหนังกำพร้า (epidermis) มีลักษณะคล้ายเกล็ดขนาดใหญ่ มีสีน้ำตาลดำหรือมีลายต่างๆ เชื่อมต่อกัน ส่วนชั้นในสร้างภายในชั้นหนังแท้ (dermis) มีลักษณะเป็นแผ่นกระดูกแบน (ภาพที่ 2)

กระดองเต่าชั้นในมีลักษณะเป็นแผ่นกระดูก (bony plate) มีลักษณะแบนแบบบน-ล่าง ด้านข้างเชื่อมกัน ด้านล่างเชื่อมกับกระดูกสันหลัง (vertebra) และกระดูกซี่โครง (ribs) ทำให้มีลักษณะเป็นกล่องหุ้มอวัยวะภายในเอาไว้ (ภาพที่ 2 A - B)

กระดองด้านบนเรียกว่าคาราแพซ (carapace) ส่วนด้านล่างเรียกว่าพลาสตรอน (plastron) ระหว่างแผ่นกระดูกของกระดองล่างกับกระดองบนอาจมีแผ่นกระดูกเชื่อมเรียกว่า บริดจ์ (bridge) การเชื่อมของแผ่นกระดูกกับกระดูกซี่โครงอาจสมบูรณ์ทั้งหมด หรือเหลือส่วนปลายซี่โครงเอาไว้ แล้วแต่กลุ่ม พวกที่เชื่อมสมบูรณ์ได้แก่เต่าบกและเต่าน้ำจืด ส่วนพวกที่ไม่สมบูรณ์ได้แก่พวกเต่าทะเลและตะพาบน้ำ กระดองเต่าชั้นในจัดเป็นโครงร่างแข็งภายใน (endoskeleton) นอกเหนือจากกระดูกอื่นๆ



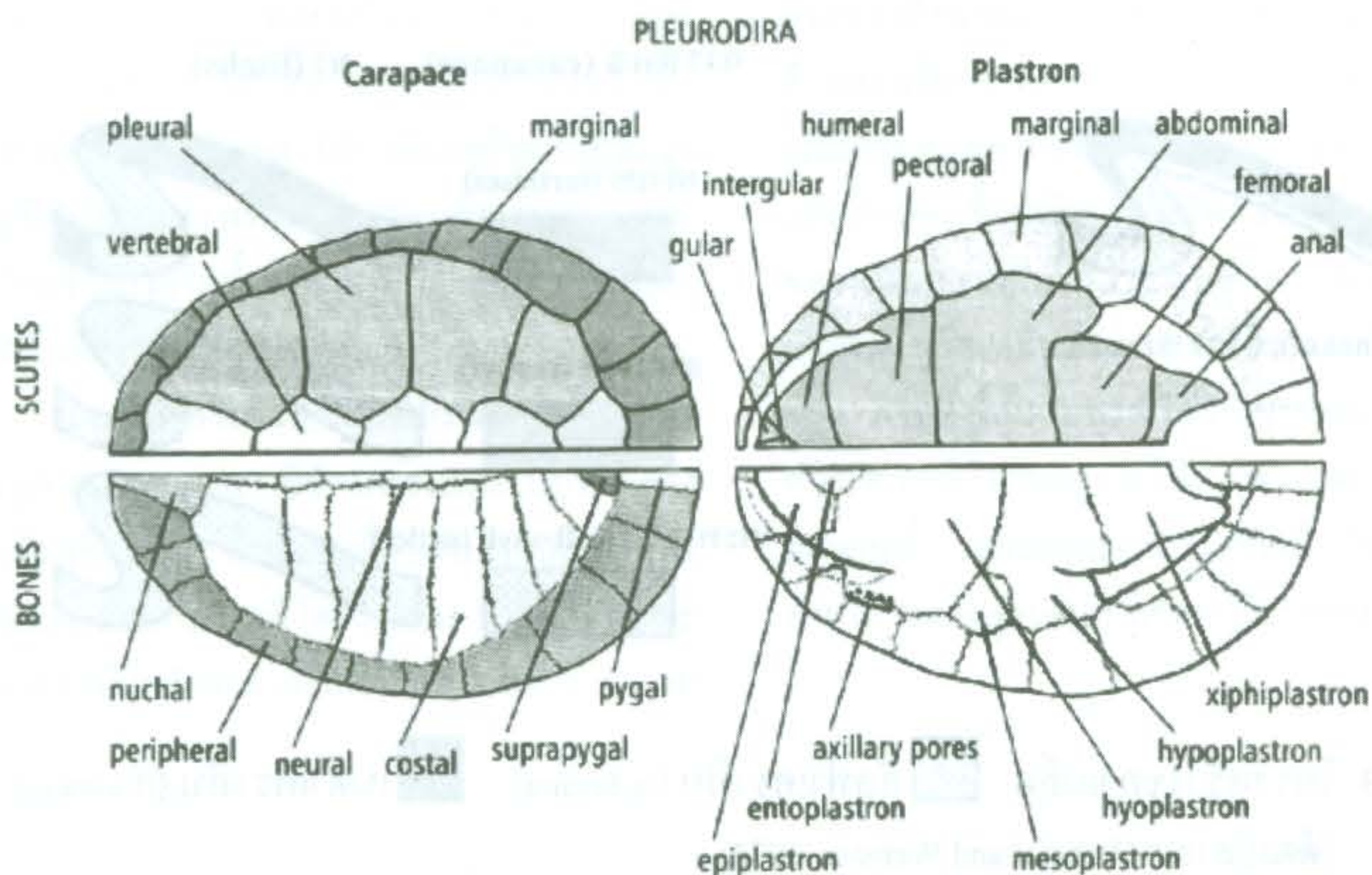
ภาพที่ 2 กระดองเต่า (shell). A. ผ่าตามขวาง, B. ผ่าตามขวาง, C. กระดองบนด้านใน, D. กระดองบนด้านนอก ด้านซ้ายเอาเกล็ดกระดองออก (A - B จาก Halliday and Adler, 2002 ; C - D จาก Cogger and Zweifel, 1998)



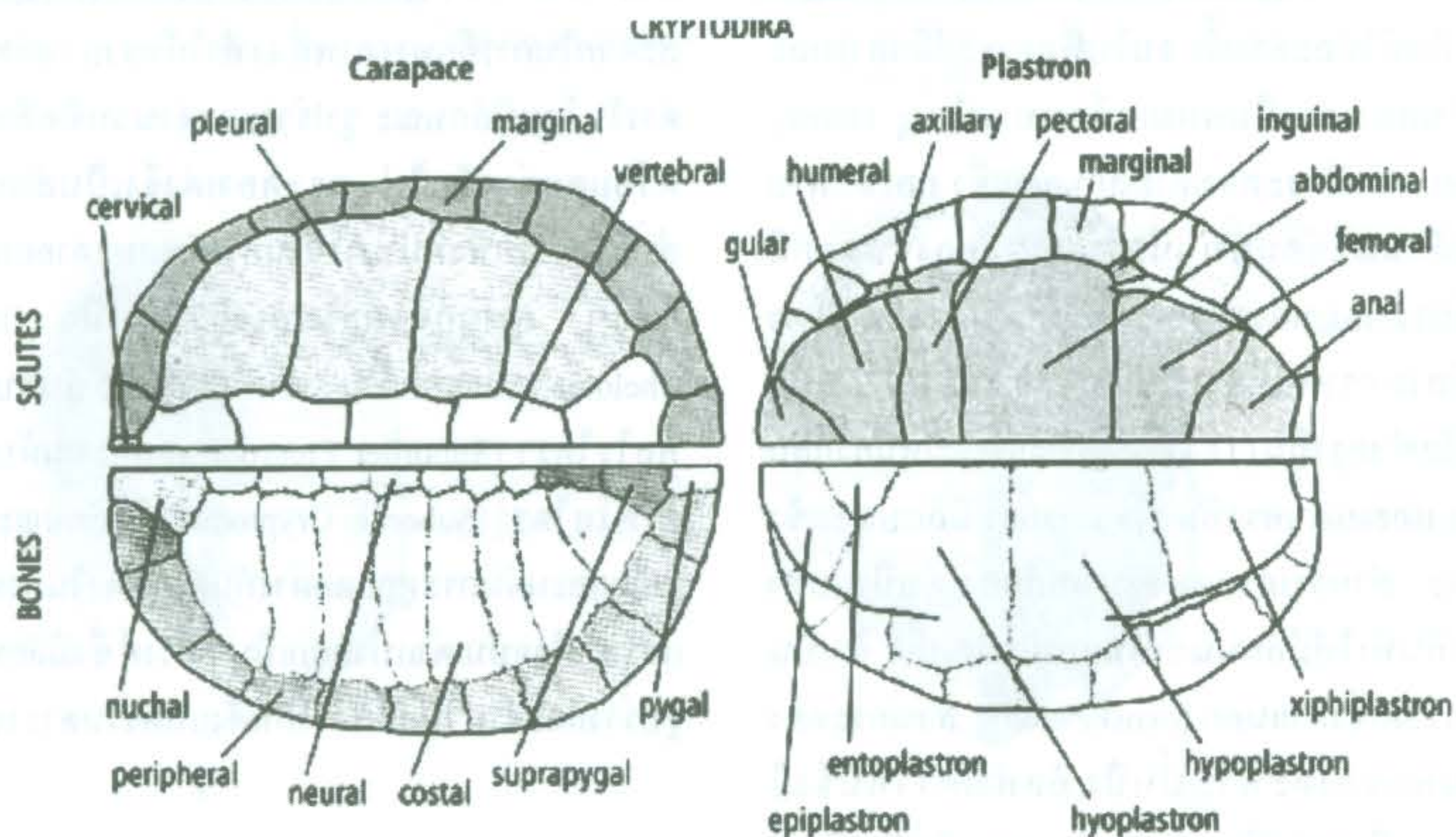
ภาพที่ 3 โครงสร้างของเกล็ด  อัลฟาเคราติน (α -keratin)  เบตาเคราติน (β -keratin)
(คัดแปลงจาก Webster and Webster, 1974)

กระดองเต่าชั้นนอกเป็นเกล็ดขนาดใหญ่ มีสีต่างๆ สร้างโดยเซลล์ผิวหนังชั้นหนังกำพร้ามีการสะสมสารพวกเคราติน (keratin) ซึ่งเป็นโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำ จนในที่สุดเซลล์ผิวหนังตายและอัดกันแน่นจนเป็นแผ่นเกล็ดขนาดใหญ่ (horny scute) การที่กระดองเต่ามีลักษณะแข็ง และตะพาน้ำมีลักษณะอ่อนนุ่ม เนื่องจากกระดองชั้นนอกมีองค์ประกอบของสารเคราตินที่แตกต่างกัน โดยปกติสารเคราตินที่ผิวหนังสัตว์เลื้อยคลานมี 2 ชนิด คือ อัลฟาเคราติน (α -keratin) มีลักษณะเหนียวอ่อนหยุ่น และเบตาเคราติน (β -keratin) มีลักษณะแข็งเปราะ สำหรับกระดองชั้นนอกของเต่าเป็นเบตาเคราตินทำให้มีลักษณะเป็นแผ่นเกล็ดแข็ง จัดเป็นโครงร่างแข็งภายนอก (exoskeleton) ส่วนกระดองชั้นนอกของตะพาน้ำเป็นอัลฟาเคราตินจึงมีลักษณะเป็นหนังเรียบ (leathery skin) อีกทั้งบริเวณขอบกระดองมีเขี้ยวยื่นออกไปโดยเฉพาะด้านข้างและด้านหลังที่เรียกว่าเขี้ยวตะพาน้ำ ทำให้ดูเหมือนกระดองมีความอ่อน

เกล็ด (horny scute) และแผ่นกระดูก (bony plate) ของกระดองเต่ามีลักษณะเป็นแผ่นหลายชิ้นประกบกันอย่างมีสมมาตร จึงมีการตั้งชื่อเพื่อสะดวกในการศึกษา (ภาพที่ 4) ทำให้ทราบว่าเต่าชนิดต่างในโลกมีลักษณะ รูปร่างและจำนวนที่คล้ายกันหรือแตกต่างกันไป กระดองเต่าจึงเป็นลักษณะสำคัญอย่างหนึ่งที่น่าสนใจในการจำแนกเต่าออกเป็นกลุ่มๆ เต่าถูกจัดอยู่ในอันดับซีโลเนีย (Order Chelonia) แบ่งออกเป็น 2 อันดับย่อย คือ อันดับย่อยพลูโรไดรา (Suborder Pleurodira) และอันดับย่อยคริปโตไดรา (Suborder Cryptodira) ซึ่งลักษณะของเกล็ดและแผ่นกระดูกแตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 4 และ 5 ปัจจุบันเต่าแบ่งออกเป็น 14 วงศ์ซึ่งมีลักษณะรูปร่างและจำนวนแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 4 ภาพแสดงชื่อของเกล็ด (horny scute) และแผ่นกระดูก (bony plate) ของกระดองเต่าในอันดับย่อย พลูโรไดรา : ซ้าย. กระดองบน, ขวา. กระดองล่าง, ครึ่งบน. เกล็ดกระดอง (horny scute), ครึ่งล่าง. แผ่นกระดูก (bony plate) (จาก Halliday and Adler, 2002)

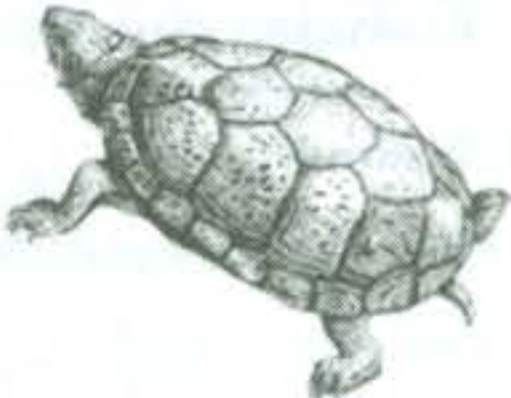
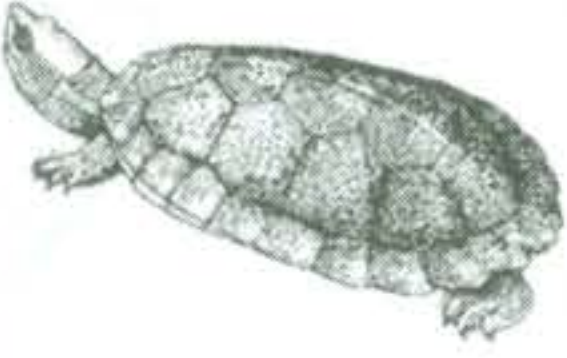
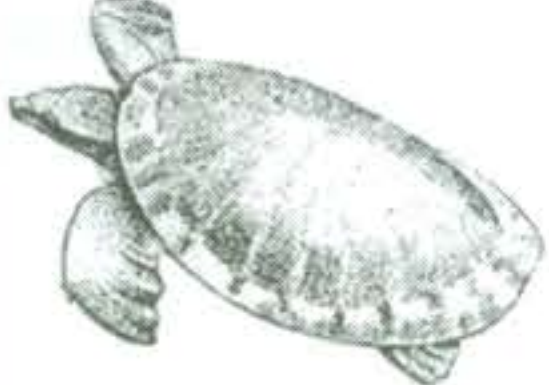
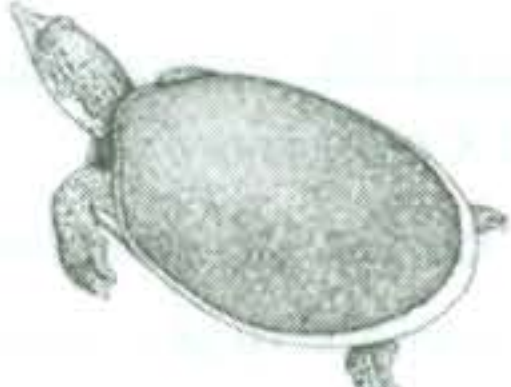


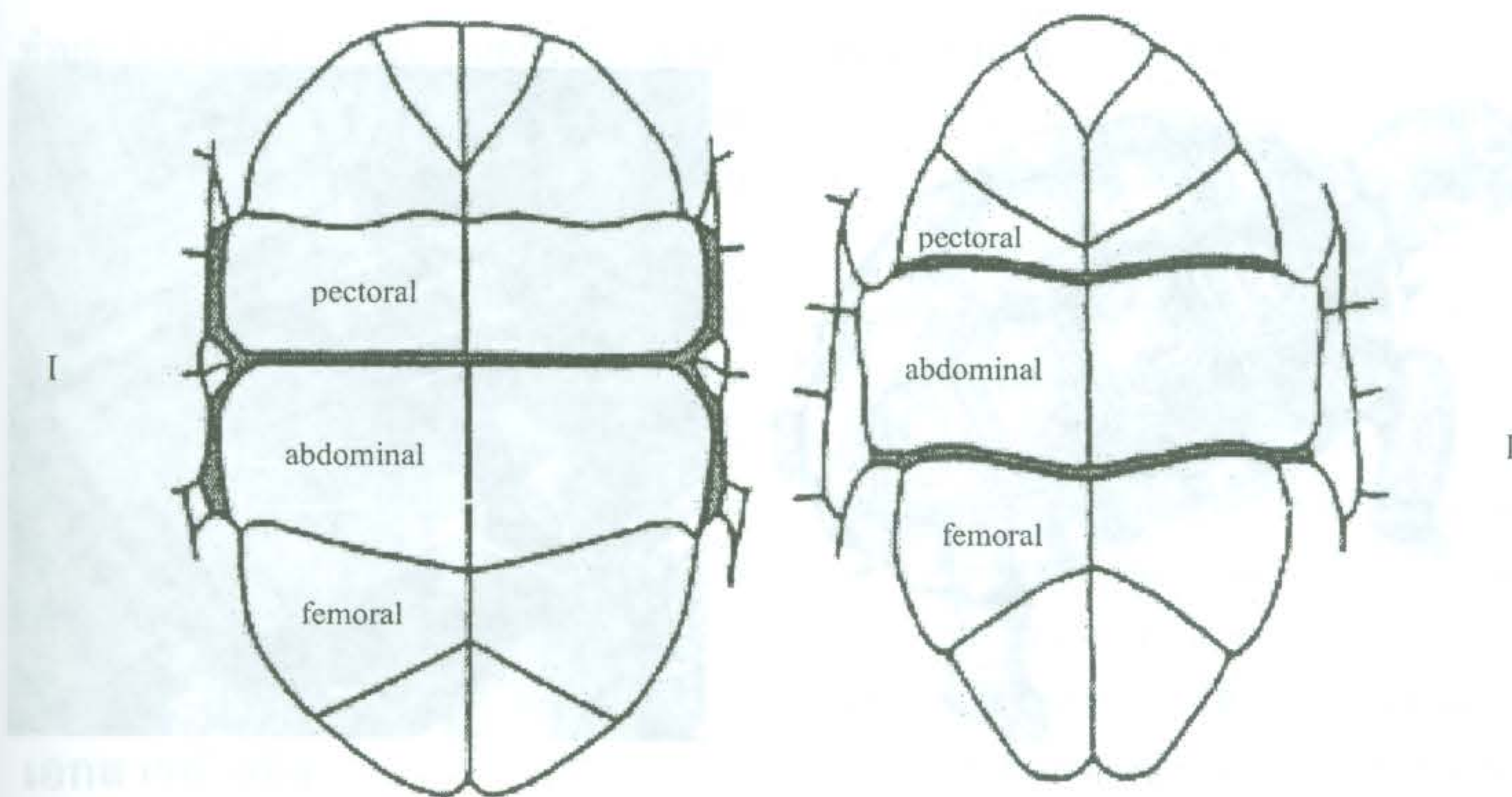
ภาพที่ 5 ภาพแสดงชื่อของเกล็ด (horny scute) และแผ่นกระดูก (bony plate) ของกระดองเต่าในอันดับย่อย คริปโตไดรา : ซ้าย. กระดองบน, ขวา. กระดองล่าง, ครึ่งบน. เกล็ดกระดอง (horny scute), ครึ่งล่าง. แผ่นกระดูก (bony plate) (จาก Halliday and Adler, 2002)

ตารางที่ 1 แสดงการใช้กระดูกจำแนกเต่าเป็นกลุ่มต่างๆ (ดัดแปลงจาก Halliday and Adler, 2002 และ Pough et al., 2004)

อันดับย่อย (Suborder)	เหนือวงศ์ (Superfamily)	วงศ์ (Family)	ภาพตัวอย่าง
1. Pleurodira - Plastron มี mesoplastron 1 คู่ - หดหัวในแนวนอน (horizontal)		1. Chelidae - เต่าพับคอขวางออสเตรเลีย-อเมริกา (Austro-American side-necked turtles) - ไม่มี neural plate หรือมีจำนวนน้อย - มี cervical scute	 <i>Chelodina onicocolis</i>
		2. Pelomedusidae - เต่าพับคอขวางแอฟริกา (African side-necked turtles) - มี neural plate - ไม่มี cervical scute - เท้าหลังมี 5 นิ้ว	 <i>Pelusios niger</i>
		3. Podocnemididae - เต่าพับคอขวางอเมริกา (American side-necked turtles) - มี neural plate - ไม่มี cervical scute - เท้าหลังมี 4 นิ้ว	 <i>Podocnemis cayennensis</i>
2. Cryptodira - Plastron ไม่มี mesoplastron - หดหัวในแนวตั้ง (vertical)	1. Chelydroidea - carapace ค่อนข้างแบน - มี bridge แคบ	4. Chelydridae - เต่าฉนบปิ้ง (Snapping turtles) - carapace มีสันตามยาว 3 แถว - plastron แคบ - bridge แคบมาก	 <i>Chelydra serpentina</i>
		5. Platysternidae - เต่าปูลู (Big-headed turtles) - carapace เรียบ ไม่มีสันตามยาว - plastron กว้าง - bridge แคบ	 <i>Platysternon megacephalum</i>
	2. Chelonioidae - carapace แบน เปรี้ยวน้ำ - มี bridge กว้าง	6. Cheloniidae - เต่าทะเล (Seaturtles) - กระดองหุ้มด้วยเกล็ด (horny scute) - carapace ไม่มีสันตามยาว, เชื่อมกับกระดูกสันหลังและกระดูกซี่โครง	 <i>Chelonia mydas</i>
		7. Dermochelyidae - เต่ามะเฟือง (Leatherback seaturtles) - กระดองหุ้มด้วยหนัง (leathery skin) - carapace มีสันตามยาว 7 แถว, ไม่เชื่อมกับกระดูกสันหลังและกระดูกซี่โครง	 <i>Dermochelys coriacea</i>

ตารางที่ 1 แสดงการใช้กระดูกจำแนกเต่าเป็นกลุ่มต่างๆ (ต่อ)

อันดับย่อย (Suborder)	เหนือวงศ์ (Superfamily)	วงศ์ (Family)	ภาพตัวอย่าง
2. Cryptodyra (ต่อ)	3. Trionychoidea - carapace แบน หรือ โค้ง - มี bridge หรือ ไม่มี	8. Kinosternidae - เต่าโคลนอเมริกา (Central American river turtles) - กระดองหุ้มด้วยเกล็ด (horny scute) - มี bridge แคบและอ่อนหยุ่น	 <i>Kinosternon sonoriense</i>
		9. Dermatemydidae - เต่าแม่น้ำอเมริกากลาง (Central American river turtles) - กระดองหุ้มด้วยเกล็ด (horny scute) ที่บางและเชื่อมกัน - มี bridge กว้าง	 <i>Dermatemys mawii</i>
		10. Carettochelidae - เต่าจมูกหมู (Pig-nosed turtles) - กระดองหุ้มด้วยหนัง (leathery skin) - มี bridge กว้าง	 <i>Carettochelys insculpta</i>
		11. Trionychidae - ตะพาบน้ำ (Soft-shell turtles) - กระดองหุ้มด้วยหนัง (leathery skin) - ไม่มี bridge	 <i>Trionyx spiniferus</i>
	4. Testudinoidea - carapace โค้ง - มี bridge	12. Emydidae - เต่าหนองน้ำ (Pond turtles) - carapace โค้ง - มี marginal scute 12 แผ่น	 <i>Pseudemys scripta</i>
		13. Bataguridae - เต่าน้ำจืด (Eurasian turtles) - carapace โค้ง - มี marginal scute 11 แผ่น	 <i>Cuora amboinensis</i>
		14. Testudinidae - เต่าบก (Tortoises) - carapace โค้งมาก - มี marginal scute 10 - 11 แผ่น	 <i>Geopherus agassizii</i>

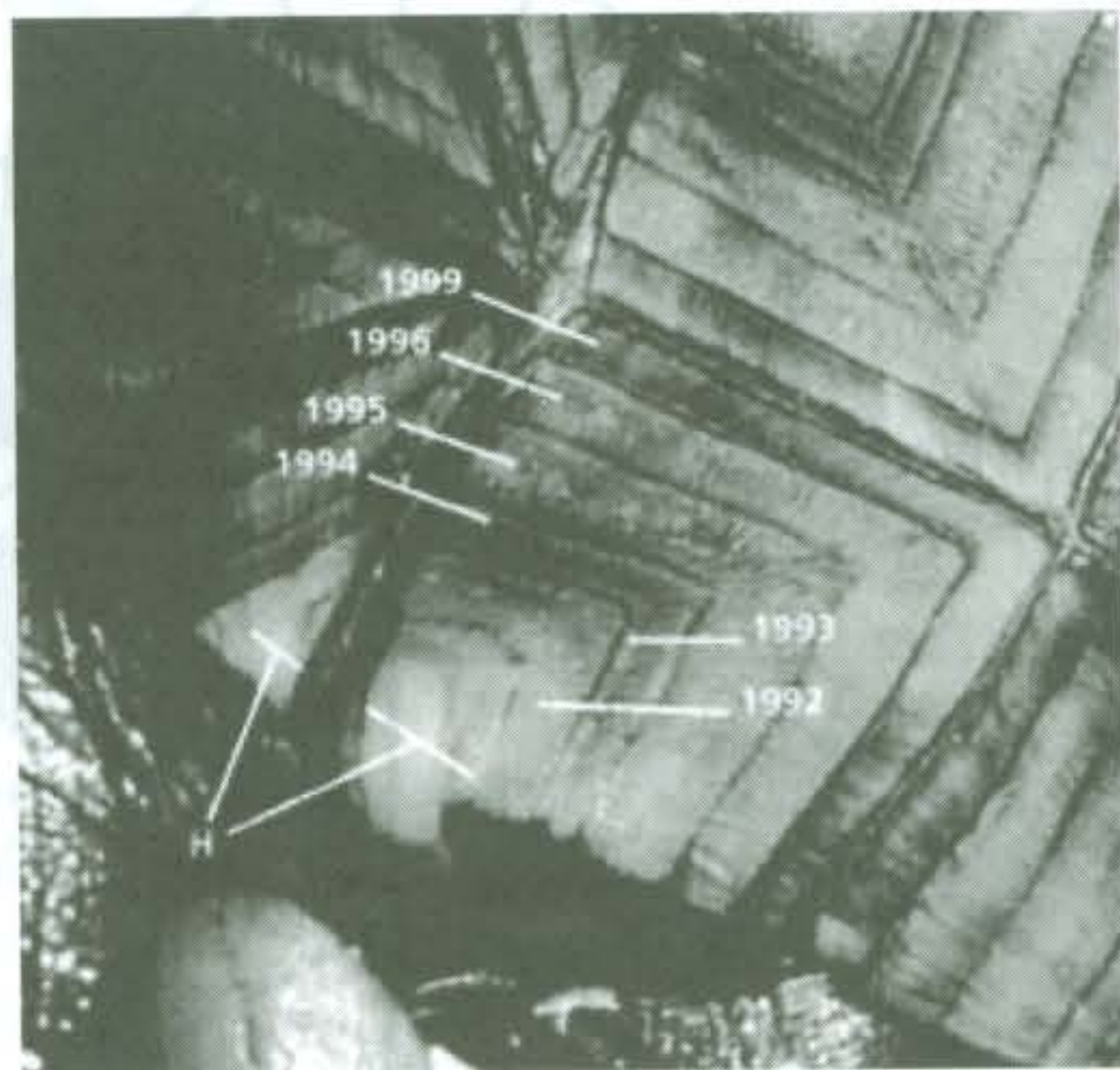
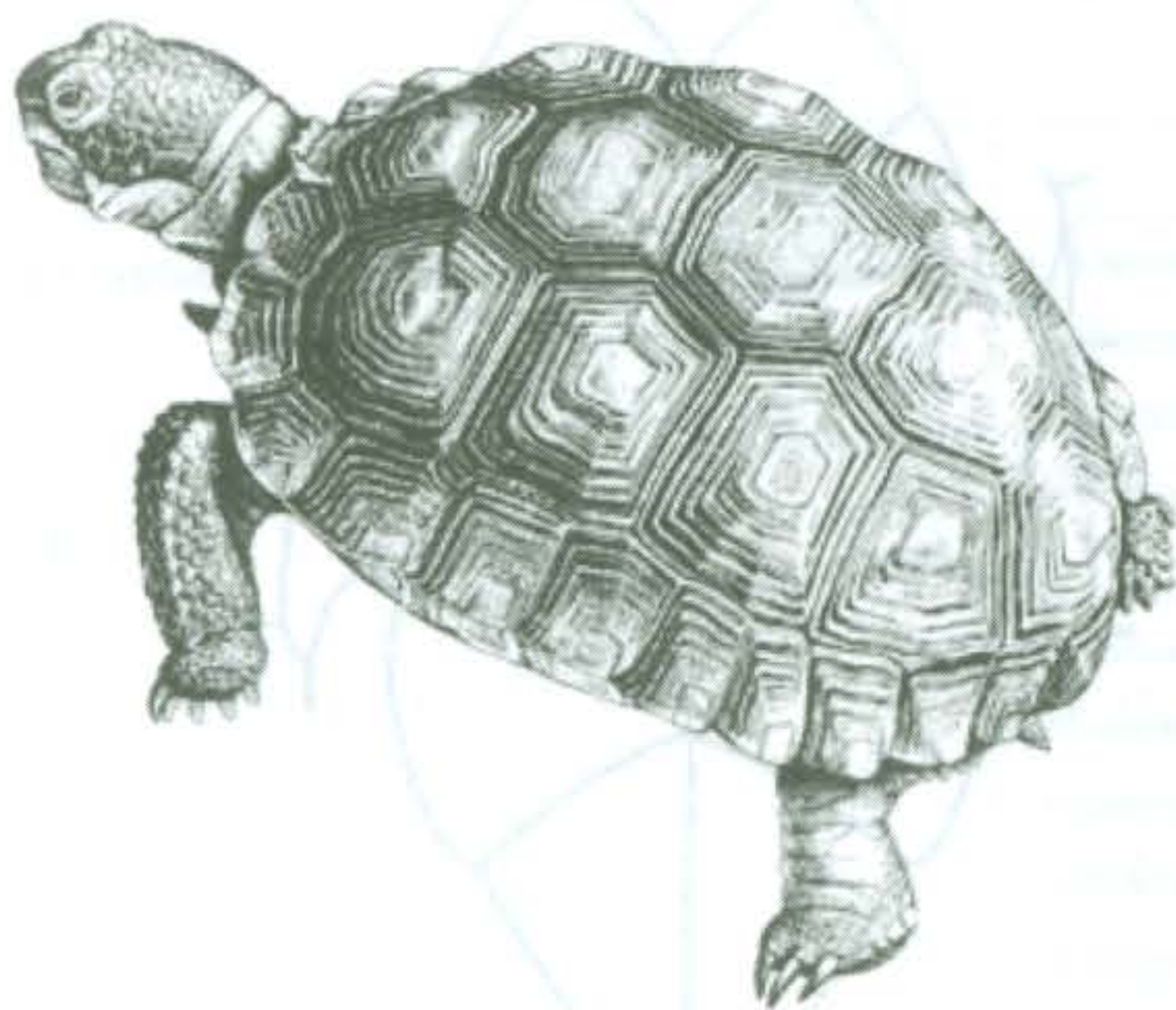


ภาพที่ 6 ภาพแสดงรอยพับ (hinge) ที่กระดูกกลางของเต่าหับ (box turtles). ซ้าย. กระดูกกลางของเต่า *Cuora amboinensis* มีรอยพับ 1 แถว, ขวา. กระดูกกลางของเต่า *Kinosternon sonoriense* มีรอยพับ 2 แถว (จาก Wermuth and Mertens, 1961)

เต่าน้ำจืดบางชนิด กระดูกกลางสามารถขยับขึ้นลงตามขวางได้ เมื่อหดหัว ขา และหางเข้าไปในกระดองจะปิดสนิท ป้องกันภัยจากศัตรู เรียกเต่าพวกนี้ว่าเต่าหับ (box turtles) การที่เต่าสามารถขยับกระดูกกลางได้เนื่องจากกระดูกกลางของเต่าพวกนี้มีรอยพับ (hinge) จำนวน 1 - 2 แถว (ภาพที่ 6) โดยถ้ามีรอยพับ 1 แถวนั้นจะอยู่ระหว่างเกล็ดเพคทอรัล (pectoral) และแอ็บโดมินัล (abdominal) ถ้ามี 2 แถวจะอยู่ระหว่างเกล็ดเพคทอรัล (pectoral) กับแอ็บโดมินัล (abdominal) และเกล็ดแอ็บโดมินัล (abdominal) กับฟีโมรัล (femoral)

พวกสัตว์เลื้อยคลานจำพวกงูมีการลอกคราบ (molting, ecdysis) อาจมีผู้สงสัยว่าเต่าซึ่งเป็นสัตว์เลื้อยคลานด้วยกันมีการลอกคราบหรือไม่ จากการศึกษพบว่า งูมีการลอกคราบทั้งตัว กิ้งก่ามีการลอกคราบเป็นแผ่นๆ ส่วนเต่ามีการลอกคราบบางส่วน ทั้งนี้เพราะมีลักษณะการสะสมของสารอัลฟาเคราตินและเบตาเคราตินที่ผิวหนังต่างกัน

งูและกิ้งก่ามีชั้นเบตาเคราตินที่แข็งแรงอยู่ชั้นบน และมีชั้นอัลฟาเคราตินที่เหนียวหยุ่นอยู่ข้างล่าง (ภาพที่ 3 ซ้าย) เมื่อมีการสร้างคราบใหม่ทำให้สามารถลอกคราบเก่าออกไปได้ โดยงูลอกออกได้ทั้งตัว แต่กิ้งก่าลอกออกเป็นแผ่นๆ เพราะมีขาทั้งคู่อึดขวางการลอกคราบ เต่ามีลักษณะการสะสมสารเคราตินตามผิวหนังในส่วนส่วนของกระดูกและส่วนที่ไม่ใช่กระดูกแตกต่างกันออกไป ที่กระดูกเต่ามีเฉพาะสารเบตาเคราติน (ภาพที่ 3 ขวาบน) ดังนั้นเมื่อมีการสร้างคราบใหม่จึงดันคราบเก่าออกไปข้างนอกเรื่อยๆ เมื่อเต่ามีอายุมากขึ้นจึงทำให้คราบซ้อนกันหลายๆ ชั้น ดูคล้ายวงปี (annual rings) ของต้นไม้ (ภาพที่ 7) โดยวงในสุดจะเป็นเกล็ดแรกที่ฟักออกจากไข่ (hatch) และวงนอกสุดเป็นเกล็ดที่สร้างใหม่สุด ปกติการเกิดแต่ละวงหมายถึงการเจริญของเต่าในแต่ละปี ทั้งนี้เพราะในรอบ 1 ปี ความอุดมสมบูรณ์ของอาหารแต่ละฤดูไม่เท่ากัน ทำให้การเจริญเติบโตในแต่ละฤดูจึงแตกต่างกันด้วย โดยในช่วงฤดูฝนมี



ภาพที่ 7 ภาพแสดงวงของเกล็ดกระดูกของเต่า. ซ้าย. กระดองของเต่าทะเลทราย (Desert tortoise, *Geopherus agassizii*), ขวา. กระดองล่างของเต่าโคลนเหลือง (Yellow mud turtle, *Kinosternon flavescens*) แสดงการเกิดวง (annuli) บ่งชี้ถึงการเจริญในแต่ละปี (ภาพซ้ายจาก Stebbins, 1985, ภาพขวาจาก Halliday and Adler, 2002)

อาหารสมบูรณ์อัตราการเติบโตจึงเกิดกว้าง ส่วนในฤดูแล้งมีความขาดแคลนอัตราการเติบโตต่ำลง เกล็ดแคบ ดังนั้นเราจึงอาจคำนวณอายุของเต่าได้จากวงของเกล็ด ตามผิวร่างกายของเต่าที่นอกเหนือจากกระดูกมีเฉพาะสารอัลฟาเคราติน มีการลอกคราบที่มีลักษณะอ่อนเป็นแผ่นบางๆ ที่ขาของเต่าบก็มีการสะสมทั้งสารอัลฟาและเบตาเคราติน โดยที่ตัวเกล็ดเป็นสารเบตาเคราตินและรอบเกล็ดเป็นอัลฟาเคราติน ดังนั้นเกล็ดขาเต่าบจึงหนาและสูง เพราะมีการคันคราบเก่าออกมาคล้ายกับที่เกิดในกระดูก การเคลื่อนไหวของเกล็ดเป็นอิสระต่อกัน เพราะความยืดหยุ่นของสารอัลฟาเคราตินที่อยู่รอบๆ เกล็ด ทำให้สะดวกในการเดิน ส่วนตะพาบน้ำ ทั้งผิวของกระดูกและร่างกายส่วนอื่นๆ มีเฉพาะสารอัลฟาเคราตินทั้งหมด (ภาพที่ 3 ขวาล่าง) ก็ลอกคราบที่มีลักษณะอ่อนเป็นแผ่นบางๆ เช่นเดียวกับเต่า

จากลักษณะรูปร่างของกระดูกเต่าในวงศ์ต่างๆ ที่แสดงในตารางที่ 1 พบว่าลักษณะรูปร่างของร่างกายและกระดูกแตกต่างกันตามลักษณะการดำรงชีวิตและหากินที่แตกต่างกัน เต่าทะเลและตะพาบน้ำ มีการดำรงชีวิตในน้ำตลอดชีวิต ยกเว้นตอนไข่ที่เพศเมียขึ้นมาไต่บนบก จะมีกระดูกอ่อนข้างแบน เพื่อลดแรงเสียดทานของน้ำ (ภาพที่ 1. C-D) ขาหน้าของเต่าทะเลมีลักษณะคล้ายครีบก (flipper) มองไม่เห็นนิ้ว ส่วนตะพาบน้ำมีลักษณะคล้ายพาย (paddle) ระหว่างนิ้วมีแผ่นหนัง (web) เต่าน้ำจืด (ภาพที่ 1. B) มีกระดูกโค้งเท้าเป็นใบพาย และเต่าบก (ภาพที่ 1. A) มีกระดูกที่โค้งมาก ขาหลังทรงกระบอกคล้ายเท้าช้าง ไม่มีแผ่นหนังระหว่างนิ้ว

จากความรู้เกี่ยวกับรูปร่างของขาและกระดูกเต่า สามารถนำมาใช้ในชนบทธรรมเนียมประเพณีของไทยได้ กล่าวคือ คนไทยนิยมการ

ทำบุญปล่อยสัตว์ในวันพระ นอกจากการปล่อยนกปล่อยปลาแล้ว ยังนิยมปล่อยเต่าอีกด้วย ซึ่งต้องคำนึงถึงลักษณะการดำรงชีวิตของมันด้วยนั่นคือต้องนำเต่าที่ดำรงชีวิตในน้ำ ได้แก่ เต่าน้ำจืดหรือตะพาบน้ำไปปล่อยในน้ำ ซึ่งพิจารณาได้จากลักษณะกระดองที่แบนหรือโค้งไม่มาก ระหว่างนิ้วมีแผ่นหนังสำหรับว่ายน้ำ หากนำเต่าบกที่มีกระดองโค้งมากและนิ้วไม่มีแผ่นหนังไปปล่อยในน้ำ มันจะจมน้ำตายเนื่องจากว่ายน้ำไม่ได้ ทำให้กลายเป็นการทำบาปแทนการทำบุญ

เอกสารอ้างอิง

- Cogger, H.G. and Zweifel, R.G. (1998). Encyclopedia of Reptiles & Amphibians. 2nded. Academic Press. San Diego. USA.
- Halliday, T. and Adler, K. (2002). The New Encyclopedia of Reptiles & Amphibians. Oxford University Press. UK.

Pough, F.H., Andrews, R.M., Cadle, J.E., Crump, M.L., Saviitzky, A.H. and Well, K.D. (2004). Herpetology. 3rd ed. Prentice Hall. USA.

Stebbins, R.C. (1985). A Field Guide to Western Reptiles & Amphibians. 2nded. Houghton Mifflin Company. New York.

Webster, D. and Webster, M. (1974). Comparative Vertebrate Morphology. Academic Press, Inc. New York.

Wermuth, h. and Mertens, R. (1961). Schildkr?ten, Krokodile, Br?ckenechsen. Gustatav Fischer, Jena. Germany.



การประเมินคุณภาพแหล่งน้ำจัดด้วย สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังหน้าดิน

นฤมล แสงประดับ¹

บทนำ

การใช้สิ่งมีชีวิตร่วมในการตรวจวัดคุณภาพน้ำเริ่มมีขึ้นตั้งแต่ยุคปฏิวัติอุตสาหกรรมในทวีปยุโรป เนื่องจากคุณภาพน้ำที่เสื่อมลงได้ทำให้เกิดการระบาดของโรคเช่น อหิวาต์และไข้ไทฟอยด์ เป็นต้น จึงได้มีการตรวจวัดจำนวนของจุลินทรีย์ที่อาจทำให้เกิดโรคในคน (Hynes, 1960) ปัจจุบันแม้จะมีการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติแต่น้ำที่ได้รับการบำบัดแล้วนี้รวมทั้งของเสียจากกิจกรรมการเกษตรและการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ล้วนมีส่วนทำให้เกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำซึ่งมีผลทำให้คุณค่าทางนิเวศ (ecological value) ของแหล่งน้ำลดลง การประเมินคุณภาพแหล่งน้ำจึงมีหลายวิธี นอกเหนือจากวิธีการวิเคราะห์ทางเคมีและการทดสอบความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตแล้ว การใช้สิ่งมีชีวิต เช่น จุลินทรีย์ พืชน้ำ สาหร่าย สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังหน้าดิน และปลาเป็นตัวบ่งบอกคุณภาพน้ำเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวาง ในกลุ่มสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังหน้าดินในแหล่งน้ำจืดซึ่งส่วนมากเป็นระยะตัวอ่อนของแมลงน้ำเป็นกลุ่มสิ่งมีชีวิตที่ได้รับความนิยมในการใช้ประเมินผลกระทบติดตามคุณภาพน้ำและการตรวจวัดมลพิษทางน้ำในหลายประเทศทั่วโลก (Rosenberg and Resh, 1993; นฤมล แสงประดับ, 2542) บทความนี้นำเสนอ

พัฒนาการของการใช้สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังหน้าดินในการประเมินคุณภาพแหล่งน้ำจืดตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

ระยะต้น: แนวคิดเรื่องสปีชีส์บ่งชี้ (Indicator species)

แนวคิดรวบยอดเกี่ยวกับการตรวจวัดคุณภาพน้ำในลำธารและแม่น้ำโดยใช้ตัวชี้วัดชีวภาพ (Bioindicator) ถือกำเนิดขึ้นในประเทศเยอรมัน โดยนักธรรมชาติวิทยา 2 ท่าน คือ Kolkwitz และ Marsson เมื่อปีค.ศ. 1909 (Kolkwitz and Marsson, 1909) ได้พัฒนาแนวคิดเรื่อง ระบบซาโปรเบียน (Saprobien System) ขึ้น สำหรับการระบุมลพิษจากสารอินทรีย์ในแม่น้ำซึ่งส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำลดลง ท่านได้ทำบัญชีรายชื่อสิ่งมีชีวิตที่เป็นตัวบ่งชี้กลุ่มต่าง ๆ เช่น จุลินทรีย์ สาหร่าย เห็ดรา โปรโตซัว และสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังหน้าดินที่พบปรากฏอยู่ในน้ำที่มีระดับมลพิษแตกต่างกัน สำหรับสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังหน้าดินนั้นได้ให้คะแนน 1 สำหรับสัตว์ที่พบ ในน้ำที่ไม่มีการปนเปื้อน เช่น ตัวอ่อนแมลงสโตนฟลาย *Diura bicaudata* จนถึงคะแนนเท่ากับ 4

สำหรับสัตว์ที่พบในน้ำที่มีมลพิษมาก เช่นตัวอ่อนแมลงวันดอกไม้ (Syrphidae) คะแนนถูกปรับด้วยค่าจาก 1 ถึง 16 ขึ้นกับจำนวนสปีชีส์บ่งชี้ที่พบ สรุปย่อๆ คือ ตัวอ่อนแมลงชีปะขาว ตัวอ่อนแมลงสโตนฟลายและตัวอ่อนแมลงหนอนปลอกน้ำถูกจัดจำแนกไว้ในดัชนีสัตว์ที่ไม่ทนทานต่อภาวะออกซิเจนต่ำ (into lerant index) ซึ่งพบสัตว์เหล่านี้อาศัยอยู่ในน้ำคุณภาพดี หนอนร็น้ำจืดหรือที่มักเรียกกันว่าหนอนแดง (*Chironomus*) และไส้เดือนน้ำจืด (*Tubifex*) ถูกจัดไว้ในกลุ่มสัตว์ที่มีความทนทานต่อภาวะออกซิเจนต่ำ (tolerant index) ซึ่งพบสัตว์ทั้งสองประเภทหลังนี้ในแหล่งน้ำที่มีมลพิษ แนวคิดนี้ได้ถูกแนะนำและได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางจากหลายประเทศในทวีปยุโรป แต่ได้รับความสนใจน้อยในทวีปอเมริกาเหนือ เนื่องจากสะท้อนเพียงมลพิษจากของเสียอินทรีย์ ไม่ใช่ของเสียจากสารพิษ ซึ่งเป็นแหล่งที่ทำให้เกิดปัญหาในประเทศสหรัฐอเมริกา (Cairns and Pratt, 1993)

ระบบซาโปรเบียนได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางสำหรับใช้ประเมินคุณภาพน้ำในยุโรปตอนกลางหลายประเทศ อย่างไรก็ตาม Roback (1974 อ้างใน Cairns and Pratt, 1993) ไม่เห็นด้วยกับแนวคิดนี้โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของแมลงน้ำ เขาได้ให้เหตุผลว่าการปรากฏตัวและไม่ปรากฏตัวของแมลงน้ำในแหล่งน้ำหนึ่งๆ อาจไม่ขึ้นกับคุณภาพน้ำเพียงอย่างเดียว แต่อาจขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ ด้วยเช่น ความสามารถในการเข้ามาครอบครองพื้นที่ของแมลงชนิดนั้น ฤดูกาล หรือกระแสน้ำ หรือลักษณะพื้นอาศัยเป็นต้น ซึ่งสอดคล้องกับความเห็นของ Johnson et al. (1993) ที่ให้ความเห็นเพิ่มเติมว่าปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตหนึ่งๆ นอกเหนือจากที่กล่าวแล้วคือ การล่า การแก่งแย่งแข่งขันกันระหว่างสิ่งมีชีวิต หรือการมีสิ่งกีดขวางทางภูมิศาสตร์ นอกจากนี้แมลงน้ำบางชนิดมีความทนทานต่อมลพิษในช่วงที่กว้างมาก ทฤษฎี

พลวัตร โครงสร้างชุมชนช่วยอธิบายเกี่ยวกับอัตราการหมุนเวียนของสิ่งมีชีวิตซึ่งแต่ละชนิดอาจหายไปบางช่วงเวลา (Mac Arthur and Wilson, 1967) และได้มีแนวคิดในการพิจารณาสิ่งมีชีวิตในภาพรวม คือพิจารณาทั้งชุมชนเกิดขึ้น เนื่องจากการหายไปของสิ่งมีชีวิตหลายชนิดจากพื้นที่เดียวกันย่อมบ่งชี้ถึงมลพิษได้มากกว่าการพิจารณาสิ่งมีชีวิตเพียงชนิดเดียว และการใช้สปีชีส์บ่งชี้จำเป็นต้องมีความรู้ที่สามารถระบุสิ่งมีชีวิตได้ถึงระดับสปีชีส์ ระบบซาโปรเบียนได้รับความสนใจลดน้อยลงและหลายประเทศในทวีปยุโรปได้เลิกใช้ไปเมื่อประมาณกลางปีค.ศ. 1970 (Metcalf, 1989)

ระยะกลาง: แนวคิดเรื่องการพิจารณาชุมชนสัตว์ (Community approach)

เนื่องจากผลกระทบต่อแหล่งน้ำได้ส่งผลเสียหายรุนแรงขึ้น แต่แนวคิดเกี่ยวกับสปีชีส์บ่งชี้ไม่สามารถตอบสนองต่อการประเมินผลกระทบและติดตามคุณภาพแหล่งน้ำได้ดีพอ และแม้ว่าระบบซาโปรเบียนมีฐานแนวคิดจาก niche concept คือใช้ niche optimum (Saprobient value) และ niche breadth (การปรับค่า) ของความต้องการออกซิเจน (physiological niche dimension) แต่อาจมี niche อื่นๆ ที่มีผลต่อการแปรผล เช่น อุณหภูมิ และกระแสน้ำมีผลต่อความต้องการออกซิเจนของสัตว์น้ำ (Hynes, 1970) นั่นคือดัชนีซาโปรเบียนจะมีค่าสูงขึ้นตามค่าอุณหภูมิและลดต่ำลงตามความเร็วของน้ำที่ระดับมลพิษสารอินทรีย์ที่เท่ากัน (Statzer and Sperling, 1993) ดังนั้นจึงทำให้เกิดความลำเอียงได้ และระบบนี้ต้องใช้ความรู้ระดับสปีชีส์จึงทำให้มีข้อจำกัดเมื่อต้องการใช้ในเขตภูมิศาสตร์อื่นๆ และกับมลพิษที่มีสาเหตุอื่นๆ นอกเหนือจากมลพิษสารอินทรีย์ นักนิเวศวิทยาจึงได้ให้ความสนใจต่อแบบแผนของการเปลี่ยนแปลงความหลากหลายชนิดและความ

ชุมชนหรือโครงสร้างชุมชนทั้งหมดของสัตว์ โดยการพัฒนาดัชนีหลากหลายแบบและระบบค่าคะแนนเพื่อประเมินสภาพระบบนิเวศ (Guhl, 1987 อ้างใน Cairns and Pratt, 1993) วิธีการนี้เป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในทวีปยุโรป (Hellawell, 1989)

ดัชนีและระบบค่าคะแนนมีความหลากหลายและแตกต่างกันในแต่ละประเทศ ระบบค่าคะแนนของ Biological Monitoring Working Party (BMWP) ซึ่งดัดแปลงมาจาก Chandler Score (Chandler, 1970) ได้รับความนิยมมากที่สุด ระบบนี้ได้รับการพัฒนาในสหราชอาณาจักรเพื่อเป็นวิธีการมาตรฐานสำหรับดัชนีชีวภาพที่ใช้สำรวจแม่น้ำที่มีมลพิษ (National Water Council, 1981) ตัวอย่างสัตว์ถูกเก็บด้วยวิธีเชิงคุณภาพและการตรวจเอกลักษณ์ถึงระดับวงศ์ ยกเว้นกลุ่มของไส้เดือนน้ำจืดที่คงไว้เป็นกลุ่มใหญ่เช่นเดิม ค่าคะแนนจาก 1 ถึง 10 ถูกกำหนดให้กับสัตว์ในระดับวงศ์ โดยวงศ์ที่ไม่ทนทานต่อมลพิษมีคะแนนสูงกว่าสัตว์วงศ์ที่ทนทานต่อมลพิษได้มากกว่า (Amitage et al., 1983) ผลรวมของคะแนนของสัตว์ทั้งหมดที่พบในสถานีหนึ่ง ๆ คือ ค่าคะแนนรวมของสถานีนั่น ซึ่งหากมีหลายสถานีสามารถนำค่าคะแนนรวมของแต่ละสถานีมาเปรียบเทียบกัน สถานีที่มีค่าคะแนนมากกว่า แสดงว่ามีคุณภาพน้ำดีกว่า

ระบบค่าคะแนน BMWP ใช้ได้ดีและถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางสำหรับการติดตามคุณภาพน้ำทั่วสหราชอาณาจักร อย่างไรก็ตามได้มีข้อคิดเห็นว่าแมลงบางวงศ์มีความทนทานต่อมลพิษได้กว้าง (Cairns, 1982) และเพื่อลดความแปรปรวนจากผลของฤดูกาลและความกว้างของความทนทานในระดับวงศ์ ค่าคะแนน BMWP ได้ถูกดัดแปลงโดยหารคะแนนรวมด้วยจำนวนวงศ์ทั้งหมดที่พบในตัวอย่างนั้น ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ย เรียกว่า Average Score Per Taxa (ASPT) วิธีการของคะแนน BMWP ถูกดัดแปลงและนำมาใช้กับหลายประเทศนอกทวีป

ยุโรป เช่น แอฟริกา (Chutter, 1972) ออสเตรเลีย (Campbell, 1982; Chessman, 1995) และเอเชีย เช่น ประเทศอินเดีย (de Zwart and Trivedi, 1994) และประเทศไทย (Mustow, 1997; นฤมล แสงประดับ และคณะ, 2541) สำหรับที่ประเทศออสเตรเลียพบว่าสัตว์หลายวงศ์ที่ไม่มีในรายการของ BMWP และสัตว์หลายรายการใน BMWP ไม่พบในประเทศออสเตรเลีย ดังนั้นจึงได้มีการคิดรายชื่อขึ้นใหม่สำหรับใช้ในประเทศออสเตรเลียโดยเฉพาะ เรียกว่า SIGNAL (Stream Invertebrate Grade Number Average Level)

ในทางตรงกันข้าม ที่ทวีปอเมริกาเหนือนิยมใช้วิธีการเก็บตัวอย่างเชิงปริมาณ การวิเคราะห์ทางสถิติแบบซับซ้อน รวมทั้งดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพและการวัดเมตริก (metric) หลากหลายแบบ เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างชุมชนสัตว์ (Cairns and Pratt, 1993) การพิจารณาดัชนีความหลากหลายมีข้อแย้งในเรื่องการสูญเสียข้อมูลทางชีวภาพซึ่งเป็นตัวแทนในชุมชน (Green, 1974; Washington, 1984) เพราะเป็นตัวเลखรวมค่าเดียว ขณะที่ระบบค่าคะแนนที่นิยมใช้ในทวีปยุโรปแม้จะเป็นค่าตัวเลขเช่นกัน แต่ตัวเลขนั้นยังบ่งบอกถึงภาพรวมความทนทานของสัตว์ที่พบ ความนิยมการวิเคราะห์ผลในรูปดัชนีความหลากหลายลดลง นอกจากนี้การเก็บตัวอย่างเชิงปริมาณต้องใช้จำนวนซ้ำมากเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มากพอสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติ กระบวนการเหล่านี้ต้องใช้กำลังคนมาก มีค่าใช้จ่ายสูงและสิ้นเปลืองเวลาไม่เหมาะกับงานติดตามคุณภาพที่ต้องทำเป็นงานประจำ (Rosengberg and Resh, 1993)

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 เป็นต้นมา แนวคิดเกี่ยวกับระบบนิเวศของลำธารเปลี่ยนแปลงจากการวิเคราะห์โครงสร้างชุมชนเป็นการประเมินความสัมพันธ์ด้านพลังงาน (Minshall, 1988) นอกจากนี้มีแนวคิดใหม่ เช่น River Continuum Concept (Vannote et al., 1980), Stream Gradient, Functional

Feeding Groups (Cummins and Klung, 1979), Reference Condition และ Habitat Assessment เป็นต้น แนวคิดเหล่านี้ถูกนำมาใช้ในวิธีการติดตามทางชีวภาพ (Cairns and Pratt, 1993)

ระยะปัจจุบัน: การประเมินทางชีวภาพแบบเร็ว (Rapid Bioassessment)

เพื่อลดค่าใช้จ่ายและร่นระยะเวลาในวิธีเชิงปริมาณ วิธีการประเมินทางชีวภาพแบบเร็ว (Rapid Bioassessment) ได้ถูกพัฒนาขึ้น วิธีการประเมินทางชีวภาพแบบเร็วเป็นการรวมการประเมินแหล่งอาศัยคุณภาพน้ำและสภาพสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำนั้น โดยอาศัยหลักการว่าผลรวมของคุณภาพแหล่งอาศัยและคุณภาพน้ำเป็นตัวกำหนดสภาพสิ่งมีชีวิตในชุมชน วิธีการนี้ช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลา ขณะที่วิธีการสำรวจยังคงความเป็นวิทยาศาสตร์ สามารถสำรวจได้หลายพื้นที่ ได้ผลลัพธ์ที่รวดเร็วและง่ายต่อการเข้าใจได้ของผู้มีอำนาจในการตัดสินใจหรือบุคคลทั่วไปที่มีผู้เชี่ยวชาญ (Resh and Jackson, 1993) วิธีการประเมินทำโดยการเปรียบเทียบสภาพอ้างอิง (reference condition) หรือ สถานีอ้างอิง (reference sites) กับสถานีทดสอบ (test sites) โดยสถานีทั้งสองแบบนี้มีลักษณะต่าง ๆ คล้ายคลึงกัน (Resh et al., 1995; Barbour et al., 1996) สถานีอ้างอิงที่เป็นพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบนั้นหาได้ยาก ดังนั้นจึงต้องพยายามหาบริเวณที่ได้รับผลกระทบน้อยที่สุดแทน ในทางปฏิบัติมักใช้ผลจากการศึกษาที่มีผู้ทำมาก่อนเป็นแนวทางในการหาบริเวณที่จะใช้เป็นสภาพอ้างอิง (Hughes, 1995; Omernik, 1995) สภาพอ้างอิงอาจเป็นสถานที่จำเพาะเจาะจง (site specific) เช่น บริเวณต้นน้ำเปรียบเทียบกับบริเวณท้ายน้ำ (upstream vs downstream) หรือเป็นชุดบริเวณที่ไม่ถูกรบกวน (unimpaired sites) ซึ่งอยู่ใน

ภูมิภาค และมีแหล่งอาศัยแบบเดียวกัน ในสหราชอาณาจักรลักษณะของแหล่งอาศัยถูกใช้ในการทำนายสัตว์ที่คาดว่าจะพบในสถานียทดสอบ และการวิเคราะห์หลายตัวแปร (multivariate analysis) ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับโมเดลทำนาย (เช่น RIVPACS, AusRivAS และ BEAST) แต่การประเมินแหล่งอาศัยในประเทศสหรัฐอเมริกาถูกใช้เป็นเครื่องมือสำหรับจำแนกและแปรผลข้อมูลของสัตว์น้ำ รวมทั้งใช้บ่งชี้คุณภาพน้ำและระดับความเครียดในแหล่งอาศัยของชุมชนสัตว์ การวิเคราะห์นิยมใช้การวิเคราะห์เมตริกหลายแบบ (multimetrics analysis) (Resh et al., 1995) เทคนิคการวิเคราะห์หลายตัวแปรถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการประเมินทางชีวภาพแบบเร็วเนื่องจากมีอำนาจสูง (power) และสามารถใช้กับข้อมูลจำนวนมากๆ ได้

โปรโตคอลการประเมินทางชีวภาพแบบเร็วมีหลากหลาย แต่โปรโตคอลสำหรับชุมชนสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังน้ำดินและชุมชนปลา (Rapid Bioassessment Protocol for Macroinvertebrates and Fishes) ของ Plafkins et al. (1989) ได้รับความสนใจมากที่สุด เมตริกที่ใช้จำแนกได้ 5 ประเภท คือจำนวนชนิด (richness) ชุมชน (community) ความทนทานต่อมลพิษ (tolerance/intolerance) การหาอาหาร (Functional Feeding Groups) และแหล่งอาศัย (habitat) (Resh and Jackson, 1993) เมตริกเหล่านี้ถูกประเมินเพื่อหาความซ้ำซ้อน (redundancy) และความผันแปร (variability) เพื่อคัดเลือกให้เหลือเพียงเมตริกแกน (core metrics) เช่น กรณียของจำนวนชนิด (richness) ผลการวิเคราะห์มักพบว่า EPT richness (จำนวนชนิดของแมลงชีปะขาว แมลงสโตน ฟลาย และแมลงหนอนปลอกน้ำ) และ total taxa richness (จำนวนชนิดสิ่งมีชีวิตทั้งหมด) มีความซ้ำซ้อนกัน แต่เมตริกทั้งสองนี้สามารถใช้แยกความแตกต่างภายในกลุ่มย่อยได้ เป็นต้น (Barbour et al., 1992; Hannaford and Resh, 1995) วิธีประเมินทางชีวภาพ

แบบเร็วมีวัตถุประสงค์ข้อหนึ่ง คือ การลดระยะเวลา การทำปฏิบัติการลง คำถามที่เกิดขึ้นคือ จำนวน ขนาดของตัวอย่าง (sample size) ที่น้อยที่สุดสำหรับ ใช้ในโปรโตคอลควรเป็นเท่าไร ได้มีความพยายาม เพื่อกำหนดจำนวนสัตว์ที่จะนับให้พอเพียง ในโปรโตคอลที่ 3 (Rapid Bioassessment Protocol III) ใช้จำนวนนับคงที่ (fix-count) ของสัตว์จำนวน 100 ตัว ซึ่งได้มีข้อโต้แย้งและการศึกษาผลของการสุ่มตัวอย่างย่อย (subsampling) ต่อกระบวนการประเมินแบบเร็ว เช่น Courtermann (1996) ได้แย้งว่า กระบวนการเพื่อให้ได้จำนวนนับคงที่นี้ทำให้ขาดคุณค่าของการแปรผลด้านนิเวศไป และพบว่าเมื่อใช้จำนวนนับคงที่ 100 ตัวเกิดความลำเอียงขึ้น (Barbour et al., 1996; Growns et al., 1997; Somer et al., 1998; Sovell and Vodracek, 1999) Deberstein et al. (2000) สานิดว่าจำนวนนับคงที่ 100-300 ตัว ไม่เพียงพอต่อการประเมินผลและอาจนำไปสู่การสรุปผลที่ผิดพลาด Ostermiller and Hawkins (2004) รายงานว่าจำนวนนับคงที่ที่น้อยที่สุดควรเท่ากับหรือมากกว่า 350 ตัวเพื่อช่วยเพิ่มความแม่นยำและความไวต่อผลของโมเดลทำนาย Growns et al. (1997) และ Somer et al. (1998) มีความเห็นพ้องกันว่าจำนวนนับคงที่ที่มากนี้ช่วยเพิ่ม taxa richness ในการสุ่มตัวอย่างย่อย Barbour and Gerritsen (1996) ได้เสนอแนะว่า จำนวนนับคงที่ของการสุ่มตัวอย่างย่อยนั้นควรมีจำนวนอยู่ในร้อยละ 20 ของจำนวนนับเป้าหมาย (เช่น อยู่ระหว่าง 80-120 สำหรับจำนวนนับคงที่ 100 ตัว) ซึ่งโปรโตคอลของการประเมินทางชีวภาพแบบเร็วในประเทศสหรัฐอเมริกาได้แนะนำให้ใช้จำนวนนับคงที่ 100-500 ตัว แต่ทั้งนี้ต้องทดสอบก่อนว่า ผลการวิเคราะห์จำนวนใดดีที่สุด เพราะอาจได้ผลแตกต่างกันขึ้นกับพื้นที่

นอกเหนือจากจำนวนนับว่าควรเป็นเท่าไร แล้ว ได้มีการอภิปรายความสำคัญของสิ่งมีชีวิตที่พบเป็นจำนวนน้อยมากๆ ในการสำรวจ (rare

species) ซึ่งในการสุ่มตัวอย่างย่อยสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ อาจไม่ถูกเลือกขึ้นมา (เพราะมีโอกาสน้อยกว่าสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ที่มีจำนวนมากกว่า) หรือสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ มักถูกตัดทิ้งออกจากข้อมูลดิบก่อนการวิเคราะห์ข้อมูล ด้วยเหตุผลว่ามีผลน้อยต่อการวิเคราะห์ข้อมูล และอาจทำให้เกิด noise ต่อวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติ (Gauch, 1982) หรือสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ อาจไม่ถูกจับขึ้นมาจากพื้นที่เก็บตัวอย่างเมื่อมีการใช้ขนาดของตัวอย่างน้อยเกินไป (Cao et al., 1998) Cao et al. (2001) ได้เรียบเรียงเกี่ยวกับ rare species หรือสิ่งมีชีวิตที่มีจำนวนน้อยมากๆ ในตัวอย่าง ต่อผลการวิเคราะห์หลายตัวแปร และให้ความเห็นว่าการเอาสิ่งมีชีวิตที่พบเป็นจำนวนน้อยมากๆ นี้ออกจากการวิเคราะห์ทำให้ไม่สามารถวัดผลที่มีต่อสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ได้ นั่นคือความไวในการหาและวัดผลกระทบจะลดลง ซึ่งตรงกับความเห็นของ Ford (1989) Cao et al. (2001) ได้ชี้ให้เห็นถึงโมเดลหลายตัวแปร เช่น RIVPACS AusRivAS และ BEAST ซึ่งเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางในการใช้ประเมินผลกระทบด้านนิเวศและสุขภาพของระบบนิเวศในประเทศอังกฤษ ออสเตรเลีย และบางส่วนของแคนาดา ตามลำดับ วิธีการเก็บตัวอย่างของโมเดลทั้งสามนี้แตกต่างกัน คือ RIVPACS ใช้วิธีการเก็บตัวอย่างเชิงคุณภาพที่เก็บตัวอย่างสัตว์จากทุกแหล่งอาศัยและใช้สิ่งมีชีวิตทุกชนิด (taxa) ที่ได้จากการแยกตัวอย่างจากตะกอน ในระยะเวลา 2 ชั่วโมง ดังนั้นจำนวนตัวอย่างสัตว์ในโมเดลนี้จึงมาก AusRivAS ใช้ข้อมูลเชิงคุณภาพจากการแยกตัวอย่างเป็นเวลา 30 นาที และ BEAST ใช้ตัวอย่างเชิงปริมาณแต่เก็บปริมาณน้อย โมเดลสองอันหลังนี้ในขั้นต่อมาได้เอาสิ่งมีชีวิตที่มีจำนวนน้อยมากๆ ออก ดังนั้นข้อมูลบางอย่างอาจขาดหายไปในการวิเคราะห์ข้อมูล Turak et al. (1999) พบว่าโมเดล RIVPACS มีความไวเพิ่มขึ้นเมื่อรวมตัวอย่างสัตว์จากแหล่งอาศัยต่างกันและหลากหลายฤดูกาลเข้าด้วยกัน ก่อนทำการวิเคราะห์ข้อมูล นั่นคือ จำนวนตัวอย่าง

ที่มากช่วยเพิ่มความไวของโมเดลทำนาย ในการประเมินทางชีวภาพความคลาดเคลื่อนตามทฤษฎีที่อาจเกิดขึ้นได้มี 2 แบบ คือ ความคลาดเคลื่อนแบบที่ 1 ได้ผลว่า มีผลกระทบแต่ในความเป็นจริงไม่มี และความคลาดเคลื่อนแบบที่ 2 ได้ผลว่าไม่มีผลกระทบแต่ในความเป็นจริงมีผลกระทบเกิดขึ้น ซึ่งเทคนิคการประเมินทางชีวภาพที่แข็งแกร่ง (robust) ควรให้เกิดความคลาดเคลื่อนทั้งสองแบบนี้ให้น้อยที่สุด การตัดสิ่งมีชีวิตที่มีจำนวนน้อยมากๆ ออกไปอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนแบบที่ 2 ได้ สิ่งมีชีวิตที่พบเป็นจำนวนน้อยมากๆ นี้อาจช่วยเพิ่มความเที่ยงตรงและความไวแก่โมเดลทำนายถ้าส่วนมากมีการตอบสนองทางบวกต่อผลกระทบ (Hawkins et al., 2000) สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอย่างหนึ่งคือ สิ่งมีชีวิตที่มีจำนวนน้อยมากๆ นี้อาจไม่มีผลต่อการแยกสถานะในการวิเคราะห์พื้นที่ช่วงภูมิศาสตร์กว้าง เช่น ระดับภูมิภาค กรณีมีมลพิษมากหรือความแตกต่างของสิ่งแวดล้อมเด่นชัด เพราะข้อมูลของสิ่งมีชีวิตที่พบเป็นจำนวนมากหรือพบบ่อย (abundant species) เพียงพอต่อการแยกความแตกต่างได้ แต่อาจมีผลต่อการวิเคราะห์พื้นที่ในระดับท้องถิ่น หรือในกรณีที่ระดับมลพิษหรือความแตกต่างของสิ่งแวดล้อมไม่เด่นชัด ดังนั้น การเก็บตัวอย่างให้ได้จำนวนมากจึงเป็นวิธีที่จะทำให้สิ่งมีชีวิตที่มีจำนวนน้อยมากๆ หรือพบไม่บ่อยไม่สูญหายไปเมื่อทำการสุ่มตัวอย่างย่อย (Cao et al., 2001) Robeni et al. (1999) ได้สรุปว่าการเลือกอาหารที่ดีเพียงหนึ่งตอนใช้เป็นตัวแทนของอาหารทั้งสายได้ และอนุกรมวิธานระดับวงศ์เพียงพอสำหรับการจัดจำแนกอาหารในระดับภูมิภาคที่กว้าง (Hewlett, 2000) จนถึงปัจจุบันวิธีการประเมินทางชีวภาพแบบเร็วได้รับการทดสอบว่าใช้ทำนายหรือทดสอบผลกระทบที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์และวัฏระดับมลพิษที่เกิดจากมนุษย์ได้ (เช่นใน Maret et al., 2003; Sloane and Norris, 2003; Weigel, 2003) และเนื่องจากวิธีการนี้ไม่มีจำนวนซ้ำ (replicate) จึงไม่สามารถ

ตรวจสอบความคลาดเคลื่อนได้ Hose et al. (2004) ได้ตรวจสอบความผันแปรของการประเมินทางชีวภาพแบบเร็วในโมเดล AusRivAS ในลำธารที่ไม่ถูกรบกวน 2 สายที่ประเทศออสเตรเลียเป็นระยะเวลา 4-6 สัปดาห์ พบว่าการมีซ้ำทำให้ค่า CI ลดลงเพิ่มความน่าเชื่อถือของสัดส่วน O/E taxa (O คือสัตว์ที่พบจริง E คือสัตว์ที่คาดว่าจะพบ) สัดส่วนนี้ไม่เปลี่ยนแปลงในระยะเวลา 4-6 สัปดาห์ และจำนวน 4 ซ้ำ เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ แต่การมีซ้ำทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณและเวลา ซึ่งการใช้วิธีการประเมินทางชีวภาพแบบเร็วหน่วยงานนั้นควรมีการประเมินความพอดีระหว่างความสามารถในการแยกแยะ (power of resolution) กับความคุ้มค่า (cost effectiveness) (Barbour et al., 1999) อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการทดสอบเรื่องจำนวนซ้ำในสถานียทดสอบหรือกับโมเดลอื่น ๆ

วิธีการอื่น ๆ ในปัจจุบัน

นอกจากวิธีการประเมินแบบเร็วแล้ว ยังมีวิธีประเมินแบบอื่นๆ อีก เช่น Biomarkers, Bioassay, Fluctuating Asymmetry และ Leaf Litter Decay เป็นต้น

Biomarkers เป็นการวัดด้านชีวเคมีบ่งถึงการตอบสนองระดับโมเลกุล เซลล์ หรือเนื้อเยื่อ ต่อความเป็นพิษในระดับที่ไม่ถึงตาย สิ่งมีชีวิตที่ใช้มักเป็นสัตว์พวกกรองกิน (filter feeder) เช่นตัวอ่อนแมลงหนอนปลอกน้ำวงศ์ Hydropsychidae หอยสองฝา (Lecoeur et al., 2004) และฟองน้ำ (Efremova et al., 2002) เป็นต้น หรือพวกอาศัยในโคลน (Downs, et al., 2001) เนื่องจากสิ่งมีชีวิตเหล่านี้มีกลไกให้น้ำผ่านเข้าไปในร่างกายเป็นจำนวนมากเพื่อกรองอาหารออกจากร่างกายจึงมีโอกาสสะสมสารพิษที่ละลายน้ำหรือสารพิษที่แขวนลอยในน้ำที่พวกมันอาศัยอยู่มากกว่าสิ่งมีชีวิตกลุ่มอื่นๆ โปรตีนหลายชนิดในร่างกายสิ่งมีชีวิตถูกชักนำให้มีการสร้างมากขึ้นเมื่อสิ่งมี

ชีวิตอยู่ในสภาวะเครียด เช่น heat shock protein Hsp70, DnaJ protein, glucose-regulated protein GRP 78, ubiquitin, 14-3-3 protein thioredoxin, mixed-function oxidases, acetylcholinesterase, cellulase/carbohydrase, genotoxicity, ion regulation, stress protein หรือ oxidative stress responses เป็นต้น ซึ่งโปรตีนเหล่านี้จะมีมากขึ้นเมื่อสิ่งมีชีวิตอาศัยอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีการสะสมโลหะหนัก หรือมลพิษอื่นๆ อย่างไรก็ตามการชักนำให้สร้างโปรตีนของสิ่งมีชีวิตชนิดเดียวกันอาจแตกต่างกันเมื่อมลพิษแตกต่างกัน (Chapman, et al., 1982a&b; Lecoecur, et al., 2004) วิธีการนี้ยังใหม่และต้องการการวิจัยเพิ่ม

Bioassays หรือ Toxicity test การทดสอบความเป็นพิษ เป็นการประเมินผลของสารพิษต่อการรอดชีวิต การเจริญ อัตราการกินอาหาร การเข้าคักแต่ การกลายเป็นตัวเต็มวัย พฤติกรรม รูปร่างลักษณะ หรือ การสืบพันธุ์ ของสิ่งมีชีวิต งานวิจัยส่วนมากให้ข้อมูลเกี่ยวกับการทดสอบความเป็นพิษเฉียบพลัน และความเป็นพิษเรื้อรัง ซึ่งอาจเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการหรือการทดสอบภาคสนาม ใช้สิ่งมีชีวิตชนิดเดียวหรือสิ่งมีชีวิตหลายชนิด ปัจจุบันการประเมินความเสี่ยงได้พัฒนาถึงการทดสอบระดับชุมชน และใช้เมทริกหลายชนิดช่วยในการวิเคราะห์ ผล การทดสอบความเป็นพิษมีความไวต่อสารพิษจึงอาจเป็นตัวบ่งชี้ที่เหมาะสมสำหรับมลพิษที่เกิดจากสารพิษเท่านั้น แต่ยังไม่มีการทดสอบกับมลพิษอื่นที่ไม่ใช่สารพิษ

Fluctuating Asymmetry การประเมินด้วยวิธีนี้เป็นวิธีการประเมินการที่สิ่งแวดล้อมถูกรบกวนแล้วมีผลต่อพัฒนาการของรูปร่างลักษณะของสิ่งมีชีวิต ซึ่งปกติควรมีลักษณะสมมาตรแบบครึ่งซีก (bilateral symmetry) (เช่นใน Leung et al, 2000; Dobrin and Corkum, 1999; Clarke, 1993; Clarke et al, 1995) กลไกหนึ่งที่น่าจะเป็นไปได้คือ สิ่งมีชีวิตต้องการพลังงานในการรับมือกับความเครียดซึ่งทำให้

พลังงานที่ต้องการใช้สำหรับการเจริญ การพัฒนาการ และการสืบพันธุ์ลดลง ซึ่งในท้ายที่สุดมีอิทธิพลต่อประชากร (Sommer, 1996) สิ่งมีชีวิตที่มีศักยภาพใช้ในการประเมินด้วยวิธีนี้คือ แมลงชีปะขาว แมลงปอ มวน แมลงหนอนปลอกน้ำ และ แมลงสองปีก ลักษณะที่ใช้พิจารณาได้แก่ ขนาดปีก เส้นปีก ความยาวของข้อขา ฟอรัมของตัวเต็มวัยแมลงชีปะขาว เพศผู้ และสีฟันของส่วนปาก เป็นต้น โดยมักพบว่า สิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในสถานที่ที่มีมลพิษสะสมมักแสดงลักษณะของ fluctuating asymmetry แต่ปัญหาที่พบบ่อยคือ การตรวจวัดในภาคสนามทำได้ยาก ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของสารพิษหรือมลพิษในสิ่งแวดล้อมไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้อย่างมีนัยสำคัญ และลักษณะไม่สมมาตรนี้อาจเกิดจากสาเหตุอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ การแสดงออกของลักษณะพันธุกรรมของประชากร ในสัตว์มีกระดูกสันหลัง เช่น กบ พบว่า ความผิดปกติของพัฒนาการระยะลูกออด นอกจากเกิดขึ้นจากมลพิษแล้ว สภาพการเลี้ยงก็ชักนำให้เกิดความผิดปกติได้เช่นกัน แต่การอาศัยอยู่ในน้ำที่มีสารพิษ หรือสารกำจัดศัตรูพืช ทำให้เปอร์เซ็นต์ความผิดปกติมีมากและเกิดขึ้นมากขึ้น (Cooke, 1981)

Leaf Litter Decay เป็นวิธีการประเมินการทำงานของระบบนิเวศ เนื่องจากการสลายเศษซากใบไม้ในแหล่งน้ำไหลเกิดจากกิจกรรมของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังหน้าดินและจุลินทรีย์ เกี่ยวข้องโดยตรงกับห่วงโซ่อาหารในลำธาร คุณภาพของน้ำที่เสื่อมลงเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ทำให้ความซับซ้อนของห่วงโซ่อาหารในธรรมชาติลดลงส่งผลให้อัตราการสลายซากช้าลงกว่าปกติ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอัตราการสลายของซากจึงอาจคาดเดาได้เมื่อมีการรบกวนจากกิจกรรมของมนุษย์ วิธีการคือ ศึกษาอัตราการสลายของเศษซากใบไม้โดยใส่ไว้ในถุงตาข่ายที่มีขนาดใหญ่พอให้สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังหน้าดินเข้าไปได้ อย่างไรก็ตามลักษณะทาง

ธรรมชาติของลำธาร เช่น อุณหภูมิ และกระแสน้ำมีผลต่ออัตราการสลายซึ่งผู้ประเมินต้องวางแผนให้ถูกรอบวงจากปัจจัยเหล่านี้น้อยที่สุด

สรุป

การประเมินคุณภาพแหล่งน้ำด้วยสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังหน้าดินมีพัฒนาการที่ยาวนานเกือบศตวรรษ Bonada et al. (2006) ใช้เกณฑ์ 12 ข้อ เปรียบเทียบวิธีหลักๆ ตั้งแต่ระบบซาโปรเบียนจนถึงที่ใช้ในปัจจุบันเพื่อหาวิธีการประเมินที่จะบรรลุวัตถุประสงค์ของการประเมินผลกระทบจากกิจกรรมมนุษย์ที่สุด แต่ละวิธีมีข้อเด่นและข้อจำกัดแตกต่างกัน การเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นกับวัตถุประสงค์และความเหมาะสมด้านต่างๆ ระบบซาโปรเบียนมีข้อจำกัดมากที่สุดในการใช้ประเมินผลกระทบที่มาจากมนุษย์ เทคนิคชีวโมเลกุลจะมีบทบาทมากขึ้น และนอกจากการใช้สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังหน้าดินโดยตรงในการประเมินทางชีวภาพแล้ว การศึกษาชนิดของจุลินทรีย์ที่เจริญบนตัวสัตว์เหล่านี้ได้แสดงให้เห็นว่ามีศักยภาพสำหรับใช้ประเมินคุณภาพน้ำได้ (Lemly, 1998) สำหรับประเทศไทยวิธีการประเมินคุณภาพแหล่งน้ำจืดของทางราชการใช้วิธีวิเคราะห์ทางเคมีเป็นหลัก วิธีทางชีวภาพที่ใช้ร่วมด้วยคือ การวิเคราะห์แบคทีเรียจำนวนโคลิฟอร์มทั้งหมดและจำนวนฟิคอลโคลิฟอร์ม ส่วนในภูมิภาคลุ่มแม่น้ำโขงปัจจุบันคณะกรรมการลุ่มแม่น้ำโขง (The Mekong River Commission-MRC) ได้ริเริ่มงานวิจัยหาวิธีการสำหรับการประเมินทางชีวภาพของแม่น้ำโขงและแม่น้ำสาขา (Campbell, et al., 2005) เพื่อหาศักยภาพและทดสอบตัวบ่งชี้สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังหน้าดิน แพลงก์ตอน สาหร่าย (Peerapornpisal and Kunpradid, 2005) และกระบวนการของระบบนิเวศ (Parnrong, 2005) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในอนาคตอันใกล้การประเมินด้วยวิธีทางชีวภาพอาจมีบทบาทมากขึ้นในการประเมินคุณภาพแหล่งน้ำจืดของประเทศสมาชิก

เอกสารอ้างอิง

- นฤมล แสงประดับ. 2542. "นาฬิกาสัตว์หน้าดิน" ทางเลือกของการดูแลเฝ้าระวังคุณภาพแหล่งน้ำโดยชุมชนท้องถิ่น. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 27(4): 279-287.
- นฤมล แสงประดับ ขรรยงค์ อินทร์ม่วง ชุติมา หาญจวนิช และอุไรวรรณ อินทร์ม่วง. (2541). ดัชนีชีวภาพสำหรับการจัดจำแนกคุณภาพน้ำทางชีววิทยาในลุ่มน้ำพองด้วยสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังหน้าดิน. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 26(4): 289-304.
- Amitage, P.D., Moss, D., Wright, J.F. and Furse, M.T. (1983). The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrate over a wide range of unpolluted running-water sites. *Water Research* 17: 333-347.
- Barbour, M.T. and Gerritsen, J. (1996). Subsampling of benthic samples: a defense of the fixed-count method. *Journal of the North American Benthological Society* 15(3):386-391.
- Barbour, M.T., Gerritsen, J., Frydenberg, R., McCarron, E., White, J.S. and Bastian, M.L. 1996. A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society* 15(2):185-211.
- Barbour, M.T., Gerritsen, J., Snyder, B.D. and Stribling, J.B. (1999). Rapid bioassessment protocol for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish. 2nd edition. EPA 841-B-99-002. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington.

- Barbour, M.T., Plafkin, J.L., Bradley, B.P., Graves, C.G. and Wisseman, R.W. (1992). Evaluation of EPAs rapid bioassessment benthic metrics: metric redundancy and variability among reference stream sites. *Environmental Toxicology and Chemistry* 11(4): 437-449.
- Bonada, N., Prat, N., Resh, V.H. and Statzner, B. (2006). Developments in aquatic insect biomonitoring: A comparative analysis of recent approaches. *Annual Review Entomology* 51:495-523.
- Cairns, J. Jr. (1982). Freshwater protozoan communities. Page 249-285. In: Bull, A.T. and Watkinson, A.R.K. (eds) *Microbial Interactions and communities*, vol.I Academic Press, London.
- Cairns, J.Jr., and Pratt, J.R. (1993). A history of biological monitoring using benthic macroinvertebrates. Page 10-27. In: Rosenberg, D.M. and Resh, V.H. (eds) *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates*. Chapman & Hall, New York.
- Campbell, I.C. (1982). Biological water quality monitoring: an Australian viewpoint. Page 39-66. in Hart, B.T.(ed) *Water quality management. Monitoring program and diffuse runoff*. Water Studies Centre, Chisholm Institute of Technology and Australian Society for Limnology, Melbourne.
- Campbell, I.C., Resh, V.H. and Chessman, B. (2005). Assessing Ecological Health of large tropical rivers in developing regions: a case study from the Mekong. Abstract 2005 Joint Assembly, New Orleans LA, 23-27 May 2005, p.278.
- Cao, Y., Williams, D.D. and Williams, N.E. (1998). How important are rare species in aquatic community ecology and bioassessment? *Limnology Oceanography* 43: 1403-1409.
- Cao, Y., Larsen, D.P. and Thorne, R.St-J. (2001). Rare species in multivariate analysis for bioassessment: some considerations. *Journal of the North American Benthological Society* 20(1): 144-153.
- Chandler, J.R. (1970). A biological approach to water quality management. *Water Pollution Control* 69: 415-421.
- Chapman, P.M., Farrel, M.A. and Brinkhurst, R.O. (1982a). Relative tolerances of selected aquatic oligochaetes to individual pollutants and environmental factors. *Aquatic Toxicology* 2(1):47-67.
- Chapman, P.M., Farrel, M.A. and Brinkhurst, R.O. (1982b). Relative tolerances of selected aquatic oligochaetes to combinations of pollutants and environmental factors. *Aquatic Toxicology* 2(1):69-78.
- Chessman, B.C. (1995). Rapid assessment of river using macroinvertebrates: A procedure based on habitat-specific, sampling, family level identification and a biotic index. *Australian Journal of Ecology* 20: 122-129.
- Chutter, F.M. (1972). An empirical biotic index of the quality of water in South African streams and rivers. *Water Research* 6: 19-30.
- Clarke, G.M. (1993). Fluctuating asymmetry of invertebrate populations as a biological indicator of environmental quality. *Environmental Pollution* 82:207-211.

- Clarke, G.M., Arthington, A.H. and Pusey, B.J. (1995). Fluctuating asymmetry of chironomid larvae as an indicator of pesticide contamination in freshwater environments. Page 101-109. In: Cranston, P. (ed.) Chironomids: from genus to ecosystems. CSIRO, Australia.
- Cooke, A.S. (1981). Tadpoles as indicators of harmful levels of pollution in the field. Environmental Pollution Series A. Ecological and Biological 25(2):123-133.
- Courtermann, D.L. (1996). Commentary on the subsampling procedures used for rapid bioassessments. Journal of the North American Benthological Society 15(3): 381-385.
- Cummins, K.W. and Klum, M.J. 1979. Feeding ecology of stream invertebrates. Annual Review of Ecology and Systematics 10:147-172.
- de Zwart, D. and Trivedi, R.C. (1994). Manual on integrated water quality evaluation. Report 802023003. National Institute of Public Health and Environmental Protection (RIVM), Bilthoven, The Netherlands.
- Doberstein, C.P., Karr, J.R. and Conquest, L.L. (2000). The effect of fixed-count subsampling on macroinvertebrate biomonitoring in small streams. Freshwater Biology 44: 355-371.
- Dobrin, M. and Corkum, L.D. (1999). Can fluctuating asymmetry in adult burrowing mayflies (*Hexagenia rigida*, Ephemeroptera) be used as a measure of contaminant stress?. Journal Great Lakes Research 25(2):339-346.
- Downs, C.A., Dillon Jr., R.T., Fauth, J.E. and Woodley, C.M. (2001). A molecular biomarker system for assessing the health of gastropods (*Ilyanassa absoleta*) exposed to natural and anthropogenic stressors. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 259:189-214.
- Efremova, S. M., Margulis, B. A., Guzhova, I. V., Itskovich, V.B., Lauenroth, S., Muller, W.E.G., and Schroder, H.C. (2002). Heat shock protein Hsp70 expression and DNA damage in Baikalian sponges exposed to model pollutants and wastewater from Baikalsk Pulp and paper Plant. Aquatic Toxicology 57:267-280.
- Ford, J. (1989). The effects of chemical stress on aquatic species composition and community structure. Pages 99-144 in Levin, S.A., Harwell, M.A., Kelly, J.R. and Kimball, K.D. (eds). Ecotoxicology: Problems and approaches. Springer-verlag, New York.
- Gauch, H.G. (1982). Multivariate analysis in community ecology. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Green, R.H. (1974). Sampling design and statistical methods for environmental biologists. John Wiley, New York.
- Growns, J.E., Chessman, B.C., Jackson, J.E. and Ross, D.G. (1997). Rapid assessment of Australian river using macroinvertebrates: cost and efficiency of 6 methods of sampling processing. Journal of the North American Benthological Society 16: 682-693.

- Guhl, W. (1987). Aquatic ecosystem characterization by biotic indices. *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie* 72: 431-455.
- Hannaford, M.J. and Resh, V.H. (1995). Variability in macroinvertebrate rapid-bioassessments in a northern surveys and habitat assessments in a northern California stream. *Journal of the North American Benthological Society* 14(3): 430-439.
- Hawkins, C.P., Norris, R.H., Gerritsen, J., Hughes, R.M., Jackson, S.K., Johnson, R.K. and Stevenson, R.J. (2000). Evaluation of the use of landscape classifications for the prediction of freshwater biota: synthesis and recommendations. *Journal of the North American Benthological Society* 19(3): 541-556.
- Hellawell, J.M. (1989). Biological indicator of freshwater pollution and environmental management. Elsevier Applied Science, London.
- Hewlett, R. (2000). Implications of taxonomic resolution and sample habitat for stream classification at a broad geographic scale. *Journal of the North American Benthological Society* 19(4): 352-361.
- Hose, G., Turak, E. and Waddel, N. (2004). Reproducibility of AUSRIVAS rapid bioassessments using macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society* 23(1):126-140.
- Hughes, R.M. (1995). Defining acceptable biological status by comparing with reference conditions. Page 31-47. In: Davis, W.S. and Simon, T.P. (eds) *Biological assessment and criteria. Tools for water resource planning and decision making*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Hynes, H.B.N. (1960). *The biology of polluted waters*. Liverpool University Press, Liverpool.
- Hynes, H.B.N. (1970). *The ecology of running waters*. University Toronto Press, Toronto.
- Johnson, R.K., Wiederholm, T. and Rosenberg, D.M. 1993. Freshwater biomonitoring using individual organisms, populations and species assemblages of benthic macroinvertebrates. Page 40-158. In: Rosenberg, D.M. and Resh, V.H. (eds) *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates*. Chapman & Hall, New York.
- Kolkwitz, R. and Marsson, M. (1909). *Ökologie der tierischen Saprobien. Beiträge zur Lehre von der biologischen Gewässerbeurteilung*. Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie und Hydrographie 2: 126-152.
- Lecoeur, S., Videmann, B. and Berny, Ph. (2004). Evaluation of metallothionein as a biomarker of single and combined Cd/Cu exposure in *Dreissena polymorpha*. *Environmental Research* 94:184-191.
- Lemly, A.D. (1998). Bacterial growth on stream insects: potential for use in bioassessment. *Journal of the North American Benthological Society* 17(2): 228-238.
- Leung, B., Forbes, M.R. and Houle, D. (2000). Fluctuating asymmetry as a bioindicator of stress: Comparing efficacy of analyses involving multiple traits. *The American Naturalist* 155(1): 101-115.

- MacArthur, R.H. and Wilson, E.O. (1967). The theory of island biogeography. Princeton University Press, Princeton.
- Maret, T.R., Cain, D.J., MacCoy, D.E. and Short, T.M. (2003). Response of benthic invertebrate assemblages to metal exposure and bioaccumulation associated with hard-rock mining in northwestern streams, USA. *Journal of the North American Benthological Society* 22(4): 598-620.
- Metcalfe, J.L. (1989). Biological water quality assessment of running waters based on macroinvertebrate communities: history and present status in Europe. *Environmental Pollution* 60: 101-139.
- Minshall, G.W. (1988). Stream ecosystem theory: a global perspective. *Journal of the North American Benthological Society* 7(4): 263-288.
- Mustow, S.E. (1997). Aquatic macroinvertebrates and environmental quality of rivers in northern Thailand. Ph.D. Thesis. University of London.
- National Water Council. (1981). River quality: the 1980 survey and future outlook. National Water Council, London.
- Omernik, J.M. (1995). Ecoregions: A Spatial Framework for Environmental management. Page 49-62. In: Davis, W.S. and Simon, T.P. (eds) *Biological assessment and criteria*. Lewis Publishers, Boca Raton.
- Ostermiller, J.D. and Hawkins, C. (2004). Effects of sampling error on bioassessments of stream ecosystems: application to RIVPACS-type models. *Journal of the North American Benthological Society* 23(2): 363-382.
- Parnrong, S. (2005). Ecological Health Assessment for the Mekong basin: Primary productivity and phytoplankton composition. 2005 Joint Assembly, New Orleans LA, 23-27 May 2005. Abstract. p.287.
- Peerapornpisal, Y. and Kunpradid, T. (2005). Ecological health monitoring of the Mekong River by using benthic algae in 2003-2004. Abstract. 2005 Joint Assembly, New Orleans LA, 23-27 May 2005, p.302.
- Plafkin, J.L., Barbour, M.T., Porter, K.D., Gross, S.K. and Hughes, R.M. (1989). Rapid bioassessment protocols for use in streams and rivers. Benthic macroinvertebrates and fish. EPA/444/4-89-001. Office of Water Regulations and Standards, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- Resh, V.H. and Jackson, J.K. (1993). Rapid assessment approaches to biomonitoring using benthic macroinvertebrates. Page 195-233. In: Rosenberg, D.M. and Resh, V.H. (eds) *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates*. Chapman & Hall, New York.
- Resh, V.H., Norris, R.H. and Barbour, M.T. (1995). Design and implementation of rapid assessment approaches for water resource monitoring using benthic macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society* 20(2): 180-121.
- Roback, S.S. (1974). Insects (Arthropoda: Insecta). Page 313-376. In: Hart, C.W. and Fuller, S.L.H. (eds) *Pollution ecology of freshwater invertebrates*. Academic Press, New York.

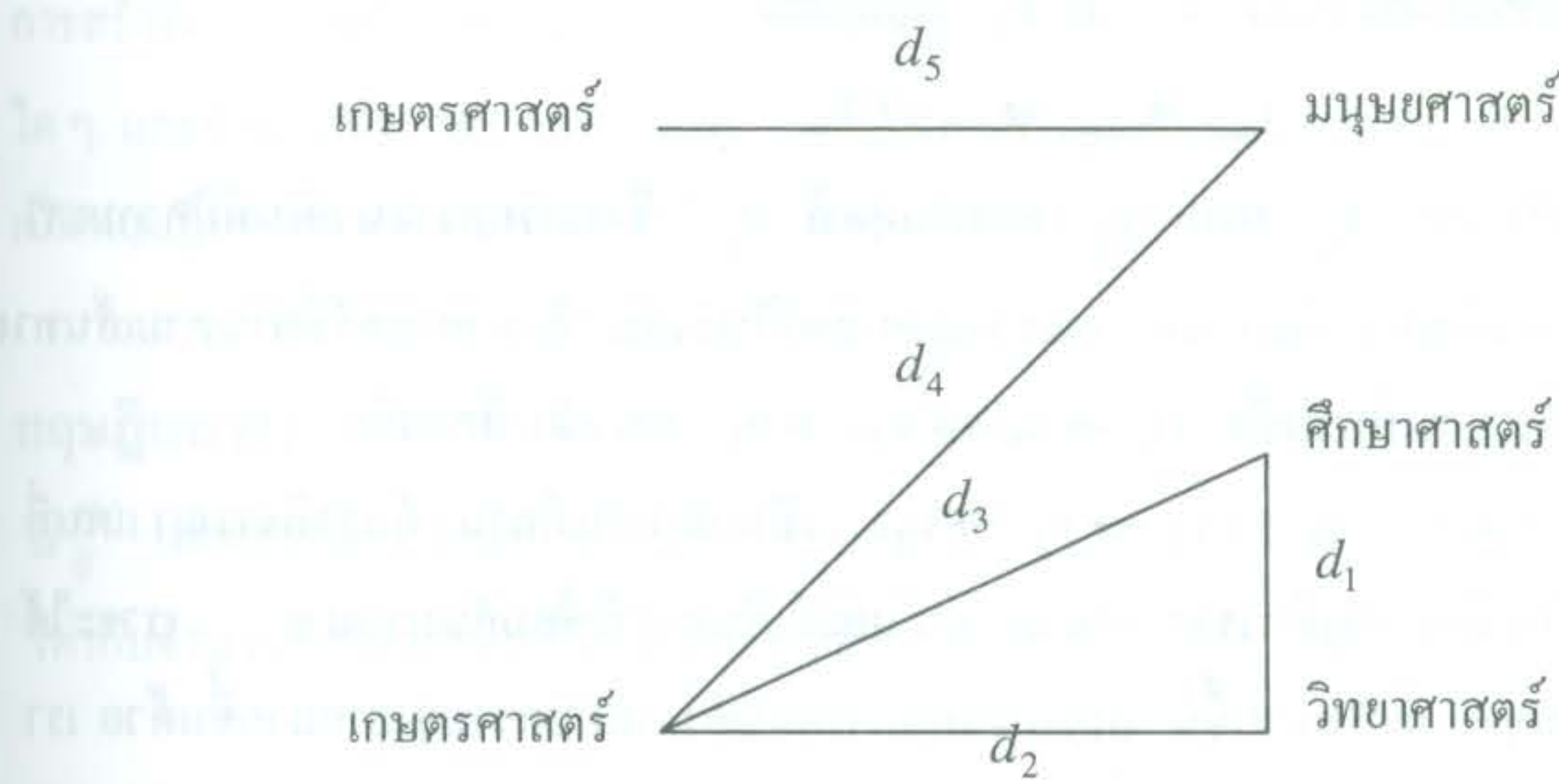
- Robeni, C.F., Wang, N. and Sarver, R.J. (1999). Evaluating adequacy of the representative stream reach used in invertebrate monitoring programs. *Journal of the North American Benthological Society* 18(3): 284-291.
- Rosenberg, D.M. and Resh, V.H. (1993). Introduction. Pp. 1-9. In Rosenberg, D.M. and Resh, V.H. (eds) *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates*. Chapman & Hall, New York.
- Sloane, P.I.W. and Norris, R.H. (2003). Relationship of AUSRIVAS-based macroinvertebrate predictive model outputs to a metal pollution gradient. *Journal of the North American Benthological Society* 22(3): 457-471.
- Somer, K.M., Reid, R.A. and David, S.M. (1998). Rapid biological assessments: How many animals are enough? *Journal of the North American Benthological Society* 17(3): 348-358.
- Sommer, C. (1996). Ecotoxicology and developmental stability as an in situ monitor of adaptation. *Ambio* 25:374-376.
- Sovell, L.A. and Vodracek, B. (1999). Evaluation of the fixed-count method for Rapid Bioassessments: how many animals are enough? *Journal of the North American Benthological Society* 17: 420-426.
- Statzner, B. and Sperling, F. (1993). Potential contribution of system-specific knowledge (SSK) to stream management decisions: ecological and economic aspects. *Freshwater Biology* 29:313-342.
- Turak, E., Flack, L.K., Norris, R.H., Simpson, J. and Waddell, N. (1999). Assessment of river condition at a large spatial scale using predictive models. *Freshwater Biology* 41: 283-298.
- Vannote, R.L., Minshall, G.W., Cumins, K.W., Sedall, J.R. and Cushing, C.E. (1980). The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 37: 130-137.
- Washington, H.G. (1984). Diversity, biotic and similarity indices. A review with special relevance to aquatic ecosystems. *Water Research* 18: 653-694.
- Weigel, B.M. (2003). Development of stream macroinvertebrate models that predict watershed and local stressors in Wisconsin. *Journal of the North American Benthological Society* 22(1): 123-142.



เมตริกซ์กับจำนวนเส้นทาง

ธวัช ช่างฝัสน'

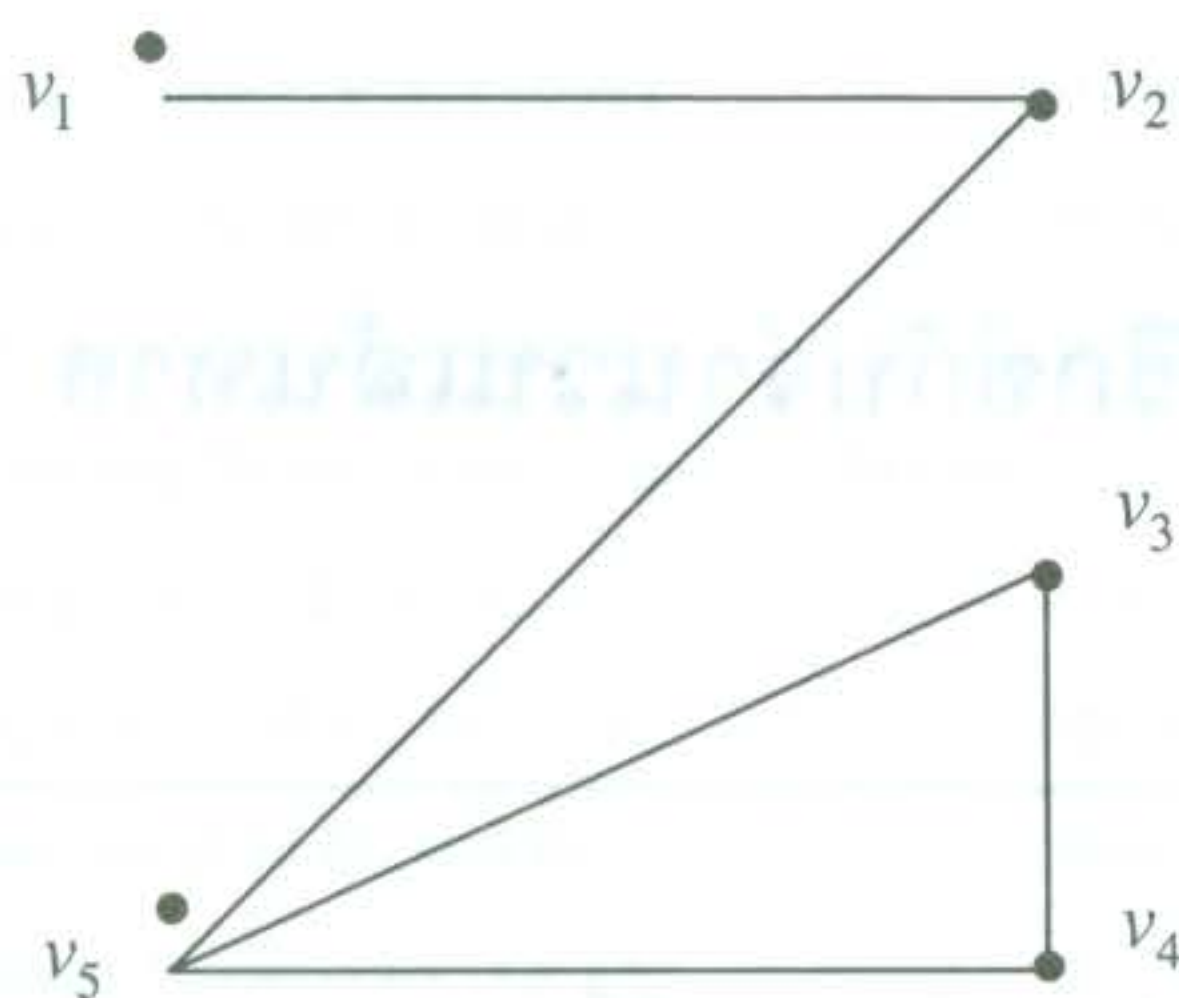
การเดินทางจากที่พักไปยังที่ทำงาน โดยเฉพาะที่ซึ่งการจราจรหนาแน่น การเลือกใช้เส้นทางมักจะขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นทางมากกว่าระยะทางที่แตกต่างกัน บทความนี้จะกล่าวถึง บทประยุกต์ของเมตริกซ์ กล่าวคือ จะแสดงการใช้เมตริกซ์ เพื่อศึกษาจำนวนแนวเดินทางที่ผ่านเส้นทางด้วยจำนวนที่จำกัด พิจารณาผังซึ่งแสดงถึงตำแหน่งของคณะ โดยมีเส้นแสดงถึงเส้นทางที่เชื่อมระหว่างคณะดังนี้



ถ้าต้องการเดินทางจากคณะวิทยาศาสตร์ไปยังคณะศึกษาศาสตร์ เราอาจตั้งคำถามว่า จำนวนแนวเดินที่ต้องผ่านเส้นทาง 3 เส้นทางมีกี่แนวเดิน ถ้าต้องการเดินทางจากคณะวิทยาศาสตร์ไปยังคณะเกษตรศาสตร์ เราอาจตั้งคำถามได้ดังนี้ จำนวนแนวเดินที่ต้องผ่านเส้นทาง 3 เส้นทางมีกี่แนวเดิน และจำนวนแนวเดินที่ต้องผ่านเส้นทาง 2 เส้นทางมีกี่แนวเดิน

จากทฤษฎีกราฟเบื้องต้น [1] กราฟจะประกอบไปด้วยเซตของจุด โดยทั่วไปจะแทนด้วย V และเซตของเส้นที่เชื่อมระหว่างจุด จะแทนด้วย E จากแผนผังข้างต้น จะได้กราฟดังรูป

¹ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002



เมื่อ $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ และ

$$E = \{ \{v_1, v_2\}, \{v_2, v_5\}, \{v_3, v_4\}, \{v_3, v_5\}, \{v_4, v_5\} \}$$

โดยที่ $\{v_i, v_j\}$ แทนเส้นที่เชื่อมระหว่าง v_i กับ v_j สัญลักษณ์

$$v_{i_0} \rightarrow v_{i_1} \rightarrow \dots \rightarrow v_{i_k}$$

จะแทนวิธีการเดินทางโดยเริ่มจาก v_{i_0} ผ่าน v_{i_1} และสิ้นสุดที่ v_{i_k} ซึ่งจะเรียกว่าแนวเดินที่มีความยาว k จากกราฟจะเห็นได้ว่าแนวเดินที่จะเดินทางจากคณะวิทยาศาสตร์ไปยังคณะศึกษาศาสตร์ที่ผ่านสามเส้นทาง มีได้สามแนวเดิน ดังนี้ แนวเดินที่หนึ่งคือ $v_4 \rightarrow v_5 \rightarrow v_4 \rightarrow v_3$ แนวเดินที่สองคือ $v_4 \rightarrow v_3 \rightarrow v_4 \rightarrow v_3$ และ $v_4 \rightarrow v_3 \rightarrow v_5 \rightarrow v_3$ เป็นแนวเดินที่สาม ถ้าเราพิจารณาแผนที่ของกรุงเทพมหานครหรือในเมืองใหญ่ที่มีการจราจรหนาแน่น และมีเส้นทางที่เชื่อมกันมากมาย เราจะได้กราฟที่ประกอบด้วยจำนวนจุดและเส้นมากขึ้น และแน่นอนการตอบคำถามก็มีความยุ่งยากมากขึ้นด้วย เราจะใช้เมตริกซ์เป็นเครื่องมือในการตอบคำถามดังนี้

จากพีชคณิตเชิงเส้น [2,3] เมตริกซ์ A ขนาด $m \times n$ ที่ประกอบไปด้วย m แถว n คอลัมน์ จะอยู่ในรูป

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

เราแทนสมาชิกของ A ในตำแหน่งแถวที่ i คอลัมน์ที่ j ด้วย a_{ij} และกล่าวว่า A เป็นเมตริกซ์สมมาตร ถ้า $a_{ji} = a_{ij}$ ทุก i, j จาก [3] เราสามารถสร้างเมตริกซ์ A ขนาด $n \times n$ จากกราฟที่มี n จุด โดยนิยามสมาชิกของเมตริกซ์ดังนี้

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 ; \{v_i, v_j\} \in E \\ 0 ; \{v_i, v_j\} \notin E \end{cases}$$

จากกราฟจะได้เมตริกซ์ A ดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

สังเกตว่าเมตริกซ์ A ที่ได้จะเป็นเมตริกซ์สมมาตร เนื่องจากถ้า $\{v_i, v_j\}$ เป็นสมาชิกของ E แล้ว $a_{ij} = a_{ji} = 1$ ถ้า $\{v_i, v_j\}$ ไม่เป็นสมาชิกของ E แล้ว $a_{ij} = a_{ji} = 0$ ดังนั้นเมตริกซ์ที่ได้จากการสร้างจากกราฟด้วยวิธีการดังกล่าวจะเป็นเมตริกซ์สมมาตรเสมอ สำหรับเมตริกซ์ A ใดๆ และจำนวนนับ k กำหนดให้ A^k แทนการคูณกันของเมตริกซ์ A ทั้งหมด k ครั้งต่อไปนี้เป็นทฤษฎีบทพร้อมด้วยบทพิสูจน์ที่จะนำมาซึ่งคำตอบของคำถามข้างต้น

ทฤษฎีบท [3] ถ้า A เป็นเมตริกซ์ของกราฟที่ได้จากการสร้างดังที่กล่าวมาข้างต้น และ $a_{ij}^{(k)}$ แทนสมาชิกที่ตำแหน่งแถวที่ i คอลัมน์ที่ j ของเมตริกซ์ A^k จะได้ว่า $a_{ij}^{(k)}$ เท่ากับจำนวนของเส้นทางที่มีความยาวเท่ากับ k จาก v_i ถึง v_j

พิสูจน์ จะพิสูจน์โดยใช้หลักอุปนัยบน k ดังนี้ ถ้า $k=1$ จากการสร้างเมตริกซ์ แนวเดินความยาว 1 จาก v_i ถึง v_j คือเส้น $\{v_i, v_j\}$ ดังนั้นทฤษฎีบทนี้เป็นจริงกรณี $k=1$ สมมติว่าทฤษฎีบทเป็นจริงเมื่อ $k=m$ นั่นคือ $a_{ij}^{(m)}$ เท่ากับจำนวนของแนวเดินความยาว m จาก v_i ไปยัง v_j พิจารณาสมาชิกของ A^{m+1} ที่ตำแหน่งแถวที่ i คอลัมน์ที่ j จะได้ว่า

$$a_{ij}^{m+1} = a_{i1}^{(m)}a_{1j} + a_{i2}^{(m)}a_{2j} + \dots + a_{in}^{(m)}a_{nj}$$

ให้ $l \in \{1, 2, \dots, n\}$ เราพิจารณาสองกรณีดังนี้

กรณี 1 มีเส้น $\{v_i, v_l\}$ ในกราฟ ดังนั้น ถ้าหาก $v_i \rightarrow \dots \rightarrow v_l$ เป็นแนวเดินความยาว m แล้วจะได้ว่า $v_i \rightarrow \dots \rightarrow v_l \rightarrow v_j$ เป็นแนวเดินความยาว $m+1$ เพราะฉะนั้น

$$a_{il}^{(m)} a_{lj} = a_{il}^{(m)}$$

ซึ่งเท่ากับจำนวนแฉกความยาว $m+1$ จาก v_i ถึง v_l ในรูป

$$v_i \rightarrow \dots \rightarrow v_l \rightarrow v_j$$

กรณี 2 ไม่มีเส้น $\{v_i, v_l\}$ ในกราฟ ดังนั้นไม่มีแฉกความยาว $m+1$ จาก v_i ถึง v_l ในรูปแบบดังนี้

$$v_i \rightarrow \dots \rightarrow v_l \rightarrow v_j$$

จึงได้ว่า

$$a_{il}^{(m)} a_{lj} = a_{il}^{(m)} 0 = 0$$

เพราะฉะนั้นจำนวนแฉกความยาว $m+1$ จาก v_i ถึง v_l เท่ากับ

$$a_{i1}^{(m)} a_{1j} + a_{i2}^{(m)} a_{2j} + \dots + a_{in}^{(m)} a_{nj}$$

ซึ่งก็คือสมาชิกในตำแหน่งแถวที่ i คอลัมน์ที่ j ของ A^{m+1} โดยหลักอุปนัยเชิงคณิตศาสตร์สรุปได้ว่าทฤษฎีบทเป็นจริง

จากเมตริกซ์ A ที่ได้จากกราฟเราพิจารณา A^2, A^3 จะได้ว่า

$$A^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 3 \end{bmatrix}, \quad A^3 = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 1 & 4 \\ 1 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 1 & 3 & 2 & 4 \\ 0 & 4 & 4 & 4 & 2 \end{bmatrix}$$

เราสามารถตอบคำถามได้ดังนี้ ถ้าต้องการเดินทางจากคณะวิทยาศาสตร์ไปยังคณะศึกษาศาสตร์ จำนวนแฉกที่ต้องผ่านเส้นทาง 3 เส้นทางมี 3 แฉก ทั้งนี้จากสมาชิก $a_{34}^{(3)} = 3$ ในทำนองเดียวกัน ถ้าต้องการเดินทางจากคณะวิทยาศาสตร์ไปยังคณะเกษตรศาสตร์ จำนวนแฉกที่ต้องผ่านเส้นทาง 3 เส้นทางมี 1 แฉก เพราะว่า $a_{14}^{(3)} = 1$ จำนวนแฉกที่ต้องผ่าน 2 เส้นทางเป็นไปไม่ได้ เพราะว่า $a_{14}^{(2)} = 0$

เอกสารอ้างอิง

- [1] West, D.B. (2001). Introduction to Graph Theory. 2th Edition. Prentice Hall.
- [2] Herstein I. N. and WinterDavid J. (1988). Matrix Theory and Linear Algebra. Macmillan Publishing Company.
- [3] Leon S.J.(2006). Linear Algebra with Applications. 7th Edition. Pearson Education International.



ความชุกของการถนัดมือซ้ายในนักเรียนไทย: การศึกษานำร่อง Prevalence of left-handedness among Thai students: a pilot study

สมทรง ณ นคร¹, นิยะดา ห่อนาค¹, ไพบุลย์ มงคลถาวรชัย¹, สมปอง ศรีกัลยา²,
สุจิตรา นามจำปา², อังคณา สุตสะอาด², พิเชษฐ์ กมลศิลป์², ศิริวรรณ แก้วหย่อง²,
สุกัลยา สีนจกร², อรุณี สาระผล², ประยูร ศรีเสน³, ทิพวัลย์ น้ำแก้ว³, สุคนธ์ อุดรจรัส³,
สมดี ปะตะเวส⁴ นภาพร ม่วงศรีพิทักษ์⁵, บังอร ใต้ชัยภูมิ⁶ และนภาพร ยุทธไชยสง⁷

บทคัดย่อ

การถนัดมือของคนมีการถ่ายทอดทางพันธุกรรมเพียงอย่างเดียวหรืออาจมีอิทธิพลจากวัฒนธรรมการเลี้ยงดู หรือปัจจัยแวดล้อมขณะอยู่ในครรภ์ร่วมด้วย ซึ่งยังเป็นที่ยกเถียงกันระหว่างนักพันธุศาสตร์ นักพฤติกรรมศาสตร์ และนักจิตวิทยาการถนัดมือซ้ายพบได้ในทุกวัฒนธรรม ทุกชนชาติ ด้วยสัดส่วนแตกต่างกัน การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เบื้องต้นเพื่อศึกษาการถนัดมือซ้ายในกลุ่มนักเรียนไทยที่อาศัยในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยใช้แบบทดสอบการถนัดมือที่ดัดแปลงมาจากแบบทดสอบการถนัดมือเอดินเบิร์ก (Edinburgh Handedness Inventory) โดยนักวิจัยได้ปรับให้เหมาะสมกับวัฒนธรรมไทยอีสานซึ่งประกอบด้วยคำถาม 17 ข้อ เกี่ยวกับการใช้มือข้างที่ถนัดในการทำกิจกรรมต่างๆ ได้แก่ การเขียน

หนังสือ การวาดภาพ การโยนลูกบอลหรือสิ่งของเข้าเป้า การเล่นเกมที่ใช้มือเช่นปิงปอง เทนนิส แบดมินตัน การแปรงฟัน การหั่นสิ่งของด้วยมีด การหิวผม การจุดไม้ขีดไฟ การใช้ตะเกียบ การใช้กรรไกรตัดผ้า/กระดาษ การจับเส้นด้ายสนเข็ม การใช้พัด การใช้มือชกคู่กรณีเมื่อโกรธจัด การหยิบข้าวเหนียวเมื่อรับประทาน การจับต้นกล้าเมื่อดำนา การจับด้ามไม้กวาดเมื่อกวาดบ้าน และการจับด้ามร่มเมื่อใช้ร่ม

กลุ่มตัวอย่างนักเรียนชั้นมัธยมศึกษา มีเพศชาย 249 คน (ร้อยละ 33.5) และเพศหญิง 494 คน (ร้อยละ 66.5) รวม 743 คน อายุระหว่าง 14 – 17 ปี ผลการศึกษาพบว่า ก) ความชุกของนักเรียนที่ถนัดมือซ้าย มีร้อยละ 10.9 (81 คน) ข) เพศชายถนัดมือซ้ายมากกว่าเพศหญิงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\chi^2 = 7.33$, $df = 1$, $p = 0.006$) กล่าวคือในกลุ่มเพศชายทั้งหมด

¹ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น

²โรงเรียนบ้านไผ่, ³โรงเรียนบ้านลานวิทยาคม, ⁴โรงเรียนเปือยน้อยศึกษา, ⁵โรงเรียนหนองขามพิทยาคม,

⁶โรงเรียนศึกษาสงเคราะห์ขอนแก่น ⁷โรงเรียนบ้านไผ่ศึกษา จังหวัดขอนแก่น

249 คน มีร้อยละ 15.3 ที่ถนัดมือซ้าย ในขณะที่กลุ่มตัวอย่างหญิงทั้งหมด 494 คน มีเพียงร้อยละ 8.7 ที่ถนัดมือซ้าย ผลการศึกษานำร่องนี้จะป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาวิเคราะห์ความชุกและความแตกต่างระหว่างเพศในการถนัดมือซ้ายในประชากรไทย

Abstract

Human handedness which is inherited by solely genetic factor or cultural factor or environmental factor remains controversial among geneticists, behavioral social scientists, and psychologists. Prevalences of left-handedness vary among populations. This pilot study aimed at investigating a proportion of left-handedness among Thai students living in the northeastern region. The instrument used was the modified Edinburgh Handedness Inventory by researchers appropriated for the northeast Thai culture. The handedness questionnaire comprises 17 items concerning hand using in several activities such as drawing, throwing, cutting by scissor/knife, sticky-rice eating, sweeping etc. Subjects were 743 students in secondary schools located in Khon Kaen province. Of those, 33.5 percents were males (n=249) while 66.5% females (n=494) with age ranged between 14-17 years. Results revealed as follows: 1) a prevalence of left handedness among total subjects was 10.9% (n=81); 2) males were left-handers significantly greater than females ($\chi^2=7.33$, $df=1$, $P=0.006$); that is among 249 males, 18.3% were left-handers while only 8.7% of 494 females. These results of a pilot study could be useful for a future study for investigation of analyzing sex difference among Thai left-handers.

Running title: Left-handedness prevalence among Thai students

Keywords: handedness, prevalence, Thai student, pilot study

บทนำ

การถนัดมือมีสาเหตุจากพฤติกรรมการเรียนรู้หรือจากพันธุกรรมหรือจากทั้งพฤติกรรมและพันธุกรรมร่วมกัน ยังคงเป็นที่ถกเถียงกันในวงวิชาการทั้งด้านพฤติกรรมศาสตร์ จิตวิทยา และพันธุศาสตร์ (Corballis 1997) ตัวอย่างเช่น การศึกษาของ บิชอป (Bishop 2001; James and Orelebeke 2002) ระบุว่ายังไม่มียกย่องหลักฐานสำคัญต่อการถนัดมือ แต่การวิจัยในคู่มือในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมาสนับสนุนทฤษฎีด้านพันธุศาสตร์ว่ายังเป็นตัวกำหนดการถนัดมือ (Levy and Nagylaki 1972; McManus 1985; Klar 1996; Corballis et al. 1996) ไม่ว่าการถนัดมือจะมีสาเหตุจากอะไรก็ตาม การถนัดมือยังคงเป็นประเด็นสนใจศึกษาของนักวิชาการ ดังเช่นการศึกษาของ McManus and Bryden (Corballis 1997) โดยการสำรวจการถนัดมือในเด็กจำนวน 72,600 คน พบว่าร้อยละ 90.5 ถนัดมือขวาโดยที่แม่พ่อและแม่ถนัดมือขวา แต่เมื่อพ่อหรือแม่ถนัดมือซ้าย พบว่า ลูกถนัดมือขวาลดลงเหลือร้อยละ 80.5 และถ้าทั้งพ่อและแม่ถนัดมือซ้าย การถนัดมือขวาในลูกลดลงเหลือร้อยละ 73.9 ซึ่งผู้วิจัยแปลผลว่าการถนัดมือมีสาเหตุจากพันธุกรรม แต่มีแบบแผนการถ่ายทอดไม่เป็นไปตามกฎเมนเดลถ้าการถนัดมือถูกควบคุมโดยยีนเดี่ยว ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Rife (1940) ที่สำรวจการถนัดมือในนักศึกษา 687 คน พบว่า ลูกถนัดมือซ้ายร้อยละ 7.6 เมื่อพ่อและแม่ถนัดมือขวา แต่ในกรณีที่พ่อหรือแม่คนใดคนหนึ่งถนัดมือซ้าย พบว่ามีลูกถนัดมือซ้ายร้อยละ 19.5 และเมื่อพ่อและแม่

ถนัดมือซ้ายทั้งสองคน กลับพบว่ามีลูกถนัดมือซ้ายร้อยละ 54 จากผลการศึกษาของ Rife นี้ ทำให้ Klar (1996, 2003) สร้างโมเดลทางพันธุศาสตร์พิสูจน์การถ่ายทอดพันธุกรรมของการถนัดมือว่าเนื่องจากยีนเดี่ยวมีชื่อ ว่า ไรท์ (เขียน *RGHT*) โดยมีโมเดลแบบสุ่มของยีนด้อย (random-recessive model) ครั้งต่อครั้ง ถ้าบุคคลใดบุคคลหนึ่งมีอัลลีลด้อยของยีน *RGHT* ทั้งสองอัลลีล อย่างไรก็ตาม ผลการสำรวจการถนัดมือมีความผันแปรซึ่งอาจขึ้นกับแบบวัดการถนัดมือซึ่งเป็นแบบสอบถามเกี่ยวกับความชอบใช้มือใดมือหนึ่งในการกระทำกิจกรรมต่างๆ ตัวอย่างเช่น แบบวัดการถนัดมือของ Rife ประกอบด้วย คำถาม 10 ข้อเกี่ยวกับการชอบใช้มือกระทำกิจกรรมต่างๆ 10 อย่าง ได้แก่ การขว้างลูกบอล การใช้ช้อน การใช้เลื่อย การใช้เข็มเย็บผ้า การโยนลูกหินอ่อน การโยนลูกโบว์ลิ่ง การใช้มีด การใช้กรรไกร การใช้หมอน และการเขียนหนังสือ โดยมีการแปลผลเป็น 2 แบบ ได้แก่ การถนัดขวา ถ้าผู้ตอบใช้มือขวากับกิจกรรมดังกล่าวทั้งสิบอย่าง แต่ถ้าผู้ใดชอบใช้มือซ้ายหรือมือใดมือหนึ่งก็ได้กระทำการดังกล่าวอย่างใดอย่างหนึ่ง บุคคลนั้นจะถูกจัดอยู่ในกลุ่มคนไม่ถนัดขวา (non-right hander) ดังนั้นคนถนัดมือซ้ายตามคำจำกัดความของ Rife จึงหมายถึงรวมถึงคนที่ถนัดทั้งสองมือด้วยยังมีการใช้แบบวัดการถนัดมือที่ประกอบด้วยคำถามแตกต่างกันไปทั้งเนื้อหาและจำนวนข้อคำถามเช่น แบบวัดการถนัดมือของ Briggs and Nebes (1975) ประกอบด้วย คำถาม 12 ข้อ ที่มีข้อเลือกตอบ 5 ระดับ นอกจากนั้นยังมีแบบวัดการถนัดมือที่ดัดแปลงจาก Coren (1992; Sidedness 2005) ประกอบด้วยคำถาม 12 ข้อที่มีเนื้อหาคำถามและการให้คะแนนแตกต่างจากของ Briggs and Nebes สำหรับแบบวัดการถนัดมือเอดินเบอร์ก (Edinburgh Handedness Inventory) ประกอบด้วยคำถาม 10 ข้อซึ่งดัดแปลงโดย Cohen (1997) ที่ให้เลือกตอบว่าชอบใช้มือซ้าย มือขวา หรือ มือข้างใดก็ได้ ในการทำกิจกรรมเกี่ยวกับการเขียนหนังสือ การวาดภาพ

การโยนลูกบอล การตัดด้วยกรรไกร การแปรงฟัน การตัดด้วยมีดโดยไม่ใช้ซ่อม การใช้ช้อน การใช้ไม้กวาด การจุดไม้ขีดไฟ และการเปิดกระป๋อง จะเห็นได้ว่าเนื้อหาในแบบวัดการถนัดมือจะมีปัจจัยด้านวัฒนธรรมเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงสร้างแบบวัดการถนัดมือขึ้น โดยได้ดัดแปลงแบบวัดการถนัดมือแบบต่างๆดังกล่าวให้มีข้อความบ่งบอกถึงวัฒนธรรมของคนไทยอีสาน เพื่อให้ครอบคลุมความถนัดมือหรือความชอบในการใช้มือกระทำกิจกรรมต่างๆในชีวิตประจำวันของคนไทยอีสาน

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาอัตราความชุกของการถนัดมือซ้ายในนักเรียนไทยทั้งเพศชายและหญิง

วิธีการศึกษา

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาคือ แบบวัดการถนัดมือ ซึ่งสร้างขึ้นโดยคณะวิจัยโดยดัดแปลงจากแบบวัดการถนัดมือต่างๆ ได้แก่แบบวัดการถนัดมือเอดินเบอร์ก แบบวัดการถนัดมือของ Rife แบบวัดการถนัดมือที่ดัดแปลงจาก Briggs and Nebes แบบวัดการถนัดมือที่ดัดแปลงจาก Coren (1992) ได้แบบวัดการถนัดมือให้ชื่อว่าแบบวัดการถนัดมือ *KKU* ประกอบด้วยคำถาม 17 ข้อเกี่ยวกับการใช้มือกระทำกิจกรรมประจำวันและกิจกรรมทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรม การกิน/ การเล่น ของชาวอีสาน รวมถึงการใช้มือในภาวะจับพลัน/ป้องกันตัว โดยมีข้อเลือกตอบเป็นใช้มือซ้าย ใช้มือขวา และใช้ได้ทั้งสองมือ การแปลผลจำแนกเป็น 3 แบบ ได้แก่ คนถนัดมือซ้าย คือผู้ที่ใช้มือซ้ายกระทำกิจกรรมทั้ง 17 ข้อ คนถนัดมือขวาคือผู้ที่ใช้มือขวากระทำกิจกรรมทั้ง 17 ข้อ และคนถนัดทั้งสองมือ คือผู้ที่ใช้มือข้างซ้ายหรือข้างขวาก็ได้ในการกระทำกิจกรรมใดกิจกรรมหนึ่งของ 17 กิจกรรม อันได้แก่ การเขียนหนังสือ การวาดภาพ การโยน

ลูกบอลหรือสิ่งของเข้าเป้า การเล่นเกมที่ใช้มือเช่น ปิงปอง/เทนนิส/แบดมินตัน การแปร่งฟัน การหันสิ่งของด้วยมือ การหิวผม การจุดไม้ขีดไฟ การใช้ตะเกียบ การใช้กรรไกรตัดผ้า/กระดาษ การจับเส้นด้าย สนเข็ม การใช้พัด การใช้มือชกคู่กรณีเมื่อโกรธจัด การหยิบข้าวเหนียวเมื่อรับประทาน การจับต้นกล้าเมื่อดำนา การจับด้ามไม้กวาดเมื่อกวาดบ้าน และการจับด้ามร่มเมื่อใช้ร่ม

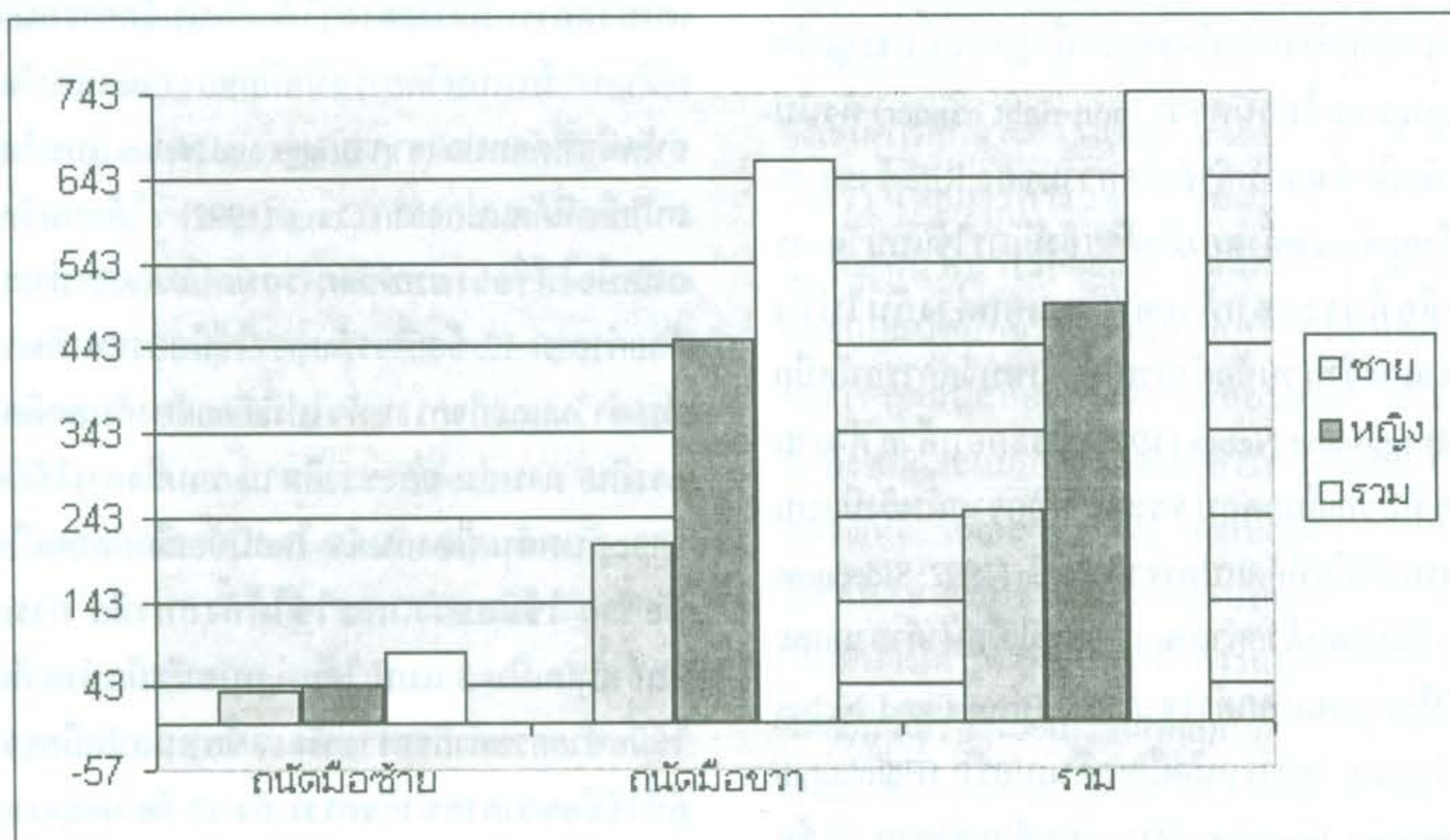
กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ นักเรียนชั้นมัธยมศึกษาจำนวน 743 คนที่กำลังเรียนในโรงเรียนต่างๆ 6 โรงเรียน ในสังกัดสำนักงานเขตพื้นที่การศึกษาขอนแก่นเขต 2 จำแนกเป็นนักเรียนชาย 249 คน และนักเรียนหญิง 494 คน

การวิเคราะห์ข้อมูล ใช้สถิติเชิงพรรณนา ร้อยละของการถนัดมือซ้ายในกลุ่มตัวอย่างแต่ละเพศ และรวมทั้งสองเพศสำหรับการวิเคราะห์ความแตกต่างของการถนัดมือซ้ายระหว่างเพศใช้สถิติไคสแควร์

ผลการศึกษา

นักเรียนกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 743 คน ถนัดมือซ้ายจำนวน 81 คน คิดเป็นร้อยละ 10.9 เมื่อจำแนกการถนัดมือตามเพศพบว่า ร้อยละ 15.3 ของเพศชาย (38 คน จาก 249 คน) ถนัดมือซ้าย ในขณะที่เพศหญิง 494 คน มีเพียงร้อยละ 8.7 (43 คน) ถนัดมือซ้าย (แผนภาพที่ 1) ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\chi^2 = 7.33$, $df = 1$, $P = 0.006$) นั่นคือ เพศชายถนัดมือซ้ายมากกว่าเพศหญิง

เมื่อพิจารณาเฉพาะในกลุ่มถนัดมือซ้าย 81 คน พบว่ามีเพศชายและหญิงจำนวนใกล้เคียงกัน (ชาย = 38, หญิง = 43 คน) คิดเป็นสัดส่วน 1 ต่อ 1.3 ในขณะที่กลุ่มนักเรียนที่ถนัดมือขวามีจำนวนรวม 662 คน มีเพศชายเพียง 211 คน เปรียบเทียบกับเพศหญิง 451 คน คิดเป็นสัดส่วนเพศชายต่อเพศหญิง ที่ถนัดมือขวาเป็น 1 ต่อ 2.1



แผนภาพที่ 1 จำนวนนักเรียนกลุ่มตัวอย่างที่ถนัดมือซ้าย มี 81 คนจาก 743 คน (ร้อยละ 10.9) ถนัดมือซ้าย เมื่อพิจารณาในเพศชาย 249 คน มี 38 คน (ร้อยละ 15.3) ถนัดมือซ้าย เปรียบเทียบกับเพศหญิง 43 คน จาก 494 คน (ร้อยละ 8.7)

สรุปและวิจารณ์

ความชุกของการถนัดมือซ้ายในเด็กนักเรียนไทยชาวอีสาน โดยใช้แบบวัดการถนัดมือ KKU มีร้อยละ 10.9 จากจำนวนที่สำรวจทั้งหมด 743 คน และเพศชายมีความถนัดมือซ้ายมากกว่าเพศหญิงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเฉพาะในกลุ่มที่ถนัดมือซ้าย ซึ่งมีเพียง 81 คน พบว่ามีเพศชายและหญิงในสัดส่วนใกล้เคียงกัน (1 ต่อ 1.3)

ผลการศึกษาเกี่ยวกับอัตราความชุกของการถนัดมือซ้ายที่พบร้อยละ 10.9 นั้น ใกล้เคียงกับการศึกษาโดย Briggs and Nebes (1975) ในนักศึกษากลุ่มตัวอย่างจำนวน 1599 คน โดยใช้แบบวัดการถนัดมือที่ดัดแปลงมาจาก Annett ซึ่งพบว่ามีนักศึกษา ร้อยละ 9.1 ถนัดมือซ้าย เช่นเดียวกันกับการศึกษาใน 17 ประเทศทั่วโลก ในกลุ่มตัวอย่าง 12,000 คน (Perelle and Ehrman 1994)

สำหรับแตกต่างระหว่างเพศในการถนัดมือซ้ายในการศึกษานำร่องครั้งนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาในประเทศออสเตรเลีย (Medland et al. 2004) ที่พบว่าเพศหญิงถนัดมือซ้ายน้อยกว่าเพศชาย โดยใช้แบบวัดการถนัดมือ 3 แบบที่แตกต่างกัน และสอดคล้องกับการศึกษาโดย Ellis et al. (1988) ซึ่งใช้แบบวัดการถนัดมือเอดินเบอร์กในประชากรทั่วไปที่พบว่าเพศชายถนัดมือซ้ายมากกว่าเพศหญิง แม้จะไม่มี ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ด้วยเหตุที่ขนาดตัวอย่างที่ถนัดมือซ้าย มีจำนวนน้อยเพียง 81 คน (ร้อยละ 10.9) เนื่องจากเป็น การศึกษานำร่อง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ผลการศึกษา ในครั้งนี้มาคำนวณขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมในการ ศึกษาครั้งต่อไปเพื่อหาความชุกและความแตกต่าง ระหว่างเพศในการถนัดมือซ้ายในคนไทยอีสานได้ ถูกต้องยิ่งขึ้น โดยใช้สูตรคำนวณขนาดตัวอย่าง สำหรับค่าสัดส่วนกลุ่มเดียว (บัณฑิต ถิ่นคำพร 2544; Armitage 1980) ถ้าให้สามารถได้ค่าความชุกที่

คลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ 1 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จะได้ขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมอย่างน้อย 3,731 คน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณนักเรียนทุกคนที่ ให้ข้อมูลในการตอบแบบวัดการถนัดมือ ที่ผู้วิจัยสร้าง ขึ้น และขอขอบคุณ ศูนย์บริการวิชาการ มหาวิทยาลัย ขอนแก่น ในการสนับสนุนการดำเนินงานบริการ วิชาการแก่ชุมชน ประจำปีงบประมาณ 2548 ที่ช่วยให้ เกิดการสร้างเครื่องมือในการวิจัยเกี่ยวกับการถนัดมือ ระหว่างคณาจารย์มหาวิทยาลัยขอนแก่น และ คณาจารย์โรงเรียนมัธยมศึกษาในสังกัดสำนักงาน เขตพื้นที่การศึกษาขอนแก่น เขต 2

เอกสารอ้างอิง

- บัณฑิต ถิ่นคำพร. (2544). ขนาดตัวอย่างและอำนาจ การทดสอบ: หลักการและแนวคิด. ศรีนครินทร์ เวชสาร. 16 (ฉบับพิเศษ): 239-251.
- Armitage, P. (1980). Statistical methods in medical research. London: Blackwell Scientific Publications.
- Bishop, D.V. (2001). Individual differences in handedness and specific speech and language impairment: evidence against a genetic link. Behav. Genet. 31:330-351.
- Briggs, G.G. and Nebes, R.D. (1975). Patterns of hand preference in a student population. Cortex. 11:230-238.
- Cohen, M.S. (1997). Handedness questionnaire. Accessed Date: 19 June 2004. www. <http://airto.bmap.ucla.edu/BMCweb/Private/3TLab/LabNotes/edinburgh.html>

- Corballis, M.C., Lee, K., McManus, I.C. and Crow, T.J. (1996). Localization of the handedness gene on the sex chromosomes. *Neuropsychiatr. Genet.* 67:50-52.
- Corballis, M.C. (1997). The genetics and evolution of handedness. *Psychol. Rev.* 104:714-727.
- Coren, S. (1992). *The left-hander syndrome: the causes and consequences of left-handedness.* Free Press, New York.
- Ellis, S.J., Ellis, P.J. and Marshall, E. (1988). Hand preference in a normal population. *Cortex.* 24:157-163. Abstract [PubMed].
- James, W.H. and Orelebeke, J.F. (2002). Determinants of handedness in twins. *Laterality.* 7:301-307.
- Klar, A.J.S. (1996). A single locus, *RGHT*, specifies preference for hand utilization in humans. *Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol.* 61: 59-65.
- Klar, A.J.S. (2003). Human handedness and scalp hair-whorl direction develop from a common genetic mechanism. *Genetics.* 15:269-76.
- Levy, J. and Nagylaki, T. (1972). A model for the genetics of handedness. *Genetics.* 72:117-128.
- McManus, I.C. (1985). Handedness, language dominance and aphasia: a genetic model. *Psychol. Med.* 8 (Suppl.):1-40.
- Medland, S.E., Perelle, I., DeMonte, V. and Ehrman, L. (2004). Effects of culture, sex, and age on the distribution of handedness: an evaluation of the sensitivity of three measures of handedness. *Laterality.* 9:287-97. Abstract [PubMed].
- Perelle, I.B. and Ehrman, L. (1994). An international study of human handedness: the data. *Behav. Genet.* 24: 217-27. Abstract [PubMed].
- Rife, D.C. (1940). Handedness, with special reference to twins. *Genetics.* 28:178-186.
- Sidedness. (2005). Handedness questionnaire. Accessed Date: 25 April 2005. [www. http://faculty.washington.edu/chudler/rhtab75.html](http://faculty.washington.edu/chudler/rhtab75.html)
- Sidedness. (2005). Handedness questionnaire. Accessed Date: 25 April 2005. [www. http://faculty.washington.edu/chudler/rhtablen.html](http://faculty.washington.edu/chudler/rhtablen.html)



ผลกระทบของการชะล้างเกลือตามธรรมชาติและการผลิตเกลือ ต่อคุณภาพน้ำในแม่น้ำสงคราม

The Impacts of Natural Leaching and Production of Salt on the Water Quality of Mae Num Songkram

ชุตินา คุคู่สมุทร¹ ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง¹ และศุภลักษณ์ ศรีจรรย์¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้เก็บตัวอย่างทั้งสิ้น 13 สถานีระหว่างอำเภอบ้านดุง จังหวัดอุดรธานี ถึงบ้านท่าสะอาด จังหวัดหนองคาย เก็บตัวอย่าง 4 ครั้ง คือ กุมภาพันธ์ พฤษภาคม สิงหาคม และธันวาคม 2545 วิเคราะห์หาปริมาณแอนไอออน แคตไอออนและโลหะหนักได้แก่ Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Pb , Cd , Mn และ Hg จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการชะล้างตามธรรมชาติเกิดในช่วงต้นฤดูฝนทำให้น้ำจุดที่ 1 ห้วยฝ่าเหือน (ใช้เป็นจุดควบคุม) มีปริมาณเกลือเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แต่ผลกระทบจากการทำนาเกลือเห็นชัดเจนในช่วงฤดูแล้ง เนื่องจากช่วงฤดูฝนจะไม่มีการผลิตเกลือและส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในลำน้ำอย่างชัดเจน 2 บริเวณ คือการทำนาเกลือบริเวณบ้านดุงส่งผลกระทบต่ออ่างเก็บน้ำท่ามะนาวทำให้น้ำเค็มจัดในเดือนกุมภาพันธ์เท่ากับ $3,207.3 \text{ mgL}^{-1}$ NaCl ในช่วงฤดูฝนน้ำล้นจากอ่างจะไหลไปรวมกับลำน้ำสงครามทำให้เกลือ ณ จุดรองรับ จุดที่ 6 บ้านห้วยหลัวมีปริมาณสูงถึง 938.9 mgL^{-1} NaCl ส่วนการทำเกลือบริเวณบ้านเขมไม่ส่งผลกระทบต่อ

คุณภาพน้ำในลำน้ำนี้แต่อย่างใด และบริเวณบ้านท่าสะอาดมีการต้มเกลือและส่งผลกระทบรุนแรงต่อคุณภาพน้ำของลำน้ำสงครามช่วงที่ไหลผ่านหมู่บ้านนี้ ความเค็มสูงสุดบริเวณนี้มีค่าเท่ากับ 974.1 mgL^{-1} NaCl เนื่องจากมีการควบแน่นน้ำบาดาลเค็มขึ้นจากกลางแม่น้ำ บรรทุกใส่เรือไปต้มบนฝั่งแม่น้ำสงครามบริเวณบ้านท่าสะอาด แต่ปริมาณโลหะหนักเป็นพิษที่ตรวจพบทุกจุดมีค่าไม่เกินมาตรฐานน้ำผิวดินประเทศไทย

Abstract

Water samples were collected from 13 stations between Ban Dung (Udonthani province) and Ban Ta-sa-ard (Nongkai province) in February, May, August and December 2002. The collected samples were determined for the content of some anions, cations and heavy metals including Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Pb , Cd , Mn and Hg . The results revealed that there was salt contamination from natural leaching at station 1

during early rain. The impact of salt production activity on water quality in Songkram river was clearly shown during dry season. Because salt production was allowed only from November to May each year. Two major sources of salt production areas that contributed to Songkram river salt contamination were supposed to be Ban Dung area which resulted in maximum content of $3,207.3 \text{ mgL}^{-1}$ NaCl in Ta-ma-now reservoir and Ban Ta-sa-ard where underground saline water was taken from the middle of the river and transported to boiling factories on the nearby Songkram river shore. The content of salt in Songkram river at this station was 974.1 mgL^{-1} NaCl in February. The content of some heavy metals, in all samples were normal according to the standard of surface water quality of Thailand.

บทนำ

แม่น้ำสงครามเป็นลำน้ำธรรมชาติที่มีความสำคัญสายหนึ่งของภาคตะวันออกเฉียงเหนือไหลผ่านพื้นที่หลายจังหวัด อาทิเช่นจังหวัด อุดรธานี สกลนคร และ หนองคาย ประชาชนสองฟากฝั่งใช้น้ำเพื่อการอุปโภค บริโภค และทำเกษตรกรรม ช่วงฤดูฝนลำน้ำจะมีน้ำมาก บางพื้นที่จะเกิดน้ำท่วมบริเวณ 2 ฝั่งแม่น้ำ มีสัตว์น้ำอุดมสมบูรณ์ แต่จะเกิดการตื่นเงินอย่างรวดเร็วจนหลังจากสิ้นสุดฤดูฝนเพราะไหลลงสู่ลำน้ำโขงอย่างรวดเร็ว

เนื่องจากภาคอีสานมีธรณีสัณฐานเป็นที่ราบสูง ที่มีชื่อว่า ที่ราบสูงโคราช ซึ่งประกอบไปด้วยแอ่งกะทะขนาดใหญ่ สองแอ่ง คือ แอ่งโคราชและแอ่งสกลนคร ทั้งสองแอ่งมีพื้นที่ครอบคลุมประมาณ 50,000 ตารางกิโลเมตร ได้พื้นดินใต้แอ่งโคราชและแอ่งสกลนครบรรจุไปด้วยชั้นเกลือหิน ชั้นหินดิน

เหนียว และชั้นหินดินดานของชุดหินมหาสารคามเป็นส่วนใหญ่ เกลือหินที่พบมีปริมาณมากมายถือเป็นทรัพยากรทางธรรมชาติอย่างหนึ่งของภาคอีสาน ที่ก่อให้เกิดอาชีพการทำนาเกลือสินเธาว์ เกลือเป็นวัตถุดิบอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญ 1 ใน 5 ของแร่อุตสาหกรรมของโลก ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของมนุษย์ Salt Institute ได้ประมาณการใช้ประโยชน์ของเกลือไว้ถึง 14,000 วิธี การผลิตเกลือของผู้ผลิตรายย่อยในพื้นที่ภาคอีสานนิยมทำกันสองแบบคือ การสูบน้ำบาดาลที่มีหินเกลือละลายอยู่ขึ้นมาต้ม โดยใช้แกเลบหรือพื้นเป็นเชื้อเพลิง การทำนาเกลือแบบนี้จะเหลือน้ำขมที่จะต้องทิ้งซึ่งมีผลทำให้ดินเค็มและน้ำเค็มได้เมื่อถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ นอกจากนี้ยังมีผลกระทบเนื่องจากเขม่าควัน ฝุ่นจี้เถ้าที่ลอยไปเป็นระยะไกลๆ ได้ อีกวิธีหนึ่งคือ การทำนาตากกรณีหลังมีผลทำให้ดินบริเวณที่ตากและพื้นที่บริเวณรอบๆ มีความเค็ม เป็นผลให้น้ำผิวดินและน้ำใต้ดินบริเวณใกล้เคียงได้รับผลกระทบ การทำนาตากและการต้มเกลือจึงก่อให้เกิดปัญหาต่าง ๆ มากมาย เช่นการทรุดตัวของพื้นดินเนื่องจากการสูบน้ำบาดาล การเกิดปัญหาดินเค็ม น้ำบาดาลและน้ำผิวดินเค็ม ทำให้สภาพนิเวศน์ของแหล่งน้ำที่รองรับเกิดการเปลี่ยนแปลง แม่น้ำสงครามเป็นแม่น้ำที่ไหลผ่านพื้นที่ทำนาเกลือ 3 จังหวัด ซึ่งได้แก่ บ้านดุง บ้านเขม จังหวัดอุดรธานี บ้านหนองกวาง บ้านโนนสะแบง จังหวัดสกลนคร บ้านท่าสะอาด จังหวัดหนองคาย

จึงน่าจะทำการศึกษาผลกระทบของการชะล้างของคราบเกลือที่เกิดในช่วงฤดูแล้ง การทำนาเกลือและเนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเป็นน้ำบาดาลเค็ม จึงได้ตรวจวิเคราะห์หาปริมาณโลหะอื่นๆ นอกเหนือจาก Na และ Cl ด้วยเพื่อจะได้ทราบสภาพการปนเปื้อนของโลหะอื่นโดยเฉพาะโลหะเป็นพิษ ซึ่งต้องมีการเฝ้าระวังในลำน้ำนี้ด้วย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณแอนไอออนได้แก่ คลอไรด์ ไนเตรต ซัลเฟต โลหะ ได้แก่ โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม รวมทั้งโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม แมงกานีส และปรอทที่ละลายในแม่น้ำสงคราม และสรุปผลกระทบของการชะล้างเคลื่อนตามธรรมชาติ และการผลิตเคลื่อนต่อคุณภาพน้ำในแม่น้ำสงคราม

วิธีการวิจัย

จะทำการศึกษาผลกระทบของการชะล้างและการทำเกลือ บริเวณพื้นที่บึงดุง จังหวัดอุดรธานี และบ้านโนนแสง (จังหวัดอุดรธานี) บ้านหนองกั้ง (จังหวัดสกลนคร) และบ้านท่าสะอาด (จังหวัดหนองคาย) ทำการเก็บตัวอย่างน้ำวิเคราะห์ทุก ๆ 3 เดือนเป็นเวลา 12 เดือน จากสถานีเก็บตัวอย่าง 13 สถานี ทำการวิเคราะห์หาปริมาณแอนไอออนได้แก่ คลอไรด์ ไนเตรต และซัลเฟต โดยใช้วิธี Ion Chromatography (IC) โลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ปรอท และแมงกานีสโดยใช้เทคนิค On line analyte preconcentration โดยใช้ Flow Injection Analysis System (FIAS) ร่วมกับ Flame atomic absorption analysis (FAAS) หาปรอท โดยใช้ Flow Injection mercury hydride method (FIMH) และโซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม โดยใช้วิธี Flame atomic emission และโดยวิธี FAAS absorption spectrometry แล้วใช้ปริมาณการปนเปื้อนของเกลือ NaCl ในการประเมินผลกระทบของการชะล้างและการทำนาเกลือที่มีต่อคุณภาพน้ำในลำน้ำสงคราม

สารเคมี: สารเคมีที่ใช้ในการวิจัยได้แก่ สารละลายมาตรฐาน NaCl, KCl, $MgCl_2$, $MnCl_2$, $CaCl_2$, $HgCl_2$, $Pb(NO_3)_2$ and $CdCl_2$ (1000 mgL^{-1}) spectrosol grade Carlo Elba, Italy. HCl, HNO_3 , 65%,

Analar grade, Carlo Elba, Italy. $KMnO_4$, Na_2CO_3 Analar grade, Ajax Chemical, Australia. CH_3OH , 30 % Ammonia solution, H_2SO_4 Analar grade. Merck, Germany. Argon gas, Acetylene gas, Nitrogen gas, pure grade. $NaHCO_3$, Analar grade. BDH Chemical Ltd., England DDTc, AR grade, Riedel-de Haen ag Sellze- Hannover, Germany and Deionized water (DI). Osmo Nics, INC., U.S.A

เครื่องมือ: เครื่องมือที่ใช้มีดังนี้ Atomic Absorption Spectrometer, Perkin Elmer AA winlab, U.S.A. Mercury Hydride, Perkin Elmer AA winlab, U.S.A. Ion Chromatography, Dionex, U.S.A. Flow Injection Unit, Perkin Elmer, U.S.A. pH Meter, Denver Instrument Model 215, Conductivity Meter, Suntext Model Sc-17A

การทดลอง แบ่งเป็น 3 ส่วน

1. วิธีเตรียมสารเคมี ดังต่อไปนี้

เตรียมสารละลายผสมของ Na_2CO_3 1.8 mM และ $NaHCO_3$ 1.7 mM mobile phase (ก่อนใช้เจือจาง 10 เท่า) สารละลาย Cl^- NO_3^- SO_4^{2-} และ PO_4^{3-} ผสมขึ้น 20 mgL^{-1} สารละลายมาตรฐาน Na K Ca Mg Hg Cd และ Mn ขึ้น 100 mgL^{-1} เพื่อใช้เตรียมสารละลายมาตรฐานสำหรับสร้างกราฟมาตรฐานต่อไป สารละลายกรด HNO_3 1 N HCl 3% (v/v) และ $NaBH_4$ 0.2% (w/v) และ DDTc ในบัฟเฟอร์ pH 9.2

2. วิธีเตรียมตัวอย่าง

2.1 วิธีเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณแอนไอออนโดยวิธี Ion Chromatography; IC

เก็บตัวอย่างใส่ขวดพลาสติกที่สะอาด กรองด้วยกระดาษกรองใยแก้วขนาด 10 ไมครอน กรองซ้ำอีกครั้งด้วยกระดาษกรองมิลลิพอร์ ขนาด 0.45 ไมครอนโดยใช้ syringe เก็บไว้ในขวดขนาด 5 ml ปิดให้สนิททำการวิเคราะห์ทันที

2.2 วิธีเตรียมตัวอย่างสำหรับหาปริมาณโลหะอัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ทและสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักโดยวิธี Flow Injection Analysis System ; FIAS

เก็บรักษาตัวอย่างด้วยกรด HNO_3 65 % 5 ml ต่อตัวอย่าง 1 ลิตร ถ่ายตัวอย่างใส่บีกเกอร์ต้มให้เดือดเบา ๆ จนเหลือปริมาตร 500 ml ทิ้งให้เย็น กรองแล้วปรับปริมาตรเป็น 1000 ml เก็บใส่ขวดพลาสติกที่สะอาดนำไปวิเคราะห์ เตรียมสารละลายแบบลงค์โดยใช้น้ำกลั่น 500 ml แทน ตัวอย่างดำเนินวิธีเช่นเดียวกับการเตรียมน้ำตัวอย่าง เก็บไว้เป็น sample blank

3. วิธีวิเคราะห์

3.1 การหาปริมาณแอนไอออนโดยเทคนิค Ion Chromatography

เตรียมสารละลายมาตรฐานผสมของ Cl^- NO_3^- SO_4^{2-} และ PO_4^{3-} ให้มีความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิดเท่ากับ 2, 4, 6, 8, 10 mgL^{-1} นำสารละลายขึ้น 10 mgL^{-1} ฉีดเข้าเครื่องจะได้โครมาโทแกรมที่มีค่า T_R ของแต่ละแอนไอออน แล้วป้อนค่า T_R ชื่อแอนไอออน และระดับความเข้มข้นลงในตาราง component table จากนั้นใช้คำสั่งสร้างกราฟมาตรฐานโดยฉีดสารละลายมาตรฐานแต่ละความเข้มข้นจนครบ เครื่องจะทำการประมวลผลแล้วสร้างกราฟมาตรฐานของไอออนแต่ละชนิด นำสารละลายตัวอย่างที่เตรียมไว้ในข้อ 2.1 มาทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับสารมาตรฐาน ผลวิเคราะห์บางส่วนแสดงในตารางที่ 2 และ 3

3.2 การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะอัลคาไลน์โดยเทคนิค Atomic Emission Spectrometry (AES)

เตรียมสารละลายมาตรฐาน Na และ K ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1, 2, 3, 5 mgL^{-1} ตามลำดับ ฉีดสารละลายมาตรฐานเข้าเครื่อง เพื่อวัดค่าการคายแสง เครื่องจะสร้างกราฟมาตรฐานให้ วิเคราะห์ตัวอย่างโดยนำสารละลายตัวอย่างที่เตรียมในข้อ 2.2 มาทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับสารละลายมาตรฐาน ผลบางส่วนแสดงในตารางที่ 4 และ 5

3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท โดยเทคนิค Atomic Absorption Spectrometry (AAS)

เตรียมสารละลายมาตรฐาน Ca ความเข้มข้นเท่ากับ 1, 2, 3, 5 mgL^{-1} และ Mg เท่ากับ 0.3, 0.5, 0.7, 1.0 mgL^{-1} จากนั้นนำสารละลายมาตรฐานฉีดเข้าเครื่อง เพื่อวัดค่าการดูดกลืน เครื่องจะสร้างกราฟมาตรฐานให้วิเคราะห์ตัวอย่าง นำสารละลายตัวอย่างที่เตรียมในข้อ 2.2 มาทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับสารละลายมาตรฐาน (ไม่ได้แสดงผลไว้)

3.4 การหาปริมาณโลหะหนักโดยการทำให้ตัวอย่างมีความเข้มข้นขึ้น ก่อนวิเคราะห์โดยวิธี FAAS

3.4.1 การวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่ว
สร้าง method file เพื่อควบคุมการวิเคราะห์และ ตั้งสภาวะการทดลองของเครื่อง Flow injection system ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงสถานะการทดลองของเครื่อง Flow injection system

Step	Time (sec)	Pump 1	Pump 2	Valve	
		Speed (r/min)	Speed (r/min)	Load/Elute	
prefill	25	100	120	LO	E●
1	50	100	0	L●	EO
2	10	100	120	L●	EO
3	15	0	120	LO	E●

O, ● แสดงตำแหน่งวาล์วที่กำลังทำงานอยู่

เตรียมสารละลายมาตรฐานของ Pb ที่มีความเข้มข้น 20, 30, และ 50 µg/L ตามลำดับ เมื่อ optimized เครื่อง AAS จนได้ sensitivity ในการวัดสูงสุดแล้ว เริ่มวิเคราะห์สารละลายมาตรฐาน เมื่อวิเคราะห์เสร็จ เครื่องจะสร้างกราฟมาตรฐานให้ วิเคราะห์ตัวอย่าง นำตัวอย่างในข้อ 2.2 มาทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับการสร้างกราฟมาตรฐานผลแสดงในตารางที่ 7

3.4.2 การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม วิเคราะห์เช่นเดียวกับตะกั่ว (ตารางที่ 1) แต่ใช้เวลาใน ขั้นที่ 2 เท่ากับ 20 วินาที และสร้างกราฟมาตรฐาน โดยใช้ Cd ข้น 1, 3 และ 5 µg/L จากนั้นจึงค่อย วิเคราะห์ตัวอย่างที่เตรียมไว้ในข้อ 2.2 ผลการ ทดลองไม่ได้นำเสนอในที่นี้

3.4.3 การวิเคราะห์หาปริมาณปรอท สร้าง method file เพื่อควบคุมการวิเคราะห์และ ตั้งสถานะการทดลองของเครื่อง Flow injection system แล้วสร้างกราฟมาตรฐาน ของ ปรอท ความ เข้มข้น 5, 10, 15 ppb. แล้ววิเคราะห์ตัวอย่างที่เตรียม ไว้ในข้อ 2.2 ผลการทดลองไม่ได้นำเสนอในที่นี้

3.4.4 การวิเคราะห์หาปริมาณแมงกานีสโดยวิธี FAAS

ก่อนทำการวิเคราะห์สารละลายตัวอย่าง จะต้องวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานที่เตรียมไว้ก่อน เพื่อนำผลการวิเคราะห์ไปสร้างกราฟมาตรฐานเช่น เดียวกัน (ไม่ได้แสดงผลไว้)

3.5 วัดค่า pH และ Conductivity ของสารตัวอย่าง ผลของค่า Conductivity แสดงในตารางที่ 8

ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณแอนไอออน โลหะอัลคาไลน์ โลหะหนัก ค่า pH และ Conductivity (เสนอข้อมูลเพียงบางส่วนเท่านั้นเนื่องจากมีพื้นที่ จำกัด)

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ (Cl⁻) แสดงค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

สถานีที่	ปริมาณคลอไรด์ (Cl ⁻) ในน้ำตัวอย่าง (mgL ⁻¹)			
	19 กุมภาพันธ์ 45	27 พฤษภาคม 45	24 สิงหาคม 45	5 ธันวาคม 45
1	12.63±0.12	567.17±2.76	6.98±0.14	2.55±0.03
2	9435.67±3.21	3231.00±1.00	501.45±1.55	1839.50±10.50
3	4397.67±1.53	2664.27±1.42	2107.7±8.96	1264.00±7.00
4	-	231.47±2.12	254.13±3.88	105.44±0.94
5	129.40±0.98	63.07±0.57	18.88±0.12	63.90±0.30
6	646.13±5.08	349.90±1.91	165.69±5.77	166.39±2.96
7	311.50±3.89	171.08±1.11	121.79±2.46	187.68±5.99
8	338.07±4.99	44.22±0.43	76.37±1.20	99.77±1.99
9	309.37±0.83	75.40±0.78	74.51±1.22	103.81±0.46
10	550.30±5.82	179.87±0.48	36.86±0.10	190.15±3.05
11	194597.67±6.81	168743.33±2.89	-	-
12	754.60±4.50	210.30±2.10	39.03±0.59	363.10±3.69
13	540.07±4.27	213.78±2.10	35.19±0.07	176.83±4.26

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรท (NO₃⁻) แสดงค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

สถานีที่	ปริมาณคลอไรด์ (Cl ⁻) ในน้ำตัวอย่าง (mgL ⁻¹)			
	19 กุมภาพันธ์ 45	27 พฤษภาคม 45	24 สิงหาคม 45	5 ธันวาคม 45
1	12.63±0.12	567.17±2.76	6.98±0.14	2.55±0.03
2	9435.67±3.21	3231.00±1.00	501.45±1.55	1839.50±10.50
3	4397.67±1.53	2664.27±1.42	2107.7±8.96	1264.00±7.00
4	-	231.47±2.12	254.13±3.88	105.44±0.94
5	129.40±0.98	63.07±0.57	18.88±0.12	63.90±0.30
6	646.13±5.08	349.90±1.91	165.69±5.77	166.39±2.96
7	311.50±3.89	171.08±1.11	121.79±2.46	187.68±5.99
8	338.07±4.99	44.22±0.43	76.37±1.20	99.77±1.99
9	309.37±0.83	75.40±0.78	74.51±1.22	103.81±0.46
10	550.30±5.82	179.87±0.48	36.86±0.10	190.15±3.05
11	194597.67±6.81	168743.33±2.89	-	-
12	754.60±4.50	210.30±2.10	39.03±0.59	363.10±3.69
13	540.07±4.27	213.78±2.10	35.19±0.07	176.83±4.26

LOD ของการวิเคราะห์ไนเตรท = 0.1 mgL⁻¹

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณโซเดียมในน้ำตัวอย่าง แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

สถานี	ปริมาณโซเดียม (Na) ในน้ำตัวอย่าง (mgL ⁻¹)			
	19 กุมภาพันธ์ 2545	27 พฤษภาคม 2545	24 สิงหาคม 2545	5 ธันวาคม 2545
1	7.17 ± 0.04	3119.50 ± 21.29	5.81 ± 0.05	2.33 ± 0.03
2	2267.27 ± 2.64	1732.21 ± 4.19	378.43 ± 5.14	1373.95 ± 11.93
3	1261.00 ± 8.69	1513.31 ± 2.32	1518.70 ± 0.95	837.29 ± 18.48
4	-	143.96 ± 1.55	163.74 ± 0.31	484.37 ± 1.44
5	84.44 ± 0.74	48.03 ± 0.15	13.19 ± 0.07	40.06 ± 0.51
6	369.14 ± 10.79	273.14 ± 2.07	118.47 ± 1.20	122.95 ± 0.80
7	161.90 ± 1.70	98.35 ± 3.11	54.81 ± 1.36	107.10 ± 1.95
8	151.50 ± 0.90	29.86 ± 0.08	43.37 ± 0.66	70.74 ± 0.82
9	159.58 ± 1.87	65.16 ± 0.89	50.00 ± 0.24	61.80 ± 0.85
10	119.25 ± 5.62	104.82 ± 1.10	16.36 ± 0.09	134.48 ± 0.47
11	120618 .33 ± 190.17	79260.42 ± 296.1	-	-
12	382.96 ± 1.50	112.02 ± 2.12	26.33 ± 0.09	548.69 ± 8.72
13	286.63 ± 0.73	162.83 ± 2.19	26.07 ± 0.50	123.74 ± 1.54

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์หาโปแตสเซียมในน้ำตัวอย่างแสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

สถานี	ปริมาณโปแตสเซียม (K) ในน้ำตัวอย่าง (mgL ⁻¹)			
	19 กุมภาพันธ์ 2545	27 พฤษภาคม 2545	24 สิงหาคม 2545	5 ธันวาคม 2545
1	5.36 ± 0.02	9.27 ± 0.06	1.50 ± 0.01	2.92 ± 0.02
2	71.75 ± 0.01	34.68 ± 0.39	8.72 ± 0.03	17.42 ± 0.07
3	95.11 ± 0.19	135.80 ± 0.66	80.20 ± 0.02	62.58 ± 0.47
4	-	20.82 ± 0.30	7.25 ± 0.002	39.01 ± 0.12
5	5.40 ± 0.07	5.24 ± 0.03	1.77 ± 0.02	2.58 ± 0.01
6	13.13 ± 0.32	18.11 ± 0.18	4.52 ± 0.03	7.36 ± 0.00
7	10.17 ± 0.05	12.43 ± 0.12	4.12 ± 0.01	4.15 ± 0.07
8	8.59 ± 0.09	2.22 ± 0.05	3.04 ± 0.01	3.87 ± 0.01
9	8.51 ± 0.08	5.48 ± 0.06	3.18 ± 0.01	4.08 ± 0.01
10	4.37 ± 0.02	8.50 ± 0.06	2.28 ± 0.02	4.12 ± 0.03
11	1188.25 ± 8.80	786.96 ± 6.05	-	-
12	10.58 ± 0.15	8.49 ± 0.03	2.33 ± 0.02	4.65 ± 0.01
13	10.70 ± 0.14	8.65 ± 0.04	2.39 ± 0.02	4.05 ± 0.00

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณปรอทในน้ำตัวอย่างแสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

สถานี	ปริมาณปรอท (Hg) ในน้ำตัวอย่าง (µg/L)			
	19 กุมภาพันธ์ 2545	27 พฤษภาคม 2545	24 สิงหาคม 2545	5 ธันวาคม 2545
1	1.013 + 0.013	7.424 + 0.093	ND	0.621 + 0.074
2	1.743 ± 0.001	4.033 ± 0.017	ND	0.668 ± 0.147
3	0.965 ± 0.001	2.715 ± 0.020	ND	0.348 ± 0.052
4	-	6.107 ± 0.015	ND	0.694 ± 0.031
5	0.964 ± 0.001	1.008 ± 0.029	ND	0.454 ± 0.037
6	0.707 + 0.009	1.025 + 0.011	ND	ND
7	0.962 ± 0.001	1.902 ± 0.002	ND	0.089 ± 0.010
8	2.935 ± 0.015	0.648 ± 0.031	0.060 ± 0.010	ND
9	4.350 ± 0.006	1.64 ± 0.002	0.275 ± 0.051	0.088 ± 0.001
10	4.211 ± 0.025	0.850 ± 0.022	ND	ND
11	10.040 + 0.000	*	-	-
12	4.436 ± 0.003	0.577 ± 0.048	0.416 ± 0.029	1.624 ± 0.097
13	4.626 ± 0.004	0.807 ± 0.059	0.136 ± 0.022	ND

LOD ของการวิเคราะห์ปรอท = 0.0300 µg/L

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่ว (Pb) แสดงค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

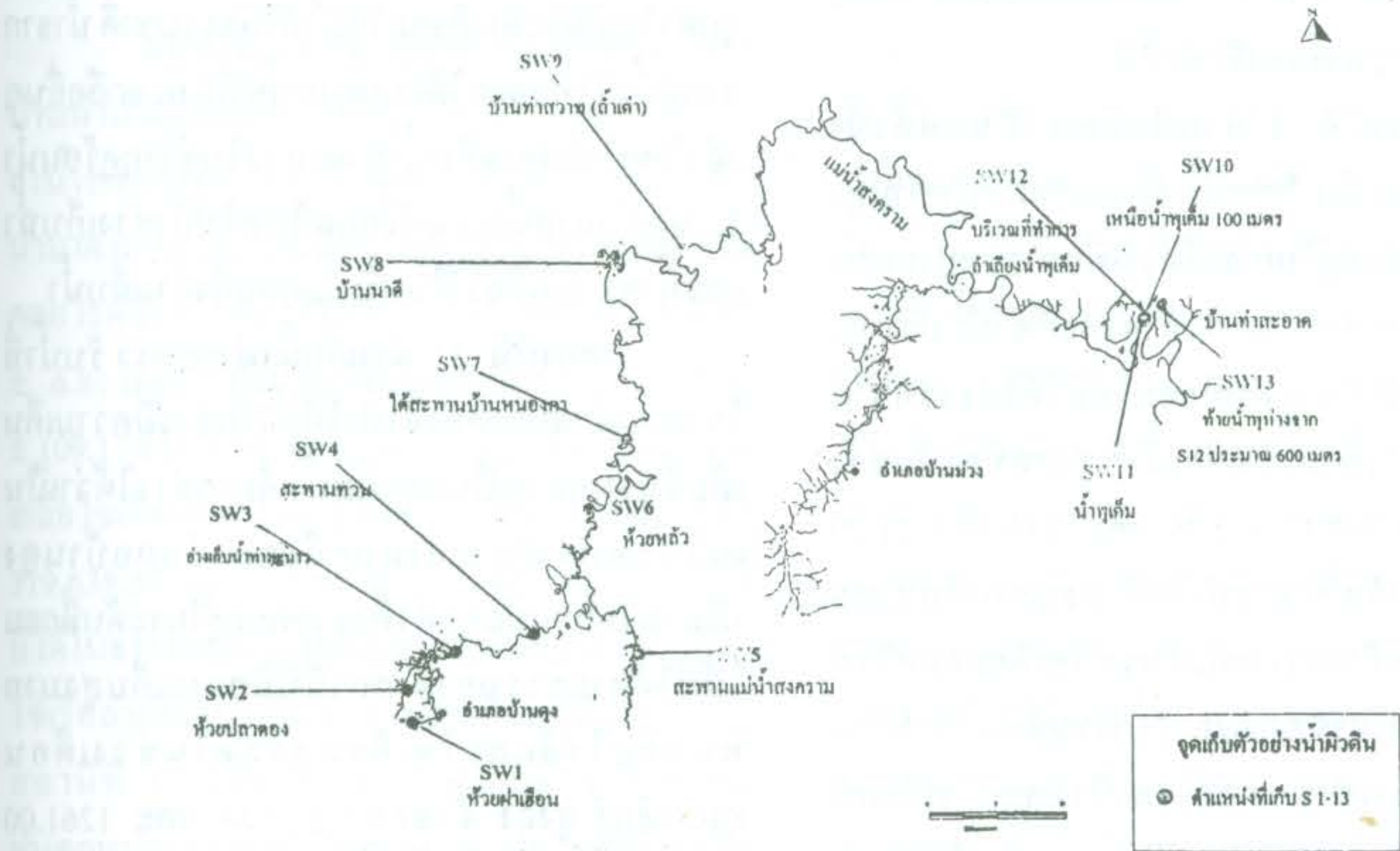
สถานีที่	ปริมาณตะกั่ว (Pb)ในน้ำตัวอย่าง (µg/L)			
	19 กุมภาพันธ์ 45	27 พฤษภาคม 45	24 สิงหาคม 45	5 ธันวาคม 45
1	0.007±0.001	12.445±1.005	ND	0.636±0.275
2	0.012±0.001	18.750±1.400	ND	2.981±0.380
3	0.013±0.001	13.335±0.195	ND	ND
4	-	10.147±0.413	3.033±0.662	2.260±0.319
5	0.014±0.001	2.253±0.475	ND	3.641±0.656
6	0.005±0.000	ND	ND	2.257±1.972
7	0.012±0.001	2.046±0.449	1.575±0.175	1.625±0.087
8	0.005±0.001	4.223±0.631	ND	2.721±0.251
9	ND	11.695±0.485	ND	ND
10	*	ND	ND	4.643±0.552
11	0.002±0.002	ND	-	-
12	10.300±0.110	ND	ND	2.573±0.232
13	ND	5.134±1.018	3.242±0.188	ND

LOD ของการวิเคราะห์ตะกั่ว = 0.001 µg/L

ตารางที่ 8 แสดงผลการวัดค่า Conductivity

สถานีที่	ค่า Conductivity (μs)			
	19 กุมภาพันธ์ 45	27 พฤษภาคม 45	24 สิงหาคม 45	5 ธันวาคม 45
1	86.80	2050.00	522.00	53.90
2	29200.00	10480.00	17640.00	5080.00
3	6700.00	7940.00	7490.00	3670.00
4	-	990.00	8590.00	2070.00
5	506.00	301.00	859.00	221.00
6	2270.00	1691.00	5480.00	583.00
7	1114.00	733.00	4600.00	532.00
8	1048.00	201.00	2970.00	356.00
9	1133.00	365.00	3100.00	396.00
10	1529.00	719.00	1381.00	609.00
11	572000.00	503000.00	-	-
12	2690.00	726.00	1378.00	1256.00
13	1755.00	860.00	1336.00	664.00

หมายเหตุ : ND (Not Detect) ตรวจไม่พบ
: - ไม่มีการเก็บตัวอย่างในจุดนั้น
: * น้ำตัวอย่างหมด



รูปที่ 1 แสดงสถานีเก็บน้ำตัวอย่าง

สรุปและอภิปราย

ในการศึกษาผลกระทบของการทำนาเกลือ และการชะล้างของเกลือตามธรรมชาติที่มีต่อ คุณภาพน้ำในลำน้ำสงคราม ได้กำหนดสถานีเก็บ ตัวอย่างน้ำในลำน้ำไว้ทั้งสิ้น 13 สถานี ทั้งนี้เพื่อให้ เห็นผลกระทบจากกิจกรรมดังกล่าวในบริเวณบ้านดุง และบ้านโนนแสงง บ้านหนองกว้าง ซึ่งเป็นแหล่ง ทำนาเกลือแหล่งใหญ่ของจังหวัดอุดรธานี บ้าน ท่าสะอาด จังหวัดหนองคาย มีการต้มเกลือกันมาก โดยใช้น้ำพุเค็มจากกลางแม่น้ำสงคราม(สถานีที่ 11)เป็นแหล่งวัตถุดิบ สถานีเก็บตัวอย่างแสดงใน แผนที่รูปที่ 1 จากการศึกษาพบว่าสถานีที่ได้รับ ผลกระทบรุนแรงจากการทำนาเกลือและการผลิต เกลือโดยวิธีต้ม ทั้งสิ้น 3 สถานีด้วยกันคือสถานีที่ 2, 3 และ 12 ส่วนการชะล้างธรรมชาติเห็นได้จากผล วิเคราะห์ของสถานีที่ 1 ซึ่งไม่รุนแรง สถานีที่ 6, 7, 8, 9 และ 10 ได้รับผลกระทบจากการทำเกลือ บ้านดุง โดยอ้อมกล่าวคือสถานีเหล่านี้รับน้ำจากสถานีที่ 4 ซึ่งได้รับผลกระทบโดยตรงจาก สถานีที่ 3 ในช่วงน้ำ หลาก ส่วนสถานีที่ 12 และ 13 ได้รับผลกระทบจากการ ต้มเกลือบ้านท่าสะอาด เนื่องจากมีพื้นที่จำกัดจึง ขอสรุปเฉพาะบางสถานีเท่านั้น

สถานีที่ 1 ห้วยผาเหื่อน เป็นแหล่งน้ำ ธรรมชาติขนาดเล็ก ไหลผ่านบริเวณทำนาเกลือบ้านดุง น้ำมีคุณภาพจัดอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้เพื่อการชลประทาน ได้ และเหมาะกับการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ ปริมาณ โลหะหนักไม่เกินระดับที่ยอมให้มีได้ในธรรมชาติ ปริมาณคลอไรด์และโซเดียมมีค่าสูงสุดที่พบในช่วง ต้นฤดูฝนคือ 567.17 ± 2.76 และ 3119.50 ± 21.29 mgL^{-1} ตามลำดับ ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ $2,050$ $\mu\text{S/cm}$ คิดเป็นความเค็มในรูปโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เท่ากับ 935.83 mgL^{-1} บริเวณต้นน้ำใกล้เคียง จุดนี้ไม่พบการทำนาเกลือ คลอไรด์และโซเดียมที่ เพิ่มขึ้นช่วงต้นฤดูฝนน่าจะเกิดจากการชะล้างคราบ เกลือบนพื้นดินตามธรรมชาติในช่วงฤดูแล้งพอถึงช่วง

ที่ฝนตกมาก ๆ จะไม่เห็นผลกระทบนี้ ช่วงฝนตกชุก มาก ๆ ในเดือนธันวาคม มีความเค็มคิดในรูปเกลือ โซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 3.84 mgL^{-1}

สถานีที่ 2 ห้วยปลาตอง แหล่งน้ำนี้รับ น้ำจากห้วยผาเหื่อนและเป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบ เนื่องจากการทำนาเกลือบริเวณบ้านดุง ช่วงฤดูฝน ผู้ประกอบการหยุดทำนาเกลือและมีการเจือจางของ น้ำฝนทำให้ปริมาณคลอไรด์และโซเดียมลดลงเท่ากับ $3,231.00 \pm 1.00$ และ 378.43 ± 5.14 mgL^{-1} ตาม ลำดับ คิดเทียบเป็นโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 962.53 mgL^{-1} และค่าการนำไฟฟ้าลดลงเท่ากับ $10,480.00$ μS ช่วงเดือนสิงหาคมมีฝนชุกคุณภาพน้ำดีขึ้นมีปลา อาศัยอยู่ แต่ส่วนใหญ่เป็นปลานิลตัวเล็ก ๆ เมื่อ ฝนหยุดตกเริ่มมีการทำนาเกลือ ในเดือนพฤศจิกายน น้ำ ณ จุดนี้จะได้รับอิทธิพลจากน้ำบาดาลเค็มที่ถูกดูด ขึ้นมาเพื่อผลิตเกลือทำให้น้ำบริเวณนี้เค็มจัดขึ้นเป็น ลำดับ จนถึงช่วงเดือนกุมภาพันธ์ตรวจพบปริมาณ คลอไรด์และโซเดียมมีค่าสูงถึง $9,435.67 \pm 3.21$ และ 2267.27 ± 2.64 mgL^{-1} ตามลำดับ หรือคิดเป็นเกลือ โซเดียมคลอไรด์เท่ากับ $5,766.75$ mgL^{-1} ค่าการ นำไฟฟ้าสูงถึง $29,200.00$ $\mu\text{S/cm}$ ปริมาณโลหะหนัก ทุกตัวไม่เกินระดับที่ยอมให้มีได้ในธรรมชาติ น้ำจาก สถานีนี้จะไหลลอดใต้ถนนผ่านพื้นที่ทำนาเกลืออื่นๆ แล้วไหลไปลงอ่างเก็บน้ำท่ามะนาว ในช่วงฤดูร้อนน้ำ ระเหยเร็วมากน้ำจะแห้งก่อนไหลไปถึงอ่างเก็บน้ำ และทิ้งคราบเกลือไว้ในบริเวณก่อนถึงอ่างเก็บน้ำ

สถานีที่ 3 อ่างเก็บน้ำท่ามะนาว รับน้ำที่ ไหลจากห้วยปลาตองจึงทำให้น้ำในอ่างมีความเค็ม เพิ่มขึ้นจนกลายเป็นอ่างเก็บน้ำเค็ม กล่าวได้ว่าเป็น ผลกระทบจากการทำนาเกลือของอำเภอบ้านดุง ปริมาณโลหะหนักทุกตัวที่ตรวจพบอยู่ในระดับที่ยอม ให้มีได้ตามธรรมชาติ สถานีนี้มีความเค็มสูงมาก พบคลอไรด์และโซเดียมสูงสุดในช่วงเดือน กุมภาพันธ์ สูงถึง $4,397.67 \pm 1.53$ และ 1261.00 ± 8.69 mgL^{-1} หรือคิดเป็นปริมาณเกลือโซเดียม คลอไรด์เท่ากับ $3,207.33$ mgL^{-1} ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ

6,700.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ เมื่อผ่านช่วงฤดูฝนไปแล้วน้ำมีความเค็มลดลง ปริมาณคลอไรด์และโซเดียมลดลงเท่ากับ 1264.00 ± 7.00 และ $837.29 \pm 18.4 \text{ mgL}^{-1}$ ตามลำดับ หรือคิดเป็นเกลือโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ $2,129.63 \text{ mgL}^{-1}$ ช่วงฤดูแล้งจะพบคราบเกลือเป็นรัศมีรอบอ่างประมาณ 1 ตารางกิโลเมตร ทำให้พื้นที่เหล่านั้นเกิดสถานะดินเค็มและไม่อาจใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้ยังอาจส่งผลกระทบต่อน้ำบาดาลบริเวณใกล้เคียง (เอกอัมพล เทียมกลาง, 2546) คราบเกลือเหล่านี้เกิดจากน้ำเค็มที่ไหลล้นจากนาเกลือบริเวณบ้านดุง ในฤดูฝนน้ำฝนจะชะคราบเกลือเหล่านี้ลงสู่อ่างเก็บน้ำและไหลล้นข้ามฝายลงไปรวมกับน้ำในห้วยทวน (สถานีที่ 4) และไหลลงแม่น้ำสงครามในที่สุด น้ำในอ่างเก็บน้ำนี้ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการชลประทานหรือเป็นแหล่งอาศัยของสัตว์น้ำได้ นั่นหมายความว่าอ่างเก็บน้ำแห่งนี้ใช้ประโยชน์อะไรไม่ได้แล้ว หากมีการทำนาเกลือกันอย่างต่อเนื่องและมากขึ้น ควรมีการดูแลเกี่ยวกับการเพิ่มขึ้นของระดับความเค็มของน้ำในอ่างเก็บน้ำนี้อย่างใกล้ชิด และควรมีการศึกษาการกระจายของดินเค็มและคุณภาพน้ำบาดาลในบริเวณรอบอ่างเก็บน้ำด้วยเพื่อหาทางป้องกันต่อไป

สถานีที่ 11 น้ำพุเค็ม เป็นน้ำพุเค็มที่ชาวบ้านนำมาผลิตเกลือ โดยชาวบ้านได้ลงทุนเจาะกลาลำน้ำสงครามฝั่งทอเพื่อจุดน้ำเค็มขึ้นมาดื่มเกลือ น้ำบาดาล ณ สถานีนี้มีความเค็มสูงมาก พบปริมาณคลอไรด์ช่วง $168,743.33 \pm 2.89$ ถึง $194,597.67 \pm 6.81 \text{ mgL}^{-1}$ ปริมาณโซเดียมอยู่ในช่วง $120,618.33 \pm 109.17$ ถึง $79,260.42 \pm 296.1 \text{ mgL}^{-1}$ คิดเป็นปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์อยู่ในช่วงเท่ากับ $210,040.11$ ถึง $319,638.57 \text{ mgL}^{-1}$ ปริมาณโลหะหนักอยู่ในระดับที่มีได้ในธรรมชาติ ช่วงเดือนกุมภาพันธ์ 2545 ชาวบ้านใช้เรือลำเลียงน้ำเค็มล่องไปดื่มที่ริมตลิ่ง ระหว่างสถานีที่ 12 และ 13 ช่วงฤดูฝนเดือนสิงหาคมฝนตกหนัก ระดับน้ำในแม่น้ำสูง ปลายทอจึงจมอยู่ใต้น้ำ ไม่สามารถจุดน้ำเค็มขึ้นมาใช้งานได้และ

ไม่สามารถเก็บตัวอย่างได้ หลังน้ำลดช่วงเดือนพฤศจิกายน 2545 ชาวบ้านได้ต่อท่ออย่างถาวรขึ้นมาบนริมตลิ่ง ณ สถานีที่ 12 เพราะย้ายหม้อต้มจากในบ้านออกมาไว้ที่นี่เพื่อเป็นการลดมลพิษทางอากาศลง และใช้ปั๊มจุดน้ำเค็มขึ้นมาใส่หม้อต้มโดยตรง การปนเปื้อนของน้ำเค็มจึงน่าจะลดลงจากปีที่ผ่านมา เดือนธันวาคม 2545 ซึ่งเป็นการเก็บตัวอย่างครั้งสุดท้าย มีการดื่มเกลือบนริมตลิ่งเพียง 2 ราย นอกนั้นยังย้ายหม้อต้มเกลืออยู่ ผู้วิจัยไม่สามารถเก็บน้ำ ณ จุดนี้ได้เนื่องจากชาวบ้านเก็บปั๊มไปแล้ว ข้อมูลของน้ำ ณ จุดนี้จึงมีเพียง 2 ครั้งเท่านั้น

สถานีที่ 12 บริเวณทำการลำเลียงน้ำพุเค็ม น้ำในสถานีนี้ได้รับการปนเปื้อนสูงที่สุดเนื่องจากมีการจุดน้ำพุเค็มจากท่อ ณ สถานีที่ 11 ใส่ในเรือหางยาว ซึ่งจะมีการหกและมีส่วนที่ล้นออกจากเรือ แม้ขณะที่ไม่มีการจุดน้ำเค็มขึ้นมาใช้งาน ปลายทอที่ฝังอยู่ใต้ดินจะมีน้ำเค็มไหลออกมาตลอดเวลา ทำให้น้ำบริเวณนี้มีความเค็มสูงสุดในลำน้ำสงคราม ปริมาณคลอไรด์และโซเดียมสูงสุดในเดือนกุมภาพันธ์เท่ากับ 754.60 ± 4.50 และ $382.96 \pm 1.50 \text{ mgL}^{-1}$ คิดเป็นปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 974.05 mgL^{-1} ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ $2,690.00 \text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ แต่เดือนสิงหาคม 2545 มีฝนชุกกระดับน้ำสูงมาก ปริมาณคลอไรด์และโซเดียมเท่ากับ 39.03 ± 0.59 และ $26.33 \pm 0.09 \text{ mgL}^{-1}$ คิดเป็นปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 66.97 mgL^{-1} เท่านั้น ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ $1,256.00 \text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ เดือนธันวาคม 2545 ชาวบ้านต่อท่อถาวรขึ้นไปบนฝั่งแล้ว การปนเปื้อนจึงลดลงจากปีที่ผ่านมา ถือได้ว่าสถานีที่ 12 ได้รับผลกระทบรุนแรงที่สุดในช่วงฤดูแล้งทำให้คุณภาพน้ำลดต่ำลงจนไม่สามารถนำไปใช้เพื่อการอุปโภคและชลประทานได้แต่ในช่วงฤดูฝนคุณภาพน้ำจะดีมาก และใช้ประโยชน์ได้เต็มที่ ส่วนปริมาณโลหะหนักอยู่ในระดับที่มีได้ในธรรมชาติตลอดปี

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคณมหาวิทยาลัยขอนแก่น
เพื่อนร่วมงานจากภาควิชาเทคโนโลยีธรณี
คณะเทคโนโลยีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้าน
การสำรวจพื้นที่และข้อมูลที่จำเป็นต่างๆ ภาควิชาเคมี
และคณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ใช้เครื่องมือต่างๆ จึงใคร่
ขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

เอกสารอ้างอิง

คณะกรรมการจัดทำคู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย สมาคม
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
(2540). คู่มือ การวิเคราะห์น้ำเสีย.

ชุติมา คุณุสมุทร สุนันทา เสงรัมย์ รัตนา มหาชัย
ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง งามนิจ นนทโส ตรีตราภรณ์
ชูศรี วิรัช ว่องพัฒนากุล เฉลิม เรื่องวิริยชัย
ศุภลักษณ์ ศรีจรรย์ และสุจิตรา อุดลย์เดชา.
(2531). ผลกระทบของอุตสาหกรรมและ
เกษตรกรรมที่มีต่อคุณภาพของน้ำในลำน้ำพอง.
วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 16 (2):96-118.

ชุติมา คุณุสมุทร สุนันทา เสงรัมย์ รัตนา มหาชัย
ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง งามนิจ นนทโส ตรีตราภรณ์
ชูศรี วิรัช ว่องพัฒนากุล เฉลิม เรื่องวิริยชัย
ศุภลักษณ์ ศรีจรรย์ และสุจิตรา อุดลย์เดชา.
(2531). ผลกระทบของอุตสาหกรรมและ
เกษตรกรรม ที่มีต่อคุณภาพของน้ำในลำน้ำ
พอง (ต่อ). วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 16 (3):
161-179.

ชุติมา คุณุสมุทร สุนันทา เสงรัมย์ รัตนา มหาชัย
ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง งามนิจ นนทโส ตรีตราภรณ์
ชูศรี วิรัช ว่องพัฒนากุล เฉลิม เรื่องวิริยชัย
ศุภลักษณ์ ศรีจรรย์ และสุจิตรา อุดลย์เดชา.
(2531). ผลกระทบของอุตสาหกรรมและ
เกษตรกรรม ที่มีต่อคุณภาพของน้ำในลำน้ำ
พอง (ต่อ). วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 16 (4):
227-235.

ชุติมา คุณุสมุทร สุนันทา เสงรัมย์ รัตนา มหาชัย
ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง งามนิจ นนทโส ตรีตราภรณ์
ชูศรี วิรัช ว่องพัฒนากุล เฉลิม เรื่องวิริยชัย
ศุภลักษณ์ ศรีจรรย์ และสุจิตรา อุดลย์เดชา.
(2532). ผลกระทบของอุตสาหกรรมและ
เกษตรกรรมที่มีต่อคุณภาพของน้ำในลำน้ำ
พอง (ต่อ). วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 17 (1):
50-62.

ชุติมา คุณุสมุทร สุนันทา เสงรัมย์ รัตนา มหาชัย
ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง งามนิจ นนทโส ตรีตราภรณ์
ชูศรี วิรัช ว่องพัฒนากุล เฉลิม เรื่องวิริยชัย
ศุภลักษณ์ ศรีจรรย์ และสุจิตรา อุดลย์เดชา.
(2531). ผลกระทบของอุตสาหกรรมและ
เกษตรกรรมที่มีต่อคุณภาพของน้ำในลำน้ำพอง
(ตอนจบ). วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 17
(2.):103-116.

มหาวิทยาลัยขอนแก่น. (2539). งานศึกษาและ
จัดทำแผนป้องกันแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อม
จากการเก็บ ถักน้ำในลำน้ำโครงการ
แม่น้ำสงคราม.



แบคทีเรียที่ใช้ toluene เป็นแหล่งต้นตอคาร์บอนและสามารถสลาย trichloroethylene (TCE) ได้ ที่แยกได้จากธรรมชาติและแหล่งปนเปื้อน และความสามารถในการใช้สารต้นตอคาร์บอนตัวอื่น

"Toluene-utilizing/trichloroethylene (TCE)-degrading bacteria isolated from natural environment and the contaminated-water site and their capabilities in utilizing the other organic compounds"

นิภา มลีนทวีสมัย¹ และ สุวรรณานิยมสนิพ²

บทคัดย่อ

Trichloroethylene (TCE) เป็นสารมลพิษชนิดสารอินทรีย์ระเหย (Volatile organic compound, VOC) ชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด กระบวนการย่อยสลาย TCE มีลักษณะเป็นโคเมตาบอลิซึม (Cometabolism) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการคัดเลือกแบคทีเรียที่สลาย TCE โดยเลี้ยงและเพิ่มจำนวน (enrichment) ในอาหารสูตรปรับค่าที่มี toluene 250 ppm (2.71mM) เป็นแหล่งต้นตอคาร์บอน ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าจากตัวอย่างที่ได้จากแหล่งดินและน้ำธรรมชาติ 5 สายพันธุ์ คือ T1/2, T1/3, T1/4, T1/8, และ T5/10 และจากแหล่งน้ำที่ปนเปื้อน 4 สายพันธุ์ คือ T4/1, T3/5, T3/9 และ T3/13 ผลการบ่งบอกเอกลักษณ์ของเชื้อ

โดยใช้ลักษณะทางสรีระวิทยา และปฏิกิริยาชีวเคมี พบว่า T1/2, T1/3, T1/4 และ T1/8 คล้ายกับ *Pseudomonas putida* 99.6% T3/9 คล้ายกับ *Rastonia picketti* 92.4% T3/13 คล้ายกับ *Acinetobacter lwoffii* 91.7% และ T5/10 คล้ายกับ *Comamonas acidovorans* 99.3% การศึกษาความสามารถของแบคทีเรียในการสลาย trichloroethylene ด้วยเทคนิค Head space และตรวจสอบปริมาณ TCE ด้วย Gas chromatography ที่มี FID เป็น detector ทำโดยใช้เชื้อที่เลี้ยงในสารละลายอาหารสูตรปรับค่าภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนที่ระยะ late log phase พบว่า T1/2, T1/3, T1/4, T3/5, T3/9, T3/13 หน่อ TCE ได้ถึง 10 ppm โดยพบว่าการสลาย TCE ของเชื้อ T3/9, T1/4, T3/5, T1/3, T1/2, T3/13, T1/8, T5/10 และ T4/1 ภายใต้สภาวะที่มี

¹ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ออกซิเจนเป็นเวลา 18 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีความสามารถสลาย TCE ที่ 10 ppm ได้เท่ากับ 20.01, 17.07, 16.56, 16.56, 12.12, 7.04, 3.78, 2.24 และ 0.91 ppm/mg protein ตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า T3/9, T1/4, T3/5 และ T1/3 มีประสิทธิภาพสูงสุดในการสลาย TCE ($p < 0.001$) ส่วนผลการศึกษาความสามารถของเชื้อ T1/3, T3/5, T3/9 และ T3/13 ในการใช้สารตั้งต้นคาร์บอน 11 ชนิด ได้แก่ toluene, benzene, ethyl benzene, *o*-cresol, *m*-cresol, *p*-cresol, *o*-xylene, *m*-xylene, *p*-xylene, phenol และ ethanol ที่ความเข้มข้น 1 และ 5 mM ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ 48 ชั่วโมง พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของสารตั้งต้นคาร์บอนในปริมาณต่ำ 1 mM เชื้อ T1/3 T3/5, T3/9 สามารถใช้สารตั้งต้นคาร์บอนได้เกือบทุกชนิดแต่ในระดับที่ต่างกัน ส่วนที่ระดับความเข้มข้นของสารตั้งต้นคาร์บอนในปริมาณสูง 5 mM เชื้อสามารถใช้ชนิดของสารตั้งต้นคาร์บอนได้น้อยลง ได้แก่ T1/3 สามารถใช้ toluene ที่ 2.71 mM และ ใช้ cresol, phenol, benzene และ ethanol ที่ 5 mM ได้, T3/5 และ T3/9 สามารถใช้ toluene, benzene, ethanol และ phenol ได้, T3/13 สามารถใช้ ethanol, toluene และ benzene ได้เชื้อทุกสายพันธุ์ไม่สามารถใช้ ethylbenzene และ xylene ได้ยกเว้นบางสายพันธุ์ใช้ได้น้อยมากที่ความเข้มข้นต่ำ 1 mM

Abstract

Trichloroethylene (TCE) is a toxic volatile organic compound which using in many industries. TCE degradation is occurred by cometabolism. In this research, toluene-utilizing/TCE-degrading bacteria were isolated aerobically at 30 °C by enrichment in minimum medium supplemented with toluene 250 ppm (2.71 mM) as a sole

carbon source. T1/2, T1/3, T1/4, T1/8 and T5/10 was isolated from natural soil and water. T4/1, T3/5, T3/9 and T3/13 was isolated from contaminated water. Physiological and Biochemical test indicated that T1/2, T1/3, T1/4 and T1/8; T3/9; T3/13 and T5/10 were similar to *Pseudomonas putida* (99.6%), *Rastonia picketti* (92.4%), *Acinetobacter levoffii* (91.7%) and *Commanonus acidovorans* (99.3%). TCE degradation capability studies of those isolates, cultured at late log phase under aerobically 30 °C, were conducted by head space technique with Gas Chromatography equipped with FID detector. The results showed that T1/2, T1/3, T1/4, T3/5, T3/9 and T3/13 could tolerance to TCE 10 ppm. TCE degradation of T3/9, T1/4, T3/5, T1/3, T1/12, T1/13, T1/8, T5/10 and T4/1 at 18 hours was 20.01, 17.07, 16.56, 16.50, 12.12, 7.04, 3.78, 2.24 and 0.91 ppm/mg protein respectively. By statistically indicated that T3/9, T1/4, T3/5 and T1/3 got the highest activity ($p < 0.001$). T1/3, T3/5, T3/9 and T3/13 were studied on utilization of the other organic compounds as a sole carbon source : toluene, benzene, ethylbenzene, *o*-cresol, *m*-cresol, *p*-cresol, *o*-xylene, *m*-xylene, *p*-xylene, phenol and ethanol at 5mM aerobically 30 °C at 24 or 48 hours. The results showed that T1/3, T3/5 and T3/9 could utilize almost all kinds of those organic compounds at low concentration of 1 mM but at different capabilities. Those isolates could utilize some organic compounds at 5 mM as following. T1/3 could utilize toluene at 1 mM and cresol, phenol, benzene and ethanol at 5 mM. T3/5 and T3/9 could utilize toluene, benzene, ethanol and phenol. T3/13 could utilize toluene, benzene and ethanol. Every isolate could not utilize ethylbenzene and xylene accepted for some isolates could utilize very little at 1 mM.

บทนำ

Trichloroethylene (TCE) เป็นสารระเหย (Volatile organic compound, VOC) ชนิดหนึ่งที่นิยมใช้เป็นตัวชะล้างกรีซในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องกล และใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมสี เป็นต้น บางประเทศในยุโรปและสหรัฐอเมริกา เริ่มพบว่าการปนเปื้อน TCE ในน้ำดื่ม (Goepfert et al., 1995) จากรายงานการวิจัยของ Montani and Lefimine (1974) พบว่า เมื่อ TCE มีการปนเปื้อนลงไปในดินและผ่านลงไปยังชั้นน้ำใต้ดิน ในระบบที่ปราศจากออกซิเจน มีแบคทีเรียบางชนิดสามารถเปลี่ยน TCE ให้อยู่ในรูปของ vinyl chloride ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารก่อมะเร็งที่รุนแรง

กระบวนการย่อยสลาย TCE มีลักษณะเป็นโคเมตาบอลิซึม (Cometabolism) จุลินทรีย์ที่ใช้สารบางชนิดเป็นแหล่งต้นตอคาร์บอน เช่น methane, propane, toluene หรือ phenol เป็นต้น มีความสามารถในการย่อยสลาย TCE ได้ด้วย (Ensley, 1991) ในสภาวะที่ใช้ออกซิเจน จุลินทรีย์จะมีการผลิตเอนไซม์จำพวก oxygenases ชนิดต่างๆ ที่สามารถใช้สารต้นตอคาร์บอนที่มักเป็นกลุ่มที่มีวงแหวนเป็นองค์ประกอบและสามารถสลาย TCE ได้ด้วย และให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ไม่เป็นสารก่อมะเร็ง เช่น แบคทีเรีย *Burkholderia cepacia* G 4 ที่เจริญโดยใช้ toluene เป็นสารต้นตอคาร์บอน สามารถสลาย TCE ได้โดยใช้เอนไซม์ toluene 2-monooxygenase ให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) formate และ glyoxylate (Newman and Wackett, 1997) และพบว่า toluene ถูกสลายเป็น o-cresol แล้วจึงสลายต่อไปเป็น 3-methylcatechol (Shields et al., 1989)

Shields et al. (1991) รายงานว่า แบคทีเรียแต่ละชนิดจะมีเอนไซม์ toluene oxygenases แตกต่างกันในการสลาย toluene เป็นแหล่งต้นตอคาร์บอน ซึ่งจะให้ผลิตภัณฑ์แตกต่างกัน 5 ชนิด โดยเอนไซม์

5 ชนิดได้แก่ toluene 2-monooxygenase, toluene 3-monooxygenase, toluene 4-monooxygenase, toluene methyl-monooxygenase และ toluene dioxygenase สลาย toluene ให้ผลิตภัณฑ์แตกต่างกันดังนี้ o-cresol, m-cresol, p-cresol, benzoic acid และสารประกอบ toluene diol ตามลำดับ ซึ่ง Wanner and McCarty (1997) ได้ทำการตรวจสอบชนิดของเอนไซม์ toluene oxygenases ทั้ง 5 ชนิด จากจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อน TCE โดยใช้ DNA Probes ที่ได้จากเชื้อ *Pseudomonas* spp. พบว่าในแต่ละแหล่งมีความหลากหลายของชนิดของเอนไซม์ เมื่อใช้ทั้ง toluene และ phenol เป็นแหล่งต้นตอคาร์บอน และพบว่า toluene 2-monooxygenases เป็นชนิดที่พบมากที่สุด (dominant) Fujita และ Ike (1997) ได้ทำการศึกษาความสามารถและลักษณะการสลาย TCE ของเชื้อแบคทีเรียหลายชนิดที่ใช้ phenol เป็นแหล่งต้นตอคาร์บอน แล้วพบว่าเชื้อมีความสามารถสลาย TCE ได้แตกต่างกัน รวมทั้งลักษณะการสลายที่มีการสลาย TCE ได้อย่างสมบูรณ์และไม่สมบูรณ์แตกต่างกัน ซึ่งบ่งชี้ว่าอาจเกิดจากคุณสมบัติของเอนไซม์ที่แตกต่างกัน

จากรายงานการศึกษาของสถาบันสิ่งแวดล้อมไทย (Thailand Environment Institute, 1998) พบว่าระหว่างปี ค.ศ. 1993 ถึง 1997 มีการนำเข้า TCE ถึง 59,914 ตัน ซึ่งทำให้มองเห็นปัญหาการปนเปื้อน TCE ที่จะเกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อมในอนาคต งานวิจัยนี้จึงได้ทำการแยกและคัดเลือกเชื้อแบคทีเรียที่มีความสามารถใช้ toluene เป็นแหล่งต้นตอคาร์บอน และมีความสามารถสลาย TCE มาทำการศึกษาความสามารถในการสลาย TCE และการใช้สารต้นตอคาร์บอนตัวอื่น เพื่อจะเป็นประโยชน์ในการศึกษาทางด้าน การบำบัดมลพิษโดยชีววิธี (Bioremediation) ต่อไป ในการศึกษาและวิจัยนี้ได้แยกและคัดเลือกเชื้อที่สามารถใช้ toluene เป็นแหล่งต้นตอคาร์บอน และมีความสามารถสลาย trichloroethylene ได้ และศึกษาความสามารถของเชื้อในการใช้สารต้นตอคาร์บอนตัวอื่นๆ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การแยกและคัดเลือกแบคทีเรียที่สามารถใช้ toluene เป็นแหล่งคาร์บอนได้และการเก็บเชื้อ

นำ mixed culture 5 ตัวอย่างได้แก่ T1, T2, T3, T4, และ T5 จากน้ำขังบริเวณต้นน้ำแม่สา, น้ำเสียในจังหวัดเชียงใหม่, น้ำที่มีการปนเปื้อน TCE จุด ECI, น้ำที่มีการปนเปื้อน TCE จุด ECI + II และดินในป่าดิบชื้น คอยอินทนนท์ ตามลำดับ ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม มาทำการคัดเลือก โดยการนำตัวอย่าง mixed culture มาเพิ่มจำนวนในเบื่องต้น ในอาหารสูตรปรับต่ำ (ดัดแปลงจาก Yeager, 1999) ที่มี toluene เป็นแหล่งคาร์บอน (enrichment) มาแล้ว โดยศูนย์วิจัยฯ มาทำการแยกและคัดเลือกเชื้อบริสุทธิ์ในอาหารแข็งสูตรปรับต่ำที่มี toluene 50 ppm ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ทำการคัดเลือกเชื้อตามลักษณะโคโลนี สี ขนาด ที่แตกต่างกัน และคัดเลือกจากการเจริญเติบโตดี ในอาหารเหลวสูตรปรับต่ำที่มี toluene ความเข้มข้นต่างกัน คือ 50, 250 และ 500 ppm (เท่ากับ 0.54, 2.71 และ 5.43 mM ตามลำดับ) ซึ่งเลี้ยงในขวดที่ปิดด้วยฝา teflon และ aluminum cap บ่มภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน โดยเขย่าที่ 180 rpm ที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน เปรียบเทียบค่าความขุ่นของเซลล์ที่ OD 600 nm

2. อาหารเลี้ยงเชื้อ

อาหารเลี้ยงเชื้อทุกการทดลอง ใช้อาหารสูตรปรับต่ำ basal salt medium (ดัดแปลงจาก Yeager, 1999) โดยมีส่วนประกอบดังนี้ ส่วนที่ 1 สารละลาย 1 ลิตร ประกอบด้วย $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.5 g, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.05 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5 g, NaCl 0.1 g, FeSO_4 0.005 g ส่วนที่ 2 1M Phosphate buffer (pH 7.0) ปริมาตร 1 ลิตร ประกอบด้วย K_2HPO_4 8.71 g, KH_2PO_4 6.80 g ส่วนที่ 3 trace element solution 1

ลิตร ประกอบด้วย H_3BO_3 0.143 g, MnSO_4 0.005 g, $\text{ZnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.032 g, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.010 g, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.008 g, $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.005 g, EDTA 0.0001 g ส่วนที่ 4 Stock vitamin ปริมาตร 100 ml ประกอบด้วย Biotin 200 mg, B12 400 mg, Thiamin hydrochloride 0.1 g, Ca DL-pantothenate 0.1 g, Nicotinic acid 0.1 g การเตรียมอาหารเหลว สูตรปรับต่ำ 1 ลิตร ใช้อัตราส่วนของสารละลายอาหาร ดังนี้ ส่วนที่ 1 : 2 : 3 : 4 เท่ากับ 940 : 50 : 10 : 0.5 มิลลิลิตร การเตรียมเป็นอาหารแข็งใส่ bacto agar 2% ส่วนที่ 5 สารคาร์บอน ได้แก่ toluene หรือสารตัวอื่นๆ เติมในขณะทำอาหาร

3. การบ่งบอกเอกลักษณ์ของเชื้อ

นำแบคทีเรียที่แยกได้มาทำการย้อมแกรม และดูรูปร่างเซลล์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1,000 เท่า ทำการทดสอบแบคทีเรียทางสรีรวิทยา และปฏิกิริยาทางชีวเคมีต่างๆ โดยใช้ชุดตรวจสอบ API system และเทียบเคียงเอกลักษณ์ของเชื้อกับ Bergey's manual (Holt et al., 1994)

4. การศึกษาการสลาย trichloroethylene (TCE)

ทำการศึกษาความสามารถในการสลาย TCE ของแบคทีเรียที่แยกได้ ด้วยเทคนิค head space และตรวจสอบปริมาณ TCE ด้วย Gas Chromatography (GC) โดยการเลี้ยงเชื้อในอาหารสูตรปรับต่ำที่มี toluene 250 ppm เป็นแหล่งคาร์บอน นำเชื้อที่ระยะ late log phase มาศึกษาการสลาย TCE ในปริมาณที่ต่างกันคือ 1,5 และ 10 ppm (เท่ากับ 7.6, 38 และ 76 mM ตามลำดับ) ในขวดขนาด 20 มิลลิลิตร (ปริมาตรอาหาร : ขวด = 1:5) ปิดด้วยฝา Teflon และ aluminum cap ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนโดยบ่มแบบเขย่าที่ 180 rpm อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่เวลา 12 หรือ 18 ชั่วโมง ทำ 2 ซ้ำ คำนวณผลทางสถิติแบบ CRD เปรียบเทียบความสามารถในการสลาย TCE (TCE degradation) ในหน่วย ppm/mg protein

โดยเทคนิค Gas Chromatography ที่ใช้ detector ชนิด FID, capillary column ชนิด DB-624 ขนาด 0.53 mm x 30 m ขนาดตัวอย่างแก๊สที่ฉีด 0.1 ml carrier gas ใช้ He 10 ml/min โดยมีอุณหภูมิ Column, Injector และ Detector เท่ากับ 65, 200 และ 250 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทำการวัดปริมาณโปรตีนโดยการนำสารละลายเชื้อ 0.5 ml ผสมกับ 1 N NaOH 0.5 ml นำไปต้มในน้ำเดือด 10 นาที ก่อนจึงนำไปวัดปริมาณโปรตีนโดยวิธีของ Lowry et al. (1951) และใช้ Bovine serum albumin (BSA) เป็นกราฟมาตรฐานของโปรตีน

5. การศึกษาความสามารถของเชื้อในการใช้สารตั้งต้นคาร์บอนตัวอื่น

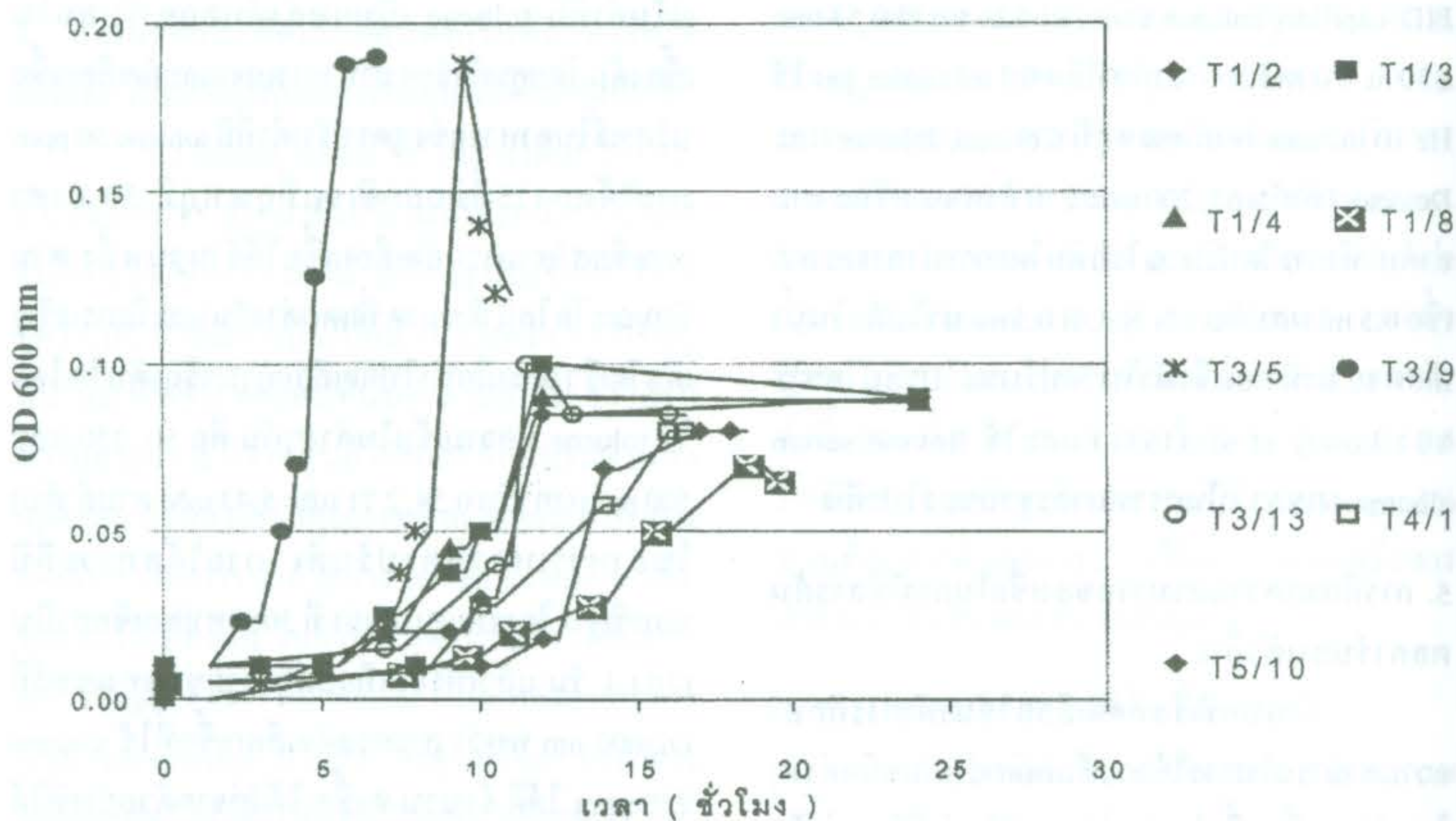
นำแบคทีเรียที่คัดเลือกได้มาทำการศึกษาความสามารถในการใช้สารตั้งต้นคาร์บอนชนิดต่างๆ โดยทำการเลี้ยงเชื้อในอาหารสูตรปรับค่าที่มีแหล่งตั้งต้นคาร์บอนชนิดต่างๆ 11 ชนิด ได้แก่ toluene, benzene, ethyl benzene, *o*-cresol, *m*-cresol, *p*-cresol, *o*-xylene, *m*-xylene, *p*-xylene, phenol และ ethanol ที่ความเข้มข้นสองระดับคือ 1 และ 5 mM ในขวดที่ปิดด้วยฝา teflon และ aluminum cap บ่มภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนโดยเขย่าที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ 48 ชั่วโมง ทำ 3 ซ้ำ แล้วคำนวณผลทางสถิติแบบ CRD เปรียบเทียบค่าความขุ่น โดยแสดงเป็นค่า OD600 nm ที่เพิ่มขึ้น จากเวลาเริ่มต้น

ผลการวิจัย

1. การคัดเลือกเชื้อแบคทีเรียที่สามารถใช้ toluene เป็นแหล่งตั้งต้นคาร์บอน

จาก mixed culture 5 ตัวอย่างได้แก่ T1, T2, T3, T4, และ T5 จากน้ำขังบริเวณต้นน้ำแม่สา, น้ำเสียในจังหวัดเชียงใหม่, น้ำที่มีการปนเปื้อน TCE จุด ECIII, น้ำที่มีการปนเปื้อน TCE จุด ECI + II และดินในป่าดิบชื้น คอยอินทนนท์ ตามลำดับ มาทำการคัดเลือกเชื้อบริสุทธิ์ โดยการนำตัวอย่าง mixed culture

ซึ่งได้ทำการเพิ่มจำนวน (enrichment) ในอาหารสูตรปรับค่าที่มี toluene เป็นแหล่งตั้งต้นคาร์บอนในเบื่องต้น โดยศูนย์วิจัยฯ มาทำการแยกและคัดเลือกเชื้อบริสุทธิ์ในอาหารแข็งสูตรปรับค่าที่มี toluene 50 ppm ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส สามารถคัดเลือกเชื้อได้จำนวนหนึ่ง ตามลักษณะโคโลนี สี ขนาด ที่แตกต่างกัน และมีการเจริญเติบโตเร็ว และเมื่อนำไปคัดเลือกการเจริญเติบโต โดยใช้ toluene ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน คือ 50, 250 และ 500 ppm (เท่ากับ 0.54, 2.71 และ 5.43 mM ตามลำดับ) ในอาหารเหลวสูตรปรับค่า ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน โดยบ่มแบบเขย่า ที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน แล้วเปรียบเทียบค่าความขุ่นของเซลล์ที่ OD600 nm พบว่า สามารถคัดเลือกเชื้อที่ใช้ toluene 250 ppm ได้ดี จำนวน 9 เชื้อ ได้แก่ จากตัวอย่างที่ได้จากแหล่งธรรมชาติ 5 สายพันธุ์ คือ T1/2, T1/3, T1/4, T1/8, และ T5/10 และจากแหล่งปนเปื้อน 4 สายพันธุ์ คือ T4/1, T3/5, T3/9 และ T3/13 โดยพบว่า T3/5 และ T3/9 เจริญเติบโตได้เร็วที่สุด โดยมีการเจริญเติบโตเข้าสู่ระยะ stationary phase ภายใน เวลา 9 ชั่วโมง และให้ค่า OD600 nm 0.190 เท่ากันและมีค่า doubling time เป็น 1 และ 0.8 ชั่วโมง ตามลำดับ รองลงมาเป็น T1/3, T3/13, T1/4 และ T/2 โดยมีการเจริญเติบโตเข้าสู่ระยะ stationary phase ภายในเวลา 12 ชั่วโมง และให้ค่า OD600 nm 0.100, 0.100, 0.090 และ 0.085 ตามลำดับ และมีค่า doubling time เป็น 3, 0.5, 3 และ 1.2 ชั่วโมงตามลำดับ ส่วน T1/8, T4/1 และ T5/10 ใช้ระยะเวลาในการเจริญเติบโตเข้าสู่ระยะ stationary phase ภายในเวลา 16 ชั่วโมง และให้ค่า OD600 nm 0.070, 0.080 และ 0.080 ตามลำดับ มีค่า doubling time เป็น 5, 4 และ 2 ชั่วโมงตามลำดับ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ผลการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสายพันธุ์ต่างๆ ที่เจริญในอาหารเหลวสูตรปรับต่ำที่มี toluene 250 ppm (2.71 mM) เป็นแหล่งคาร์บอน บ่มภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน แบบเขย่า 180 rpm ที่ 30 องศาเซลเซียส

2. การบ่งเอกลักษณ์ของเชื้อ

เมื่อนำแบคทีเรียทั้ง 9 สายพันธุ์มาทำการย้อมแกรมและดูรูปร่างเซลล์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1,000 เท่า พบว่า T1/2, T1/3, T1/4, T1/8, T3/9, T3/13, T4/1, และ T5/10 เป็นแบคทีเรียแกรมลบมีรูปร่าง coccobacilli ส่วน T3/5 เป็นแบคทีเรียแกรมบวกและมีรูปร่างเป็น coccus เมื่อทำการยืนยันผลการย้อมแกรม โดยการเลี้ยงเชื้อใน Mac Conkey agar ก็พบว่าเชื้อที่เป็นแกรมลบสามารถเจริญเติบโตได้ ส่วนเชื้อที่เป็นแกรมบวกไม่สามารถเจริญเติบโตได้ สอดคล้องกับผลการย้อมแกรม ได้ทำการบ่งเอกลักษณ์ของเชื้อแบคทีเรียในกลุ่ม non-enteric Gram-negative rod ได้แก่ T1/2, T1/3, T1/4, T1/8, T3/9, T3/13 และ T5/10 โดยใช้ API 20 NE system

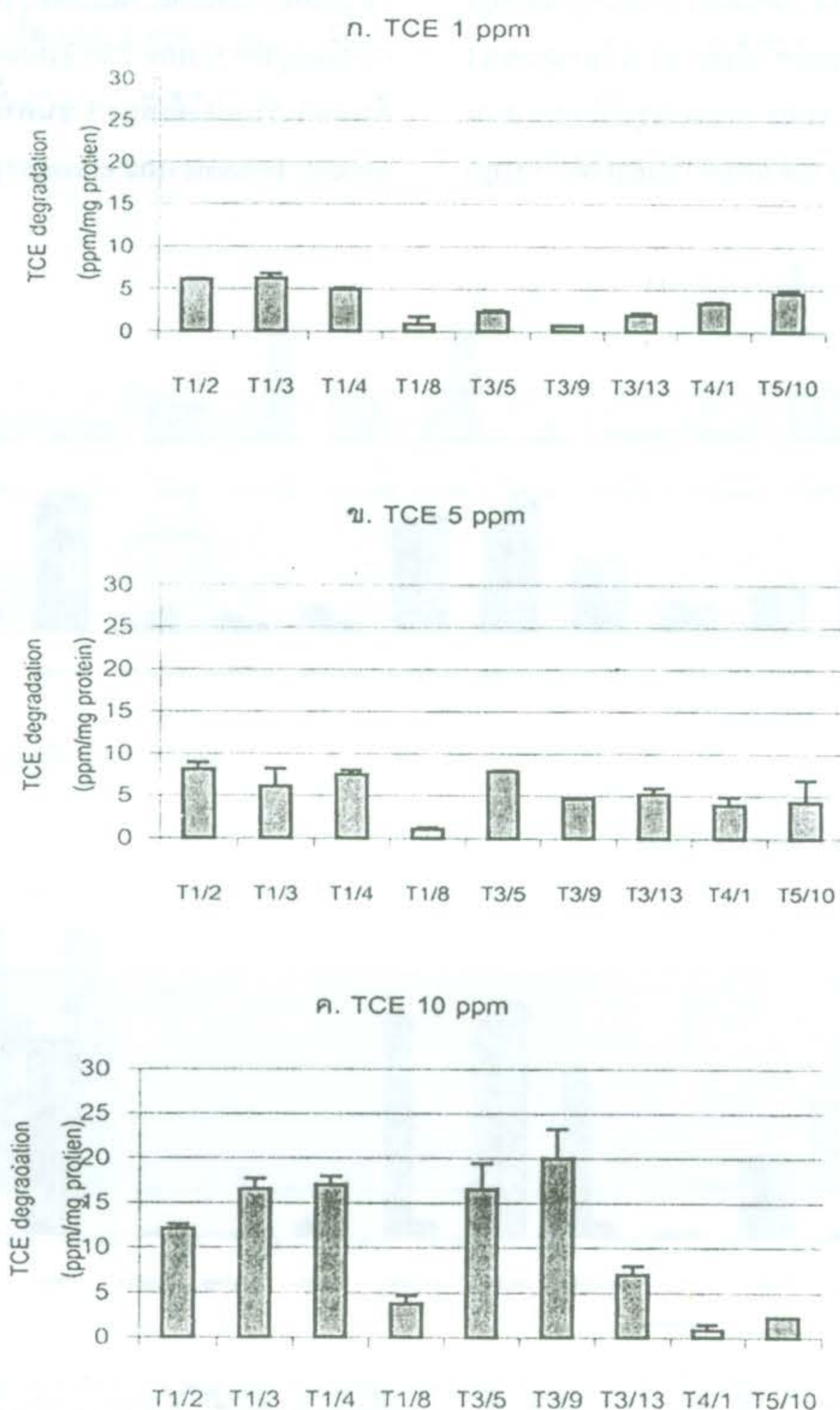
ผลการจำแนกแบคทีเรียตาม API พบว่า T1/2, T1/3, T1/4 และ T1/8 มีความใกล้เคียงกับ *Pseudomonas putida* เหมือนกัน (%identity 99.6) T3/9, T3/13 และ T5/10 มีความใกล้เคียงกับ *Rastonia picketti* (%identity 92.4) *Acinetobacter lwoffii* (%identity 91.7) และ *Comamonas acidovorans* (%identity 99.3) ตามลำดับ ส่วนผลของการบ่งบอกลักษณะของ T4/1 และ T3/5 ยังไม่ชัดเจน จึงไม่รายงาน

3. การศึกษาความสามารถของเชื้อในการสลาย trichloroethylene (TCE)

จากการศึกษาความสามารถในการสลาย TCE ของแบคทีเรียทั้งหมด 9 เชื้อ คือ T1/2, T1/3, T1/4, T1/8, T3/5, T3/9, T3/13, T4/1 และ T5/10

ผลการทดลองพบว่าแบคทีเรียทุกสายพันธุ์มีความสามารถในการสลาย TCE ได้แต่มีประสิทธิภาพและทนต่อ TCE ในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยพบว่าเชื้อ T1/2 , T1/3 , T1/4, T3/5 ,T3/9 , T3/13 ทนต่อ TCE ได้ถึง 10 ppm และมีประสิทธิภาพ ในการสลาย TCE เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ TCE เพิ่มขึ้น ค่าการสลาย TCE ของเชื้อ T3/9 , T1/4 , T3/5, T1/3 ,T1/2 , T3/13, T1/8,

T5/10 และ T4/1 ที่ระดับความเข้มข้นของ TCE 10 ppm เท่ากับ 20.01, 17.07, 16.56, 16.56, 12.12, 7.04, 3.78, 2.24 และ 0.91 ppm/mg protein ตามลำดับที่เวลา 18 ชั่วโมง ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าเชื้อ T3/9, T1/4, T3/5 และ T1/3 มีประสิทธิภาพสูงสุดในการสลาย TCE ($p < 0.001$) ดังแสดงในรูปที่ 2



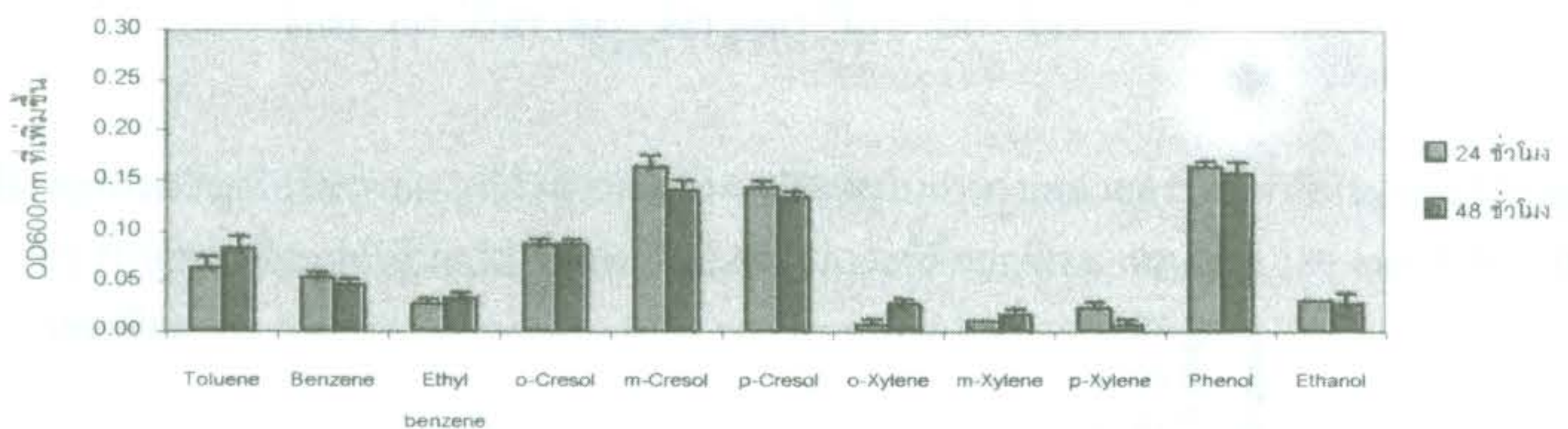
รูปที่ 2 ผลของการสลาย TCE ของแบคทีเรียสายพันธุ์ต่างๆ ในอาหารสูตรปรับค่าที่มี toluene 250 ppm (2.71mM) บ่มแบบเขย่าที่ 30 องศาเซลเซียส ที่ 180 rpm เป็นเวลา 18 ชั่วโมง เมื่อใส่ TCE ที่ปริมาณต่างๆ ดังรูป ก. TCE 1 ppm ข. TCE 5 ppm และ ค. TCE 10 ppm

4. การศึกษาความสามารถของแบคทีเรียบางสายพันธุ์ในการใช้สารต้นตอคาร์บอนตัวอื่น

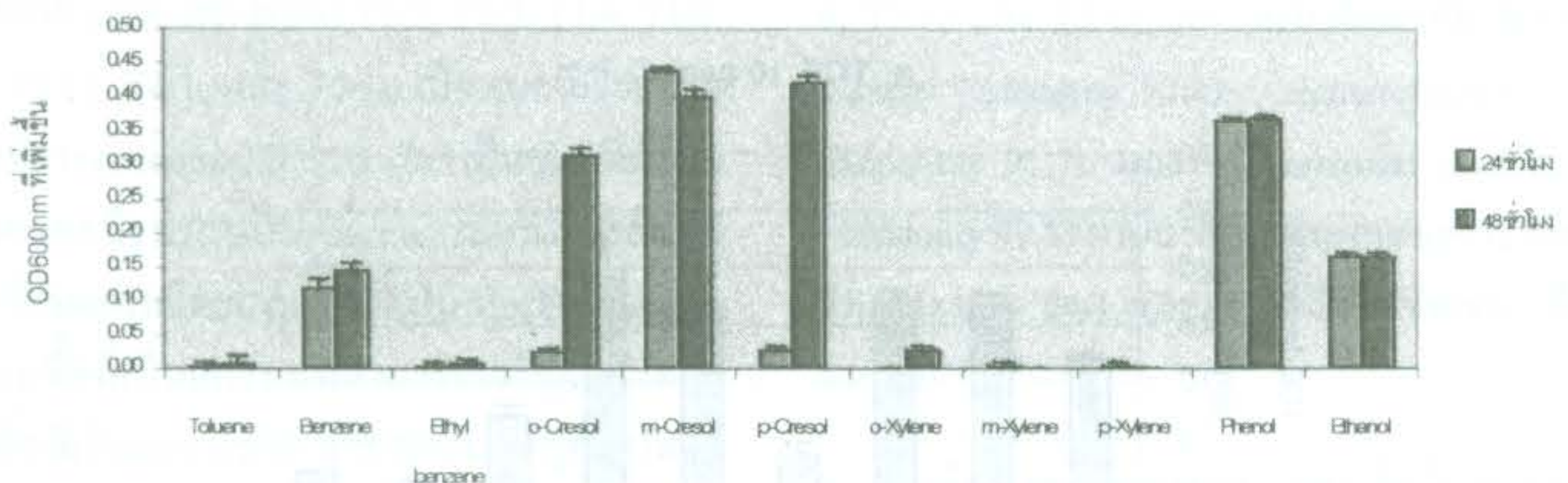
ผลการศึกษาความสามารถของเชื้อแต่ละสายพันธุ์ในการใช้สารต้นตอคาร์บอนชนิดต่างๆ พบว่าเชื้อ T1/3 สามารถใช้สารต้นตอคาร์บอนได้ทุกชนิดที่ระดับความเข้มข้นต่ำ 1 mM และสามารถใช้ toluene ที่ 2.71 mM (250 ppm) ได้ (รูปที่ 3 ก.) แต่ที่ระดับความเข้มข้นของสารต้นตอคาร์บอนทุกชนิดสูงถึง 5 mM เชื้อสามารถใช้ได้เพียงสารในกลุ่มของ cresol, benzene, phenol และ ethanol (รูปที่ 3 ข.) ส่วนเชื้อ T3/5 สามารถใช้สารต้นตอคาร์บอนได้เกือบทุก

ชนิดที่ระดับความเข้มข้นต่ำ 1 mM ยกเว้นในกลุ่มของ xylene ส่วนที่ระดับความเข้มข้นถึง 5 mM เชื้อสามารถใช้ได้เพียง toluene, benzene, phenol และ ethanol เท่านั้น (รูปที่ 4 ก. และ ข.) ส่วนเชื้อ T3/9 สามารถใช้สารต้นตอคาร์บอนได้เกือบทุกชนิดที่ความเข้มข้นต่ำ 1 mM ยกเว้นสารในกลุ่มของ cresol และ xylene บางชนิด ส่วนที่ระดับความเข้มข้นสูง 5 mM เชื้อสามารถใช้ได้เพียง toluene, benzene, phenol และ ethanol เท่านั้น (รูปที่ 5) และ T3/13 เป็นเชื้อที่สามารถใช้สารต้นตอคาร์บอนได้เพียง 3 ชนิดทั้งที่ 1 และ 5 mM คือ toluene, benzene และ ethanol (รูปที่ 6)

(ก) เชื้อ T1/3 1 mM



(ข) เชื้อ T1/3 5 mM

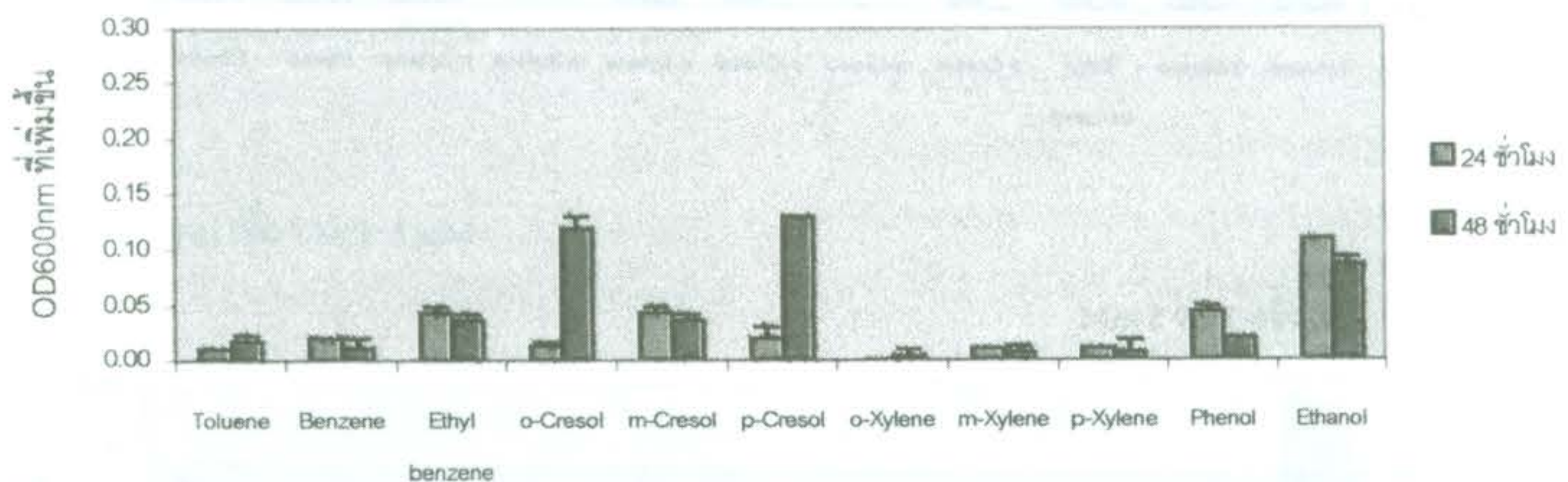


รูปที่ 3 การเจริญเติบโตสูงสุด (OD600nm ที่เพิ่มขึ้น) ของเชื้อ T1/3 เมื่อเลี้ยงในอาหารสูตรปรับค่าที่มีสารต้นตอคาร์บอนชนิดต่างๆ ที่เวลา 24 และ 48 ชั่วโมง บ่มแบบเขย่า 180 rpm ที่ 30 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้น (ก) 1 mM และ (ข) 5 mM

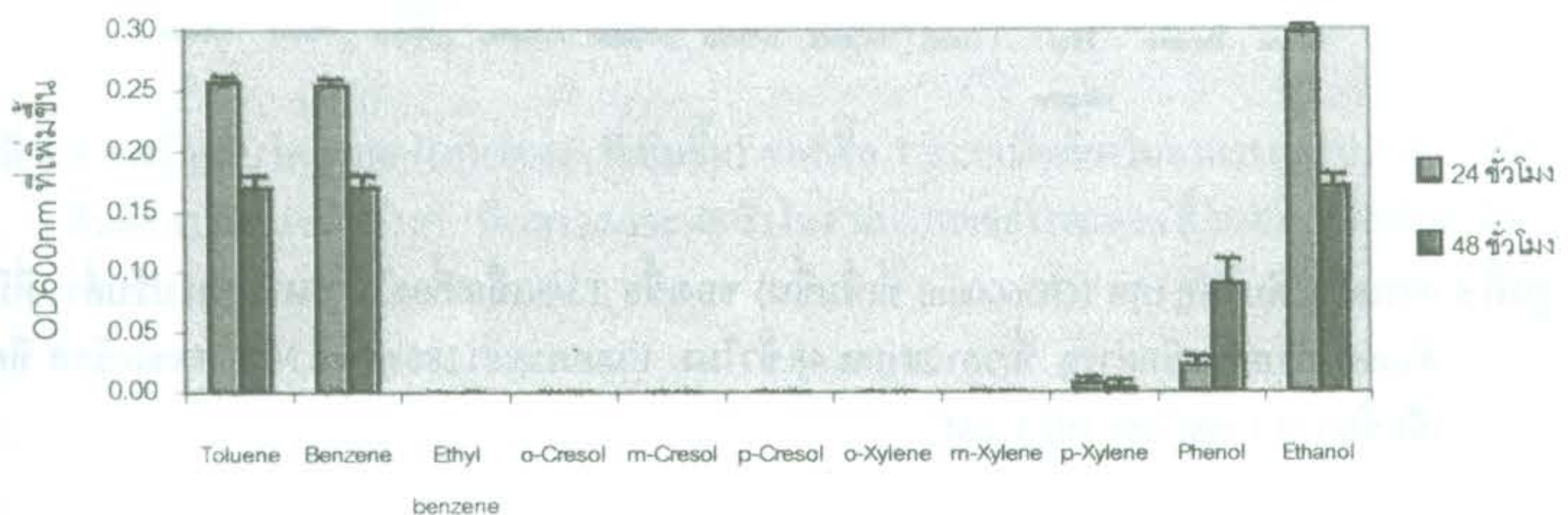
การศึกษาศักยภาพของเชื้อ T1/3, T3/5, T3/9 และ T3/13 ที่ดีที่สุดในการใช้สารต้นตอคาร์บอนชนิดต่างๆ จากการคำนวณทางสถิติ พบว่า เชื้อที่สามารถใช้ toluene ที่ระดับความเข้มข้น 5 mM ได้ดีที่สุดคือ T3/5, T3/9 และ T3/13 เชื้อทุกสายพันธุ์ได้แก่ T1/3, T3/5, T3/9 และ T3/13 สามารถใช้ benzene และ

ethanol ได้ดี พบว่าเชื้อทุกสายพันธุ์สามารถใช้ ethylbenzene และ xylene ได้น้อยมากหรือใช้ไม่ได้เลยแม้ที่ความเข้มข้นต่ำ 1 mM เชื้อ T1/3 สามารถใช้ cresol ได้ดีที่สุด และเชื้อ T1/3 กับ T3/5 สามารถใช้ phenol ได้ดีที่สุด

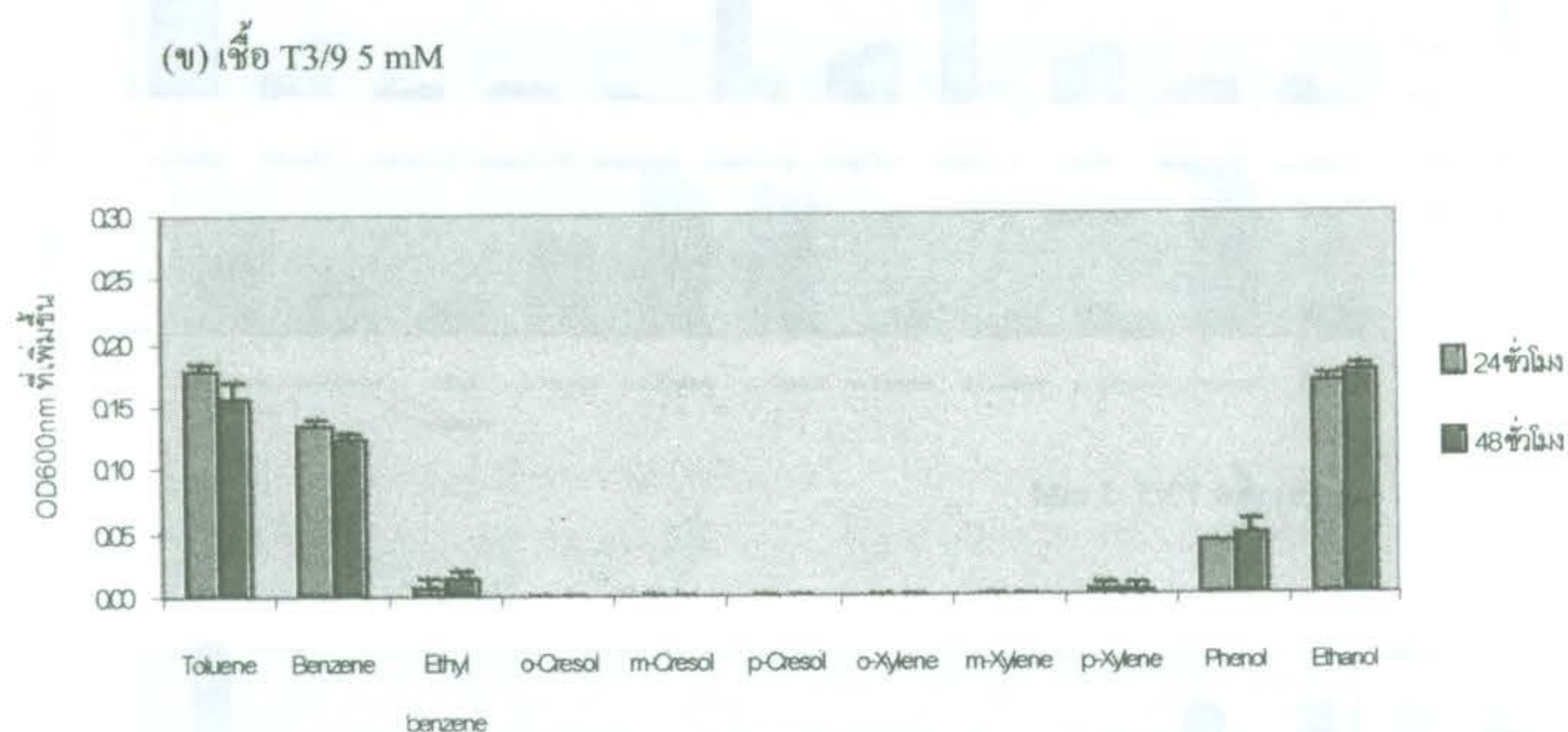
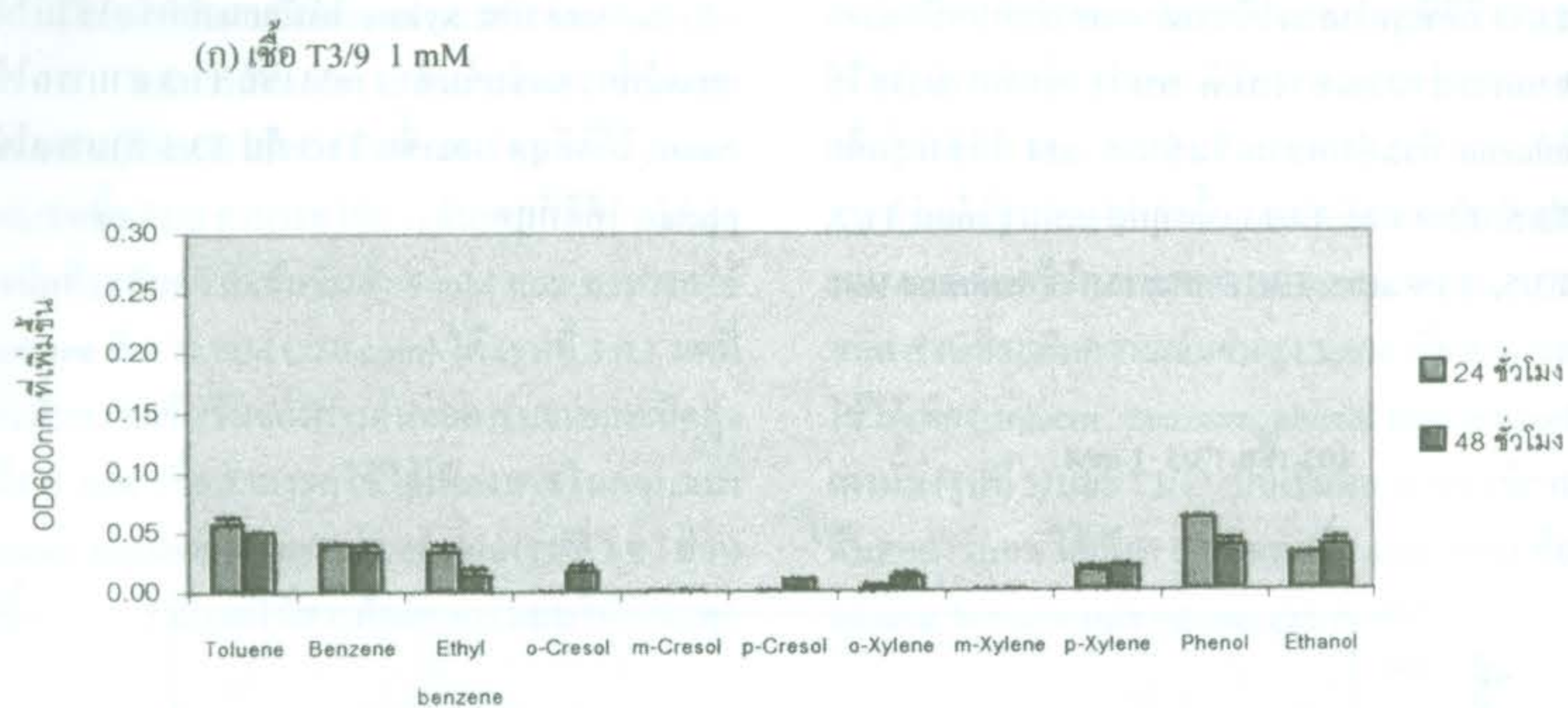
(ก) เชื้อ T3/5 1 mM



(ข) เชื้อ T3/5 5 mM

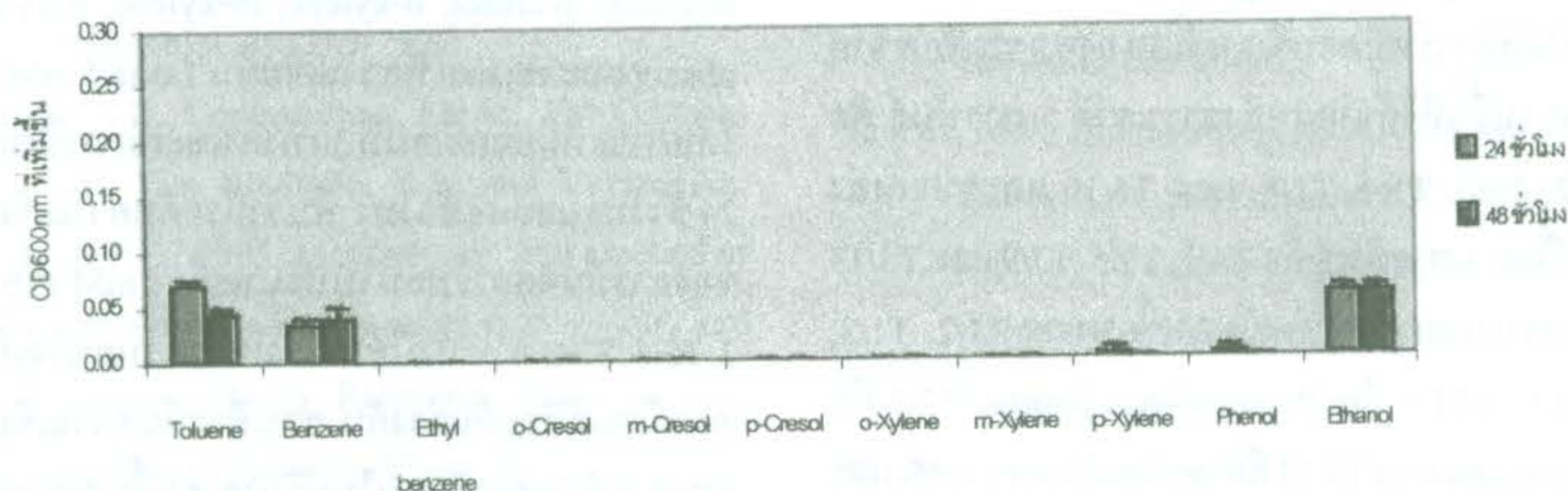


รูปที่ 4 การเจริญเติบโตสูงสุด (OD600nm ที่เพิ่มขึ้น) ของเชื้อ T3/5 เมื่อเลี้ยงในอาหารสูตรปรับต่ำที่มีสารต้นตอคาร์บอนชนิดต่างๆ ที่เวลา 24 และ 48 ชั่วโมง บ่มแบบเขย่า 180 rpm ที่ 30 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้น (ก) 1 mM และ (ข) 5 mM

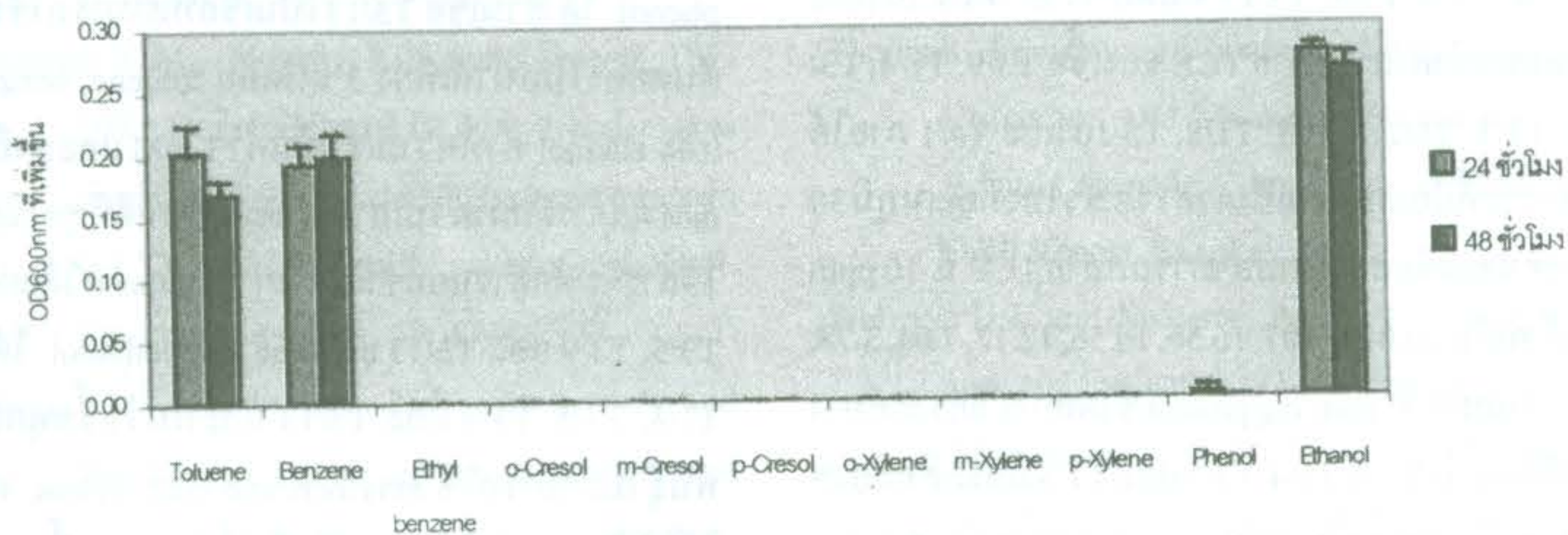


รูปที่ 5 การเจริญเติบโตสูงสุด (OD600nm ที่เพิ่มขึ้น) ของเชื้อ T3/9 เมื่อเลี้ยงในอาหารสูตรปรับต่ำ ที่มีสารต้นตอคาร์บอน ชนิดต่างๆ ที่เวลา 24 และ 48 ชั่วโมง บ่มแบบเขย่า 180 rpm ที่ 30 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้น (ก) 1 mM และ (ข) 5 mM

(ก) เชื้อ T3/I3 1 mM



(ข) เชื้อ T3/I3 5 mM



รูปที่ 6 การเจริญเติบโตสูงสุด (OD600nm ที่เพิ่มขึ้น) ของเชื้อ T3/I3 เมื่อเลี้ยงในอาหารสูตรปรับต่ำ ที่มีสารตั้งต้นคาร์บอนชนิดต่างๆ ที่เวลา 24 และ 48 ชั่วโมง บ่มแบบเขย่า 180 rpm ที่ 30 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้น (ก) 1 mM และ (ข) 5 mM

วิจารณ์ผลการทดลอง

ในการคัดเลือกเชื้อแบคทีเรีย พบว่าสามารถแยกเชื้อจากเชื้อที่ใช้ toluene 250 ppm (2.71 mM) ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน ที่ 30 องศาเซลเซียส จากตัวอย่างเชื้อที่ได้จากแหล่งธรรมชาติ 5 สายพันธุ์ คือ T1/2, T1/3, T1/4, T1/8, และ T5/10 และจากแหล่งปนเปื้อน 4 สายพันธุ์ คือ T4/1, T3/5, T3/9 และ T3/13 ผลการบ่งบอกเอกลักษณ์ของเชื้อพบว่า T1/2, T1/3, T1/4 และ T1/8 คือ *Pseudomonas putida* T3/9 คือ *Rastonia picketti* T3/13 คือ *Acinetobacter lwoffii* และ T5/10 คือ *Comamonas acidovorans* ผลการศึกษาความสามารถของแบคทีเรียในการสลาย trichloroethylene ด้วยเทคนิค Head space และตรวจสอบปริมาณ TCE ด้วย Gas chromatograph พบว่า T1/2, T1/3, T1/4, T3/5, T3/9, T3/13 ทนต่อ TCE ได้ถึง 10 ppm โดยพบว่าการสลาย TCE ของเชื้อ T3/9, T1/4, T3/5, T1/3, T1/2, T3/13, T1/8, T5/10 และ T4/1 ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนเป็นเวลา 18 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีความสามารถสลาย TCE ที่ 10 ppm ได้เท่ากับ 20.01, 17.07, 16.56, 16.56, 12.12, 7.04, 3.78, 2.24 และ 0.91 ppm/mg protein ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า T3/9, T1/4, T3/5 และ T1/3 มีประสิทธิภาพสูงสุดในการสลาย TCE ($p < 0.001$) ความสามารถในการสลาย TCE ที่แยกได้นี้ มีประสิทธิภาพมากกว่า *Acinetobacter* sp. P4 และ *Alcaligenes* sp. P2 และ P7 ซึ่งแยกจากดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยการใช้ phenol เป็นแหล่งต้นตอคาร์บอน ซึ่งมีความสามารถในการสลาย TCE เพียง 0.43, 0.86 และ 0.56 ppm/mg protein ภายใน 18 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้น TCE 10 ppm เช่นเดียวกัน (Millintawisamai et al., 1999) และมีประสิทธิภาพสูงกว่า *Pseudomonas cepacia* G4 ซึ่งเป็นเชื้อที่แยกได้จากแหล่งปนเปื้อนโดยใช้ toluene เป็นแหล่งต้นตอคาร์บอน ซึ่งสามารถสลาย TCE ได้ 20 mM (2.6 ppm) (Krumme et al., 1993) ภายใน 24 ชั่วโมง ส่วน

ผลการศึกษาความสามารถของเชื้อ T1/3, T3/5, T3/9 และ T3/13 ในการใช้สารต้นตอคาร์บอน 11 ชนิด ได้แก่ toluene, benzene, ethyl benzene, o-cresol, m-cresol, p-cresol, o-xylene, m-xylene, p-xylene, phenol และ ethanol ที่ความเข้มข้น 1 และ 5 mM ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ 48 ชั่วโมง พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของสารต้นตอคาร์บอนในปริมาณต่ำ 1 mM เชื้อ T1/3 T3/5, T3/9 สามารถใช้สารต้นตอคาร์บอนได้เกือบทุกชนิดแต่ที่ระดับต่างกัน ส่วนที่ระดับความเข้มข้นของสารต้นตอคาร์บอนในปริมาณสูงเชื้อสามารถใช้ชนิดของสารต้นตอคาร์บอนได้น้อยลง ได้แก่ T1/3 สามารถใช้ toluene ที่ 2.71 mM และ ใช้ cresols, phenol, benzene และ ethanol ที่ 5 mM ได้, T3/5 และ T3/9 สามารถใช้ toluene, benzene, ethanol และ phenol ได้ ส่วนเชื้อ T3/13 เป็นเชื้อที่สามารถใช้สารต้นตอคาร์บอนได้เพียง 3 ชนิดคือ toluene, benzene และ ethanol ทั้งที่ความเข้มข้นต่ำ 1 mM และสูงถึง 5 mM ผลการศึกษาความสามารถของเชื้อที่ดีที่สุดในการใช้สารต้นตอคาร์บอนชนิดต่างๆ คือ toluene ได้แก่เชื้อ T3/5, T3/9 และ T3/13 benzene และ ethanol ได้แก่ T1/3, T3/5 T3/9 และ T3/13 และพบว่าเชื้อทุกสายพันธุ์ไม่สามารถใช้ ethylbenzene และ xylene หรือใช้ได้น้อยมากแม้ที่ความเข้มข้นต่ำ 1 mM เชื้อ T1/3 สามารถใช้ cresol ได้ดีที่สุด และเชื้อ T1/3 กับ T3/5 สามารถใช้ phenol ได้ดีที่สุด Zaitsev et al. (1995) รายงานว่า *Rhodococcus opacus* GM-14 สามารถสลาย benzene, phenol และ benzoates ได้ ดังนั้นแบคทีเรียที่แยกได้ในประเทศไทย จากแหล่งธรรมชาติและแหล่งปนเปื้อนเหล่านี้ น่าจะมีประโยชน์ในการศึกษาการบำบัดสารมลพิษโดยชีววิธี (bioremediation) ในบริเวณที่มีการปนเปื้อน (site remediation) ได้แก่ trichloroethylene, benzene, toluene, phenol และ Modern gasoline ซึ่งมี ethanol เป็นส่วนผสม ซึ่งในปัจจุบันเริ่มทำให้เกิดปัญหาในการบำบัดโดยชีววิธีในพื้นที่ปนเปื้อน ในประเทศทางอเมริกาเหนือ

เอกสารอ้างอิง

- Ensley, B.D. 1991. Biochemical diversity of trichloroethylene metabolism. *Annu. Rev. Microbiol.* 45 : 283-299.
- Goeptar, A.R., Commandeur, J.N.M., Van Ommen, B., Van Bladeren, P.J., and Vermeulen, N.P.E.. 1995. Metabolism and kinetics of trichloroethylene in relation to toxicity and carcinogenicity. Relevance of the mercapturic acid pathway. *Chem. Res. Toxicol.* 8: 3-21.
- Holt J.G., Krieg, N.R., Sneath, P.H.A., Stanley, J.T., and Williams, S.T.. 1994. *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology* 9th edition. Williams & Wilkins. Baltimore. 787 p.
- Krumme, L.M., Timmis, K.N., and Dwyer, D.F. 1993. Degradation of TCE by *Pseudomonas cepacia* G4 and the constitutive mutant strain G4 5223 PRI in aquifer microcosms. *Appl. Environ. Microbiol.* 59: 2746-2749
- Lowry, O.H., Rosbrough, N.J., Lewis, F.A. and Randall, R.J. 1951. Protein measurement with the Folin Phenol Reagent *J. Biol. Chem.* 193: 265.
- Milintawisamai, N., Trakulthong, J., Tosoungnuan, S., and Sarangbin, S. 1999. Isolation and Characterization of Phenol Degrading Bacteria. The Fourth Princess Chulabhorn International Science Congress. "Chemicals in the 21 th Century". Bangkok. Thailand, Nov. 28-Dec.2. Poster session P-203 (Abstract)
- Montani, C. and Lefimine, G. 1974. Carcinogenicity bioassays of vinyl chloride. *Envi.Res.* 7 : 387-396.
- Newman, L.M. and Wackett, L.P. 1997. Trichloroethylene Oxidation by Purified toluene 2-Monooxygenase: Products, Kinetics, and Turnover Dependent Inactivation. *J. of Bacteriol.* 179: 90-96.
- Shields, M.S., Montgomery, S.O., Chapman, P.T., Curtey, S.M., and Pritchard, P.H. 1989. Novel pathway of toluene catabolism in the TCE-degradation bacterium G4 *Appl. Environ. Microbiol.* 55:1624-1629.
- Shields, M.S., Montgomeny, S.O., Curtey, S.M., Chapman, P.J., and Pritchard, P.H. 1991. Mutants of *Pseudomonas cepacia* G4 Defective in Catabolism of Aromatic Compounds and Trichloroethylene. *Appl. Environ. Microbiol.* 57:1935-1941.
- Thailand Environment Institute. 1998. Study on Utilization and Management Situation of Volatile Organic Compounds in Thailand. Draft Report. Bangkok 80 p.
- Wanner, U.J. and Mccarty, P.L.. 1997. Development and Evaluation of Semicontinuous Slurry Microcosms to Simulate in Situ Biodegradation of Trichloroethylene in Contaminated Aquifers. *Environ. Sci. Technol.* 31: 2915-2922.
- Yeager, C.M., Bottomley, P.J., Arp D.J., and Hyman, M.H. 1999. Inactivation of toluene 2-monooxygenase in *Burkholderia cepacia* G4 by alkynes. *Appl. Environ. Microbiol.* 65(2): 632-639.
- Zaitsev G.M., Uotila, J.S., Tsitko, I.V., Lobanok, A.G., and Salkinoja-Salonen, M.S. 1995. Utilization of Halogenated Benzenes, Phenols, and Benzoates by *Rhodococcus opacus* GM-14. *Appl. Environ. Microbiol.* 61:4191-4201.

ความหลากหลายชนิดของโพรโทซัวในบ่อบำบัดน้ำเสียบึงทุ่งสร้าง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น

พินิจ หวังสมนึก, ญัฐนันท์ ประยูรชาญ¹ นันทพร จารุพันธุ์² และสมพงษ์ ดุลย์จินดาชบาพร³

บทคัดย่อ

การสำรวจโพรโทซัวในบ่อบำบัดน้ำเสียแบบต่างๆ ที่บึงทุ่งสร้าง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น ระหว่างเดือนมิถุนายน 2545 ถึง เดือนพฤษภาคม 2546 รวมระยะเวลา 12 เดือน พบโพรโทซัว 14 class รวมทั้งสิ้น 100 ชนิด ได้แก่ (1) Class Karyorelictea 3 ชนิด, (2) Class Spirotrichea 17 ชนิด, (3) Class Prostomatea 4 ชนิด, (4) Class Litostomatea 4 ชนิด (5) Class Phyllopharyngea 8 ชนิด, (6) Class Nassophorea 2 ชนิด, (7) Class Oligohymenophorea 8 ชนิด, (8) Class Colpodea 1 ชนิด, (9) Class Diniferea 2 ชนิด, (10) Class Euglenoidea 26 ชนิด, (11) Class Phytomonadea 4 ชนิด, (12) Class Cryptomonadea 1 ชนิด, (13) Class Lobosea 15 ชนิด และ (14) Class Heliozoa 5 ชนิด โพรโทซัวส่วนใหญ่ที่พบมีการแพร่กระจายคล้ายกันทุกแหล่งน้ำยกเว้นโพรโทซัวใน Class Karyorelictea และ Class Diniferea พบค่อนข้างน้อย โพรโทซัวที่พบเฉพาะในบ่อน้ำเสียก่อนได้รับการบำบัดในช่วงฤดูแล้งมีทั้งหมด 13 ชนิด ได้แก่ *Acineria incurvata*, *Echinospaerium* sp.,

Anthophysis vegetans, *Arcella vulgaris*, *Ceratium furca*, *Epistylis* sp., *Loxodes striata*, *L.vorax*, *Metopus* sp., *Paraurostyla weissei*, *Phacus ramula*, *Sphaenophrya* sp. และ *Stentor polymorphus* โพรโทซัวเหล่านี้อาจใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ความเสียมาก

Abstract

The species diversity of protozoa was investigated in wastewater treatment ponds, including pretreatment and six posttreatment ponds in municipal region of Amphur Muang, Khon Kaen province between June 2003 and May 2004. One hundred species of protozoa belonging to 14 Classes were recorded; (1) three species of Class Karyorelictea, (2) seventeen species of Class Spirotrichea, (3) four species of Class Prostomatea, (4) four species of Class Litostomatea, (5) eight species of Class Phyllopharyngea, (6) two species of Class Nassophorea, (7) eight species of Class Oligohymenophorea, (8) one species of Class

¹ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ. ขอนแก่น 40002

²ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

³ภาควิชาประมง คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ. ขอนแก่น 40002

Colpodea, (9) two species of Class Diniferea, (10) twenty-six species of Class Euglenoidea, (11) four species of Class Phytomonadea, (12) one species of Class Cryptomonadea, (13) fifteen species of Class Lobosea, and (14) five species of Class Heliozoa. Almost protozoa recorded in this study had a similar distribution at all sampling sites, except members of the Class Karyorelictea and Class Diniferea were rarely found in this study. Protozoa found only in pretreatment ponds during the dry season (October 2002 - May 2003) period were as follows; *Acineria incurvata*, *Echinosphaerium* sp. *Anthophysis vegetans*, *Arcella vulgaris*, *Ceratium furca*, *Epistylis* sp., *Loxodes striata*, *L. vorax*, *Metopus* sp., *Paraurostyla weissei*, *Phacus ramula*, *Sphaenophrya* sp. and *Stentor polymorphus* These 13 protozoa species may be use as an indicator for waste water.

บทนำ

นักชีววิทยาจำนวนหนึ่งได้ศึกษาการใช้โปรโตซัวในการบ่งชี้คุณภาพน้ำ โดยดูจากชนิดที่พบมากหรือพบเฉพาะแหล่งน้ำแบบต่างๆ เช่น โปรโตซัวบางชนิดทนต่อสภาพน้ำเสียที่เกิดจากสารอินทรีย์ เช่น แอมโมเนียและไฮโดรเจนซัลไฟด์ ขณะที่โปรโตซัวอื่นๆ ไม่สามารถทนทานสภาพน้ำเสียในแบบเดียวกันนี้ได้ (Kudo, 1966) บพิท จารุพันธุ์ และ นันทพร จารุพันธุ์ (2532) ศึกษาชนิดของโปรโตซัวเพื่อใช้เป็นดัชนีบ่งบอกคุณภาพน้ำของบึงมักกะสัน พบว่ามีโปรโตซัวจำนวน 30 สกุลจาก 74 สกุล สามารถใช้เป็นดัชนีบ่งบอกคุณภาพน้ำของบึงมักกะสันได้ พินิจ หวังสมนึก และคณะ (2545) ศึกษาความหลากหลายชนิดของโปรโตซัวในแม่น้ำพอง จังหวัดขอนแก่น ในบริเวณที่มีคุณภาพน้ำต่างกันทั้งน้ำดีและน้ำเสีย พบโปรโตซัว 13 class รวมทั้งสิ้น 78 ชนิด และโปรโตซัวที่พบในน้ำเสียมี 15 ชนิด

บึงทุ่งสร้างเป็นแหล่งน้ำธรรมชาติขนาดใหญ่ อยู่ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือของเทศบาลนครขอนแก่น มีพื้นที่ 1,692 ไร่ เป็นแหล่งรับน้ำจากชุมชนในเขตเทศบาลนครขอนแก่นโดยผ่านทางคลองร่องเหมือง เทศบาลนครขอนแก่นได้จัดแบ่งพื้นที่ส่วนหนึ่งของบึงทุ่งสร้างก่อสร้างสถานีบำบัดน้ำเสียเพื่อรองรับน้ำเสียจากแหล่งชุมชนเมืองขอนแก่นมาบำบัดตามขั้นตอนต่างๆ ก่อนระบายออกสู่คลองร่องเหมืองแล้วส่งต่อไปยังหนองเลิงเปือย ลำห้วยพระคือ แล้วไหลลงสู่ลำน้ำพองและน้ำชีต่อไป น้ำที่ผ่านการบำบัดในแต่ละขั้นตอนจะมีองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นสารประกอบอินทรีย์และสารอนินทรีย์ชนิดและปริมาณแตกต่างกัน รวมทั้งมีการลดลงของค่า BOD ที่แตกต่างกันด้วย (กัณท์วิทย์ ศรีพงศ์พันธุ์, 2540) งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความหลากหลายของโปรโตซัวในน้ำเสียและน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดตามขั้นตอนต่างๆและน้ำสะอาดจากสระพลาสติกอยู่ในมหาวิทยาลัยขอนแก่น

วิธีดำเนินการ

สถานที่ทำการวิจัย

บึงทุ่งสร้างเป็นแหล่งน้ำธรรมชาติขนาดใหญ่ที่รับน้ำจากชุมชนในเขตเทศบาลนครขอนแก่นมาบำบัดตามขั้นตอนต่างๆจนได้น้ำทิ้งตามมาตรฐานการควบคุมการระบายน้ำทิ้งตามที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด (อ้างถึงในกองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2538) ก่อนระบายออกไป สถานีบำบัดน้ำเสียแห่งนี้สามารถรับน้ำเสียได้ 78,000 ลูกบาศก์เมตร/วัน ขั้นตอนบำบัดน้ำเสียเริ่มจากการรวบรวมน้ำเสียจากแหล่งชุมชนเมืองขอนแก่นผ่านตะแกรงคัดขยะ (screening) ก่อนจะถูกสูบส่งผ่านกล่องวัดอัตราการไหลของ น้ำเสีย (flow meter)

ไปยังบ่อแบ่งน้ำ (distribution box) เข้าสู่สระเติมอากาศ (aerated lagoon 1 และ 2 ตามลำดับ) ใช้ระบบเติมอากาศบนผิวน้ำแบบง่ายๆ (surface aeration) และไม่มีการใช้ตะกอนหมุนเวียน (return sludge) หลังจากนั้นเสียผ่านการบำบัดโดยการเติมอากาศแล้วจะไหลเข้าสู่บ่อตกตะกอน (settling pond 1 และ 2 ตามลำดับ) เพื่อทำการตกตะกอนและเติมคลอรีนในบ่อเติมคลอรีน (chlorination tank) ก่อนปล่อยออกจากระบบต่อไป (เทศบาลนครขอนแก่น, 2544)

สระพลาสติกอยู่ในเขตพื้นที่มหาวิทยาลัยขอนแก่น มีพื้นที่กว้าง 100 เมตร ยาว 180 เมตร ลึก 4 เมตร พื้นด้านล่างและผนังบ่อด้านข้างบุด้วยพลาสติก เริ่มสร้างปี พ.ศ. 2528 (นุกูล ใจเชื้อ, 2529) ลักษณะทั่วไปของสระพลาสติกมีถนนรอบสระ มีการตกแต่งบริเวณให้สวยงามและร่มรื่นเพื่อใช้เป็นสถานที่พักผ่อนหย่อนใจและออกกำลังกาย ริมสระมีต้นหญ้าขึ้นรอบๆ มีน้ำพุอยู่ตรงกลางสระซึ่งให้ทั้งความสวยงามและช่วยเพิ่มปริมาณออกซิเจนในน้ำ น้ำในสระพลาสติกสูบมาจากสถานีสูบน้ำดิบหนองโกทา ตำบลศิลาอำเภอมือเมือง จังหวัดขอนแก่น ซึ่งไหลมาจากเขื่อนอุบลรัตน์โดยเก็บสำรองไว้ที่สระพลาสติกเพื่อใช้ทำน้ำประปาของมหาวิทยาลัยขอนแก่น

วิธีดำเนินการวิจัย

เก็บตัวอย่างน้ำเสียก่อนและหลังได้รับการบำบัดจากบ่อรับน้ำเสียระดับต่างๆ จำนวน 6 บ่อ (ภาพที่ 1) และน้ำสะอาดจากสระน้ำพลาสติก มหาวิทยาลัยขอนแก่น ถูกเก็บวันละ 1 แห่ง จากบ่อต่างๆ บ่อละ 3 จุด ในรอบ 2 เดือน/ครั้ง ระหว่างเดือนมิถุนายน 2545 ถึงเดือนพฤษภาคม 2546 พร้อมทั้งตรวจวัดคุณภาพน้ำและบันทึกลักษณะทางกายภาพ เช่น สีและกลิ่นของน้ำทุกแหล่งน้ำที่เก็บตัวอย่าง (ตารางที่ 1) เก็บตัวอย่างโพโทซัวจากบริเวณผิวน้ำด้วยการใช้ถุงลากแพลงก์ตอนขนาดตาถี่ 20 ไมโครเมตร ลากจากบริเวณ

ผิวน้ำที่อยู่ห่างจากฝั่งในระยะ 1, 5 และ 8 เมตร โดยในแต่ละระยะลาก 15-20 ครั้ง ความลึก 3 ระดับ คือ 50 เซนติเมตร 1 เมตร และ 5 เมตร ระยะความกว้างของบริเวณที่เก็บตัวอย่างน้ำประมาณ 25 เมตร ใช้ภาชนะตักน้ำบริเวณผิวน้ำและฝ้าที่ลอยอยู่ผิวน้ำใกล้ฝั่งติดมาด้วย เก็บเศษอินทรีย์วัตถุที่เน่าเปื่อยตะกอนใต้น้ำ และพืชน้ำที่ขึ้นในแหล่งน้ำใส่ในภาชนะที่เก็บตัวอย่างแล้วนำตัวอย่างที่เก็บมาทั้งหมดมาตรวจหาโพโทซัวในห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เก็บไว้ในภาชนะที่ใช้เลี้ยงเพื่อตรวจหาชนิดโพโทซัวเพิ่มเติมที่อาจจะเจริญเติบโตในอาหารเลี้ยงได้ ส่วนที่ 2 สำหรับตรวจในทันทีอย่างละเอียดพร้อมทั้งบันทึกลักษณะต่างๆ ที่สำคัญที่ใช้ในการจำแนกชนิดและถ่ายภาพด้วยกล้องด้วยกล้องจุลทรรศน์

การจำแนกชนิดและการตรวจสอบหมวดหมู่ของโพโทซัวใช้เอกสารหลักของโอภาส ศรีนวลละออง (2523) เชิดพันธ์ มุรธานันท์ (2526) บพิธ จารุพันธุ์ และ นันทพร จารุพันธุ์ (2532 และ 2539) อินทิรา ประยูรเกียรติ (2540 และ 2542) Edmonson (1959), Kudo (1966), Leedale (1967), Fritsch (1975), Janh et al. (1979), Farmer (1980), Lee et al. (2000), Foissner and Berger (1996) และ Hausmann and Hulsman (1996) โดยยึดหลักการจัดจำแนกหมวดหมู่ตามวิธีของ Hausmann and Hulsman (1996)

ผลการศึกษา

ผลของการศึกษาคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีบางประการ (ตารางที่ 1) และความหลากหลายชนิดของโพโทซัวในน้ำเสียก่อนและหลังบำบัด และน้ำสะอาดจากสระพลาสติก มหาวิทยาลัยขอนแก่น (ตารางที่ 2)

น้ำเสียก่อนได้รับการบำบัด

โพรโทซัวที่พบในบ่อบำบัดน้ำเสียจากเขตเทศบาลนครขอนแก่นก่อนเข้าสู่บ่อบำบัดมี 13 class รวม 57 ชนิด (ตารางที่ 2) โพรโทซัวชนิดที่พบจำนวนมากมี 8 ชนิด คือ *Loxodes striata*, *L. vorax*, *Acineria incurvata*, *Aspidisca costata*, *Metopus* sp., *Paramecium caudatum*, *Vorticella convallaria* และ *Amoeba proteus* ช่วงเดือนที่พบชนิดของโพรโทซัวมากที่สุดคือเดือนสิงหาคม 2545 ถึงเดือนกันยายน 2545 รวมทั้งสิ้น 74 ชนิด และช่วงเดือนที่พบชนิดของโพรโทซัวน้อยที่สุดคือ เดือนกุมภาพันธ์ 2546 ถึงเดือนมีนาคม 2546 รวมทั้งสิ้น 54 ชนิด

น้ำเสียที่ได้รับการบำบัดขั้นตอนต่างๆ

บ่อบำบัดที่ 1-2 พบโพรโทซัว 12 class รวมทั้งสิ้น 46 ชนิด ช่วงที่พบชนิดของโพรโทซัวมากที่สุดคือ ระหว่างเดือนสิงหาคมถึงเดือนกันยายน 2545 รวม 53 ชนิด ช่วงที่พบชนิดของโพรโทซัวน้อยที่สุดคือ ระหว่างเดือนธันวาคม 2545 ถึงเดือนมกราคม 2546 รวม 45 ชนิด

บ่อบำบัดที่ 3-4 พบโพรโทซัว 11 class รวมทั้งสิ้น 39 ชนิด ช่วงที่พบชนิดของโพรโทซัวมากที่สุดคือ ระหว่างเดือนสิงหาคมถึงกันยายน 2545 จำนวน 46 ชนิด และช่วงที่พบชนิดของโพรโทซัวน้อยที่สุดคือ เดือนธันวาคม 2545 ถึงเดือนมกราคม 2546 จำนวน 38 ชนิด

บ่อบำบัดที่ 5-6 พบโพรโทซัว 10 class รวมทั้งสิ้น 34 ชนิด ช่วงที่พบชนิดของโพรโทซัวมากที่สุดคือ ระหว่างเดือนสิงหาคมถึงกันยายน 2545 จำนวน 44 ชนิด ช่วงที่พบชนิดของโพรโทซัวน้อยที่สุดคือ ระหว่างเดือนตุลาคมถึงเดือนพฤศจิกายน 2545 จำนวน 34 ชนิด

น้ำสะอาดจากสระพลาสติก

โพรโทซัวที่พบในน้ำสะอาดจากสระพลาสติก มหาวิทยาลัยขอนแก่น มี 10 class รวม 39 ชนิด ช่วงระยะเวลาที่พบชนิดของโพรโทซัวมากที่สุด (34 ชนิด) คือ ระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนมีนาคม 2546 และช่วงเดือนที่พบจำนวนชนิดของโพรโทซัวน้อยที่สุด (26 ชนิด) คือ ระหว่างเดือนตุลาคมถึงเดือนพฤศจิกายน 2545

ตารางที่ 1 คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีบางประการ

คุณภาพน้ำ	บ่อบำบัดตัวอย่างน้ำเพื่อศึกษาโพรโทซัว				
	น้ำก่อนบำบัด	บ่อบำบัด 1-2	บ่อบำบัด 3-4	บ่อบำบัด 5-6	สระพลาสติก
อุณหภูมิของน้ำ (องศาเซลเซียส)	22.0-29.0	23.5-30.5	24.5-31.0	23.5-30.0	23.5-34.0
พีเอช	6.7-7.1	6.1-6.8	6.8-7.7	6.9-7.3	6.5-7.8
ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	3.9-5.3	3.1-4.4	3.2-4.3	3.1-4.1	6.0-11.0
ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนส์/เซนติเมตร)	151.8-190.5	143.7-189.4	865.0-1,343.5	1,535.4-2,690.0	152.8-192.6
ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	102.2-130.4	88.9-128.3	576.0-978.2	1,025.2-1,788.0	102.6-128.0
ความเค็ม (ส่วนในพัน)	0	0	0-0.5	0-0.5	0
ลักษณะทางกายภาพของน้ำและบ่อ	น้ำมีสีดำมาก มีคราบไขมัน กลิ่นเหม็นมาก	สีดำมาก ไม่มีคราบไขมัน กลิ่นเหม็นฉุน มีผักทอดยอ	สีดำไม่มาก น้ำเริ่มใส กลิ่นไม่เหม็น มีผักทอดยอ	น้ำใสมากกว่า บ่อ 3-4 กลิ่นไม่เหม็น มีปลานิลในบ่อ	น้ำใสมาก มีพืชขึ้นรอบสระ

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบชนิดและความชุกชุมสัมพัทธ์ของชนิดโพรโทซัวที่พบในบ่อน้ำเสียระดับต่างๆ และ
สระพลาสติก

ชนิดของโพรโทซัว	บ่อที่เก็บตัวอย่างโพรโทซัวที่สำรวจ				
	น้ำก่อนบำบัด	บ่อน้ำบำบัด 1-2	บ่อน้ำบำบัด 3-4	บ่อน้ำบำบัด 5-6	น้ำในสระพลาสติก
Phylum Alveolata					
Subphylum Ciliophora					
Class Karyorelictea					
<i>Loxodes magnus</i>	+	+	-	-	-
<i>L. striata</i>	+++	-	-	-	-
<i>L. vorax</i>	+++	-	-	-	-
Class Spirotrichea					
<i>Acineria incurvata</i>	+++	-	-	-	-
<i>Aspidisca costata</i>	+++	++	-	-	++
<i>Euplotes affinis</i>	-	-	-	-	+
<i>E. eurytomus</i>	+	+	+	-	-
<i>E. patella</i>	+	+	+	-	-
<i>Halteria grandinella</i>	-	-	-	+	+++
<i>Metopus sp.</i>	+++	+	-	-	-
<i>Onychodromopsis flexilis</i>	-	-	-	-	++
<i>Oxytricha bifaria</i>	-	-	-	-	++
<i>O. haematoplasma</i>	+	-	+	+	-
<i>Paraurostyla weissei</i>	+	-	-	-	-
<i>Spirostomum intermedium</i>	++	+	-	-	++
<i>Stentor polymorphus</i>	++	-	-	-	-
<i>Stichotricha secunda</i>	-	-	-	-	+
<i>Stylonychia mytilus</i>	++	+	-	+	+
<i>S. pustulata</i>	-	-	-	-	+
<i>Stylonychia sp.</i>	+	+	+	-	-
Class Prostomatea					
<i>Coleps elongatus</i>	-	-	-	-	+++
<i>C. hirtus</i>	-	-	+	+	+++
<i>C. octospinus</i>	+	+	-	+	-
<i>Spathidium sp.</i>	-	-	-	-	+
Class Litostomatea					
<i>Amphileptus claparedei</i>	+	-	+	-	+
<i>A. pleurosigma</i>	-	-	-	+	-
<i>A. procerus</i>	-	-	-	+	-
<i>Lacrymaria olor</i>	-	-	+	-	-
Class Phyllopharyngea					
<i>Chilodonella cucullulus</i>	-	+	+	-	++
<i>Chilodonella sp.</i>	-	-	+	-	-
<i>Chilodontopsis vorax</i>	-	-	-	+	-
<i>Acineta flava</i>	+	+	+	-	++
<i>Periacineta buckei</i>	-	-	-	+	-
<i>Podophrya fixa</i>	-	+	-	-	-
<i>Tokophrya lemnae</i>	+	+	+	-	-
<i>Tokophrya quadripartita</i>	-	+	++	-	-

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบชนิดและความชุกชุมสัมพัทธ์ของชนิดโพรโทซัวที่พบในบ่อน้ำเสียระดับต่างๆ และ
สระพลาสติก(ต่อ)

ชนิดของโพรโทซัว	บ่อที่เก็บตัวอย่างโพรโทซัวที่สำรวจ				
	น้ำก่อนบำบัด	บ่อบำบัด 1-2	บ่อบำบัด 3-4	บ่อบำบัด 5-6	น้ำในสระพลาสติก
Class Nassophorea					
<i>Paramecium caudatum</i>	+++	+	-	+	++
<i>P. multimicronucleatum</i>	+	+	-	-	-
Class Oligohymenophorea					
<i>Cyclidium glaucoma</i>	++	+	+	+	-
<i>Carchesium polypinum</i>	+	+	+	-	-
<i>Cristigera phoenix</i>	-	-	-	-	+++
<i>Epistylis nympharum</i>	+	-	+	-	-
<i>Epistylis</i> sp.	++	-	-	-	-
<i>Opercularia</i> sp.	-	-	++	++	-
<i>Uronema</i> sp.	-	-	-	-	+
<i>Vorticella convallaria</i>	+++	-	-	+	-
Class Colpodea					
<i>Colpodea ecaudata</i>	-	+	+	-	-
Subphylum dinoflagellata					
Class Diniferea					
<i>Ceratium furca</i>	+	-	-	-	-
<i>Glenodinium pulvisculum</i>	-	-	+	-	-
Subphylum Euglenida					
Class Euglenoidea					
<i>Entosiphon sulcatum</i>	+	-	-	+	+
<i>Euglena acus</i>	+	+	+	-	-
<i>E. deses</i>	-	+	+	+	+
<i>E. ehrenbergi</i>	+	+	+	+	+
<i>E. oxyuris</i>	+	+	+	+	-
<i>E. polymorpha</i>	-	+	+	+	+
<i>E. proxima</i>	+	+	+	+	+
<i>E. rostrifera</i>	+	+	+	+	+
<i>E. spirogyra</i>	+	+	+	+	-
<i>E. terricola</i>	-	-	+	-	-
<i>E. tripteris</i>	+	+	-	-	-
<i>Euglena</i> sp.1	+	+	-	-	+
<i>Euglena</i> sp.2	-	-	-	-	+
<i>Peranema trichophorum</i>	++	+	-	+	+
<i>Phacus acuminata</i>	+	-	-	+	-
<i>P. alata</i>	+	+	+	-	-
<i>P. helikoides</i>	++	+	+	-	+
<i>P. longicaudata</i>	++	-	-	+	-
<i>P. pyrum</i>	+	-	-	-	-
<i>P. ramula</i>	++	-	-	-	-
<i>Trachelomonas hispida</i>	++	+	+	+	-
<i>T. horida</i>	-	+	-	+	-
<i>T. piscatoris</i>	-	-	-	-	+
<i>T. volvocina</i>	-	-	+	-	-
<i>Trachelomonas</i> sp.1	-	+	+	+	-
<i>Trachelomonas</i> sp.2	-	+	+	+	-

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบชนิดและความชุกชุมสัมพัทธ์ของชนิดโพรโทซัวที่พบในบ่อน้ำเสียระดับต่างๆ และ
สระพลาสติก (ต่อ)

ชนิดของโพรโทซัว	บ่อที่เก็บตัวอย่างโพรโทซัวที่สำรวจ				
	น้ำก่อนบำบัด	บ่อบำบัด 1-2	บ่อบำบัด 3-4	บ่อบำบัด 5-6	น้ำในสระพลาสติก
Phylum Chlorophyta					
Class Phytomonadea					
<i>Anthophysis vegetans</i>	+	-	-	-	-
<i>Eudorina elegans</i>	-	+	-	-	-
<i>Gonium pectorale</i>	+	-	-	+	-
<i>Pandorina morum</i>	+	-	-	-	-
Phylum Chromista					
Subphylum Cryptomonada					
Class Cryptomonadea					
<i>Chilomonas paramecium</i>	+	+	+	-	+
Class Lobosea					
<i>Amoeba guttula</i>	-	-	-	+	++
<i>A. proteus</i>	+++	++	+	-	-
<i>A. radiosa</i>	+	+	-	+	++
<i>A. striata</i>	-	-	-	+	+
<i>Dinamoeba acuum</i>	-	-	-	+	-
<i>Arcella bathystoma</i>	+	+	+	-	-
<i>A. vulgaris</i>	+	-	-	-	-
<i>Centropyxis aculeata</i>	-	+	-	-	-
<i>Centropyxis hirsuta.</i>	-	-	-	-	++
<i>Diffugia lebes</i>	+	+	-	-	++
<i>Heleopera petricola</i>	-	-	-	-	+
<i>Pelomyxa carolinensis</i>	+	+	+	+	-
<i>Pelomyxa palustris</i>	-	-	-	-	+
<i>Pelomyxa illinoisensis</i>	+	-	-	-	-
<i>Vahlkampfia sp.</i>	-	-	-	-	++
Actinopoda					
Class Heliozoa					
<i>Actinophrys sol</i>	++	+	+	+	+
<i>Actinosphaerium eichhorri</i>	+	-	+	-	-
<i>Echinosphaerium sp.</i>	+	-	-	-	-
<i>Lithocalla globosa</i>	+	-	-	-	-
<i>Sphaenophrya sp.</i>	-	-	-	-	+
รวม	58	46	39	34	39
	รวมโพรโทซัวที่พบทั้งสิ้น 100 ชนิด				

หมายเหตุ

+++ พบชนิดของโพรโทซัวบ่อยและมีจำนวนมาก ตรวจพบชนิดของโพรโทซัวตั้งแต่ 8-10 สไลด์ และแต่ละสไลด์พบจำนวนมาก

++ พบชนิดของโพรโทซัวจำนวนปานกลาง ตรวจพบชนิดของโพรโทซัวตั้งแต่ 4-7 สไลด์ และแต่ละสไลด์พบจำนวนปานกลาง

+

พบชนิดของโพรโทซัวจำนวนน้อย ตรวจพบชนิดของโพรโทซัวตั้งแต่ 1-3 สไลด์ และแต่ละสไลด์พบจำนวนน้อย

-

ไม่พบชนิดของโพรโทซัวในบ่อที่สำรวจ

สรุปและวิจารณ์ผลการศึกษา

ผลการศึกษาความหลากหลายชนิดของโพรโทซัวในสระพลาสติก มหาวิทยาลัยขอนแก่น บ่อน้ำเสียก่อนบำบัดและหลังบำบัดแล้วของ บึงทุ่งสร้าง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น ตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2545 ถึงเดือนพฤษภาคม 2546 รวมระยะเวลา 12 เดือน พบชนิดของโพรโทซัวดังต่อไปนี้

น้ำสะอาด

ความหลากหลายชนิดของโพรโทซัวในน้ำสะอาดจากสระพลาสติกซึ่งสูบมาจากเขื่อนอุบลรัตน์ พบโพรโทซัว 10 class รวม 39 ชนิด ชนิดที่พบเป็นจำนวนมากทุกครั้งที่สำรวจ ได้แก่ *Aspidisca costata*, *Entosiphon sulcatum*, *Peranema trichophorum* และ *Stentor* sp. ชนิดที่พบบ่อยครั้ง ได้แก่ *Actinophrys sol*, *Amoeba radiosa*, *Chilodonella uncinata*, *Coleps hirtus*, *Diffugia lebes* และ *Paramecium caudatum* แต่ชนิดที่พบได้เฉพาะในช่วงฤดูแล้งและไม่พบที่อื่น ๆ มีทั้งหมด 17 ชนิด ได้แก่ *Euplotes affinis*, *Tokophrya lemnae*, *Amoeba* sp., *Centropyxis* sp., *Chilodonella uncinata*, *Coleps elongatus*, *C. hirtus*, *Euglena* sp., *Halteria grandinella*, *Heleopera petricola*, *Onychodromopsis flexilis*, *Oxytricha bifaria*, *Spathidium* sp., *Stylonychia pustulata*, *Trachelomonas piscatoris*, *Uronema* sp., และ *Vahlkampfia* sp. โพรโทซัวเหล่านี้อาจใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ว่าสะอาดได้ เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาโพรโทซัวในเขื่อนอุบลรัตน์ (พินิจ หวังสมนึก และคณะ, 2545) และน้ำจากสระพลาสติกซึ่งเป็นน้ำสะอาด พบโพรโทซัวชนิดที่เหมือนกัน จำนวน 9 ชนิด ได้แก่ *Stylonychia mytilus*, *Euplotes patella*, *Coleps hirtus*, *Paramecium caudatum*, *Euglena deses*, *Peranema trichophorum*, *Synura uvella*, *Chilomonas paramecium* และ *Amoeba radiosa* ในจำนวน 9 ชนิดนี้มีชนิดที่พบจำนวนมาก 1 ชนิด คือ *Coleps hirtus* (ตารางที่ 2) โพรโทซัวเหล่านี้มีรายงานว่ามักพบในน้ำ

สะอาด เช่น มุกดา สุขสมาน (2536) สุดาพรรณ สัตย์พานิช (2539) และอินทรา ปรงเกียรติ (2540) ความแตกต่างของชนิดโพรโทซัวที่พบในแหล่งน้ำ 2 แห่งนี้ทั้งที่ไหลมาจากแหล่งเดียวกันเนื่องจากน้ำที่ถูกสูบมาจากเขื่อนอุบลรัตน์ถูกนำมาพักไว้ก่อนที่หนองโกทา ตำบลศิลา อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น ซึ่งมีสภาพแวดล้อมต่างไปจากบริเวณที่น้ำถูกสูบมา

ช่วงเดือนที่พบจำนวนชนิดของโพรโทซัวน้อยที่สุดคือช่วงระหว่างเดือนตุลาคมถึงเดือนพฤศจิกายนซึ่งเป็นช่วงปลายฤดูฝน น้ำในสระพลาสติกมีปริมาณมากทำให้โพรโทซัวกระจายและอาจเกิดจากโพรโทซัวถูกสัตว์น้ำอื่น ๆ กินเป็นอาหาร เพราะการเก็บตัวอย่างน้ำในช่วงดังกล่าวมีสัตว์น้ำวัยอ่อนติดปนมากับตัวอย่างน้ำค่อนข้างมาก เช่น โรติเฟอร์ คลาโดเซอรา โคพีพอด และกิ้งฟอย (บพิตร จารุพันธุ์ และนันทพร จารุพันธุ์, 2532) ส่วนในเดือนกุมภาพันธ์เป็นช่วงฤดูหนาวปริมาณน้ำค่อนข้างน้อยและคงที่ทำให้พบชนิดของโพรโทซัวเพิ่มมากขึ้น คล้ายกับรายงานของโอภาส ศรีนวลละออง (2523) ซึ่งได้ศึกษาความหลากหลายชนิดของโพรโทซัวในอ่างเก็บน้ำอ่างแก้ว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พบว่าชนิดของโพรโทซัวแตกต่างกันไปตามฤดูกาล

น้ำเสียก่อนได้รับการบำบัด

พบโพรโทซัวในน้ำเสียก่อนได้รับการบำบัดรวมทั้งสิ้น 13 class 57 ชนิด (ตารางที่ 2) และในการสำรวจโพรโทซัวในบ่อน้ำนี้ในช่วงฤดูแล้งซึ่งไม่มีน้ำไหลมาจากพื้นที่รอบๆบ่อเหมือนในฤดูฝนซึ่งน้ำฝนได้พัดพาเอาโพรโทซัวที่อาศัยอยู่ในดินลงมาปะปนในบ่อด้วย พบชนิดของโพรโทซัวซึ่งไม่พบในน้ำสะอาดที่พบในสระพลาสติกภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่นและการสำรวจโพรโทซัวในเขื่อนอุบลรัตน์ (พินิจ หวังสมนึก และคณะ, 2545) จำนวน 13 ชนิด ได้แก่ *Loxodes striata*, *L. vorax*, *Acineria incurvata*, *Metopus* sp., *Paraurostyla weissei*, *Stentor polymorphus*, *Epistylis* sp., *Ceratium furca*, *Phacus*

ramula, *Anthophysis vegetans*, *Arcella vulgaris*, *Echinospheerium* sp., และ *Sphaenophrya* sp. ซึ่งโพรโทซัวที่พบจำนวนมากมี 4 ชนิด คือ *Loxodes striata*, *L. vorax*, *Acineria incurvata* และ *Metopus* sp. มีรายงานการสำรวจโพรโทซัวในน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทยและต่างประเทศพบโพรโทซัวบางชนิดที่เป็นชนิดเดียวกันกับการศึกษาครั้งนี้ เช่น Foissner and Berger (1996) กล่าวว่าโพรโทซัวสกุล *Acineria incurvata* และ *Metopus* sp. พบมากในน้ำที่มีค่าออกซิเจนน้อยหรือไม่มีเลย ฟินิจ หวังสมนึก และคณะ (2547) สำรวจโพรโทซัวที่บึงหนองโจดตอนล่าง บ้านหนองโจด ตำบลกุดน้ำใส อำเภอน้ำพอง จังหวัดขอนแก่น ซึ่งมีค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่ำจัดเป็นน้ำประเภทที่ 5 ตามมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำจืดผิวดิน (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2537) พบโพรโทซัว 9 class จำนวน 22 ชนิด ได้แก่ *Stylonychia mytilus*, *Aspidisca costata*, *Euplotes patella*, *Coleps octospinus*, *Paramecium caudatum*, *Cyclidium glaucoma*, *V. convallaria*, *Euglena acus*, *E. ehrenbergi*, *E. oxyuris*, *Phacus acuminata*, *P. alata*, *P. helikoides*, *P. longicauda*, *Trachelomonas hispida*, *Entosiphon sulcatum*, *Peranema trichophorum*, *Chilomonas paramecium*, *A. proteus*, *A. radiosa*, *Pelomyxa palustris* และ *Actinophrys sol.* ปัจจัยที่เป็นสาเหตุให้พบโพรโทซัวชนิดเดียวกันเนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำทั้ง 2 แหล่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก (ตารางที่ 1) จึงทำให้พบโพรโทซัวชนิดที่เหมือนกันถึง 22 ชนิด ขนาดและรูปร่างของโพรโทซัวอาจแตกต่างกันบ้างขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย นอกจากนี้มีโพรโทซัวหลายชนิดที่สามารถปรับตัวให้อาศัยอยู่ได้ในน้ำที่มีคุณภาพไม่แตกต่างกันมาก เช่น อาศัยอยู่ได้ทั้งในน้ำที่มีคุณภาพดีและปานกลาง หรืออาศัยอยู่ได้ทั้งในน้ำที่มีคุณภาพปานกลางและน้ำเสีย (Farmer, 1980) แต่ก็มีโพรโทซัวต่างชนิดกันอยู่จำนวนมากเช่นกัน สาเหตุ

เนื่องจากแหล่งน้ำเสียก่อนได้รับการบำบัดเป็นแหล่งน้ำที่รองรับน้ำทิ้งจากชุมชนในเขตเทศบาลนครขอนแก่น ทำให้มีของเสียและสารอินทรีย์ปริมาณมากปนเปื้อนอยู่ในน้ำซึ่งเป็นอาหารของแบคทีเรียมากกว่าที่บึงหนองโจดตอนล่างในแม่น้ำพองซึ่งเป็นบริเวณที่ตั้งของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ น้ำทิ้งที่ปล่อยมีการปนเปื้อนของสารเคมีเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ทำให้พบโพรโทซัวต่างชนิดกัน เช่น ลักษณะทางนิเวศวิทยาแตกต่างกัน สภาพทางชีววิทยา (เช่น โครงสร้างประชากรของโพรโทซัว) การแข่งขันระหว่างประชากร (Farmer, 1980) ส่วนการสำรวจโพรโทซัวในแหล่งน้ำเสียอื่นๆ ในประเทศไทยก็พบโพรโทซัวชนิดเดียวกับที่พบที่บ่อบำบัดน้ำเสีย บึงทุ่งสร้าง เช่น เชิดพันธ์ มุรธาพันธ์ (2526) สำรวจโพรโทซัวในคูเมืองเชียงใหม่ พบโพรโทซัว 4 class รวม 70 ชนิด เป็นชนิดเดียวกันกับการศึกษาครั้งนี้จำนวน 2 ชนิด คือ *Stentor polymorphus* และ *Arcella vulgaris* บพิท จารุพันธุ์และนันทพร จารุพันธุ์ (2532) ได้สำรวจชนิดของโพรโทซัวในบึงมักกะสันซึ่งเป็นแหล่งน้ำเสียอยู่กลางกรุงเทพมหานคร พบโพรโทซัวสกุล *Metopus* sp. ซึ่งเป็นโพรโทซัวที่ดำรงชีวิตในน้ำที่ไม่มีออกซิเจน สภาพน้ำเน่าเสียมาก (polysaprobic) สุดาพรรณ สัตย์พาณิชย์ (2539) ได้จัด *Metopus* sp., *Caenomorpha* และ *Saprodinium* เป็นดัชนีบ่งบอกประเภทน้ำเสียในแหล่งรับน้ำทิ้งจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน มุกดา สุขสมาน (2536) ศึกษาชีววิทยาและการกระจายของโพรโทซัวในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต พบ *Peranema trichophorum*, *Entosiphon sulcatum* และ *Loxodes* sp. จำนวนมากในแหล่งน้ำแห่งนี้ซึ่งมีปริมาณออกซิเจนละลายต่ำ-ปานกลาง บางแห่งมีลักษณะเป็นน้ำเน่า น้ำมีสีดำ มีกลิ่น ปริมาณออกซิเจนละลายมีค่าต่ำกว่า 4 มิลลิกรัมต่อลิตร อินทรา ประเกียรติ (2542) ศึกษาความหลากหลายชนิดของโพรโทซัวในคลองแม่ข่า จังหวัดเชียงใหม่ (ก่อนเข้าเขตเมือง

ภายในเมือง และก่อนออกนอกเมืองเชียงใหม่) พบว่า น้ำมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์จากแหล่งชุมชนมาก ซึ่งมีโปรโตซัว 21 ชนิด ที่ใช้เป็นดัชนีทางชีวภาพ บ่งบอกคุณภาพน้ำเสียได้

โปรโตซัวชนิดที่พบจำนวนมากที่บ่อน้ำเสีย บึงทุ่งสร้าง คือ *Acineria incurvata*, *Loxodes* sp., *Metopus* sp. และ *Arcella vulgaris* น่าจะสามารถใช้เป็นดัชนีบ่งบอกน้ำเสียประเภทนี้ได้ ส่วนชนิดที่เหลือควรมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

น้ำเสียที่ได้รับการบำบัดตามขั้นตอนต่างๆ

ผลการศึกษาความหลากหลายชนิดของโปรโตซัว ในบ่อน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดขั้นต้น (บ่อ 1-2) พบ โปรโตซัว 15 ชนิดที่เหมือนกันกับที่บึงหนองโจด ตอนบน บ้านหนองโจด ตำบลกุดน้ำใส อำเภอน้ำพอง จังหวัดขอนแก่น (พินิจ หวังสมนึกและคณะ, 2547) ได้แก่ *Aspidisca costata*, *Coleps octospinus*, *Chilodonella cucullulus*, *Paramecium caudatum*, *Podophrya fixa*, *Cyclidium glaucoma*, *Euglena acus*, *E. deses*, *E. chrenbergi*, *E. proxima*, *E. oxyuris*, *Trachelomonas horida*, *Chilomonas paramecium*, *Amoeba proteus* และ *A. radiosa*

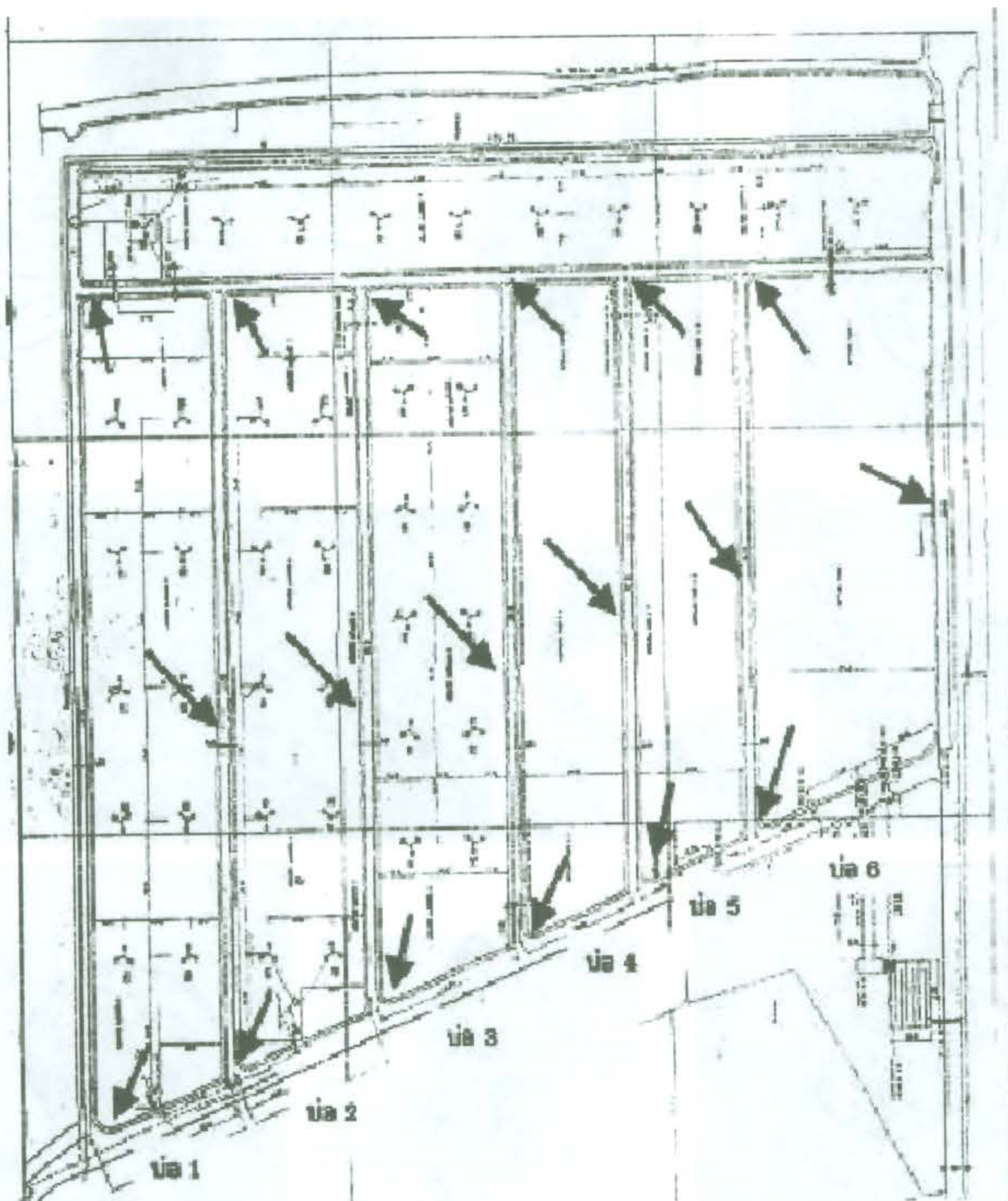
ส่วนผลการการสำรวจโปรโตซัวบ่อน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดที่ 3-4 ซึ่งมีคุณภาพน้ำคล้ายกับคุณภาพน้ำที่พินิจ หวังสมนึก และคณะได้สำรวจจากแม่น้ำพองที่ไหลผ่านบ้านหนองบัวน้อย ตำบลกุดน้ำใส อำเภอน้ำพอง จังหวัดขอนแก่น ระหว่างเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2544 - เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2545 (พินิจ หวังสมนึก และคณะ, 2547) โดยพบโปรโตซัวชนิดที่เหมือนกันจำนวน 12 ชนิด ได้แก่ *Euplotes patella*, *Coleps hirtus*, *Lacrymaria olor*, *Chilodonella cucullulus*, *Euglena acus*, *E. deses*, *E. polymorpha*, *E. oxyuris*, *Stylonychia mytilus*, *Chilomonas paramecium*, *Amoeba proteus* และ *Actinophrys sol*.

ผลการศึกษาความหลากหลายชนิดของโปรโตซัว ในบ่อน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดที่ บ่อ 5-6 ซึ่งมีการปนเปื้อนของน้ำทิ้งจากกิจกรรมต่างๆ น้อย สามารถที่จะนำมาอุปโภคได้ และพบว่าคุณภาพน้ำในบ่อที่ 5-6 คล้ายกับรายงานการสำรวจความหลากหลายชนิดของโปรโตซัวในแม่น้ำพองของพินิจ หวังสมนึกและคณะ (2547) ในบริเวณสถานีที่ 1, 2, 6 และ 7 ซึ่งจัดเป็นแหล่งน้ำประเภทที่ 2 ตามมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำจืดผิวดิน พบโปรโตซัวชนิดที่เหมือนกันจำนวน 16 ชนิด ได้แก่ *Halteria grandinella*, *Stylonychia mytilus*, *Coleps hirtus*, *C. octospinus*, *Paramecium caudatum*, *Euglena deses*, *E. oxyuris*, *E. polymorpha*, *E. proxima*, *Phacus acuminata*, *P. longicauda*, *Peranema trichophorum*, *Trachelomonas hispida*, *T. horida*, *Amoeba radiosa* และ *Actinophrys sol* สาเหตุที่ทำให้พบโปรโตซัวชนิดที่เหมือนกันอาจเนื่องมาจากคุณภาพทางด้านกายภาพและทางเคมีของน้ำคล้ายกัน สภาวะทางเคมี เช่น ค่าพีเอช ค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ อินทรีย์สาร สภาวะทางฟิสิกส์ เช่น ระดับอุณหภูมิ ฤดูกาล และยังเป็นแหล่งรองรับน้ำทิ้งจากกิจกรรมต่างๆ คล้ายกัน ทำให้ลักษณะทางนิเวศวิทยาเหมือนกัน (Farmer, 1980) แต่ก็พบว่าชนิดของโปรโตซัวในบ่อบำบัดต่างๆ และบริเวณต่างๆ ในแม่น้ำพองที่มีการสำรวจโปรโตซัวที่ต่างชนิดกันจำนวนหนึ่ง ปัจจัยที่ทำให้พบชนิดของโปรโตซัวแตกต่างกันเนื่องจากน้ำที่ไหลลงบ่อพักน้ำเสียและบ่อบำบัดต่างเป็นแหล่งรับน้ำเสียจากกิจกรรมต่างๆ ของประชาชนในเขตเทศบาลนครขอนแก่น เช่น น้ำจากครัวเรือน อุตสาหกรรมขนาดเล็ก กิจกรรมร้านค้า ฯลฯ น้ำทิ้งเหล่านี้มีมวลของธาตุอาหารละลายอยู่ในน้ำมาก แต่ น้ำเสียที่ถูกปล่อยลงสู่แม่น้ำพองในบริเวณที่สำรวจนี้ ส่วนใหญ่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เช่น

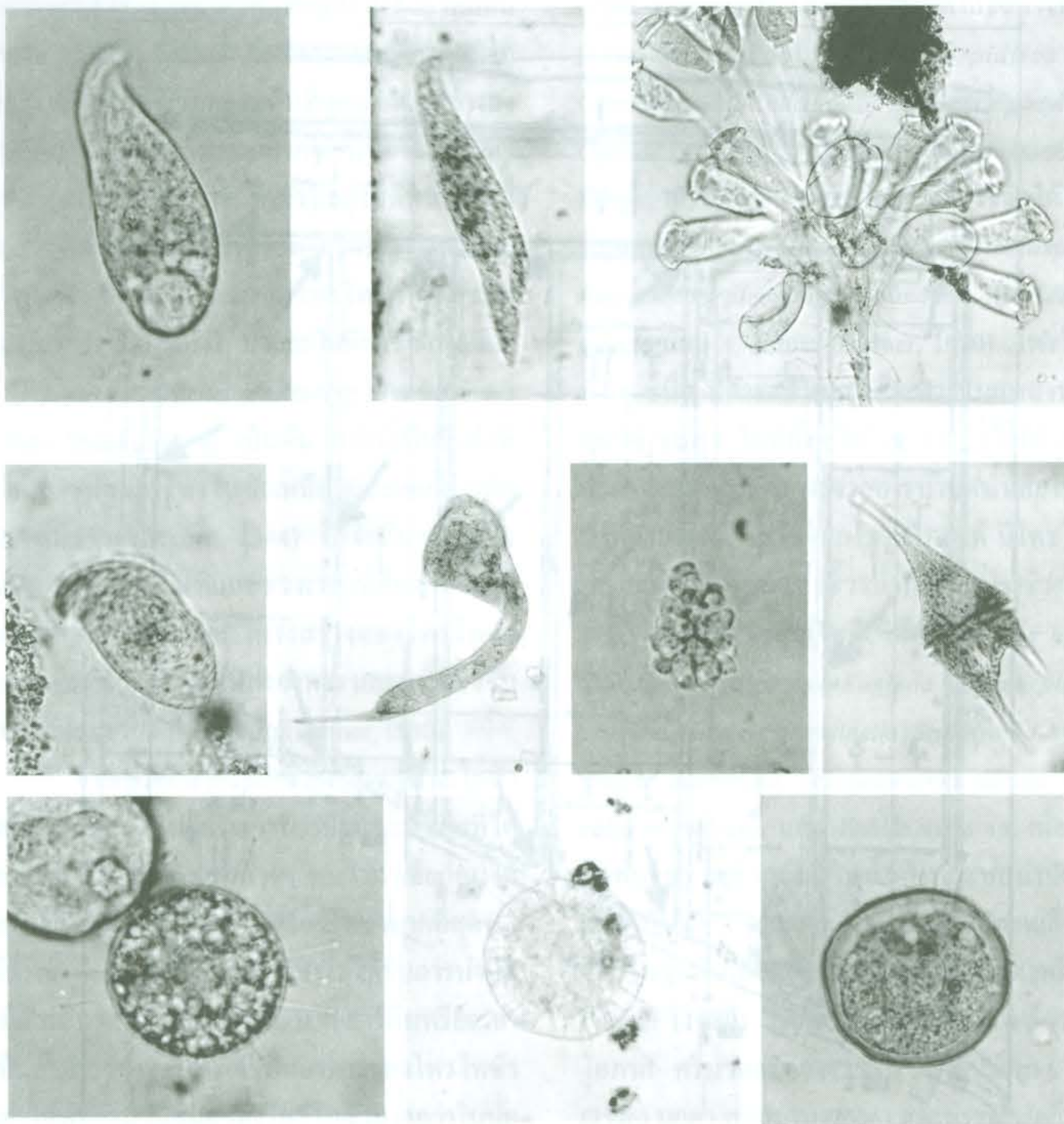
โรงงานสุรา โรงงานน้ำตาล (สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 6, 2542) ลักษณะน้ำเสียมีความแตกต่างกันมาก นอกจากนี้โพรโทซัวที่อยู่ในดินที่ถูกน้ำฝนชะล้างลงปะปนในบ่อน้ำเสียไหลมาจากขอบบ่อที่มีบริเวณแคบมากเมื่อเทียบกับโพรโทซัวที่อยู่ในดินบนพื้นที่สองฝั่งของแม่น้ำพองที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่กว่ามากและมีความแตกต่างของดินมาก ซึ่งโพรโทซัวหลายชนิดสามารถดำรงชีวิตได้ทั้งในน้ำและในดินเช่น *Colpoda* sp., *Dileptus* sp., *Trachelophyllum* sp., *Tetrahynema* sp. และ *Stylonychia* sp. เป็นต้น เหล่านี้เป็นปัจจัยที่ทำให้พบชนิดของโพรโทซัวเหมือนและแตกต่างกันด้วย (พินิจ หวังสมนึก, 2544) ปัจจัยอื่นๆที่มีส่วนสำคัญเช่นกันคือ ปีที่และช่วงเวลาการศึกษาต่างกัน สภาพทางชีววิทยา เช่น โครงสร้างของโพรโทซัว ความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งอาหาร และการแข่งขันระหว่างประชากรแตกต่างกัน (Farmer, 1980)

จากการศึกษาความหลากหลายชนิดของโพรโทซัวในแหล่งน้ำเสียก่อนได้รับการบำบัดและน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดตามขั้นตอนต่างๆ พบว่าน้ำเสียก่อนได้รับการบำบัดมีจำนวนชนิดของโพรโทซัวมากที่สุด (58 ชนิด) เนื่องจากเป็นบ่อน้ำเสียที่ยังไม่ได้รับการบำบัด จึงมีสารอินทรีย์อยู่เป็นปริมาณมาก สารอินทรีย์เหล่านี้เป็นอาหารของจุลินทรีย์ที่เป็นอาหารของโพรโทซัว จึงทำให้พบจำนวนชนิดของโพรโทซัวมากกว่าในบ่อที่ได้รับการบำบัดแล้วซึ่งมวลของธาตุอาหารที่อยู่ในน้ำลดปริมาณไปเรื่อยตามระยะทางที่น้ำไหลจากบ่อน้ำเสียไปยังบ่อบำบัดที่ 1-6 เนื่องจากถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์จึงเป็นผลให้พบจำนวนชนิดของโพรโทซัวลดลงตามลำดับ (46, 39 และ 34 ชนิดตามลำดับ) นอกจากนี้โพรโทซัวแต่ละชนิดดำรงชีวิตในน้ำที่มีความแตกต่างกัน บางชนิดสามารถดำรงชีวิตในน้ำหลังบำบัดซึ่งจัดเป็นน้ำประเภทอัลฟามีโซซาโพรบิก

(alpha-mesosaprobic) ถึงประเภทเบตามีโซซาโพรบิก (beta-mesosaprobic) ได้แก่ *Aspidisca* sp., *Carchesium* sp., *Chilodonella uncinata*, *Epistylis* sp., *Opercularia* sp. และ *Tokophrya* sp. (Foissner and Berger, 1996) มีบางชนิดสามารถดำรงชีวิตได้ในน้ำที่คุณภาพดี เช่น *Coleps hirtus*, *C. octospinus*, *Amphileptus pleurosigma*, *Amoeba discoides*, *A. guttula* และ *A. striata* (Farmer, 1980) โพรโทซัวทั้ง 6 ชนิด นี้ดำรงชีวิตอยู่ได้เฉพาะในแหล่งน้ำที่มีออกซิเจนสูง ไม่มีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และมีปริมาณแบคทีเรียต่ำ ผลจากการบำบัดน้ำเสียให้เป็นน้ำที่สามารถนำไปใช้ในการอุปโภคได้ มีโพรโทซัวหลายชนิดที่เป็นตัวบ่งชี้ว่าน้ำที่มีโพรโทซัวกลุ่มนี้อาศัยอยู่เป็นน้ำคุณภาพดี ได้แก่ *Coleps hirtus*, *Entosiphon sulcatum*, *Euglena polymorpha*, *E. proxima*, *Halteria grandinella*, *Stylonychia mytilus*, *Phacus acuminata*, *Trachelomonas horida*, *Vorticella convallaria* และ *Vahlkampfia* sp. เนื่องจากไม่พบโพรโทซัวกลุ่มนี้ในน้ำเสียและบ่อบำบัด 1-2 แต่พบในบ่อ 3, 4, 5 และ 6 เท่านั้น มีรายงานเกี่ยวกับโพรโทซัวดังกล่าวว่าพบเฉพาะในน้ำคุณภาพดี เช่น Farmer (1980) อำไพ อาภรณ์ชยานนท์ (2520) โอภาส ศรีนวลละออง (2523) เชิดพันธ์ มุรชานนท์ (2526) มุกดา สุขสมาน (2536) สุดาพรรณ สัตย์พานิช (2539) อินทิราปรุ่งเกียรติ (2540) และ พินิจ หวังสมนึก และคณะ (2545) ส่วนโพรโทซัวที่พบในน้ำคุณภาพดีปานกลาง มีจำนวน 10 ชนิด ได้แก่ *Amphileptus pleurosigma*, *A. procerus*, *Amphileptus* sp., *Lacrymaria olor*, *Chilodontopsis vorax*, *Vorticella natans*, *Pandorina morum*, *Amoeba discoides*, *A. guttula* และ *A. striata*



ภาพที่ 1 แผนผังบ่อบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่บึงทุ่งสร้าง ลูกศรชี้แสดงตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง (เทศบาลนครขอนแก่น)



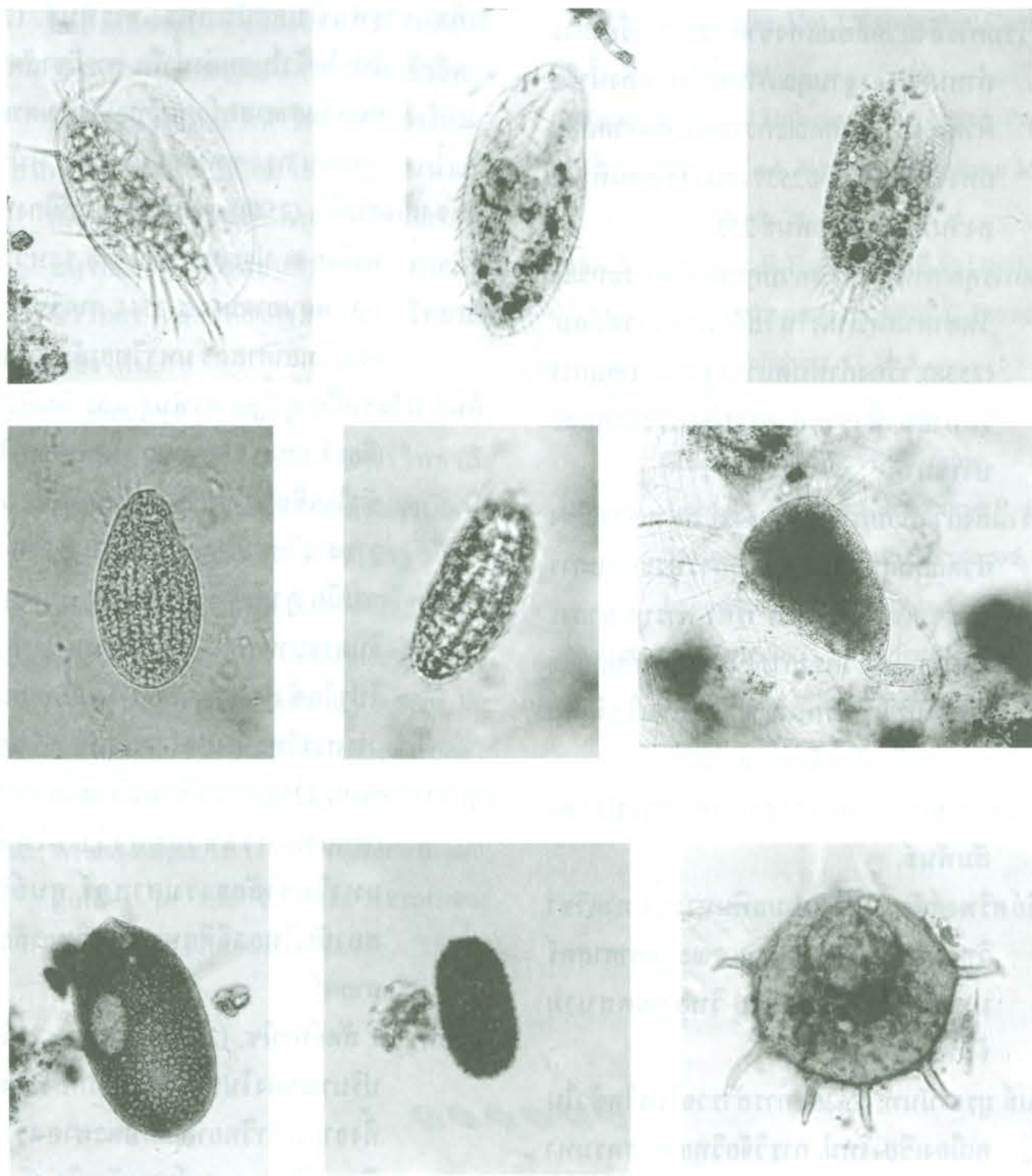
ภาพที่ 2 โพรโทซัวบางชนิดที่พบในน้ำเสียมาก(บ่อน้ำเสียก่อนบำบัด) ภาพกำลังขยาย 1000 เท่า

แถวบน *Acineria incurvata* (ซ้าย), *Loxodes striata* (กลาง), *Epistylis* sp.(ขวา)

แถวกลาง *Metopus* sp. (ซ้าย), *Stentor polymorphus* (กลาง-ซ้าย),

Anthophysis vegetans (กลาง-ขวา), *Ceratium furca* (ขวา)

แถวล่าง *Sphaenophrya* sp. (ซ้าย), *Echinosphaerium* sp. (กลาง), และ *Arcella vulgaris* (ขวา)



ภาพที่ 3 โปรโตชีวบางชนิดที่พบในน้ำสะอาด(สระพลาสติก) ภาพกำลังขยาย 1000 เท่า

แถวบน *Euplotes affinis*(ซ้าย), *Oxytricha bifaria* (กลาง), *Stylonychia pustulata* (ขวา)

แถวกลาง *Uronema* sp. (ซ้าย), *Coleps elongatus* (กลาง), *Tokophrya lemnae* (ขวา)

แถวล่าง *Euglena* sp. (ซ้าย), *Trachelomonas piscatoris* (กลาง) , และ *Centropyxis* sp. (ขวา)

เอกสารอ้างอิง

- คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. (2537). เรื่องการกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำจืดผิวดิน. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 4/2537 เล่ม 111 ตอนที่ 162 ลงวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2537.
- กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. (2538). เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด.
- สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 6. (2542). สถานการณ์สิ่งแวดล้อมแม่น้ำพอง. เอกสารประกอบการประชุมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง การบูรณาการแผนงานและโครงการในการป้องกันแก้ไขและฟื้นฟูแม่น้ำพอง. ณ โรงแรมโซฟิเทลราชาออคิด จังหวัดขอนแก่น.
- เทศบาลนครขอนแก่น. (2544). เอกสารประชาสัมพันธ์.
- กัณท์ธีร์ ศรีพงศ์พันธุ์. (2540). มลพิษทางน้ำ. ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตสนามจันทร์. 230 หน้า.
- เชิดพันธ์ มุรธานันท์. (2526). การสำรวจโปรโตซัวในคูเมืองเชียงใหม่. การวิจัยวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต(การสอนชีววิทยา) ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- นุกูล ใจชื่อ และ สิทธิพล เสงี่ยม. (2539). การคาดคะเนด้วยแผ่นพลาสติก พี.วี.ซี. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 48 หน้า.
- บพิธ จารุพันธ์ และนันทพร จารุพันธ์. (2532). การศึกษาชนิดของโปรโตซัวเพื่อใช้เป็นดัชนีบ่งบอกคุณภาพน้ำ. รายงานการวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร.
- บพิธ จารุพันธ์ และนันทพร จารุพันธ์. (2539). โปรโตซัวในแหล่งน้ำจืด. ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพมหานคร. 139 หน้า
- พินิจ หวังสมนึก. (2544). รายงานการไปฝึกงานและทำวิจัย ณ ประเทศออสเตรเลีย ระหว่างวันที่ 1-31 พฤษภาคม พ.ศ. 2544. ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- พินิจ หวังสมนึก ภูวณ กรพันธุ์ และ อินทิรา ปรงเกียรติ. (2545). ความหลากหลายของโปรโตซัวในเขื่อนอุบลรัตน์ จังหวัดขอนแก่น. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 30 (4):240-252.
- พินิจ หวังสมนึก ภูวณ กรพันธุ์ และ สมพงษ์ คุณย์จินดาชบาพร. (2547). ความหลากหลายของโปรโตซัวในแม่น้ำพอง จังหวัดขอนแก่น. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 32 (1): 53-69.
- มุกดา สุขสมาน. (2536). การศึกษานิเวศวิทยาและการเผยแพร่กระจายของโปรโตซัวในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต. สถาบันไทยคดีศึกษา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- สุดาพรรณ สัตย์พานิช. (2539). การศึกษาชนิดและปริมาณของโปรโตซัวจากแหล่งรองรับน้ำทิ้งจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ชีววิทยา) ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อินทิรา ปรงเกียรติ. (2540). การสำรวจโปรโตซัวในอ่างเก็บน้ำ สำนักงานเกษตรและสหกรณ์ จังหวัดเชียงใหม่. การค้นคว้าอิสระเชิงวิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

- อินทรา ปรงเกียรติ. (2542). การสำรวจโปรโตซัวในคลองแม่ข่าจังหวัดเชียงใหม่. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- อำไพ อารักษ์ยานนท์. (2520). โปรโตซัวในน้ำเสียเนื่องจากสารอินทรีย์. การวิจัยวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (การสอนชีววิทยา) ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- โอภาส ศรีนวลละออง. (2523). การสำรวจโปรโตซัวในอ่างเก็บน้ำอ่างแก้ว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. การวิจัยวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การสอนชีววิทยา) ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- Edmondson, W. T. (1959). *Freshwater Biology*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Farmer, J. N. (1980). *The Protozoa: Introduction to Protozoology*. London: The C.V. Mosby Co.
- Foissner, W. and Berger, H. (1996). A user's friendly guides to the Ciliates (Protozoa, Ciliophora). *Freshwater Biology*. 35:375-482.
- Fritsch, F. E. (1975). *The structure and reproduction of the algae*. Vol. I. Cambridge: Cambridge University.
- Hausmann, K. and Hulsmann, N. (1996). *Protozoology*. 2nd ed. New York: Thieme Medical Publishers.
- Jahn, T. L., Bovee, E. E and Jahn, F. F. (1979). *How to know the protozoa*, WM. C. brown Company Publishers. U. S. A.
- Kudo, R. R. (1966). *Protozoology*. 5th ed. Illinois: Charles C. Thomas Publishing.
- Lee, J.J., Leedale, G.F. and Bradbury, P. (2000). *Illustrated guide to the protozoa*. 2th ed. Lawrence: Allen Press Inc.
- Leedale, G. F. (1967). *Euglenoid flagellates*. Englewood Cliffs. New Jersey: Printice-Hall.



...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

ข้อแนะนำในการเขียนบทความลงวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ประเภทของเรื่องที่จะตีพิมพ์

1. รายงานผลการวิจัยและค้นคว้าหรือการสำรวจที่ยังไม่เคยตีพิมพ์ในวารสารหรือหนังสืออื่นมาก่อน
2. บทความปริทัศน์ ได้แก่งานเขียนที่รวบรวมหรือเรียบเรียงจากเอกสารหรือหนังสือต่าง ๆ เพื่อเผยแพร่และฟื้นฟูงานด้านวิชาการระดับต่าง ๆ
3. บทความแสดงข้อคิดเห็นหรือข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในด้านวิชาการ เรื่องแปลข่าววิชาการ ย่อความจากงานวิจัยหรือหนังสือใหม่ที่น่าสนใจ
4. เรื่องที่จะตีพิมพ์ ต้องไม่เคยได้รับการตีพิมพ์ในวารสารอื่น หรือ Proceedings ของการประชุมทางวิชาการมาก่อน

รูปแบบของการเขียนและเตรียมต้นฉบับ

1. ต้นฉบับ ต้องเป็นตัวพิมพ์ปกติ มีช่วงห่างระหว่างบรรทัดตามมาตรฐาน พิมพ์ลงในกระดาษขาว A4 (โรเนียวสั้น) โดยใช้กระดาษหน้าเดียว ความยาวไม่เกิน 10 หน้า ส่งต้นฉบับ 2 ชุด
2. ต้นฉบับ จะถูกพิจารณาโดยกองบรรณาธิการ และจะตอบรับการได้รับบทความโดยไม่ส่งต้นฉบับคืน ผู้เขียนควรจะทำสำเนาเก็บไว้เป็นหลักฐานของตัวเอง 1 ฉบับ
3. ต้นฉบับ จะต้องมีความถูกต้องทั้งในด้านเนื้อหา และการใช้ภาษา รวมทั้งมีความสมบูรณ์ในรูปแบบพร้อมที่จะนำลงตีพิมพ์ได้
4. ชื่อเรื่อง ให้ใช้ภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ไม่ยาวเกินไป และหลีกเลี่ยงการใช้คำย่อโดยไม่จำเป็น
5. ชื่อผู้เขียน เขียนชื่อภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษพร้อมทั้งบอกสถานที่ทำงานให้ชัดเจน
6. เนื้อเรื่อง ใช้ได้ทั้งภาษาไทยล้วน และภาษาอังกฤษล้วน ถ้าใช้ภาษาไทยภาษาอังกฤษที่ใช้ปนกับภาษาไทยนั้นให้พยายามแปลเป็นไทยเท่าที่จะทำได้ และให้เขียนคำเดิมกำกับในวงเล็บ การทับศัพท์ภาษาอังกฤษ ตลอดทั้งการเขียนตัวสะกด การันต์ ในภาษาไทยให้ใช้ตามแบบราชบัณฑิตยสถาน
7. ในกรณีของบทความวิจัย ต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ และแบ่งเนื้อหาของบทความเป็นบทนำ วิธีดำเนินงาน ผลการวิเคราะห์ บทสรุปและวิจารณ์
8. เชิงอรรถ (footnote) ใช้เฉพาะที่จำเป็นเพื่อขยายหรือให้รายละเอียดเพิ่มเติมแก่ใจความเฉพาะตอนในบทความ
9. ตารางและภาพประกอบ คำบรรยายประกอบตารางหรือภาพประกอบควรจะสั้นและชัดเจน ถ้าเป็นภาพถ่ายให้ใช้ภาพขาว-ดำ ขนาดโปสเตอร์ ภาพเขียนลายเส้นควรเขียนด้วยหมึกดำ ภาพที่เขียนต้องชัดเจนและมีขนาดที่เหมาะสม
10. เอกสารอ้างอิง หรือบรรณานุกรม แนะนำให้เขียนตามแบบที่ทางวารสารกำหนด

ส่งต้นฉบับมาที่

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

อภิสิทธิ์สำหรับการตีพิมพ์

เรื่องที่ได้รับการตีพิมพ์ ผู้เขียนจะได้รับวารสารฉบับนั้น 2 เล่ม และสำเนาพิมพ์อีก 15 ชุด

การเขียนเอกสารอ้างอิงในวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

เอกสารอ้างอิง (Reference) หมายถึง เอกสารหรือส่วนหนึ่งของเอกสารที่อ้างอิงถึงหรือแปลมาโดยตรง การเขียนเอกสารอ้างอิงในเนื้อหานี้ ให้ใช้ระบบชื่อและปี เช่น Williams (2001) รายงานว่า... หรือ ...(Williams, 2001) การเขียนเอกสารอ้างอิงในตอนท้ายบทความนั้น ให้ใส่เฉพาะเล่มที่มีการอ้างไว้แล้วในเนื้อหาเท่านั้น

บรรณานุกรม (Bibliography) หมายถึง เอกสารที่ใช้อ้างอิงในลักษณะที่สรุปเป็นหลักการหรือทฤษฎี โดยมีได้อ้างอิงหรือแปลมาโดยตรง

การเขียนเอกสารอ้างอิง หรือบรรณานุกรม มีแนวทางการเขียนดังนี้

1. หนังสือ

ก. ภาษาไทย

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

ข. ภาษาอังกฤษ

ชื่อสกุล, อักษรย่อชื่อต้น. อักษรย่อชื่อรอง. (เลขปี ค.ศ.). ชื่อเรื่อง. ชื่อหนังสือ. เมืองที่พิมพ์ : โรงพิมพ์ หรือสำนักพิมพ์. 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-เลขหน้าสุดท้ายที่อ้างอิง.

ข. ภาษาอังกฤษ

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

หมายเหตุ

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

ใบส่งลงโฆษณา ในวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

เขียนที่.....
วันที่.....

เรียน บรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ข้าพเจ้า.....เป็นตัวแทนของ (บริษัท, ห้างร้าน,
องค์การ).....ที่อยู่.....
.....โทรศัพท์.....โทรสาร.....

มีความประสงค์จะลงโฆษณาในวารสารวิทยาศาสตร์ มข. ดังรายการต่อไปนี้

- | | | |
|---------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| ☐ ปกหลังด้านใน | ☐ เต็มหน้า | ☐ ครึ่งหน้า |
| ☐ ในฉบับ | ☐ เต็มหน้า | ☐ ครึ่งหน้า |

โดยข้าพเจ้าขอให้ลงโฆษณา จำนวน.....ฉบับ นับตั้งแต่ฉบับแรก ที่จะพิมพ์
ในครั้งต่อไปหลังจากที่ท่านได้รับหนังสือนี้แล้ว

พร้อมกับจดหมายฉบับนี้ ข้าพเจ้าได้ส่งต้นฉบับเพื่อลงโฆษณาและเงินค่าโฆษณา
จำนวน.....บาท (.....)

เป็น ☐ ธนาณัติ หรือ ☐ เช็คไปรษณีย์ ในนามของนางบุญคุ้ม เหลือกลิ่น
ส่งจ่าย ปท. มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ลงนาม.....

ตำแหน่ง.....

อัตราค่าโฆษณาในวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

		ลง 1 ฉบับ	ลง 4 ฉบับ
ปกหลัง	ด้านในเต็มหน้า	1,000 บาท	3,600 บาท
	ด้านในครึ่งหน้า	500 บาท	1,800 บาท
ในฉบับ	เต็มหน้า	500 บาท	1,600 บาท
	ครึ่งหน้า	250 บาท	800 บาท

หมายเหตุ ถ้าทางวารสารฯ ไม่สามารถลงตีพิมพ์บนปกหลังได้ วารสารฯ จะตีพิมพ์ลงในฉบับแทน
ในวงเงินเท่ากัน



วารสาร

วิทยาศาสตร์ มข.

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

วัตถุประสงค์

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

กำหนดออก ปีละ 4 ฉบับ

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

ใบสมัครเป็นสมาชิก

"วารสารวิทยาศาสตร์ มข."

- ☐ สมาชิกใหม่
☐ ต่ออายุ

ชื่อ-สกุล.....

ที่อยู่.....

รหัสไปรษณีย์.....หมายเลขสมาชิก.....

ตั้งแต่ฉบับที่.....ปีที่.....ถึงฉบับที่.....ปีที่.....รวม.....ฉบับ

พร้อมนี้ได้ส่งเงินจำนวน.....บาท มาทาง

อัตราค่าบำรุง

- | | |
|--|----------------------|
| ☐ ฐานนิติสงฆ์จ่าย ป.ท.มข. | 1 ปี 4 เล่ม 75 บาท |
| ☐ เช็กไปรษณีย์ | 2 ปี 8 เล่ม 150 บาท |
| ☐ เงินสด | 3 ปี 12 เล่ม 200 บาท |

ลายเซ็นผู้สมัคร.....

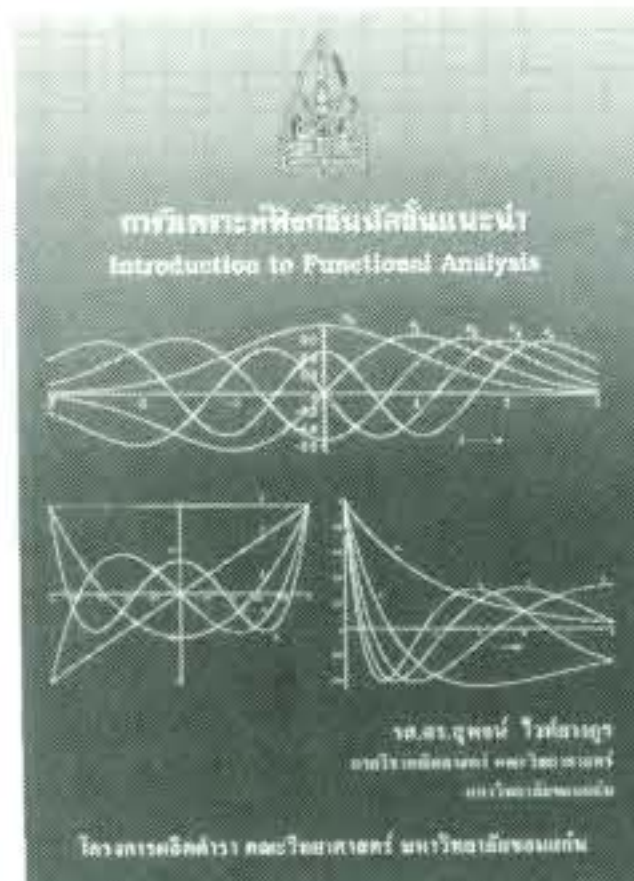
- หมายเหตุ 1. ส่งเงินทางธนาคารหรือเช็คไปรษณีย์ ในนามของนางบุญคุ้ม เหลือสั้น คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ส่งจ่าย ป.ท. มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002
2. กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงที่อยู่ กรุณาแจ้งให้ทราบล่วงหน้า ไม่น้อยกว่า 1 เดือน ก่อนเดือนสุดท้ายของกำหนดวารสารออก เพื่อความสะดวกในการส่งวารสารให้แก่ท่าน

หนังสือในโครงการผลิตตำรา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



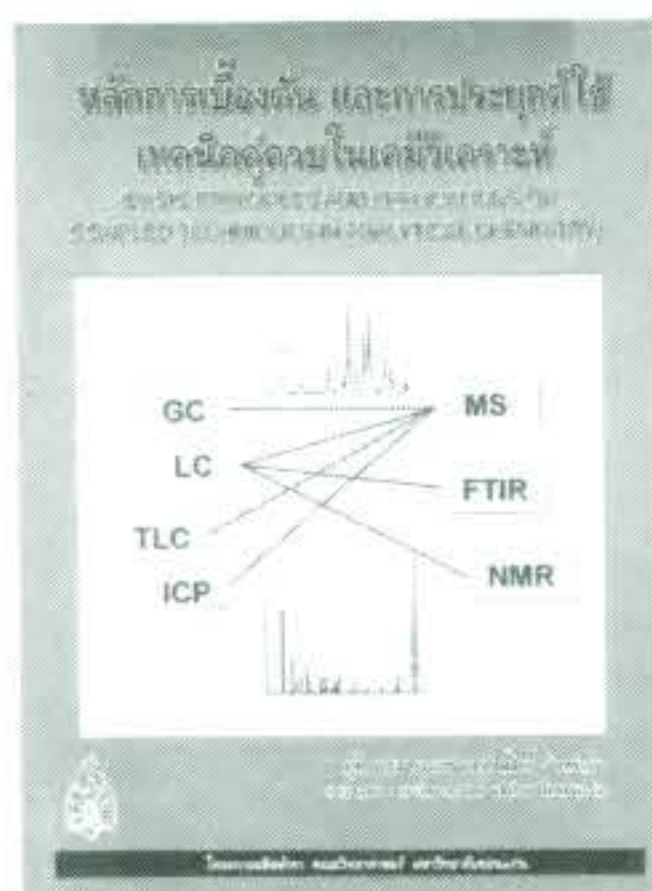
สถิติพื้นฐาน พร้อม
ตัวอย่างการวิเคราะห์
ด้วยโปรแกรม MINITAB
SPSS และ SAS

รองศาสตราจารย์ชัชวาล เรืองประพันธ์
พิมพ์ครั้งที่ 2 2543 • 510 หน้า
ISBN 974-675-666-4
ราคา 180 บาท



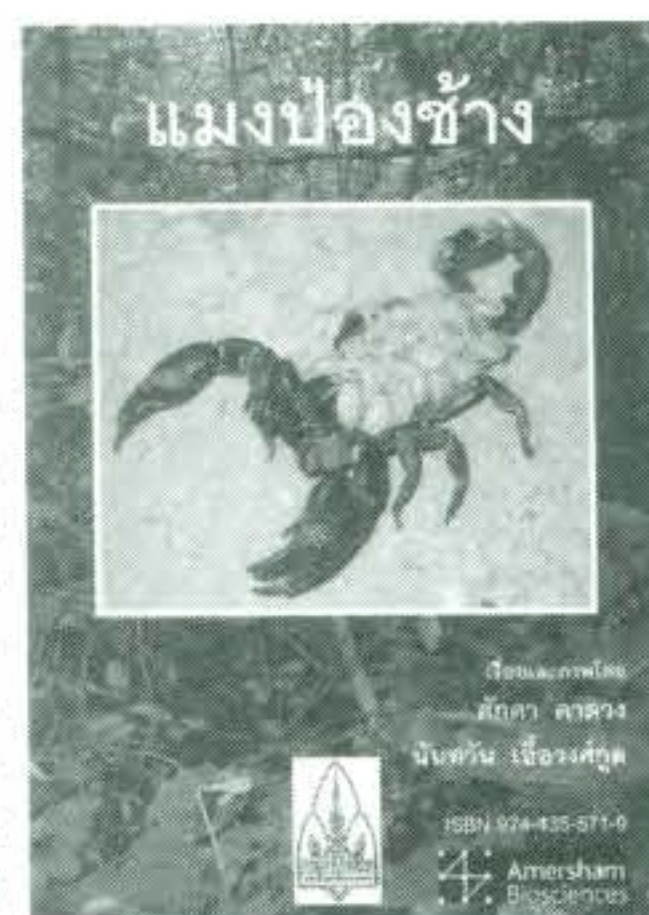
การวิเคราะห์ฟังก์ชันขั้น
ต้น

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



หลักการเบื้องต้นและ
การประยุกต์ใช้เทคนิค
การวิเคราะห์ในเคมีวิเคราะห์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศักดิ์สิทธิ์ จันทน์ไทย
2543 • 202 หน้า
ISBN 974-678-333-2
ราคา 150 บาท



แมงป่องข้าง

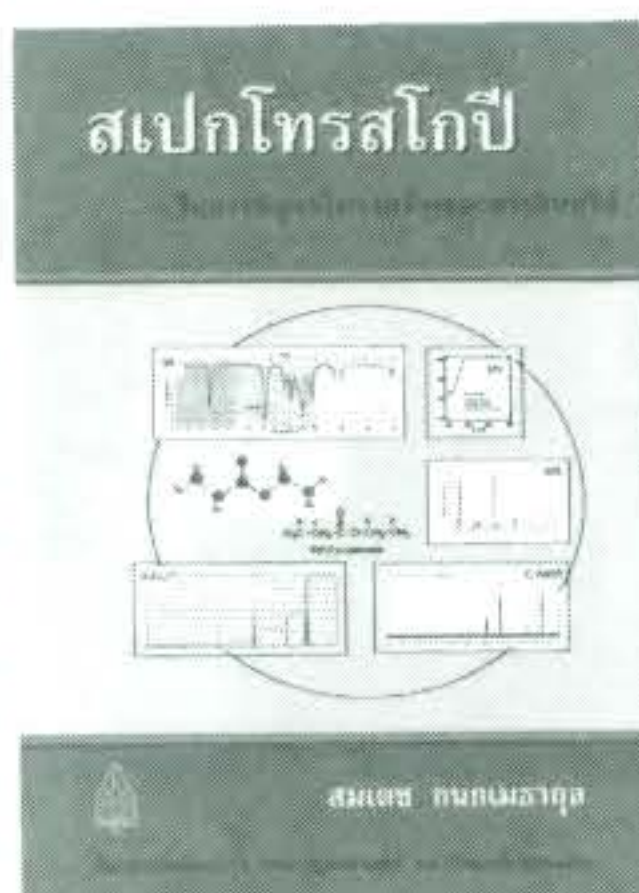
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ดา คาควง
นางสาวนันท์วัน เอื้อวงศ์กุล
2547 • 64 หน้า
ISBN 974-435-571-9
ราคา 160 บาท



การวิเคราะห์ข้อมูลด้วย
โปรแกรม
SPSS for Windows



รองศาสตราจารย์ชัชวาล เรืองประพันธ์
2544 • 620 หน้า
ISBN 974-654-608-2
ราคา 300 บาท



สเปกโทรสโกปีในการพิสูจน์
โครงสร้างของสารอินทรีย์

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

