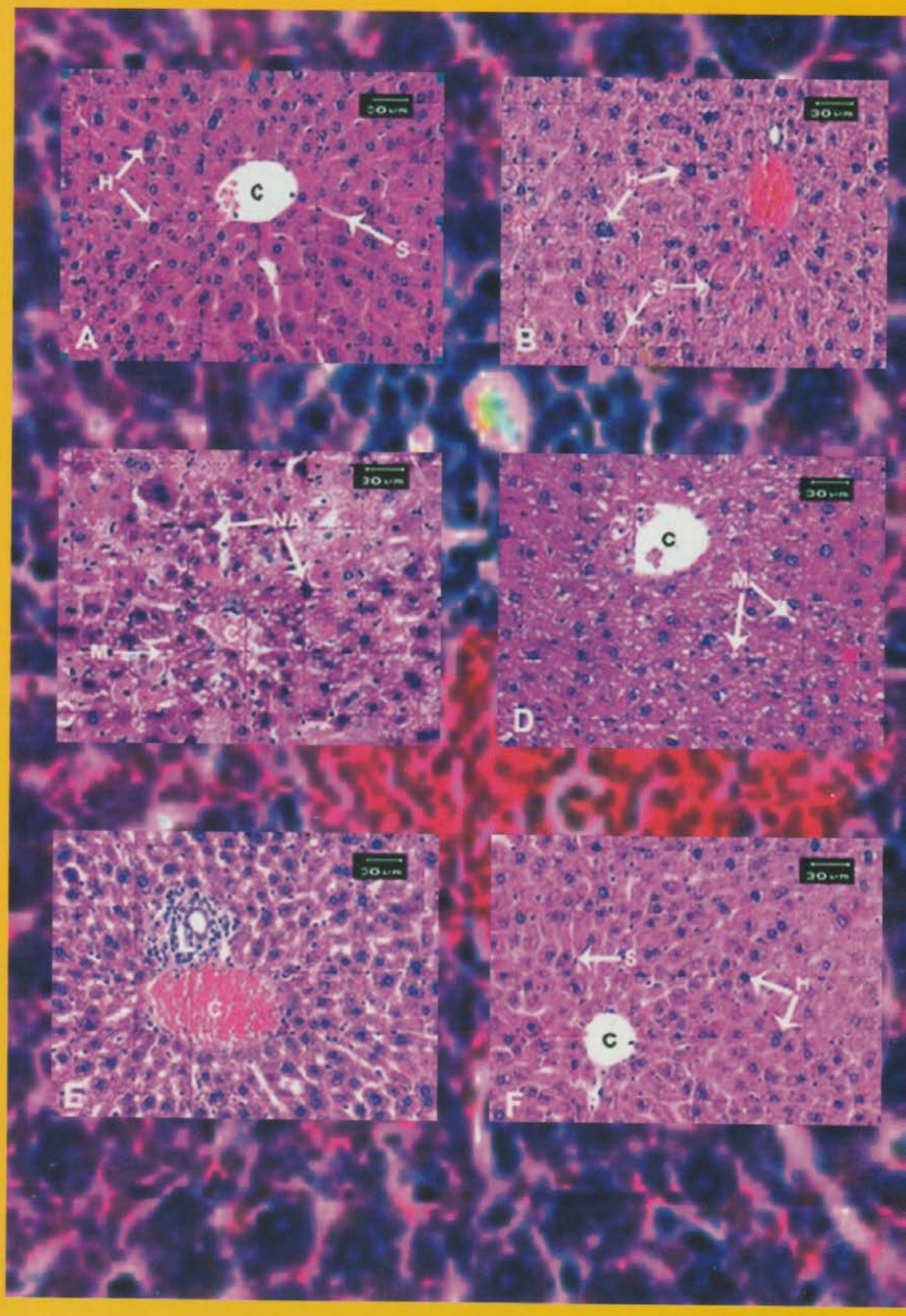
KKU SCIENCE JOURNAL

วารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ปีที่ 38 ฉบับที่ 1 (ม.ค.-มี.ค. 2553) Vol. 38 No. 1 (Jan.-Mar. 2010)

ISSN : 0125-2364



Histological structure of liver section (H&E)

KKU SCIENCE JOURNAL

วารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ปีที่ 38 ฉบับที่ 1 (ม.ค. - มี.ค. 53) Vol. 38 No.1 (Jan - Mar)

ISSN : 0125-2364

เจ้าของ

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สำนักงาน

คณะวิทยาศาสตร์ ตึก 6 มหาวิทยาลัยขอนแก่น

อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

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

วัตถุประสงค์

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

กำหนดออก ปีละ 4 ฉบับ

ฉบับที่ 1 มกราคม - มีนาคม

ฉบับที่ 2 เมษายน - มิ

ถุนายน

ฉบับที่ 3 กรกฎาคม - กันยายน

ฉบับที่ 4 ตุลาคม - ธันวาคม

"ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา"

สารบัญ Table of Contents

KKU SCIENCE JOURNAL

วารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ปีที่ 38 ฉบับที่ 1 (ม.ค. - มี.ค. 53) Vol. 38 No.1 (Jan - Mar)

ISSN : 0125 - 2364

สารบัญ Table of Contents

KKU SCIENCE JOURNAL
วารสารวิทยาศาสตร์ มข.
ปีที่ 38 ฉบับที่ 1 (ม.ค. - มี.ค. 53) Vol. 38 No.1 (Jan - Mar)
ISSN : 0125 - 2364

บทความ

งานวิจัย

สารบัญ Table of Contents

KKU SCIENCE JOURNAL
วารสารวิทยาศาสตร์ มข.
ปีที่ 38 ฉบับที่ 1 (ม.ค. - มี.ค. 53) Vol. 38 No.1 (Jan - Mar)
ISSN : 0125 - 2364

งานวิจัย

สารบัญ Table of Contents

KKU SCIENCE JOURNAL
วารสารวิทยาศาสตร์ มข.
ปีที่ 38 ฉบับที่ 1 (ม.ค. - มี.ค. 53) Vol. 38 No.1 (Jan - Mar)
ISSN : 0125 - 2364

งานวิจัย

KKU SCIENCE JOURNAL
วารสารวิทยาศาสตร์ มข.
ปีที่ 38 ฉบับที่ 1 (ม.ค. - มี.ค. 53) Vol. 38 No.1 (Jan - Mar)
ISSN : 0125-2364

Publisher

Faculty of Science, Khon Kaen University, Thailand.

Office

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

Objectives

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

Publishing frequency

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

Number 1 January - March
Number 2 April - June
Number 3 July - September
Number 4 October - December

"With the Financial Support of the Commission on Higher Education"

บรรณาธิการแถลง

สวัสดีค่ะ **ท่านผู้อ่านทุกท่าน**

ปี 2010 ได้เริ่มต้นแล้วค่ะ และตอนนี้ทางวารสารของเราก็กำลังปรับปรุง ทั้งรูปแบบของรูปเล่มและวิธีการที่ท่านจะส่งบทความเข้ามาและจะพยายามทำระยะเวลาให้สั้นลงให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ค่ะ เช่นเดิมค่ะในเล่มแรกของปี 2010 นี้เนื้อหาวิชาการของเรายังครบครันทั้ง บทความปริทัศน์ และบทความวิจัยค่ะ เช่น (การพิสูจน์หลักการการหดตัวของบานาคโดยใช้ทฤษฎีบทอินเตอร์เซกชันของคันเตอร์ การแต่งงานนี้จะไปรอดไหม ตัวกำหนดของตัวเลขในปฏิทิน ประโยชน์และการสังเคราะห์ Conjugated Linoleic Acids (CLA) แอคติโนมัยสีทในทะเล: แหล่งของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพชนิดใหม่ การกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ใต้ผิวดิน: บทบาทของธรณีฟิสิกส์ต่อปัญหาสภาวะโลกร้อน ระบบบูรณาการสารสนเทศจากแหล่งข้อมูลที่หลากหลายโดยใช้แบบจำลององค์ประกอบเว็บเซอร์วิส กรณีศึกษา: การบูรณาการข้อมูลสารสนเทศบุคลากรของมหาวิทยาลัยขอนแก่น การอบแห้งชั้นบางเปลือกมังคุดด้วยพลังงานความร้อนร่วม: ลมร้อน-แสงอาทิตย์ การหมักผลิตภัณฑ์คล้ายนมเปรี้ยวจากน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ การเลี้ยงกุ้งก้ามกราม *Macrobrachium rosenbergii* de Man ด้วยอาหารเสริมไรน้ำนางฟ้าไทย *Branchinella thailandensis*, Sanoamuang, Saengphan and Murugan, 2002 ผลต้านฤทธิ์ของสารสกัดจากกลีบเลี้ยงกระเจี๊ยบแดงต่อพิษของยาเตตราซัยคลินต่อตับของหนูเม้าส์ คุณภาพและการยอมรับผลิตภัณฑ์หมูก้อนทอดที่ทดแทนเนื้อหมูด้วยกากถั่วเหลือง ประสิทธิภาพของน้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพรในการฆ่าไรดีด *Formicomotes heteromorphus* Magowski โดยวิธีการสัมผัส และแบบจำลองการไหลแบบหนืดที่ไม่อัดตัวโดยวิธีสมาชิกจำกัด) ก็เช่นเดิมค่ะขอเชิญชวนท่านผู้อ่านทุกท่านส่งบทความวิจัยของท่านมาตีพิมพ์วารสารเรานะคะ

ขอบคุณค่ะ

สมปอง ธรรมศิริรักษ์

ว.วิทย. มข. 38(1) 1-5 (2553) KKU Sci. J.38(1) 1-5 (2010)

การพิสูจน์หลักการการหดตัวของบานาค โดยใช้ทฤษฎีบทอินเตอร์เซกชันของคันเตอร์

Proving Banach Contraction Principle by Using Cantor's Intersection Theorem

ปิยะ บัณฑิตสกุลชัย[1]

ในบทความนี้จะแสดงรูปแบบการพิสูจน์หลักการคอนแทรคชันบานาค (banach contraction principle) ที่แตกต่างจากการพิสูจน์ที่พบโดยทั่วไป โดยการพิสูจน์ที่พบกันโดยทั่วไปนั้นเป็นการพิสูจน์ของบานาค โดยอ้างอิงจากราวีและคณะ (Ravi et al., 2001) ส่วนการพิสูจน์อีกแบบหนึ่งซึ่งแตกต่างจากการพิสูจน์โดยทั่วไปนั้น ใช้ทฤษฎีบทอินเตอร์เซกชันของคันเตอร์เป็นการพิสูจน์ของบอยด์ และ วอง (Boyd and Wong, 1968) แต่ก่อนที่จะพิสูจน์ทฤษฎีบทดังกล่าวโดยใช้ 2 วิธีนั้น ขอทบทวนบทนิยามและทฤษฎีพื้นฐานดังต่อไปนี้

บทนิยามที่ 1 ให้ $\{x_n\}$ เป็นลำดับในเป็นปริภูมิอิงระยะทาง (X,d) จะกล่าวว่า $\{x_n\}$ เป็น "ลำดับโคชี" (Cauchy Sequence) ในปริภูมิอิงระยะทาง (X,d) ถ้าสำหรับทุก $\varepsilon > 0$ จะมีจำนวนนับ N ที่ทำให้ $d(x_m, x_n) < \varepsilon$ สำหรับทุก m, n N

บทนิยามที่ 2 ให้ (X,d) เป็นปริภูมิอิงระยะทาง จะกล่าวว่า (X,d) เป็น "ปริภูมิอิงระยะทางที่บริบูรณ์" (complete metric space) ถ้าสำหรับทุก ๆ ลำดับโคชีใน (X,d) ลู่เข้า

บทนิยามที่ 3 ให้ (X,d) เป็นปริภูมิอิงระยะทาง และ $T : (X,d) \to (X,d)$ เป็นการส่งแล้วเรียก T ว่า "การส่งแบบหดตัว" (Contraction Mapping) ถ้ามีจำนวนจริง k ซึ่ง 0 $k < 1$ ทำให้

$$d(T(x), T(y)) \quad kd(x,y)$$

สำหรับทุก $x, y \in X$

[1] หมวดวิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ วิทยาลัยนอร์ทกรุงเทพ กรุงเทพมหานคร 10220
E-mail: piya_band@hotmail.com

ก่อนที่จะพิสูจน์จะนิยามสัญลักษณ์ที่ใช้ คือ $T^n(x)$, $x \in X$ และ $n \in \mathbb{N} \cup \{0\}$ โดยที่จะนิยามแบบอุปนัยคือ $T^0(x) = x$ และ $T^{n+1}(x) = T(T^n(x))$ สำหรับการพิสูจน์ต่อไปนี้จะเป็นการพิสูจน์ของบานาคที่พบกันโดยทั่วไป

ทฤษฎีบท (หลักการหดตัวของบานาค) กำหนดให้ (X,d) เป็นปริภูมิอิงระยะทางที่บริบูรณ์ และ $T:(X,d) \to (X,d)$ เป็นการส่งแบบหดตัว แล้ว T จะมีจุดตรึงเพียงจุดเดียว

พิสูจน์ เนื่องจาก T เป็นการส่งแบบหดตัว ดังนั้น จะมีจำนวนจริง k ซึ่ง $0 \quad k < 1$ ซึ่งทำให้

$$d(T(x), T(y)) \quad kd(x,y)$$

สำหรับทุก $x, y \in X$

ให้ $x \in X$ ถ้า $T(x) = x$ แล้วจะได้ว่า T จะมีจุดตรึง ดังนั้นสมมติว่า $T(x) \quad x$ และสำหรับทุก $m, n \in \mathbb{N}$ ซึ่ง $m > n$ จะสังเกตเห็นว่า

$$d\left(T^m(x),T^n(x)\right) \le kd\left(T^{m-1}(x),T^{n-1}(x)\right) \le k^2 d\left(T^{m-2}(x),T^{n-2}(x)\right) \le \cdots \le k^n d\left(T^{m-n}(x),x\right)$$

และสำหรับทุก $n \in \mathbb{N}$ จะสังเกตเห็นว่า

$$\begin{aligned} d(x, T^n(x) \quad & d(x,T(x)) + d(T(x),T^2(x)) + \cdots + d(T^{n-1}(x),T^n(x)) \\ & d(x,T(x)) + kd(x,T(x)) + \cdots + k^{n-1} d(x,T(x)) \\ & [1+k+\cdots+k^{n-1}]\, d(x,T(x)) \\ & \left[\frac{1-k^n}{1-k}\right] d(x,T(x)) \\ & \left[\frac{1}{1-k}\right] d(x,T(x)) \end{aligned}$$

จะแสดงว่า $\{T^n(x)\}$ เป็นลำดับโคชี ให้ $\varepsilon > 0$ เลือกจำนวนนับ N ซึ่ง $k^N < \dfrac{\varepsilon(1-k)}{d(x,T(x))}$ สำหรับทุกจำนวนนับ $m, n \quad N$ จะได้ว่า

$$d\left(T^n(x),T^m(x)\right) \le k^n d\left(T^{m-n}(x),x\right) \le \frac{k^n}{1-k}\left(d\left(x,T(x)\right)\right) < \varepsilon$$

จึงได้ว่า $\{T^n(x)\}$ เป็นลำดับโคชี เนื่องจาก (X,d) เป็นปริภูมิบริบูรณ์ ดังนั้นจะมี $x_0 \in X$ ที่ทำให้ $\lim_{n \to} T^n(x) = x_0$ และยิ่งไปกว่านั้น ถ้า T เป็นการส่งแบบหดตัว แล้ว T จะเป็นการส่งที่ต่อเนื่อง เราจึงได้ว่า

$$x_0 = \lim_{n\to} T^{n+1}(x) = \lim_{n\to} T(T^n(x)) = T\left(\lim_{n\to} T^n(x)\right) = T(x_0)$$

นั่นคือ x_0 เป็นจุดตรึงของการส่ง T ต่อไปจะแสดงว่า จุดตรึงจะมีได้เพียงจุดเดียว สมมติให้มี $y_0 \in X$ ที่ทำให้ $y_0 = T(y_0)$ และเนื่องจาก T เป็นการส่งแบบหดตัว จึงได้ว่า

$$d(x_0, y_0) = d(T(x), T(x)) \le kd(x_0, y_0)$$

นั่นคือ $d(x_0, y_0) = 0$ หรือ $x_0 = y_0$ เพราะฉะนั้นจุดตรึงจะมีได้เพียงจุดเดียว ❐

สำหรับการพิสูจน์ต่อไปที่เป็นการพิสูจน์ที่แตกต่างจากการพิสูจน์ของบานาคซึ่งพิสูจน์โดยบอยด์ และ วอง (Boyd and Wong, 1968) โดยใช้ทฤษฎีบทอินเตอร์เซกชันของคันเตอร์ (Cantor's Intersection Theorem) ซึ่งเขียนเป็นทฤษฎีบทได้ดังนี้

ทฤษฎีบท (ทฤษฎีบทอินเตอร์เซกชันของคันเตอร์) ให้ (X,d) เป็นปริภูมิอิงระยะทางแล้ว (X,d) เป็นปริภูมิที่บริบูรณ์ ก็ต่อเมื่อ สำหรับแต่ละจำนวนนับ n, F_n ไม่เป็นเซตว่าง เป็นเซตย่อยปิดที่มีขอบเขตของ X ซึ่งสอดคล้องเงื่อนไข $F_{n+1} \subseteq F_n$ สำหรับทุกจำนวนนับ n และ $\lim_{n\to\infty} [\text{diam}(F_n)] = 0$ แล้ว $\bigcap_{n=1}^{\infty} F_n$ จะบรรจุสมาชิกเพียง ตัวเดียว

ซึ่งสำหรับการพิสูจน์ทฤษฎีบทอินเตอร์เซกชันของคันเตอร์สามารถดูจากการพิสูจน์ของโมฮัมเหม็ด และ วิลเลียม (Mohamed and William, 2001) ประการต่อไปจะทำการพิสูจน์โดยใช้ทฤษฎีบทอินเตอร์เซกชันของคันเตอร์ดังต่อไปนี้

พิสูจน์ (โดยใช้ทฤษฎีบทอินเตอร์เซกชันของคันเตอร์) นิยามฟังก์ชัน $\phi(x) = d(x, T(x))$ สำหรับทุก $x \in X$ สำหรับ $a \in X$ พิจารณา

$$\begin{aligned}
\phi(x) - \phi(a) &= d(x,T(x)) - d(a,T(a)) \\
&\quad [d(x,a) + d(a,T(a)) + d(T(a), T(x))] - d(a,T(a)) \\
&= d(x,a) + d(T(a),T(x)) \\
&\quad d(x,a) + kd(x,a) \\
&= (1+k)\, d(x,a)
\end{aligned}$$

นั่นคือ $\phi(x) - \phi(a) \quad (1+k)\, d(x,a)$ และในทำนองเดียวกัน เราสามารถแสดงได้ว่า $\phi(a) - \phi(x) \quad (1+k)\, d(x,a)$ ดังนั้น $|\phi(x) - \phi(a)| \le (1+k)d(x,a)$

ต่อไปจะแสดงว่า ϕ เป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง ให้ $\varepsilon > 0$ เลือกจำนวนจริงบวก $\delta = \frac{\varepsilon}{1+k}$ ซึ่ง $d(x,a) < \delta$

ดังนั้นสำหรับทุก $x \in X$ จะได้ว่า

$$|\phi(x) - \phi(a)| \quad (1+k)\, d(x,a) < (1+k)\frac{\varepsilon}{1+k} = \varepsilon$$

ดังนั้น ϕ เป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง และยิ่งไปกว่านั้น สำหรับทุก $x \in X$ จะเห็นว่า

$$\phi\left(T^n(x)\right) = d\left(T^n(x), T^{n+1}(x)\right) \le kd\left(T^{n-1}(x), T^n(x)\right) \le \cdots \le k^n\phi(x)$$

ดังนั้น
$$0 \le \lim_{n\to\infty}\phi\left(T^n(x)\right) \le \lim_{n\to\infty} k^n\phi(x) = 0$$

นั่นคือ $\lim_{n\to\infty} \phi(T^n(x)) = 0$

ประการต่อไป สำหรับแต่ละ $m \in \mathbb{N}$ เรานิยามเซต $C_m = \left\{ x \in X \mid \phi(x) \quad \frac{1}{m} \right\}$ เนื่องจากว่าเมื่อ n มีค่าเข้าใกล้อนันต์แล้ว $\phi(T^n(x))$ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้น $C_m \quad \varnothing$ และเนื่องจาก ϕ เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องจึงทำให้สำหรับแต่ละ $m \in \mathbb{N}$, C_m เป็นเซตปิด อันดับต่อไปจะแสดงว่า สำหรับแต่ละ $m \in \mathbb{N}$, C_m เป็นเซตที่มีขอบเขต ให้ $x, y \in C_m$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} d(x, y) \quad & d(x,T(x)) + d(T(x),T(y)) + d(T(y),y) \\ & \phi(x) + kd(x,y) + \phi(y) \\ & \frac{2}{m} + kd(x,y) \end{aligned}$$

เราจึงได้ว่า
$$d(x, y) - kd(x,y) \quad \frac{2}{m}$$

$$(1-k)\, d(x, y) \quad \frac{2}{m}$$

$$d(x, y) \quad \frac{2}{m(1-k)}$$

ดังนั้น สำหรับแต่ละ $m \in \mathbb{N}$, C_m เป็นเซตที่มีขอบเขต และยิ่งไปกว่านั้น เมื่อ m มีค่าเข้าใกล้อนันต์แล้ว diam (C_m) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เพราะฉะนั้น $\{C_m\}$ สอดคล้องเงื่อนไขของทฤษฎีบทอินเตอร์เซกชันของคันเตอร์

จึงทำให้ $\bigcap_{m=1}^{\infty} C_m$ จะบรรจุสมาชิกเพียงตัวเดียวโดยเรียกแทนว่า x_0 ดังนั้น

$$x_0 \in \bigcap_{m=1}^{\infty} C_m \Leftrightarrow \phi(x_0) = 0 \Leftrightarrow d(x_0, T(x_0)) = 0 \Leftrightarrow T(x_0) = x_0$$

เราจึงได้ว่า T จะมีจุดตรึงเพียงจุดเดียว ❐

จากการพิสูจน์โดยการใช้ทฤษฎีบทอินเตอร์เซกชันของคันเตอร์นั้น จะเห็นว่าพิจารณาที่ฟังก์ชัน ϕ ที่นิยามขึ้นมาใหม่ซึ่งแตกต่างจากการพิสูจน์ของบานาคที่ทำการพิจารณาที่ฟังก์ชัน T แต่สิ่งที่การพิสูจน์ทั้งสองแบบใช้เหมือนกันคือ การพิจารณาที่ตัวลำดับโคชีที่ลู่เข้าในปริภูมิอิงระยะทางที่บริบูรณ์เหมือนกัน

เอกสารอ้างอิง

Ravi, A. P., Meehan, M. and Regan, D. O. (2001). Fixed point theory and applications. Cambridge: United Kingdom at the University Press.

Boyd, D. W. and Wong, J. S. W. (1968). Another proof of the contraction mapping principle. Canad. Math. Bull. 11: 605-606.

Mohamed, K. A. and William, K. A. (2001). An Introduction to Metric Spaces and Fixed Point Theory. United State of America: .John Wiley & Sons,Inc.

ว.วิทย. มข. 38(1) 6-15 (2553) KKU Sci. J.38(1) 6-15 (2010)

การแต่งงานนี้จะไปรอดไหม
Will This Marriage Last?

ธีรนุช บุนนาค[1]

สถิติการหย่าร้างในหลาย ๆ ประเทศทั่วโลกมีแนวโน้มสูงขึ้นทุกปี ในประเทศไทยเองก็เช่นเดียวกัน (ดูได้จากเว็บไซต์ของ กรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย http://www.dopa.go.th) สถิติสูงสุดในโลกอยู่ที่สหรัฐอเมริกาคือครึ่งหนึ่งของจำนวนคู่สมรสจบลงด้วยการหย่าร้างจึงไม่น่าแปลกที่นักจิตวิทยาและผู้เชี่ยวชาญมากมายได้นำเสนอข้อมูลเพื่อความเข้าใจ การให้คำปรึกษา รวมถึงการทำนายว่าคู่สมรสจะอยู่อย่างมีความสุขหรือจะเลิกรากันไป แน่นอนการทำนายนี้ไม่ได้อาศัย วัน เดือน ปีเกิด หรือเวลาตกฟาก แต่เป็นความร่วมมือกันของนักจิตวิทยาและนักคณิตศาสตร์ มีความแม่นยำถึง 94% ที่จะบอกว่า ในเวลาสี่ปีข้างหน้า จะมีการหย่าร้างเกิดขึ้นหรือไม่ โดยศึกษาจากการสนทนาโต้ตอบของคู่สมรสที่เพิ่งแต่งงานใหม่ ถึงเรื่องความขัดแย้งของพวกเขา ประมาณ 15 นาที ซึ่งในการทำนายนั้นต้องเปลี่ยนคำพูด ท่าทาง การแสดงสีหน้า ให้เป็นปริมาณที่วัดได้ แล้วใช้คณิตศาสตร์มาช่วย ผลที่ได้สามารถใช้ในการออกแบบการบำบัดคู่สมรสจากสถานการณ์ของพวกเขาเอง ทั้งนี้เพราะคณิตศาสตร์ได้เข้ามาสร้างการส่งเชิงพื้นที่ (spatial mapping) ของความสัมพันธ์ของคู่สมรส ตอนนี้ฟังดูน่าเชื่อถือขึ้นไหมล่ะ ก่อนอื่นต้องเล่าเท้าความไปว่า ทำไมสองสาขานี้ถึงได้มาลงเอยกันได้

จอห์น ก็อตแมน (John Gottman) ศาสตราจารย์แห่งภาควิชาจิตวิทยา มหาวิทยาลัยวอชิงตัน ที่ซีแอทเทิล มลรัฐวอชิงตัน สหรัฐอเมริกาและทีม ทำงานวิจัยเกี่ยวกับชีวิตครอบครัวของคู่สมรสมานานมากกว่า 24 ปี โดยได้ศึกษาคู่สมรสที่มาที่ห้องทดลองวิจัยเกี่ยวกับครอบครัว (family research laboratory) หรือรู้จักกันในชื่อว่า love lab พวกเขาจะบันทึกการสนทนาโต้ตอบของคู่สมรสเกี่ยวกับปัญหาความขัดแย้งของพวกเขาไว้ประมาณ 15 นาที หลังจากนั้นผู้ช่วยของก็อตแมนจะดูวีดีโอเทป และใช้เทคนิคที่เขาสร้างขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1979 สังเกตอารมณ์ ความรู้สึก หรือสัญญาณต่าง ๆ ที่คู่สมรสได้แสดงไว้ เปลี่ยนแต่ละประโยค และการแสดงทางสีหน้า ให้เป็นคะแนน เช่น แสดงความรู้สึกน่ารังเกียจขยะแขยง (-3) แสดงความรักความเสน่หา (+4) บ่นในเรื่องเล็กน้อยที่ไม่สำคัญ (-1) ดูถูก สบประมาท (-4) เพื่อใช้ในการศึกษาต่อไป

ในช่วงทศวรรษ 1980 เขาใช้ข้อมูลเหล่านั้นทำนายการหย่าร้างโดยมีความแม่นยำกว่า 90% ต่อมาในช่วง

[1] ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ. เชียงใหม่ 50200
E-mail: dhiranuch@yahoo.com

ต้นทศวรรษ 1990 ก็อตแมนรู้สึกว่างานของเขาจะสมบูรณ์ขึ้นอีกถ้าได้ใช้คณิตศาสตร์ด้วย ซึ่งเขาก็มีพื้นฐานอยู่แล้ว และในที่สุดเขาก็ได้ทำวิจัยร่วมกับ เจมส์ เมอเรย์ (James Murray) ซึ่งเป็นนักคณิตศาสตร์ที่มีชื่อเสียงด้านชีววิทยาเชิงคณิตศาสตร์ ที่มีการประยุกต์ใช้ทั้งในทางการแพทย์ จิตวิทยา นิเวศวิทยา และวิทยาการระบาด

1. งานวิจัยเบื้องหลังการสร้างแบบจำลอง

ก่อนการสร้างแบบจำลองนี้ขึ้น ก็อตแมนทำงานวิจัยเกี่ยวกับความขัดแย้งกันของคู่สมรสมาอย่างมากมาย งานวิจัยหนึ่งของเขาในปี ค.ศ. 1992 Gottman และคณะ (1992) ได้ทำการบันทึกการสนทนาโต้ตอบของคู่สมรส 79 คู่ที่เพิ่งแต่งงานใหม่ เพื่อประโยชน์ในการศึกษา ก่อนที่จะมีการบันทึกการสนทนาไว้โดยเขาจะไม่ให้คู่สมรสพูดคุยกันเลยเป็นเวลาอย่างน้อย 8 ชั่วโมง ก็อตแมนจะให้คู่สมรสสนทนากันใน 3 ประเด็นคือ (1) เรื่องทั่วไปของวันนั้น (2) ความขัดแย้งในชีวิตสมรสของพวกเขา (3) เรื่องที่ทั้งคู่คิดว่ามีความสุขร่วมกัน จากนั้นอีก 4 ปี คณะวิจัยจะติดต่อคู่สมรสอีกครั้งเพื่อให้ตอบแบบสอบถามเรื่องความพึงพอใจในการใช้ชีวิตคู่ จากวีดีโอเทป นักวิจัยจะสังเกตการแสดงอารมณ์ความรู้สึก หรือสัญญาณต่าง ๆ ที่คู่สมรสได้แสดงไว้เปลี่ยนแต่ละประโยค และการแสดงทางสีหน้า ให้เป็นคะแนน โดยใช้ระบบ RCISS (Rapid Couples Interaction Scoring System) และ MICS (Marital Interaction Coding System) Gottman และคณะ (2002)

Gottman และ Silver (1999) แสดงให้เห็นว่าสิ่งที่จะบอกเป็นนัยว่าจะมีการหย่าร้างหรือไม่อยู่ที่วิธีการและท่าทางการโต้เถียงกันของคู่สมรส ได้แก่ การเริ่มต้นบทสนทนาด้วยความแข็งกร้าว การสื่อสารระหว่างกันในเชิงลบที่ก็อตแมนเรียกว่า "ทหารม้าทั้งสี่" (คือการวิจารณ์ การดูถูกเหยียบย่ำอีกฝ่าย การแก้ตัวหรือปกป้องตัวเอง การนิ่งเฉยและหันเหไปทางอื่น) ความล้มเหลวในความพยายามแก้สถานการณ์ การระลึกได้แต่เหตุการณ์ที่ทำให้ไม่มีความสุข

ก็อตแมน สรุปว่าบทสนทนาเรื่องปัญหาความขัดแย้งในชีวิตสมรส เป็นตัวบ่งชี้สำคัญที่ใช้ทำนายถึงความพึงพอใจของชีวิตคู่ เมื่อสอบถามคู่สมรสในอีก 4 ปีข้างหน้าได้

จากข้อมูล ก็อตแมนแบ่งคู่สมรสได้เป็น 5 แบบ คือ

(1) พวกผู้มีเหตุผล (validators) อารมณ์สงบ ใกล้ชิดสนิทสนม เคารพกัน ให้ความสำคัญกับการใช้ชีวิตคู่ แบ่งปันเพื่อให้มีส่วนร่วมในประสบการณ์ร่วมกัน ไม่ถือตนเองโดยลำพัง

(2) พวกอารมณ์เปลี่ยนแปลงง่าย (volatiles) ช่างฝัน เต็มไปด้วยความรู้สึกหลงใหล อาจมีการโต้เถียงกันรุนแรงแล้วกลับมาดีกันสลับไปมา

(3) พวกช่างหลบหลีก (avoiders) หลีกเลี่ยงการเผชิญหน้าเมื่อเกิดความขัดแย้ง มีการโต้ตอบกับเฉพาะเรื่องในเชิงบวก

(4) ตรงข้ามกัน (hostile) ฝ่ายหนึ่งหลีกเลี่ยงการเผชิญหน้า อีกฝ่ายเห็นด้วยเพราะอยากให้สงบ จึงไม่มีการสื่อสารใด ๆ

(5) ตรงข้ามกัน - สันโดษ (hostile-detached) ฝ่ายหนึ่งเป็นพวกอารมณ์เปลี่ยนแปลงง่าย พร้อมโต้แย้ง อีกฝ่ายไม่อยากให้เกิดปัญหาจึงสงบนิ่งไว้

สามแบบแรกจะมีชีวิตคู่ที่มีความเสี่ยงต่ำในการหย่าร้าง ส่วนสองแบบหลังมักจะเป็นกลุ่มที่มีความเสี่ยงต่อการการหย่าร้างสูง คะแนนจาก RCISS ชี้ว่าสามแบบแรกจะมีพฤติกรรมเชิงบวกมาก ส่วนสองแบบหลังจะมีพฤติกรรมเชิงลบมาก

งานวิจัยนี้ให้ข้อสังเกตสำคัญที่ต่างจากความเชื่อทั่วไปว่า คู่สมรสที่มีความสุขไม่ใช่คู่ที่มีความขัดแย้งกันน้อยที่สุด สิ่งสำคัญของความพึงพอใจในชีวิตคู่ไม่ใช่การทำให้ไม่มีการโต้เถียงขัดแย้งกัน หากอยู่ที่การตกลงใจกัน และสร้างสมดุลขึ้นด้วยพฤติกรรมที่สร้างอารมณ์เชิงบวก ถึงแม้ผลวิจัยจากคะแนน RCISS จะทำนายอนาคตของคู่สมรสได้ แต่ก็อตแมนก็ยังไม่เข้าใจว่าทำไมคะแนนเหล่านั้นถึงทำนายได้ เป้าหมายถัดไปของเขาก็คือ หาทฤษฎีบทที่จะอธิบายความสามารถของ RCISS ในการทำนายอนาคตของคู่สมรส

2. แบบจำลองสมการเชิงผลต่างไม่เชิงเส้นของการปฏิสัมพันธ์ของคู่สมรส

สมการที่จะใช้อธิบาย จะมีสมการของภรรยาและสามีเพื่ออธิบายพฤติกรรมของแต่ละคน ส่วนค่าของตัวแปรที่ใช้ คือค่าจากคะแนน RCISS ในการสนทนาจะมีการโต้ตอบระหว่างสามีและภรรยาสลับไปมา จึงกำหนดให้ตัวแปรเวลาเป็นจำนวนเต็ม t = 1, 2, 3,...คือจะนับเวลาเมื่อครั้งที่มีการเปลี่ยนผู้พูด เช่นภรรยาเริ่มพูดก่อน (W_1) เสร็จแล้วสามีโต้ตอบ (H_1) สลับเช่นนี้เรื่อย ๆ ถ้าให้ W_t คือคะแนนของภรรยา เมื่อคราวที่พูด t และ H_t คือคะแนนของสามี เมื่อคราวที่พูด t ถ้าพูดสลับกันโดยภรรยาเริ่มก่อนจะมีลำดับการพูดเป็น $W_1, H_1, W_2, H_2, W_3, H_3, \ldots$

การสนทนาโต้ตอบกันของคู่สมรสนั้น คำพูดของฝ่ายหนึ่งย่อมมีอิทธิพลต่อการตอบกลับของอีกฝ่าย ก็อตแมนจึงวิเคราะห์ถึงสิ่งกระตุ้นที่อยู่เบื้องหลังพฤติกรรมของผู้พูด การแสดงออกไม่ว่าเชิงบวกหรือลบในการโต้ตอบกันเป็นผลมาจากสองสิ่งคือ (1) อิทธิพลที่แต่ละฝ่ายมีต่อกันและ (2) อารมณ์ของแต่ละคน กล่าวอีกนัยหนึ่งว่า การแสดงออกของพฤติกรรมสามารถแบ่งได้เป็นสองส่วนคือส่วนที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของคู่สนทนา จะเรียกว่าส่วนที่ถูกชักจูงและส่วนที่เป็นอิสระไม่ถูกชักจูงโดยคู่สนทนา การสร้างแบบจำลองจะต้องเปลี่ยนสองส่วนนี้เป็นแนวคิดทางคณิตศาสตร์และเชื่อมเข้าด้วยกันในสมการที่จะสร้างเป็นฟังก์ชัน

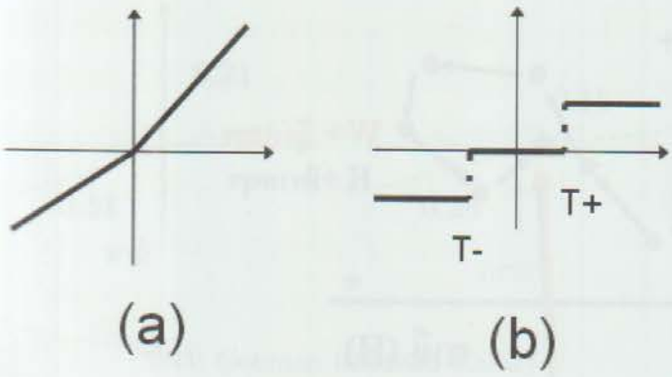
พฤติกรรมที่ไม่ถูกชักจูงโดยคู่สนทนา

ณ สถานการณ์เดียวกัน ถ้าอยู่เพียงลำพัง แต่ละคนจะมีอารมณ์และความรู้สึกต่างกัน บางคนในทางบวก บางคนในทางลบ เราจะเรียกสภาวะนี้ว่า สถานะคงตัว (steady state) ที่ไม่ถูกชักจูง แต่ละคนจะมีความรู้สึกกลับเข้าสู่สถานะนี้หลังจากเวลาผ่านไประยะหนึ่ง โดยไม่เกี่ยวกับว่าจะมีอะไรทำให้เศร้า หรือมีความสุขก่อนหน้านี้ วิธีที่ง่ายที่สุดที่จะอธิบายปริมาณของเทอมนี้คือใช้ความสัมพันธ์ เชิงเส้น $P_{t+1} = rP_t + a$ โดย P_t คือคะแนนจาก RCISS เมื่อพูดครั้งที่ t a คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับบุคคล และ r คืออัตราในการกลับคืนสู่สภาวะคงตัวที่ไม่ถูกชักจูง เราเรียกภาวะนี้ว่าสถานะคงตัวของอารมณ์ ค่า r นี้เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงความเฉื่อยทางอารมณ์ มีค่าเป็นได้ทั้งบวกและลบ คนที่มีค่าความเฉื่อยทางอารมณ์มากจะสามารถอยู่ในสภาวะทางอารมณ์หนึ่งได้ยาวนานกว่าคนที่มีค่าความเฉื่อยทางอารมณ์น้อย

ฟังก์ชันการชักจูง คือฟังก์ชันที่ใช้อธิบายการมีผลกระทบซึ่งกันและกันของคู่สมรส ฟังก์ชันการชักจูงของสามี แสดงอิทธิพลที่สามีมีต่อภรรยา พารามิเตอร์ในฟังก์ชันนี้แปรเปลี่ยนไปตามวัฒนธรรม ความพึงพอใจในชีวิตคู่ ระดับความตึงเครียดของของคู่สมรสขณะนั้น รวมถึงอารมณ์ของแต่ละคนด้วย ตัวอย่างของฟังก์ชันการชักจูงเช่น ฟังก์ชันเชิงเส้นที่มีสองความชันและฟังก์ชันขั้นบันได

ฟังก์ชันเชิงเส้นที่มีสองความชัน (รูป 1a) มีสมมติฐานคือพฤติกรรมเชิงบวก มีผลในการชักจูงทางบวก (ทำนองเดียวกันในเชิงลบ) ความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นแต่มีความชันต่างกันในแต่ละครึ่งซีกของกราฟ อธิบายได้ว่า ถ้าตัวแปรนั้นมีค่าในเชิงลบมาก ก็จะมีผลชักจูงไปในทางลบมากด้วย (ทำนองเดียวกันในเชิงบวก) ส่วนฟังก์ชันขั้นบันได (รูป 1b) มีสมมติฐานว่า หลังจากผ่านค่าที่เรียกว่า ค่า threshold (T_+ และ T_-) แล้ว พฤติกรรมเชิงบวกจะชักจูงพฤติกรรมเชิงบวก และเชิงลบชักจูงพฤติกรรมเชิงลบ คนที่มีลักษณะเป็นคนที่คอยตอบสนองอย่างเดียว (reactive) จะมีค่า threshold ต่ำ

ปริมาณการมีอิทธิพลต่ออีกฝ่ายจะคงที่เมื่อผ่านค่า threshold เช่นถ้าเป็นฟังก์ชันการชักจูงของสามี ค่า threshold นี้จะแสดงว่าสามีจะแสดงอิทธิพลเชิงลบมากขนาดไหนถึงจะมีอิทธิพลต่อภรรยา (T_-) หรือต้องแสดงอิทธิพลเชิงบวกมากขนาดไหน (T_+)



รูปที่ 1 ฟังก์ชันการชักจูง (a) ฟังก์ชันเชิงเส้นที่มีสองความชัน (b) ฟังก์ชันขั้นบันได

ถ้าค่าของฟังก์ชันการชักจูงเป็นศูนย์จะหมายถึงการไม่มีอิทธิพลต่ออีกฝ่ายหนึ่ง อาจนำฟังก์ชันสองแบบข้างต้นมารวมกันเป็นฟังก์ชันใหม่ได้ ฟังก์ชันการชักจูงที่แทนด้วย $I_{AB}(A_t)$ หมายถึงอิทธิพลของ A ที่พูดเมื่อครั้งที่ t ต่อ B ที่พูดเมื่อครั้งที่ $t+1$ ดังนั้นจึงมีฟังก์ชันการชักจูงของสามีและของภรรยาแยกกัน

สมการแสดงแบบจำลอง

สรุปสมมติฐานสำคัญที่ใช้สร้างแบบจำลอง

1. ให้ภรรยาพูดก่อน ทำให้มีความไม่สมมาตรในสมการของสามีและภรรยา คะแนนใหม่ของภรรยา W_{t+1} ได้จากการใช้ค่า W_t และ H_t ดูจาก (1a) ส่วนสามี H_{t+1} ได้จาก W_{t+1} และ H_t ดูจาก (1b)

2. คะแนนที่ได้ใหม่ของแต่ละสมการได้จากการใช้คะแนนก่อนหน้านี้สองส่วนคือจากส่วนของตนและของคู่สมรส แต่ละส่วนสร้างมาแยกกันแต่ก็นำมารวมกันได้

3. เมื่อคะแนน RCISS มีขนาดเท่ากันแต่เครื่องหมายต่างกัน ฟังก์ชันการชักจูงจะมีค่าเป็นศูนย์

4. การสนทนาจะไม่เป็นแบบสุ่ม แต่ละคนจะไม่เปลี่ยนลักษณะการโต้ตอบซึ่งกันและกันไม่นอกเรื่อง

5. พฤติกรรมที่ไม่ถูกชักจูงและฟังก์ชันการชักจูง ของแต่ละคนจะแตกต่างกันไป

จากสมมติฐานที่กล่าวมาจึงเขียนสมการของแบบจำลองได้ดังนี้

คะแนนของภรรยาเมื่อเวลาใหม่

= อิทธิพลของสามีที่มีต่อภรรยา
+ คะแนนของภรรยาเมื่อคราวก่อน
+ ค่าคงที่คะแนนของสามีเมื่อเวลาใหม่
= อิทธิพลของภรรยาที่มีต่อสามี
+ คะแนนของสามีเมื่อคราวก่อน
+ ค่าคงที่

หรือ

$$W_{t+1} = I_{HW}(H_t) + r_W W_t + a \qquad (1a)$$

$$H_{t+1} = I_{WH}(W_{t+1}) + r_H W_t + b \qquad (1b)$$

การหาค่าพารามิเตอร์เมื่อไม่มีพฤติกรรมการชักจูง

เมื่อไม่มีพฤติกรรมการชักจูง $I_{HW} = 0$ และ $I_{WH} = 0$ จะได้สมการ

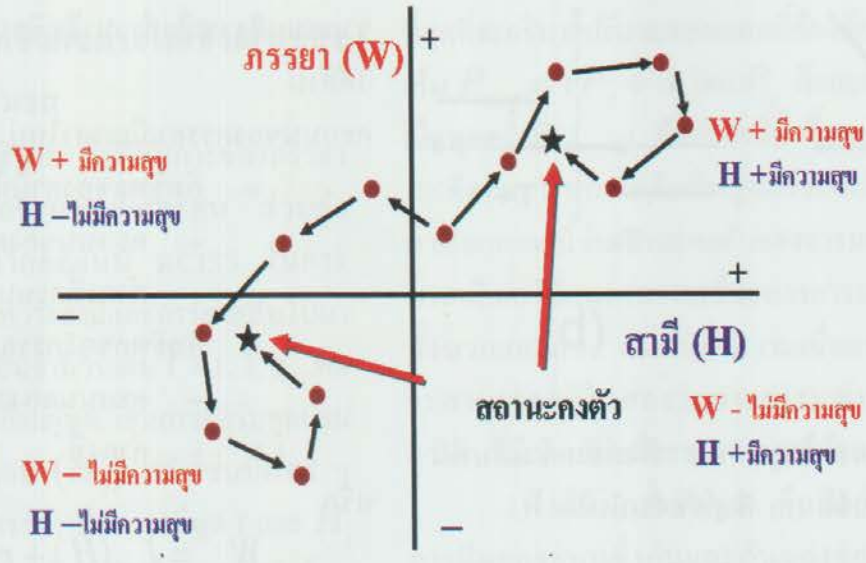
$$W_{t+1} = r_W W_t + a \qquad (2a)$$

$$H_{t+1} = r_H W_t + b \qquad (2b)$$

จะพิจารณาข้อมูลคู่คะแนน (W_i, H_i) ที่ฝ่ายหนึ่งมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งโดยทั่วไปข้อมูลที่บันทึกไว้ของคู่สมรสหนึ่งจะมีข้อมูลประเภทนี้ประมาณ 15% แล้วใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดกับข้อมูลชุดนี้เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของแต่ละคนออกมาคือ r_W a และ r_H b จากนั้นหาสถานะคงตัวเมื่อไม่มีพฤติกรรมการชักจูง $(W_{t+1} = W_t)$ ได้เป็น

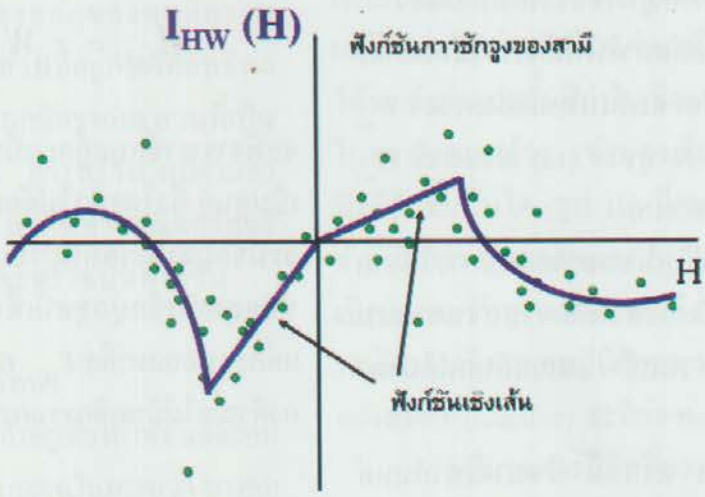
$$W_u = \frac{a}{1 - r_W} \text{ และ } H_u = \frac{b}{1 - r_H}$$

สามารถแสดงความสัมพันธ์ของคู่สมรสโดยใช้ข้อมูลคะแนน RCISS ในระบบพิกัด xy โดยให้แกน x คือคะแนนของภรรยา และแกน y คือคะแนนของสามี โดยจุดที่เห็นคือข้อมูล (W_i, H_i) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของคู่สมรส ที่มา: Murray (2004)

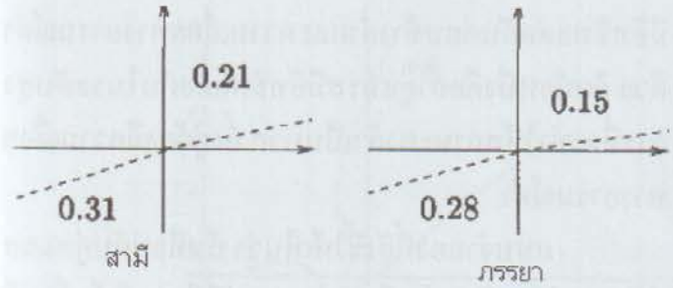
งานวิจัยของก็อตแมนได้ศึกษารูปแบบฟังก์ชันการชักจูง โดยใช้ฟังก์ชันเชิงเส้นที่มีสองความชันกับข้อมูลของคู่สมรส ดังนี้คือ ใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดเพื่อการประมาณจากข้อมูล (จุดในรูปที่ 3 คือข้อมูล) แล้วคำนวณความชันของฟังก์ชัน ก็จะได้รูปแบบฟังก์ชันการชักจูง จะใช้แกน x แสดงคะแนนของสามีหรือภรรยา แกน y เป็นค่าของฟังก์ชันการชักจูง



รูปที่ 3 การประมาณฟังก์ชันการชักจูงโดยใช้ฟังก์ชันเชิงเส้นที่มีสองความชัน ที่มา: Murray (2004)

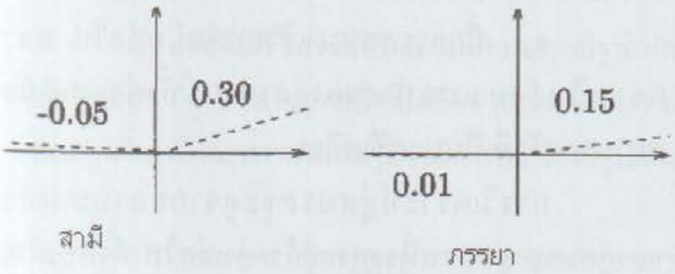
เมื่อหารูปแบบของฟังก์ชันการชักจูงตามที่อธิบายข้างต้น จะได้ว่า เมื่อทั้งสามีและภรรยามีฟังก์ชันการชักจูงประเภทเดียวกันจะได้ดังนี้

1. พวกผู้มีเหตุผล (validators) แต่ละคนในคู่ที่เป็นพวกมีเหตุผลจะมีอิทธิพลต่อฝ่ายตรงข้าม ดังนั้นถ้าฝ่ายหนึ่งมีพฤติกรรมเชิงลบ จะมีอิทธิพลในเชิงลบต่ออีกฝ่าย ทำนองเดียวกันกับพฤติกรรมเชิงบวก กราฟจึงเป็นเส้นตรงแต่ความชันในช่วงบวกและลบต่างกันได้ ตัวอย่างแสดงดังรูป



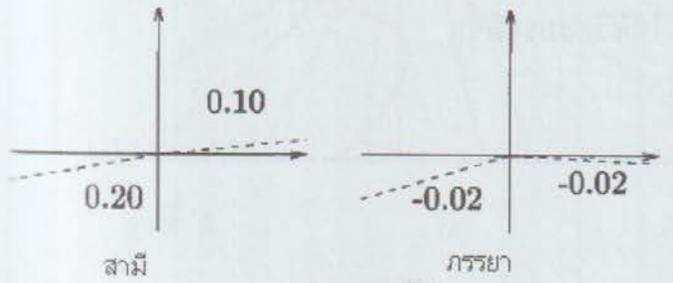
ที่มา: Gottman และคณะ (2002)

2. พวกช่างหลบหลีก (avoiders) คู่นี้มีอิทธิพลต่อกันเฉพาะพฤติกรรมเชิงบวก แต่พฤติกรรมเชิงลบจะมีอิทธิพลน้อยมากหรือไม่มีเลย จึงมีความชันค่อนข้างแบนราบในช่วงคะแนนที่เป็นลบ



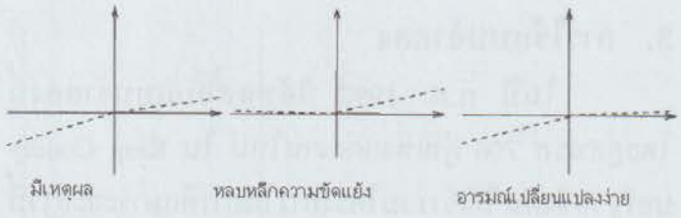
ที่มา: Gottman และคณะ (2002)

3. พวกอารมณ์เปลี่ยนแปลงง่าย (volatiles) ฟังก์ชันการชักจูงของพวกอารมณ์เปลี่ยนแปลงง่ายจะตรงข้ามกับพวกช่างหลบหลีก แต่ละฝ่ายจะมีอิทธิพลต่อกันในเชิงลบและในช่วงคะแนนที่เป็นบวกความชันมีค่าใกล้ศูนย์



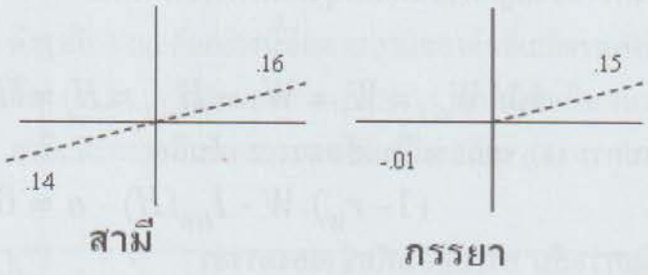
ที่มา: Gottman และคณะ (2002)

สรุปรูปแบบของฟังก์ชันการชักจูง 3 ประเภทข้างต้น



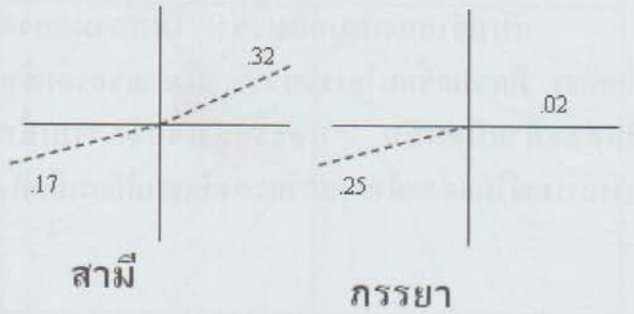
ที่มา: Gottman และคณะ (2002)

สำหรับคู่สมรสที่ฟังก์ชันไม่ได้เป็นแบบเดียวกันก็จะได้ฟังก์ชันที่เป็นลักษณะต่างกันตามสามแบบขั้นต้น จากข้อมูลจะพบ 2 แบบ คือ สามีเป็นพวกมีเหตุผล-ภรรยาเป็นพวกหลบหลีกความขัดแย้ง



ที่มา: Gottman และคณะ (2002)

และ สามีเป็นพวกมีเหตุผล-ภรรยาเป็นอารมณ์เปลี่ยนแปลงง่าย



ที่มา: Gottman และคณะ. (2002)

เป็นที่น่าสังเกตว่าไม่มีคู่สมรสต่างรูปแบบในลักษณะอื่น เช่นพวกอารมณ์เปลี่ยนแปลงง่ายกับพวกหลบหลีกความขัดแย้ง อาจจะเป็นไปได้ว่าทั้งคู่มีความแตกต่างกันมากจนความสัมพันธ์นั้นไม่อยู่รอดจนถึงขั้นแต่งงาน

3. การใช้แบบจำลอง

ในปี ค.ศ. 1992 ได้ทดสอบแบบจำลองนี้ โดยคู่สมรส 700 คู่ที่เพิ่งแต่งงานใหม่ ใน King County มลรัฐวอชิงตัน ได้เข้าร่วมโครงการในการศึกษาระยะยาวนี้ ทีมวิจัยจะวิเคราะห์และทำนายชีวิตคู่ดังนี้ (1) หย่าร้าง (2) ยังคงใช้ชีวิตคู่และมีความสุข (3) ยังคงใช้ชีวิตคู่แต่ไม่มีความสุข

ทุก ๆ 1-2 ปี เป็นเวลา 12 ปี จะให้สามีและภรรยากรอกแบบสอบถามเรื่องความพึงพอใจในการใช้ชีวิตคู่ (แยกกันกรอก) แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับที่ทำนายไว้ การทำนายว่าคู่ไหนจะหย่าร้างกัน (ภายใน 4 ปี) นั้นมีความแม่นยำถึง 94% บางคู่ที่ถูกทำนายว่ายังคงใช้ชีวิตคู่แต่ไม่มีความสุขก็มีการหย่าร้างด้วย

ถ้าให้ $W_{t+1} = W_t = W$ และ $H_{t+1} = H_t = H$ สมการ (1) จะกลายเป็นเส้นตรง 2 เส้นคือ

$$(1- r_W)\ W - I_{HW}(H) - a = 0$$

เรียกว่าเส้น การปฏิสัมพันธ์ ของภรรยา

และ $(1- r_H)\ H - I_{WH}(W) - b = 0$ เรียกว่าเส้นการปฏิสัมพันธ์ของสามี

จุดตัดของสองเส้นนี้คือ สถานะคงตัวเมื่อมีการชักจูง แทนด้วย (W^*, H^*)

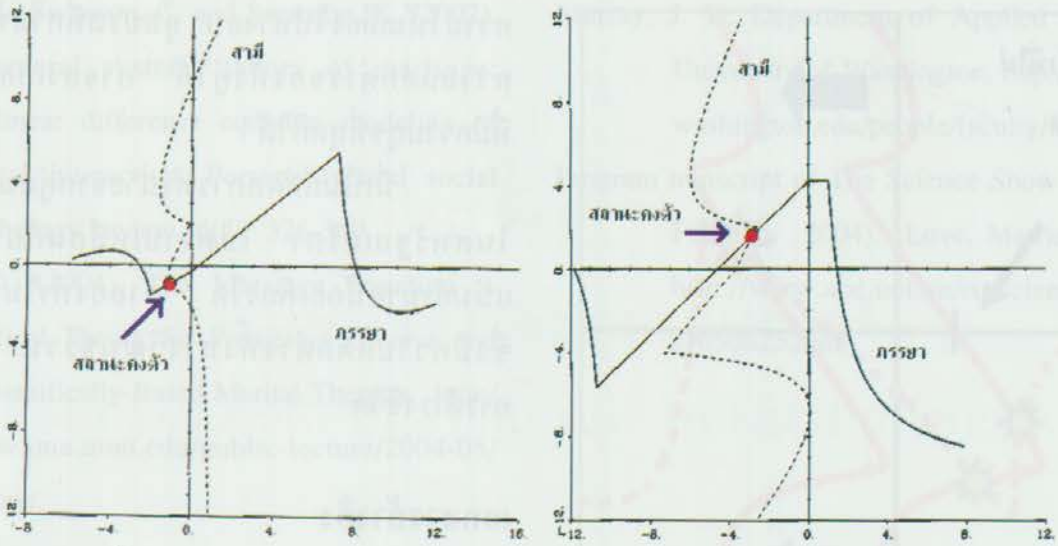
แบบจำลองเสนอแนะว่า ในสถานะคงตัวที่เสถียร มีความเชื่อมโยงระหว่าง ปริมาณของอิทธิพลที่แต่ละฝ่ายมีต่อกัน และระดับของความเฉื่อยทางอารมณ์ในแต่ละฝ่าย สถานะคงตัวจะเสถียรเมื่อทั้งคู่มีอิทธิพลต่อกันค่อนข้างต่ำและความเฉื่อยทางอารมณ์ต่ำด้วย อีกนัยหนึ่งคือถ้าคู่สมรสมีอิทธิพลต่อกันในระดับสูง การที่จะทำให้สถานะคงตัวเป็นบวก ทั้งคู่ต้องมีความเฉื่อยทางอารมณ์ต่ำ

แบบจำลองนี้ยังชี้ให้เห็นว่า ถ้าเทียบกับคู่สมรสที่ยังคงอยู่ร่วมกันอย่างมีความสุข คู่ที่มีแนวโน้มที่จะมีการหย่าร้างจะมีลักษณะดังนี้คือ

1. มีความเฉื่อยทางอารมณ์มากกว่า (ความเฉื่อยทางอารมณ์ของแต่ละคน คือค่า r ในสมการ 1 และ 2)
2. ถึงแม้ไม่มีพฤติกรรมการชักจูง ก็มีคะแนนในเชิงลบมาก
3. เมื่อเริ่มการสนทนาทั้งคู่จะมีอิทธิพลในเชิงลบต่อกันมากกว่าเชิงบวก
4. เมื่อการสนทนาเชิงลบดำเนินต่อไป และกลายเป็นลักษณะเฉพาะของคู่สมรส ทั้งคู่จะสูญเสียสถานะคงตัวที่เป็นบวกที่เสถียร

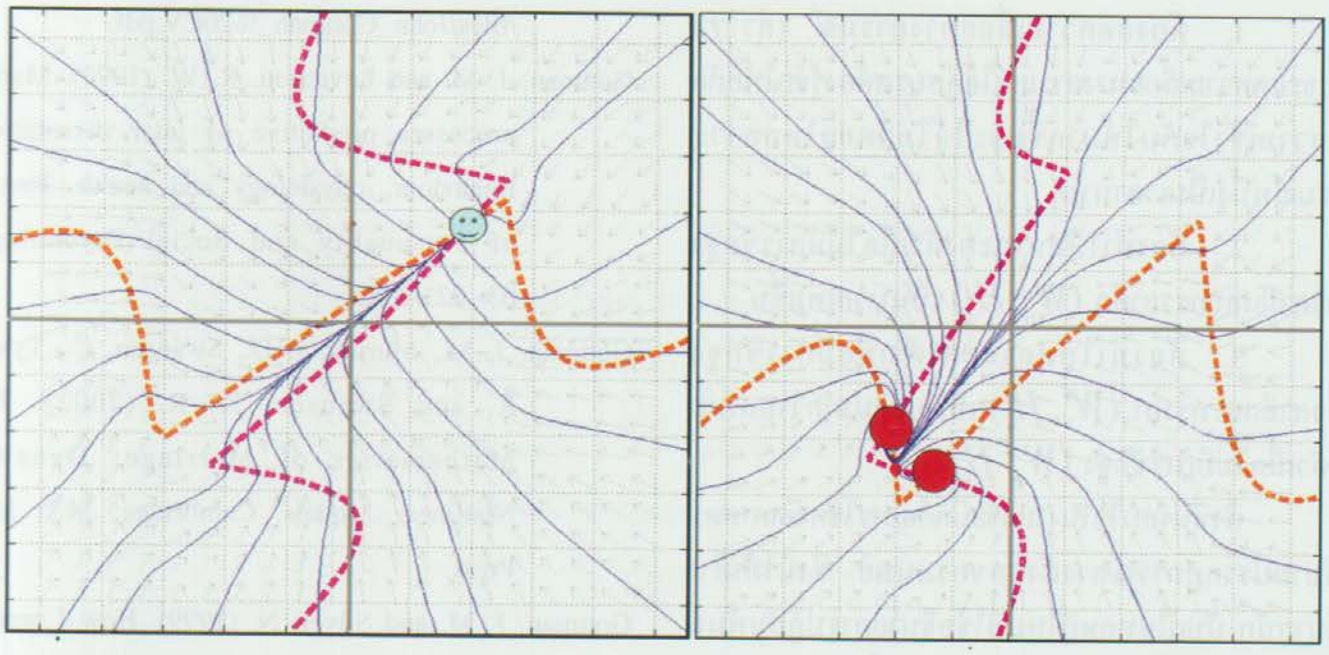
การวิเคราะห์คู่สมรสจะดูจากสถานะคงตัวของคู่สมรส คู่สมรสที่จะคงอยู่ด้วยกันต่อไป ทั้งสองฝ่ายควรต้องมีความสุขในการใช้ชีวิตคู่ นั่นคือสถานะคงตัวที่เสถียร ควรอยู่ในจตุภาคที่ 1

ตัวอย่างคู่สมรสในรูปที่ 4 เส้นประคือสมการของสามี (1b) เส้นทึบคือสมการของภรรยา (1a) รูปที่ 4(a) มีสถานะคงตัว (-.89,-1.06) มีค่าลบทั้งสามีและภรรยา แสดงว่าทั้งคู่ต่างก็ไม่มีความสุขเมื่ออยู่ร่วมกัน คู่นี้มีโอกาสที่จะหย่าร้างสูง ส่วนคู่สมรสรูปที่ 4(b) มีสถานะคงตัว (-2.84, 1.6) คู่นี้ควรได้รับการบำบัดเพื่อให้ชีวิตสมรสดีขึ้น



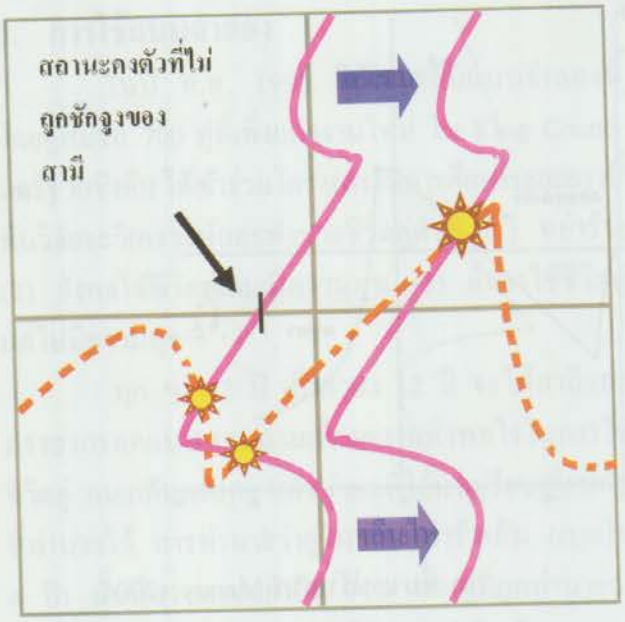
รูปที่ 4 (a) (b) ที่มา: ปรับจาก Murray (2004)

คู่สมรสที่มีชีวิตร่วมกันอย่างมีความสุขมีรูปเฟสดังในรูปที่ 5 (a) มีสถานะคงตัวที่เสถียร (3.78, 3.40) คือมีค่าบวกทั้งสามีและภรรยาส่วนคู่ที่จะมีการหย่าร้างมีรูปเฟสดังรูปที่ 5 (b) ตัวอย่างนี้มีสองสถานะคงตัวที่เสถียรสองจุด คือ (-4.24, -3.58) และ (-2.82, -5.28) มีค่าเป็นลบทั้งสามีและภรรยา และสถานะคงตัวที่ไม่เสถียร (-4.01, -5.09)



รูปที่ 5 (a) (b) ที่มา: ปรับจาก Murray (2004)

สามารถออกแบบการบำบัดคู่สมรสในรูปที่ 5(b) โดยการเพิ่มสถานะคงตัวของสามีเมื่อไม่มีการชักจูง H_u ให้มีค่าเป็นบวก ดูรูปที่ 6 จะเห็นว่าเมื่อกราฟเส้นทึบเลื่อนขนานไปด้านขวา ทำให้เกิดจุดตัดระหว่างเส้นประและเส้นทึบเพียงจุดเดียว จุดตัดนั้นคือสถานะคงตัวใหม่ที่มีการชักจูง เลื่อนไปอยู่ในจตุภาคที่ 1 (ทั้งคู่มีค่าเป็นบวก)



รูปที่ 6 เส้นทึบคือฟังก์ชันของสามี เส้นประคือฟังก์ชันของภรรยา ที่มา: Murray (2004)

สรุปข้อแนะนำที่ได้สำหรับคู่สมรสเมื่อมีการนำคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์คือ

1. ต้องลดความเฉื่อยทางอารมณ์ (ค่า r) การจะลดความเฉื่อยทางอารมณ์ได้คู่สมรสต้องรู้จักให้อภัย ทำความเข้าใจกันให้มากขึ้นจะได้ไม่ติดอยู่ในสภาวะอารมณ์หนึ่งเป็นเวลานาน

2. ต้องทำให้สถานะคงตัวเมื่อไม่มีการชักจูงของสามีและภรรยาคือ (W_u, H_u) เป็นบวกเพิ่มขึ้น

3. ต้องทำให้สถานะคงตัวเมื่อมีการชักจูงของสามีและภรรยา (W^*, H^*) เป็นบวกมากกว่าสถานะคงตัวเมื่อไม่มีการชักจูง (W_u, H_u)

สิ่งที่น่าสนใจในงานวิจัยนี้ก็คือการใช้คณิตศาสตร์อธิบายปรากฏการณ์ทางสังคมของมนุษย์ ซึ่งมีให้เห็นไม่มากนัก นับเป็นทฤษฎีใหม่ที่ใช้อธิบายการปฏิสัมพันธ์ของคู่สมรส ซึ่งไม่ใช่แค่ทำนายความยั่งยืนของชีวิตคู่ แต่ได้แสดงกลไกการทำนายด้วย

การที่คู่สมรสถูกจัดประเภทให้อยู่ในรูปแบบหนึ่งก็ไม่ได้หมายความว่า จะเป็นแบบนั้นตลอดไป การที่รู้จักปัญหาและเรียนรู้การจัดการกับมันนั้นเป็นกุญแจสำคัญที่จะเปลี่ยนความสัมพันธ์ที่คลอนแคลนให้กลายเป็นความสัมพันธ์ที่มั่นคงได้ แต่ละฝ่ายต้องเอาชนะความโน้มเอียงไปทางลบ คู่สมรสที่สามารถจัดการกับความแตกต่างของทั้งคู่ได้ อาจลงเอยเป็นคู่สมรสที่มีความสุขที่สุดก็ได้

นี่เป็นแค่ผลการทำนายจากคู่สมรส 700 คู่ในสหรัฐอเมริกา ไม่ทราบเหมือนกันว่าจะมีความแม่นยำมากน้อยเพียงใด ถ้าลองทำในประเทศไทยซึ่งมีความแตกต่างทั้งทางวัฒนธรรม สังคมและการดำรงชีวิต

เอกสารอ้างอิง

Cook, J., Tyson, R., White, J., Rushe, R., Gottman, J. M. and Murray, J. D. (1995).The mathematics of marital conflict: Qualitative dynamic mathematical modeling of marital interaction. Journal of Family Psychology. 9:110-130

Gottman, J. M. Curriculum vitae http://www.gottman.com /files/John_Gottman_%20CV.pdf.

Gottman, J. M. and Levenson, R. W. (1992). Marital processes predictive of later dissolution: Behaviour, physiology and health. Journal of Personality and Social Psychology. 63: 221-233.

Gottman, J. M., Murray, J. D., Swanson, C., Tyson, R. and Swanson, K. R. (2002). The Mathematics of Marriage: Dynamic Nonlinear Models. Cambridge: MA: MIT Press.

Gottman, J. M. and Silver, N. (1999). How I predict divorce, in The Seven Principles for Making Marriages Work. New York: Three Rivers Press (Random House, Inc.). pp. 25-46.

Gottman, J. M., Swason, C. and Murray, J. D. (1999). The mathematics of marital conflict: Dynamic mathematical nonlinear modeling of newlywed marital interaction. Journal of Personality and Social Psychology. 67: 3-19.

Gottman, J. M., Swanson, C. and Swanson, K. (2002). A general systems theory of marriage: Nonlinear difference equation modeling of marital interaction. Personality and social psychology review. 6(4): 326-340.

Murray, J. D. (2004). The Marriage Equation A Practical Theory for Predicting Divorce and a Scientifically-Based Marital Therapy. http://www.ima.umn.edu/public-lecture/2004-05/murray/.

Murray, J. D. Department of Applied Mathematics, University of Washington. http://www.amath.washington.edu/people/faculty/murray.

Program transcript of The Science Show (Saturday 21 February 2004). Love, Marriage & Maths. http://www.abc.net.au/rn/science/ss/stories/s1050825.htm.

ว.วิทย. มข. 38(1) 16-24 (2553) KKU Sci. J.38(1) 16-24 (2010)

ตัวกำหนดของตัวเลขในปฏิทิน

Determinant of Numbers in the Calendar

กมลรัตน์ แนมมณี[1]

ระบบปฏิทินที่เราใช้อยู่ในทุกวันนี้เรียกว่า **ระบบปฏิทินเกรกอเรียน** (Gregorian calendar) ซึ่งเป็นปฏิทินที่มีความคลาดเคลื่อนจากความจริงทางดาราศาสตร์น้อยที่สุด จากการศึกษาสมบัติของตัวเลขที่ปรากฏในปฏิทินพบว่ามีสมบัติที่น่าสนใจหลายประการ สมบัติที่น่าสนใจประการหนึ่งซึ่งผู้เขียนจะกล่าวถึงในบทความนี้ คือ ตัวกำหนดของตัวเลขที่ปรากฏในปฏิทิน

พิจารณาตัวเลขที่อยู่ติดกัน 3 แถว 3 หลัก ในปฏิทินต่อไปนี้

มกราคม 2552						
Sun	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31

จะเห็นว่าตัวเลขในแต่ละชุดสามารถเขียนแทนได้ด้วยเมทริกซ์ ซึ่งในที่นี้เราจะกำหนดให้

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 8 & 9 & 10 \\ 15 & 16 & 17 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 \\ 11 & 12 & 13 \\ 18 & 19 & 20 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 12 & 13 & 14 \\ 19 & 20 & 21 \\ 26 & 27 & 28 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 14 & 15 & 16 \\ 21 & 22 & 23 \\ 28 & 29 & 30 \end{bmatrix}$$

[1] สาขาวิชาคณิตศาสตร์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนเรศวร พะเยา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา 56000
E-mail: kamonratn@nu.ac.th

เราสามารถหาตัวกำหนดของเมทริกซ์ A, B, C และ D ได้ดังนี้

$$\det A = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 8 & 9 & 10 \\ 15 & 16 & 17 \end{vmatrix}$$

$$= [(1)(9)(17) + (2)(10)(15) + (3)(8)(16)] - [(15)(9)(3) + (16)(10)(1) + (17)(8)(2)]$$

$$= (153 + 300 + 384) - (405 + 160 + 272)$$

$$= 837 - 837$$

$$= 0$$

$$\det B = \begin{vmatrix} 4 & 5 & 6 \\ 11 & 12 & 13 \\ 18 & 19 & 20 \end{vmatrix}$$

$$= [(4)(12)(20) + (5)(13)(18) + (6)(11)(19)] - [(18)(12)(6) + (19)(13)(4) + (20)(11)(5)]$$

$$= (960 + 1,170 + 1,254) - (1,296 + 988 + 1,100)$$

$$= 3,384 - 3,384$$

$$= 0$$

$$\det C = \begin{vmatrix} 12 & 13 & 14 \\ 19 & 20 & 21 \\ 26 & 27 & 28 \end{vmatrix}$$

$$= [(12)(20)(28) + (13)(21)(26) + (14)(19)(27)] - [(26)(20)(14) + (27)(21)(12) + (28)(19)(13)]$$

$$= (6,720 + 7,098 + 7,182) - (7,280 + 6,804 + 6,916)$$

$$= 21,000 - 21,000$$

$$= 0$$

$$\det D = \begin{vmatrix} 14 & 15 & 16 \\ 21 & 22 & 23 \\ 28 & 29 & 30 \end{vmatrix}$$

$$= [(14)(22)(30) + (15)(23)(28) + (16)(21)(29)] - [(28)(22)(16) + (29)(23)(14) + (30)(21)(15)]$$

$$= (9,240 + 9,660 + 9,744) - (9,856 + 9,338 + 9,450)$$

$$= 28,644 - 28,644$$

$$= 0$$

จะพบว่าตัวกำหนดของเมทริกซ์ A, B, C และ D มีค่าเท่ากับ 0

ก่อนที่เราจะพิจารณากรณีทั่วไปของตัวกำหนดของตัวเลขที่อยู่ติดกัน 3 แถว 3 หลักใดๆ ในปฏิทิน จะขอกล่าวถึงบทตั้งที่จำเป็นดังต่อไปนี้

บทตั้ง 1 ให้ A, B และ C เป็นเมทริกซ์ขนาด n×n ที่มีสมาชิกเหมือนกันทุกตัวยกเว้นหลัก (แถว) ที่ k ถ้าหลัก (แถว)ที่ k ของ A เป็นผลบวกของหลัก (แถว) ที่ k ของ B กับ C แล้วจะได้ว่า det A = det B + det C (Anton, 2005)

ต่อไปเราจะพิจารณากรณีทั่วไปของตัวกำหนดของตัวเลขที่อยู่ติดกัน 3 แถว 3 หลักใดๆ ในปฏิทิน

สมมติให้ A เป็นเมทริกซ์ ซึ่งมีสมาชิกเป็นตัวเลขที่อยู่ติดกัน 3 แถว 3 หลักใดๆ ในปฏิทิน โดยมี a เป็นสมาชิกที่น้อยที่สุด

จะได้ว่า $A = \begin{bmatrix} a & a+1 & a+2 \\ a+7 & a+8 & a+9 \\ a+14 & a+15 & a+16 \end{bmatrix}$

หาตัวกำหนดของ A ได้ดังนี้

$$\det A = \begin{vmatrix} a & a+1 & a+2 \\ a+7 & a+8 & a+9 \\ a+14 & a+15 & a+16 \end{vmatrix}$$

$$= \begin{vmatrix} a & a+1 & a+2 \\ a & a+8 & a+9 \\ a & a+15 & a+16 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & a+1 & a+2 \\ 7 & a+8 & a+9 \\ 14 & a+15 & a+16 \end{vmatrix} \quad \text{โดยบทตั้ง 1}$$

$$= \begin{vmatrix} a & a & a+2 \\ a & a & a+9 \\ a & a & a+16 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a & 1 & a+2 \\ a & 8 & a+9 \\ a & 15 & a+16 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & a+1 & a+2 \\ 7 & a+1 & a+9 \\ 14 & a+1 & a+16 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 0 & a+2 \\ 7 & 7 & a+9 \\ 14 & 14 & a+16 \end{vmatrix}$$

เนื่องจากตัวกำหนดของเมทริกซ์ที่มีแถวหรือหลักเหมือนกันอย่างน้อย 1 คู่ มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้น

$$\det A = \begin{vmatrix} a & 1 & a+2 \\ a & 8 & a+9 \\ a & 15 & a+16 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & a+1 & a+2 \\ 7 & a+1 & a+9 \\ 14 & a+1 & a+16 \end{vmatrix}$$

$$= \begin{vmatrix} a & 1 & a+1 \\ a & 8 & a+1 \\ a & 15 & a+1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a & 1 & 1 \\ a & 8 & 8 \\ a & 15 & 15 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & a+1 & a+2 \\ 7 & a+1 & a+2 \\ 14 & a+1 & a+2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & a+1 & 0 \\ 7 & a+1 & 7 \\ 14 & a+1 & 14 \end{vmatrix}$$

$$= 0$$

แสดงว่าตัวกำหนดของตัวเลขที่อยู่ติดกัน 3 แถว 3 หลักใดๆ ในปฏิทิน มีค่าเท่ากับ 0

จากการพิจารณาตัวเลขที่อยู่ติดกัน 3 แถว 3 หลักใด ๆ ในปฏิทิน เราจะพบว่าสมาชิกในแต่ละแถว (หลัก) เป็นลำดับเลขคณิต ซึ่งทฤษฎีบทต่อไปนี้ทำให้เราได้ข้อสรุปตามมาว่า ถ้า A เป็นเมทริกซ์ขนาด 3×3 ซึ่งมีสมาชิกในแต่ละแถวเป็นลำดับเลขคณิต แล้ว det A = 0

ทฤษฎีบท 1 ให้ A เป็นเมทริกซ์ขนาด 3×3 ถ้าสมาชิกในแต่ละแถวเป็นลำดับเลขคณิต แล้ว det A = 0

พิสูจน์ ให้ A เป็นเมทริกซ์ขนาด 3×3 ซึ่งมีสมาชิกในแต่ละแถวเป็นลำดับเลขคณิต

จะได้ว่า $\begin{bmatrix} a_{11} & a_{11}+c_1 & a_{11}+2c_1 \\ a_{21} & a_{21}+c_2 & a_{21}+2c_2 \\ a_{31} & a_{31}+c_3 & a_{31}+2c_3 \end{bmatrix}$ เมื่อ c_1, c_2, c_3 เป็นค่าคงตัวใดๆ

เราสามารถหา det A ได้ดังนี้

$$\det A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{11}+c_1 & a_{11}+2c_1 \\ a_{21} & a_{21}+c_2 & a_{21}+2c_2 \\ a_{31} & a_{31}+c_3 & a_{31}+2c_3 \end{vmatrix}$$

$$= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{11} & a_{11}+2c_1 \\ a_{21} & a_{21} & a_{21}+2c_2 \\ a_{31} & a_{31} & a_{31}+2c_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11} & c_1 & a_{11}+2c_1 \\ a_{21} & c_2 & a_{21}+2c_2 \\ a_{31} & c_3 & a_{31}+2c_3 \end{vmatrix} \quad \text{โดยบทตั้ง 1}$$

$$= 0 + \begin{vmatrix} a_{11} & c_1 & a_{11}+2c_1 \\ a_{21} & c_2 & a_{21}+2c_2 \\ a_{31} & c_3 & a_{31}+2c_3 \end{vmatrix}$$

$$= \begin{vmatrix} a_{11} & c_1 & a_{11} \\ a_{21} & c_2 & a_{21} \\ a_{31} & c_3 & a_{31} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11} & c_1 & 2c_1 \\ a_{21} & c_2 & 2c_2 \\ a_{31} & c_3 & 2c_3 \end{vmatrix}$$

$$= 0 + 0 = 0$$

บทแทรก 1 ให้ A เป็นเมทริกซ์ขนาด 3×3 ถ้าสมาชิกในแต่ละหลักเป็นลำดับเลขคณิต แล้ว det A = 0

พิสูจน์ เนื่องจาก $\det A = \det A^T$

ดังนั้น บทแทรกเป็นจริง

ตัวอย่างที่ 1 จงหา det A เมื่อกำหนดให้

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 5 & 8 \\ 5 & 6 & 7 \\ 1 & 3 & 5 \end{bmatrix}$$

วิธีทำ เนื่องจากสมาชิกในแต่ละแถวเป็นลำดับเลขคณิต ดังนั้น det A = 0

ตัวอย่างที่ 2 จงหา det A เมื่อกำหนดให้

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 6 & 3 \\ 2 & 5 & 5 \\ 3 & 4 & 7 \end{bmatrix}$$

วิธีทำ เนื่องจากสมาชิกในแต่ละหลักเป็นลำดับเลขคณิต ดังนั้น det A = 0

นอกจากนี้เรายังสามารถขยายผลไปยังเมทริกซ์ขนาด n×n ว่าตัวกำหนดของเมทริกซ์ที่มีสมาชิกในแต่ละแถว (หลัก) เป็นลำดับเลขคณิตอย่างน้อย 3 แถว (หลัก) มีค่าเท่ากับ 0 โดยใช้วิธีการเดียวกับทฤษฎีบทที่ผ่านมา

ทฤษฎีบท 2 ให้ A เป็นเมทริกซ์ขนาด n×n เมื่อ n 4 ถ้าสมาชิกในแต่ละแถวเป็นลำดับเลขคณิตอย่างน้อย 3 แถว แล้ว det A = 0

พิสูจน์

ให้
$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{r1} & a_{r1}+c_1 & a_{r1}+2c_1 & \cdots & a_{r1}+(n-1)c_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{s1} & a_{s1}+c_2 & a_{s1}+2c_2 & \cdots & a_{s1}+(n-1)c_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{t1} & a_{t1}+c_3 & a_{t1}+2c_3 & \cdots & a_{t1}+(n-1)c_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$
เมื่อ c_1, c_2, c_3 เป็นค่าคงตัวใด ๆ

โดยบทตั้ง 1 จะได้ว่า

$$\det A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{r1} & a_{r1}+c_1 & a_{r1}+2c_1 & \cdots & a_{r1}+(n-1)c_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{s1} & a_{s1}+c_2 & a_{s1}+2c_2 & \cdots & a_{s1}+(n-1)c_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{t1} & a_{t1}+c_3 & a_{t1}+2c_3 & \cdots & a_{t1}+(n-1)c_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}$$

$$
= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{r1} & a_{r1} & a_{r1} & \cdots & a_{r1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{s1} & a_{s1}+c_2 & a_{s1}+2c_2 & \cdots & a_{s1}+(n-1)c_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{t1} & a_{t1}+c_3 & a_{t1}+2c_3 & \cdots & a_{t1}+(n-1)c_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & c_1 & 2c_1 & \cdots & (n-1)c_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{s1} & a_{s1}+c_2 & a_{s1}+2c_2 & \cdots & a_{s1}+(n-1)c_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{t1} & a_{t1}+c_3 & a_{t1}+2c_3 & \cdots & a_{t1}+(n-1)c_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}
$$

$$
= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{r1} & a_{r1} & a_{r1} & \cdots & a_{r1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{s1} & a_{s1} & a_{s1} & \cdots & a_{s1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{t1} & a_{t1}+c_3 & a_{t1}+2c_3 & \cdots & a_{t1}+(n-1)c_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{r1} & a_{r1} & a_{r1} & \cdots & a_{r1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & c_2 & 2c_2 & \cdots & (n-1)c_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{t1} & a_{t1}+c_3 & a_{t1}+2c_3 & \cdots & a_{t1}+(n-1)c_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}
$$

$$
+ \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & c_1 & 2c_1 & \cdots & (n-1)c_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{s1} & a_{s1} & a_{s1} & \cdots & a_{s1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{t1} & a_{t1}+c_3 & a_{t1}+2c_3 & \cdots & a_{t1}+(n-1)c_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & c_1 & 2c_1 & \cdots & (n-1)c_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & c_2 & 2c_2 & \cdots & (n-1)c_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{t1} & a_{t1}+c_3 & a_{t1}+2c_3 & \cdots & a_{t1}+(n-1)c_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}
$$

$$
= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{r1} & a_{r1} & a_{r1} & \cdots & a_{r1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & c_2 & 2c_2 & \cdots & (n-1)c_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{t1} & a_{t1}+c_3 & a_{t1}+2c_3 & \cdots & a_{t1}+(n-1)c_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & c_1 & 2c_1 & \cdots & (n-1)c_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{s1} & a_{s1} & a_{s1} & \cdots & a_{s1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{t1} & a_{t1}+c_3 & a_{t1}+2c_3 & \cdots & a_{t1}+(n-1)c_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}
$$

$$
= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{r1} & a_{r1} & a_{r1} & \cdots & a_{r1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & c_2 & 2c_2 & \cdots & (n-1)c_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{t1} & a_{t1} & a_{t1} & \cdots & a_{t1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{r1} & a_{r1} & a_{r1} & \cdots & a_{r1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & c_2 & 2c_2 & \cdots & (n-1)c_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & c_3 & 2c_3 & \cdots & (n-1)c_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}
$$

$$
+ \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & c_1 & 2c_1 & \cdots & (n-1)c_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{s1} & a_{s1} & a_{s1} & \cdots & a_{s1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{t1} & a_{t1} & a_{t1} & \cdots & a_{t1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & c_1 & 2c_1 & \cdots & (n-1)c_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{s1} & a_{s1} & a_{s1} & \cdots & a_{s1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & c_3 & 2c_3 & \cdots & (n-1)c_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}
$$

$$= 0$$

บทแทรก 2 ให้ A เป็นเมทริกซ์ขนาด n×n เมื่อ n 4 ถ้าสมาชิกในแต่ละหลักเป็นลำดับเลขคณิตอย่างน้อย 3 หลัก แล้ว det A = 0

พิสูจน์ เนื่องจาก det A = det A^T
ดังนั้น บทแทรกเป็นจริง

ตัวอย่างที่ 3 จงหา det A เมื่อกำหนดให้

$$
A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 7 \\ 5 & 4 & 3 & 2 \\ 2 & 6 & 10 & 14 \\ 1 & 4 & 7 & 10 \end{bmatrix}
$$

วิธีทำ เนื่องจากสมาชิกในแต่ละแถวเป็นลำดับเลขคณิต
ดังนั้น det A = 0

ตัวอย่างที่ 4 จงหา det A เมื่อกำหนดให้

$$A = \begin{bmatrix} 9 & 3 & 4 & 1 \\ 7 & 5 & 3 & 5 \\ 5 & 7 & 2 & 9 \\ 3 & 9 & 1 & 13 \end{bmatrix}$$

วิธีทำ เนื่องจากสมาชิกในแต่ละหลักเป็นลำดับเลขคณิต
ดังนั้น det A = 0

ตัวอย่างที่ 5 จงหา det A เมื่อกำหนดให้

$$A = \begin{bmatrix} 5 & 7 & 9 & 11 \\ 2 & 4 & 6 & 2 \\ 3 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \end{bmatrix}$$

วิธีทำ เนื่องจากสมาชิกในแถวที่ 1, 3 และ 4 เป็นลำดับเลขคณิต
ดังนั้น det A = 0

ตัวอย่างที่ 6 จงหา det A เมื่อกำหนดให้

$$A = \begin{bmatrix} 5 & 1 & 2 & 4 & 1 \\ 3 & 7 & 5 & 6 & 3 \\ 1 & 2 & 8 & 2 & 5 \\ -1 & 4 & 11 & 5 & 7 \\ -3 & 5 & 14 & 2 & 9 \end{bmatrix}$$

วิธีทำ เนื่องจากสมาชิกในหลักที่ 1, 3 และ 5 เป็นลำดับเลขคณิต
ดังนั้น det A = 0

เอกสารอ้างอิง

Anton, H. (2005). Elementary Linear Algebra. 9th ed. New York: John Wiley & Sons.

Friedberg, S. H., Insel, A. J. and Spence, L. E. (2003). Linear Algebra. 4th ed. New Jersey: Prentice-Hall.

Johnson, L. W., Riess, R. D. and Arnold, J. T.(1998). Introduction to Linear Algebra. 4th ed. Massachusetts : Addison-Wesley.

Leon, S .J. (2006). Linear Algebra with Applications. 7th ed . New Jersey : Pearson Prentice-Hall.

Lipschutz, S. and Lipson, M. L. (2002). Linear Algebra. New York : McGraw-Hill.

Nicholson, W. K. (2004). Elementary Linear Algebra. 2nd ed. Boston : McGraw Hill.

ว.วิทย. มข. 38(1) 25-35 (2553) KKU Sci. J.38(1) 25-35 (2010)

ประโยชน์และการสังเคราะห์ Conjugated Linoleic Acids (CLA)

Benefits and Synthesis of Conjugated Linoleic Acids (CLA)

พัชรินทร์ ภักดีฉนวน[1]

บทนำ

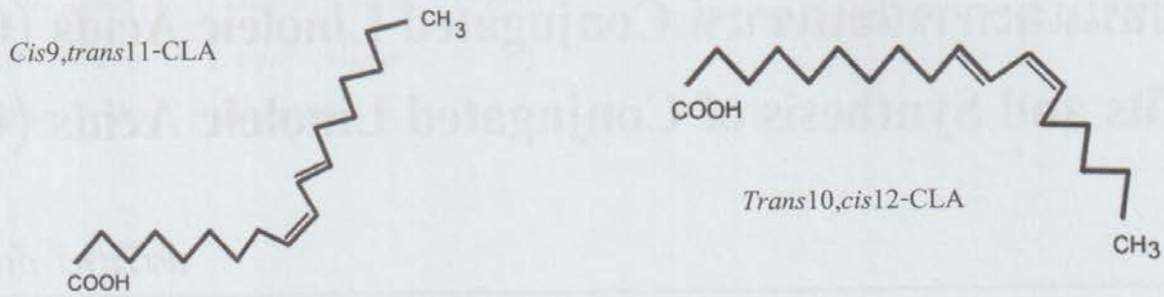
Conjugated Linoleic Acid หรือ CLA เป็นกรดไขมัน ชนิดโอเมกา-6 เริ่มได้รับความนิยมในประเทศไทยประมาณปี พ.ศ.2543 โดยมีการนำเข้าผลิตภัณฑ์ CLA ในรูปแคปซูลชนิด Soft gel จากกลุ่มประเทศยุโรปและบางช่องทางของการจัดจำหน่ายจะผ่านตัวแทนในประเทศมาเลเซีย CLA ถูกโฆษณาในรายการโทรทัศน์ ว่าเป็นอาหารเสริมสุขภาพที่สามารถลดปริมาณมวลไขมันทำให้กระชับสัดส่วนผู้ที่บริโภค การโฆษณาได้ดำเนินการอย่างต่อเนื่องผู้จัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์ CLA ประสบความสำเร็จในการสร้างยี่ห้อ ทำให้ผู้บริโภคเริ่มรู้จักคำว่า CLA และมี CLA วางจำหน่ายอย่างแพร่หลายในร้านอาหารเสริมและร้านขายยา ซึ่งต่อมาได้มีผลิตภัณฑ์ปลากระป๋องเสริม CLA แต่ปัจจุบันไม่มีจำหน่ายในประเทศไทยแล้ว บริษัทผู้ผลิตทางภาคใต้จะผลิตตามคำสั่งส่งออกไปที่ประเทศออสเตรเลีย จนถึงทุกวันนี้กระแสการบริโภค CLA ลดลงเล็กน้อยเนื่องจากมีอาหารเสริมสุขภาพชนิดอื่นถูกแนะนำเข้ามาใหม่ตลอดเวลา ในข้อเท็จจริง CLA สามารถใช้กระชับสัดส่วนหรือใช้ลดน้ำหนักได้จริงหรือไม่เป็นสิ่งที่นักวิจัยยังคงศึกษากันมาอย่างต่อเนื่อง แต่สำหรับผู้บริโภคต่างประเทศโดยเฉพาะในประเทศสหรัฐอเมริกาและออสเตรเลียรู้จัก CLA ในประโยชน์ทางด้านอื่นที่สำคัญกว่ามาก เช่น การเป็นสารต้านมะเร็ง สารต้านอนุมูลอิสระ การป้องกันการอุดตันของหลอดเลือด การกระตุ้นภูมิคุ้มกัน ลดภาวะเบาหวาน และต้านการอักเสบ ทำให้ CLA ในลักษณะอาหารเสริมได้รับความนิยมในต่างประเทศ โดยมีการจำหน่าย CLA มากกว่าร้อยยี่ห้อ เช่น Tonalin, Slim, Ultimate nutrition, Nature made, Max, Super fat, Lipidex, Iron tek, Now food และ Omega burn

โครงสร้างของ CLA

CLA เป็นกรดไขมันที่เป็นไอโซเมอร์ของกรดไขมันชนิดไลโนเลอิก มีคาร์บอน 18 อะตอม พันธะคู่ 2 ตำแหน่ง ที่อยู่ในลักษณะคู่ร่วม (conjugate) คือมีพันธะเดี่ยว 1 พันธะคั่นกลางพันธะคู่ทั้งสอง (รูปที่ 1) เนื่องจาก CLA เป็นการเปลี่ยนรูปจากไลโนเลอิกซึ่งมีพันธะคู่ที่ตำแหน่ง 9 และ 12 ในรูปของ *cis,cis* ไอโซเมอร์ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยเอนไซม์หรือสารเคมีพันธะคู่จะเกิดการเปลี่ยนตำแหน่ง จากตำแหน่งของ *cis* ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง คือ ถ้าเป็นตำแหน่ง *cis* 9 ก็จะเปลี่ยนรูปเป็น *trans* 10 และถ้าเป็นตำแหน่ง *cis* 12

[1] ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหารและโภชนาการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ. ปัตตานี 94000
E mail: patcharin.psu@gmail.com

ก็จะเปลี่ยนเป็น *trans* 11 ดังนั้น CLA ที่พบมาก 2 รูป ก็คือ *trans*10,*cis*12 และ cis9,*tran*11 แต่ถ้าถูกกระตุ้นและมีการเปลี่ยนตำแหน่งของพันธะคู่ไปเรื่อยๆทั้งทางซ้ายและขวาของโครงสร้างก็จะได้ไอโซเมอร์ของ CLA เป็น *cis,trans* หรือ *tran,cis* ของตำแหน่ง 7, 9; 8, 10; 11, 13; และ 12, 14 (Rainer and Heiss, 2000) แต่อย่างไรก็ตาม ไอโซเมอร์ที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพคือ *cis*9,*tran*11 และ *trans*10,*cis*12 ดังนั้นผู้บริโภคจึงควรมีความรู้ในเรื่องนี้



รูปที่ 1 โครงสร้างของ *cis*9,*trans*11 และ *trans*10,*cis*12-octadecadienoic acid (C18:2)

บทความวิจัยที่รายงานเรื่อง CLA มีตั้งแต่ 40 กว่าปีที่แล้ว ที่พบว่าแบคทีเรียในกระเพาะของสัตว์เคี้ยวเอื้อง เช่น *Butyrivibrio fibrisolvens, Ruminococcus albus* และ *Eubacterium* sp. สามารถเปลี่ยนกรดไขมันไลโนเลอิกเป็น CLA ทำให้เนื้อและนมของสัตว์เคี้ยวเอื้องมีปริมาณ CLA ไม่มาก เพียงปริมาณ 2.9-11.3 มิลลิกรัม/กรัมไขมัน ในผลิตภัณฑ์นม (Decker, 1995) และมากที่สุดในผลิตภัณฑ์ประเภทเนยแข็งซึ่งพบ 15.6 มิลลิกรัม/กรัมไขมัน (Sofi et al., 2009) ผลิตภัณฑ์นมไขมันต่ำจะมีปริมาณ CLA น้อยมาก ส่วนผลิตภัณฑ์เนื้อมีรายงานว่าเนื้อวัว เนื้อแพะ และเนื้อแกะมีปริมาณ CLA 2.65-9.21 มิลลิกรัม/กรัมไขมันในเนื้อ (ตารางที่ 1) เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันพืชสำหรับบริโภคจะเห็นว่าแทบไม่มี CLA อยู่เลย จุดเริ่มต้นที่ทำให้ CLA เป็นที่สนใจอย่างกว้างขวางในปัจจุบันเริ่มจากการรายงานของ Pariza และ Hargraves (1985) ซึ่งเป็นนักวิจัยในมหาวิทยาลัย Wisconsin ประเทศสหรัฐอเมริกาที่จำแนก CLA จากเนื้อวัวย่าง และรายงานว่า CLA สามารถยับยั้งการเกิดเนื้องอกในหนูที่กระตุ้นโดย 7,12- Dimethylbenz(a)anthracene (DMBA)ได้ จนถึงปัจจุบันมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ CLA ไม่ต่ำกว่า 5,000 เรื่อง โดย website ของมหาวิทยาลัย Wisconsin ในสหรัฐอเมริกา เป็นแหล่งของข้อมูล CLA รวบรวมชื่อเรื่องบทความที่มีงานวิจัยเกี่ยวกับ CLA ไว้มากที่สุด

ตารางที่ 1 ปริมาณ CLA ในอาหารชนิดต่างๆ

ชนิด	ปริมาณ (mg/g fat)	อ้างอิง
น้ำนมและผลิตภัณฑ์จากน้ำนมวัว	2.90-11.30	Decker (1995)
น้ำนมแพะ	4.2-5.4	Talpur et al. (2009)
น้ำนมแกะ	7.10-8.30	Talpur et al. (2009)
เนยแข็งจากน้ำนมแกะ	15.6	Sofi et al. (2009)
โยเกิร์ตไขมันต่ำ	0.60-1.70	Lin et al. (1995)
ไขมันวัว	2.92-9.21	Fuente et al. (2009)
ไขมันวัว	2.65-5.76	Alfaia et al. (2009)
ไขมันควาย	3.78	Juárez et al. (2009)
น้ำมันพืช	0.60-0.90	Decker (1995)

ประโยชน์ของ CLA

ผู้บริโภคจะรู้จัก CLA ในคุณสมบัติที่ใช้กระชับสัดส่วนลดปริมาณมวลไขมันและมีการใช้กับนักกีฬาที่ต้องการสร้างกล้ามเนื้อมาเกือบ 10 ปีแล้ว รวมทั้งมีรายงานการใช้ CLA ร่วมกับยารักษามะเร็ง ในบทความนี้ได้รวบรวมประโยชน์ที่สำคัญของ CLA ที่มีงานวิจัยเผยแพร่อย่างต่อเนื่อง คือ สมบัติการเป็นสารต้านออกซิเดชัน สารต้านมะเร็ง การลดมวลไขมัน ลดภาวะเบาหวาน การป้องกันการอุดตันของหลอดเลือด การกระตุ้นภูมิคุ้มกัน และต้านการอักเสบ

การป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (Anti-oxidation)

สารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันบางชนิดทำให้เกิดความเสื่อมและเสียหายต่อเซลล์ การตรวจสอบคุณสมบัติความเป็นสารต้านอนุมูลอิสระของ CLA เปรียบเทียบกับกรดไขมันชนิดไลโนเลอิกและไลโนเลอิกเมทิลเอสเทอร์ พบว่า CLA สามารถจับกับอนุมูลอิสระ DPPH ได้ในขณะที่กรดไขมันชนิดไลโนเลอิก และไลโนเลอิกเมทิลเอสเทอร์ไม่ได้แสดงสมบัติดังกล่าว (Fagali and Catalá, 2008) ส่วนการศึกษาการป้องกันการเกิดออกซิเดชันระดับเซลล์มีรายงานว่า CLA สามารถชักนำการสร้างกลูทาไทโอน (glutathione) ในเซลล์ไฟโบรบลาสต์ (fibroblast) ของมนุษย์ (Arab et al., 2006) ชักนำให้มีการเพิ่มเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (antioxidant enzyme) คือ Superoxide dismutase, Catalase และ Glutathione peroxidase (O'Shea et al., 1998) ลดการแสดงออกของ mRNA ของเอนไซม์ Cyclo-oxygenase-2 และ Nitric oxide synthase ซึ่งเป็นตัวกระตุ้นการเกิดออกซิเดชัน (Yu and Vanden, 2002) Nakamura and Omaye (2009) ได้ทดลองการต้านการเกิดออกซิเดชันในเซลล์มนุษย์โดยใช้เซลล์เยื่อบุผนังหลอดเลือด พบว่า CLA ระดับ 10 ไมโครโมล/ลิตร สามารถกระตุ้นตัวรับ (receptor) ชนิด Peroxisome proliferators-activated receptor และมีการชักนำการทำงานของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดออกซิเดชัน เช่น Copper/zinc superoxide dismutase และ Catalase mRNA

การเกิดออกซิเดชันบางประเภทสามารถกระตุ้นการแบ่งเซลล์ที่ผิดปกติซึ่งเป็นสาเหตุของเนื้องอกและมะเร็ง การยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของ CLA จึงเป็นการยับยั้งระยะแรกของกระบวนการดังกล่าว (O'Shea et al., 1998)

การป้องกันการเกิดเนื้องอกและมะเร็ง (Anti-tumorgenesis/Anti-carcinogenesis)

เนื้องอกหรือมะเร็งเป็นลักษณะของการแบ่งเซลล์ที่ผิดปกติ เซลล์ที่เกิดใหม่ไม่สามารถทำหน้าที่เหมือนกับเซลล์เดิมและบางชนิดเป็นอันตรายต่อร่างกาย มีรายงานวิจัยมากมายที่รายงานถึงบทบาทของ CLA ในลักษณะเป็นสารต้านมะเร็ง โดยนักวิจัยใช้สารเคมีหลายชนิดในการชักนำให้เกิดเซลล์มะเร็งในสัตว์ทดลอง เช่น การใช้ Benzo(a)pyrene, 7,12-Dimethylbenz(a)anthracene และ 2-amino-3-methyl imidazo[4,5-f] quinoline แล้วให้สัตว์ได้รับ CLA ในปริมาณร้อยละ 0.05-0.5 ของน้ำหนักอาหารที่ให้สัตว์กิน ในการทดลองได้รายงานว่า CLA สามารถต้านการเกิดเนื้องอกในเต้านม ปอด กระเพาะอาหาร ลำไส้เล็ก (Ha et al., 1990; Ip et al., 1991) และมะเร็งลำไส้ใหญ่ (Liew et al., 1995)

สาเหตุหนึ่งของการแบ่งเซลล์ที่ผิดปกติคือมีการแสดงออกของเอนไซม์ Cyclooxygenase-2 (COX-2) มาก ทำให้ไปกระตุ้นการสร้าง Prostaglandin E2 (PGE_2) ซึ่งมีบทบาทในการกระตุ้นการพัฒนาของเซลล์เนื้องอก CLA จะมีผลต่อการยับยั้งเอนไซม์ COX-2 ทำให้การสังเคราะห์ PGE_2 ลดลง โดยที่การทดลองในหนู ที่ให้ CLA ในอาหารร้อยละ 0.1 และ 0.25 ของน้ำหนักอาหาร พบว่าไอโซเมอร์ของ CLA ทั้งชนิด *cis*9,*tran*11 และ *trans*10,*cis*12 สามารถลดขนาดของเซลล์เนื้องอกได้ โดยมีลักษณะเป็น Dose dependent คือ เมื่อมีการให้ CLA มากขึ้น ขนาดของเนื้องอกก็จะลดลงได้มากขึ้น และอีกช่องทางหนึ่งคือ CLA สามารถยับยั้งการเจริญของเซลล์มะเร็งโดยการยับยั้งตัวรับชนิด Fetal liver kinase -1 receptor ซึ่งมีบทบาทต่อการสร้างเส้นเลือดไปเลี้ยงเซลล์มะเร็ง

เมื่อตัวรับนี้ลดการทำงานก็จะทำให้ไม่มีการสร้างเส้นเลือด หรือการสร้างเส้นเลือดลดลงเซลล์มะเร็งก็จะหยุดการเจริญ (Sikorski et al., 2008)

การลดมวลไขมัน (Body fat reduction)

การลดมวลไขมันของ CLA มีการศึกษากันมาก เพราะเป็นหัวข้อหลักที่ใช้ในการโฆษณาประโยชน์ของ CLA Azain et al. (2000) ได้ทดลองให้ CLA ในอาหารหนูปริมาณร้อยละ 0.5 เป็นเวลา 5 สัปดาห์ พบว่า CLA สามารถลดน้ำหนักของหน้าท้องหนูจากชุดควบคุม 0.68 กรัม เป็น 0.51 กรัม และพิสูจน์ว่าเป็นเพราะ CLA สามารถลดขนาดของเซลล์ไขมันให้ลดลงจาก 68 ไมโครเมตร ในชุดควบคุมเป็น 61 ไมโครเมตร ในหนูที่ได้รับ CLA โดยร้อยละ 80.9 ของเซลล์ไขมันมีขนาด 40-69 ไมโครเมตร การศึกษาผลของ CLA ต่อการลดมวลไขมันในคนยังมีความขัดแย้งกันอยู่ งานวิจัยของ Berven et al. (2000) ให้ผู้ใหญ่รับประทาน CLA 3-3.4 กรัม/วัน นาน 6 เดือน พบว่า CLA ไม่ได้มีผลต่อน้ำหนักและมวลไขมัน ในขณะที่งานวิจัยของ Blankson et al. (2000) ให้ผู้ป่วยโรคอ้วนรับประทาน CLA ปริมาณ 6.8 กรัม/วัน เป็นเวลานาน 7-13 สัปดาห์ พบว่า CLA สามารถลดมวลไขมันในกลุ่มผู้ป่วย อย่างไรก็ตามสำหรับงานวิจัยทางชีวเคมีในสัตว์ทดลองซึ่งวิเคราะห์พารามิเตอร์ด้านยีนและโปรตีนที่เกี่ยวข้อง พบว่า CLA สามารถกระตุ้นการแสดงออกของ PPARγ ซึ่งเป็นตัวรับที่ควบคุมการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับเมแทบอลิซึมของน้ำตาลกลูโคสและไขมัน จากการศึกษาของ Zhou และคณะ (2008) พบว่า การเพิ่มปริมาณของ PPARγ มีผลให้ปริมาณ Leptin ลดลง ทำให้มีผลในการลดมวลไขมัน เนื่องจาก Leptin จะถูกหลั่งมาจากเซลล์ไขมันมีบทบาทต่อการควบคุมสมดุลของพลังงาน ถ้าปริมาณ Leptin ในเลือดสูง การสะสมไขมันจะเกิดขึ้นสูง ซึ่งจะพบว่าผู้ป่วยโรคอ้วนจะมีปริมาณ Leptin สูง แต่ผลการทดลองแสดงว่าการได้รับ CLA ทำให้หนูมีปริมาณ Leptin ในเลือดต่ำกว่าหนูที่ไม่ได้รับ CLA

PPARγ ยังมีผลต่อโปรตีนอื่นที่มีบทบาทต่อการควบคุมปริมาณอินซูลิน (Insulin) เช่น Fatty acid binding protein (aP_2), Fatty acid transporter protein (FATP), Acyl-CoA synthetase (ACS) และ Adiponectin โดย Zhou และคณะ (2008) รายงานว่า CLA มีผลกระตุ้น PPAR□ ทำให้โปรตีนดังกล่าวมีปริมาณสูงขึ้นมีผลต่อการปรับปรุง Insulin resistance จึงลดภาวะเบาหวานชนิดที่ 2

การป้องกันการอุดตันของหลอดเลือด (Anti-atherosclerosis)

Atherosclerosis คือสภาวะการอุดตันของหลอดเลือดซึ่งสาเหตุส่วนหนึ่งมาจากคอเลสเตอรอลชนิด LDL (Low density lipoprotein) มีรายงานวิจัยว่าสัตว์ที่ได้รับ CLA นาน 2 สัปดาห์ มีปริมาณไตรกลีเซอร์ไรด์ ปริมาณคอเลสเตอรอลทั้งหมดและคอเลสเตอรอล ชนิด LDL ลดลง และการลดลงชัดเจนขึ้นเมื่อได้รับ CLA นาน 6 สัปดาห์ โดย CLA ไม่มีผลต่อคอเลสเตอรอล ชนิด HDL ซึ่งเป็น คอเลสเตอรอลที่ดี กลไกการควบคุมระดับคอเลสเตอรอล ชนิด LDL และ HDL-cholesterol ในกระแสเลือดนี้ทำให้สามารถลดความรุนแรงของโรคในเส้นเลือดแดง aortic arch ในกระต่ายได้ร้อยละ 20 และในเส้นเลือดบริเวณทรวงอกของกระต่ายได้ร้อยละ 8 และพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ CLA ให้สูงขึ้น ความรุนแรงของโรคจะลดต่ำลง (Kritcevsky et al., 2002) นอกจากนี้ CLA ยังช่วยลดการเกิดออกซิเดชันของคอเลสเตอรอล ชนิด LDL ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่า Oxidized LDL จะทำให้เกิดการสะสมของ ไขมันและเกล็ดเลือด (plaque) ในเส้นเลือดเป็นสาเหตุให้เส้นเลือดเกิดการอุดตัน (Belury, 2002)

การเพิ่มภูมิคุ้มกัน (Enhancing immune function)

CLA มีผลต่อการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันโดยช่วยเพิ่มปริมาณของแอนติบอดีบางชนิด เช่น IgA และ IgG ซึ่งเป็น immunoglobulin ที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับภูมิคุ้มกันของร่างกาย สามารถลดระดับ Leukotrienes และเพิ่ม Cytokines ซึ่งมีผลต่อการก่อภูมิคุ้มกันและลดการเกิดภูมิแพ้ (Fernie, 2003)

การต้านการอักเสบ (Anti-inflammatory effect)

การอักเสบเป็นกลไกของร่างกายที่ตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นที่เป็นอันตราย ซึ่งมีความจำเป็นต่อการกำจัดสิ่งที่เป็นอันตรายนั้นแต่การอักเสบที่มากเกินไปจะเกิดผลเสีย CLA ต้านการอักเสบโดยกระตุ้นการสังเคราะห์ Reactive oxygen species (POS) และ Cytoplasmic phopholipase A2 activity ซึ่งเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนของกรดไขมันชนิด อะราคิโนดิก (arachidonic acid) ทำให้เกิดกระบวนการสลายของเซลล์แมโครฟาจของมนุษย์ จึงส่งผลต้านการอักเสบ (Stachoska et al., 2008)

การศึกษาในมนุษย์โดยการให้คนอายุ 30-65 ปี (เฉลี่ย 45.6 ปี) ทั้งชายและหญิง จำนวน 10 คนซึ่งถูกคัดกรองว่าเป็นผู้ที่เสี่ยงต่อการเป็นโรคที่เกี่ยวกับการอักเสบ รับประทานเนยแข็งจากแกะชนิด Pecorino ที่มี CLA ธรรมชาติปริมาณ 15.6 มิลลิกรัม/กรัมไขมัน สัปดาห์ละ 200 กรัม นาน 10 สัปดาห์ จากนั้นทิ้งช่วงไประยะหนึ่งเพื่อปรับสภาวะให้เป็นเหมือนก่อนการทดลอง แล้วให้รับประทานเนยแข็งอื่นที่มีปริมาณ CLA เพียง 1.90 มิลลิกรัม/กรัมไขมัน พบว่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการอักเสบซึ่งตรวจวัดในเลือดเช่น Interleukin-6, Interleukin-8 และ Tumor necrosis factor-α ของคนในช่วงเวลาที่รับประทานเนยแข็ง Percorino เพิ่มขึ้น แตกต่างจากช่วงเวลาที่รับประทานเนยแข็งที่มี CLA น้อย ($p<0.05$) โดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 43.2 36.5 และ 40.1 ตามลำดับ (Sofi et al., 2009)

การศึกษาผลของ CLA ส่วนใหญ่ศึกษาในสัตว์ทดลอง การคำนวณปริมาณของ CLA ที่ให้ผลต่างๆ โดยเฉพาะการต้านการเกิดเนื้องอกและมะเร็งนั้น Pariza และ Hargraves (1985) ได้ประเมินปริมาณที่มนุษย์ควรรับ CLA ในคนที่น้ำหนักเฉลี่ย 70 กิโลกรัม ว่าควรได้รับ CLA อย่างน้อย 3 กรัม/วัน แต่การรับ CLA ในอาหารจากธรรมชาติมีปริมาณ CLA ไม่เกิน 15 มิลลิกรัม/กรัมไขมันของอาหาร ดังนั้นการสังเคราะห์ CLA ทางเคมีโดยใช้น้ำมันที่มีกรดไขมันไลโนเลอิกสูงเป็นสารตั้งต้นซึ่งได้ผลผลิตสูงจึงมีบทบาทสำคัญ

การผลิต CLA

การเกิดปฏิกิริยา Isomerization ของกรดไลโนเลอิกเป็น CLA เกิดได้ทั้งในธรรมชาติและการสังเคราะห์ทางเคมี ซึ่งทั้ง 2 วิธีมีผู้สังเกตและสังเคราะห์ได้นานมาแล้ว แต่ ณ ขณะนั้นยังไม่ทราบว่า CLA มีประโยชน์อย่างไร จึงไม่ได้มีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมจนกระทั่งในปี ค.ศ.1985 ที่ Pariza และ Hargraves ได้รายงานสมบัติการต้านเนื้องอก จึงเริ่มมีการคิดค้นวิธีที่จะผลิต CLA ในวิธีการต่างๆ ซึ่งจะจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ การผลิต CLA ด้วยกระบวนการของสิ่งมีชีวิต การผลิต CLA ด้วยกระบวนการทางเคมีและด้วยกระบวนการทางกายภาพ

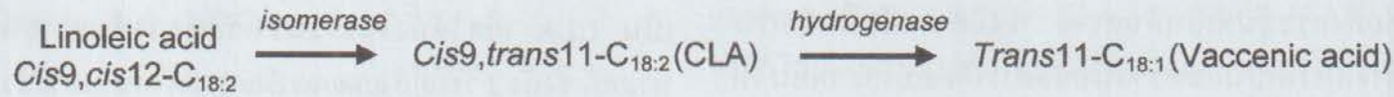
การสังเคราะห์ CLA ในสิ่งมีชีวิต (Biosynthesis of CLA)

การสังเคราะห์ CLA ในสิ่งมีชีวิตเกิดจาก 2 กระบวนการ คือ isomerization และ desaturation ด้วยเอนไซม์จากแบคทีเรียและเอนไซม์ที่อยู่ในเซลล์ของสัตว์

(1) การสังเคราะห์ CLA ในกระเพาะของสัตว์เคี้ยวเอื้องโดยเอนไซม์ isomerase

วิธีการนี้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการ biohydrogenation โดยแบคทีเรีย ชนิด *Butyrivibrio fibrisolvens, Ruminococcus albus* และ *Eubacterium sp.* ในกระเพาะช่องที่ 1 ของสัตว์เคี้ยวเอื้อง (Rumen) (Kepler and Tove, 1967) จากสารเริ่มต้นที่เป็นกรดไขมันชนิดไลโนเลอิก โดยไขมันชนิดไกลโคไลปิดและไตรกลีเซอไรด์จะถูกเอนไซม์สลายไขมันจากจุลินทรีย์สลายโมเลกุลเป็นกรดไขมัน จากนั้นกรดไขมันจะถูกเปลี่ยนเป็น CLA และดูดซึมไปในกระแสเลือด (Ntambi, 1999) ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของ CLA คือ ปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวโดยเฉพาะไลโนเลอิก (*cis*9,*cis*12-C18:2) (Bauman et al., 1999) การเกิดกระบวนการนี้จะเกิด 2 ขั้นตอนคือ เป็นการ isomerization โดยเอนไซม์ linoleic acid isomerase (EC 5.3.1.5) ส่วนของตำแหน่งพันธะคู่ *cis*12 กลายเป็น *trans*11 จึงได้ CLA ชนิด *cis*9,*trans*11 จากนั้นจะเกิดกระบวนการ

ที่ 2 เป็นการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) มีการเติมไฮโดรเจนเข้าที่ *cis*12 ได้เป็น *trans11*-C18:1 (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 การสังเคราะห์ CLA โดยเอนไซม์ isomerase (ดัดแปลงจาก Bauman et al., 1999)

(2) การสังเคราะห์ CLA ในเซลล์โดยเอนไซม์ Δ^9Desaturase

เอนไซม์ Δ^9desaturase ทำปฏิกิริยา Desaturation หรือการเพิ่มพันธะคู่ให้กรดไขมันชนิด *trans*-vaccenic acid (*trans*11-C18:1) ที่อยู่ในเซลล์ต่อมน้ำนมและเซลล์ไขมันให้เป็น *cis*9,*trans*11 กระบวนการนี้มีการรายงานว่าเป็นกระบวนการหลักในการผลิต CLA ชนิด *cis*9,*trans*11 มากถึงร้อยละ 90 (Ntambi, 1999) และมีรายงานอีกฉบับหนึ่งสนับสนุนแนวคิดนี้ โดยรายงานว่ามี CLA ที่สังเคราะห์ขึ้นที่เซลล์ต่อมน้ำนมร้อยละ 64 และมากกว่าร้อยละ 86 สังเคราะห์ขึ้นที่เซลล์ไขมันในไขมันโค (Griinari et al., 2000)

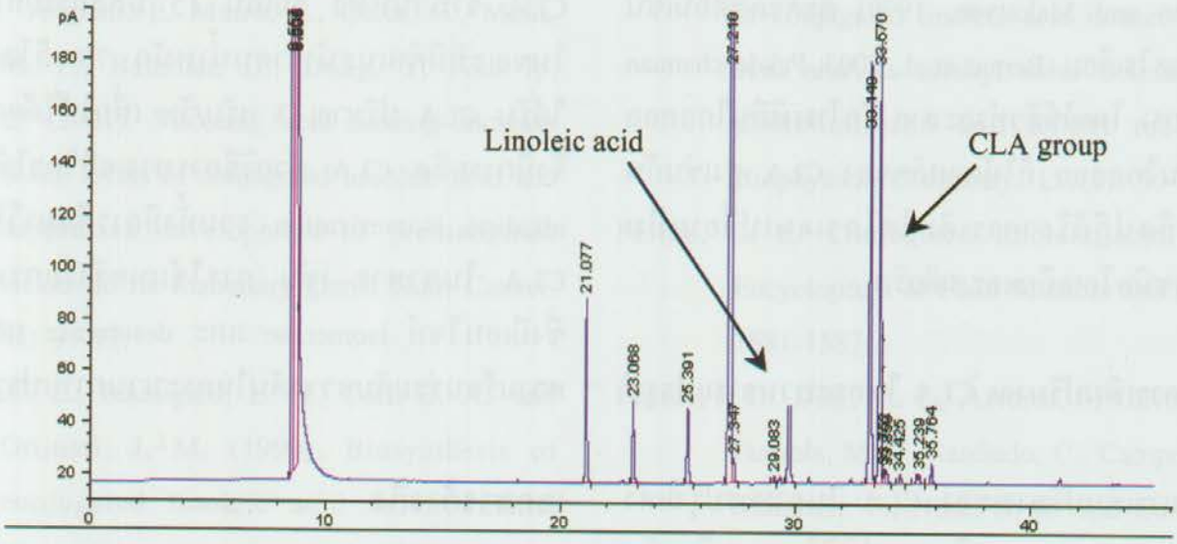
งานวิจัยตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 เป็นต้นมา ยังพบว่าสัตว์ที่ไม่ใช่สัตว์เคี้ยวเอื้องเช่นหนู ก็มีเอนไซม์ Δ^9desaturase เปลี่ยน *Trans*-vaccenic acid เป็น *cis*9,*trans*11-CLA ได้เช่นกันแต่ในปริมาณที่น้อยมาก (Banni et al., 2001) ซึ่งสามารถคำนวณ Δ^9desaturase index ได้จากสมการ 100*[C18:1/(C18:0+C18:1)] โดยพบว่าค่า Δ^9desaturase index จะแตกต่างกันตามสายพันธุ์ของสัตว์ (Zapletal et al., 2009)

แบคทีเรียกรดแลกติก (Lactic acid bacteria) มีเอนไซม์ isomerase และ Δ^9desaturase เช่นกัน จึงมีนักวิจัยสนใจศึกษาการเพิ่มปริมาณ CLA โดยใช้แบคทีเรียกรดแลกติกชนิดต่างๆ Lin และคณะ (2003) ได้ทดลองสกัดแยกเอนไซม์บริสุทธิ์ linoleic isomerase จากแบคทีเรียกรดแลกติกสายพันธุ์ *Lactobacillus delbrueckii* ssp. Bulgaricus มาผสมกับกรดไขมันไลโนเลอิก แล้วทำการสกัดแยก CLA ออกมาวิเคราะห์ พบว่ามี CLA 13 ไอโซเมอร์ และมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจาก 27 ไมโครกรัม เป็น 209 ไมโครกรัม โดยไอโซเมอร์หลักคือ *trans*10,*cis*12 และ *cis*9,*trans*11 ในอัตราส่วนร้อยละ 57.2 และ 30.9 ตามลำดับ นอกจากแบคทีเรียสายพันธุ์ bulgaricus แล้วแบคทีเรียกรดแลกติกชนิด *L. acidophilus* และแบคทีเรียกรดแลกติกอื่นอีก 12 ชนิด ก็ให้ผลในทำนองเดียวกัน (Lin et al., 2002) ส่วนการทำงานของเอนไซม์ Δ^9desaturase นั้นพบในกรณีของการเปลี่ยนกรดไขมันชนิดโอเลอิกเป็น CLA (Lin et al., 2003)

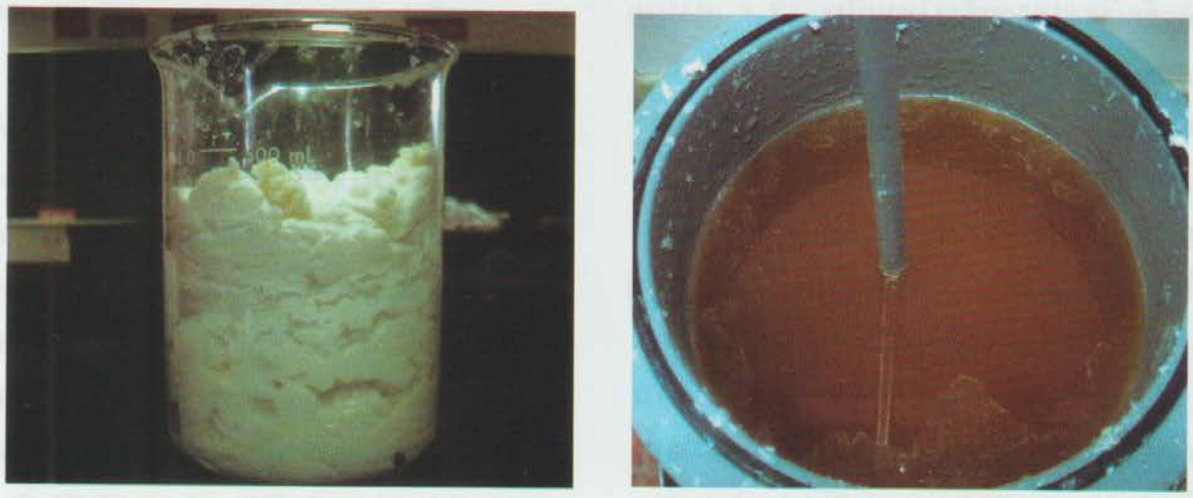
การสังเคราะห์ CLA ทางเคมี

ในทางการค้าใช้วิธีการผลิต CLA ด้วยด่างและความร้อนสูง เรียกกระบวนการนี้ว่า alkaline isomerization โดยใช้น้ำมันที่มีปริมาณกรดไลโนเลอิกมาก เช่น น้ำมันจากเมล็ดดอกคำฝอย และเมล็ดดอกทานตะวัน เป็นสารตั้งต้น ใช้อุณหภูมิสูง 160-180 °C ซึ่งกระบวนการนี้เป็นที่รู้จักกันตั้งแต่ปี 1951 (Nichols et al., 1951) ได้ผลผลิตหลักเป็น CLA 2 ไอโซเมอร์ คือ *cis*9,*trans*11-C18:2 และ *trans*10,*cis*12-C18:2 มากกว่าร้อยละ 75 ซึ่งต่อมาได้มีการพัฒนาวิธีการจนได้ผลผลิตมากกว่าร้อยละ 90 (Zu and Schut, 1992) การทดลองของผู้เขียนที่ผลิต CLA ปริมาณ 6 ลิตรในถัง Reactor ขนาด 20 ลิตร ใช้อุณหภูมิ 180°C อัตราการกวนผสม 300 rpm ใช้อัตราส่วนของตัวทำละลายโพรพิลีนไกลคอล (propylene glycol) ต่อน้ำมัน เท่ากับ 2:1 เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (รูปที่ 3) พบว่าร้อยละของการเปลี่ยนกรดไขมันไลโนเลอิกเป็น CLA (% conversion) สูงถึงร้อยละ 94 (ไม่ได้ตีพิมพ์) CLA หลังการทำปฏิกิริยาจะได้ด่างของกรดไขมัน (สบู่) (รูปที่ 4 A) ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นกรดไขมัน CLA เมื่อปรับพีเอชเป็นกรดที่พีเอช 2-3 (รูปที่ 4 B) ปฏิกิริยาที่เกิดระหว่าง isomerization คือโปรตอนที่ตำแหน่ง methylene ซึ่งเป็นคาร์บอนตำแหน่ง

ที่ 11 ของกรดไลโนเลอิก *cis*9,*cis*12 ถูกกระตุ้นหลุดออกไป ทำให้กลุ่มไอออนลบเกิด Resonance hybrid และเคลื่อนย้ายตำแหน่งของพันธะคู่ และมีโครงสร้างเป็นชนิด *trans* ดังนั้น ไอโซเมอร์ หลัก คือ *cis*9,*trans*11-C18:2 และ *trans*10,*cis*12-C18:2



รูปที่ 3 GC-chromatogram แสดงกลุ่มพีกของ CLA ที่ isomerize มาจากกรดไขมันไลโนเลอิก



A B

รูปที่ 4 (A) isomerized oil ในรูปสบู่

(B) isomerized oil หลังจากการปรับพีเอชให้อยู่ในรูปของกรดไขมันในถัง reactor

วิธีการอื่นที่มีการรายงานคือการผลิต CLA ด้วยวิธี homogeneous และ heterogeneous catalysis ตัวอย่างของการใช้ homogeneous transition metal catalysts เช่น Wilkinson's catalyst $RhCL(PPh_3)_3$ (Adlof, 1999) และคะตะลิสต์ชนิด $[RhCl(C_{14}H_2)_2]_2$ และ $RhCl{\cdot}2H_2O$ (Larock et al., 2001) และ heterogeneous catalysts เช่น Nickel catalyst ร้อยละ 0.1 ในกระบวนการเติมไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 210 °C

อัตราการกวนผสม 300 rpm ได้ปริมาณ CLA 162.82 มิลลิกรัม/กรัมน้ำมัน (Jung et al., 2001) แต่วิธีการนี้ต้องระวังเรื่องความเป็นพิษของนิเคิล และอันตรายที่เกิดจากการใช้อุณหภูมิสูง อาจมีสารประกอบที่เป็นอันตรายเกิดมาจากการสลายตัวของสารอื่นที่ถูกความร้อน (Savchenko and Makaryan, 1999) คะตะลิสต์อื่นเช่น รูทิเนียมและโรเดียม (Bernas et al., 2003; Pakdeechanuan et al., 2005) โดยใช้ตัวทำละลาย คือโพรพิลีนไกลคอล หรือเอทิลีนไกลคอล ก็ให้ผลผลิตของ CLA สูงเช่นกัน แต่ก็อาจเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนเปลี่ยนเป็นกรดไขมันชนิดโอเลอิกและสเตียริก

การเพิ่มปริมาณ CLA ในกระบวนการแปรรูปอาหาร

การเพิ่มปริมาณของ CLA ในอาหารปรุงแต่ง (processed food) อาจเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมัน ไลโนเลอิก (Ha et al., 1989) โดยอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับโปรตอนอื่นเช่น โปรตีนและจัดเรียงโครงสร้างใหม่เป็น CLA ดังนั้นปัจจัยที่กระตุ้นให้มีการเพิ่มปริมาณของ CLA คือ อุณหภูมิ ปริมาณไขมัน ปริมาณโปรตีน อากาศ และเชื้อจุลินทรีย์ เนื่องจากมีการสังเกตในเนยเหลวพบว่ามีการเพิ่มปริมาณ CLA จาก 6.11 มิลลิกรัม/กรัมไขมัน ในนมที่ใช้เป็นวัตถุดิบเป็น 8.11 มิลลิกรัม/กรัมไขมัน ในเนยเหลว (Shantha et al., 1995) และมีการเพิ่มปริมาณ CLA จาก 1.17 มิลลิกรัม/กรัมน้ำมัน เป็น 7.75 มิลลิกรัม/กรัมน้ำมัน ในอาหารที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (extrusion) ที่อุณหภูมิ 150 °C และ 70% torque (Pakdeechanuan et al., 2007)

สรุป

Conjugated linoleic acid หรือ CLA เป็นกรดไขมันที่ร่างกายไม่สามารถสร้างขึ้นเองได้ต้องรับจากอาหาร มีรายงานวิจัยสนับสนุนว่า ไอโซเมอร์ของ CLA ชนิด *cis*9,*trans*11 และ *trans*10,*cis*12 มีสมบัติการเป็นสารต้านออกซิเดชัน สารต้านมะเร็ง ลดมวลไขมัน ป้องกันการอุดตันของหลอดเลือด กระตุ้นภูมิคุ้มกัน และต้านการอักเสบ สัตว์เคี้ยวเอื้องมีกระบวนการ bioisomerization จากแบคทีเรียในกระเพาะและเอนไซม์ desaturase ที่อยู่ในเซลล์ต่อมน้ำนมและเซลล์ไขมันทำให้เนื้อและนมของสัตว์เคี้ยวเอื้องมี CLA จำนวนหนึ่ง ไม่เกิน 15 มิลลิกรัม/กรัมไขมัน ในขณะที่มีคำแนะนำว่าคนน้ำหนัก 70 กิโลกรัมควรได้รับ CLA ปริมาณ 3 กรัม/วัน เพื่อให้ได้ผลดังกล่าวจึงมีการผลิต CLA ด้วยวิธีการทางเคมีโดยใช้ปฏิกิริยา alkaline isomerization รวมทั้งมีการศึกษาวิธีการเพิ่ม CLA ในอาหาร เช่น การใช้แบคทีเรียกรดแลกติกซึ่งมีเอนไซม์ isomerase และ desaturase และการใช้ความร้อนร่วมกับความดันในกระบวนการแปรรูป

เอกสารอ้างอิง

Adlof, R. O. (1999). The lindlar-catalyzed reduction of methyl santalbate: A facile preparation of methyl 9-cis,11-trans-octadecadienoate-9, 10-d_2. J. Am. Oil Chem. Soc. 76: 301-304.

Alfaia, C. P. M., Alves, S. P., Martins, S. I. V., Costa, A. S. H., Fontes, C. M. G. A., Lemos, J. P. C., Bessa, R. J. B. and Prates, J. A. M. (2009). Effect of the feeding system on intramuscular fatty acids and conjugated linoleic acid isomers of beef cattle with emphasis on their nutritional value and discriminatory ability. Food Chem. 114: 939-946.

Arab, K. R A., Soulere, L. and Steghens, J. P. (2006). Conjugated linoleic acid, unlike other unsaturated fatty acids, strongly induces glutathione synthesis without any lipoperoxidation. J. Nutr. 96: 811-9.

Azain, M. J., Hausman, D. B., Sisk, M. B., Flatt, W. P., and Jewell, D. E. (2000). Dietary conjugated linoleic acid reduces rat adipose tissue cell size rather than cell number. J. Nutr. 130: 1548-1554.

Banni, S., Angioni, E. Murru, E., Carta, G., Melis, M. P., Bauman, D., Dong, Y. And Ip, C. (2001). Vaccenic acid feeding increase tissue levels of conjugated linioleic acid and suppresses development of premalignant lesions in rat mammary gland. Nutr. Cancer. 41: 91-97.

Bauman, D. E., Baumgard, L. H., Corl, B. A., and Griinari, J. M. (1999). Biosynthesis of conjugated linoleic acid in ruminants. Proceeding of the American Society of Animal Science. 1-15.

Belury, M. A. (2002). Dietary conjugated linoleic acid in health: physiological effects and mechanisms of action. Annu Rev Nutr. 22: 505-531.

Bernas, A., Kumar, N., M?kArevela, P., Kul'kova, N. V., Holmbom, B., Salmi, T., and Murzin, D. Y. (2003). Isomerization of linoleic acid over supported metal catalysts. Appl. Catal. 6483: 1-19.

Berven, G., Bye, A., Hals, O., Blankson, H., Thom, E., Wadstein, J. and Gudmundsen, O. (2000). Safety of conjugated linoleic acid (CLA) in overweight or obese human volunteers. Eur. J. Lipid Sci. Technol. 102: 455-462.

Blankson, H., Stakkestad, J., Fagertum, H., Thom, E., Wadstein, J. and Gudmundsen, O. (2000). Conjugated linoleic acid reduces body fat mass in overweight and obese human. J. Nutr. 130: 2943-2948.

Decker, E. A. (1995). The role of phenolics, conjugated linoleic acid, carnosine, and pyrroloquinoline quinone as nonessential dietary antioxidants. Nutr. Res. 53(3): 49-58.

Fagali, N. and Catalá, A. (2008). Antioxidant activity of conjugated linoleic acid isomers, linoleic acid and its methyl ester determined by photoemission and DPPH techniques. Biophysical Chemistry. 137(1): 56-62.

Fernie, C. E. Conjugated linoleic acid. (2003). Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition. 1581-1587.

Fuente, J. D., Díaz, M. T., Álvarez, I., Oliver, M. A., Furnols, M. F., Sanñudo, C., Campo, M. M., Montossi, F., Nute, G. R. and Cañeque, V. (2009). Fatty acid and vitamin E composition of intramuscular fat in cattle reared in different production systems. Meat Sci. 82: 331-337.

Griinari, J. M., Corl, B. A., Lacy, S. H., Chouinard, P. Y., Nurmela, K. V. V. and Bauman, D. E. (2000). Conjugated linoleic acid is synthesized endogeneously in lactating dairy cows by * ^{9}-desaturase. J. Nutr., 130: 2285-2291.

Ha, Y. L., Grimm, N. K., and Pariza, M. W. (1989). Newly recognized anticarcinogenic fatty acids: Identification and quantification in natural and processed cheese. J. Agric. Food Chem. 37(1): 75-81.

Ha, Y. L., Storkson, J., and Pariza, M. W. (1990). Inhibition of benzo(a)pyrene-induced mouse forestomach neoplasia by conjugated dienoic derivatives of linoleic acid. Cancer Res. 50: 1097-1101.

Ip, C., Chin, S. F., Scimeca, A., and Pariza, M. W. (1991). Mammary cancer prevention by conjugated dienoic derivative of linoleic acid. Cancer Res. 51: 6118-6124.

Juárez, M., Failla, S., Ficco, A., Peña, F., Avileés, C. And Polvillo, O. (2009). Buffalo meat composition as affected by different cooking methods. Food and Bioproducts Processing. In press.

Jung, M. O., Yoon, S. H., and Jung, M. Y. (2001). Effect of temperature and agitation rate on the formation of conjugated linoleic acids in soybean oil during hydrogenation process. J. Agri. Food Chem. 49(6): 3010-3016.

Kepler, C. R. and Tove, S. B. (1967). Biohydrogenation of unsaturated fatty acids. J. Biol. Chem. 242(24): 5686-5691.

Kritcevsky, D., Tepper, S. A., Wright, S. and Czarnecki, S.K. (2002). Influence of graded levels of conjugated linoleic acid (CLA) on experimental atherosclerosis in rabbits. Nutr. Res. 22(11): 1275-1279.

Larock, R. C., Dong, X., Chung, S., Reddy, C. K., and Ehlers, E. (2001). Preparation of conjugated soybean oil and other natural oils and fatty acids by homogeneous transition metal catalysis. J. Am. Oil Chem. Soc. 78(5): 447-453.

Liew, C., Schut, H. A. J., Chin, S. F., Pariza, M. W., and Dashwood, R. H. (1995). Protection of conjugated linoleic acids against 2-amino-3-methylimidazo[4,5-f]quinoline-induced colon carcinogenesis in the F344 rat: a study of inhibitory mechanisms. Carcinogenesis 16: 3037-3043.

Lin, H., Boylston, T. D., Chang, M. J., Luedecke, L. O., and Shultz, T. D. (1995). Survey of the conjugated linoleic acid contents of dairy products. J. Dairy Sci. 78: 2358-2365.

Lin, T. Y., Lin, C. W. and Wang, T. J. (2002). Linoleic acid isomerase activity in enzyme extracts from *Lactobacillus acidophilus and Propionibacterium fredenreichii* spp shermanii. J. Food Sci. 67(4): 1502-1505.

Lin, T. Y., Lin, C. W. and Wang, T. J. (2003). Production of conjugated linoleic acid by enzyme extract of *Lactobacillus acidophilus CCRC 14079. Food* Chem. 83(1): 27-31.

Nakamura, Y. K. and Omaye, S. T. (2009). Conjugated linoleic acid isomers' role in the regulation of PPAR-γ and NF-κ B DNA binding and subsequent expression of antioxidant enzymes in human umbilical vein endothelial cells. Nutrition. 25(7-8): 800-811.

Nichols, P. L., Herb, Jr.S. F., Riemenschneider, R. W. (1951). Isomers of conjugated fatty acids. I. Alkaline-isomerized linoleic acid. J. Chem. Soc. 73: 247-252.

Ntambi, J. M. (1999). Regulation of stearoyl-Co-A desaturase by polyunsaturated fatty acids and cholesterol. J. Lipid Res. 40: 1549-1558.

O'Shea, M., Lawless, F., Stanton, C. and Devery, R. (1998). Conjugated linoleic acid in bovine milk fat: a food-based approach to cancer chemoprevention. Trends in Food Sci and Tech. 9: 192-196.

Pariza, M. W., and Hargraves, W. A. (1985). A beef-derived mutagenesis modulator inhibits initiation of mouse epidermal tumors by 7, 12-dimethylbenz[a] anthracene. Carcinogenesis. 8: 591-593.

Palaniappan, P., Intarapichet, K., Fernando, L. and Grieen, L. (2005). Effects of Rhodium Heterogeneous catalyst and isomerization conditions on linoleic acid conjugation of soybean oil. J. Agric. Food Chem. 53: 923-927.

Palaniappan, P., Intarapichet, K. and Tongta, S. (2007). Effect of Extrusion Parameters on Conjugated Linoleic Acids of Corn Extrudates. J. Agric. Food Chem. 55: 1463-1468.

Rainer L. and Heiss, C. J. (2000). Conjugated linoleic acid: Health implications and effects on body composition. J. The American Dietetic Association. 104: 963-968.

Savchenko, V. I., and Makaryan, I. A. (1999). Palladium catalyst for the production of pure margarine. Palatinum Metals Rev. 43(2): 74-82.

Shantha, N. C., Ram, L. N., O'leary, J., Hicks, C. L., and Decker, E. A. (1995). Conjugated linoleic acid concentrations indairy products as affected by processing and storage. J. Food Sci. 60(4): 695-720.

Sidwell, A., Hiebert, N and Swain, R. A. (2008). Conjugated Linoleic Acid (CLA) inhibits new vessel growth in the mammalian brain. Brain Res. 1213(5): 35-40.

Stachowska, E. Baskiewicz-Masiuk, M. Dziedziejko, V. Gutowska, I., Baranowska-Bosiacka, I. and Marchlewicz, M. (2008). Conjugated linoleic acid increases intracellular ROS synthesis and oxygenation of arachidonic acid in macrophages. Nutr. 24: 187-199.

Sofi, F., Buccioni, A., Cesari, F., Gori, A. M., Minieri, S. Mannini, L., Casini, A., Gensini, G. F., Abbate, R. and Antongiovanni, M. (2009). Effects of a diary product (pecorino cheese) naturally rich in cis-9, trans-11 conjugated linoleic acid on lipid, inflammatory and haemorheological variables: A dietary intervention study. Nutr. Met.Cardio. Dis. In press.

Talpur, F. N., Bhanger, M. I. and Memon, N. N. (2009). Milk fatty acid composition of indigenous goat and ewe breeds from Sindh, Pakistan. J. Food Compo. Anal. 22(1): 59-64.

Yu, Y. and Vanden Heuvel, J. P. (2002). Conjugated linoleic acid decreases production of pro-inflammatory products in macrophages: evidence for a PPAR gamma-dependent mechanism. Biochem Biophys Acta. 1581: 89-99.

Zapletal, D., Chládek, G. And Šubrt. (2009). Breed variation in the chemical and fatty acid compositions of the Longissimus dorsi muscle in Czech Fleckvieh and Montbeliarde cattle. Livestock Science. 123: 28-33.

Zhou, X. R., Sun, C. H. Liu, J. R. and Zhao, D. (2008). Dietary conjugated linoleic acid increases PPARγ gene expression in adipose tissue of obese rat, and improves insulin resistance. Growth Hormone and IGF Res. 18(5): 361-368.

Zu, H. X., and Schut, H. A. J. (1992). Inhibition of 2-amino-3-methylimidazo[4,5-f]quinoline-DNA adduct formation in CDF mice by heat-altered derivatives of linoleic acid. Food Chem. Tox. 30(1): 9-16.

ว.วิทย. มข. 38(1) 36-49 (2553) KKU Sci. J.38(1) 36-49 (2010)

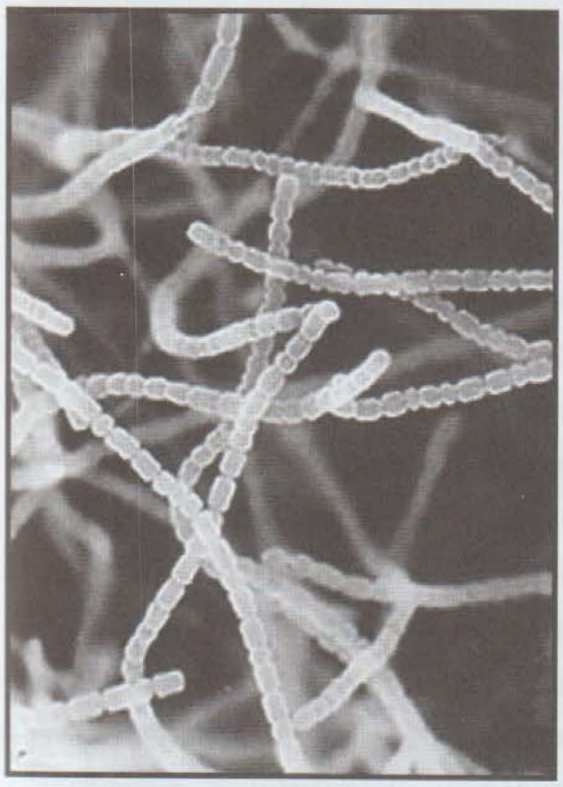
แอคติโนมัยสีทในทะเล: แหล่งของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพชนิดใหม่

Marine Actinomycetes: Source Of Novel Natural Products

กรรรณิการ์ ดวงมาลย์ [1] และวสุ ปฐมอารีย์ [2]*

แอคติโนมัยสีท (actinomycete) เป็นแบคทีเรียแกรมบวกที่มีปริมาณเบสก้วนีนและไซโตซีน (G+C content) ในจีโนมมากกว่าร้อยละ 55 ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นเส้นสาย จัดอยู่ใน *class Actinobacteria* (Stackebrandt et al., 1997) สามารถพบได้ทั่วไปในธรรมชาติ โดยเฉพาะในดิน มีบทบาทสำคัญในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในธรรมชาติ รวมถึงสารที่มีโครงสร้างที่ย่อยสลายยาก เช่น ไคติน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ทำให้เกิดความสมดุลในระบบนิเวศ และบทบาทสำคัญที่สุดคือ เป็นแหล่งของยาปฏิชีวนะจำนวนมากที่ใช้เป็นยารักษาโรคในปัจจุบัน เช่น คลอแรมเฟนิคอล (chloramphenical) สเตรพโตมัยซิน (streptomycin) และเตตราซัยคลิน (tetracycline) เป็นต้น (Goodfellow and Simpson, 1987) การศึกษาและการค้นหาสารปฏิชีวนะจากแอคติโนมัยสีทเริ่มต้นตั้งแต่มีการค้นพบสเตรพโตมัยซินจาก *Streptomyces griseus* (รูปที่ 1) ซึ่งคัดแยกมาจากดิน โดยนักชีวเคมีชาวอเมริกัน Selman Waksman และคณะ เมื่อปี ค.ศ. 1943 จากนั้นนักวิทยาศาสตร์ก็ให้ความสนใจในการค้นหาสารปฏิชีวนะชนิดใหม่ๆ จากแอคติโนมัยสีทกันมากขึ้น ในปัจจุบันสารปฏิชีวนะเกือบร้อยละ 70 ซึ่งมีจำนวนมากกว่า 10,000 ชนิด ผลิตมาจากแบคทีเรียในกลุ่มแอคติโนมัยสีท และ *Streptomyces* เป็นสกุลที่มีความสามารถในการผลิตสารปฏิชีวนะได้มากเป็นอันดับที่หนึ่ง ส่วนอันดับรองลงมาได้แก่สมาชิกของ Family *Micromonosporaceae* (Bérdy, 2005)

[1]ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900
[2]ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200
*Corresponding Author, E-mail: wasu@chiangmai.ac.th



รูปที่ 1 ลักษณะของ *Streptomyces griseus* M-1027 ที่ผลิตสารสเตรพโตมัยซิน ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (ที่มา http://www.nih.go.jp/saj/DigitalAtlas/)

ในช่วงเวลา 20 กว่าปีที่ผ่านมา มีรายงานว่าจำนวนชนิดของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากแอคติโนมัยสีทที่จะนำไปพัฒนาเป็นยารักษาโรคมีแนวโน้มลงลง โดยสารที่ค้นพบส่วนใหญ่มักเป็นสารชนิดเดิมที่เคยมีรายงานมาแล้ว หรือแอคติโนมัยสีทที่คัดแยกได้เป็นสายพันธุ์เดิม ในขณะที่มีการเพิ่มขึ้นของโรคอุบัติใหม่หรือจำนวนจุลินทรีย์ดื้อยาที่มีเพิ่มมากขึ้นทำให้ยาปฏิชีวนะที่มีอยู่ใช้ไม่ได้ผล ดังนั้นการค้นหายาปฏิชีวนะชนิดใหม่ให้ทันกับการเพิ่มขึ้นของโรคเหล่านี้จึงเป็นสิ่งเร่งด่วนที่นักวิทยาศาสตร์ให้ความสนใจและศึกษากันอย่างจริงจัง ถึงแม้ว่าการผลิตยารักษาโรคนั้นจะสามารถใช้วิธีทางเคมีในการสังเคราะห์เพื่อเลียนแบบสารจากธรรมชาติได้ แต่เป็นที่ยอมรับกันว่าสารที่ได้มาจากจุลินทรีย์มีโครงสร้างที่ซับซ้อนและหลากหลายมากกว่าสารที่มาจากวิธีการสังเคราะห์ทางเคมี (Henkel et al., 1999) และในปัจจุบันการศึกษาและพัฒนายาชนิดใหม่จากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ (natural product) ที่จะนำมาใช้ในมนุษย์นั้นก็ใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่าสมัยก่อนมาก

การศึกษาทางด้านความหลากหลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์และการจัดจำแนกจุลินทรีย์ (microbial systematics) ทำให้ทราบถึงหนทางที่จะนำไปสู่ การค้นพบสารชนิดใหม่ๆ รวมถึงยีนที่ควบคุมการสร้างสารหรือผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด ดังนั้นการค้นหาสารปฏิชีวนะชนิดใหม่ ไม่ว่าจะเป็นสารต้านจุลินทรีย์ดื้อยา สารต้านมะเร็งหรือสารต้านไวรัส จึงมุ่งเป้าหมายมาที่นิเวศวิทยาหรือแหล่งที่อยู่ของจุลินทรีย์ที่มีการศึกษากันน้อย (Lazzarini et al., 2000) ซึ่งระบบนิเวศแหล่งหนึ่งที่น่าสนใจคือ ระบบนิเวศในทะเล (Bernan et al., 2004; Fiedler et al., 2005; Fenical and Jensen, 2006; Bull and Stach, 2007) โดยรายงานของ Fiedler และคณะ (2005) พบว่ามีสารทุติยภูมิมากกว่า 900 ชนิดที่คัดแยกได้จากแอคติโนมัยสีทในทะเล (marine actinomycetes)

แอคติโนมัยสีทในทะเล

ทะเลและมหาสมุทรเป็นผืนน้ำที่ครอบคลุมผิวโลกมากกว่าร้อยละ 70 เป็นแหล่งที่มีความหลากหลายทั้งในด้านแร่ธาตุ สารอาหาร ปริมาณออกซิเจน ความดัน ความเค็ม และอุณหภูมิ โดยมหาสมุทรเป็นส่วนของท้องทะเลที่มีความลึกมากกว่า 2,000 เมตร และมีบริเวณ Mariana Trench ในประเทศฟิลิปปินส์เป็นจุดที่มีความลึกมากที่สุดในโลกซึ่งมีความลึกประมาณ 10,915-10,920 เมตร ในอดีตเชื่อกันว่าพื้นล่างของมหาสมุทรไม่น่าจะมีสิ่งมีชีวิตอาศัยอยู่มากนัก แต่จากการศึกษาทางด้านชีววิทยาระดับโมเลกุลพบว่าบริเวณก้นมหาสมุทรมีความหลากหลายทางชีวภาพสูงมาก (Gontang et al., 2007) โดยเฉพาะกลุ่มของจุลินทรีย์ซึ่งต้องเป็น จุลินทรีย์ที่สามารถทนความดันได้สูงหรือสามารถปรับตัวให้เหมาะสมกับสิ่งแวดล้อมนั้น เนื่องจากความดันบรรยากาศใต้ทะเลจะเพิ่มขึ้น 1 บรรยากาศทุกระดับความลึกที่เพิ่มขึ้น 10 เมตร และจากสภาวะดังกล่าวน่าจะมีส่วนทำให้จุลินทรีย์ในระบบนิเวศทางทะเลสามารถสร้างสารทุติยภูมิ

ที่ไม่เหมือนในจุลินทรีย์ที่มีถิ่นอาศัยอยู่บนบก (Bernan et al., 2004) นอกจากจะพบแอคติโนมัยสีทที่อยู่ตามตะกอนดินใต้ทะเลและมหาสมุทรแล้ว ในน้ำทะเล (Lee, 2008) ป่าชายเลน (Tamura and Sakane, 2005; Thawai et al., 2008) ดินหาดทราย (Hong et al., 2008) และ ดินตามไหล่ทวีป (Huang et al., 2005) ก็เป็นแหล่งของแอคติโนมัยสีทที่มีผู้สนใจศึกษาและค้นหา แอคติโนมัยสีทชนิดใหม่เช่นกัน

อย่างไรก็ตามมีข้อสงสัยที่ยังไม่สามารถอธิบายได้ถึงการกระจายตัวและธรรมชาติของแอคติโนมัยสีทในทะเลหรือมหาสมุทรว่าแอคติโนมัยสีทที่พบในตะกอนใต้ทะเลนั้นมีที่มาจากแหล่งใด เป็นจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในแหล่งนั้นจริงๆ หรือเป็นเพียง แอคติโนมัยสีทบนบก (terrestrial) ที่ถูกพัดพามากับกระแสน้ำและไหลลงสู่ท้องทะเลจากนั้นจึงปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมด้วย lateral gene transfer หรือยังคงรอดชีวิตอยู่ในตะกอนในรูปสปอร์หรือโครงสร้างระยะพักตัว (resting propagules) (Bull et al., 2005) ข้อมูลที่สนับสนุนว่าแอคติโนมัยสีทที่อยู่ในทะเลอาจมาจากการพัดพาจากบนบก ได้แก่ การที่แอคติโนมัยสีทที่พบบนบกหลายชนิดสามารถเจริญได้ในสภาพที่มีความเข้มข้นของเกลือสูง ดังนั้นเมื่อถูกพัดพาลงสู่ทะเลจึงยังสามารถเจริญได้ในทะเล (Okazaki and Okami, 1975) หรือจากการที่พบว่าจำนวนแอคติโนมัยสีทในท้องทะเลลดลงตามระยะทางที่ห่างจากผืนดินมากขึ้น (Goodfellow and Haynes, 1984) แต่แนวคิดที่ว่าแอคติโนมัยสีทที่พบในตะกอนทะเลนั้นเป็นจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในแหล่งนั้นจริง ก็มีหลักฐานสนับสนุนจากการศึกษาด้วยเทคนิคระดับโมเลกุล (Moran et al., 1995; Gontang et al., 2007) และมีรายงานว่าแอคติโนมัยสีทจากทะเลบางชนิดต้องการน้ำทะเลในการเจริญ (Maldonado et al., 2005a) อย่างไรก็ตามต้องมีการศึกษากันต่อไปเพื่อหาหลักฐานมาสนับสนุนสมมติฐานดังกล่าว

ในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าทะเลเป็นแหล่งที่อยู่ของจุลินทรีย์และแอคติโนมัยสีท มีการประมาณกันว่ามีพื้นที่เพียง 1 ส่วนจาก 1012 ส่วนของผิวโลกส่วนที่เป็นผิวดินบนบกที่ถูกนำมาค้นหาแอคติโนมัยสีทและจากการศึกษาด้วยเทคนิคระดับโมเลกุลพบว่าจุลินทรีย์ที่เพาะเลี้ยงได้ในห้องปฏิบัติการมีจำนวนเพียงร้อยละ 1 ของจุลินทรีย์ทั้งหมดที่มีอยู่เท่านั้น ดังนั้นผิวโลกส่วนที่เป็นน้ำซึ่งมีมากกว่าส่วนผืนดินถึงประมาณ 2 เท่ายังคงเป็นส่วนที่ทำการค้นหาแอคติโนมัยสีทไม่มากเท่ากับพื้นดิน อย่างไรก็ตามจากข้อมูลในช่วง 10 กว่าปีที่ผ่านมา นักวิทยาศาสตร์ให้ความสนใจในการศึกษาแอคติโนมัยสีทจากทะเลมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากมีรายงานความสามารถของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ในการผลิตสารยับยั้งที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพซึ่งสามารถพัฒนามาเป็นยาปฏิชีวนะอย่างต่อเนื่อง (Fenical and Jensen, 2006) ปัจจุบันการศึกษาแอคติโนมัยสีทจากทะเลมีการกระจายตัวอยู่ทั่วโลกไม่ว่าจะเป็นออสเตรเลีย ทะเลแคริเบียน มหาสมุทรอินเดีย เกาะญี่ปุ่น ทะเลเมดิเตอเรเนียน มหาสมุทรแปซิฟิกตะวันตก หรือทะเลจีน ทำให้มีการค้นพบแอคติโนมัยสีทสกุลใหม่เป็นจำนวนมาก เช่น *Demequina* (Yi et al., 2007), *Ilumatobacter* (Matsumoto et al., 2009), *Marihabitans* (Kageyama et al., 2008), *Salinibacterium* (Han et al.,2003), *Salinispora* (Maldonado et al., 2005a), *Serinicoccus* (Yi et al., 2004) และ *Tessaracoccus* (Lee and Lee, 2008) เป็นต้น ตัวอย่างของแอคติโนมัยสีทที่แยกได้จากทะเลแสดงในตารางที่ 1 นอกจากนี้ยังมีการศึกษาแอคติโนมัยสีทสปีชีส์ใหม่ๆ จากแหล่งที่อยู่อาศัยข้างเคียงทั้งในโคลนน้ำตื้น ดินตะกอนน้ำลึก ดินในป่าชายเลน น้ำทะเล หรือแอคติโนมัยสีทที่อาศัยแบบพึ่งพากับพืชหรือสัตว์ที่อยู่ในระบบนิเวศทางทะเลนั้น

นอกจากแหล่งที่มาของตัวอย่างแล้ว การที่จะเพิ่มโอกาสในการค้นพบแอคติโนมัยสีทสายพันธุ์ใหม่ๆ ยังขึ้นกับวิธีการคัดแยกเชื้อด้วย เช่น การนำตัวอย่างที่จะคัดแยกเชื้อมาทำ pretreatment ด้วยอุณหภูมิ การใช้สารเคมี หรือการทำให้อนุภาคของดินกระจายตัวจนเชื้อหลุดออกมาจากอนุภาคของดิน ซึ่งพบว่าสามารถทำให้เปอร์เซ็นต์ของแอคติโนมัยสีทที่คัดแยกออกมาได้เพิ่มขึ้นหลายเท่าจากการคัดแยกด้วยวิธีการปกติ การนำ

ส่วนผสมที่มาจากสิ่งแวดล้อมนั้น เช่น น้ำทะเล ตะกอนดิน ผสมลงในอาหารคัดแยกเชื้อ หรือการคัดแยกแอคติโนมัยสีทบางชนิดที่อาศัยร่วมกับฟองน้ำทะเล (sponge symbiotic) จะมีการเติมสารสกัดจากฟองน้ำทะเล (marine sponge) ผสมลงไปด้วยพบว่าสามารถคัดแยกแอคติโนมัยสีทชนิดใหม่ได้ถึง 42 % เมื่อเทียบกับวิธีการทั่วไปที่คัดแยกเชื้อได้เพียงร้อยละ 7 เท่านั้น การศึกษาแอคติโนมัยสีทโดยอาศัยเทคนิคการเพาะเลี้ยงเชื้อร่วมกับเทคนิคทางโมเลกุลจะช่วยทำให้ข้อมูลด้านความหลากหลายทางชีวภาพของแอคติโนมัยสีทที่พบในทะเลมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น เช่น การศึกษาฟองน้ำทะเลในสกุล *Xestosporangia* พบว่าเมื่อใช้เทคนิคทางโมเลกุล พบแอคติโนมัยสีทที่อาศัยอยู่ในฟองน้ำชนิดนี้ประมาณร้อยละ12 ของจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด แต่เมื่อศึกษาด้วยการเพาะเลี้ยงพบว่าสามารถเพาะเลี้ยงแอคติโนมัยสีทได้เพียง 3 สกุลเท่านั้นได้แก่ *Brachybacteria, Gordonia* และ *Micrococcus* หรือในงานวิจัยของ Gontang และคณะ (2007) ซึ่งศึกษาความหลากหลายทางชีวภาพของแบคทีเรียแกรมบวกในตะกอนทะเล พบว่าประมาณร้อยละ 65 ของสายพันธุ์ที่คัดแยกได้เป็น แอคติโนมัยสีทและในจำนวนนี้มีร้อยละ 23 ที่เป็นสายพันธุ์ใหม่ นอกจากนี้แอคติโนมัยสีทยังพบได้ในทุกระดับความลึกของมหาสมุทร เช่น ที่ความลึกมากกว่า 6,000 เมตร ก็ยังพบแอคติโนแบคทีเรียที่เพาะเลี้ยงได้ คิดเป็นร้อยละ 0.5-0.8 ของแบคทีเรียทั้งหมด หรือจากรายงานพบว่าในดินตะกอนจาก Northern Atlantic ocean พบแอคติโนมัยสีทคิดเป็น 14% ของแบคทีเรียทั้งหมด (Bull et al., 2005)

ตารางที่ 1 ตัวอย่างของแอคติโนมัยสีทที่แยกได้จากทะเลตั้งแต่ปี ค.ศ.1984-2008

แอคติโนมัยสีท	แหล่งที่พบ	ความลึก (ม.)	ปีที่พบ (ค.ศ.)	เอกสารอ้างอิง
Actinopolyspora	Alibag coast, India	ไม่ระบุ	2004	Kokare et al. (2004)
Aeromicrobium marinum	German Wadden Sea	ไม่ระบุ	2003	Bruns et al. (2003)
Brevibacterium marinum	Seawater, Korea	ไม่ระบุ	2008	Lee (2008)
Corynebacterium	Okinawa Trough	1,393	1998	Colquhoun et al. (1998)
Demequina aestuarii	Tidal flat sediment, Korea	ไม่ระบุ	2007	Yi et al. (2007)
Dermacoccus abysii, D. barathri, D. profundii	Mariana Trench Northwest Pacific Ocean	10,898	2006	Pathom-aree et al. (2006c,d)
Dietzia maris	Mariana Trench	10,898	1997	Takami et al. (1997)
	Northwest Pacific Ocean		1998	Colquhoun et al. (1998)
Gordonia	Izu Bonin Trench	2,679	1998	Colquhoun et al. (1998)
Kocuria marina	Troitsa Bay, East Sea, Korea	ไม่ระบุ	2004	Kim et al. (2004)
Marihabitans asiaticum	Surface seawater, Japan	ไม่ระบุ	2008	Kageyama et al. (2008)

ตารางที่ 1 (ต่อ)

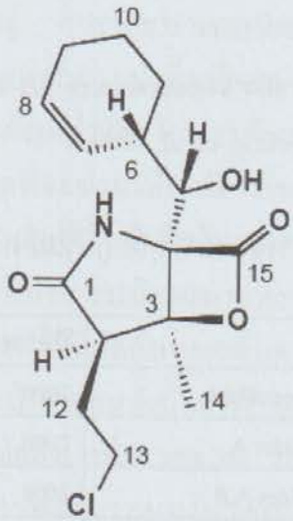
แอคติโนมัยสีท	แหล่งที่พบ	ความลึก (ม.)	ปีที่พบ (ค.ศ.)	เอกสารอ้างอิง
Microbacterium maritypicum	Seawater	ไม่ระบุ	1998	Takeuchi and Hatano, (1998)
Micromonospora	North Beach, Aberystwyth, UK	0.05-0.2	2004	Zhao et al. (2004)
Nocardioides aestuarii	Ganghwa Island, Korea	ไม่ระบุ	2004	Yi and Chun (2004)
Nocardiopsis aegyptia	Abu Qir Bay, Egypt	0.2	2004	Sabry et al. (2004)
Rhodococcus	Northwest Pacific Ocean	289-6,499	1998	Colquhoun et al. (1998)
Salinibacterium amurskyense	Amursky Bay, East Sea, Republic of Korea	5	2003	Han et al. (2003)
Salinispora arenicola, S. tropica	Bahamas	0-45	2005	Maldonado et al. (2005a)
Serinicoccus marinus	East Sea, Republic of Korea	ไม่ระบุ	2004	Yi et al. (2004)
Streptomyces	North Atlantic Ocean	158	1984	Goodfellow and Haynes (1984)
Streptosporangium	Suruga Bay, Japan	1,151	2005	Maldonado et al. (2005b)
Tessaracoccus flavescens	Marine sediment, Korea	ไม่ระบุ	2008	Lee and Lee (2008)
Tsukamurella	Mariana Trench Northwest Pacific Ocean	10,898	2006	Pathom-aree et al. (2006a)
Verrucosispora	Sea of Japan	289	2004	Riedlinger et al. (2004)
Williamsia maris	Sea of Japan	289	2004	Stach et al. (2004)
Williamsia mariannensis	Mariana Trench Northwest Pacific Ocean	10,898	2006	Pathom-aree et al. (2006b)

นอกจากดินตะกอนในทะเลหรือมหาสมุทรแล้ว ป่าชายเลนก็เป็นอีกแหล่งที่น่าสนใจในการค้นหาแอคติโนมัยสีท ป่าชายเลนเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญยิ่งของระบบนิเวศชายฝั่ง เป็นสังคมพืชที่ประกอบด้วยพรรณไม้หลายชนิด มีความหลากหลายทางชีวภาพสูงทั้งชนิดของพืช สัตว์ และจุลินทรีย์เป็นส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างระบบนิเวศบนบกและนิเวศทางทะเล จากการที่มีน้ำขึ้นและน้ำลงอยู่ตลอดเวลาทำให้เกิดการทับถมของตะกอนดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ แอคติโนมัยสีทสกุลใหม่ที่พบจากดินรอบรากพืชในป่าชายเลนของปากแม่น้ำบนเกาะในประเทศญี่ปุ่นเช่น สกุล *Polymorphospora* (Tamura et al., 2006)

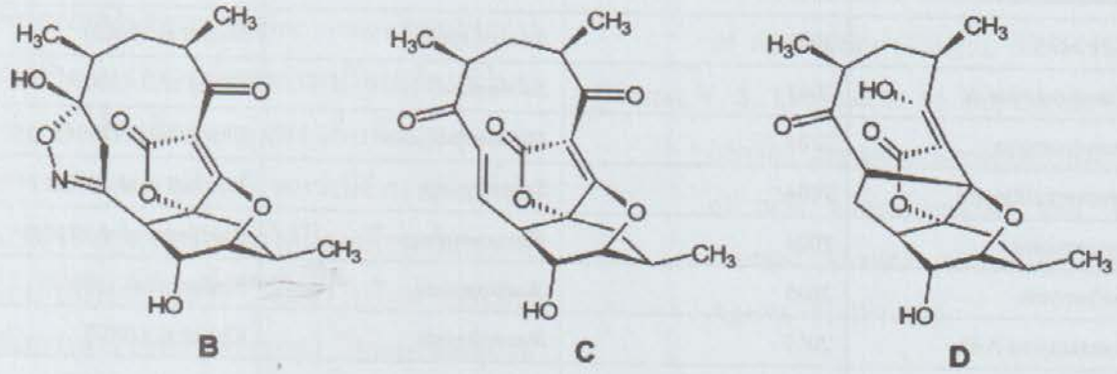
ส่วนในประเทศไทยมีรายงานการค้นพบสปีชีส์ใหม่ที่ชื่อ *Micromonospora krabiensis* ซึ่งคัดแยกได้จากดินชายฝั่งทะเล (Jongrungruangchok et al., 2008)

สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากแอคติโนมัยสีทในทะเล

อาจกล่าวได้ว่าแอคติโนมัยสีทจากทะเลเป็นแหล่งของสารปฏิชีวนะที่สำคัญ ตัวอย่างของแอคติโนมัยสีทที่คัดแยกได้จากทะเลที่ผลิตสารซึ่งกำลังมีการพัฒนาเพื่อใช้กับมนุษย์เช่น *Salinispora tropica* strain CNB-440 เป็นสายพันธุ์ที่ต้องการน้ำทะเลในการเจริญ คัดแยกได้มาจากตะกอนทะเลแคริเบียน (Mincer et al., 2002) จากการศึกษาอย่างต่อเนื่องพบว่า *Salinispora tropica* strain CNB-440 สามารถสร้าง salinosporamide A (รูปที่ 2) ซึ่งเป็นสารที่มีลักษณะเด่นและมีแนวโน้มสูงที่จะนำมาใช้เป็นสารต่อต้านมะเร็งได้ (Feling et al., 2003) ขณะนี้อยู่ในระยะแรกของการทดลองยาใหม่ในมนุษย์ โดยศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาทางเคมีของยาและความปลอดภัยของยา (phase 1 trial) ทำให้มีผู้พยายามค้นหาแอคติโนมัยสีทในสกุลนี้จากทะเลกันมากขึ้น ซึ่งจากรายงานพบว่าถึงแม้จะเป็นสกุล *Salinispora* เหมือนกันแต่ความสามารถในการผลิตสารทุติยภูมิแตกต่างกันได้ โดย *Salinispora* ซึ่งคัดแยกได้จากแหล่งต่างกันแต่มีเพียง *S. tropica* ชนิดที่แยกมาจากมหาสมุทรแคริเบียนเท่านั้นที่สามารถผลิตสารต้านมะเร็งชนิด salinosporamide A ได้ หรือสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพชนิดใหม่ที่ชื่อว่า abyssomicin (รูปที่ 3) ผลิตจาก *Verrucosispora* (รูปที่ 4) เป็นสารที่มีผลในการยับยั้ง papa-aminobenzoic acid pathway และ methicillin resistant staphylococci ค้นพบในปี ค.ศ. 2004 (Riedlinger et al., 2004) หรือ thiocoraline เป็นยาต้านมะเร็งที่ผลิตโดย marine *Micromonospora* รายงานโดย Romero และคณะ (1997) และอยู่ในขั้นการประเมินระดับพรีคลีนิค ตัวอย่างของสารทุติยภูมิชนิดอื่นที่มีแหล่งที่มาจากแอคติโนมัยสีทที่แยกได้จากทะเลที่มีการรายงานในช่วงตั้งแต่ปีค.ศ. 2000 เป็นต้นมา แสดงในตารางที่ 2

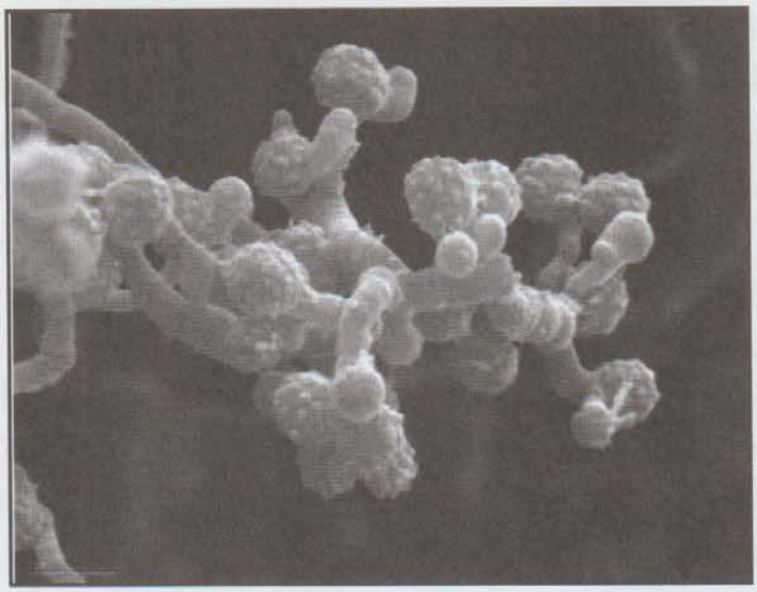


รูปที่ 2 โครงสร้างของสาร salinosporamide A ที่ผลิตโดย *Salinispora* (ที่มา Fiedler et al., 2005)



Abyssomicins

รูปที่ 3 โครงสร้างของ abyssomicin B, C และ D ที่ผลิตโดย *Verrucosispora* AB-18-032 (ที่มา Fiedler et al., 2005)



รูปที่ 4 ลักษณะของ *Verrucosispora* AB-18-032 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด. สเกล =1 ไมโครเมตร (ที่มา Feling et al., 2003)

ตารางที่ 2 ตัวอย่างของสารทุติยภูมิที่ผลิตโดยแอคติโนมัยสีทที่แยกได้จากทะเลในช่วงปี ค.ศ. 2000-2008

สาร	ปีที่รายงาน	แอคติโนมัยสีท	เอกสารอ้างอิง
Glycoglycerolipids	2000	*Microbacterium*	Wicke et al. (2000)
Kanakamides A	2000	*Nocardiopsis*	Hardt et al. (2000)
Lorneamides A,B	2000	*Streptomyces*	Capon et al. (2000)
Nitrile hydrolyzing enzymes	2001-2002	*Rhodococcus*	Heald et al.(2001); Brandao et al. (2002)
IB-00208;Chandrananimycins A-C	2003	*Actinomadura*	Malet-Cascon et al. (2003)
Nocathiacins I-III	2003	*Nocardia*	Leet et al. (2003)
MKN-349A	2003	*Nocardiopsis*	Shin et al. (2003)
Salinosporamide A	2003	*Salinispora*	Feling et al. (2003)
Diazepinomicin	2004	*Micromonospora*	Charan et al. (2004)
Aureoverticillactam	2004	*Streptomyces*	Mitchell et al. (2004)
Abyssomicins	2004	*Verrucosispora*	Riedlinger et al. (2004)
Lajollamycin	2005	*Streptomyces*	Manam et al. (2005)
Lucentamycin A-D	2007	*Nocardiopsis*	Cho et al. (2007)
Streptochlorin;Marmycin A,B	2007	*Streptomyces*	Martin et al. (2007)
Salinipyrone, Pacificanone	2008	*Salinispora*	Oh et al. (2008)
Proximicin A-C	2008	*Verrucosispora*	Fiedler et al. (2008)

นอกจากงานวิจัยจำนวนมากที่มุ่งคัดแยกแอคติโนมัยสีทจากดินตะกอนทะเล และป่าชายเลนแล้ว ยังมีแอคติโนมัยสีทที่เป็น specific symbiotic association กับสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในทะเล ฟองน้ำทะเล หรือพืชทะเล เช่น *Salinispora pacifica* เป็น แอคติโนมัยสีทที่อาศัยอยู่กับฟองน้ำทะเลที่ผลิต bioactive secondary metabolite ชนิดใหม่ที่มีชื่อว่า cyanosporasides A และ B และ cyano-cyclopenta (a) indene glycosides ได้ (Oh et al., 2006)

เนื่องจาก *Salinispora tropica* เป็นแอคติโนมัยสีทที่สามารถสร้าง salinosporamide A ได้ จึงมีผู้ศึกษาข้อมูลพันธุกรรมทั้งหมด (complete genome) ของสายพันธุ์ *Salinispora tropica* CN-440 ได้สำเร็จในเดือนเมษายน ค.ศ. 2007 (Udwary et al., 2007) พบว่าจีโนมของแอคติโนมัยสีทสายพันธุ์นี้มีขนาด 5.2 mbp ซึ่งเล็กกว่าจีโนมของ *Streptomyces coelicolor* ซึ่งเป็นแอคติโนมัยสีทสายพันธุ์แรกที่ทราบจีโนมที่สมบูรณ์ มีจีโนมขนาด 8.6 mbp นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์หาลำดับเบสในจีโนมของแอคติโนมัยสีทจากทะเลสายพันธุ์อื่นที่ยังระหว่างขั้นตอนการศึกษาได้แก่จีโนมของ *Salinispora arenicola* (CNS205 และ ATCC BAA917- http://www.genomesonline.org/gold.cgi?want=Bacterial+Ongoing+Genomes) เพื่อศึกษาถึงการสูญหายของยีน (gene lost) และการได้มาของยีนใหม่ (gene acquisition) ซึ่งน่าจะเป็นข้อมูลช่วยในการระบุแยกความแตกต่างของแอคติโนมัยสีทบนบก (terrestrial strain) และสายพันธุ์ในทะเล (marine strain) ออกจากกันได้ชัดเจนมากขึ้น นอกจากนี้จากการเปรียบเทียบจีโนมของ *S. tropica* โดยศึกษากลุ่มของยีนที่ควบคุมการสังเคราะห์สารประกอบ ทุติยภูมิ พบว่ามีจำนวนยีนที่ทำหน้าที่นี้จำนวน 17 กลุ่ม และล่าสุดได้มีการศึกษาวิเคราะห์ยีนที่เกี่ยวข้องกับการสร้างสาร เมตาโบไลต์ และยีนที่เกี่ยวข้องกับการดำรงชีพในทะเลของ "*Verrucosispora maris*" ซึ่งพบว่ามีกลุ่มของยีนที่ควบคุมการสังเคราะห์สารประกอบทุติยภูมิมากกว่า 20 กลุ่มซึ่งใกล้เคียงกับใน *Streptomyces coelicolor* (Stach, 2009-ติดต่อส่วนตัว)

กล่าวโดยสรุปจะเห็นได้ว่าแอคติโนมัยสีทจากทะเลเป็นแบคทีเรียที่มีประโยชน์อย่างยิ่งในการใช้เป็นแหล่งของสารปฏิชีวนะ ซึ่งการศึกษาและความรู้เกี่ยวกับการแพร่กระจายและบทบาทของแอคติโนมัยสีทในระบบนิเวศทางทะเลยังมีค่อนข้างน้อย ถึงแม้ว่าแอคติโนมัยสีทจะเป็นกลุ่มของจุลินทรีย์ที่ได้รับการศึกษามากกว่าจุลินทรีย์กลุ่มอื่นๆ ในด้านการเป็นผู้ผลิตยาปฏิชีวนะที่สำคัญ แต่หากพิจารณาจากปริมาณรายงานในวารสารวิชาการที่เกี่ยวข้องกับแอคติโนมัยสีทชนิดใหม่จากทะเลในแต่ละปี เป็นที่ชัดเจนว่ายังมีแอคติโนมัยสีทชนิดใหม่อีกเป็นจำนวนมากที่รอคอยการค้นพบอยู่ การพัฒนาเทคนิคในการตรวจหา การเพาะเลี้ยงและการบ่งชี้ชนิดของแอคติโนมัยสีทจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการค้นหาสารชนิดใหม่ และเป็นข้อมูลที่จะช่วยให้เรามีความเข้าใจถึงบทบาทและหน้าที่ของแอคติโนมัยสีทในทะเล ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศที่มีระบบนิเวศทางทะเลที่หลากหลาย ทั้งชายฝั่งทะเลด้านที่ติดกับทะเลอันดามันและอ่าวไทย ทะเลน้ำลึกและป่าชายเลน ดังนั้นการศึกษาความหลากหลายของแอคติโนมัยสีท เพื่อรวบรวม และค้นหาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากระบบนิเวศเหล่านี้ก็น่าจะพบแอคติโนมัยสีทสายพันธุ์ใหม่หรือสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพชนิดใหม่ที่จะนำมาพัฒนาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

Bérdy, J. (2005). Bioactive microbial metabolites. Journal of Antibiotics (Tokyo). 58: 1-26.

Bernan, V. S., Greenstein, M. and Carter, G. T. (2004). Mining marine microorganisms as a source of new antimicrobials and antifungals. Current Medical Chemistry-Anti-Infective Agents. 3: 181-195.

Brandão, P. F. B., Clapp, J. P. and Bull, A. T. (2002). Discrimination and taxonomy of geographically diverse strains of nitrile-metabolizing actinomycetes using chemometric and molecular sequencing techniques. Environmental Microbiology. 4: 262-276.

Bruns, A., Philipp, H., Cypionka, H. and Brinkhoff, T. (2003). *Aeromicrobium marinum* sp. nov., an abundant pelagic bacterium isolated from the German Wadden Sea. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 53: 1917-1923.

Bull, A. T. and Stach, J. E. M. (2007). Marine actinobacteria: new opportunities for natural product search and discovery. Trends in Microbiology. 15: 491-499.

Bull, A. T., Stach, J. E. M., Ward, A.C. and Goodfellow, M. (2005). Marine actinobacteria: perspectives, challenges and future directions. Antonie van Leeuwenhoek. 87: 65-79.

Capon, R. J., Skene, C., Lacey, E., Gill, J. H., Wicker, J., Heiland, K. and Friedel, T. (2000). Lorneamides A ans B: two new aromatic amides from a southern Australian marine actinomycete. Journal of Natural Products. 63: 1682-1683.

Charan, R. D., Schlingmann, G., Janso, J., Bernan, V., Feng, X. and Carter, G. T. (2004). Diazepinomicin, a new antimicrobial alkaloid from a marine *Micromonospora*. Journal of Natural Products. 67: 1431-1433.

Cho, J. Y., Williams, P. G., Kwon, H. C., Jensen, P. R. and Fenical, W. (2007). Lucentamycins A-D, cytotoxic peptides from the marine derived actinomycete *Nocardiopsis lucentensis*. Journal of Natural Products. 70: 1321-1328.

Colquhoun, J. A., Mexson, J., Goodfellow, M., Ward, A. C., Horikoshi, K. and Bull, A. T. (1998). Novel rhodococci and other mycolate actinomycetes from the deep sea. Antonie van Leeuwenhoek. 74: 27-40.

Feling, R. H., Buchanan, G. O., Mincer, T. J., Kauffman, C. A., Jensen, P. R. and Fenical, W. (2003). Salinosporamide A: A highly cytotoxic proteasome inhibitor from a novel microbial source, a marine bacterium of the new genus *Salinospora*. Angewante Chemie International Edition. 42: 355-357.

Fenical, W. and Jensen, P.R. (2006). Developing a new resource for drug discovery: marine actinomycete bacteria. Nature Chemical Biology. 2: 666-673.

Fiedler, H.-P., Bruntner, C., Bull, A. T., Ward, A. C., Goodfellow, M., Potterat, O., Puder, C. and Mihm, G. (2005) Marine actinomycetes as a source of novel secondary metabolites. Antonie van Leeuwenhoek. 87: 37-42.

Fiedler, H. P., C. Bruntner, J. Riedlinger, A. T. Bull, G. Knutsen, M. Goodfellow, A. Jones, L. Maldonado, W. Pathom-aree, W.,Biel, K. Schneider, S. Keller and R. D. Sussmuth 2008. Proximicin A, B and C, novel aminofuran antibiotic and anticancer compounds isolated from marine strains of the actinomycete *Verrucosispora*. Journal of Antibiotics (Tokyo). 61: 158-163.

Gontang, E. A., Fenical, W. and Jensen, P. R. (2007). Phylogenetic diversity of Gram positive bacteria cultured from marine sediments. Applied and Environmental Microbiology. 73: 3272-3282.

Goodfellow, M. and Haynes, J. A. (1984). Actinomycetes in marine sediments. In *Biological, Biochemical, and Biomedical Aspects of Actinomycetes*, pp. 452-472. Edited by L. Ortiz-Ortiz, L.F. Bojalil and V. Yakoleff. New York: Academic Press.

Goodfellow, M. and Simpson, K. E. (1987). Ecology of streptomycetes. Frontiers in Applied Microbiology 2: 97-125.

Han, S. K., Nedashkovzkaya, O. I., Mikhailov, V. V., Kim, S. B. and Bae, K. S. (2003). *Salinibacterium amurkyense* gen. nov., sp. nov., a novel genus of the family *Microbacteriaceae* from the marine environment. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 53: 2061-2066.

Hardt, I. H., Jensen, P. R. and Fenical, W. (2000). Neomarinone, and new cytotoxic marinone derivatives, produced by a marine filamentous bacterium (actinomycetales). Tetrahedron Letters. 41: 2073-2076.

Heald, S. C., Brandão, P. F. B., Hardicre, R. and Bull, A. T. (2001). Physiology, biochemistry and taxonomy of deep-sea nitrile metabolising *Rhodococcus* strains. Antonie van Leeuwenhoek. 80: 169-183.

Henkel, T., Brunne, R. M., Muller, H. and Reichel, F. (1999). Statisitical investigation into the structural complementarity of natural products and synthetic compounds. Angewandte Chemie-International Edition. 38: 643-647.

Hong, S. G., Lee, Y. K., Yim, J. H., Chun, J. and Lee, H. K. (2008). *Sanguibacter antarcticus* sp. nov., isolated from Antarctic sea sand. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 58: 50-52.

Huang, Y., Dai, X., He, L., Wang, Y-N., Wang, B-J., Liu, Z. and Liu, S-J. (2005). *Sanguibacter marinus* sp. nov., isolated from coastal sediment. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 55: 1755-1758.

Jongrungruangchok, S., Tanasupawat, S. and Kudo, T. (2008). *Micromonospora krabiensis* sp. nov., isolated from marine soil in Thailand. Journal of General and Applied Microbiology. *54: 127-33.*

Kageyama, A., Haga, T., Kasai, H., Shizuri, Y., Omura, S. and Takahashi, Y. (2008). *Marihabitans asiaticum* gen. nov., sp. nov., a meso-diamino pimelic acid-containing member of the family *Intrasporangiaceae*. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 58: 2429-2432.

Kim, S. B., Nedashkovskaya, O. I., Mikhailov, V. V., Han, S. K., Kim, K. O., Rhee, M. S. and Bae, K. S. (2004). *Kocuria marina* sp. nov., a novel actinobacterium isolated from marine sediment. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 54: 1617-1620

Kokare, C. R., Mahadik, K. R., Kadam, S. S. and Chopade, B. A. (2004). Isolation, characterization and antimicrobial activity of marine halophilic *Actinopolyspora* species AH1 from the west coast of India. Current Science. 86: 593-597.

Lam, K. S. (2006). Discovery of novel metabolites from marine actinomycetes. Current Opinion in Microbiology. 9: 245-251.

Lazzarini, A., Toppo, C.G. and Marinelli, F. (2000). Rare genera of actinomycetes as potential producers of new antibiotics. Antonie van Leeuwenhoek. 79: 399-405.

Lee, S. D. (2008). *Brevibacterium marinum* sp. nov., isolated from seawater. International Journal of Systematic and EvolutionaryMicrobiology. 58: 500-504.

Lee, D. W. and Lee, S. D. (2008). *Tessaracoccus flavescens* sp. nov., isolated from marine sediment. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 58: 785-789.

Leet, J. E., Li, W., Ax, H. A., Matson, J. A., Huang, S., Huang, R., Cantone, J. L., Drexler, D., Dalterio, R. A. and Lam, K. S. (2003). Nocathiacins, new thiazolyl peptide antibiotics from *Nocardia* sp. II. Isolation, characterization, and structure determination. Journal of Antibiotics (Tokyo). 56: 232-242.

Maldonado, L. A., Fenical, W., Goodfellow, M., Jensen, P. R., Kauffman, C. K. and Ward, A. C. (2005a). *Salinispora* gen nov., sp. nov., *Salinispora arenicola* sp. nov., and S. *tropica* sp. nov., obligate marine actinomycetes belonging to the family *Micromonosporaceae*. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 55: 1759-1766.

Maldonado, L. A., Stach J. E. M., Pathom-aree, W., Ward, A. C., Bull, A. T. and Goodfellow, M. (2005b). Diversity of cultivable actinobacteria in geographically widespread marine sediments. Antonie van Leeuwenhoek. 87: 11-18.

Malet-Cascon, L., Romero, F., Espliego-Vazquez, F., Gravalos, D. and Fernandez-Puentes, J. L. (2003). IB-00208, a new cytotoxic polyclyclic xanthone produced by a marine-derived *Actinomadura*. I. Isolation of the strain, taxonomy and biological activities. Journal of Antibiotics (Tokyo). 56: 219-225.

Manam, R. R., Teisan, S., White, D. J., Nicholson, B., Grodberg, J., Neuteboom, S. T. C., Lam, K. S., Mosca, D. A., Lloyd, G. K. and Potts, B. C. M. (2005). Lajollamycin, a nitro-tetraene spiro-β-lactone-γ-lactam antibiotic from the marine actinomycete *Streptomyces nodosus*. Journal of Natual Product. 68: 240-243.

Martin, G.D.A., Tan, L.T., Jensen, P.R., Dimayuga, R.E., Fairchild, C.R., Raventos-Suarez, C. and Fenical, W. (2007). Marmycins A and B, cytotoxic pentacyclic C-glycosides from a marine sediment-derived actinomycete related to the genus *Streptomyces*. Journal of Natural Products. 70: 1406-1409.

Matsumoto, A., Kasai, H., Matsuo, Y., Omura, S., Shizuri, Y. and Takahashi, Y. (2009). *Ilumatobacter fluminis* gen. nov., sp. nov., a novel actinobacterium isolated from the sediment of an estuary. Journal of General and Applied Microbiology. 55: 201-205.

Mincer, T. J., Jensen, P. R., Kauffman, C. A. and Fenical, W. (2002). Widespread and persistent populations of a major new marine actinomycete taxon in ocean sediments. Applied and Environmental Microbiology. 68: 5005-5011.

Mitchell, S. S., Nicholson, B., Teisan, S., Lam, K. S. and Potts, B. C. M. (2004). Aureoverticillactam, a novel 22-atom macrocyclic lactam from the marine actinomycete *Streptomyces aureoverticillatus*. Journal of Natural Products. 67: 1400-1402.

Moran, M. A., Rutherford, L. T. and Hodson, R. E. (1995). Evidence for indigenous *Streptomyces* populations in a marine environment determined with a 16S rRNA probe. Applied and Environmental Microbiology. 61: 3695-3700.

Oh, D. C., Gontang, E. A., Kauffman, C. A., Jensen, P. R. and Fenical, W. (2008). Salinipyrones and Pacificanones, mixed precursor polyketides from the marine actinomycete *Salinispora pacifica*. Journal of Natural Products. 71: 570-1402.

Oh, D. C., Williams, P. G., Kauffman, C. A., Jensen, P. R. and Fenical, W. (2006). Cyanosporasides A and B, chloro- and cyano-cyclopenta[a] indene glycosides from the marine actinomycete "*Salinospora pacifica*." Organic Letters. 8: 1021-1024.

Okazaki, T. and Okami, Y. (1975). Actinomycetes tolerant to increased NaCl concentration and their metabolites. Journal of Fermentation Technology. 53: 833-840.

Pathom-aree, W., Ward, A. C., Horikoshi, K., Bull, A. T. and Goodfellow, M. (2006a). Diversity of actinomycetes isolated from the Challenger Deep sediment (10898 m) from the Mariana Trench. Extremophiles. 10: 181-189 .

Pathom-aree, W., Nogi, Y., Sutcliffe, I. C., Ward, A. C., Horikoshi, K., Bull, A. T. and Goodfellow, M. (2006b). *Williamsia marianensis* sp. nov., a novel actinomycete isolated from the Mariana Trench. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 56: 1123-1126.

Pathom-aree, W., Y. Nogi, I. C. Sutcliffe, A. C. Ward, K. Horikoshi, A. T. Bull and M. Goodfellow. (2006c). *Dermacoccus abysii* sp. nov., a novel piezotolerant actinomycete isolated from the Mariana Trench. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 56: 1233-1237.

Pathom-aree, W., Y. Nogi, I. C. Sutcliffe, A. C. Ward, K. Horikoshi, A. T. Bull and M. Goodfellow. (2006d). *Dermacoccus barathri* sp. nov. and *Dermacoccus profundi* sp. nov., novel actinomycetes isolated from the deepest sea mud of Mariana Trench. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 56: 2303-2307.

Riedlinger, J., Reicke, A., Krismer, B., Zähner, H., Bull, A. T., Maldonado, L. A., Goodfellow, M., Bister, B., Bischoff, D., Süssmuth, R. D. and Fiedler, H. P. (2004). Abyssomicins, inhibitors of *para*-aminobenzoic acid pathway produced by the marine *Verrucosispora* strain Ab-18-032. Journal of Antibiotics (Tokyo). 57: 271-279.

Romero, F., Espliego, F., Baz, J. P., de Quesada, T. G., Grávalos, D., la Calle, F. and Fernández-Puentes, J. L. (1997). Thiocoraline, a new depsipeptide with antitumor activity produced by a marine *Micromonospora*. I. Taxonomy, fermentation, isolation, and biological activities. Journal of Antibiotics (Tokyo). 50: 734-737.

Sabry, S. A., Ghanem, N. B., Abu-Ella, G. A., Schumann, P., Stackebrandt, E. and Kroppenstedt, R. M. (2004). *Nocardiopsis aegyptia* sp. nov., isolated from marine sediment. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 54: 453-456.

Shin, J., Seo, Y., Lee, H. S., Rho, J. R. and Mo, S. J. (2003). A new cyclic peptide from a marine-derived bacterium of the genus *Nocardiopsis*. Journal of Natural Products. 66: 883-884.

Stach, J. E. M., Maldonado L. A., Ward, A. C., Bull, A. T. and Goodfellow, M. (2004). *Williamsia maris* sp. nov., a novel actinomycete isolated from the Sea of Japan. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 54: 191-194.

Stackebrandt, E., Rainey, F. A. and Ward-Rainey, N. L. (1997). Proposal for a new hierarchic classification system, *Actinobacteria* classis nov. International Journal of Systematic Bacteriology. 47: 479-491.

Takami, H., Inoue, A., Fuji, F. and Horikoshi, K. (1997). Microbial flora in the deepest sea mud of the Mariana Trench. FEMS Microbiology Letters. 152: 279-285.

Takeuchi, M. and Hatano, K. (1998). Proposal of six new species in the genus *Microbacterium* and transfer of *Flavobacterium marinotypicum* ZoBell and Upham to the genus *Microbacterium* as *Microbacterium maritypicum* comb. nov. International Journal of Systematic Bacteriology. 48: 973-982.

Tamura, T., Hatano, K. and Suzuki, K. (2006). A new genus of the family *Micromonosporaceae*, *Polymorphospora* gen. nov., with description of *Polymorphospora rubra* sp. nov. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 56: 1959-1964.

Tamura, T. and Sakane, T. (2005). *Asanoa iriomotensis* sp. nov., isolated from mangrove soil. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 55: 725-727.

Thawai, C., Tanasupawat and Kudo, T. (2008). *Micromonospora pattaloongensis* sp. nov., isolated from a Thai mangrove forest. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 58: 1516-1521.

Udwary, D. W., Zeigler, L., Asolkar, R. N., Singan, V., Lapidus, A., Fenical, W., Jensen, P. R. and Moore, B. S. (2007). Genome sequencing reveals complex secondary metabolome in the marine in the marine actinomycete *Salinispora tropica*. Proceedings of The National Academy of Sciences, USA. 104: 10376-10381.

Wicke, C., Huners, M., Wray, V., Nimtz, M., Bilitewski, U. and Lang, S. (2000). Production and structure elucidation of glycoglycerolipids from a marine sponge-associated *Microbacterium* species. Journal of Natural Products. 63: 621-626.

Yi, H. and Chun, J. (2004). *Nocardioides aestuarii* sp. nov., isolated from tidal flat sediment. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 54: 2151-2154.

Yi, H., Schumann, P., Sohn, K. and Chun, J. (2004). *Serinicoccus marinus* gen. nov., sp. nov., a novel actinomycete with L-ornithine and L-serine in the peptidoglycan. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 54: 1585-1589.

Yi, H., Schumann, P. and Chun, J. (2007). *Demequina aestuarii* gen. nov., sp. nov., a novel actinomycete of a suborden *Micrococcineae*, and reclassification of *Cellulomonas fermentans* Bagnara et al. 1985 as *Actinotalea fermentans* gen. nov., comb. nov. . International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 57: 151-156.

Zhao, H., Kassama, Y., Young, M., Kell, D.B. and Goodacre, R. (2004). Differentiation of *Micromonospora* isolates from a coastal sediment in Wales on the basis of Fourier Transform Infrared Spectroscopy, 16S rRNA sequence analysis, and the Amplified Fragment Length Polymorphism technique. Applied and Environmental Microbiology. 70: 6619-6627.

http://www.nih.go.jp/saj/Digital Atlas/

ว.วิทย. มข. 38(1) 50-60 (2553) KKU Sci. J.38(1) 50-60 (2010)

การกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ใต้ผิวดิน: บทบาทของธรณีฟิสิกส์ต่อปัญหาสภาวะโลกร้อน

Geological Storage of Carbon Dioxide: Role of Geophysics on the Global Warming Problem

สวัสดี ยอดขยัน[1]

บทนำ

การวิเคราะห์เชิงสถิติเกี่ยวกับอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกในช่วง 150 ปีที่ผ่านมา พบว่าอุณหภูมิโลกประจำปีค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 0.76 องศาเซลเซียส (IPCC, 2007) การพยากรณ์โดยหลักการเดียวกับอัตราการเติบโตทางเศรษฐกิจ แสดงให้เห็นว่ามนุษย์กำลังเผชิญหน้ากับการเปลี่ยนแปลงของสภาวะอากาศในตอนปลายของศตวรรษนี้ ซึ่งเป็นผล จากการที่อุณหภูมิของโลกเพิ่มขึ้นในช่วง 1.1-6.3 องศาเซลเซียส (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการพยากรณ์) (IPCC, 2007) เป็นที่ยอมรับกันว่าสาเหตุหลักของอุณหภูมิโลกที่เพิ่มขึ้นเกิดจากความเข้มข้นของก๊าซที่ทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจกเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน (CH_4) และไนตรัสออกไซด์ (N_2O) โดยเฉพาะการใช้พลังงาน เชื้อเพลิงจากฟอสซิลเป็นปัจจัยสำคัญที่เพิ่มความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ ดังนั้นการพัฒนา เทคโนโลยีสำหรับลดก๊าซเหล่านี้โดยการดักจับและกักเก็บ (capture and storage) จึงมีบทบาทสำคัญและมีศักยภาพ ในการตอบสนองต่อปัญหาโลกร้อน และเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่กำลังเป็นที่สนใจในปัจจุบัน ควบคู่กับการแก้ปัญหา โดยวิธีการอื่นๆ เช่น การเลือกใช้พลังงานทดแทน โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์หรือพลังงานนิวเคลียร์และ การพัฒนาการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า เป็นต้น

ปัจจุบันมีโครงการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ใต้ผิวดินขนาดใหญ่กำลังดำเนินการอยู่ ได้แก่ โครงการ Sleipne ในแหล่งก๊าซธรรมชาติที่ประเทศนอร์เวย์ (Chadwick et al., 2002) และโครงการ InSalah ในประเทศแอลจีเรี (IPCC, 2005) ส่วนโครงการอื่นๆอีกกว่า 50 โครงการที่มีขนาดเล็กกว่าและกระจายอยู่รอบโลกกำลังดำเนินการแล วางแผนอยู่ในขณะนี้ ตัวอย่างเช่น การปั๊มคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ชั้นหินอุ้มน้ำระดับลึกที่เมือง Frio ในมลรัฐเท็กซั ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่เมือง Otway ประเทศออสเตรเลีย ในแหล่งน้ำมันเก่าที่แหล่ง Weyburn ประเทศแคนาด (Davis et al., 2002) และในแหล่งน้ำมัน K12-B ที่ประเทศเนเธอร์แลนด์ (White et al., 2004; IPCC, 2005) เป็นต้ การดำเนินการโครงการเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าไม่มีอุปสรรคทางเทคนิคกีดขวางเทคโนโลยีนี้

[1] ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ. หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112
E-mail: sawasdee.y@psu.ac.th

นอกเหนือจากปัจจัยด้านเทคนิคและวิธีการแล้ว ความปลอดภัยและการยอมรับจากชุมชนก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาในการดำเนินการโครงการเหล่านี้ นั่นคือต้องมีระบบจัดการ ติดตามและตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของแหล่งกักเก็บและบริเวณข้างเคียง เช่น การเปลี่ยนแปลงความดัน อุณหภูมิ ตลอดจนติดตามการแผ่ขยายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือการรั่วไหลสู่ผิวดินและแผนแก้ปัญหาในกรณีที่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น

ในบทความนี้จะกล่าวถึงหลักการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ใต้ผิวดินและตัวอย่างการประยุกต์ใช้การสำรวจคลื่นไหวสะเทือนสำหรับเทคโนโลยีนี้ เพื่อให้ผู้อ่านได้ทราบถึงบทบาทของธรณีฟิสิกส์ที่มีต่อปัญหาสภาวะโลกร้อน การสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีคลื่นไหวสะเทือนอาศัยหลักการทำให้เกิดคลื่นไหวสะเทือนที่ผิวดินหรือใกล้ๆผิวดิน แล้ววัดผลการตอบสนอง ของคลื่นที่เดินทางไปใต้ผิวดินและกลับขึ้นสู่ผิวดิน เพื่อแปลความหมายถึงสภาพทางธรณีวิทยาใต้ผิวดินอันเกิดจากคุณสมบัติด้านความ ยืดหยุ่นที่แตกต่างกันของชั้นดินชั้นหิน วิธีการนี้นำมาประยุกต์สำหรับสำรวจหาบริเวณที่คาดว่าเป็นแหล่งกักเก็บน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ (Woodward, 1994) หาแหล่งน้ำบาดาล (Bradford et al., 1998;Francese et al., 2005) สำรวจวิศวกรรมธรณีและวิศวกรรมโยธา เพื่อหาความลึกของหินรากฐาน (Hunter et al., 1984) เป็นต้น

หลักการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นหิน

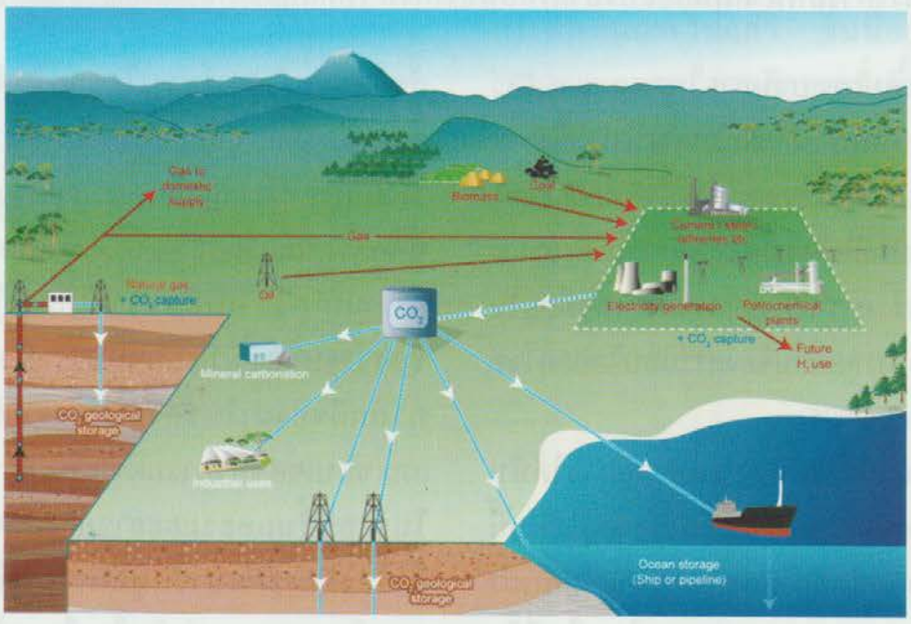
หลักการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นหินทำได้โดยการเก็บสะสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งต่างๆ แทนที่จะปล่อยสู่บรรยากาศ แล้วขนย้ายไปยังแหล่งกักเก็บและปั๊มลงไปเก็บไว้ที่ระดับความลึกหลายร้อยเมตรใต้ผิวดิน (รูปที่ 1) โดยตัวกลางที่มีความเหมาะสมสำหรับกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์จะต้องมีคุณสมบัติ ดังนี้ (Bachu, 2008)

1) ความจุ (capacity) หมายถึงชั้นหินจะต้องมีขอบเขตและปริมาตรมากพอที่จะรองรับการแผ่ขยายของคาร์บอนไดออกไซด์

2) ความสามารถในการรองรับการปั๊ม (injectivity) หมายถึงชั้นหินจะต้องมีเสถียรภาพต่ออัตราการปั๊มคาร์บอนไดออกไซด์

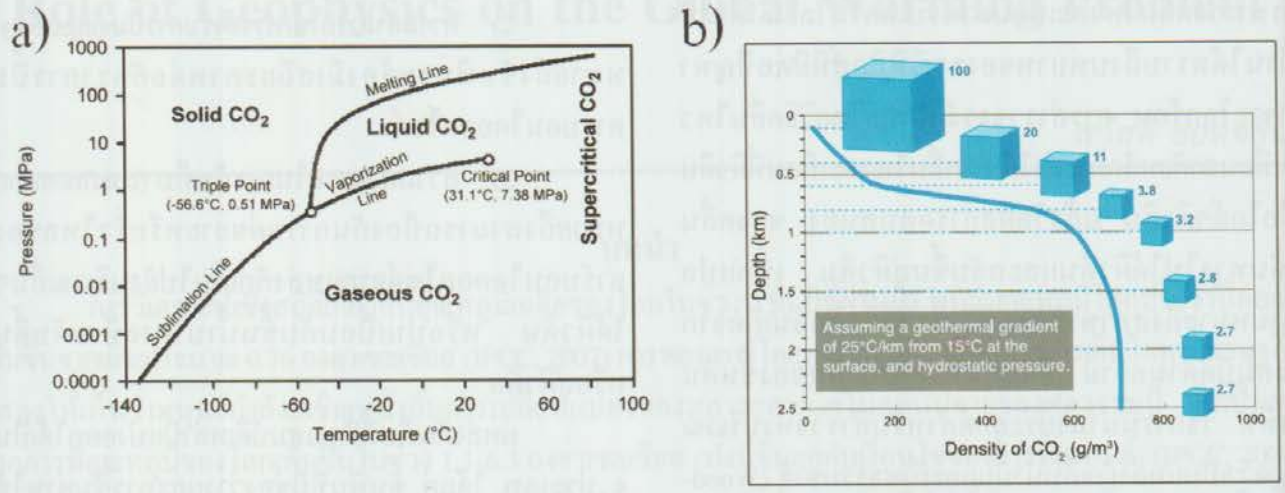
3) ความสามารถในการกักเก็บ (confinement) หมายถึงสามารถป้องกันการแผ่ขยายหรือรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งกักเก็บไปยังบริเวณอื่นๆ ใต้ผิวดิน หรือปนเปื้อนกับชั้นน้ำบาดาลที่ระดับตื้นหรือสู่ผิวดิน

แหล่งกักเก็บที่มีคุณสมบัติเหล่านี้แบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่ ชั้นหินที่มีช่องว่างและการซึมผ่านได้หรือแหล่งน้ำบาดาล แหล่งน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติที่ไม่ได้ดำเนินการแล้วแหล่งถ่านหินและถ้ำใต้ดินที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือที่มนุษย์สร้างขึ้น (Holloway, 2005)



รูปที่ 1 แสดงแหล่งที่มาของคาร์บอนไดออกไซด์และหลักการกักเก็บ (IPCC, 2005)

ที่สภาวะปกติก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.872 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร (หนักกว่าอากาศเล็กน้อย) อุณหภูมิวิกฤติและความดันวิกฤติของคาร์บอนไดออกไซด์ คือ 31.1 องศาเซลเซียล และ 7.38 MPa ตามลำดับ ที่อุณหภูมิและความดันสูงกว่าจุดวิกฤติ คาร์บอนไดออกไซด์จะอยู่ในสถานะ supercritical fluid (รูปที่ 2a) นั่นคือจะเป็นของเหลวที่มีความหนาแน่นสูงและแผ่ขยายไปได้ทั่วบริเวณ (Bachu, 2008) เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปั๊มลงสู่ใต้ดินจะทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีปริมาตร ลดลงจนกระทั่งถึงที่ระดับความลึกประมาณ 800 ถึง 1000 เมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามความลึก (geothermal gradient) (รูปที่ 2b) นั่นคือ จะมีการเปลี่ยนสถานะจากสถานะก๊าซไปเป็นของเหลวที่สถานะวิกฤติยิ่งยวด (supercritical) ดังนั้นคาร์บอนไดออกไซด์จึงครอบคลุมพื้นที่ใต้ผิวดินน้อยมากเมื่อเทียบกับบนผิวดิน ด้วยเหตุนี้การกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ในแหล่งกักเก็บที่อยู่ระดับตื้นจึงไม่เหมาะสม เพราะนอกจากต้องใช้พื้นที่มากแล้ว โดยทั่วไปแหล่งกักเก็บในระดับตื้นจะเป็นแหล่งน้ำบาดาลที่นำมาใช้ประโยชน์

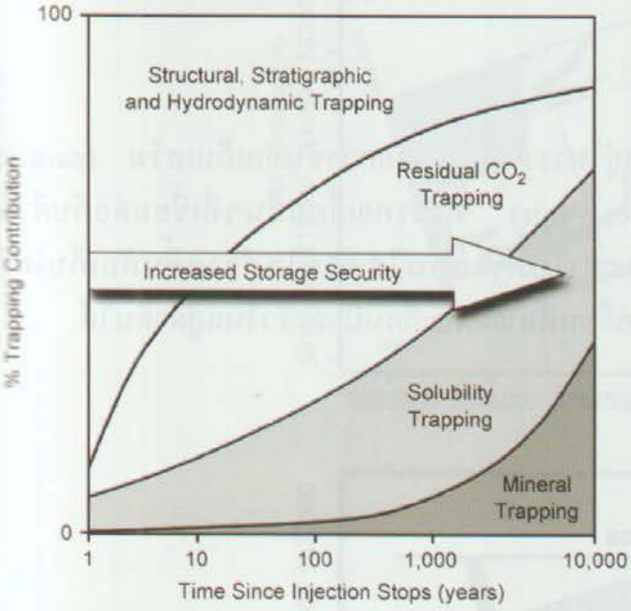


รูปที่ 2 a) เฟสไดอะแกรมของคาร์บอนไดออกไซด์ b) การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ตามความลึก โดยลูกบาศก์แสดงปริมาตรสัมพัทธ์ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความลึกต่างๆ ที่ความลึกมากกว่า 1.5 กิโลเมตร ความหนาแน่นและปริมาตรค่อนข้างคงที่ (ดัดแปลงจาก Bachu, 2008; IPCC, 2005)

กลไกที่ควบคุมกระบวนการไหลและการแพร่กระจายของคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นหิน ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงความดันเนื่องจากการปั๊ม hydraulic gradient แรงลอยตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นที่แตกต่างกัน การแพร่ การละลายของของเหลวที่อยู่ในชั้นหิน การตกผลึกและการดูดกลืนของคาร์บอนไดออกไซด์โดยสารอินทรีย์ (IPCC, 2005)

คาร์บอนไดออกไซด์ที่สะสมตัวอยู่ภายใต้หินกักกัน (cap rock) จะค่อยๆแผ่ขยายเป็นชั้นบางๆอยู่ใต้หินนี้ เมื่อเวลาผ่านไปคาร์บอนไดออกไซด์จะละลายไปกับน้ำในชั้นหิน ซึ่งอัตราการละลายจะควบคุมโดยพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และชั้นน้ำ อย่างไรก็ตามมีคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนที่ถูกกักไว้ในช่องว่างเนื่องจากแรงดูดยึด (capillary) ซึ่งเรียกว่าเป็นก๊าซที่ตกค้าง (residual gas) คาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนอาจถูกกักไว้ได้เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเคมีกับน้ำในช่องว่างหรือชั้นหินกักเก็บ ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีของน้ำในช่องว่าง แร่ที่เป็นองค์ประกอบหินและขอบเขตของการแผ่ขยาย ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงในระยะสั้นและระยะยาวอาจเกิดขึ้นได้ ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการศึกษาข้อมูลทางธรณีวิทยาและการสร้างแบบจำลองของแหล่งกักเก็บเพื่อหาข้อมูลเกี่ยวกับปริมาตร

เสถียรภาพและความปลอดภัยในระยะยาว ความสัมพันธ์ระหว่างกลไกการกักเก็บกับระยะเวลาการกักเก็บและความปลอดภัย (รูปที่ 3) พบว่าเมื่อปั๊มคาร์บอนไดออกไซด์ลงไป จะเกิดฟองก๊าซรอบๆบ่อ ซึ่งจะไปแทนที่น้ำหรือน้ำมันที่อยู่รอบๆ เมื่อทำปฏิกิริยาเคมีกับน้ำในช่องว่างจะเกิดกลไกการกักเก็บทางธรณีเคมี (geochemical trapping) เมื่อเวลาผ่านไป คาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่เคลื่อนที่จะทำปฏิกิริยากับหินเกิดเป็นกรดคาร์บอนิก (solubility trapping) ซึ่งอาจเกิดในช่วง 10 ถึง 100 ปี และอาจกลายเป็นแร่คาร์บอเนต (mineral trapping) ซึ่งทำให้คาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในสภาวะที่ปลอดภัย โดยอาจเกิดขึ้นได้ในช่วงตั้งแต่พันปีถึงล้านปี



รูปที่ 3 ความปลอดภัยในการกักเก็บขึ้นอยู่กับกลไกการกักเก็บทางกายภาพและทางธรณีเคมี (IPCC, 2005)

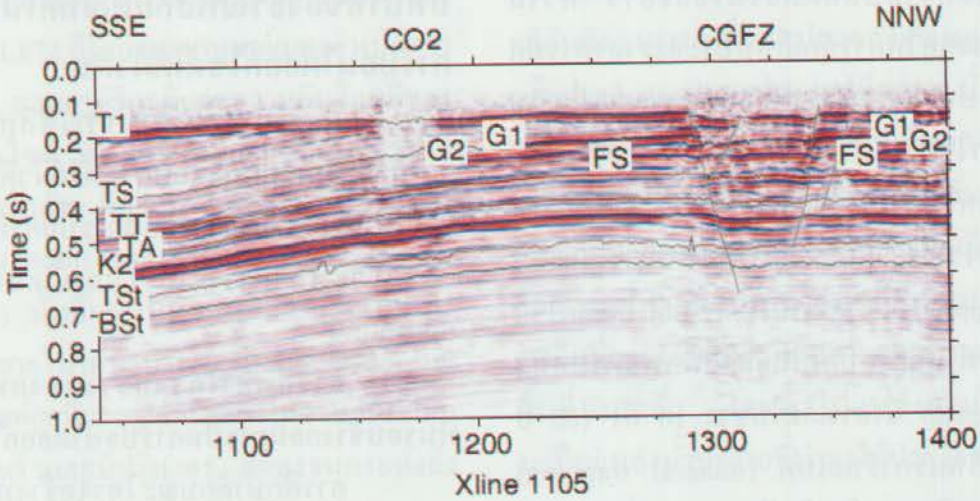
บทบาทของธรณีฟิสิกส์ต่อเทคโนโลยีการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ใต้ผิวดิน

บทบาทสำคัญของธรณีฟิสิกส์ต่อเทคโนโลยีการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ใต้ผิวดิน สามารถแบ่งได้เป็น 2 ระยะ คือ ระยะก่อนการปั๊มคาร์บอนไดออกไซด์ และระยะหลังการปั๊มคาร์บอนไดออกไซด์สู่แหล่งกักเก็บแล้ว

การศึกษาโครงสร้างของแหล่งกักเก็บและหินรอบข้างก่อนการปั๊มคาร์บอนไดออกไซด์

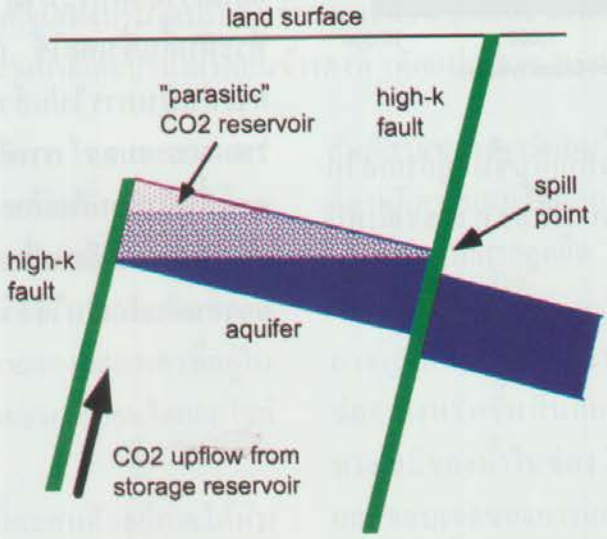
การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาของแหล่งกักเก็บ รวมถึงการศึกษาด้านแผ่นดินไหววิทยาหรือการไหลของน้ำบาดาลในพื้นที่เป็นขั้นตอนแรกที่ควรพิจารณาเพื่อหาแหล่งกักเก็บที่มีศักยภาพและเหมาะสมสำหรับโครงการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ใต้ผิวดิน

Juhlin และคณะ (2007) ได้ใช้วิธีการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนสะท้อนแบบ 3 มิติ ในการศึกษาโครงสร้างและขอบเขตของหินกักเก็บและหินปิดทับของแหล่งกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่เมือง Ketzin ประเทศเยอรมนี (Förster et al., 2006) พื้นที่ศึกษามีโครงสร้างทางธรณีวิทยาเป็นแบบรูปประทุน (anticline) โดยมีชั้นหินกักเก็บอยู่สองระดับ คือชั้นหินอุ้มน้ำที่ระดับลึก ซึ่งใช้สำหรับกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ความลึกประมาณ 700 เมตร และชั้นหินกักเก็บที่ระดับตื้นซึ่งเคยใช้ กักเก็บก๊าซธรรมชาติและได้หยุดการดำเนินการไปแล้ว ชั้นนี้อยู่ที่ความลึกประมาณ 250-400 เมตร การศึกษาครั้งนี้สามารถระบุขอบเขตของชั้นหินกักเก็บและหินปิดทับ ตลอดจนตำแหน่งของแนวรอยเลื่อนที่อาจลงไปในระดับลึกถึงด้านบนของชั้นหินกักเก็บได้ด้วย (รูปที่ 4)



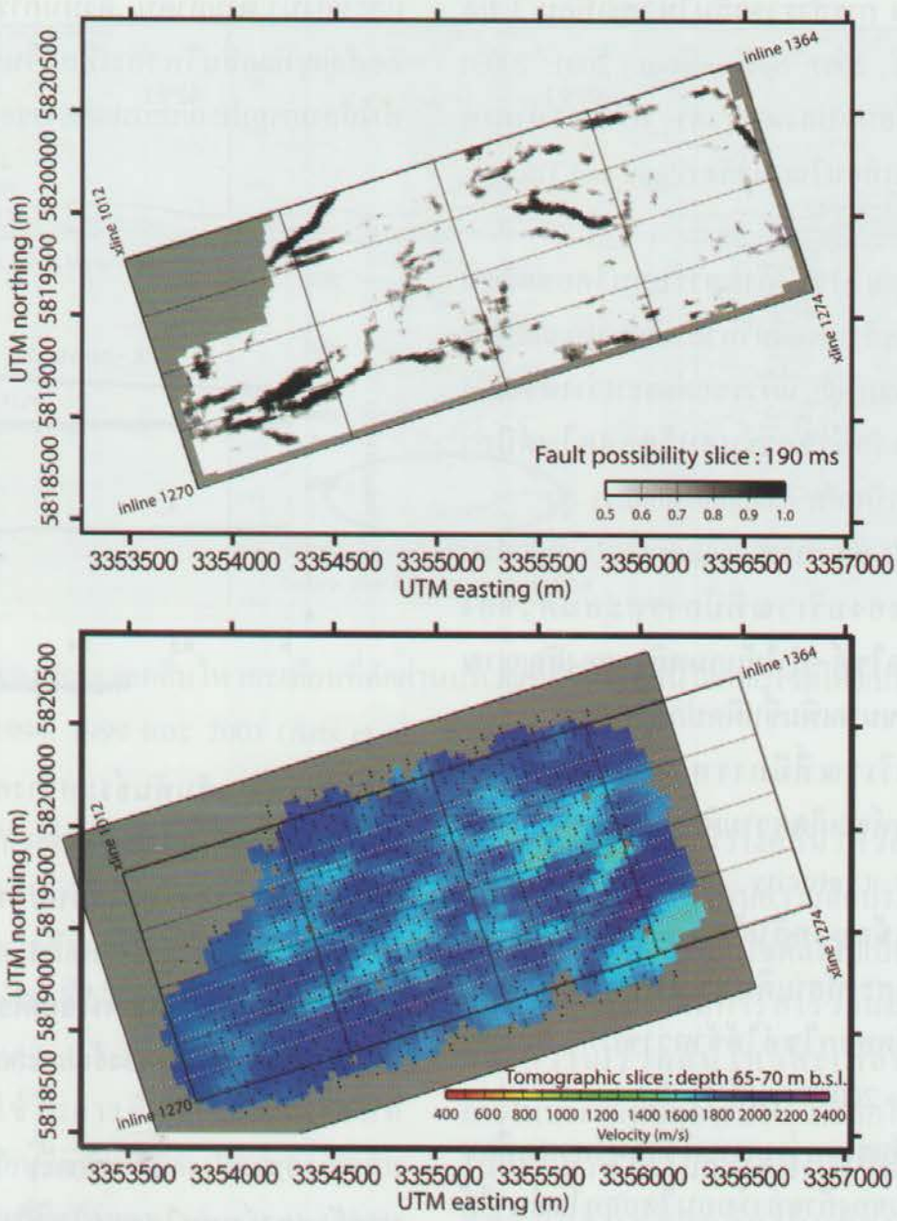
รูปที่ 4 ภาพตัดขวางของคลื่นไหวสะเทือนที่ตัดผ่านจุดยอดของโครงสร้างรูปประทุน (anticline) ที่แหล่งกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่เมือง Ketzin ประเทศเยอรมนี ตัวย่อแทนชื่อของสัญญาณสะท้อนที่ผิวรอยต่อระหว่างชั้นหิน (Juhlin et al., 2007)

การศึกษาโครงสร้างในระดับตื้นก็มีความสำคัญไม่น้อยกว่าการศึกษาโครงสร้างของหินกักเก็บในระดับลึก ทั้งนี้ถ้ามีแนวรอยเลื่อนที่เชื่อมต่อจากระดับลึกมาสู่ใกล้ผิวดินหรือผ่านมายังชั้นหินอุ้มน้ำในระดับตื้น (รูปที่ 5) ในกรณีนี้คาร์บอนไดออกไซด์อาจมาสะสมตัวอยู่ในระดับตื้น เรียกว่าชั้นกักเก็บเสริม (parasitic reservoir) ถ้ามีรอยเลื่อนอื่นๆที่เชื่อมต่อกับผิวดินจะทำให้คาร์บอนไดออกไซด์จากชั้นกักเก็บเสริมเคลื่อนที่มายังรอยเลื่อนนี้และรั่วไหลสู่ผิวดินได้



รูปที่ 5 แบบจำลองโครงสร้างของชั้นดินในระดับตื้นซึ่งประกอบด้วยชั้นหินอุ้มน้ำ แนวรอยเลื่อนที่เชื่อมต่อจากชั้นหินกักเก็บและที่ตัดผ่านสู่ผิวดิน ถ้ารอยเลื่อนมีความรั่วซึมได้สูง คาร์บอนไดออกไซด์ อาจเดินทางมาสะสมตัวที่ชั้นหินอุ้มน้ำระดับตื้น และอาจรั่วไหลสู่ผิวดินผ่านทางแนวรอยเลื่อนได้ (Pruess, 2008)

Yordkayhun และคณะ (2009a, 2009b) ได้ใช้เทคนิคโทโมกราฟฟี (seismic tomography) และ seismic attribute analysis โดยอาศัย neural network (Meldahl et al., 2001) ช่วยในการติดตามและระบุตำแหน่งของแนวรอยเลื่อนใกล้ผิวดินที่แหล่งกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ใต้ผิวดินที่เมือง Ketzin ประเทศเยอรมนี การเปรียบเทียบผลที่ได้การศึกษาตำแหน่งของรอยเลื่อนทั้งสองวิธี ผลการศึกษา (รูปที่ 6) พบว่าบริเวณที่มีความเร็วคลื่นไหวสะเทือนต่ำในแผนภาพโทโมกราฟฟี (สีฟ้าอ่อน) จะสอดคล้องกับบริเวณที่น่าจะเป็นแนวของรอยเลื่อนจากการวิเคราะห์โดย seismic attribute โดยใช้ neural network (สีเข้ม) การศึกษาพบว่าแนวรอยเลื่อนในพื้นที่ศึกษานั้นสิ้นสุดที่ชั้นหินกักกั้นและไม่ได้แทรกซอนขึ้นมาถึงผิวดิน ซึ่งผลที่ได้นี้เป็นการยืนยันในความปลอดภัยของพื้นที่ก่อนการปั๊มคาร์บอนไดออกไซด์จะเริ่มขึ้น



รูปที่ 6 แผนที่แสดงความเป็นไปได้ของแนวรอยเลื่อนจากการวิเคราะห์โดยวิธี seismic attribute analysis และแผนที่โทโมกราฟฟีแสดงความผิดปกติของความเร็วคลื่นไหวสะเทือน ที่ระดับความลึกประมาณ 65-70 เมตรเทียบกับระดับน้ำทะเล (Yordkayhun et al., 2009a)

การติดตามการแผ่ขยายของคาร์บอนไดออกไซด์ในแหล่งกักเก็บหลังจากปั๊มคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นหินกักเก็บ

การติดตามการเคลื่อนที่ของคาร์บอนไดออกไซด์ใต้ผิวดินสามารถทำได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม ทางตรงทำได้โดยการวัดความดันและเก็บตัวอย่างของเหลวจากบ่อสังเกตการณ์และบ่อติดตามที่มีการผสมสารติดตามร่องรอย (tracer) เข้ากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อปั๊มลงไป (Bachu, 2008) สำหรับวิธีทางอ้อมทำได้โดยการสร้างภาพตัดขวางของชั้นดินโดยใช้เทคนิคทางธรณีฟิสิกส์ เช่น การสำรวจคลื่นไหวสะเทือน 3 มิติ (Schmelzbach et al., 2007; Spitzer et al., 2001; 2003) และติดตามการเปลี่ยนแปลงตามเวลา หรือการทำภาพตัดขวางคลื่นไหวสะเทือนในแนวดิ่ง (Ziqiu and Takashi, 2004) เป็นต้น

การตอบสนองของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในแหล่งกักเก็บต่อการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนประกอบด้วย

1) reflectivity ที่ผิวรอยต่อระหว่างตัวกลางมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าความสามารถในการบีบอัด (compressibility) สูง

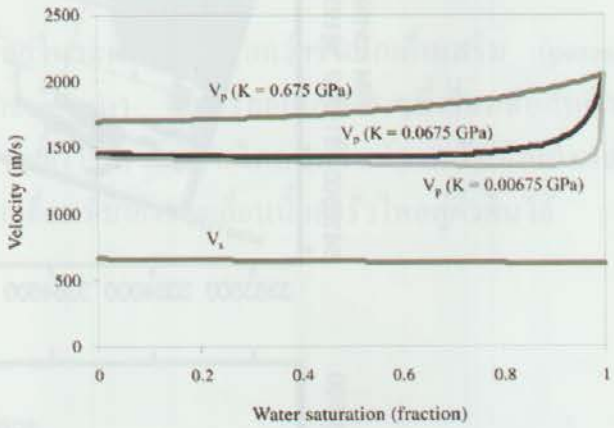
2) เกิดปรากฏการณ์ tuning effect ที่ผิวด้านบนและด้านล่างของบริเวณที่มีการสะสมตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นไหวสะเทือนมีขนาดเพิ่มขึ้นผิดปกติ

3) ใต้บริเวณที่มีการสะสมตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดความผิดปกติของความเร็วคลื่นไหวสะเทือน (velocity push-down effect) ซึ่งตรวจพบได้ในข้อมูลคลื่นไหวสะเทือน ทั้งนี้เนื่องจากคลื่นไหวสะเทือนเดินทางในชั้นหินที่อิ่มตัวด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ช้ากว่าชั้นหินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Arts et al., 2004) (รูปที่ 7)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นไหวสะเทือน (V) และการอิ่มตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หาได้จากความสัมพันธ์ของ Gassmann และแบบจำลองของ White (Carcione et al., 2006) นั่นคือ

$$V = \sqrt{\frac{K + 4\mu_m / 3}{\rho}} \quad (1)$$

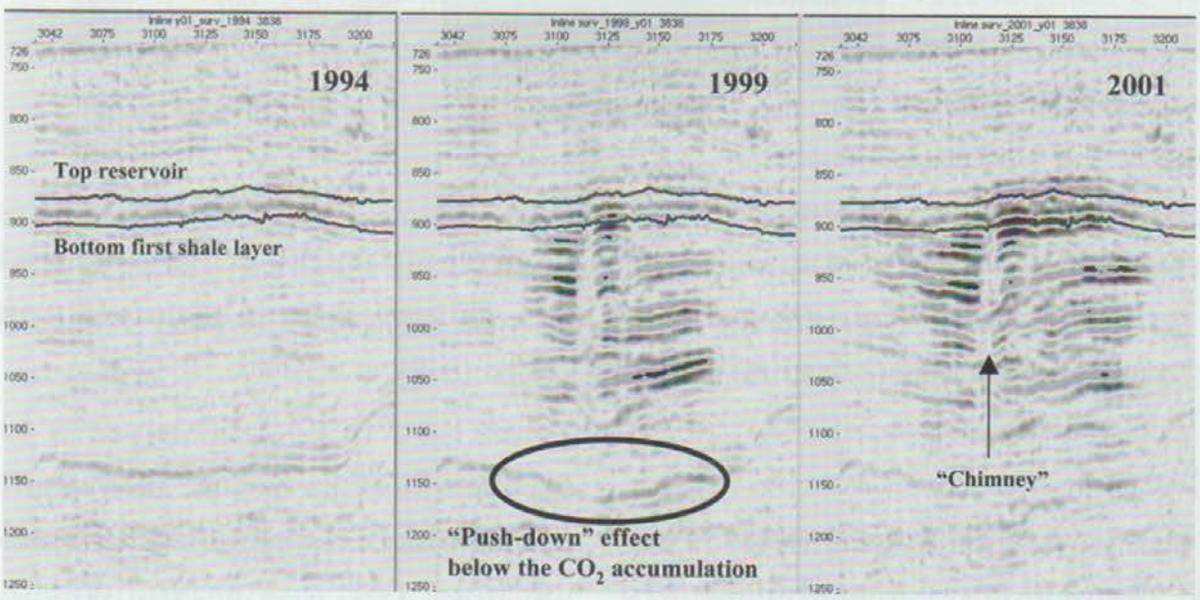
เมื่อ K คือ complex bulk modulus, μ_m คือ dry-rock shear modulus, และ $\rho = (1-\phi)\rho_s + \phi\rho_f$ คือ bulk density, ρ_s คือ grain density และ ϕ คือความพรุน และความหนาแน่นของของเหลวที่ผสมอยู่ในช่องว่าง ρ_f โดยที่ $\rho_f = S_1\rho_{f1} + S_2\rho_{f2}$ เมื่อ ρ_{f1} และ ρ_{f2} คือความหนาแน่นของก๊าซและน้ำ ตามลำดับ S_1 และ S_2=1-S_1 คือ ความอิ่มตัว (saturation) ของก๊าซและของน้ำ ตามลำดับ ดังนั้นการติดตามการตอบสนองต่อสัญญาณคลื่นไหวสะเทือนในช่วงเวลาที่แตกต่างกันทำให้สามารถประเมินการแผ่ขยายของคาร์บอนไดออกไซด์ได้



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นพี (Vp) และคลื่นเอส (Vs) กับความอิ่มตัวของน้ำและก๊าซโดยใช้แบบจำลองของ Gassmann ที่ Utsira formation น้ำที่ถูกแทนที่ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เพียงเล็กน้อยจะมีความเร็วคลื่นพีลดลงถึงร้อยละ30 (Arts et al., 2004)

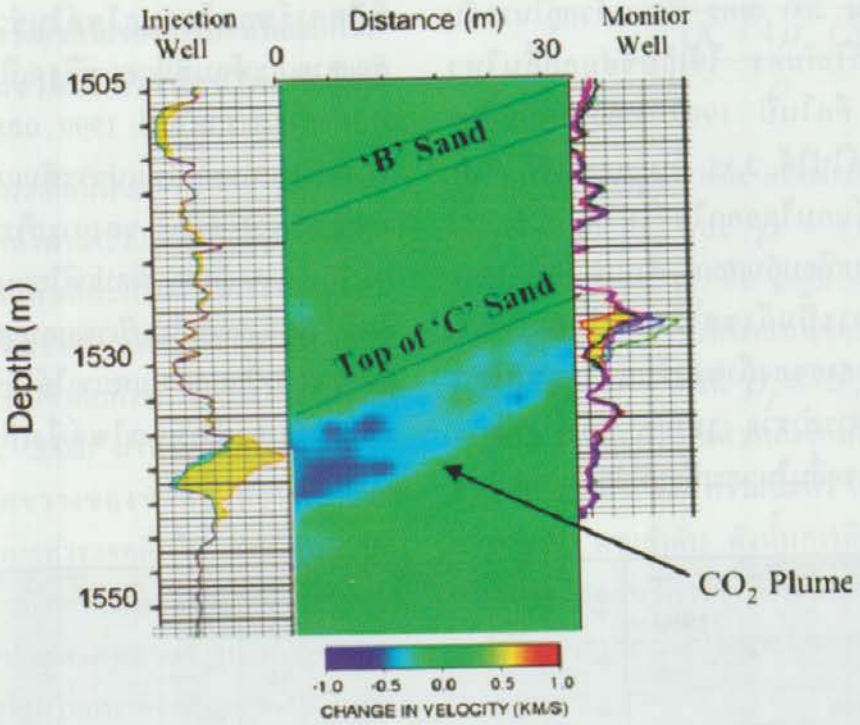
Arts et al. (2004) ได้ติดตามการแผ่ขยายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในแหล่งกักเก็บที่แหล่ง Sleipner ประเทศนอร์เวย์ โดยใช้ข้อมูลการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนที่เวลาแตกต่างกัน (time-lapse seismic) โดยแหล่งกักเก็บ ณ ที่นี้เป็นชั้นหินอุ้มน้ำที่เป็นน้ำเค็ม

มีความหนาประมาณ 200 เมตร ซึ่งวางตัวอยู่ในระดับลึกประมาณ 1 กิโลเมตร ได้เก็บข้อมูลคลื่นไหวสะเทือนสองครั้ง คือในปี 1999 หลังจากปั๊มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปได้ 2.35 ตัน และในปี 2001 หลังจากปั๊มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปได้ 4.26 ตัน ผลที่ได้นี้จะไปเปรียบเทียบกับผลการสำรวจเมื่อปี 1994 ซึ่งได้สำรวจก่อนการปั๊มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้ภาพการแผ่ขยายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในแหล่งกักเก็บ ผลการสำรวจ (รูปที่ 8) พบว่าจากการเปรียบเทียบแนวสำรวจคลื่นไหวสะเทือนที่ตัดผ่านตำแหน่งที่ปั๊มคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน สัญญาณสะท้อนที่มีแอมพลิจูดเป็นลบผิดปกติถูกตรวจพบทั้งการสำรวจในปี 1999 และปี 2001 โดยทั่วไประดับการแผ่ขยายในแนวระดับและการทรุดตัวของผิวรอยต่อ (push-down) ของการสำรวจในปี 2001 จะมากกว่าในปี 1999 ลักษณะผิดปกติในแนวดิ่งที่สังเกตุได้ชัดเจนคือเกิด push-down ในบริเวณแคบๆและมีแอมพลิจูดลดลง ลักษณะเช่นนี้แปลความหมายได้ว่าเป็นช่องทาง (chimney) ของคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเกิดขึ้นเหนือจุดที่ปั๊มคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 8 ภาพตัดขวางของสัญญาณคลื่นไหวสะเทือนที่ตัดผ่านบริเวณที่ปั๊มคาร์บอนไดออกไซด์โดยเปรียบเทียบกันระหว่างข้อมูลในปี 1994, 1999 และ 2001 (Arts et al., 2004)

นอกจากการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนที่เก็บข้อมูล บนผิวดินแล้ว การสำรวจคลื่นไหวสะเทือนภายในหลุมเจาะสำรวจระหว่างสองหลุมเจาะและการทำภาพตัดขวางคลื่นไหวสะเทือนในแนวดิ่ง (Crosswell และ Vertical seismic profile, VSP) ก็สามารถประยุกต์ใช้ในการติดตามการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของคาร์บอนไดออกไซด์ ในแหล่งกักเก็บได้เช่นเดียวกัน ดังผลการศึกษาของ Daley et al. (2008) ที่ได้ติดตามการเคลื่อนที่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในแหล่งกักเก็บที่เมือง Frio มลรัฐเท็กซัส ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยใช้เทคนิคการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนภายในหลุมเจาะสำรวจระหว่างหลุมเจาะสองหลุมและการทำภาพตัดขวางคลื่นไหวสะเทือนในแนวดิ่ง แหล่งกักเก็บนี้อยู่ที่ระดับความลึกประมาณ 1,500 เมตร โดยปั๊มคาร์บอนไดออกไซด์ลงไปเป็นปริมาณ 1600 ตัน ในปี 2004 ผลการสำรวจแสดงความผิดปกติของความเร็วคลื่นไหวสะเทือนได้อย่างชัดเจนภายในบริเวณที่ปั๊มคาร์บอนไดออกไซด์ลงไป ดังแสดงในแผนภาพโทโมกราฟฟี (รูปที่ 9) โดยบริเวณที่ผิดปกตินี้สอดคล้องกับข้อมูลความผิดปกติของความอิ่มตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ตามความลึกที่บ่อเฝ้าติดตาม (monitoring well) และบ่อที่ปั๊มคาร์บอนไดออกไซด์ลงไป (injection well)



รูปที่ 9 แผนภาพโทโมกราฟฟี (กลาง) และข้อมูลความอิ่มตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ในหลุมเจาะที่บ่อปั๊มคาร์บอนไดออกไซด์ (ซ้าย) และบ่อเฝ้าติดตาม (ขวา) ขอบเขตของคาร์บอนไดออกไซด์ที่แผ่กระจายไประหว่างสองหลุมเจาะสอดคล้องกับความเร็วคลื่นต่ำ (สีฟ้า) (Daley et al., 2008)

บทสรุป

การสำรวจธรณีฟิสิกส์ โดยเฉพาะวิธีคลื่นไหวสะเทือน เป็นเทคนิคที่เหมาะสมและให้ผลดีในการประเมินศักยภาพของแหล่งกักเก็บและติดตามการเคลื่อนที่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นหิน ทั้งนี้เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์มีการตอบสนองต่อสัญญาณคลื่นไหวสะเทือนทั้งในเทอมของแอมพลิจูดและการเปลี่ยนแปลงความเร็วคลื่น

แม้ว่าการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใต้ผิวดินมีความเป็นไปได้ในทางเทคนิค และแสดงให้เห็นว่าเป็นเทคโนโลยีที่ตอบสนองต่อการลดปริมาณก๊าซที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกเราควรระลึกอยู่เสมอว่าธรณีวิทยาใต้ผิวโลกนั้นเป็นระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ ดังนั้นในแหล่งกักเก็บใดๆจะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยและเสถียรภาพในระยะยาว ทุกๆแหล่งกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์จะต้องทำงานเป็นโครงข่าย นั่นคือมีการทำวิจัย พัฒนา และตรวจสอบคุณภาพอย่างต่อเนื่อง ยังมีวิธีการอื่นๆที่เกี่ยวข้องและต้องดำเนินการควบคู่ไปด้วยเพื่อให้เข้าใจถึงปัญหาเฉพาะสำหรับแหล่งกักเก็บแหล่งนั้นๆ เช่น การจำลองชั้นหินจากแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ การสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ หรือการสำรวจธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีอื่นๆ เช่น การสำรวจด้านความโน้มถ่วง ตลอดจนการวิเคราะห์ตัวอย่างหินและน้ำทางธรณีเคมี เป็นต้น

สำหรับประเทศไทย เทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใต้ผิวดินยังไม่เป็นที่รู้จักและเข้าใจกันมากนัก เช่นเดียวกับเทคโนโลยีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ เราอาจมองว่ายังเป็นเรื่องไกลตัว แต่เมื่อใดที่ความต้องการพลังงานไม่สมดุลกับอัตราการผลิต เมื่อใดที่มนุษย์ยังปล่อยก๊าซที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก และเมื่อใดที่สภาวะโลกร้อนอยู่ในขั้นวิกฤติ เราอาจมีทางเลือกไม่มากนักในการแก้ปัญหาในระยะเวลาอันรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม ในประเทศไทยยังมีชั้นดินชั้นหินและโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่น่าจะมี

ศักยภาพเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ได้ เช่น แอ่งตะกอนที่มีอยู่ทั่วไปทั้งภาคพื้นดินและในทะเล สิ่งอ่าวไทยและอันดามัน รวมทั้งมีแหล่งเกลือหินหรือชั้นน้ำบาดาลที่เป็นน้ำเค็ม เป็นต้น พื้นที่เหล่านี้อยู่ที่ใดบ้าง และมีความเหมาะสมหรือไม่นั้น เป็นหน้าที่ของนักธรณีวิทยา นักธรณีฟิสิกส์ และผู้ที่เกี่ยวข้องจะต้องหาคำตอบกันต่อไป

เอกสารอ้างอิง

Arts, R., Eiken, O., Chadwick, A., Zweigel, P., van der Meer, L. and Zinszner, B. (2004). Monitoring of CO_2 injected at Sleipner using time-lapse seismic data. Energy. 29: 1383-1392.

Bachu, S. (2008). CO2 storage in geological media: Role, means, status and barriers to deployment. Progress in Energy and Combustion Science. 34: 254-273.

Bradford, J. H., Sawyer, D. S., Zelt, C. A. and Oldow, J. H. (1998). Imaging a shallow aquifer in temperate glacial sediments using seismic reflection profiling with DMO processing. Geophysics. 63: 1248-1256.

Carcione J. M., Picotti, S., Gei, D. and Rossi, G. (2006). Physics and Seismic Modeling for Monitoring CO2 Storage. Pure and Applied Geophysics. 163: 175-207.

Chadwick, R. A., Zweigel, P., Gregersen, U., Kirby, G. A., Holloway, G. A. S., and Johannssen, P. N. (2002). Geological Characterisation of CO2 storage sites: Lessons from Sleipner, Northern North Sea. 6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technology, Kyoto, Japan, expanded abstract.

Daley, T. M., Myer, L. R., Peterson, J. E, Majer, E. L., Hoversten, G. M. (2008). Time lapse crosswell seismic and VSP monitoring of injected CO_2 in a brine aquifer, Environmental Geology. 54: 1657-1665.

Davis, T. L., Terrell, M. J., Benson, R. D. and Kendall, R. R. (2002). Seismic Monitoring of the CO_2 Flood at Weyburn Field, Saskatchewan, Canada. EAGE 64th Conference & Exhibition, Florence Italy.

Förster, A., Norden, B., Zinck-Jφrgensen, K., Frykman, P., Kulenkampff, J., Spangenberg, E., Erzinger, J., Zimmer, M., Kopp, J., Borm, G., Juhlin, C., Cosma, C. and Hurter, S. (2006). Baseline characterization of the CO2SINK geological storage site at Ketzin, Germany, Environmental Geosciences. 13: 145-161.

Francese, R., Giudici, M., Schmitt, D. R. and Zaja, A. (2005). Mapping the geometry of an aquifer system with a high-resolution reflection seismic profile. Geophysical Prospecting. 53: 817-828.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2005). In: Metz B., Davidson O., de Coninck H. C., Loos M., Mayer L. A., editors, Special report on carbon dioxide capture and storage, Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

IPCC (Intergovernmental panel on climate change). (2007). Climate change 2007: The physical science basis. Fourth assessment report, IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland.

Holloway, S. (2005). Underground sequestration of carbon dioxide-a viable Greenhouse gas mitigation option. Energy. 30: 2318-2333.

Hunter, J. A., Pullan, S. E., Burns, R. A., Gagne, R. M. and Good, R. L. (1984). Shallow seismic reflection mapping of the overburden-bedrock interface with the engineering seismograph-Some simple techniques. Geophysics. 49: 1381-1385.

Juhlin, C., Giese, R., Zinck-JØrgensen, K., Cosma, C., Kazemeini, H., Juhojuntti, N., Lüth, S., Norden, B. and Förster, A. (2007). 3D baseline seismics at Ketzin, Germany: The CO_2SINK project. Geophysics. 72: B121-B132.

Meldahl, P., Heggland, R., Bril, A. H. and de Groot, P. F. (2001). Identifying targets like faults and chimneys using multi-attributes and neural networks. The Leading Edge. 20: 474-482.

Pruess, K. (2008). Leakage of CO_2 from geologic storage: Role of secondary accumulation at shallow depth. International Journal of Greenhouse Gas Control. 2: 37-46.

Schmelzbach, C., Horstmeyer, H. and Juhlin, C. (2007). Shallow 3D seismic-reflection imaging of fracture zones in crystalline rock. Geophysics. 72: B149-B160.

Spitzer, R., Green, A. G. and Nitsche, F. O. (2001). Minimizing field operations in shallow 3-D seismic reflection surveying. Geophysics. 66: 1761-1773.

Spitzer, R., Nitsche, F. O., Green, A. G. and Horstmeyer, H. (2003). Efficient acquisition, processing, and interpretation strategy for shallow 3D seismic surveying: A case study. Geophysics. 68: 1792-1806.

White, D. J., Burrowes, G., David, T., Hajnal, Z., Hirsche, K., Hutcheon, I., Majer, E., Rostron, B. and Whittaker, S. (2004). Greenhouse gas sequestration in abandoned oil reservoirs: The International Energy Agency Weyburn pilot project. GSA Today. 14: 4-10.

Woodward, D. (1994). Contributions to a shallow aquifer study by reprocessed seismic sections from petroleum exploration surveys, eastern Abu Dhabi, United Arab Emirates. Journal of Applied Geophysics. 31: 271-289.

Yordkayhun, S., Juhlin, C. and Norden, B. (2009a). 3D seismic reflection surveying at the CO_2SINK project site, Ketzin, Germany: A study for extracting shallow subsurface information. Near Surface Geophysics. in press.

Yordkayhun, S., Tryggvason, A., Norden, B., Juhlin, C. and Bergman, B. (2009b) 3D seismic traveltime tomography imaging of the shallow subsurface at the CO_2SINK project site, Ketzin, Germany. Geophysics. 74: G1-G15.

Ziqiu, X. and Takashi, O. (2004). Time-lapse crosswell seismic tomography and well logging to monitor the injected CO_2 in an onshore aquifer, Nagaoka, Japan. IEA Monitoring and Verification Workshop, Santa Cruz.

ว.วิทย. มข. 38(1) 61-73 (2553) KKU Sci. J.38(1) 61-73 (2010)

ระบบบูรณาการสารสนเทศจากแหล่งข้อมูลที่หลากหลาย โดยใช้แบบจำลององค์ประกอบเว็บเซอร์วิสกรณีศึกษา: การบูรณาการข้อมูลสารสนเทศบุคลากรของมหาวิทยาลัยขอนแก่น

Integrated Information System for Heterogeneous Data Sources Using Web Services Composition Model. Case Study : Personnel Information Integration of Khon Kaen University

มานพ สุวรรณกูฏ [1] งามนิจ อาจอินทร์ [1] และ สมจิตร อาจอินทร์ [1]*

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน องค์ประกอบเว็บเซอร์วิสได้รับความนิยมอย่างมากในการทำให้เกิดการทำงานร่วมกันระหว่างระบบงานทางธุรกิจหรือในการบูรณาการข้อมูลระหว่างโปรแกรมประยุกต์ขององค์กร หลายมาตรฐานทางธุรกิจได้เกิดขึ้นเพื่อช่วยให้บริการต่างๆเหล่านี้สามารถทำงานร่วมกันได้ เช่น BPEL4WS, WSCI, WSFL เป็นต้น งานวิจัยและพัฒนานี้ได้นำเสนอระบบบูรณาการสารสนเทศจากแหล่งข้อมูลที่หลากหลายโดยใช้แบบจำลององค์ประกอบเว็บเซอร์วิส โดยใช้กรณีศึกษาคือการบูรณาการข้อมูลสารสนเทศบุคลากรเพื่อสนับสนุนให้เกิดการแลกเปลี่ยนข้อมูลกันระหว่างหน่วยงานที่แตกต่างกันภายในโดเมนของมหาวิทยาลัย และเพื่อที่จะทำให้ระบบงานที่แตกต่างกันนี้สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างอัตโนมัติ งานวิจัยและพัฒนานี้ได้ใช้เทคโนโลยีเว็บเซอร์วิสเข้ามาช่วยทำให้โปรแกรมประยุกต์ที่แตกต่างกันสามารถทำงานร่วมกันได้บนระบบอินเทอร์เน็ต นอกจากนี้ เพื่ออำนวยความสะดวกในการสร้างองค์ประกอบเว็บเซอร์วิส งานวิจัยและพัฒนานี้ได้ใช้ BPEL4WS เป็นภาษามาตรฐานในการสนับสนุนให้เกิดการสร้างองค์ประกอบเว็บเซอร์วิสบนพื้นฐานของกระบวนการทางธุรกิจ และทำให้เว็บเซอร์วิสที่แตกต่างกันสามารถทำงานร่วมกันได้ ระบบบูรณาการนี้จะช่วยให้ผู้ใช้สามารถค้นหาและบูรณาการข้อมูลบุคลากรที่ถูกเก็บกระจัดกระจายอยู่ในระบบงานต่างๆได้อย่างอัตโนมัติ โดยสนับสนุนให้สามารถเรียกใช้งานเว็บเซอร์วิสที่หลากหลายได้อย่างง่ายดาย

[1] ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

[*] Corresponding Author, E-mail: smanop@kku.ac.th

Abstract

Currently, Web services composition has received much interest to support business-to-business or enterprise application integration. Many business standards have been emerged to compose a set of existing services, such as, BPEL4WS, WSCI, WSFL, etc. This research presents the Integrated Information System for Heterogeneous Data Sources Using Web Services Composition Model. The research has been applied to a case study of the Personnel Information Integration to support cross-organizational workflows between different systems that dispersed in the area of university domain. To enable the dynamic interoperability between different systems, Web services have been employed to allow the different application programs to work corporately via the Internet system. In order to facilitate the composition of these existing services, the research employs BPEL4WS as a standard language to support business process-oriented service composition and enable service interoperability. Such the integrated system offers the client users to discover and integrate personnel information dispersed over heterogeneous systems automatically and provides a seamless access to a variety of complex services.

คำสำคัญ: เว็บเซอร์วิส BPEL4WS องค์ประกอบเว็บเซอร์วิส

Keywords: Web Services, BPEL4WS, Web Services Composition

บทนำ

ในปัจจุบัน ข้อมูลสารสนเทศเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับทุกๆ องค์กร ข้อมูลสารสนเทศที่มีการบริหารจัดการที่ดีสามารถบอกได้ถึงสภาพปัจจุบันขององค์กร รวมถึงสามารถพยากรณ์แนวโน้ม หรือทิศทางการเจริญเติบโตขององค์กรนั้นๆ ได้ ด้วยเหตุนี้หลายๆ องค์กรต่างมีความต้องการที่จะพัฒนาระบบการบริหารจัดการข้อมูลสารสนเทศขึ้น โดยใช้โปรแกรมประยุกต์ต่างๆ เพื่อบริหารจัดการข้อมูลภายในหน่วยงาน และตอบสนองต่อความต้องการของหน่วยงานนั้นๆ ตามศักยภาพและทรัพยากรที่มีอยู่ ส่งผลให้เกิดปัญหาในการนำข้อมูลจากแต่ละหน่วยงานมาใช้ร่วมกัน เนื่องจากความแตกต่างของโปรแกรมประยุกต์และข้อมูลที่มีอยู่ของแต่ละหน่วยงาน เช่น ความแตกต่างในเรื่องของแพลตฟอร์ม ระบบจัดการฐานข้อมูล ภาษาที่ใช้ในการพัฒนา รวมถึงชื่อฟิลด์และชนิดของข้อมูลที่จัดเก็บในระบบฐานข้อมูล เป็นต้น

ในปัจจุบันเว็บเซอร์วิส (Web Services) (W3C, 2004) เป็นเทคโนโลยีที่ถูกออกแบบเพื่อใช้เป็นมาตรฐานเปิด (open standard) โดยมุ่งเน้นการแก้ปัญหาการบูรณาการข้อมูลจากแหล่งข้อมูลที่หลากหลาย (heterogeneous sources) และทำให้ระบบหรือโปรแกรมประยุกต์ที่มีความแตกต่างกันสามารถทำงานร่วมกันได้ (interoperability) โดยใช้โปรโตคอลมาตรฐานที่เรียกว่า SOAP (Simple Object Access Protocol) (W3C, 2007) ที่ทำงานบนพื้นฐานของโปรโตคอล HTTP ของเครือข่ายอินเทอร์เน็ต และมีการสร้างแพ็กเกจของข้อความที่รับส่งกันระหว่างระบบงานในรูปแบบของภาษา XML (Extensible Markup Language) (W3C, 2005) โดยไม่ถูกปิดกั้นจากระบบรักษาความปลอดภัยทางเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของแต่ละระบบงาน จึงทำให้สามารถรับและส่งข้อมูลระหว่างกันได้

แม้ว่าเว็บเซอร์วิสสามารถช่วยให้ระบบงานที่มีความแตกต่างกันสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลร่วมกันได้ แต่ในกรณีที่ต้องการเรียกใช้บริการจากผู้ให้บริการเว็บเซอร์วิสที่หลากหลายแล้วทำการบูรณาการข้อมูลจากเว็บเซอร์วิสเหล่านั้นพร้อมๆ กัน ยังคงมีความยุ่งยากสำหรับผู้พัฒนาระบบที่ต้องการเรียกใช้ข้อมูลจากหลายๆ เว็บเซอร์วิสพร้อมกัน

เพื่อช่วยให้เว็บเซอร์วิสที่หลากหลายสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างอัตโนมัติ และมีความยืดหยุ่นต่อการบูรณาการข้อมูลจากเว็บเซอร์วิสที่หลากหลายนี้ จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีที่เรียกว่า องค์ประกอบร่วมเว็บเซอร์วิส(Web Services Composition) ที่มีการทำงานบนพื้นฐานของกระบวนการทางธุรกิจ (business process) ซึ่งสามารถกำหนดลำดับการทำงานของเว็บเซอร์วิสและกำหนดเงื่อนไขต่างๆ เพื่อให้การดำเนินงานเป็นไปตามกระแสงาน (work flow) ที่ได้ออกแบบไว้ ตัวอย่างของภาษาที่ใช้สร้างองค์ประกอบร่วมเว็บเซอร์วิส ได้แก่ BPEL4WS (Business Process Execution Language for Web Service) (BEA et al., 2003) และ WSCI (Web Service Choreography Interface) (W3C, 2002).

งานวิจัยและพัฒนานี้ได้นำเสนอระบบบูรณาการสารสนเทศจากแหล่งข้อมูลที่หลากหลาย โดยใช้แบบจำลององค์ประกอบเว็บเซอร์วิส กรณีศึกษาการบูรณาการข้อมูลด้านบุคลากรในมหาวิทยาลัยขอนแก่น ซึ่งประกอบด้วยระบบงานต่างๆ ที่มีความหลากหลายและต่างแพลตฟอร์มกัน โดยใช้เทคโนโลยีเว็บเซอร์วิสเพื่อแก้ปัญหาเกี่ยวกับการบูรณาการข้อมูลจากแหล่งข้อมูลที่หลากหลาย และทำให้ระบบงานที่ถูกพัฒนาด้วยโปรแกรมประยุกต์ที่แตกต่างกัน รวมทั้งใช้ระบบฐานข้อมูลที่แตกต่างกันสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลกันและทำงานร่วมกันได้ งานวิจัยและพัฒนานี้ยังได้ใช้เทคโนโลยีองค์ประกอบร่วมเว็บเซอร์วิสที่ใช้ภาษา BPEL4WS เป็นตัวกลางสำหรับประสาน ควบคุมลำดับการทำงานและกำหนดการแลกเปลี่ยนข้อมูลกันระหว่างหลายเว็บเซอร์วิสที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งจะช่วยให้สามารถสืบค้นข้อมูลจากระบบงานต่างๆ ที่กระจัดกระจายอยู่ในที่ต่างๆ โดยผ่านระบบบูรณาการกลางได้อย่างอัตโนมัติ เพื่อสร้างเป็นผลลัพธ์สุดท้ายที่สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้อย่างแท้จริง

เทคโนโลยีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคโนโลยีพื้นฐาน

เว็บเซอร์วิส (Web Services) คือ โปรแกรมหรือแอพพลิเคชั่น (application) ที่ติดตั้งบนเครื่องคอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่เป็นผู้ให้บริการ (service provider) โดยให้บริการบางส่วนของการทำงานอย่างใดอย่างหนึ่ง และมีแอพพลิเคชั่นอื่นที่อาจสร้างด้วยภาษาโปรแกรมที่แตกต่างกันบนเครื่องที่มีระบบปฏิบัติการที่ต่างกัน ทำหน้าที่เป็นผู้เรียกใช้บริการ (service requester) โดยเรียกใช้งานหรือขอใช้บริการผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตบนโปรโตคอล HTTP เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับเว็บเซอร์วิสมีดังนี้

1. SOAP (Simple Object Access Protocol) เป็นโปรโตคอลมาตรฐานที่ช่วยให้ผู้เรียกใช้บริการเรียกใช้งานผ่านโปรแกรมประยุกต์สามารถติดต่อกับผู้ให้บริการที่อาจสร้างด้วยโปรแกรมประยุกต์ที่แตกต่างกันได้ โดยมีการสร้างแพ็กเกจของข้อความที่อยู่ในรูปแบบของภาษา XML เป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างเครื่องผู้ให้บริการและผู้เรียกใช้บริการ โดยทำงานร่วมกับโปรโตคอล HTTP

2. WSDL (Web Services Description Language) (W3C, 2001) เป็นภาษาสำหรับกำหนดรูปแบบของการอธิบายการเรียกใช้เว็บเซอร์วิส เช่น ชื่อของบริการ เมธอด (method) พารามิเตอร์ที่เป็นข้อมูลนำเข้าและค่าผลลัพธ์ที่ส่งกลับมาเป็นต้น เพื่อให้ผู้ใช้บริการสามารถเขียนโปรแกรมเรียกใช้บริการเหล่านั้นได้

3. UDDI (Universal Description, Discovery and Integration) (OASIS, 2004) เป็นมาตรฐานสำหรับค้นหาบริการต่างๆ ของเว็บเซอร์วิสที่ผู้ให้บริการมาลงทะเบียนไว้ และบอกตำแหน่ง URL ของไฟล์ WSDL ที่ใช้อธิบายรายละเอียดการให้บริการแก่ผู้ที่มาค้นหาบริการ

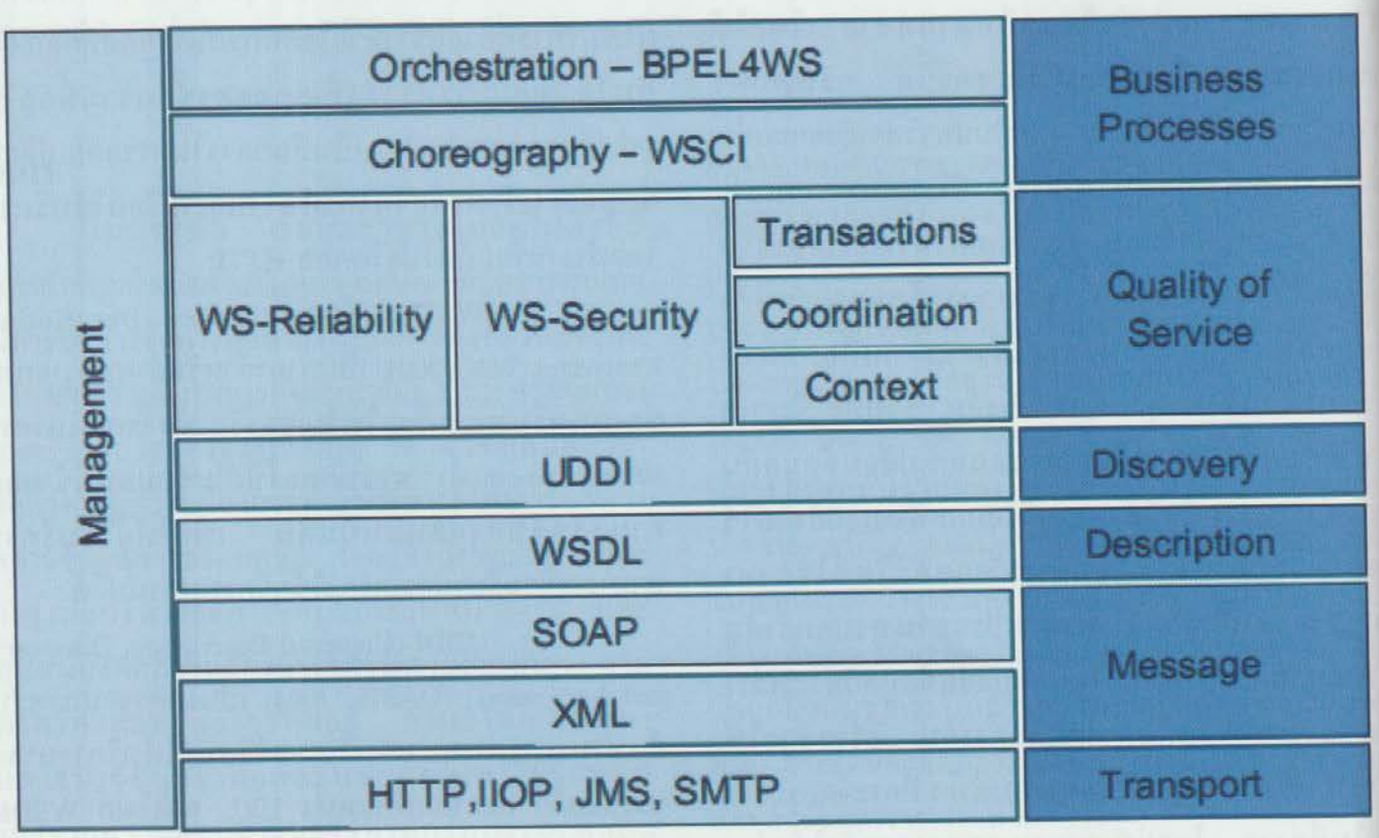
องค์ประกอบร่วมเว็บเซอร์วิส (Web Services Composition) คือ วิธีการประกอบร่วมของเว็บเซอร์วิสเพื่อทำให้เว็บเซอร์วิสต่างๆ นั้นสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างอัตโนมัติ ตัวอย่างภาษาที่ใช้สร้างองค์ประกอบ

ของเว็บเซอร์วิส เช่น BPEL4WS, WSCI, WSFL (IBM-WSFL, 2001 และ XLANG (Microsoft Corporation, 2001) เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนา เช่น NetBeans, WebSphere Studio Application Developer และ Oracle Jdeveloper โดยแต่ละภาษามีจุดมุ่งหมายเดียวกันคือสร้างกระบวนการทางธุรกิจ (business process) เพื่อกำหนดถึงการทำงานร่วมกันของเว็บเซอร์วิส โดยจะกำหนดวิธีการ และลำดับขั้นตอนของการดำเนินการร่วมกัน

BPEL4WS เป็นอีกภาษาหนึ่งที่นิยมใช้ในการสร้างองค์ประกอบร่วมของเว็บเซอร์วิสในปัจจุบัน เป็นภาษาที่ใช้กำหนดการทำงานร่วมกันของเว็บเซอร์วิส โดยจะกำหนดวิธีการ และลำดับขั้นตอนของการดำเนินการร่วมกัน ซึ่งเกิดขึ้นจากความพยายามที่จะสร้างมาตรฐานร่วมกันระหว่าง มาตรฐาน WSFL ของไอบีเอ็มและมาตรฐาน XLANG ของไมโครซอฟต์ เพื่อให้เกิดมาตรฐานที่ดีที่สุดโดยนำข้อดีของทั้งสองมาตรฐานมารวมกัน

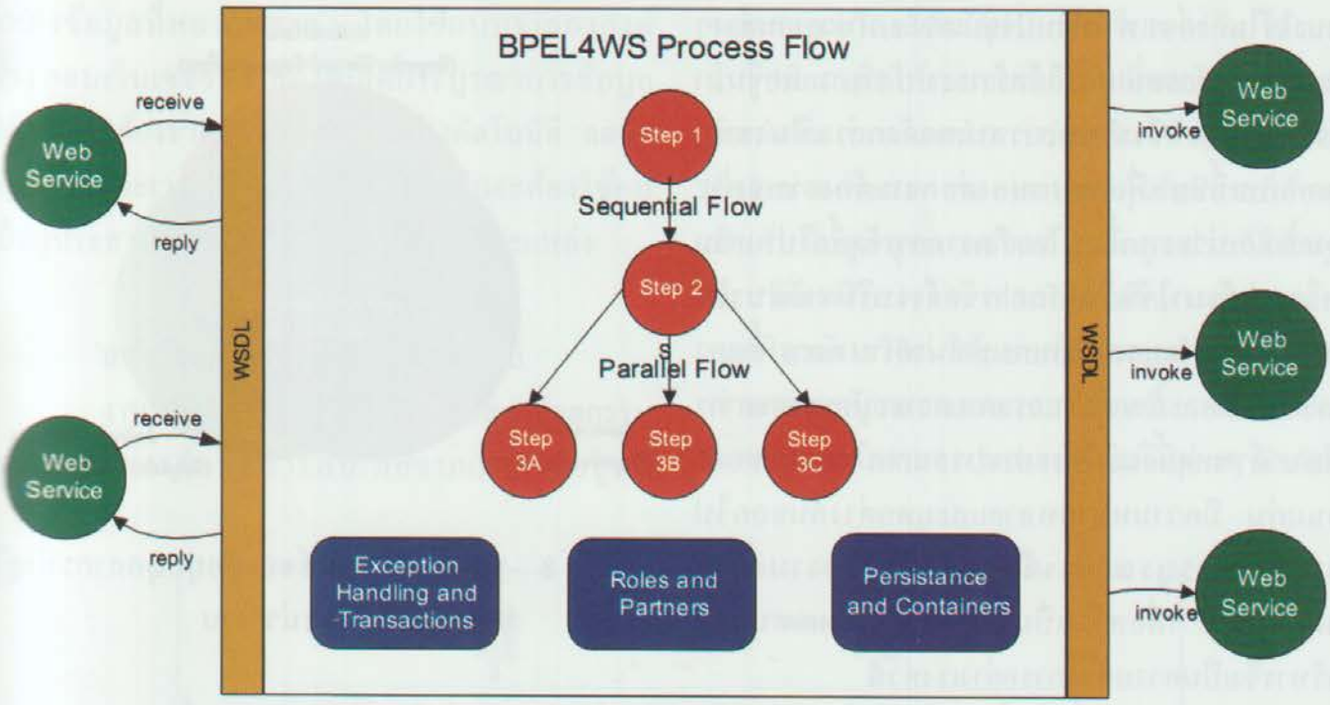
เทคโนโลยี BPEL4WS อยู่ในลำดับชั้นบนสุดของโครงสร้างสถาปัตยกรรมเว็บเซอร์วิสดังแสดงในรูปที่ 1 โดย BPEL4WS สามารถกำหนดกิจกรรมขั้นพื้นฐาน (basic activities) ให้สามารถรับข้อความ (receive message) จากผู้ร้องขอใช้บริการ แล้วเรียกใช้งาน invoke) เว็บเซอร์วิสภายนอกอื่นๆ (external web services) เพื่อรวบรวมข้อมูลจากเว็บเซอร์วิสเหล่านั้นและส่งผลการทำงานกลับไป (reply) ยังผู้ร้องขอ

รูปที่ 1 ตำแหน่ง BPEL4WS ในโครงสร้าง



สถาปัตยกรรมเว็บเซอร์วิส (W3C, 2004)

นอกจากนี้ BPEL4WS ยังสามารถกำหนดโครงสร้างลำดับการทำงานของกิจกรรมพื้นฐานเหล่านั้น (structure activities) เช่น กำหนดการทำงานเป็นแบบเรียงลำดับ (sequence) แบบการทำงานวนซ้ำ (while) หรือแบบเลือกการทำงาน (switch) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 BPEL4WS Process Flow (Chris, 2003)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลายงานวิจัยได้นำเทคโนโลยีองค์ประกอบเว็บเซอร์วิสมาใช้แก้ปัญหาการบูรณาการข้อมูลจากเว็บเซอร์วิสที่หลากหลาย ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Nanudon และคณะ (2006) ได้นำเสนอแบบจำลององค์ประกอบเว็บเซอร์วิสสำหรับธุรกิจการท่องเที่ยวแบบครบวงจรที่เรียกว่า ระบบสารสนเทศการท่องเที่ยว (Tourism Information System: TIS) ซึ่งใช้เทคโนโลยี BPEL4WS เป็นตัวกลางประสานงานให้เว็บเซอร์วิสที่ถูกสร้างให้กับธุรกิจต่างๆ เช่น ธุรกิจการจองตั๋วเครื่องบิน ธุรกิจโรงแรม รถเช่า และการเงินสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลและทำงานร่วมกันได้อย่างอัตโนมัติ และนอกจากนี้ งานวิจัยของ Yeung และคณะ (1998) ได้แสดงถึงการสร้างระบบข้อมูลสารสนเทศเกี่ยวกับธุรกิจการท่องเที่ยวโดยการสร้าง Multi-Agent ซึ่งในแต่ละ Agent เก็บข้อมูลของกลุ่มบริการท่องเที่ยว ที่แตกต่างกันไป เช่น Agent A เก็บข้อมูลของโรงแรม A และ Agent B เก็บข้อมูลของโรงแรม B ผู้ใช้สามารถติดต่อผ่านทาง Client Agent (CA) และมี Agent Name Server ซึ่งเป็นตัวกลางที่จะค้นข้อมูลที่อยู่ใน Agent ในกลุ่มต่างๆ และส่งกลับผลลัพธ์ไปยังผู้ใช้ และงานวิจัย Yeung และคณะ (2003) ได้แสดงถึงการเปรียบเทียบถึงข้อดีข้อเสียและความสามารถของภาษาที่ใช้สร้างองค์ประกอบร่วม เว็บเซอร์วิสระหว่างภาษา BPEL4WS กับภาษาอื่นๆ และการจัดการกระบวนการทางธุรกิจไว้อย่างชัดเจน

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังที่กล่าวมาข้างต้นนั้นทำให้ทราบกระบวนการทำงานขององค์ประกอบร่วมเว็บเซอร์วิส มากยิ่งขึ้นและเป็นข้อมูลในการเลือก BPEL4WS เป็นภาษาที่ใช้สร้างองค์ประกอบร่วมเว็บเซอร์วิส อีกทั้งผลการวิจัยดังกล่าวยังสามารถประยุกต์ใช้แก้ปัญหาความแตกต่างของระบบงานอื่นๆ ที่มีความหลากหลายให้สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงสามารถแก้ปัญหาการทำงานร่วมกันของระบบงานในกรณีศึกษาของงานวิจัยและพัฒนาครั้งนี้ด้วย

กรณีศึกษา

ในปัจจุบันมหาวิทยาลัยขอนแก่นเป็นองค์กรหนึ่งที่ได้ให้ความสำคัญของการบริหารจัดการข้อมูลสารสนเทศ ดังจะเห็นได้จากนโยบายของสภามหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ส่งเสริมให้ทุกคณะ/หน่วยงาน มีการพัฒนาระบบสารสนเทศ

ขึ้นมาใช้ในองค์กร ทำให้ในปัจจุบันคณะ/หน่วยงานต่างๆ ในมหาวิทยาลัยขอนแก่น ได้สร้างระบบสารสนเทศขึ้นมาใช้จำนวนมาก ซึ่งระบบสารสนเทศดังกล่าวเป็นระบบที่ออกแบบขึ้นมาเพื่อตอบสนองต่อความต้องการเฉพาะของคณะ/หน่วยงานนั้นๆ โดยเกิดจากการจัดซื้อโปรแกรมสำเร็จรูปเข้ามาใช้หรือจากการจัดจ้างบริษัทพัฒนาให้ รวมไปถึงเกิดจากบุคลากรในคณะ/หน่วยงาน พัฒนาขึ้นเองด้วยเครื่องมือและภาษาโปรแกรมตามความถนัดของบุคลากร ที่พัฒนาด้วยเหตุนี้จึงทำให้ระบบสารสนเทศในมหาวิทยาลัยขอนแก่น มีความหลากหลายและแตกต่างกันออกไป ความต้องการบูรณาการข้อมูลจากระบบงานต่างๆ ที่แตกต่างกัน เพื่อสร้างเป็นข้อมูลสารสนเทศเสนอต่อผู้บริหารจึงเป็นความต้องการอย่างเร่งด่วน

งานวิจัยและพัฒนานี้ จึงพัฒนาระบบบูรณาการสารสนเทศจากแหล่งข้อมูลที่หลากหลาย โดยเน้น 3 ระบบงานหลักของมหาวิทยาลัยได้แก่ ระบบงานของสำนักทะเบียนฯ ระบบงานของสำนักบริหารการวิจัย และระบบงานของกองการเจ้าหน้าที่ โดยทั้ง 3 ระบบงานนี้จะมีการเก็บข้อมูลที่ความซ้ำซ้อนกันอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 3

รูปที่ 3 รูปความสัมพันธ์ของข้อมูลบุคลากรที่อยู่ในระบบงานทั้ง 3 หน่วยงาน

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าทั้ง 3 หน่วยงานนี้มีการเก็บข้อมูลบุคลากรที่ซ้ำซ้อนกันทำให้เกิดปัญหาความเป็นเอกภาพของข้อมูล นอกจากนี้แต่ละระบบงานยังมีความแตกต่างของการใช้ระบบฐานข้อมูล การกำหนดสิทธิ์เข้าถึงข้อมูล และระบบปฏิบัติการดังสรุปได้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความแตกต่างของทั้งสามระบบงาน

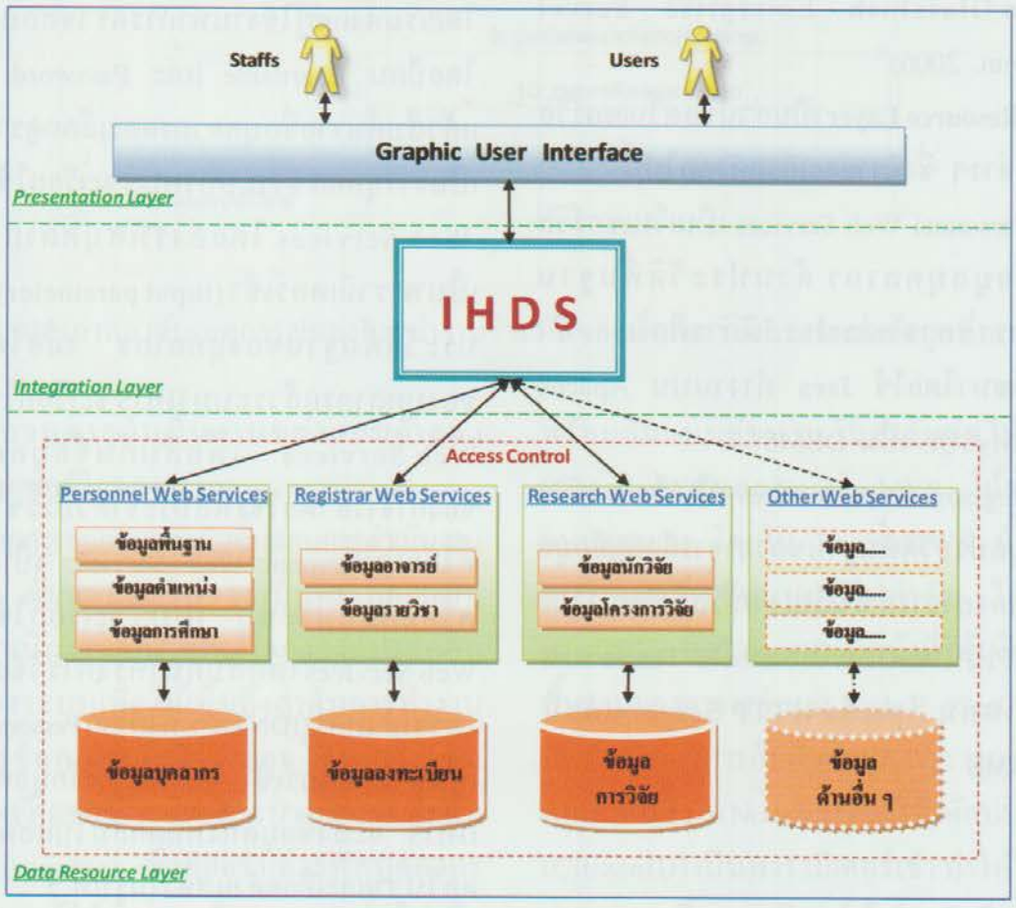
หน่วยงาน / เรื่อง	ระบบงาน		
	กองการเจ้าหน้าที่	**สำนักทะเบียนฯ**	**สำนักบริหารการวิจัย**
1.การออกแบบฐานข้อมูล (ชื่อฟิลด์และชนิดข้อมูล)	หน่วยงานเป็นผู้กำหนด	หน่วยงานเป็นผู้กำหนด	หน่วยงานเป็นผู้กำหนด
2.ระบบจัดการฐานข้อมูล	MySQL	Oracle	MS Access
3.ระบบปฏิบัติการของ Web Server	CentOS Linux	MS Windows	MS Windows

จากความแตกต่างที่แสดงในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าการนำข้อมูลจากระบบงานที่มีความแตกต่างกันมาใช้ร่วมกันนั้น มีความยุ่งยากและใช้เวลาในการดำเนินการมาก ตัวอย่างเช่น การสืบค้นข้อมูลบุคลากรที่เก็บอยู่ในระบบงานต่างๆ มาใช้ประกอบการพิจารณาแต่งตั้งบุคคลให้ดำรงตำแหน่งทางวิชาการ ตามเอกสารแนบท้ายประกาศ ก.พ.อ. (สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ, 2550) ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากทั้งสามหน่วยงานมาประกอบการพิจาณา ในงานวิจัยและพัฒนานี้จึงนำเสนอระบบบูรณาการสารสนเทศจาก

แหล่งข้อมูลที่หลากหลาย โดยใช้แบบจำลององค์ประกอบเว็บเซอร์วิสเพื่อให้เกิดการบูรณาการข้อมูลได้อย่างถูกต้องรวดเร็วและเป็นไปอย่างอัตโนมัติ ลดข้อผิดพลาดและเวลาในการทำงาน ซึ่งเดิมจะต้องใช้คนเป็นผู้ประสานงานและสืบค้นข้อมูลจากแต่ละแหล่ง

สถาปัตยกรรมการทำงานของระบบ

งานวิจัยและพัฒนานี้ได้นำเสนอสถาปัตยกรรมการบูรณาการข้อมูลสารสนเทศจากแหล่งข้อมูลที่หลากหลายโดยใช้องค์ประกอบเว็บเซอร์วิส ดังแสดงในรูปที่ 4 เพื่อให้ระบบงานต่างๆ ที่หลากหลายสามารถติดต่อสื่อสารและทำงานร่วมกันได้อย่างอัตโนมัติ ซึ่งจะช่วยอำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้บริการที่ต้องการสืบค้นข้อมูลบุคลากรในด้านข้อมูลประวัติพื้นฐาน ประวัติการรับราชการ ประวัติการศึกษา ภาระงานสอน และโครงการวิจัย ได้แบบเสร็จสรรพในจุดเดียว โดยผ่านระบบบูรณาการสารสนเทศนี้ องค์ประกอบของสถาปัตยกรรมจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4 สถาปัตยกรรมระบบบูรณาการสารสนเทศจากแหล่งข้อมูลที่มีความหลากหลาย โดยใช้ องค์ประกอบเว็บเซอร์วิส

Presentation Layer ทำหน้าที่ติดต่อกับผู้ใช้งานผ่านทางเว็บอินเทอร์เฟส โดยผู้ใช้งานสามารถเข้าใช้งานระบบได้ โดยป้อน Username และ Password ผ่านระบบ LDAP (Lightweight Directory Access Protocol) ของมหาวิทยาลัยขอนแก่น ซึ่งสามารถแบ่งระดับผู้ใช้งานออกเป็น 2 ระดับ ตามสิทธิ์การใช้งานได้แก่

(1) Staffs (เจ้าหน้าที่) สามารถสืบค้นรายชื่อบุคลากรโดยค้นจากชื่อบุคลากรหรือคณะวิชาที่บุคลากรสังกัดและดูรายละเอียดข้อมูลของบุคลากรแต่ละคนได้

(2) Users (บุคลากรทั่วไป) สามารถดูรายละเอียดข้อมูลส่วนตัวได้ แต่ไม่สามารถสืบค้นรายชื่อและดูข้อมูลของคนอื่นได้

Integration Layer เป็นระบบงานกลางของระบบที่ประกอบด้วยระบบงานบูรณาการข้อมูลสารสนเทศจากแหล่งข้อมูลที่หลากหลาย (Integrated Information System for Heterogeneous Data Sources-IHDS) ที่ทำหน้าที่เป็น Web Services Orchestration ช่วยควบคุมการทำงานของเว็บเซอร์วิสต่างๆ จัดลำดับการทำงานและควบคุมการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างเว็บเซอร์วิส รวมถึงบูรณาการข้อมูลที่ได้จากเว็บเซอร์วิสก่อนที่จะส่งกลับคืนไปแสดงผลแก่ผู้ใช้งาน ซึ่งส่วนนี้พัฒนาโดย BPEL4WS และใช้ NetBeans เป็น BPEL Designer ทำงานบน Sun GlassFish Enterprise Server (Sun Microsystem, 2006)

Data Resource Layer เป็นส่วนของเว็บเซอร์วิสจากแหล่งข้อมูลต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

(1) Personnel Web Services เป็นเว็บเซอร์วิสที่ให้บริการข้อมูลบุคลากร ด้านประวัติพื้นฐาน ประวัติการรับราชการ และประวัติการศึกษา ซึ่งเว็บเซอร์วิสนี้พัฒนาโดยใช้ Java ทำงานบน Apache Tomcat และมี MySQL เป็น DBMS

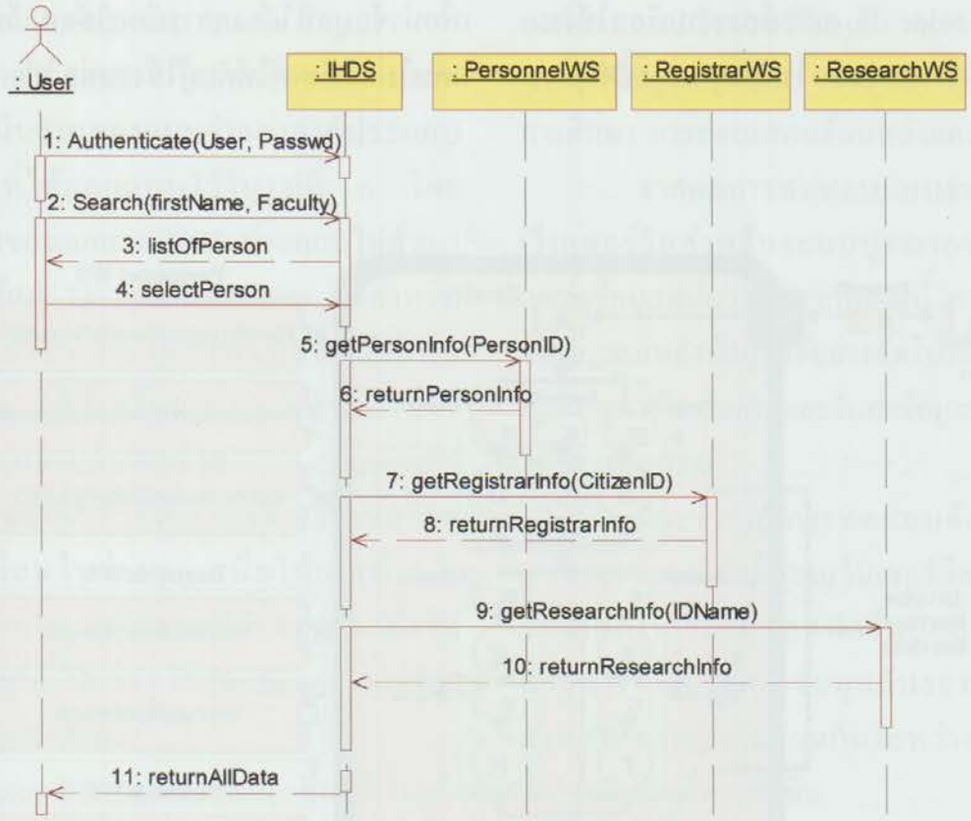
(2) Registrar Web Services เป็นเว็บเซอร์วิสที่ให้บริการข้อมูลประวัติพื้นฐานของอาจารย์และข้อมูลภาระงานสอนของอาจารย์ ซึ่งเว็บเซอร์วิสนี้พัฒนาโดยใช้ WSO2 WSF/PHP (WSO2 Web Services Framework for PHP) ทำงานบน Apache HTTP Server และมี Oracle เป็น DBMS

(3) Research Web Services เป็นเว็บเซอร์วิสที่ให้บริการข้อมูลประวัติพื้นฐานของนักวิจัยและข้อมูลโครงการวิจัย ซึ่งเว็บเซอร์วิสนี้พัฒนาโดยใช้ ASP.NET ทำงานบน IIS (Microsoft Internet Information Services) และมี Microsoft Access เป็นฐานข้อมูล

การออกแบบและพัฒนาแบบจำลององค์ประกอบเว็บเซอร์วิส

ออกแบบลำดับขั้นตอนการดำเนินงานของระบบ

ออกแบบลำดับขั้นตอนการดำเนินงานของระบบ โดยเริ่มตั้งแต่ผู้ใช้งานทำการตรวจสอบสิทธิ์การใช้งานโดยป้อน Username และ Password เพื่อเข้าสู่ระบบ แล้วสืบค้นรายชื่อบุคลากรและเลือกดูรายละเอียดข้อมูลเป็นรายบุคคล ซึ่งระบบ IHDS จะเรียกใช้งาน Personnel Web Services โดยส่งรหัสบุคลากร (PersonID) เป็นพารามิเตอร์เข้า (input parameter) จะได้ ข้อมูลประวัติพื้นฐานของบุคลากร เมื่อได้ข้อมูลพื้นฐานของบุคลากรแล้วระบบ IHDS จะเรียกใช้งาน Registrar Web Services เพื่อสืบค้นข้อมูลภาระงานสอนของอาจารย์ โดยใช้รหัสประจำตัวประชาชน (CitizenID) ที่ได้จาก Personnel Web Services เป็นพารามิเตอร์เข้า พร้อมกันนั้นระบบ IHDS จะเรียกใช้งาน Research Web Services เพื่อสืบค้นโครงการวิจัย โดยใช้เลขที่บรรจุบุคลากร (IDName) ที่ได้จาก Personnel Web Services เป็นพารามิเตอร์เข้า และเมื่อได้ข้อมูลครบแล้ว ระบบ IHDS จะส่งข้อมูลทั้งหมดกลับไปแสดงให้กับผู้ใช้งานต่อไป รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 5

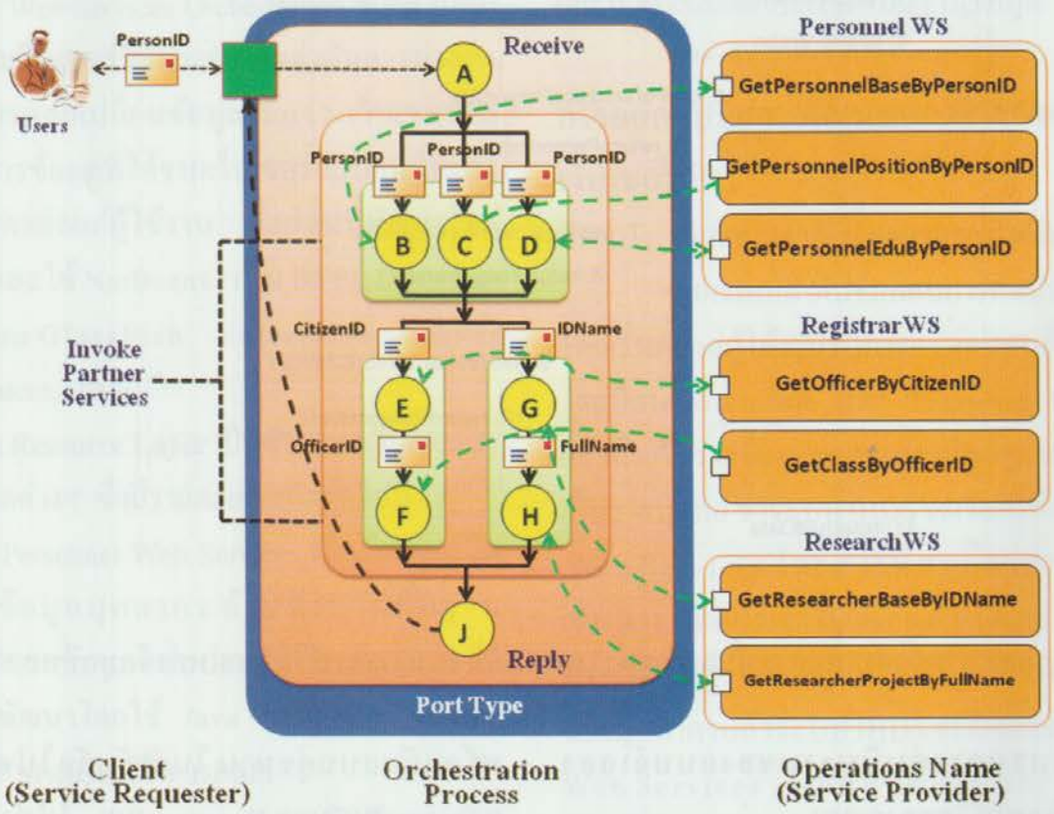


รูปที่ 5 แผนภาพลำดับเหตุการณ์ของการทำงานร่วมกันของเว็บเซอร์วิสจากแหล่งข้อมูลที่หลากหลาย

ออกแบบกระบวนการดำเนินงานของแบบจำลององค์ประกอบเว็บเซอร์วิสของระบบ

หลังจากการออกแบบลำดับขั้นตอนการดำเนินงานของระบบแล้ว ขั้นตอนถัดไป จะเป็นการออกแบบกระบวนการดำเนินงานของแบบจำลององค์ประกอบเว็บเซอร์วิสของระบบเพื่อให้เห็นถึงลำดับการทำงานและการรับส่งข้อความกันในแต่ละโอเปอร์เรชัน (operation) ของเว็บเซอร์วิส โดยกระบวนการจะเริ่มต้นที่ Node A (receive) ซึ่งคอยรับค่ารหัสบุคลากร (PersonID) จากผู้ใช้งาน แล้วจะถูกส่งต่อไปเพื่อเรียกใช้งาน PersonnelWS ซึ่งประกอบไปด้วย 3 โอเปอร์เรชัน ได้แก่ Node B (GetPersonnelBaseBy PersonID มีหน้าที่ให้บริการสืบค้นข้อมูลประวัติพื้นฐาน), Node C (GetPersonnelPositionBy PersonID มีหน้าที่ให้บริการสืบค้นข้อมูลประวัติการรับราชการ) และ Node D (GetPersonnelEduBy PersonID มีหน้าที่ให้บริการสืบค้นข้อมูลประวัติการศึกษา) โดยทั้ง 3 โอเปอร์เรชันนี้จะถูกเรียกให้ทำงานพร้อมกันแบบคู่ขนาน ในลำดับถัดไปจะเรียกใช้งาน RegistrarWS และ ResearchWS ให้ทำงานพร้อมกันแบบคู่ขนาน โดยใน RegistrarWS นั้นจะต้องเรียกใช้ 2 โอเปอร์เรชันแบบเรียงลำดับ ได้แก่ Node E (GetOfficerByCitizenID มีหน้าที่ให้บริการสืบค้นข้อมูลพื้นฐานของอาจารย์) และ Node F (GetClassByOfficerID มีหน้าที่ให้บริการสืบค้นข้อมูลภาระงานสอนของอาจารย์) ตามลำดับ ซึ่งใน Node E จะต้องใช้รหัสประจำตัวประชาชน (CitizenID) เป็นพารามิเตอร์เข้า ทำให้ได้รหัสอาจารย์ (OfficeID) เป็นพารามิเตอร์เข้าสำหรับเรียกใช้โอเปอร์เรชันใน Node F ส่วนใน ResearchWS นั้นจะต้องเรียกใช้ 2 โอเปอร์เรชันแบบเรียงลำดับเช่นกัน ได้แก่Node G (GetResearchBaseByIDName มีหน้าที่ให้บริการสืบค้นข้อมูลพื้นฐานของนักวิจัย) และ Node H (GetRearcherProjectBy FullName มีหน้าที่ให้บริการสืบค้นข้อมูลโครงการวิจัย) ตามลำดับ ซึ่งใน Node G จะต้องใช้รหัสบรรจุบุคลากร (IDName) เป็นพารามิเตอร์เข้า ทำให้ได้ชื่อนักวิจัย (firstname) และสกุลนักวิจัย (lastname)เป็นพารามิเตอร์

เข้าสำหรับเรียกใช้ Node H และเมื่อระบบเรียกใช้งานเว็บเซอร์วิสครบแล้ว จะส่งต่อไปยัง Node J (Reply) เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการเรียกใช้งานเว็บเซอร์วิสทั้งหมดกลับไปแสดงผลให้กับผู้ใช้งานต่อไป



รูปที่ 6 แผนภาพกระบวนการดำเนินงานและการรับส่งข้อความระหว่างแต่ละโอเปอร์เรชันของเว็บเซอร์วิส

สร้างแบบจำลององค์ประกอบเว็บเซอร์วิสตามมาตรฐานของ BPEL4WS

สำหรับการสร้างแบบจำลององค์ประกอบเว็บเซอร์วิสนั้นจะต้องทราบที่อยู่ของเว็บเซอร์วิสที่ต้องการเรียกใช้บริการก่อน เพื่อศึกษาไฟล์เอกสาร WSDL ซึ่งเป็นภาษาที่อธิบายคุณลักษณะการให้บริการของเว็บเซอร์วิสและวิธีการติดต่อกับเว็บเซอร์วิสนั้นๆ โดยวิธีการค้นหาที่อยู่ของเว็บเซอร์วิสนั้นสามารถสืบค้นได้จาก UDDI หรือเข้าไปที่เว็บไซต์ของผู้ให้บริการเว็บเซอร์วิสโดยตรงแล้วเริ่มสร้างกระบวนงานดังนี้

(1) สร้างเอกสาร XSD สำหรับเอกสาร WSDL

เพื่อกำหนดชื่อและชนิดของอิลิเมนต์สำหรับรองรับการรับส่งข้อมูลกันระหว่างผู้ใช้บริการกับเว็บเซอร์วิสหรือระหว่างเว็บเซอร์วิสกับเว็บเซอร์วิส ซึ่งเอกสาร XSD นี้จะถูกใช้ในเอกสาร WSDL ของ BPEL4WS Process

(2) สร้างเอกสาร WSDL สำหรับ BPEL4WS Process

เมื่อสร้าง Web Services Composition เสร็จแล้วผู้ใช้บริการจะมองเห็นเสมือนเว็บเซอร์วิสทั่วไปจึงต้องมีการสร้างเอกสาร WSDL เพื่ออธิบายคุณลักษณะการให้บริการและรอรับข้อความจากผู้ใช้บริการแล้วส่งผลลัพธ์กลับคืนผู้ใช้บริการ โดยใช้รูปแบบของ XML Schema ตามไฟล์เอกสาร XSD ที่สร้างไว้แล้ว กำหนด Port Type และกำหนด Endpoint เพื่อใช้ติดต่อกับผู้ใช้บริการหรือเว็บเซอร์วิสอื่นๆ

(3) สร้าง BPEL4WS Process

สร้างเอกสาร BPEL ให้สอดคล้องกับแผนภาพกระบวนการดำเนินงานของแบบจำลององค์ประกอบเว็บเซอร์วิสตามที่ได้ออกแบบไว้ในรูปที่ 6 โดยโครงสร้างพื้นฐานของเอกสาร BPEL ประกอบไปด้วย 3 อิลิเมนต์หลัก ได้แก่ 1) <partnerLinks> ใช้สำหรับกำหนดเว็บเซอร์วิสที่เกี่ยวข้องทั้งหมดในระบบ 2) <variables> ใช้สำหรับกำหนดค่าตัวแปรที่ใช้รับส่งข้อมูลกันระหว่างเว็บเซอร์วิส 3) <sequence> ใช้สำหรับกำหนดลำดับการทำงานของเว็บเซอร์วิส รวมถึงกำหนดเงื่อนไขต่างๆ เพื่อให้การทำงานของระบบนั้นดำเนินงานไปตามที่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยและพัฒนานี้ได้เลือกใช้ NetBeans เวอร์ชั่น 6.1 สำหรับสร้างเอกสาร bpel

(4) Deploy BPEL4WS Process ขึ้นใช้งานบน Web Server

เพื่อเป็นการนำเอาแบบจำลององค์ประกอบเว็บเซอร์วิสไปใช้งานจริง จะต้องทำการ Deploy BPEL4WS Process ขึ้นไปยัง Web Server ซึ่งในการ Deploy BPEL4WS Process นี้สามารถทำได้โดยใช้ NetBeans เวอร์ชั่น 6.1 เป็นเครื่องมือ และสำหรับงานวิจัยและพัฒนานี้ได้เลือกใช้ Sun GlassFish Enterprise Server เวอร์ชั่น 2 เป็น Web Server

ผลการวิจัย

การสืบค้นข้อมูลเว็บเซอร์วิส

งานวิจัยและพัฒนานี้ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์เพื่อทดสอบแบบจำลององค์ประกอบเว็บเซอร์วิสโดยใช้ภาษา JSP ทำงานบน Apache Tomcat เวอร์ชั่น 6.0.16 ซึ่งโปรแกรมประยุกต์นี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางระหว่างผู้ใช้บริการและแบบจำลององค์ประกอบเว็บเซอร์วิส โดยผู้ใช้บริการสามารถสืบค้นรายชื่อบุคลากรได้จากชื่อบุคลากรหรือชื่อคณะวิชาที่บุคลากรสังกัด และสามารถเลือกดูรายละเอียดข้อมูลเป็นรายบุคคลได้ ซึ่งรายละเอียดข้อมูลรายบุคคลนั้นเป็นข้อมูลที่ได้ผ่านการบูรณาการจากเว็บเซอร์วิสต่างๆ โดยแบบจำลององค์ประกอบเว็บเซอร์วิสแล้ว ประกอบไปด้วยข้อมูลประวัติพื้นฐานบุคลากร ประวัติการรับราชการ ประวัติการศึกษา ภาระงานสอนย้อนหลังและโครงการวิจัย

จากผลการทดสอบแบบจำลององค์ประกอบเว็บเซอร์วิสสำหรับระบบบูรณาการสารสนเทศจากแหล่งข้อมูลที่มีความหลากหลายนี้ สามารถสืบค้นข้อมูลจากหลายแหล่งข้อมูลได้อย่างอัตโนมัติ แต่ละเว็บเซอร์วิสสามารถทำงานร่วมกันและรับส่งข้อมูลระหว่างเว็บเซอร์วิสได้อย่างสมบูรณ์

และจากผลการทดสอบดังกล่าวนี้จะเห็นว่าแบบจำลององค์ประกอบเว็บเซอร์วิสสามารถแก้ปัญหาข้อจำกัดในเรื่องแฟลตฟอร์ม การทำงานร่วมกันและการแลกเปลี่ยนข้อมูลกันระหว่างเว็บเซอร์วิส ส่งผลให้การทำงานร่วมกันระหว่างองค์กรเป็นไปได้โดยง่ายและสะดวกยิ่งขึ้น

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยและพัฒนานี้ได้นำเสนอแบบจำลององค์ประกอบเว็บเซอร์วิสสำหรับระบบบูรณาการสารสนเทศจากแหล่งข้อมูลที่มีความหลากหลาย ซึ่งประกอบไปด้วยเว็บเซอร์วิสที่ให้บริการข้อมูลประวัติพื้นฐานบุคลากร ประวัติการรับราชการ ประวัติการศึกษา ภาระงานสอนย้อนหลังและโครงการวิจัย โดยใช้ภาษา BPEL4WS ซึ่งเป็น Web Services Composition ทำหน้าที่ในการประสานการทำงานให้เว็บเซอร์วิสทำงานร่วมกันได้อย่างอัตโนมัติ และจากผลการทดสอบจะเห็นว่าแบบจำลององค์ประกอบเว็บเซอร์วิสนี้สามารถแก้ปัญหาข้อจำกัดในเรื่องแฟลตฟอร์มที่หลากหลาย การทำงานร่วมกัน และแลกเปลี่ยนข้อมูลกันระหว่างเว็บเซอร์วิส ส่งผลให้การทำงานร่วมกันระหว่างองค์กรเป็นไปได้โดยง่ายและสะดวกยิ่งขึ้น อีกทั้งแบบจำลององค์ประกอบเว็บเซอร์วิสนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบงานอื่นๆ ที่มีความแตกต่างทางด้านแพลตฟอร์มและมีข้อมูลที่มีความซ้ำซ้อนกัน ให้สามารถทำงานร่วมกันและแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันได้

แม้ว่างานวิจัยและพัฒนานี้สามารถบูรณาการสารสนเทศจากแหล่งข้อมูลที่มีความหลากหลายให้ทำงานร่วมกันได้ แต่ยังพบว่าแบบจำลองนี้ยังขาดส่วนของการเข้ารหัสข้อมูลเพื่อเป็นการรักษาความปลอดภัยของข้อมูลที่ใช้ในระบบ และระบบอาจไม่สามารถสืบค้นข้อมูลได้ ถ้าหากบางระบบงานมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างฐานข้อมูล ซึ่งแนวทางแก้ปัญหาคือควรสร้างระบบลงทะเบียน เพื่อเก็บรายละเอียดโครงสร้างฐานข้อมูลของแต่ละระบบงานและต้องปรับปรุงข้อมูลในระบบลงทะเบียนทุกครั้งที่มีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างฐานข้อมูลในแต่ละระบบงาน

เอกสารอ้างอิง

สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ. (2550). ประกาศ ก.พ.อ. เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการพิจารณาแต่งตั้งบุคคลให้ดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ รองศาสตราจารย์ และศาสตราจารย์ ฉบับที่ 2 กรุงเทพฯ:

Aalst, W., Dumas, M., Hofstede, A. (2003). Web Service Composition Languages: Old Wine in New Bottles?, Proceedings of the 29th EUROMICRO Conference 2003. Belek-Antalya, Turkey. IEEE Computer Society. 298-307.

BEA, IBM, Microsoft, SAP and Siebel. (2003). Business Process Execution Language for Web Services Version 1.1. (Cited 15 February, 2007). Available from: http://www.ibm.com/developerworks/library/specification/ws-bpel/.

Chris, P. (2003). Web services orchestration and choregraphy. IEEE Computer. 36(10): 46-52

IBM-WSFL., (2001). Web Services Flow Language (WSFL) IBM. (Cited 25 October, 2007). Available from:http://www-3.ibm.com/software/solutions/webservices/pdf/WSFL.pdf.

Microsoft Corparation. (2001). Web Services for Business Process Design. (Cited March 10, 2007). Available from:http://www.gotdotnet.com/team/xml_wsspecs/xlang-c/.

Nanudon, E., Arch-int, N., Arch-int, S. (2006). Service Integration System for Tourism Information using Web Service Composition. Proceedings of the 3rd Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE 2006). King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok. Thailand. 133-141.

OASIS. (2004). UDDI Version 3.0.2. (Cited 20 March, 2007). Available from:http://uddi.org/pubs/uddi-v3.0.2-20041019.htm.

Sun microsystem. (2006). Sun GlallFish Enterprise Server. (Cited 15 January, 2009). Available from: https://glassfish.dev.java.net/.

W3C. (2004). World Wide Web Consortium, Web Services Architecture. (Cited 15 January, 2009). Available from: http://www.w3.org/Tr/ws-arch/.

W3C. (2007). World Wide Web Consortium, SOAP version 1.2 Part 0: Primer. (Cited 15 January, 2009). Avaliable from: http://www.w3.org/TR/soap12-part0/.

W3C. (2005). World Wide Web Consortium, Ectensible Markup Language (XML) version 1.0 (Second Edition). (Cited 15 January, 2009). Available from: http://www.w3.org/XML/.

W3C. (2002). World Wide Web Consortium. Web Service Choreography Interface (WSDL) 1.0 (Cited 15 January, 2009). Available from: http://www.w3.org/TR/wsci/.

W3C. (2001). World Wide Web Consortium. Web Services Description Language (WADL) 1.1. (Cited 15 Janunary, 2009). Available from: http://www.w3.org/Tr/wadl.

Yeung, C., Pang-Fei, T. and Yen, J. (1998). A Multi-Agent Based Tourism Kiosk on Internet, Proceedings of the Thirty-First Annual Hawaii International Conference on System Sciences-Volume 4; Kohala Coast, Hawaii, USA. p. 452.

ว.วิทย. มข. 38(1) 74-86 (2553) KKU Sci. J.38(1) 74-86 (2010)

การอบแห้งชั้นบางเปลือกมังคุดด้วยพลังงานความร้อนร่วม: ลมร้อน-แสงอาทิตย์

Thin-Layer Drying of Mangosteen Rind Using Combined Heating Energy: Hot air-Solar Energy

อีลีหย๊ะ สนิโซ [1] มะรูดิง กาซา [1]*

บทคัดย่อ

มังคุดเป็นผลไม้ที่สำคัญ (ราชินีแห่งผลไม้) ในหลายประเทศโดยเฉพาะในภาคใต้ของประเทศไทย และเป็นที่ทราบกันดีว่าสารสกัดจากเปลือกมังคุดแห้งมีคุณสมบัติทางยาหลายอย่าง อาทิเช่น มีฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย ต้านเชื้อรา และต้านการอักเสบเรื้อรัง โครงการวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบางเปลือกมังคุดความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 170 มาตรฐานแห้ง ด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานความร้อนร่วม YRU-TLD#1(R&E) ที่อาศัยลมร้อนและพลังงานแสงอาทิตย์ ในช่วงอุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที จากผลการทดลองสรุปได้ว่าอุณหภูมิมีผลต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งโดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอ็มพิริคัลของ Page เหมาะสมที่สุดในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมมีศักยภาพที่ดีในการลดพลังงาน

Abstract

The Mangosteen is an important fruit (Queen of fruit) in many countries, especially in the southern of Thailand. The dried Mangosteen rind contains some chemical substances that can act as pharmacological activities such as anti-bacterial, anti-inflammatory and anti-fungal. The purpose of this project was study the drying kinetics of Mangosteen rind using combined thermal energy YRU-TLD#1(R&E) dryer, using hot air and solar energy. An initial moisture content about 170% d.b., temperature in rang of 50-80°C and 1.0 m/s air velocity was used. The results of this study showed that the temperature had significant effects on the drying kinetics. When the temperature increased the drying rate increased. The calculation data from the Page model

[1] สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา อ.เมือง จ.ยะลา 95000

[*] Corresponding Author, E-mail: saniso.e@hotmail.com

is reasonable for describing drying kinetics of mangosteen rind. The combined heating energy drying shows good potential to reduce the energy input.

คำสำคัญ : การอบแห้งชั้นบาง มังคุด พลังงานความร้อนร่วม

Keywords : Thin-layer drying, Mangosteen, Combined thermal energy

บทนำ

มังคุด (mangosteen) มีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า *Garcinia mangostana* L. ปัจจุบันประเทศไทยส่งออกมากที่สุดในโลก โดยมีแหล่งผลิตที่สำคัญ คือ ภาคใต้ ได้แก่ จังหวัดชุมพร ระนอง นครศรีธรรมราชและนราธิวาส ซึ่งมีพื้นที่ปลูกรวมกันประมาณร้อยละ 61.23 และให้ผลผลิตประมาณร้อยละ 62.34 ของทั้งประเทศ (www.natres.psu.ac.th/Researchcenter/tropiccalfruit/fruit/mangosteen.htm) ในเนื้อผลมีกากใยน้ำตาล กรดอินทรีย์ แคลเซียม ฟอสฟอรัสและเหล็ก ในขณะที่เปลือกผลมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ สารรสฝาดกลุ่ม Tannins และสารจำพวก Xanthones นอกนี้ยังมีสาร Chrysanthemin, Garcinone A, Garcinone B, Gartanin และ Kolanone จากการวิจัยทางวิทยาศาสตร์ของนักเภสัชศาสตร์เชียงใหม่ (วันดี กฤษณพันธ์, 2541; สุนทรี สิงหบุตรา, 2540) และกลุ่มเภสัชกรของโรงพยาบาลเจ้าพระยาอภัยภูเบศร ปราจีนบุรี (www.thairath.co.th/news.php? Sec-tion=agriculture&content=9776) พบว่า เปลือกมังคุดมีสาร Tannin ที่มีฤทธิ์สมานแผล ตกตะกอนโปรตีน และส่วนใหญ่มีฤทธิ์ฆ่าเชื้อโรค สารแมงโกสติน (mangostin) ช่วยลดอาการอักเสบ สารแมงโกสตีนอล (mangostenol) สามารถนำไปเป็นอาหารสำหรับผู้ป่วยโรคมะเร็งในหลอดเลือดหรือใช้กับผู้ป่วยโรคไขข้อหรือทำเป็นเครื่องสำอางเกี่ยวกับผิวพรรณและชะลอความแก่ สาร Xanthones มีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียที่ทำให้เกิดหนองรวมทั้งมีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อราที่เป็นต้นเหตุของโรคผิวหนัง และสาร Antioxdant สามารถต้านฤทธิ์การอักเสบ ฆ่าเชื้อโรค รักษาแผลและยับยั้งกลิ่นตัว ทางกลุ่มเภสัชกรของโรงพยาบาลเจ้าพระยาอภัยภูเบศรปราจีนบุรี จึงนำสารเหล่านี้มาผสมเป็นสบู่เปลือกมังคุดและยาทาแผลฆ่าเชื้อจากเปลือกมังคุดใช้กับงานของโรงพยาบาล และได้ผ่านการรับรองมาตรฐานจากคณะกรรมการอาหารและยา (อย.) นอกจากนี้น้ำสกัดจากเปลือกมังคุดผสมกับน้ำผักและผลไม้ เช่น น้ำองุ่น ทำเป็นเครื่องดื่มได้ ในขณะที่เปลือกมังคุดตากแห้งผสมกับน้ำดื่มสามารถแก้อาการท้องเสีย ใช้ทาแผลพุพอง เน่าเปื่อย และเป็นส่วนผสมทำสบู่สมุนไพร สารบางตัวในเปลือกมังคุดช่วยกระตุ้นให้เซลล์ Phagocyte ในร่างกายของมนุษย์ที่ทำหน้าที่ทำลายเชื้อแบคทีเรียสามารถทำงานได้ดีขึ้น ในขณะเดียวกันนักเภสัชศาสตร์เชียงใหม่ (www.variety.teenee.com/variety.teenee.com/science/3285.html) ได้วิจัยเพื่อปรุงยาแต้มหัวสิวจากน้ำหมักชีวภาพที่ได้จากเปลือกมังคุด กระชายดำ ขมิ้นชัน และใบบัวบก พบว่า เปลือกมังคุดมีสารชีวภาพที่ดีที่สุดในการออกฤทธิ์ต้านแบคทีเรียที่เป็นตัวการทำให้เกิดสิวหัวหนอง

โครงการวิจัยนี้จึงมุ่งทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งเปลือกมังคุดเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบอบแห้งเปลือกมังคุดและผลผลิตทางการเกษตรอื่นๆ ในพื้นที่จังหวัดยะลา ปัตตานี และนราธิวาส ที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพต่อไป

ทฤษฎีพื้นฐานการอบแห้ง

การอบแห้ง

การอบแห้ง (drying) คือ กระบวนการลดความชื้นวัสดุ ส่วนใหญ่ใช้หลักการถ่ายโอนความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย โดยให้ของเหลวที่อยู่ภายในวัสดุเคลื่อนที่ออกมายังผิวและระเหยออกสู่อากาศที่ใช้อบแห้ง การเคลื่อนที่

ของความชื้นภายในวัสดุอาศัยความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้นและความดันไอน้ำในวัสดุกับอากาศร้อน ช่วงแรกของการอบแห้งเป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant drying rate period) ซึ่งเป็นช่วงที่อุณหภูมิของวัสดุมีค่าคงที่ช่วงที่สองเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling drying rate period) เป็นช่วงที่ผิวของวัสดุมีปริมาณน้ำลดลงมาก การถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลจะเกิดขึ้นภายในวัสดุโดยน้ำภายในจะเคลื่อนที่มายังผิววัสดุในรูปของของเหลวหรือไอน้ำแล้วระเหยเมื่อได้รับความร้อนจากอากาศ การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในมายังผิววัสดุจะช้ากว่าการพาความชื้นจากผิวไปยังอากาศทำให้ผิวของวัสดุอยู่ในสภาพที่แห้งและอุณหภูมิของวัสดุเริ่มสูงขึ้น (Bala, 1997) ที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพันธ์อากาศคงที่ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดๆ หนึ่งซึ่งจะไม่เปลี่ยนแปลงอีกต่อไป ที่จุดนี้ความดันไอของน้ำในวัสดุมีค่าเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆ ด้วย (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540) ทำให้น้ำไม่สามารถระเหยออกจากวัสดุได้อีกเรียกความชื้นในขณะนี้ว่า ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content, M_{eq})

ความชื้น (moisture, M) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเปรียบเทียบกับมวลวัสดุชื้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงออกเป็น 2 ลักษณะ (AOAC, 2005) คือ ความชื้นมาตรฐานเปียกและความชื้นมาตรฐานแห้ง ดังนี

$$M_w = \frac{w-d}{w} \quad (1)$$

$$M_d = \frac{w-d}{d} \quad (2)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (ร้อยละมาตรฐานเปียก), M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (ร้อยละมาตรฐานแห้ง), d คือ มวลแห้ง ของวัสดุ (กิโลกรัม) และ w คือ มวลเปียกของวัสดุ (กิโลกรัม)

อัตราส่วนความชื้น (moisture ratio, MR) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้นเมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินไปที่เวลาใดๆ (AOAC, 2005; Crank, 1975) เขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$MR = \frac{(M_t - M_{eq})}{(M_0 - M_{eq})} \quad (3)$$

เมื่อถือว่า ค่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น ($M_{eq} << M_0$) และความชื้นที่เวลาใดๆ ($M_{eq} << M_t$) จึงละค่าความชื้นสมดุลในสมการข้างต้น ทำให้สามารถเขียนสมการ (3) ได้ใหม่ (Bala, 1997; Crank, 1975; Jena and Das, 2007) ดังนี้

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (4)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (อัตราส่วน), M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (ร้อยละมาตรฐานแห้ง), M_t คือ ความชื้นของวัสดุที่เวลาใดๆ (ร้อยละมาตรฐานแห้ง) และ M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ (ร้อยละมาตรฐานแห้ง)

จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

จลนพลศาสตร์การอบแห้ง (drying kinetics) พิจารณาได้โดยอาศัยสมการการแพร่ตามกฎข้อที่ 2 ของฟิคก์ (Fick's second low of diffusion) ที่สมมติว่าการแพร่ของน้ำหรือความชื้นออกจากเปลือกมังคุดเกิดจากเกรเดียนท์ของความเข้มข้นของความชื้น (Bala, 1997; Crank, 1975) ซึ่งเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{eff}\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}\right) \quad (5)$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของความชื้น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร), D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (ตารางเมตร/วินาที), t คือ เวลา (วินาที), และ x, y, z คือ พิกัดแกน

เมื่อถือว่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าคงที่ความชื้นมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ ไม่เกิดความต้านทานของการถ่ายเทมวลที่ผิววัสดุและอุณหภูมิคงที่ จะสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

(effective moisture diffusivity, D_{eff}) (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540) ของเปลือกมังคุดที่เป็นทรงลูกบาศก์ (cubic shape) ได้จากผลเฉลยของสมการ (5) (Crank, 1975) ดังนี้

$$MR = \left(\frac{8}{\pi^2}\right)^3 \sum_{n=0}^{\infty}\left\{\left[\frac{1}{(2n+1)^2}\right]^3 \exp\left[-(2n+1)^2\pi^2 D_{eff} t\left(\frac{1}{L_x^2}+\frac{1}{L_y^2}+\frac{1}{L_z^2}\right)\right]\right\} \quad (6)$$

เนื่องจากเทอมท้ายๆ ของสมการ (6) จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเทอมแรกจึงพิจารณาเทอมแรกเพียงเทอมเดียวจะได้ ดังนี้

$$MR = \left(\frac{8}{\pi^2}\right)^3 \exp\left[-\pi^2 D_{eff} t\left(\frac{1}{L_x^2}+\frac{1}{L_y^2}+\frac{1}{L_z^2}\right)\right] \quad (7)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (อัตราส่วน), D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (ตารางเมตร/วินาที), t คือ เวลา (วินาที), L_x คือ ความกว้าง (เมตร), L_y คือ ความยาว (เมตร), L_z คือ ความหนา (เมตร) และ n คือ จำนวนข้อมูลที่วิเคราะห์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง (drying kinetic model) ได้นำสมการการอบแห้งแบบเอ็มพิริคัล (empirical drying equation) มาวิเคราะห์สมการการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (non-linear regression analysis) (ทรงศิริ แต้สมบัติ, 2549) เพื่อหาค่าคงที่ของสมการการอบแห้งแบบชั้นบาง (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งแบบชั้นบาง (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540; Bala, 1997; Crank, 1975)

ชื่อแบบจำลองจลนพลศาสตร์	รูปแบบสมการ
1. Newton	$MR = (M_t-M_{eq})/(M_0-M_{eq}) = \exp(-kt)$
2. Page	$MR = (M_t-M_{eq})/(M_0-M_{eq}) = \exp(-kt^n)$
3. Modified Page	$MR = (M_t-M_{eq})/(M_0-M_{eq}) = \exp(-(kt)^n)$
4. Henderson & Pabis	$MR = (M_t-M_{eq})/(M_0-M_{eq}) = a\exp(-kt)$
5. Wang & Singh	$MR = (M_t-M_{eq})/(M_0-M_{eq}) = 1+at+bt^2$
6. Two-Terms Exponential	$MR = (M_t-M_{eq})/(M_0-M_{eq}) = a\exp(-kt)+(1-a)\exp(-kat)$
7. Modified Logarithmic	$MR = (M_t-M_{eq})/(M_0-M_{eq}) = a\exp(-kt)+c^k$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (อัตราส่วน), M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (ร้อยละมาตรฐานแห้ง), M_t คือ ความชื้นของวัสดุที่เวลาใดๆ (ร้อยละมาตรฐานแห้ง), M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ (ร้อยละมาตรฐานแห้ง), t คือ เวลา (วินาที) และ a, b, c, k, n คือ ค่าคงที่สมการ

การหดตัว

การหดตัว (shrinkage) คือ ค่าที่บงบอกถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุเนื่องจากการลดลงของความชื้นในวัสดุระหว่างการอบแห้ง (Bala, 1997) ในงานวิจัยนี้พิจารณาการหดตัวเชิงปริมาตร (volumetric shrinkage) ที่หาได้โดยการวัดความกว้าง ความยาว และความหนาของเปลือกมังคุดที่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการอบแห้ง (Thanit et al., 2007) ซึ่งสามารถ

คำนวณได้ ดังนี้

$$\% \text{ Shrinkage} = \left(\frac{V_0 - V_t}{V_0}\right) \times 100 \qquad (8)$$

เมื่อ V_0 คือ ปริมาตรวัสดุเริ่มต้น (ลูกบาศก์เมตร) และ V_t คือ ปริมาตรวัสดุที่เวลาใดๆ (ลูกบาศก์เมตร)

สถิติวิเคราะห์

การทดลองนี้ได้พิจารณาค่าทางสถิติ 3 ค่า คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (coefficient of correlation, r) ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Percentage Error, %E) วิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายจลนศาสตร์การอบแห้ง โดยถือว่าแบบจำลองที่ให้ค่า r สูงสุด และให้ค่า RMSE และ %E ต่ำสุด เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด (ทรงศิริ แต้สมบัติ, 2549; Singh and Gupta, 2007) ซึ่งสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i Y_i - \overline{X}\sum_{i=1}^{n} Y_i}{\sqrt{(\sum_{i=1}^{n} X_i^2 - \overline{X}\sum_{i=1}^{n} X)(\sum_{i=1}^{n} Y_i^2 - \overline{Y}\sum_{i=1}^{n} Y_i)}} \qquad (9)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(E_i - P_i)^2\right]^{1/2} \qquad (10)$$

$$\%E = \sum_{i=1}^{n}\left|\frac{E_i - P_i}{E_i}\right| \times 100 \qquad (11)$$

เมื่อ X คือ ตัวแปรอิสระ, Y คือ ตัวแปรตาม, P_i คือ ข้อมูลจากแบบจำลอง, E_i คือ ข้อมูลจากการทดลอง, n คือ จำนวนข้อมูลที่วิเคราะห์ และ i คือ จำนวนเต็มบวก

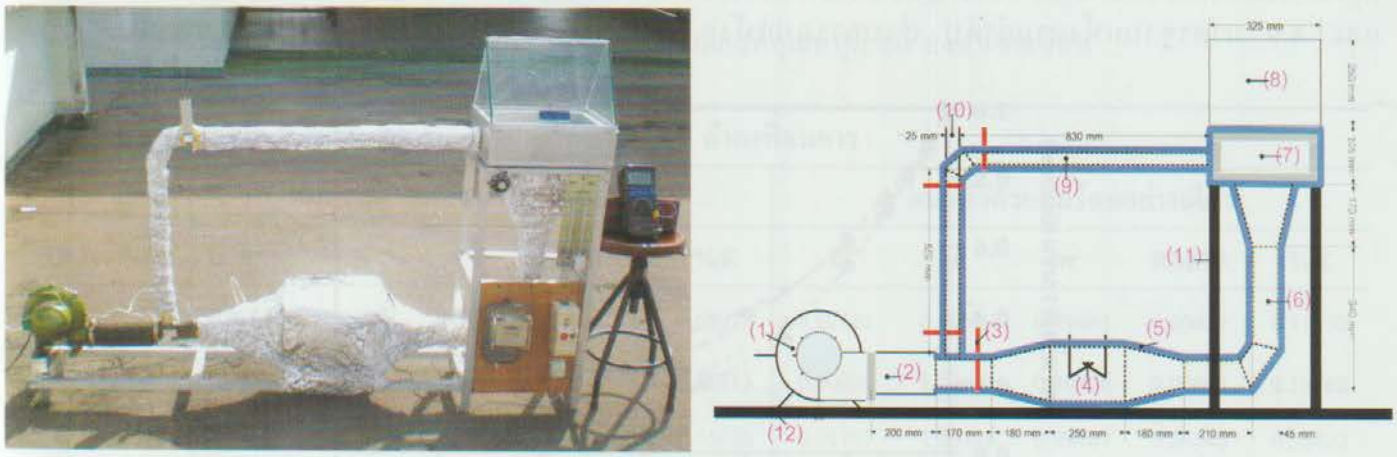
อุปกรณ์และวิธีดำเนินการทดลอง

การเตรียมตัวอย่างทดลอง

ตัวอย่างทดลองที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แก่ เปลือกมังคุด ซึ่งเตรียมได้โดยการนำเปลือกมังคุดสดที่เหลือทิ้งมาปอกเปลือกนอกออกแล้วตัดเป็นทรงสี่เหลี่ยมให้มีขนาดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 19.52x19.52x8.34 ลูกบาศก์มิลลิเมตร โดยใช้เวอร์เนียร์คาร์ลิปเปอร์ความละเอียด 0.05 มิลลิเมตร วัดขนาด จากนั้นทำความชื้นให้มีค่าสม่ำเสมอโดยการบรรจุเปลือกมังคุดลงในถุงพลาสติกปิดผลึกแล้วนำไปเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิประมาณ 3-5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-5 วัน ระหว่างนี้ทำการคลุกเคล้าทุกวันจนความชื้นกระจายสม่ำเสมอ จึงนำออกมาหาความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน AOAC (2005) และพบว่า ความชื้นของเปลือกมังคุดที่ได้มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 170 มาตรฐานแห้ง

เครื่องอบแห้ง

การอบแห้งเปลือกมังคุดในโครงการวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องอบแห้งแบบชั้นบางที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์และลมร้อน YRU-TLD#1(R&D) (อีลีหยัะ มะรูดิงกาซา และมูฮัมมัดรุสดี เจ๊ะเต๊ะ, 2551) ต้นแบบที่ได้พัฒนาขึ้นในระดับห้องปฏิบัติการ(รูปที่ 1) ซึ่งด้านบนเป็นกระจกใสหนา 3.00 มิลลิเมตร ทำมุม 60 องศากับแนวระดับ 2 แผ่นประกบกันเป็นทรงหน้าจั่วขนาด 325×280 ตารางมิลลิเมตร ทำหน้าที่ป้องกันแมลง ฝุ่นละอองและให้รังสีแสงอาทิตย์ผ่านไปยังห้องอบแห้งสี่เหลี่ยมพื้นผ้าขนาด 325×260×105 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ที่หุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนโพลีเอทธีลีน (M-PE Alumax; R-Value 20 ชั่วโมง-ตารางฟุต-องศาฟาเรนไฮต์/บีทียู) หนา 10 มิลลิเมตร ส่วนด้านล่างต่อเข่ากับท่อนำอากาศร้อนจากขดลวดความร้อนแบบขดยากันยุง (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ =132 มิลลิเมตร/240 วัตต์) ที่ควบคุมความร้อนอัตโนมัติด้วยเทอร์โมสตัท EGOThermostat (50-300 องศาเซลเซียส) และเชื่อมต่อเข้ากับพัดลมเป่าอากาศ YAMAGUSHI Electric Blower (KY-20/220 โวลต์/50 เฮิร์ต) และมีมิเตอร์ไฟฟ้า WATT-HOUR METER (DD 28/220 โวลต์/5(10) แอมแปร์/50 เฮิร์ต) วัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระหว่างการอบแห้ง



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้ง YRU-TLD#1(R&E) (อีลีหยัะ มะรูดิงกาซา และมูฮัมมัดรุสดี เจ๊ะเต๊ะ, 2551)

วิธีการทดลอง

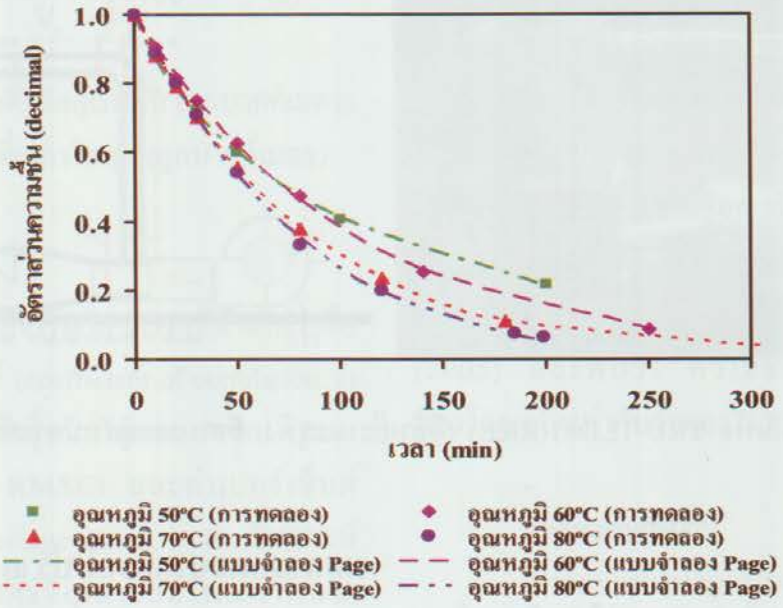
การทดลองอบแห้งชั้นบางเปลือกมังคุดด้วยพลังงานความร้อนร่วมทำได้โดยนำเปลือกมังคุดสดที่มีความชื้นโดยเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 170 มาตรฐานแห้ง ประมาณ 250 กรัม มาอบแห้งด้วยเครื่อง YRU-TLD#1(R&D) ที่อุณหภูมิ 50 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.0 เมตร/วินาที ซึ่งวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบดิจิตอลยี่ห้อ DIGICON รุ่น DA-41 ความละเอียด ±0.1 เมตร/วินาที โดยแยกการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์และลมร้อนอย่างเดียว ระหว่างการอบแห้งวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม อุณหภูมิภายในและภายนอกห้องอบแห้งด้วยเครื่อง Flash Link Data Logger รุ่น Delta TRAK ความละเอียด 0.1 องศาเซลเซียส วัดการหดตัวของเปลือกมังคุดโดยสุ่มตัวอย่างมาวัดด้วยเวอร์เนียร์คาร์ลิปเปอร์ความละเอียด 0.05 มิลลิเมตร แล้วใช้ค่าเฉลี่ย และทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดลองเป็นระยะๆ ทุกๆ 10 นาที ใน 0.5 ชั่วโมงแรก จากนั้นชั่งน้ำหนักทุกๆ 20-30 นาที ด้วยเครื่องชั่งแบบดิจิตอลยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น PB 1502 ความละเอียด 0.01 กรัม

ผลการทดลองและอภิปราย

จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

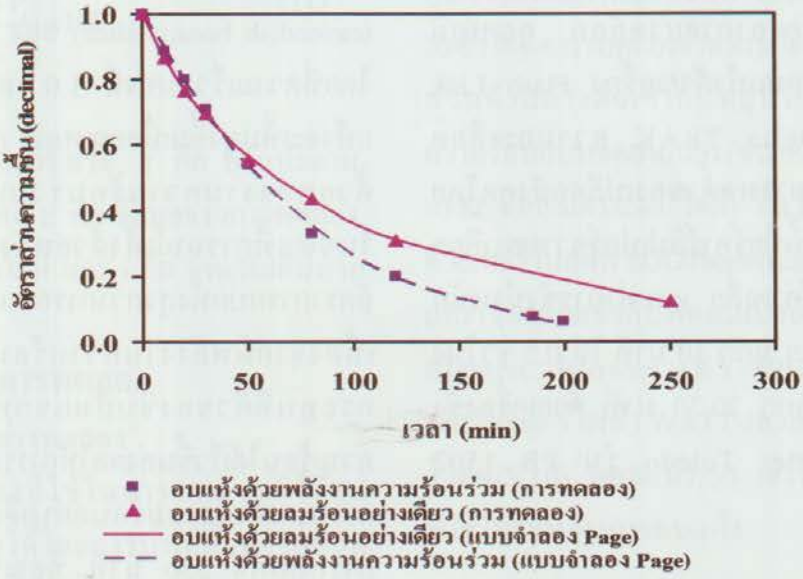
จากการทดลองอบแห้งชั้นบางเปลือกมังคุดด้วยเครื่อง YRU-TLD#1(R&D) โดยใช้ตัวอย่างทดลองเฉลี่ย 250 กรัม ที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 170 มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิ 50 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งจะอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองอบแห้งเนื้อมะพร้าวขูด (coconut presscake) ของ Jena and Das (2007) การอบแห้งเมล็ดฟักทอง (*Cucurbita pepo* L.) ของ Sacilik (2007) และการทดลองอบแห้งกล้วยหอมหั่นบาง (cavendish banana slice) ของ Thanit และคณะ (2007) โดยที่ความเร็วลมคงที่ 1.0 เมตร/วินาที อัตราการอบแห้งจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิ (รูปที่ 2) ทั้งการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมและลมร้อนอย่างเดียว ในขณะที่การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว เนื่องจากมีพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มาตกกระทบที่ผิวของชิ้นส้มแขกทำให้ชิ้นส้มแขกสะสมความร้อนได้เร็วขึ้นส่งผลให้การระเหยของน้ำเกิดได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว (รูปที่ 3) ณ เวลาการอบแห้ง 250 นาที ที่อุณหภูมิ 50 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วม

จะเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับร้อยละ 43.7 30.0 13.8 และ 8.9 มาตรฐานแห้งตามลำดับ ส่วนการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียวจะเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับร้อยละ 50.4 37.7 18.3 และ 12.2 มาตรฐานแห้งตามลำดับ



รูปที่ 2 อัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งเปลือกมังคุดด้วยลมความร้อนอย่างเดียว

จากการวิเคราะห์สมการการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นแล้วพิจารณาค่าสถิติ 3 ค่า คือ r, RMSE และ %E โดยแบบจำลองที่ให้ค่า r สูงสุด และให้ค่า RMSE และ %E ต่ำสุด ถือเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายจลนศาสตร์การอบแห้งเปลือกมังคุด (ทรงศิริ แต้สมบัติ, 2549) ซึ่งการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองของ Page เหมาะสมที่สุดในการอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งเปลือกมังคุดที่ทุกค่าอุณหภูมิ (รูปที่ 2) ทั้งการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมและลมร้อนอย่างเดียว โดยให้ค่า r, RMSE และ %E อยู่ในช่วง 0.99652 - 0.99990, 0.00447 - 0.02268 และ 0.11032 - 0.65975 ตามลำดับ (ตารางที่ 2)



รูปที่ 3 อัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งเปลือกมังคุดด้วยพลังงานความร้อนร่วมและลมร้อนอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2 ค่าคงที่สมการตามแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งแบบชั้นบางของ Page เมื่ออบแห้งเปลือกมังคุดด้วยพลังงานความร้อนร่วมและลมร้อนอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่สมการ									
	อบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วม					อบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว				
	k	n	r	RMSE	%E	k	n	r	RMSE	%E
50	0.01695	0.82801	0.99671	0.02268	0.65975	0.02161	0.80623	0.99983	0.00459	0.11032
60	0.01430	0.93577	0.99990	0.00447	0.15813	0.00935	1.00623	0.99976	0.00662	0.18560
70	0.03105	0.76029	0.99652	0.02152	0.65628	0.01197	1.00118	0.99987	0.00540	0.58422
80	0.02229	0.82758	0.99980	0.00557	0.15286	0.00852	1.09806	0.99961	0.00936	0.32187

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

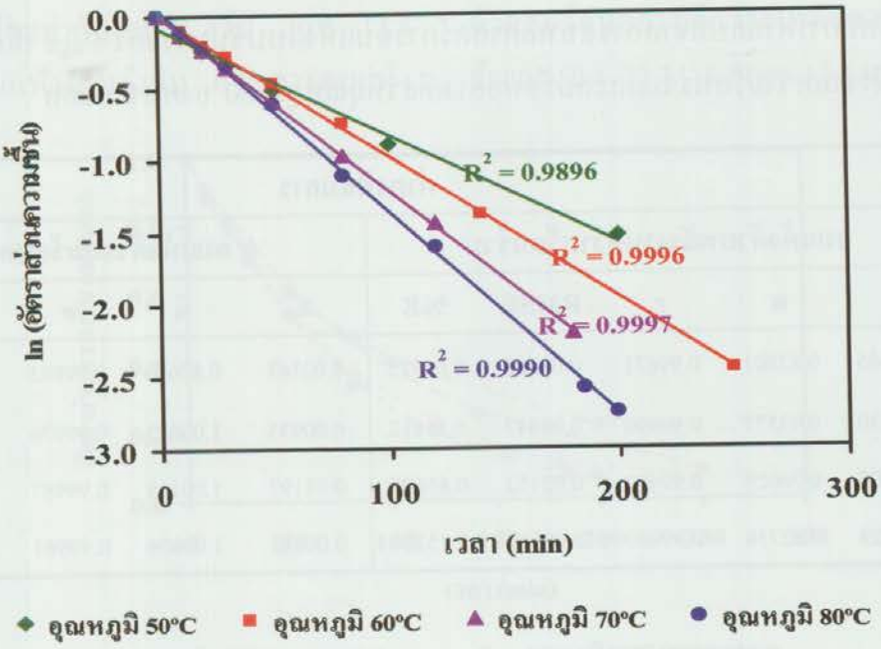
เมื่อพิจารณาความชันของกราฟ (slope, m) จากความสัมพันธ์ระหว่าง ln ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้งตามสมการ (7) จะสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลได้ ดังนี้

$$m = -\pi^2 D_{eff}\left(\frac{1}{L_x^2}+\frac{1}{L_y^2}+\frac{1}{L_z^2}\right) \qquad (12)$$

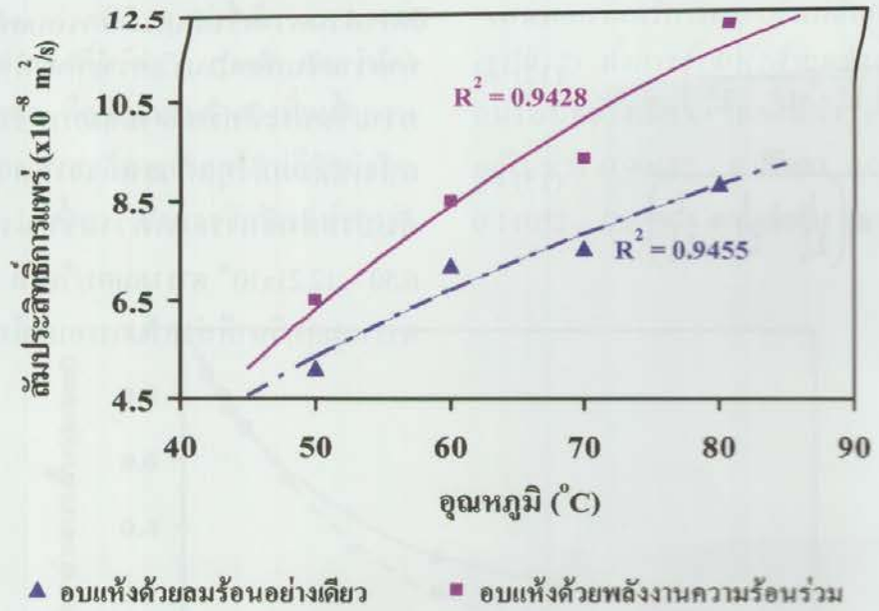
$$\text{หรือ } D_{eff} = \frac{m}{-\pi^2\left(\frac{1}{L_x^2}+\frac{1}{L_y^2}+\frac{1}{L_z^2}\right)} \qquad (13)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (ตารางเมตร/วินาที), L_x คือ ความกว้าง (m), L_y คือ ความยาว (เมตร), L_z คือ ความหนา (เมตร) และ m คือ ความชัน

เมื่อเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง ln ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้ง (รูปที่ 4) จะได้ค่าความชันเพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลตามสมการ (13) ซึ่งพบว่า การอบแห้งเปลือกมังคุดด้วยพลังงานความร้อนร่วมจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลอยู่ในช่วง 6.50 - 12.21x10^{-8} ตารางเมตร/วินาที และ 5.11 - 8.84x10^{-8} ตารางเมตร/วินาที สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้งเปลือกมังคุดด้วยพลังงานความร้อนร่วม



รูปที่ 5 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเมื่ออบแห้งเปลือกมังคุดด้วยพลังงานความร้อนร่วมและลมร้อนอย่างเดียว

นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว เนื่องจากมีพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มาตกกระทบที่ผิวของชิ้นส้มแขกทำให้ชิ้นส้มแขกสะสมความร้อนได้เร็วขึ้นส่งผลให้การแพร่ของความชื้นเกิดได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว และเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้

มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ พบว่า เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย (รูปที่ 5) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองอบแห้งกล้วยแผ่นของจารุวรรณ กุลวิศว และคณะ (2550) และการอบแห้งถั่วเหลืองของ Ibrahim (2005)

พลังงานกระตุ้น

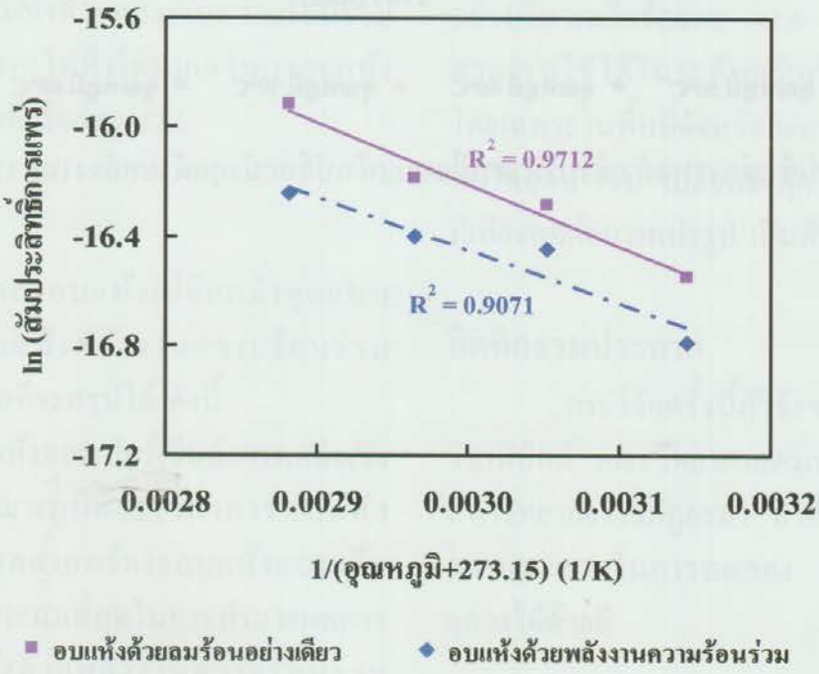
พลังงานกระตุ้น (activation energy, E_a) ของการอบแห้งพิจารณาได้โดยอาศัยสมการความสัมพันธ์ของอารีเนียส (Arrhenias type equation) (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540; Bala, 1997) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T+273.15)}\right) \quad (14)$$

$$\text{หรือ } \ln D_{eff} = -\frac{E_a}{R(T+273.15)} + \ln D_0 \quad (15)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (ตารางเมตร/วินาที), D_0 คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ (ตารางเมตร/วินาที), E_a คือ พลังงานกระตุ้นที่ใช้ในการอบแห้ง (กิโลจูล/โมล), T คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) และ R คือ ค่าคงที่สากลของก๊าซเท่ากับ 8.314 กิโลจูล/โมล-องศาเคลวิน

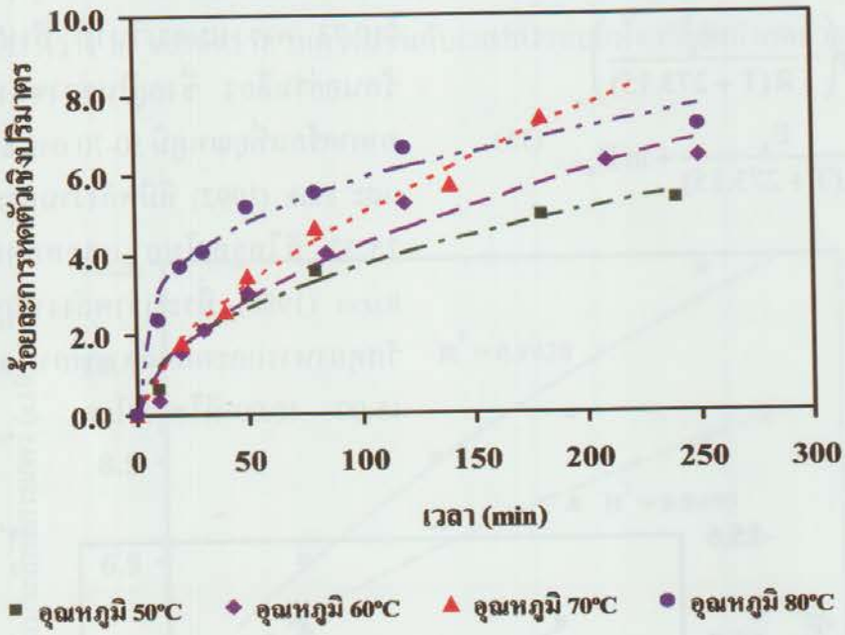
เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln ของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับ 1/R(T+273.15) (รูปที่ 6) แล้วอาศัยสมการ (15) ข้างต้น จะสามารถคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นในการอบแห้งได้ โดยมีค่าเท่ากับ 18.88 กิโลจูล/โมล เมื่อ D_0 เท่ากับ -9.51 ตารางเมตร/วินาที สำหรับการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วม และมีค่าเท่ากับ 16.12 กิโลจูล/โมล เมื่อ D_0 เท่ากับ -10.73 ตารางเมตร/วินาที สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว ซึ่งอยู่ในช่วงของการอบแห้งกล้วยแบบอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 50-70 องศาเซลเซียส ของ Nogueira และ Park (1992) ที่มีพลังงานกระตุ้นอยู่ในช่วง 15.50 - 25.32 กิโลจูล/โมล และสอดคล้องกับรายงานของ Rizvi (1986) ที่ระบุว่าพลังงานกระตุ้นของการอบแห้งวัสดุอาหารและผลผลิตทางการเกษตรจะมีค่าอยู่ในช่วง 15.00 - 40.00 กิโลจูล/โมล



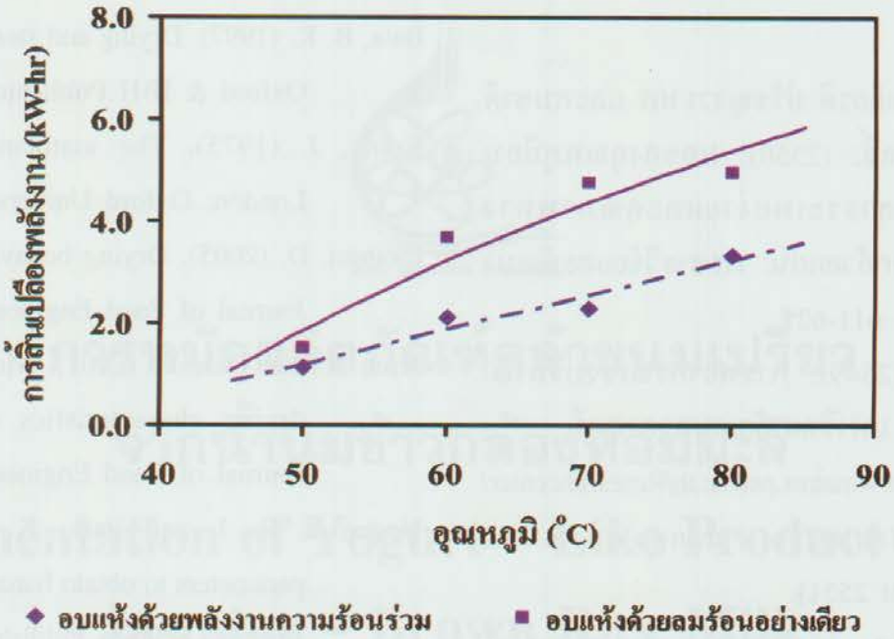
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln ของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลกับ 1/R (T+273.15)

การหดตัว

เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรของเปลือกมังคุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในช่วง 90 นาทีแรก เพราะเปลือกมังคุดมีความชื้นสูงประมาณร้อยละ 170 มาตรฐานแห้งจากนั้นเปอร์เซ็นต์การหดตัวจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มคงที่ (รูปที่ 7) ที่เป็นเช่นนี้เป็นไปได้ว่าเปลือกมังคุดมีโครงสร้างเป็นรูพรุนที่ค่อนข้างแข็งทำให้การถ่ายโอนมวลน้ำภายในเกิดอย่างสม่ำเสมอและการยุบตัวของผิวมีค่าน้อย ซึ่งตรงข้ามกับการอบแห้งกล้วยแผ่น (จารุวรรณ กุลวิศว และคณะ, 2550) และกล้วยหอมหั่นบาง (Thanit et al., 2007) ที่พบว่า เปอร์เซ็นต์การหดตัวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงความชื้นในวัสดุจะลดลงอย่างรวดเร็วทำให้เกิดความเครียดขึ้นภายในวัสดุส่งผลให้วัสดุเหี่ยวย่นทำให้เซลล์ของกล้วยแผ่นหดตัวที่ผิวนอกมากจึงแข็งตัวเร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้การทดลองยังพบอีกว่า การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว



รูปที่ 7 เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรเมื่ออบแห้งเปลือกมังคุดด้วยพลังงานความร้อนร่วม



รูปที่ 8 การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในการอบแห้งเปลือกมังคุด

การสิ้นเปลืองพลังงาน

ความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง (energy consumption, EC) เปลือกมังคุดในการวิจัยนี้ พิจารณาเฉพาะพลังงานที่ให้กับพัดลมขับอากาศ (blower) และขดลวดความร้อน (heater) ซึ่งวัดได้ด้วยมิเตอร์ไฟฟ้า (WATT-HOUR METER) ที่เวลาการอบแห้งเฉลี่ย 250 นาที ซึ่งพบว่า เมื่ออุณหภูมิลมร้อนที่ใช้อบแห้งเพิ่มสูงขึ้นการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (รูปที่ 8) และการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียวเฉลี่ยร้อยละ 42.6

บทสรุป

จากการทดลองอบแห้งเปลือกมังคุดแบบชั้นบางด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานความร้อนร่วม YRU-TLD#1(R&E) พอที่จะสรุปได้ ดังนี้

อัตราการอบแห้งและเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรจะขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาการอบแห้ง โดยแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งแบบเอ็มพิริคัลของ Page เหมาะสมที่สุดในการทำนายผลการทดลองทั้งการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมและลมร้อนอย่างเดียว

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสำหรับการอบแห้งทั้งสองแบบจะอยู่ในช่วง 5.11×10^{-8} -12.21×10^{-8} ตารางเมตร/วินาที ในขณะที่พลังงานกระตุ้นในการอบแห้งมีค่าเท่ากับ 18.88 กิโลจูล/โมล และ 16.12 กิโลจูล/โมล สำหรับการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมและลมร้อนอย่างเดียว ตามลำดับ

การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมสามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียวเฉลี่ยร้อยละ 42.6 โดยรูปแบบการทดลองสามารถใช้ได้ในระดับครัวเรือนและกลุ่มเกษตรกร โดยเฉพาะในพื้นที่จังหวัดยะลา ปัตตานีและนราธิวาส ที่มีวัตถุดิบ เช่น เปลือกมังคุด ส้มแขก กล้วยและอื่นๆ ที่เพียงพอต่อการแปรรูป เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ที่ได้ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการทดลอง จนทำให้การวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

จารุวรรณ กุลวิศว สมเกียรติ ปรัชญาวรากร และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2550). ผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อสารระเหยง่ายและคุณภาพทางกายภาพของกล้วยแผ่น. วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. 30(4): 611-621.

ทรงศิริ แต้สมบัติ. (2549). การพยากรณ์เชิงปริมาณ. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มังคุด. URL : http://www.natres.psu.ac.th/Researchcenter/tropiccalfruit/fruit/mangosteen.htm [9 กรกฎาคม 2551].

ยาทาแผลเปลือกมังคุด วิจัยเพิ่มคุณค่าจากเศษผลไม้. หนังสือพิมพ์ไทยรัฐ 19 มิ.ย. 2549. URL : http://www.thairath.co.th/ news.php?section =agriculture &content=9776 [9 พฤษภาคม 2552].

ยาสิวจากเปลือกมังคุด หยุดเชื้อโรคตัวก่อสิว. URL : http://www.variety.teenee.com/variety.teenee.com/science/3285.html [2 พฤษภาคม 2552].

วันดี กฤษณพันธ์. (2541). สมุนไพรน่ารู้. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุนทรี สิงหบุตรา. (2540). สรรพคุณสมุนไพร 200 ชนิด. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: ดอกเบี้ย.

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2540). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

อีลีหยัะ สนิโซ มะรูดิง กาซา และ มูฮัมมัดรุสดี เจ๊ะเต๊ะ. (2551). การพัฒนาเครื่องอบแห้งชั้นบางพลังงานความร้อนร่วม YRU-TLD#1(R&E). วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา. 3(2): 87-96.

AOAC. (2005) Official methods of analysis of the association of official analytical chemists. 18th edition. Washington, D.C., USA.

Bala, B. K. (1997). Drying and storage of cereal grains. Oxford & IBH Publishing, India.

Crank, J. (1975). The mathematics of diffusion. London: Oxford University Press, UK.

Ibrahim, D. (2005). Drying behaviour of green beans. Journal of Food Engineering. 69: 161-165.

Jena, S. and Das, H. (2007). Modelling for vacuum drying characteristics coconut presscake. Journal of Food Engineering. 79: 92-99.

Nogueira, R. I. and Park, K. J. (1992). Drying parameters to obtain banana passa. New York: Elsevier Science Publisher, USA.

Rizvi, S. S. H. (1986). Thermodynamicpropertiesof-foodsindehydration. In Rao, M. A. and Rizvi, S. S. H., Engineering properties of foods. NewYork: Marcel Dekker. USA.

Sacilik, K. (2007). Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). Journal of Food Engineering. 79: 23-30.

Singh, B. and Gupta, A. K. (2007). Mass transfer kinetics and determination of effective diffusivity during convective dehydration of pre-osmosed carrot cubes. Journal of Food Engineering. 79: 459-470.

Thanit, S., Sakamon, D., Rittigrai, N. and Somchart, S. (2007). Optimization of a drying process using infrared-vacuum drying of cavendish banana slice. Songklanakarin J.Sci.Technol. 29(3): 809-816.

ว.วิทย. มข. 38(1) 87-95 (2553) KKU Sci. J.38(1) 87-95 (2010)

การหมักผลิตภัณฑ์คล้ายนมเปรี้ยว จากน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ

Fermentation of Yogurt – Like Product from Jasmine – Brown Rice Milk

จุฑามาศ ถิระสาโรช[1] และ เฉลิมพล ถนอมวงศ์[1]*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณของสารให้ความหวาน 3 ชนิด คือ ซูโครส น้ำผึ้ง และน้ำเชื่อมกล้วย ที่เติมลงในน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิที่เตรียมได้จากการละลายแป้งข้าวกล้องหอมมะลิ 105 กับน้ำในอัตราส่วน 1 : 2 สกัดที่ 50 องศาเซลเซียส และหมักด้วยหัวเชื้อผสม *Lactobacillus bulgaricus* + *Streptococcus thermophillus* รหัส ABY 2 และหัวเชื้อเดี่ยว *Lactobacillus acidophilus* รหัส LA-5 โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่า pH และปริมาณกรดแลคติคในระหว่างการหมัก พบว่าในชั่วโมงที่ 8 ของการหมัก น้ำเชื่อมกล้วย มีการผลิตกรดแลคติคได้สูงกว่าซูโครสและน้ำผึ้ง โดยมีปริมาณกรดแลคติคอยู่ในช่วง 0.97 - 0.99 และมีค่า pH อยู่ในช่วง 3.76 - 3.73 และเมื่อนำผลิตภัณฑ์ผ่านการหมักมาปรับความหวานด้วยน้ำเชื่อม 28 องศาบริกซ์ ในอัตราส่วน 30 : 70 40 : 60 50 : 50 60 : 40 และ 70 : 30 พบว่าที่อัตราส่วน 50 : 50 ได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัสอยู่ในเกณฑ์ชอบปานกลาง และจากการตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี และทางจุลชีววิทยา พบว่าโปรตีนมีการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่แยกชั้น มีสีขาวอมชมพูอ่อน ความข้นหนืด 141.1 cps. มีค่า pH 3.84 มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญได้แก่ กรดแลคติค ของแข็งที่ละลายได้ โปรตีน และไขมันร้อยละ 1.39 11.87 2.17 0.21 ตามลำดับ และมีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด 9.8×10^8 cfu/ml ปริมาณแบคทีเรียแลคติคทั้งหมด 6.3×10^8 cfu/ml ปริมาณยีสต์และราน้อยกว่า 10 cfu/ml และปริมาณโคลิฟอร์ม (MPN) น้อยกว่า 3 มิลลิลิตร

คำสำคัญ : นมเปรี้ยวพร้อมดื่ม น้ำเชื่อมกล้วย น้ำผึ้ง ข้าวกล้องหอมมะลิ

Keywords : Drinking Yogurt, Banana syrup, Honey, Brown Jasmine Rice

[1] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา. พิษณุโลก.

* Corresponding Author, E-mail: joepd13@hotmail.com

Abstract

This research aimed to study the effects of type and quantity of sweetener (honey, sucrose and banana syrup) on change of pH and lactic acid content during the fermentation of yogurt-like product from jasmine brown rice milk. Jasmine brown rice milk was prepared by dissolving jasmine brown rice flour in water at the ratio of 1:2 at 50^0C. The solution was fermented with 2 types of starter *culture Lactobacillus bulgaricus + Streptococcus thermophillus:* code ABY-2, and *Lactobacillus acidophilus*: code LA-5. It was found that at eighth hour of fermentation, the Jasmine - brown rice milk with banana syrup contained higher lactic acid content (0.97-0.99%) than other samples and had pH of 3.76-3.73 For the sensory test, the fermented Jasmine brown rice milk with banana syrup was sweetened with 28 ^{0}Brix syrup at the ratio of 30:70, 40:60, 50:50, 60:40 and 70:30. It was found that the ratio of 50:50 was the most acceptable for color, odor, texture, and overall acceptance. The study on physical, chemical and microbiological properties of yogurt-like from Jasmine brown rice mike product revealed that the protein content was uniformly blended, no separation. The product has pinky white with viscosity value of 141.1 cps. The product contains 1.39 % of lactic acid, pH of 3.84, 11.87 % of total soluble solid, 2.17 % of protein, 0.21 % of fat, 9.8×10^8cfu/ml of total bacterial count,6.3×10^8cfu/ml of lactic bacteria, less than 10 cfu/ml of yeast and fungi, and MPN of coliform < 3 ml

บทนำ

ข้าวกล้องจัดเป็นสุดยอดของอาหารชนิดหนึ่งที่มีองค์ประกอบทางเคมี คาร์โบไฮเดรตใยอาหาร วิตามินและแร่ธาตุอยู่สูง เมื่อเทียบคุณค่าทางโภชนาการระหว่างนมวัวและข้าวกล้อง พบว่ามีปริมาณโปรตีนที่สูงกว่านมวัวและมีไขมันที่ต่ำกว่า (ยุพกนิษฐ์ พ่วงวีระกุล, 2544) แหล่งอาหารโปรตีนของประชากรโลกโดยมากจะได้มาจากสัตว์ แต่ในปัจจุบันนี้มีสภาวะหลายๆ อย่าง อาทิเช่น ภาวะการติดเชื้อและการแพร่ระบาดของโรคประกอบกับสารเคมีและยาตกค้างใน ผลิตภัณฑ์สัตว์ ทำให้ผู้บริโภคหันมาบริโภคพืชผักผลไม้ปลอดสารพิษ รวมทั้งยังรับประทานอาหารมังสวิรัติและอาหารเพื่อสุขภาพกันมากขึ้น นมเปรี้ยวหรือโยเกิร์ตเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่งที่มีการยอมรับจากกลุ่มผู้บริโภค ซึ่งโดยปกติแล้วนมเปรี้ยวจะผลิตจากนมวัวเป็นหลัก จึงมีปัญหาในเรื่องของไขมันส่วนเกิน และ บางคนก็มีปัญหาในเรื่องของระบบย่อย จึงหันมาดื่มนมเปรี้ยวที่ผลิตจากพืชแทน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วใน ขณะนี้นมเปรี้ยวที่ผลิตจากพืชส่วนใหญ่จะเป็นนมจากถั่วเหลือง ซึ่งยังมีปัญหาในเรื่องของกลิ่นถั่วค่อนข้างรุนแรง (ลินจง สุขลำภู, 2538) จึงได้มีการพยายามหาโปรตีนจากแหล่งอื่น ๆ ที่มีปริมาณสูงและราคาถูกกว่าเนื้อสัตว์และน้ำนม และมีคุณค่าทางอาหารที่จำเป็นอยู่สูง โดยเฉพาะในข้าวกล้อง ซึ่งน้ำนมข้าวกล้องเป็นอาหารเพื่อสุขภาพและมีประโยชน์ต่อร่างกายที่กำลังได้รับการยอมรับจากกลุ่มผู้บริโภคอาหารเพื่อสุขภาพค่อนข้างสูง นอกจากนี้นมเปรี้ยวพร้อมดื่มหรือโยเกิร์ตจากธัญพืชก็เป็นผลิตภัณฑ์อีกชนิดหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจจากผู้บริโภค (ศยามล เนตรประภา, 2544)

ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงน่าจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ที่นิยมบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพ หรือผู้ที่ต้องการควบคุมน้ำหนัก ผู้ที่มีปัญหาเรื่องคลอเรสเตอรอลและผู้ที่ร่างกายไม่สามารถย่อยน้ำตาลแลคโตสในน้ำนมวัวได้ เพราะผลิตภัณฑ์คล้ายนมเปรี้ยวจากน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิมีคุณค่าทางอาหารสูง และปริมาณกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวสูง นอกจากนี้การวิจัยครั้งนี้จะได้ข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนากระบวนการผลิตนมเปรี้ยวจากน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ และยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของข้าวกล้องอันจะเป็นประโยชน์ต่อชาวนาของประเทศไทยต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมแป้งข้าวกล้อง และน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ และการเตรียม น้ำเชื่อมกล้วย

วัตถุดิบหลักที่ใช้ คือ ข้าวกล้องหอมมะลิ 105 จากกลุ่มเกษตรกรผู้ผลิตข้าวกล้องหอมมะลิ ตำบลปากโทก อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก บดข้าวด้วยเครื่องปั่นผสมสแตนเลส (blender) ยี่ห้อ WARING รุ่น BL/9 34BL99 (8021) ความเร็วระดับ 7 เป็นเวลา 5 นาที ร่อนแป้งด้วยตะแกรงร่อนแป้งเบอร์ 100 นำแป้งข้าวกล้องมาสกัดด้วยน้ำสะอาดอัตราส่วน แป้ง : น้ำ 1:2 สกัดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที กรองด้วยผ้าขาวบางสะอาดสองชั้นจนได้น้ำนมข้าวกล้อง นำไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (AOAC, 1990) หางนมผงขาดมันเนย ยี่ห้อ มิสชั่น น้ำตาลซูโครส (น้ำตาลทรายมิตรผล) น้ำผึ้ง (จากอำเภอนครไทย) น้ำเชื่อมกล้วย จากกล้วยน้ำว้าพันธุ์มะลิอ่อง (ไส้ขาว) ความสุกในระยะที่ 7 ทำลายเอนไซม์โดยการลวกน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 3 นาที และทำให้เย็นโดยทันที จากนั้นนำมาปอกเปลือกหั่นเป็นแว่นหนา 2 เซนติเมตร ผสมน้ำสะอาดอัตราส่วนกล้วย : น้ำ เท่ากับ 1: 1 ทำการสกัดที่ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที บีบ และกรองเอาเฉพาะส่วนของน้ำ จากนั้นนำมาระเหยน้ำ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนกระทั่งมีความหวาน 60 องศาบริกซ์ หัวเชื้อผสม *Lactobacillus bulgaricus* + *Streptococcus thermophillus* อัตรา 1 : 1 รหัส ABY 2 และหัวเชื้อเดี่ยว *Lactobacillus acidophilus* รหัส LA-5 จากบริษัท East Asiatic Company Ltd.

ศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารให้ความหวานที่เหมาะสมต่อการหมักน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ

นำน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิจำนวน 800 มิลลิลิตร บรรจุในขวดแก้วรูปชมพู่ขนาด 1,000 มิลลิลิตร เติมปริมาณหางนมผงร้อยละ 6 และเติมแต่ละชนิดของสารให้ความหวานคือซูโครส น้ำผึ้ง และน้ำเชื่อมกล้วยที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 3 5 และ 7 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นผสม ฆ่าเชื้อด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที ในอ่างควบคุมอุณหภูมิปิดฝาขวดแก้วให้สนิทด้วยกระดาษอลูมินัมฟรอยด์ ลดอุณหภูมิลงที่ 43 องศาเซลเซียส เติมหัวเชื้อผสม รหัส ABY-2 และหัวเชื้อเดี่ยวรหัส LA-5 ด้วยวิธีการปลอดเชื้อในปริมาณร้อยละ 0.05 (น้ำหนักต่อปริมาตร) บ่มที่อุณหภูมิ 43°C ในตู้บ่มโยเกิร์ต นาน 8 ชั่วโมง ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระหว่างการหมักที่ 0 1 2 3 4 5 6 7 และ 8 ชั่วโมง โดยการวัดค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) โดยใช้ pH meter โดยใช้ตัวอย่างน้ำนมข้าวกล้องปริมาณ 20 มิลลิลิตร ตรวจสอบปริมาณกรดทั้งหมด ด้วยการไตเตรตน้ำนมข้าวกล้องปริมาณ 5 มิลลิลิตร กับสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.1N คำนวณผลเป็นเปอร์เซ็นต์กรดแลคติค (AOAC, 1990) วางแผนการทดลองแบบ CRD คัดเลือกปัจจัยที่เหมาะสมไปทำการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

การตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางจุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์คล้ายนมเปรี้ยวจากน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิที่คัดเลือกปัจจัยที่เหมาะสมแล้ว

นำน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ จำนวน 800 มิลลิลิตร บรรจุในขวดแก้วรูปชมพู่ขนาด 1,000 มิลลิลิตร เติมปริมาณหางนมผงร้อยละ 6 ชนิดและสารให้ความหวาน ตามปริมาณที่คัดเลือกได้ ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นผสม ฆ่าเชื้อด้วยความอุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที ในอ่างควบคุมอุณหภูมิปิดฝาขวดแก้วให้สนิทด้วยกระดาษอลูมินัมฟรอยด์ ลดอุณหภูมิลงที่ 43 องศาเซลเซียส เติมหัวเชื้อผสม รหัส ABY-2 และหัวเชื้อเดี่ยว รหัส LA-5 ด้วยวิธีการปลอดเชื้อในปริมาณร้อยละ 0.05 (น้ำหนักต่อปริมาตร) บ่มที่อุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส ในตู้บ่มโยเกิร์ต ยุติการหมักเมื่อได้ปริมาณกรดที่เหมาะสมในการหมักนมเปรี้ยว ที่ระดับปริมาณกรดไม่น้อยกว่าร้อยละ 1.0 ของกรดแลคติค นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ เก็บที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางจุลชีววิทยา (AOAC, 1990) วางแผนการทดลองแบบ CRD

ศึกษาการยอมรับผลิตภัณฑ์คล้ายนมเปรี้ยวจากน้ำนมข้าวกล้อง หอมมะลิ

นำนมเปรี้ยวจากน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิที่ผ่านการเก็บที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ผสมกับน้ำเชื่อมความหวาน 28 องศาบริกซ์ ที่อัตราส่วนระหว่างนมเปรี้ยว ต่อ น้ำเชื่อมที่ระดับ 30 : 70 40 : 60 50 : 50 60 : 40 และ 70 : 30 ตามลำดับ ทดสอบคุณสมบัติทางด้านสี กลิ่น รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส และการยอมรับรวม จากผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 30 คน โดยวิธี 9- point Hedonic Scale โดยวางแผนการทดลองแบบ RCBD (ไพโรจน์ วิริยจารี, 2539)

ผลการทดลองและวิจารณ์

การเตรียมแป้งข้าวกล้อง และน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ และการเตรียมน้ำเชื่อมกล้วย

ผลจากการเตรียมและตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิพบว่าน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิที่ได้มีสีขาวครีม ขุ่น มีลักษณะข้นหนืด และมีกลิ่นหอมของข้าว และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 1 และผลจากการเตรียมน้ำเชื่อมกล้วยที่มีความหวาน 60 องศาบริกซ์ พบว่ามีลักษณะสีม่วงเข้ม ข้นหนืด มีกลิ่นหอมของกล้วยน้ำว้า

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิต่อปริมาณ 100 กรัม

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละ)
ค่า pH	6.26
ปริมาณกรดแลคติค	0.19
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้	3.0
ปริมาณความชื้น	93.11
ปริมาณโปรตีน	0.73
ปริมาณไขมัน	1.12
ปริมาณเถ้า	0.86
ปริมาณเยื่อใย	0.23
ปริมาณคาร์โบไฮเดรต	4.18

อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารให้ความหวานที่เหมาะสมต่อการหมักน้ำนมข้าว กล้องหอมมะลิ

อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารให้ความหวานที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH ระหว่างการหมักน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิพบว่าอิทธิพลของสารให้ความหวานทั้ง 3 ชนิด คือ ซูโครส น้ำผึ้ง และน้ำเชื่อมกล้วยที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 3 5 และ7 ของน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิมีผลต่อการลดลงของค่า pH จากข้อมูลจะพบว่าชนิดของสารให้ความหวานที่มีผลต่อการลดลงของค่า pH มากที่สุดคือ น้ำเชื่อมกล้วยที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 7 โดยที่อัตราการลดของค่า pH จะอยู่ในระดับที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) เมื่อเทียบกับน้ำตาลซูโครส และน้ำผึ้ง ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารให้ความหวาน ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH ระหว่างการหมักน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ

ชนิดและปริมาณของสารให้ความหวาน	ค่า pH ที่ได้ในแต่ละชั่วโมงของการหมัก								
	0 ชม.	1 ชม.	2 ชม.	3 ชม.	4 ชม.	5 ชม.	6 ชม.	7 ชม.	8 ชม.
สารให้ความหวาน 0%	6.37^{a}	6.13^{ab}	5.94^{a}	5.75^{a}	5.37^{a}	4.89^{a}	4.65^{a}	4.41^{c}	4.29^{b}
ซูโครส 3%	6.32^{b}	6.17^{a}	5.97^{a}	5.68^{a}	4.92^{b}	4.78^{b}	4.51^{c}	4.23^{d}	4.10^{d}
ซูโครส 5%	6.29^{b}	6.07^{b}	5.78^{b}	5.57^{b}	4.72^{c}	4.53^{c}	4.32^{d}	4.14^{e}	4.05^{e}
ซูโครส 7%	6.18^{c}	5.99^{c}	5.49^{d}	5.28^{d}	4.56^{d}	4.36^{d}	4.23^{f}	4.01^{f}	4.00^{f}
น้ำผึ้ง 3%	6.20^{c}	6.16^{a}	5.62^{c}	5.43^{c}	5.28^{a}	4.84^{ab}	4.65^{b}	4.47^{b}	4.23^{c}
น้ำผึ้ง 5%	6.03^{e}	5.89^{d}	5.58^{c}	5.20^{e}	4.98^{b}	4.83^{ab}	4.73^{a}	4.68^{a}	4.48^{a}
น้ำผึ้ง 7%	6.01^{e}	5.71^{c}	5.29^{e}	4.87^{f}	4.62^{cd}	4.44^{d}	4.24^{ef}	4.04^{f}	3.96^{g}
น้ำเชื่อมกล้วย 3%	6.13^{d}	5.70^{e}	4.99^{f}	4.69^{g}	4.54^{d}	4.48^{e}	4.27^{e}	3.97^{g}	3.84^{h}
น้ำเชื่อมกล้วย 5%	6.03^{e}	5.50^{f}	4.99^{f}	4.45^{h}	4.34^{e}	4.26^{e}	3.99^{g}	3.86^{h}	3.76^{i}
น้ำเชื่อมกล้วย 7%	5.88^{f}	5.43^{f}	4.81^{g}	4.44^{h}	4.28^{e}	4.05^{f}	3.95^{g}	3.81^{i}	3.73^{j}

หมายเหตุ : a - j ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างกัน ($p \leq 0.05$) เปรียบเทียบความแตกต่างด้วยวิธี DMRT

อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารให้ความหวานที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแลคติคระหว่างการหมักน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ

พบว่าอิทธิพลของสารให้ความหวานทั้ง 3 ชนิด คือ ซูโครส น้ำผึ้ง และน้ำเชื่อมกล้วยมีผลต่อการส่งเสริมการผลิตกรดแลคติค โดยพบว่าในชั่วโมงที่ 8 น้ำเชื่อมกล้วยที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 7 ของน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ มีผลต่ออัตราการผลิตแลคติคมากที่สุดในระดับที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับน้ำตาลซูโครส และน้ำผึ้ง ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารให้ความหวาน ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ กรดแลคติค ระหว่างการหมักน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ

ชนิดและปริมาณ	ร้อยละของกรดแลคติคที่ได้ในแต่ละชั่วโมงของการหมัก								
ของสารให้ความหวาน	0 ชม.	1 ชม.	2 ชม.	3 ชม.	4 ชม.	5 ชม.	6 ชม.	7 ชม.	8 ชม.
สารให้ความหวาน 0%	0.20^{c}	0.20^{d}	0.21^{f}	0.33^{d}	0.40^{ef}	0.41^{f}	0.45^{g}	0.46^{g}	0.47^{e}
ซูโครส 3%	0.20^{c}	0.21^{d}	0.24^{e}	0.41^{b}	0.42^{def}	0.44^{de}	0.46^{f}	0.48^{f}	0.49^{de}
ซูโครส 5%	0.20^{c}	0.22^{c}	0.26^{d}	0.41^{b}	0.42^{de}	0.45^{d}	0.46^{f}	0.48^{f}	0.50^{de}
ซูโครส 7%	0.20^{c}	0.24^{b}	0.26^{d}	0.42^{b}	0.44^{cd}	0.46^{d}	0.48^{e}	0.51^{e}	0.52^{d}
น้ำผึ้ง 3%	0.20^{c}	0.20^{d}	0.21^{f}	0.34^{d}	0.39^{f}	0.42^{ef}	0.46^{f}	0.48^{f}	0.52^{d}
น้ำผึ้ง 5%	0.20^{c}	0.21^{d}	0.22^{ef}	0.37^{c}	0.42^{def}	0.46^{d}	0.48^{e}	0.50^{e}	0.59^{c}
น้ำผึ้ง 7%	0.21^{c}	0.23^{bc}	0.23^{e}	0.38^{c}	0.46^{c}	0.49^{c}	0.52^{d}	0.53^{d}	0.62^{c}
น้ำเชื่อมกล้วย 3%	0.23^{b}	0.23^{bc}	0.33^{c}	0.51^{a}	0.59^{b}	0.64^{b}	0.72^{c}	0.72^{c}	0.85^{b}
น้ำเชื่อมกล้วย 5%	0.26^{a}	0.26^{a}	0.46^{d}	0.53^{a}	0.70^{a}	0.82^{a}	0.84^{b}	0.86^{b}	0.97^{a}
น้ำเชื่อมกล้วย 7%	0.26^{a}	0.27^{a}	0.48^{a}	0.53^{a}	0.72^{a}	0.84^{a}	0.85^{a}	0.89^{a}	0.99^{a}

หมายเหตุ : a - g ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)เปรียบเทียบความแตกต่างด้วยวิธี DMRT

จากผลการทดลองพบว่าการเติมน้ำเชื่อมกล้วยที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 7 ของน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิมีผลต่ออัตราการผลิตกรดได้ในปริมาณสูง ซึ่งส่งผลให้ค่า pH ลดลง โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะไม่ต่างกับการเติมน้ำเชื่อมกล้วยที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 5 ของน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ ซึ่งสอดคล้องกับที่ วราวุฒิ ครูส่ง และรุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต (2532) ได้กล่าวว่าแหล่งคาร์บอนจะต้องมีสารประกอบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ความต้องการคาร์บอนของแบคทีเรียมีอยู่ในรูปต่าง ๆ กัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ แหล่งคาร์บอนได้จากสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต เป็นต้น เพื่อให้ได้พลังงานและการสังเคราะห์ของเซลล์ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีระหว่างน้ำตาลซูโครส น้ำผึ้ง และน้ำเชื่อมกล้วย พบว่าน้ำเชื่อมกล้วยมีองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบด้วย น้ำตาล ฟรุกโตส และมีวิตามินเกลือแร่ เพียงเล็กน้อยได้แก่ วิตามินเอ วิตามินบี วิตามินซี และเกลือแร่ เช่นแคลเซียม, โปแตสเซียม, แมกนีเซียม (จุฑามาศ ถิระสาโรช, 2548) จากผลการทดลองจะเห็นว่าชั่วโมงที่ 8 ของการหมักซึ่งเป็นช่วงระยะเวลาที่น่าจะเป็นไปได้ในการหมักนมเปรี้ยวจากน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิที่มีการเติมปริมาณหางนมผงร้อยละ 6 และปริมาณน้ำเชื่อมกล้วยร้อยละ 5 ของน้ำนมข้าวกล้องนั้น มีอัตราการสร้างกรดสูงสุด และการลดลงของค่า pH อยู่ในระดับที่ไม่มีความแตกต่างจากระดับร้อยละ 7 จึงได้ทำการคัดเลือกน้ำเชื่อมกล้วยที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 5 ของน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ทั้งนี้นอกจากปริมาณกรด ค่า pH ที่ใกล้เคียงกับการหมักนมธรรมดาแล้ว ตะกอนโปรตีนที่ได้ก็มีลักษณะเป็นก้อนเนื้อเดียวกัน ไม่กระจายตัว มีกลิ่นหอมของกรดและกลิ่นหอมของข้าวกล้องหอมมะลิเจืออยู่ในผลิตภัณฑ์ด้วย

คุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางจุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์คล้ายนมเปรี้ยวจากน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ

ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์คล้ายนมเปรี้ยวจากน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิจากการตรวจสอบผลิตภัณฑ์สุดท้ายเมื่อยุติการหมักและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ได้แก่ การสังเกตลักษณะของสีพบว่าผลิตภัณฑ์นมเปรี้ยว มีลักษณะสีขาวอมชมพูอ่อน มีค่าความข้นหนืดเท่ากับ 141.1 cps ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ลักษณะของน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ และผลิตภัณฑ์คล้ายนมเปรี้ยวจากน้ำนมข้าวกล้องหอม มะลิ

ผลิตภัณฑ์	ลักษณะสี	ความข้นหนืด		
		T(°C)	rpm	cps
น้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ	ขาว ครีม	18.8	20	93.8
นมเปรี้ยวจากน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ	ขาวอมชมพูอ่อน	18.8	20	141.1

คุณสมบัติทางเคมีของน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิและผลิตภัณฑ์คล้ายนมเปรี้ยวจากน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิพบว่าหลังการหมักค่า pH ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ โปรตีน และไขมันจะลดลง ส่วนปริมาณกรดแลคติคจะเพิ่มมากขึ้น ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิและนมเปรี้ยวพร้อมดื่มจากน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิต่อปริมาตร 100 มิลลิลิตร

องค์ประกอบทางเคมี	น้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ ก่อนหมัก	นมเปรี้ยวจากน้ำนม ข้าวกล้องหอมมะลิ
ค่า pH	5.75	3.84
ปริมาณกรดแลคติคทั้งหมด (กรัม)	0.34	1.39
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (กรัม)	13.00	11.87
ปริมาณโปรตีนทั้งหมด (กรัม)	2.30	2.17
ปริมาณไขมันทั้งหมด (กรัม)	0.28	0.21

คุณสมบัติทางจุลชีววิทยาของน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ และผลิตภัณฑ์คล้ายนมเปรี้ยวจากน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ ผลิตภัณฑ์นมเปรี้ยวจากน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ ที่ผ่านการหมักที่ 43 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง และเก็บผลิตภัณฑ์ที่ 5 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง พบว่ามีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดและปริมาณแบคทีเรียแลคติคเพิ่มขึ้น ปริมาณยีสต์และรามีน้อยกว่า 10 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ปริมาณโคลิฟอร์ม (MPN) มีน้อยกว่า 3 ต่อมิลลิลิตร ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางจุลชีววิทยาของน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ และนมเปรี้ยวจากน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ ต่อปริมาตร 1 มิลลิลิตร

ชนิดของจุลินทรีย์	น้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ ก่อนหมัก	นมเปรี้ยวจากน้ำนม ข้าวกล้องหมอมะลิ
จุลินทรีย์ทั้งหมด (cfu/ml)	1.8 x 10	9.8×10^8
แบคทีเรียแลคติคทั้งหมด (cfu/ml)	1.1 x 10	6.3×10^8
ยีสต์และราทั้งหมด (cfu/ml)	< 10	< 10
โคลิฟอร์มทั้งหมด (MPN)	< 3	< 3

การยอมรับผลิตภัณฑ์คล้ายนมเปรี้ยวจากน้ำนมข้าวกล้อง หอมมะลิผสมน้ำเชื่อม

ผลการยอมรับของผลิตภัณฑ์คล้ายนมเปรี้ยวจากน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิผสมน้ำเชื่อม โดยการทดสอบคุณลักษณะด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และการยอมรับรวม พบว่าผู้ทดสอบให้การยอมรับที่อัตราส่วนนมเปรี้ยว : น้ำเชื่อมที่ระดับ 50 : 50 มากที่สุด โดยอยู่ในระดับที่ชอบปานกลาง ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผู้ทดสอบที่มีต่อผลิตภัณฑ์คล้ายนมเปรี้ยวพร้อมดื่มจากน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ (N=30)

อัตราส่วนของนมเปรี้ยวต่อน้ำเชื่อม 28 °Brix	คะแนนการทดสอบคุณลักษณะ*				
	สี	กลิ่น	รสชาติ	เนื้อสัมผัส	การยอมรับรวม
30 : 70	5.98^{b}	6.04^{b}	5.82^{c}	6.24^{b}	6.67^{b}
40 : 60	6.28^{ab}	6.30^{b}	6.33^{b}	6.57^{b}	6.20^{b}
50 : 50	6.51^{a}	7.08^{a}	7.21^{a}	7.28^{a}	7.21^{a}
60 : 40	6.36^{ab}	6.01^{b}	6.11^{bc}	6.50^{b}	6.09^{b}
70 : 30	6.12^{b}	6.13^{b}	5.30^{d}	6.38^{b}	5.67^{c}

หมายเหตุ: abc ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง แสดงว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P 0.05) เปรียบเทียบความแตกต่างโดยวิธี DMRT

สรุป

แป้งข้าวกล้องหอมมะลิที่ได้จากการบดข้าวกล้องหอมมะลิ 105 มีลักษณะสีขาวอมน้ำตาลอ่อน เนื้อเนียนละเอียด และเมื่อนำมาสกัดเป็นน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิจะมีลักษณะสีขาวครีม ขุ่น มีกลิ่นหอมของข้าว มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ร้อยละ 3.0 โปรตีนร้อยละ 0.73 ไขมันร้อยละ 1.12 เยื่อใยร้อยละ 0.23 และคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 4.18 และเมื่อนำไปหมักเป็นผลิตภัณฑ์คล้ายนมเปรี้ยว โดยการเติมหางนมผงร้อยละ 6 และเติมน้ำเชื่อมกล้วยร้อยละ 5 ของน้ำนมข้าวกล้องหอมมะลิ หมักด้วยเชื้อผสมรหัส ABY-2 และ LA-5 เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และผ่านการเก็บที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมงจะได้ปริมาณกรดแลคติคร้อยละ 1.39 มีค่า pH เท่ากับ 3.84 ผลิตภัณฑ์มีลักษณะสีขาวอมชมพู มีความข้นหนืด เท่ากับ 141.1 cps. ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดร้อยละ 11.87 ปริมาณโปรตีนร้อยละ 2.17 และไขมันร้อยละ 0.21 มีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดเท่ากับ 9.8 x10^8 cfu/ml แบคทีเรียแลคติคทั้งหมด 6.3 x 10^8 cfu/ml ยีสต์และราน้อยกว่า 10 cfu/ml และโคลิฟอร์มน้อยกว่า 3 cfu/ml เมื่อนำมาปรับความหวานด้วยน้ำเชื่อม 28 องศาบริกซ์ พบว่าผู้บริโภคให้การยอมรับที่อัตราส่วนนมเปรี้ยวต่อน้ำเชื่อมที่ระดับ 50 : 50 มากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

จุฑามาศ ถิระสาโรช. (2548). การสกัดไซรัปจากกล้วย. รายงานผลการวิจัย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา. พิษณุโลก.

ไพโรจน์ วิริยจารี. (2539). การวางแผนการวิเคราะห์ทางด้านประสาทสัมผัส. เชียงใหม่; ภาควิชาเทคโนโลยีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ลินจง สุขลำภู. (2538). การสกัดกลิ่นในน้ำนมถั่วเหลืองเพื่อทำผลิตภัณฑ์โยเกิร์ต. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า 13 (2): 51-58.

ยุพกนิษฐ์ พ่วงวีระกุล. (2544). ไวน์ขาว. วารสารจาร์พา. 8(58): 22-23.

วราวุฒิ ครูส่ง และรุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. (2532). เทคโนโลยีการหมักในอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2. โอเดียนสโตร์. กรุงเทพมหานคร. 209 หน้า.

ศยามล เนตรประภา. (2544). การพัฒนาเครื่องดื่มข้าวหอมมะลิกลิ่นใบเตย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร, กรุงเทพมหานคร. 248 หน้า.

AOAC. 1990. Official Method of Analysis. 15th ed. Washington DC : Association of Official Analytical Chemists.

ว.วิทย. มข. 38(1) 96-106 (2553) KKU Sci. J.38(1) 96-106 (2010)

การเลี้ยงกุ้งก้ามกราม *Macrobrachium rosenbergii* de Man ด้วยอาหารเสริมไรน้ำนางฟ้าไทย *Branchinella thailandensis*, Sanoamuang, Saengphan and Murugan, 2002

Culturing of the Giant Freshwater Prawns *Macrobrachium rosenbergii* de Man Supplements with Thai fairy shrimp, *Branchinella thailandensis*, Sanoamuang, Saengphan and Murugan, 2002

นพคุณ ภักดีณรงค์[1,4], สุภาพร ชื่นชม[1], วาที คงบรรทัด[2,4] และศิริรัตน์ ดีศีลธรรม[3,4]*

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาอัตราการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ ปริมาณเม็ดเลือด และเนื้อเยื่อวิทยาของกุ้งก้ามกราม *Macrobrachium rosenbergii* de Man ที่เลี้ยงด้วยไรน้ำนางฟ้าไทย โดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน 6 สูตร คือ อาหารกุ้งก้ามกรามเม็ดสำเร็จรูปเป็นชุดควบคุม (สูตร 1) สูตร 2 3 4 และ 5 ให้อาหารกุ้งก้ามกรามเม็ดสำเร็จรูปเสริมไรน้ำนางฟ้าที่มีชีวิตจำนวน 20 30 40 และ 50 ตัวต่อวัน ตามลำดับและสูตร 6 ให้อาหารกุ้งก้ามกรามเม็ดสำเร็จรูปเสริมไรน้ำนางฟ้าแช่แข็งที่ 0 องศาเซลเซียส จำนวน 50 ตัวต่อวัน วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด ทำ 3 ซ้ำ ซ้ำละ 15 ตัว ใช้ระยะเวลาในการทดลอง 8 สัปดาห์ เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่าอาหารสูตร 3 มีอัตราการรอดตายสูงที่สุด และอาหารสูตร 5 มีอัตราการเจริญเติบโต อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อและมีปริมาณเม็ดเลือดมากกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ผลทางเนื้อเยื่อวิทยาของตับและตับอ่อน พบว่าอาหารสูตร 4

[1] ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44150

[2] คณะสัตวแพทยศาสตร์และสัตวศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44150

[3] ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44150

[4] หน่วยปฏิบัติการวิจัยกุ้งน้ำจืดมหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44150

* Corresponding Author, E-mail: noppakun241@yahoo.com

มี Resorption cells หรือ R-cells และหยดน้ำมันมากกว่า ทุกกลุ่มการทดลอง ชั้นบุผิวของท่อย้อมติดสีเข้มและชัดเจน อาหารสูตร 5 พบผลผลิตจากเซลล์ภายในท่อของตับและตับอ่อน จากการศึกษานี้สรุปได้ว่าการเสริมอาหารด้วยไรน้ำนางฟ้าไทยมีผลต่ออัตราการเจริญเติบโต อัตราการแลกเนื้อ ปริมาณเม็ดเลือดและลักษณะทางเนื้อเยื่อวิทยาของตับและตับอ่อนของกุ้งก้ามกราม ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานที่จะพัฒนา การใช้ไรน้ำนางฟ้าไทยเพื่อเป็นอาหารกุ้งก้ามกราม ต่อไป

Abstract

This study aimed to investigate the growth rate, specific growth rate, feed conversion ratio and total hemocyte count after feeding live Thai fairy shrimp (*Branchinella thailandensis*, Sanoamuang, Saengphan and Murugan 2002) for giant freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii* de Man) in 6 different treatments : prawn diet pellet served as a control (T_1) , prawn diet pellet added with 20 (T_2), 30 (T_3), 40 (T_4) and 50 (T_5) live Thai fairy shrimps per day, respectively and prawn diet pellet supplemented with 50 frozen Thai fairy shrimps per day (T_6) for 8 weeks. The results showed that the giant freshwater prawn fed with 30 live Thai fairy shrimps per day had providing the highest survival rate. On the other hand, feeding with 50 live Thai fairy shrimps per day provided the highest of growth rate, specific growth rate and total count haemocyte significantly ($p<0.05$). The histology of hepatopancreas of the giant freshwater prawn fed with 40 live Thai fairy shrimps per day showed higher absorption cells (R-cells) and lipid droplets than the control. Hepatopancreatic epithelium was distinguished and darkly stained. The inclusion was found in hepatopancreatic lumen of the giant freshwater prawn fed with 50 live Thai fairy shrimps per day. In conclusion, Thai fairy shrimps supplement as live feed had effect on growth rate, specific growth rate, feed conversion ratio, total hemocyte count and hepatopancreatic tissue of the giant freshwater prawn. This result serves as the basic knowledge to improve prawn diets in the future.

บทนำ

กุ้งก้ามกรามเป็นสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง จัดอยู่ในไฟลัมอาร์โทรโพดา คลาสครัสเตเซีย เป็นกุ้งน้ำจืดที่ขนาดใหญ่ที่สุด มีชื่อสามัญภาษาอังกฤษ คือ Giant Freshwater Prawn และชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Macrobrachium rosenbergii* (de Man) เป็นสัตว์น้ำที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ ราคาแพง เนื้อรสชาติดี (กรมประมง, 2544) มีลำตัวยาวประมาณ 30 เซนติเมตร น้ำหนักประมาณ 370-400 กรัม มีลักษณะลำตัวยาว มีเปลือกหุ้มตัว ลำตัวแบ่งออกได้ 3 ส่วน คือ หัว อก และท้อง ส่วนหัวและส่วนอกรวมกันเป็นปล้องเดียว ทางส่วนหางมีหนามสองอัน สองข้างแก้มมีร่องปรากฏอยู่ชัดเจน (บรรจง เทียนส่งรัศมี, 2535) เมื่อถึงฤดูผสมพันธุ์แม่กุ้งมักจะเดินทางกลับออกสู่บริเวณปากแม่น้ำหรือทะเลสาบหรือที่เรียกว่า บริเวณน้ำกร่อย ๆ เพื่อวางไข่และฟักเป็นตัว ซึ่งจัดเป็นลูกกุ้งวัยอ่อนนั้นจะล่องลอยไปตามกระแสน้ำ ในสภาพของแพลงตอน ตัวอ่อนของกุ้งชนิดนี้หัวโต ตัวเล็กห้อยหัวลงขณะที่ลอยตัวอยู่ในน้ำ เมื่อเคลื่อนที่ ชอบแสงสว่างกินแพลงตอนพืชและสัตว์เป็นอาหารจะใช้เวลาในการวิวัฒนาการจนเป็นกุ้งวัยรุ่นที่มีขนาด 1-2 เซนติเมตร ในเวลา 45-60 วัน ซึ่งมีลักษณะทุกอย่างเหมือนกุ้งโต และจะคว่ำตัวลงอาศัยหน้าดิน เดินทางเข้ามาในบริเวณน้ำจืดเพื่อเลี้ยงตัวจนเป็นกุ้งใหญ่ต่อไป (บพิธ จารุพันธุ์ และ นันทพร จารุพันธุ์, 2540)

กุ้งก้ามกราม มีนิสัยชอบยึดครองพื้นที่ขณะกินอาหาร มีปากแบบกัดแทะ มีลำไส้ตรงและสั้น ชอบกินอาหารในเวลากลางคืน ใช้หนวดและระยางค์สัมผัสอาหารทางกลิ่นมากกว่าทางตากินอาหารตามพื้นบ่อ โดยใช้ขาเดินคู่ที่ 1 และ 2 กุ้งก้ามกรามวัยอ่อน

กินแพลงตอนมีชีวิต ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแพลงตอนสัตว์ โดยทั่วไปลูกกุ้งจะเริ่มเปลี่ยนนิสัยการกินอาหาร จากที่เคยกินกลางน้ำเป็นกินตามพื้นเมื่อลูกกุ้งมีขนาด 2-3 เซนติเมตร. ส่วนกุ้งที่โตแล้วกินอาหารทุกชนิด ทั้งพืชและสัตว์ ทั้งที่มีชีวิตและที่ตายแล้ว (ประจวบ หลำอุบล, 2529) ในการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามอาหารที่ใช้เลี้ยงมีทั้งอาหารสด อาหารผสม และอาหารสำเร็จรูป อาหารสดที่นิยมใช้ได้แก่เนื้อปลาบดหรือสับ แต่โดยทั่วไปมักใช้อาหารสำเร็จรูปเป็นหลักแล้วมีการเสริมอาหารสดหรืออาหารผสมอาหารสดเป็นอาหารเสริมเป็นบางครั้ง ทั้งนี้เนื่องจากอาหารสำเร็จรูปมีความสะดวกในการใช้และการเก็บรักษา นอกจากนี้อาหารสำเร็จรูปยังมีคุณค่าทางอาหารครบถ้วนสำหรับการเจริญเติบโตของกุ้ง ทำให้มีประสิทธิภาพการใช้เปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวแน่นอน และยังง่ายต่อการควบคุมคุณภาพน้ำไม่ทำให้น้ำเน่าเสีย ส่วนประกอบของสูตรอาหารกุ้งก้ามกรามโดยทั่วไปประกอบด้วย ปลาป่น ปลาหมึกป่น ตับ หัวกุ้งป่น กากถั่วเหลือง รำข้าว ปลายข้าวแป้งสาลี ยีสต์ น้ำมันพืช น้ำมันปลาทะเล/ปลาหมึก วิตามินแร่ธาตุรวม วิตามินซี ส่วนอาหารสดเช่นไข่ ปลา ปลาหมึก และเนื้อหอย (ฐานันดร์ ฑัตตานนท์ และสุจินต์ มณีวงค์, 2520) ปลาบด เนื้อหอยบด เนื้อหอยทากยักษ์ *Achatina fulica* (Costa ,1980) และ ไรแดง (ฐานันดร์ ฑัตตานนท์ และนิเวศน์ เรืองพานิช, 2521) นำมาเลี้ยงกุ้งพบว่าทำให้กุ้งเจริญเติบโตได้ดี ซึ่งยังไม่ค่อยพบงานวิจัยเกี่ยวข้องกับการใช้ศักยภาพของไรน้ำนางฟ้ามาเลี้ยงกุ้งก้ามกรามมากนัก

ไรน้ำนางฟ้าไทย *Branchinella thailandensis* พบมากในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (สุพัตรา เหล็กจาน, 2546) ตั้งชื่อวิทยาศาสตร์โดยศาสตราจารย์ ละออศรี เสนาะเมือง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545 (Sanoamuang et al., 2002) ปัจจุบันมีการใช้ไรน้ำนางฟ้ารูปแบบที่ยังมีชีวิต เพื่อนำไปเลี้ยงสัตว์น้ำหลายประเภท ด้วยวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน ด้วยเหตุผลที่ว่าไรน้ำนางฟ้ามีคุณค่าทางโภชนาการสูง เช่น โปรตีนร้อยละ 64.94 ไขมันร้อยละ 5.07 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 17.96 ดังนั้น การใช้ไรน้ำนางฟ้าไทยเป็นอาหารกุ้งก้ามกราม จึงเป็นแนวทางที่สามารถลดต้นทุนการผลิตและสามารถลดการใช้สารเคมี และทำให้เกษตรกรสามารถประหยัดเงินทุนในการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามและเป็นข้อมูลที่จะสามารถนำไปพัฒนาเป็นอาหารของกุ้งก้ามกรามต่อไปและพบว่ามีสารประกอบสำคัญจากสีของไรน้ำนางฟ้า เช่น astaxanthin และ canthaxanthin ซึ่งเป็นสารจำพวก carotenoids (Velu et al., 2003) พบรายงานว่ามีผลต่อระบบสืบพันธุ์ สีของลำตัว ระบบภูมิคุ้มกัน และอัตราการรอดตายของสัตว์น้ำ (Velu et al., 2003) การศึกษาวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลการให้ไรน้ำนางฟ้าไทยชนิดที่มีชีวิตและชนิดแช่แข็งต่อน้ำหนัก ความยาว อัตราการเจริญเติบโต อัตราการแลกเนื้อ ปริมาณของเม็ดเลือดและลักษณะทางเนื้อเยื่อวิทยาของ hepatopancreas ของกุ้งก้ามกราม *M. rosenbergii* จากฟาร์มในจังหวัดกาฬสินธุ์ เพื่อเป็นแนวทางในการลดต้นทุนอาหารกุ้งก้ามกราม ลดสารตกค้าง ลดการใช้สารกระตุ้นการเจริญเติบโตในพื้นที่ฟาร์มกุ้งก้ามกรามในประเทศไทย

วิธีดำเนินการ

การเตรียมบ่อ

เตรียมบ่อซีเมนต์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.95 เมตร ลึก 0.50 เมตร จำนวน 18 บ่อ ทำการฆ่าเชื้อโรค และตากบ่อไว้ก่อน 1 สัปดาห์ ใส่ทรายหนา 0.5 เซนติเมตรให้ทั่วพื้นบ่อและวางแผงไข่บ่อละ 2 แผง โดยทำมุม 45 องศากับพื้นบ่อเพื่อเป็นที่กำบังของกุ้งที่ลอกคราบ จากนั้น เติมน้ำในปริมาตร 40 ลิตรต่อบ่อและให้อากาศตลอดเวลา

การเตรียมกุ้งก้ามกราม

ใช้ กุ้งก้ามกราม *M. rosenbergii* ระยะวัยรุ่นอายุ 3 เดือน เพศเมีย น้ำหนักเฉลี่ยต่อตัวประมาณ 8.50-9.00 กรัม ความยาวเฉลี่ยประมาณ 8.00-8.50 เซนติเมตร จากฟาร์มนายธนูศิลป์ ภูผาลาด ต.บัวบาน อ.ยางตลาด จ.กาฬสินธุ์ ทำการย้ายกุ้งลงบ่อโดยปรับสภาพกุ้งก้ามกรามก่อนประมาณ 20 นาที แล้วค่อย ๆ เปิดถุงออกให้น้ำในบ่อไหลเข้าไปในถุง ปล่อยกุ้งในอัตรา 15 ตัวต่อบ่อ โดยพักไว้ในบ่อเป็นเวลา 2 วัน

การวางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบรูณ์ (Complete Randomize Design, CRD) 3 ซ้ำ แบ่งกุ้งก้ามกรามเป็น 6 กลุ่ม กลุ่มละ 15 ตัว ระยะเวลาทดลองทั้งสิ้น 8 สัปดาห์ ในช่วงเดือน พฤศจิกายน 2551- มกราคม 2552 โดยให้อาหาร 6 สูตร ได้แก่ อาหารชุดควบคุมคืออาหารเม็ดสำเร็จรูปกุ้งก้ามกราม (สูตร 1) อาหารเม็ดสำเร็จรูปกุ้งก้ามกรามเสริมด้วยไรน้ำนางฟ้าไทยที่มีชีวิต 20 ตัวต่อวัน (สูตร 2) อาหารเม็ดสำเร็จรูปกุ้งก้ามกรามเสริมด้วยไรน้ำนางฟ้าไทยที่มีชีวิต 30 ตัวต่อวัน (สูตร 3) อาหารเม็ดสำเร็จรูปกุ้งก้ามกรามเสริมด้วยไรน้ำนางฟ้าไทยที่มีชีวิต 40 ตัวต่อวัน (สูตร 4) อาหารเม็ดสำเร็จรูปกุ้งก้ามกรามเสริมด้วยไรน้ำนางฟ้าไทยที่มีชีวิต 50 ตัวต่อวัน (สูตร 5) และอาหารเม็ดสำเร็จรูปกุ้งก้ามกรามเสริมด้วยไรน้ำนางฟ้าไทยแช่แข็งที่ 0 องศาเซลเซียส 50 ตัวต่อวัน (สูตร 6)

การให้อาหารสำเร็จรูป วางอาหารบนถาดอาหารที่ทำด้วยผ้าฝ้ายขนาด 15 x 15 เซนติเมตร เพื่อศึกษาและบันทึกการกินอาหารโดยในแต่ละวันให้อาหาร 2 กรัมต่อบ่อ โดยการให้อาหารจะให้วันละ 2 ครั้งๆ ละ 1 กรัม คือเวลา 07.00 และ 17.00 น. และการให้ไรน้ำนางฟ้าไทยที่มีชีวิตจะต้องเลือกไรน้ำนางฟ้าไทย อายุ 7-8 วัน ขนาดใกล้เคียงกัน ให้ตามจำนวนที่กำหนดในสูตรอาหาร ส่วนอาหารเสริมด้วยไรน้ำนางฟ้าไทยที่ 0 องศาเซลเซียส 50 ตัว นำไรน้ำนางฟ้าไทยแช่แข็งเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาละลายน้ำแข็งในน้ำก่อนนำไปให้กุ้ง ทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำและทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำด้วยเครื่องตรวจวัดคุณภาพน้ำบริษัท Hanna Instruments: Model HI 98311สัปดาห์ละ 2 ครั้งตลอดการทดลอง

การเก็บข้อมูล

เก็บตัวอย่างเพื่อบันทึกน้ำหนักและความยาวของกุ้งทุกๆ 15 วัน เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ คำนวณหาอัตราการแลกเนื้อจากสมการ อัตราการแลกเนื้อ (กรัม) = น้ำหนักอาหารที่กิน/ น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ทำการเจาะเลือดเพื่อนับจำนวนเซลล์เม็ดเลือดและคงสภาพกุ้งก้ามกรามที่สุ่มมา 3 ตัวในแต่ละซ้ำใน Davidsons fixative เพื่อศึกษาเนื้อเยื่อวิทยาและคำนวณหาอัตราการรอดตาย

การนับเซลล์เม็ดเลือดรวม

ทำการเจาะเลือดกุ้งจากแต่ละชุดการทดลอง 100 ไมโครลิตร ผสมกับ 10 % ฟอร์มาลีน ใน 0.45 M โซเดียมคลอไรด์ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันเบาๆ หยดน้ำเลือด 100 ไมโครลิตร บนสไลด์นับเม็ดเลือด (hematocytometer) นับจำนวนเม็ดเลือดทั้งหมดด้วยกล้องจุลทรรศน์ Olympus รุ่น CH 30 กำลังขยาย 40 เท่า

การเตรียมเนื้อเยื่อ

ทำให้เนื้อเยื่อคงสภาพโดยใช้ Davidson's fixative เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเนื้อเยื่อผ่านกระบวนการทำสไลด์ถาวร ทำการย้อมสีด้วย hematoxylin และ eosin และบันทึกภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง Olympus รุ่น CH 30 กำลังขยาย 10 เท่า

การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสังเกตตามแผนการทดลองแบบสุ่มสมบรูณ์ (complete randomize design, CRD) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของปัจจัยทดลองด้วยวิธี Ducan's new multiple rang test โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for Window 11.5

ผลการวิเคราะห์

คุณภาพน้ำ

คุณภาพน้ำที่ใช้เลี้ยงกุ้งในการทดลองตลอดระยะเป็นการทดลองเวลา 8 สัปดาห์ พบว่า มีค่ากรด-เบส (pH) อยู่ที่ 8 - 9.5 อุณหภูมิอยู่ที่ 18 - 26 องศาเซลเซียส ค่าออกซิเจนละลายในน้ำ (DO) อยู่ที่ 5 -9 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าไนไตร์ทเท่ากับ 0 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าแอมโมเนียเท่ากับ 0 mg/l (ตารางที่ 1)

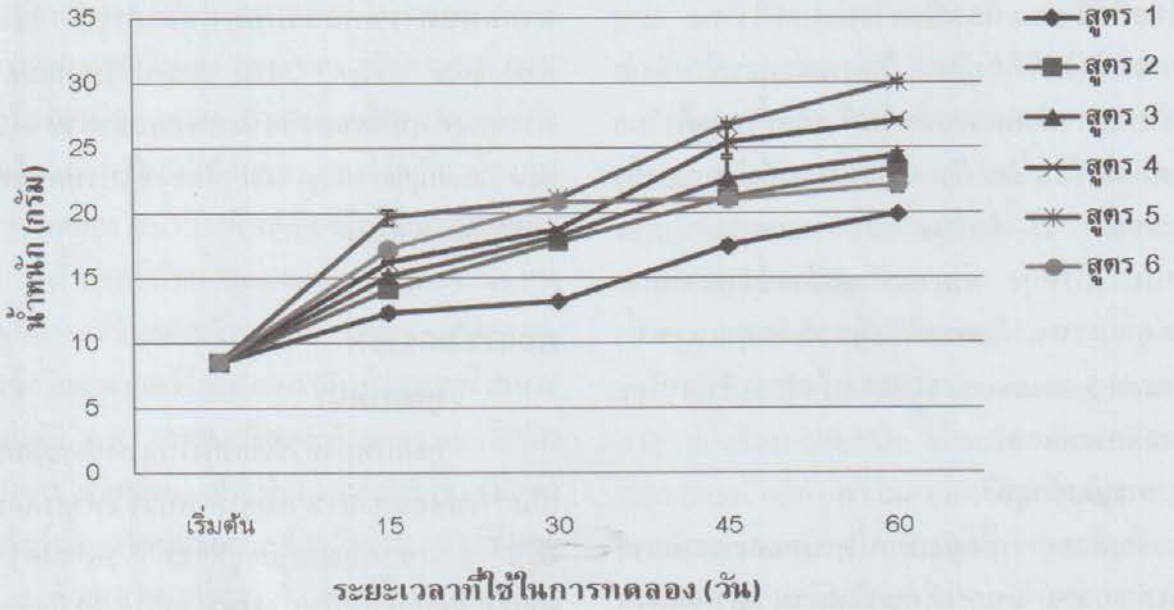
ตารางที่ 1 คุณภาพน้ำที่ใช้เลี้ยงกุ้งก้ามกราม อ้างตาม บรรจง เทียนส่งรัศมี (2535) และน้ำที่ใช้ในการทดลอง

คุณสมบัติของน้ำที่ใช้เลี้ยงกุ้ง	คุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยง (ทุก ๆ 15 วัน)				
	เริ่มต้น	วันที่ 15	วันที่ 30	วันที่ 45	วันที่ 60
pH 7.5-8.9	8	8-9	8-8.5	8-8.5	8-8.5
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) 23-28	25-26	25-26	24-26	23-24	18-20
DO (มิลลิกรัม/ลิตร) > 3	5-8	6-8	6-7.5	6-9	6-7
ไนไตร์ท (มิลลิกรัม/ลิตร) <6-12	0	0	0	0	0
แอมโมเนีย (มิลลิกรัม/ลิตร) < 0.1	0	0	0	0	0

อัตราการรอดตาย

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า ลูกกุ้งก้ามกรามระยะวัยรุ่นที่เลี้ยงด้วยสูตรอาหารเสริมไรน้ำนางฟ้าสด 30 ตัว มีอัตราการรอดตายสูงที่สุด คือ 68.89±16.78 (ตารางที่ 2) เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม พบว่า แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) และพบว่า อัตราการรอดตายของลูกกุ้งก้ามกรามมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น

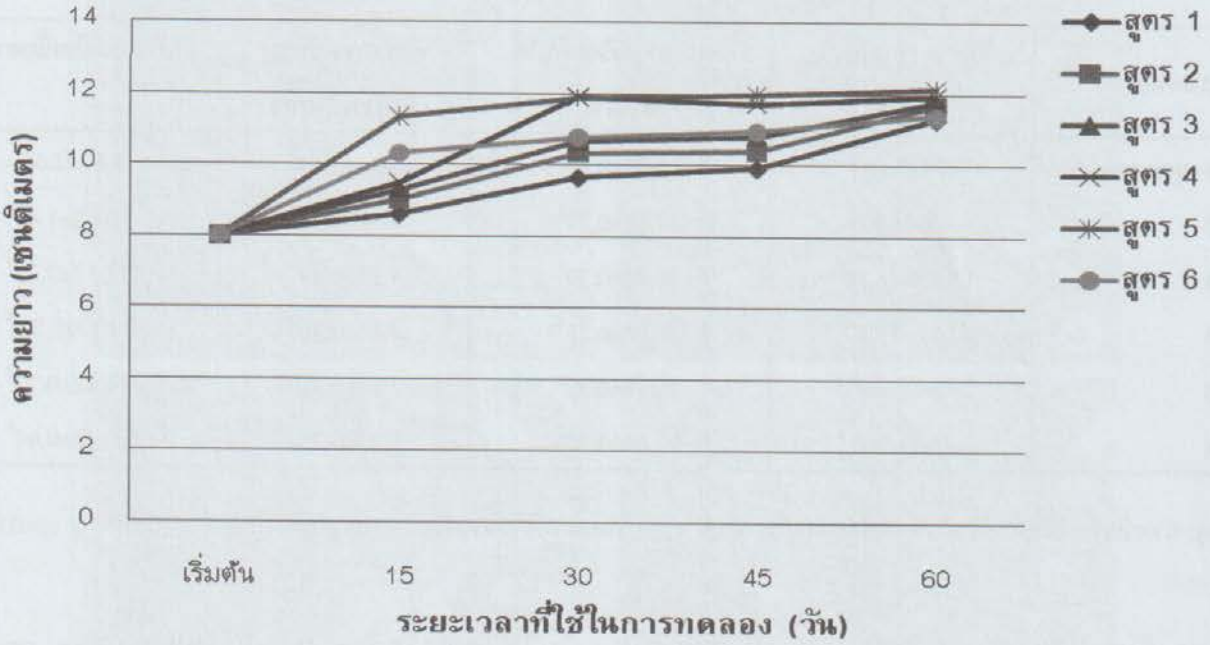
ผลของการใช้ไรน้ำนางฟ้าไทยเป็นอาหารเสริมในการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม



รูปที่ 1 เปรียบเทียบน้ำหนักเฉลี่ยของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยสูตรอาหารที่แตกต่างกัน 6 สูตรเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์

น้ำหนักและความยาว

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า กุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยสูตรการเสริมไรน้ำนางฟ้าปริมาณต่างกันมีน้ำหนักเฉลี่ยแตกต่างและแตกต่างจากชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) และพบว่า กุ้งก้ามกรามน้ำหนักเฉลี่ยมากที่สุด คือ สูตรอาหารเสริมไรน้ำนางฟ้าที่มีชีวิต 50 ตัว/วัน ซึ่งมีค่าน้ำหนักตัวเฉลี่ยเมื่อสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ 30.07±0.16 กรัม (รูปที่ 1) และมีค่าความยาวเฉลี่ยสูงสุด คือ 12.14±0.09 เซนติเมตร ซึ่งมีความแตกต่างกับชุดการทดลองอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 เปรียบเทียบความยาวเฉลี่ยของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยสูตรอาหารที่แตกต่างกัน 6 สูตร เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์

อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific Growth Rate)

เมื่อสิ้นสุดการทดลองกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยสูตรอาหารเสริมไรน้ำนางฟ้าไทยที่มีชีวิต 50 ตัวต่อวัน มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (เปอร์เซ็นต์/วัน) เฉลี่ยสูงที่สุด คือ 35.95±0.27 รองลงมา คือ สูตรอาหารเสริมไรน้ำนางฟ้าไทยที่มีชีวิต 40 ตัว 30 ตัว 20 ตัว สูตรอาหารเสริมไรน้ำนางฟ้าแช่แข็ง 50 ตัวและสูตรควบคุม ตามลำดับ (ตารางที่ 1) เมื่อเปรียบเทียบแต่ละชุดการทดลองกับชุดควบคุม พบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

อัตราการแลกเนื้อ (Feed Conversion Ratio)

กุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยสูตรอาหารเสริมไรน้ำนางฟ้าไทยที่มีชีวิต 50 ตัว มีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อเฉลี่ยสูงที่สุด คือ 2.80±0.41 รองลงมาคือ สูตรอาหารเสริมไรน้ำนางฟ้าไทยที่มีชีวิต 40 ตัว 30 ตัว 20 ตัว สูตรอาหารเสริมไรน้ำนางฟ้าแช่แข็ง 50 ตัว/วัน และสูตรควบคุม ตามลำดับ (ตารางที่ 2) เมื่อเปรียบเทียบสูตรอาหารเสริมไรน้ำนางฟ้าไทยที่มีชีวิต 50 ตัว/วัน กับชุดควบคุม พบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

ปริมาณเม็ดเลือด (Total Hemocyte Count)

พบว่า จำนวนเม็ดเลือดรวมของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยสูตรอาหารเสริมไรน้ำนางฟ้าไทยที่มีชีวิต 50 ตัวต่อวัน มีค่าเฉลี่ยเม็ดเลือดรวมสูงที่สุด คือ 14.42 x 10^6 รองลงมาคือ สูตรอาหารเสริมไรน้ำนางฟ้าที่มีชีวิต 40 ตัว 30 ตัว 20 ตัว ต่อวัน เสริมไรน้ำนางฟ้าแช่แข็ง 50 ตัวต่อวันและชุดควบคุม ตามลำดับ (ตารางที่ 2) และเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม พบว่า แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

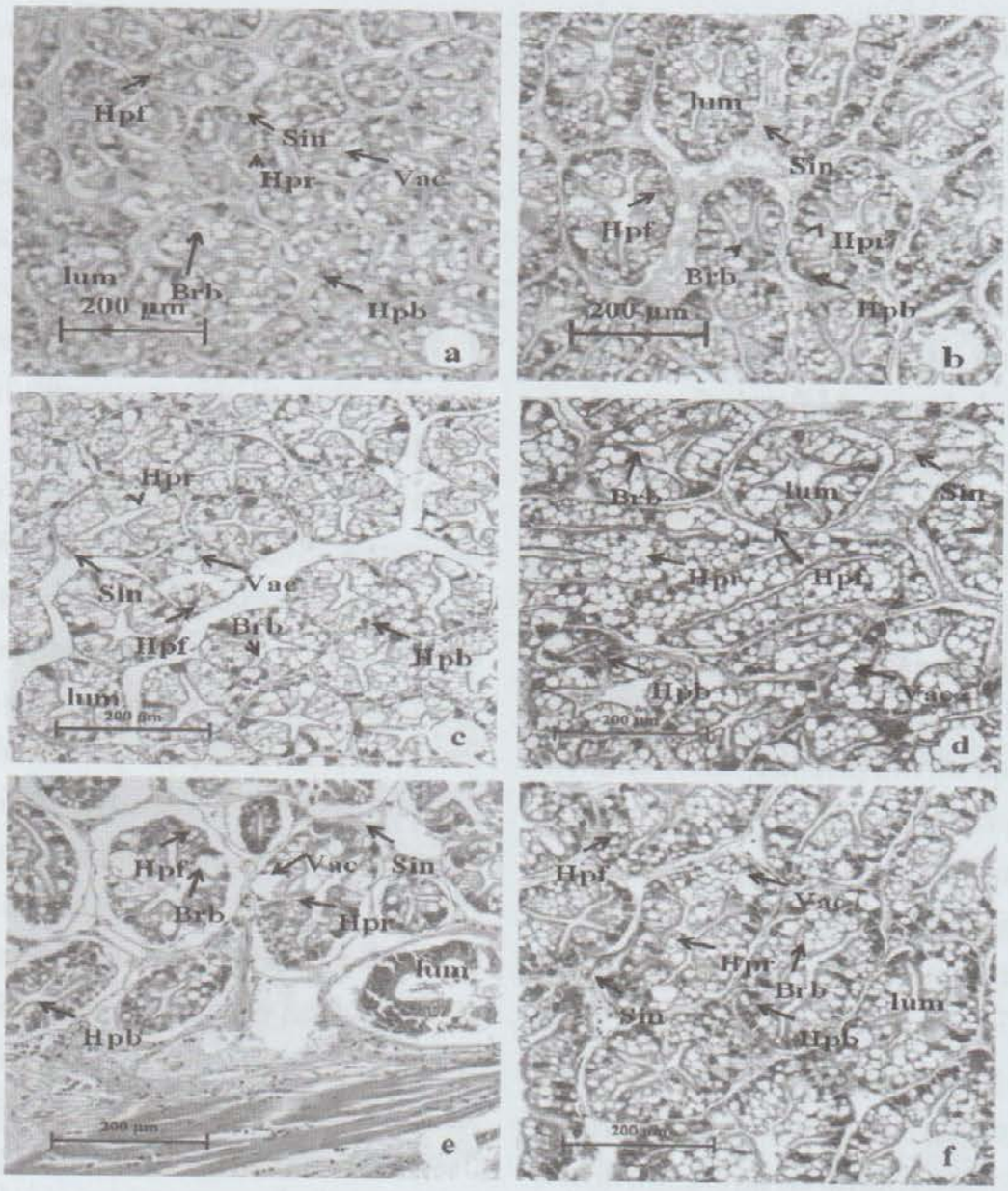
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบอัตราการรอดตาย อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ อัตราการแลกเนื้อและปริมาณเม็ดเลือดรวมเมื่อสิ้นสุดการทดลองระยะเวลา 8 สัปดาห์

ชุดการทดลอง	อัตราการรอดตาย (%)	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ	อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ	ปริมาณเม็ดเลือดรวม
สูตร 1 (ชุดควบคุม)	4.44±7.69^{a}	19.09±0.34^{a}	5.11±1.06^{c}	5.60±1.56^{a}
สูตร 2	40.00±6.67^{b}	24.86±0.79^{b}	4.55±0.36^{bc}	10.82±1.49^{b}
สูตร 3	68.89±16.78^{c}	26.57±0.39^{c}	4.27±0.69^{bc}	12.57±0.72^{c}
สูตร 4	42.22±13.87^{bc}	31.03±0.28^{d}	3.80±0.36^{ab}	14.17±0.85^{cd}
สูตร 5	24.44±23.41^{ab}	35.95±0.27^{e}	2.80±0.41^{a}	14.42±0.79^{d}
สูตร 6	4.44±7.69^{a}	22.84±1.05^{f}	5.23±0.75^{c}	10.02±0.64^{b}

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกัน (a, b, c,...) ในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

เนื้อเยื่อของตับและตับอ่อน (Hepatopancreatic Tissue)

เนื้อเยื่อของตับและตับอ่อนมีลักษณะเป็นท่อ (tubes) หลายๆ ท่อ เมื่อตัดตามขวาง พบว่า ในแต่ละชุดการทดลองมีความแตกต่างกับชุดควบคุม คือ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่และจำนวนชั้นของเซลล์มากกว่า มีเซลล์ชนิดที่เป็น R-, F- และ B-cells มากกว่า (R-cell: Resorption cell หรือ light cell) ซึ่งเป็นเซลล์รูปร่างสี่เหลี่ยมทรงสูง มีไขมันจำนวนมากสะสมอยู่ในไซโทพลาสซึม , F-cell: Fibrillar cell หรือ dark cell ที่มีรูปร่างคล้ายหยดน้ำ ย้อมติดสีเข้ม เนื่องจากมีเส้นใยในไซโทพลาสซึม, B-cell: Blister-like cell หรือ vacuolated cell) ซึ่งเป็นเซลล์ที่มี vacuole ขนาดใหญ่ในไซโทพลาสซึม ทำให้เห็นไซโทพลาสซึมเป็นชั้นบางๆ หุ้ม vacuole อยู่ และยังพบสารจากผลผลิตของเซลล์ (inclusion)ในช่องว่างภายในของท่อ (รูปที่ 3e-f) มากกว่าชุดควบคุม (รูปที่ 3a) การย้อมติดสีเข้มในส่วนของ epithelial layer ของชุดการทดลองที่เสริมไรน้ำนางฟ้าที่มีชีวิต 40 ตัวต่อวัน แตกต่างจากชุดควบคุมชัดเจน (รูปที่ 3d) แสดงให้เห็นความสมบรูณ์แข็งแรง และมีสุขภาพดีของกุ้งก้ามกราม



รูปที่ 3 ลักษณะทางเนื้อเยื่อวิทยาของเซลล์ตับและตับอ่อนของกุ้งก้ามกราม ภาคตัดขวาง เมื่อสิ้นสุดการทดลอง 8 สัปดาห์ (H&E, x10)

(a) ชุดควบคุม (สูตร 1) พบว่าภายในแต่ละท่อ เซลล์เรียงตัวชั้นเดียว

(b) ชุดการทดลองที่ 2 (สูตร 2) กลุ่มที่ได้รับไรน้ำนางฟ้าไทยมีชีวิต 20 ตัวต่อวัน พบว่าขนาดของท่อกว้างและจำนวนชั้นของเซลล์มากกว่าชุดควบคุม

(c) ชุดการทดลองที่ 3 (สูตร 3) กลุ่มที่ได้รับไรน้ำนางฟ้าไทยมีชีวิต 30 ตัวต่อวัน พบว่าชั้น microvillus brush border ย้อมติดสีชัดเจน

(d) ชุดการทดลองที่ 4 (สูตร 4) กลุ่มที่ได้รับไรน้ำนางฟ้าไทยมีชีวิต 40 ตัวต่อวัน พบว่า epithelial layer และ microvillus brush border ย้อมติดสีชัดเจน

(e) ชุดการทดลองที่ 5 (สูตร 5) กลุ่มที่ได้รับไรน้ำนางฟ้าไทยมีชีวิต 50 ตัวต่อวัน พบ inclusion ภายในท่อ (Lumen:Lum) ในลักษณะ secretory substances

(f) ชุดการทดลองที่ 6 (สูตร 6) กลุ่มที่ได้รับไรน้ำนางฟ้าไทยแช่แข็ง 50 ตัวต่อวัน พบว่า epithelial layer และ microvillus brush border ย้อมติดสีชัดเจน จำนวนชั้นของเซลล์ภายในท่อมีหลายชั้น และพบ inclusion ภายในท่อ

หมายเหตุ: Brb = Microvillus brush border, Lum = lumen, Sin = hemal sinuses, Vac= vacuole, Hpb =Hepatopancreas B-cells, Hpf = Hepatopancreas F-cells และ Hpr = Hepatopancreas R-cells.

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ พบว่า กุ้งก้ามกรามที่ได้รับอาหารเสริมน้ำนางฟ้าไทยที่มีชีวิต 50 ตัวต่อวัน และกุ้งก้ามกรามที่ได้รับอาหารเสริมไรน้ำนางฟ้าไทยแช่แข็ง 50 ตัวต่อวัน มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะและจำนวนเม็ดเลือดรวมสูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) แสดงว่า ไรน้ำนางฟ้ามีคุณค่าทางโภชนาการสูง สามารถใช้เลี้ยงกุ้งก้ามกรามได้เป็นอย่างดี พบว่าไรน้ำนางฟ้า ประกอบด้วย อาหารกลุ่มโปรตีน 64.94 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 5.07 เปอร์เซ็นต์ คาร์โบไฮเดรต 17.96 เปอร์เซ็นต์ (Velu and Munuswamy, 2007) ซึ่งเป็นสารอาหารที่ทำให้มีคุณค่าต่อการเจริญเติบโต นอกจากนี้ ไรน้ำนางฟ้ามีสารกลุ่มแคโรทีนอยด์สูงถึง 1,143 ไมโครกรัมต่อน้ำหนักแห้ง 1 กรัม และพบกรดอะมิโนที่จำเป็นหลายชนิด (นุกุล แสงพันธุ์และคณะ, 2549) มีผลทำให้อัตราการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามเพิ่มขึ้น เมื่อเสริมไรน้ำนางฟ้าไทยที่มีชีวิต 50 ตัวต่อวันอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อมีค่าต่ำที่สุดคือ 2.80±0.41 แสดงถึงการเผาผลาญสารอาหารที่ได้รับเปลี่ยนเป็นน้ำหนักได้สูงที่สุดจึงส่งผลถึงอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูง ซึ่งผลการศึกษาอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อจากการศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับการทดลองของ ละออศรี เสนาะเมืองและคณะ (2549) ซึ่งพบว่า ปลาหมอสีที่ได้รับไรน้ำนางฟ้าเป็นอาหาร มีอัตราการแลกเนื้อดีกว่าปลาหมอสีที่ได้รับอาหารสำเร็จรูปอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาในกุ้งที่ได้รับอาหารเสริมไรน้ำนางฟ้าแช่แข็ง พบว่า มีผลของอัตราการรอดตาย อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อต่ำกว่ากุ้งที่ได้รับไรน้ำนางฟ้าที่มีชีวิต แต่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะและปริมาณเม็ดเลือดรวมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p< 0.05$) อาจเป็นเพราะไรน้ำนางฟ้าแช่แข็งมีสารอาหารที่ถูกย่อยสลายทำให้เสียคุณค่าทางอาหารและตัวไรน้ำนางฟ้าเปื่อยยุ่ยจึงย่อยสลายง่าย ทำให้กุ้งก้ามกรามได้รับไรน้ำนางฟ้าได้น้อยลง จากการศึกษาอัตราการรอดตายของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงเสริมด้วยไรน้ำนางฟ้าที่มีชีวิต พบว่า กุ้งที่ได้รับไรน้ำนางฟ้าที่มีชีวิตเพียงจำนวน 30 ตัวต่อวัน สามารถทำให้อัตราการรอดตายสูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p< 0.05$) และเมื่อพิจารณาจำนวนเม็ดเลือด พบว่า มีค่าสูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p< 0.05$) ความสัมพันธ์ที่เป็นไปในแนวทางเดียวกันนี้แสดงให้เห็นว่าไรน้ำนางฟ้ามีผลทำให้จำนวนเม็ดเลือดมากขึ้น 2 เท่า ซึ่งการเพิ่มของจำนวนเม็ดเลือดนี้เกี่ยวข้องกับการสร้างภูมิคุ้มกันของกุ้ง (กิจการ ศุภมาตย์และคณะ, 2543) ทำให้อัตราการรอดตายในกลุ่มที่ได้รับไรน้ำนางฟ้าสูงกว่าชุดควบคุม

การศึกษาปริมาณเม็ดเลือด พบว่า จำนวนเม็ดเลือดรวมของกุ้งที่ได้รับอาหารเสริมไรน้ำนางฟ้าไทยที่มีชีวิต 50 ตัวต่อวันเท่ากับ 13.6×10^6 เซลล์ต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร รองลงมาคือ สูตรอาหารเสริมไรน้ำนางฟ้าสด 40 ตัวต่อวัน ซึ่งทั้งสองชุดการทดลองมีความแตกต่างกับชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แสดงว่าปริมาณที่ควรให้ไรน้ำนางฟ้าไทยต่อกุ้งก้ามกราม 15 ตัวคือ 40 ตัวต่อวัน และจากการทดลองของ ประทีป ภาสดา (2550) พบว่าจำนวนเซลล์เม็ดเลือดรวมที่ได้จากการทดลองกับการให้ไรน้ำนางฟ้าไทยที่มีชีวิตอย่างเดียวให้ค่าต่ำกว่าการทดลองนี้ โดยมีจำนวนเซลล์เม็ดเลือดรวมเท่ากับ 6.13×10^3 เซลล์ต่อลูกบาศก์มิลลิเมตรแต่ก็มีความสอดคล้องกัน คือ เมื่อเพิ่มจำนวนไรน้ำนางฟ้าส่งผลให้ปริมาณเม็ดเลือดรวมเพิ่มขึ้น การศึกษาครั้งนี้มีการศึกษาลักษณะเนื้อเยื่อของตับและตับอ่อน พบว่า กุ้งก้ามกรามที่ได้รับอาหารเสริมไรน้ำนางฟ้าไทยที่มีชีวิต 50 ตัวต่อวัน มี inclusion ภายในท่อ แสดงถึงมีการหลั่งเอ็นไซม์ออกมาในช่องของเซลล์ตับและตับอ่อน ซึ่งเกิดจากการเจริญพัฒนาของเซลล์ตับและตับอ่อน จาก Embryonic cell (E-cell) ซึ่งเป็นเซลล์ที่ยังไม่พัฒนาที่มีขนาดเล็กที่สุด ไปเป็น Resorption cell (R-cell) ซึ่งเป็นเซลล์รูปร่างสี่เหลี่ยมทรงสูงมีไขมันจำนวนมากสะสมอยู่ในไซโทพลาสซึมพบหนาแน่นบริเวณจุดเริ่มต้นของท่อเป็นเซลล์ที่ทำหน้าที่ดูดซึมและสะสมอาหารประเภทไขมัน และ พัฒนาเป็น Fibrillar cell (F-cell หรือ Dark cell) ที่มีรูปร่างคล้ายหยดน้ำ (อนุตรา อัครจามร, 2534) พบกระจายอยู่

เกือบตลอดความยาวของท่อ ยกเว้นที่ปลายท่อจะพบร่วมกับ R-cell และ Blister-like cell (B-cell) ซึ่งเป็นเซลล์ที่มี vacuole ขนาด ใหญ่ในไซโทพลาสซึม ทำให้เห็นไซโทพลาสซึมเป็นชั้นบางๆ หุ้ม vacuole อยู่ พบหนาแน่นบริเวณส่วนต้นของท่อทำหน้าที่สังเคราะห์และหลั่งเอ็นไซม์ พบว่ากุ้งที่แข็งแรงจะพบ R-cell มากที่สุด เนื่องจากเป็นเซลล์ขนาดใหญ่และมีไขมันในไซโทพลาสซึมมาก B-cell จะพบค่อนข้างน้อย ส่วน F-cell พบกระจายเกือบตลอดความยาวของท่อกุ้งที่ไม่สมบูรณ์ R-cell จะมีขนาดเล็กลง และ B-cell มีจำนวนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และจะพบที่จุดเริ่มต้นของท่อ ถ้ากุ้งอดอาหารจะไม่พบไขมันใน R-cell และ F-cell มีขนาดเล็กลงขณะที่ B-cell พบมากที่สุด F-cell ทำหน้าที่ย่อยและดูดซึม ส่วน B-cell ทำหน้าที่สะสมอาหารในรูปไขมัน (อนุตรา อัครจามร, 2534) ซึ่งเอ็นไซม์ที่พบใน hepatopancreas จากงานวิจัยของ รุจิยา สุทธิธรรม (2545) พบว่าเอ็นไซม์ที่พบในกุ้งส่วนใหญ่เป็น catalase และ α- amylase ที่ส่งผลถึงน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นของกุ้ง เนื่องจากการหลั่งเอ็นไซม์มากทำให้ระบบการย่อยอาหารทำงานได้มากขึ้น และในชุดควบคุมพบว่ามีหยดน้ำมัน (lipid droplets) ใน hepatopancreatic epithelium น้อยกว่าชุดการทดลองอื่นๆ ซึ่งหยดน้ำมันนี้เป็นพลังงานที่กุ้งเก็บสะสมไว้ สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่ง พบว่า การเสริมไรน้ำนางฟ้าไทยที่มีชีวิตหรือแช่แข็งก็ตามทำให้จำนวนชั้นเซลล์ตับและตับอ่อนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชุดควบคุม ยิ่งไปกว่านั้นยังพบหยดน้ำมันในเซลล์ตับและตับอ่อนปริมาณมาก แสดงถึงความสมบรูณ์แข็งแรงและสุขภาพดีของตับและตับอ่อน จากงานวิจัยของ Vladka และคณะ (2008) พบว่าหยดน้ำมันที่สะสมจะพบมากก่อนระยะลอกคราบและระยะที่กุ้งมีการลอกคราบต่อจากนั้นจะลดลงหลังกุ้งลอกคราบเสร็จสิ้นแล้ว

ในการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยง (ค่า pH ค่าอุณหภูมิ ค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ปริมาณแอมโมเนียและไนไตรท์) พบว่า มีค่าในช่วงที่ไม่เป็นอันตรายต่อการเลี้ยงกุ้ง (บรรจง เทียนส่งรัศมี, 2535) เนื่องจากมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำทุกๆ 3 วัน แต่พบว่าค่าอุณหภูมิของน้ำที่ต่ำลงในช่วง 20 วันสุดท้าย (18-20 องศาเซลเซียส) ส่งผลให้กุ้งกินอาหารน้อยลง ทำให้อัตราการเจริญเติบโต อัตราการรอดตายและจำนวนเม็ดเลือดรวมของกุ้งลดลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามช่วงอุณหภูมิดังกล่าวกุ้งก้ามกรามยังสามารถรอดชีวิตได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคุณธนูศิลป์ ภูผาลาด เกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่ให้คำปรึกษาด้านการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม และคุณสำรวย นางทะราช บริษัทฟาร์มราชาแฟรี่ชริมป์ จังหวัดขอนแก่น ที่ให้การฝึกอบรมการเพาะเลี้ยงไรน้ำนางฟ้าไทยและให้คำปรึกษาจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กิจการ ศุภมาตย์และคณะ. (2543). กุ้งกุลาดำ: ระบบภูมิคุ้มกันและการกระตุ้นภูมิคุ้มกันโรคในกุ้งกุลาดำ. วารสารสงขลานครินทร์. ฉบับพิเศษ. สงขลา: 605-613.

ฐานันดร์ ฑัตตานนท์ และสุจินต์ มณีวงค์. (2520). การทดลองอนุบาลกุ้งก้ามกรามวัยรุ่นอายุ 10-45 วันด้วยอาหารชนิดต่างๆ กัน. ใน: รายงานประจำปีกรมประมงทะเลสงขลา กรมประมง, สงขลา: หน้า 157-165.

ฐานันดร์ ฑัตตานนท์ และนิเวศน์ เรืองพานิช. (2521). เปรียบเทียบการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามวัยอ่อนด้วยไรแดงกับอาร์ทีเมีย. ใน: รายงานประจำปีกรมประมงทะเลสงขลา กรมประมง, สงขลา: หน้า 192 - 196.

นุกูล แสงพันธุ์ โฆษิต ศรีภูธรและละออศรี เสนาะเมือง. (2549). ไรน้ำนางฟ้า: จิ๋วแต่แจ๋ว. (พิมพ์ครั้งที่ 1).ขอนแก่น: หจก. โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา.

บรรจง เทียนส่งรัศมี. (2535). หลักการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม. (พิมพ์ครั้งที่ 1) กรุงเทพฯ: บริษัท ที. พี. พริ้นท์ จำกัด.

ประจวบ หลำอุบล. (2529). กุ้ง. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประทีป ภาสดา. (2550). ศักยภาพของการใช้ไรน้ำนางฟ้าในการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม. ปริญญานิพนธ์ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยี. มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

รุจิยา สุทธิธรรม. (2545). คุณสมบัติของเอนไซม์แคทาเลสจากตับอ่อนกุ้งกุลาดำ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ละออศรี เสนาะเมือง, ภัทยา ภาคมฤค, วาสนร สิริแสน และศิริวงศ์ บูรรุ่งโรจน์. (2549). การใช้ไรน้ำนางฟ้าสิรินธรและอาร์ทีเมียเป็นอาหารเสริมต่อสมรรถนะปลาหมอสี ใน: ไรน้ำนางฟ้าจิ๋วแต่แจ๋ว. (พิมพ์ครั้งที่ 1). ขอนแก่น: โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา.

สมพงษ์ สุวรรณทศ. (2545). แผนการแก้ไขปัญหาเรื่องสารตกค้างและราคากุ้งก้ามกรามตกต่ำ. วารสารการประมง. กรมประมง. เล่มที่ 55 (ฉบับที่ 3).

สุพัสตรา เหล็กจาน และละออศรี เสนาะเมือง. (2546). การแพร่กระจายของไรน้ำนางฟ้าและแพลงก์ตอนสัตว์ในแหล่งน้ำชั่วคราวในเขตจังหวัดมหาสารคามและร้อยเอ็ด. การเสนอผลงานวิทยานิพนธ์ของนักศึกษาบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 5 กลุ่มวิทยาศาสตร์ชีวภาพ. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ขอนแก่น. หจก.ขอนแก่นการพิมพ์. หน้า 47-60.

อนุตรา อัครจามร. (2534). การศึกษาทางเนื้อเยื่อของกุ้งกุลาดำ. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Costa, H. H. (1980). Preliminary studies on the breeding of *Macrobrachium rosenbergii* using locally available diets. Symposium on Giant prawn. Exawan hotle, Bangkok, Thailand 15-21 June.

Sanoamuang, L., Saengphan, N. and Murugan, G. (2002). First record of the family Thamnocephalidae, (Crustacea, Anostraca) from Southeast Asia and description of a new species of *Branchinella*. Hydrobiologia. 486: 63-69.

Vladka, L., Drobne, D., Vilhar, B., Kladnik, A., Znidarsic, N. and Strus, J. (2008). Epithelial thickness and lipid droplets in the hepatopancreas of *Porcellio*. Zoology. 111: 419-432.

Velu, C. S, Czeczuga, B. and Munuswamy, N. (2003). Carotenoprotein complexes in entomostracan Crustaceans (*Streptocephalus dichotomus and Moina micrura*). Comparative Biochemistry Physiology Part B. 135: 35-42.

Velu, C. S. and Munuswamy, N. (2007). Composition and Nutritional Efficacy of Adult Fairy Shrimp *Streptocephalus dichotomus* as Live Feed. Food Chemistry. 100: 435-1442.

ว.วิทย. มข. 38(1) 107-113 (2553) KKU Sci. J.38(1) 107-113 (2010)

ผลต้านฤทธิ์ของสารสกัดจากกลีบเลี้ยงกระเจี๊ยบแดงต่อพิษของยาเตตราซัยคลินต่อตับของหนูเม้าส์

Protective Effect of *Hibiscus sabdariffa* Linn. Calyx Extract on Tetracycline Induced Hepatotoxicity in Mice

Ampa Luangpirom[1*] *and Navaphat Teweebot*[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาผลของสารสกัดจากกลีบเลี้ยงกระเจี๊ยบแดงด้วยน้ำในการป้องกันการเกิดพิษต่อตับของหนูเม้าส์ที่ได้รับยาเตตราซัยคลินขนาด 20 มิลลิกรัม/100 กรัมน้ำหนักตัวเป็นเวลา 14 วัน พบว่า หนูเม้าส์ที่ได้รับสารสกัดขนาด 20 50 และ 100 มิลลิกรัมทางปากเป็นเวลา 4 วันก่อนให้ร่วมกับยาเตตราซัยคลิน 14 วันมีระดับเอนไซม์อะลานีนอะมิโนทรานเฟอเรสในเลือดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) และสอดคล้องกับผลการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อตับ พบการอักเสบของเนื้อเยื่อตับลดลง การมีถุงไขมันในเซลล์ตับและการตายของเซลล์ตับก็ลดลงในแบบขึ้นกับขนาดของสารสกัดที่ได้รับ สรุปได้ว่าสารสกัดจากกลีบเลี้ยงกระเจี๊ยบแดงมีฤทธิ์ลดความเป็นพิษของยาเตตราซัยคลินต่อตับของหนูเม้าส์ได้

Abstract

Aqueous extract of *Hibiscus sabdariffa* Linn. (Malvaceae) calyx was evaluated for the protective effect against hepatotoxicity induced by tetracycline 20 mg/100 gBW for 14 days in mice. The extract at oral doses of 20, 50 and 100 mg/100 gBW were pretreated for 4 days and co-treated with tetracycline for 14 days exhibited the significant protective effect by lowering serum alanine aminotransferase (ALT) ($p < 0.05$). This biochemical observation was supported by the concordance results of histopathological changes of liver sections. They showed that inflammation of liver including lymphocytic infiltration, microvesicular steatosis and necrosis areas were attenuated with dose dependent manner. It is concluded that *Hibiscus sabdariffa* Linn. calyx extract may be useful as a protective agent against tetracycline induced hepatotoxicity in mice.

[1] Applied Taxonomic Research Center, Biology Department, Faculty of Science, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002, Thailand.
* Corresponding Author, E-mail: amplua@kku.ac.tha

คำสำคัญ: กระเจี๊ยบแดง เอนไซม์อะลานีนอะมิโน ทรานเฟอเรส พิษต่อตับ เตตราไซคลิน

Keywords: *Hibiscus sabdariffa* Linn., Alanine aminotransferase (ALT), Hepatotoxicity, Tetracycline.

Introduction

The liver is the major site of metabolism for virtually all drugs. Antibiotics are the most common drugs and most frequently reported as causes of hepatotoxicity (Simmons, 2002). Therefore, prevention or reduction of drug toxicity is crucial. The previous studies were reported that many high antioxidant fruits and herbs were used to prevent hepatotoxicity, by inhibiting lipid peroxidation or decrease oxidative radicals production (Liu et al., 2006). *Hibiscus sabdariffa* calyx extracts are used to make cold and hot drink in many countries and were characterized by a very low degree of toxicity. Median lethal dose (LD_{50}) of these extracts in rats was found to be above 5,000 mg/kgBW (Ali et al., 2005) Hirunpanich et al. (2006) claimed that 5 mg/ml of *H. sabdariffa* extract showed more antioxidant potency than 100 μm of vitamin E *in vitro*. There are many evidences supported that *H. sabdariffa* extract had hepatoprotective effect against zathioprime-induced acute liver damage in rats (Amin and Hamza, 2005), against carbon tatrachloride (CCl_4) induced liver fibrosis in rats (Liu et al., 2006) and against paracetamol-induced liver damage in mice (Olaleye and Rocha, 2008).

This investigation was to evaluate the protective effect of *H. sabdariffa* calyx aqueous extract against tetracycline-induced hepatotoxicity in mice. Hepatotoxicity was induced by oral adminitration with tetracycline dose of 20 mg/100 gBW for 14 days (Luangpirom and Taweebot, 2009). The protective effect of the extract was assessed by serum alanine aminotransferase (ALT) determination and liver histopathological studies. ALT is mostly found in hepatocytes and serum ALT levels is a biochemical marker for early acute hepatic damage (Kaufman and Greene,1993).

Material and methods

Preparation of extract

The dried calyxs of *H. sabdariffa* Linn. were purchased from grocery in Khon Kaen Province. They were extracted with boiling water for 1 hour and evaporated in oven at 50 °C to concentrate at dosed of 20, 50 and 100 mg/ml for experiments.

Animals

Adult male mice (aged 8 weeks old) weighing 35-40 g were obtained from the National Laboratory Animal Center of Mahidol University, Salaya, Nakornprathom Province, Thailand. They were housed under a 12:12 of light-day cycle and at 25 ± 1°C, were fed with standard pellet diet and were provided with water *ad libitum* all time. The experiments were performed after the experimental protocols had been approved by the Institutional Animal Ethics Committee, Khon Kaen Universiry, Thailand (Reference No. 0514.1.12.2132)

Experiment

Male mice were distributed into 6 groups of six animals each. Group I received distilled water 1 ml/100 gBW for 14 days as negative control, Group II received *H. sabdariffa* calyx extract (HSE) 100 mg/ 100 gBW for extract toxicity test, Group III received tetracycline 20 mg/100 gBW as positive control, Groups IV, V and VI were pretreated with HSE at doses of 20, 50 and 100 mg/100 gBW, respectively for 4 days

and then were co-treated with tetracycline for 14 days as treated groups.

Biochemical test

At the end of each experiment, blood samples were collected by cardiac puncture under ether anasthesia, allowed to stand in a test tube for 30 minutes to clot and then collected the serum after centrifugation at 3,000 rpm for 10 minutes. The serum samples were submitted for ALT analysis.

Liver histopathological studies

After the blood sampling, livers were removed and hepatic tissues were cut, then fixed in Bouin's solution, followed by paraffin method process, sectioned 5 μm in thickness and sections were stained with Haematoxylin and Eosin (H&E). The histopathological changes of liver architecture were observed under light microscope and the percentage of animal having hepatic lesions were compared among groups.

Statstical analysis

Data of serum ALT levels were expressed as the mean ± SD, and were assessed by using one way analysis of varience (one way ANOVA). Duncan's multiple test was used to determine the difference among groups. Difference were considered to be statistically significant if $p < 0.05$.

Results

Biochemical test

There was no significant difference of ALT level of the administered HSE group (25.00 ± 2.19 IU/L) in comparision with the control (29.17 ± 5.19 IU/L). While the serum ALT of tetracycline treated group was significantly increased (77.17 ±24.72 IU/L) ($p < 0.05$) which was 2.65 fold of the control. Interestingly, the treated groups which were pretreated with HSE at doses of 20, 50 and 100 mg/100 gBW, respectively before co-treated with tetracycline revealed the significant decrease of serum ALT when compared to the tetracycline treated group alone ($p < 0.05$), but showed no significantly different results in comparison with the control ($p > 0.05$) (Table 1).

Table 1. Effect of *H. sabdariffa* calyx extract (HSE) on serum ALT of mice treated with tetracycline.

Group N=6	ALT level (mean ± SD, IU/L)
I Control	29.17 ±5.19[a]
II HSE 100 mg	25.00 ± 2.19[a]
III T 20 mg	77.17 ± 24.72[b]
IV T 20 mg + HSE 20 mg	23.33 ± 5.39[a]
V T 20 mg + HSE 50 mg	20.83 ± 10.36[a]
VI T 20 mg + HSE 100 mg	26.17 ± 12.42[a]

N= numbers of experimental animals
same alhabet = non-significantly different ($p > 0.05$)
different alhabet = significantly different ($p < 0.05$)

Liver histopathological studies

Histopathological examinations of livers in the tetracycline treated groups were found high occurrence of liver damage including lymphocytic infiltration, microvesicular steatosis and necrosis area. Interestingly, in groups IV, V and group VI which were pretreated with HSE at doses of 20, 50 and 100 mg, respectively before co-treated with tetracycline were found the reduction incidence of liver lesions. However, the hepatic histological structure of HSE treated group alone appeared normal when compared to the control (Table 2 and figure 1)

Table 2. Percentage of animals having hepatic lesions after pretreatment with *H. sabdariffa* Linn. extract (HSE) and co-treatment with tetracycline (T).

Groups (N=6)	Animals having histopathological changes (%)		
	Lymphocytic infiltration	Microvesicular steatosis	Necrosis area
Control	16.67 (1/6)	0	0
HSE 100 mg	16.67 (1/6)	0	0
T 20 mg	83.33 (5/6)	83.33 (5/6)	83.33 (5/6)
HSE 20 mg + T	50.00 (3/6)	66.67 (4/6)	50.00 (3/6)
HSE 50 mg + T	33.33 (2/6)	50.00 (3/6)	33.33 (2/6)
HSE 100 mg + T	33.33 (2/6)	33.33 (2/6)	16.67 (1/6)

N= number of experimental animals

Discussion

The levels of serum ALT of tetracycline treated group was increased 2.65 fold of control. It was a biological marker to indicate liver injury (Kaufman and Greene, 1993), and confirmed by histological changes in liver tissue. Most of animals in tetracycline treated group by 83.33 % displayed abnormal hepatic tissue including lymphocytic infiltration, microvesicular steatosis and necrosis area. There was disarray of hepatic lobules and pyknosis of nuclei or karyolysis was found in some hepatocytes. Microvesicular steatosis, in which small droplets are present within the hepatocytes causing by abnormal cellular lipid peroxidation which can be induce by many drugs include tetracycline (Navarro and Senior, 2006). Lymphocytic infiltration is also an incidence of acute liver inflamation (Liu et al, 2006).

In contrast, our biochemical and histological results showed that pretreatment with HSE effectively protected mice against tetracycline induced hepatic toxicity. The pretreatment with HSE at doses of 20, 50 and 100 mg/100 gBW of mice and then co-treatment with tetracycline were capable to prevent the elevation of serum ALT and histopathological changes. The previous studies were reported that *H. sabdariffa* Linn. aqueous extract (HSE) contained numerous natural phenolic compounds such as anthocyanin and protocatechuric acid (Tsai et al, 2002). Through their free radicals scavenging capacity and antioxidant activity had been shown protective effect against oxidative stress (Liu et al, 2002) Similar protective effect of HSE against drugs or chemical toxicity had been documented *in vitro* by using tert- butyl hydroperoxide (t-BHT)-induced hepatictoxicity in rats (Wang et al, 2000) and by using carbon tetrachloride (CCl_4) induced liver fibrosis in rats (Liu et al, 2006). *In vivo* studies, HSE also revealed protective effect against CCl_4 induced liver damage in rats (Dahiru et al, 2003) and also had protective effect against azathioprine-induced toxicity in rats (Amin and Hanza,

2005). Futhermore, our work was found that HSE treated alone with 100 mg /100 gBW did not show any signs of hepatic toxicity when compared to the control. Ali et al (2005) reported that *H. sabdariffa* Linn. calyx aqueous extract had a very low toxicity and its median lethal dose (LD_{50}) in rats was above 5,000 mg / kgBW.

Conclusion is that tetracycline treatment at dose of 20 mg/ 100 gBW for 14 days caused liver damage in mice. The pretreatment with *H. sabdariffa* Linn. calyx aqueous extract at least 4 days before co-treatment with tetracycline may be useful as a hepatoprotective agent against tetracycline-induced hepatotoxicity in mice.

References

Ali, B. H., Al Wabel, N. and Blunden, G. (2005). Phytochemical, pharmacological and toxicological aspects of *Hibiscus sabdariffa* Linn. A Review: Phytotherapy Research. 19(5): 369-375.

Amin, A. and Hamza, A. A. (2005). Hepatoprotective effects of *Hibiscus, Rosmarinus* and *Salvia* on azathioprine-induced toxicity in rats. Life Sciences. 77(3): 266-278.

Dahiru, D., Obi, O. J. and Maru, H. (2003). Effect of *Hibiscus sabdariffa* calyx extract on carbon tetrachloride induced liver damage. Biokemistri. 15(1): 27-33.

Kaufman, A. C. and Greene, C. E. (1993). Increased alanine transaminase activity associated with tetracycline administration in a cat. Journal of American Veterinary Medical Association. 202(4): 628-630.

Hirunpinich, V., Utaipat, A., Morales, N. P., Bunyapraphatsara, N., Sato, H., Herunsalee, A. and Suthisisang, C. (2006). Antioxidant effects of aqueous extract from dried calyx of *Hibiscus sabdariffa* Linn. (roselle) *in vitro* using rat low dendity lipoprotein (LDL). Biological and Pharmaceutical Bulletin. 28(3): 481- 484.

Liu, C. L., Wang, J. M., Chu, C. Y., Cheng, M. and Tseng, T. H. (2002). *In vivo* protective effect of protocatechuic acid on tert-butyl hydroperoxide-induced rat hepatotoxicity. Food and Chemical Toxicology. 40: 635-641.

Liu, J. Y., Chen, C. C., Wang, W. H., Hsu, J. D., Yang, M. Y. and Wang, C. J. (2006). The protective effects of *Hibiscus sabdariffa* extract on CCl_4-induced liver fibrosis in rats. Food and Chemical Toxicology. 44: 336-343.

Luangpirom, A., Taweebot, N. (2009). Effect of tetracycline on hepatotoxicity and spermatogenesis in mice. KKU Science Journal. 37(1): 56-64.

Navarro, V. J. and Senior J. R. (2006). Drug-related hepatotoxicity. The New England Journal of Medicine. 354(7): 731-739.

Olaleye, M. T. and Rocha, B. T. J. (2008). Acetaminophen-induced liver damage in mice: Effects of some medicinal plants on the oxidative defense system. Experimental and Toxicologic Pathology. 59: 319-327.

Simmons, C. (2002). Beware: Antibiotic-induced hepatotoxicity is rare but deadly. Hospital Pharmacy. 37(3): 326-330.

Tsai, P. J., McIntosh, J., Pearce, P., Camden, B. and Jordan, B. R. (2002). Anthocyanin and antioxidant capacity in roselle (*Hibiscus sabdariffa* Linn.) extract. Food Research International. 35: 351-356.

Wang, C. J., Wang, J. M., Lin, W. L., Chu, C. Y., Chou, F. P. and Tseng, T. H. (2000). Protective effect of Hibiscus anthocyanins against tert-butyl hydroperoxide-induced hepatic toxicity in rats. Food and Chemical Toxicolgy. 38: 411-416.

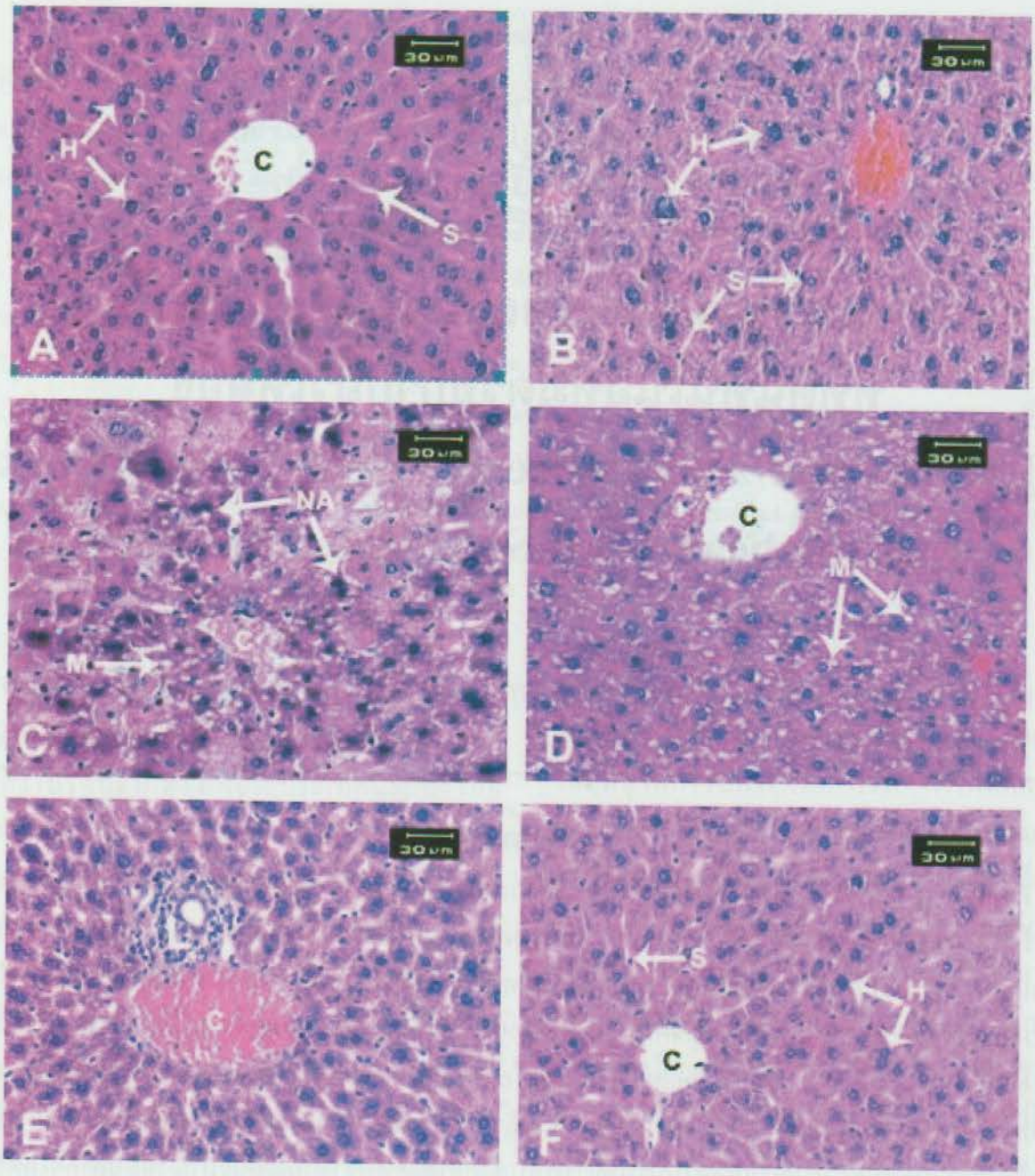


Figure 1. Histological structure of liver section (H&E): **A**, control group showing normal hepatic architecture, where the hepatocytes (H) are arranged around the central vein (C) and alternate with blood sinusoid (S) called hepatic lobule. Each hepatocyte has large nucleus at central and prominent nuclei; **B**, group treated with HSE 100 mg showing normal hepatic architecture; **C**, group treated with tetracycline (T) 20 mg showing hepatic lesion including microvesicular steatosis (M) and necrosis area (NA); **D**, group treated with HSE 20 mg+ T showing abnormal hepatic tissue including microvesicular steatosis ; **E**, group treated with HSE 50 mg+T showing some hepatic inflammation including lymphocytic infiltration (L) around the central vein (C); **F**, group treated with HSE 50 mg.+T showing normal hepatocytes and normal hepatic lobules.

ว.วิทย. มข. 38(1) 114-123 (2553) KKU Sci. J.38(1) 114-123 (2010)

คุณภาพและการยอมรับผลิตภัณฑ์หมูก้อนทอดที่ทดแทนเนื้อหมูด้วยกากถั่วเหลือง

Qualities and Acceptance of Fried-Ground Pork with Soybean Meal Substituted for Pork

นงเยาว์ ชูสุข[1] อภิญญา จันทรวัฒนะ[2] สุคนธ์ นวลกำแหง[1]*
ศุภดิษฐ์ โชติสุภาพ[1] และ ทินกร วชิรดุสิต[1]

บทคัดย่อ

กากถั่วเหลืองเป็นผลพลอยได้จากการผลิตนมถั่วเหลืองหรือเต้าหู้ มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย ความชื้นร้อยละ 65.67 ไขมันร้อยละ 1.19 โปรตีนร้อยละ 3.16 เถ้าร้อยละ 8.07 เส้นใยร้อยละ 21.12 และคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 0.79 เมื่อนำไปเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์หมูก้อน สามารถทดแทนการใช้เนื้อและมันหมูได้ร้อยละ 40 ของเนื้อและมันหมู สูตรผลิตภัณฑ์หมูก้อนที่ใช้กากถั่วเหลืองประกอบด้วยเนื้อหมูร้อยละ 28.8 กากถั่วเหลืองร้อยละ 24.1 มันหมูร้อยละ 7.2 แป้งมันร้อยละ 3.3 ไข่ไก่ร้อยละ 10.0 กระเทียมร้อยละ 3.3 พริกไทยเม็ดร้อยละ 1.7 ลูกผักชีร้อยละ 0.8 น้ำตาลร้อยละ 2.2 เกลือร้อยละ 1.1 ซีอิ๊วขาวร้อยละ 2.4 และเกล็ดขนมปังร้อยละ 15 ผลิตภัณฑ์หมูก้อนทอดที่มีส่วนผสมของกากถั่วเหลืองมีปริมาณโปรตีนสูงกว่าสูตรพื้นฐาน และมีปริมาณไขมันต่ำกว่าสูตรพื้นฐาน องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์หมูก้อนที่ผสมกากถั่วเหลือง ประกอบด้วย ความชื้นร้อยละ 52.5 โปรตีนร้อยละ 16 ไขมันร้อยละ 27.2 เส้นใยร้อยละ 1.2 เถ้าร้อยละ 2.4 และคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 1.9 คะแนนความชอบรวมในระดับชอบมาก (7.78) ผู้บริโภค 100 คนให้การยอมรับผลิตภัณฑ์ร้อยละ 99 และสนใจซื้อผลิตภัณฑ์ร้อยละ 95 ผลิตภัณฑ์ยังคงมีคุณภาพทางกายภาพ จุลินทรีย์ และประสาทสัมผัส ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากผลิตภัณฑ์ต้นแบบ เมื่อเก็บในตู้เย็นอุณหภูมิ -2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 สัปดาห์

คำสำคัญ: หมูก้อน กากถั่วเหลือง การพัฒนาผลิตภัณฑ์ Response Surface Methodology

[1] ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
[2] ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตรและการจัดการ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
* Corresponding Author, E- mail: nongyaoc@kmutnb.ac.th

Abstract

Soybean meal is a byproduct obtained from the soymilk and tofu production process. The composition of chemical compound contains moisture (65.67%), fat (1.19%), protein (3.16%), ash (8.07%), fiber (21.12%) and carbohydrate (0.79%). It was applied instead of pork and lard in the fried-ground pork production. The results showed that soybean meal could be replaced pork and lard by 40% of the formula. The formula of the accepted product were pork, soybean meal, lard, tapioca flour, egg, garlic, pepper, cilantro seed, sugar, salt, soy sauce and breadcrumbs with 28.2%, 24.1%, 7.2%, 3.3%, 10.0%, 3.3%, 1.7%, 0.8%, 2.2%, 1.1%, 2.4% and 15% respectively. The product achieved contains higher amount of protein and lower amount of fat than those of the original product. The compositions were moisture (52.2%), protein (16%), fat (27.7%), fiber (1.2%), ash (2.4%) and carbohydrate (1.9%). The sensory evaluation of overall product liking revealed that product was accepted with high score liking (7.78). Furthermore, 99% of consumers accepted this product and 95% intend to buy it. The product qualities were remained unchanged compared with that of original product throughout eight weeks of storage (-2 ^{o}C).

บทนำ

ถั่วเหลืองเป็นพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เป็นแหล่งโปรตีนจากพืชที่หลายประเทศนิยมบริโภค เนื่องจากถั่วเหลืองอุดมไปด้วย เกลือแร่ วิตามิน ฟอสฟอรัส เหล็ก แคลเซียม สำหรับแคลเซียมเป็นธาตุที่สำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งในการเจริญเติบโตของกระดูกและฟันใน ร่างกาย (สมชาย ประภาวัตร, 2524) อีกทั้งยังนำไปประกอบอาหารได้หลายรูปแบบ เช่น นมถั่วเหลือง หรือน้ำเต้าหู้ ฟองเต้าหู้ เต้าฮวย และเต้าเจี้ยว เป็นต้น

กระบวนการผลิตนมถั่วเหลือง หรือน้ำเต้าหู้ มีของเหลือใช้จากการผลิตที่สำคัญ คือ กากถั่วเหลือง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน กากถั่วเหลืองที่เหลือจากการผลิตนมถั่วเหลืองระดับอุตสาหกรรม ส่วนมากจะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ และนำไปใช้แปรรูปในผลิตภัณฑ์อาหารบ้าง เช่น เทมเป้ กากถั่วเหลือง น้ำพริกมะขามสด คุกกี้ และข้าวตู เป็นต้น (สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร, 2527)

ยุพร พืชกมุทร (2550) รายงานว่า กากถั่วเหลืองสามารถนำไปผลิตผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น ทดแทนแป้งสาลีในการผลิตคุกกี้ ขนมทองม้วน ทำให้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้มีปริมาณโปรตีนและเส้นใยอาหารเพิ่มขึ้น หรือนำมาผลิตอาหารหมัก ได้แก่ นัตโต (natto) และเทมเป้ (tempeh) แทนการใช้ถั่วเหลืองทั้งเมล็ด นอกจากนี้กากถั่วเหลืองยังใช้เป็นแหล่งอาหารของเชื้อจุลินทรีย์ในอุตสาหกรรมการหมัก เช่น การผลิตกรดซิตริก การใช้ประโยชน์จากกากถั่วเหลืองจึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลพลอยได้จากการผลิตนมถั่วเหลืองหรือเต้าหู้

ยุพร พืชกมุทร และกานดา แซ่จิว (2548) ได้ผลิตคุกกี้ โดยใช้กากถั่วเหลืองที่ได้จากการผลิตนมถั่วเหลืองที่เลียนแบบการผลิตในครัวเรือน และกากถั่วเหลืองจากโรงงานผลิตนมถั่วเหลืองขนาดใหญ่ พบว่ากากถั่วเหลืองทั้งสองชนิดทดแทนแป้งสาลีได้ร้อยละ 80 คุกกี้ที่ใช้กากถั่วเหลืองสดมีปริมาณเส้นใยอาหารมากกว่าคุกกี้เนยสูตรควบคุมถึง 4.61 เท่า และการใช้กากถั่วเหลืองอบแห้งผลิตคุกกี้ ทำให้ คุกกี้มีอายุการเก็บสั้น เนื่องจากมีการใช้อุณหภูมิสูงในการอบกากถั่วเหลือง ทำให้เกิดการออกซิเดชันของน้ำมันในกากถั่วเหลือง

งานศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาการนำกากถั่วเหลืองมาใช้ประโยชน์ โดยการนำไปใช้ผสมในผลิตภัณฑ์หมูก้อน ซึ่งหมูก้อนมีส่วนประกอบหลัก คือ เนื้อหมูและมันหมูดังนั้นหากมีการเพิ่มกากถั่วเหลืองในผลิตภัณฑ์จะช่วยลดต้นทุนการผลิต และลดปริมาณการใช้เนื้อหมูและมันหมูได้อีกทั้งเป็นการใช้ประโยชน์จากของเหลือจาก

กระบวนการผลิตนมถั่วเหลือง หรือน้ำเต้าหู้ในระดับครัวเรือนหรือร้านค้าเล็กๆ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นของเหลือทิ้งที่ไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่

วิธีการ

1. การหาองค์ประกอบทางเคมีของกากถั่วเหลือง

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการใช้กากถั่วเหลืองสดจากร้านขายน้ำเต้าหู้ ตลาดวงเวียนนเรศวร จังหวัดปราจีนบุรี ดังนั้นจึงได้ทำการสุ่มตัวอย่างและหาองค์ประกอบทางเคมีเพื่อให้มั่นใจว่าในแต่ละครั้งที่ทำการทดลองกากถั่วเหลืองที่ได้มีองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกัน โดยสุ่มตัวอย่างจำนวน 3 ครั้ง และทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมี (AOAC, 1995) ประกอบด้วยความชื้น โปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้า และคำนวณปริมาณคาร์โบไฮเดรต (By difference)

2. การศึกษาปริมาณการใช้กากถั่วเหลืองในผลิตภัณฑ์หมูก้อน

2.1 กรรมวิธีการผลิตหมูก้อนสูตรพื้นฐาน

ส่วนประกอบของหมูก้อนได้แก่ กระเทียมร้อยละ 3.4 พริกไทยร้อยละ 1.6 และลูกผักชีร้อยละ 0.8 โขลกรวมกัน ผสมกับ หมูเนื้อแดงบดร้อยละ 50 และมันหมูบดร้อยละ 10 เติมซีอิ๊วขาวร้อยละ 2.5 เกลือร้อยละ 0.8 น้ำตาลร้อยละ 2.5 แป้งมันร้อยละ 3.4 และไข่ไก่ร้อยละ 10 นวดให้เข้ากัน หมักทิ้งไว้ 30 นาที แบ่งหมูสำหรับทอดชิ้นละ 20 กรัม ชุบเกล็ดขนมปัง ร้อยละ 15 และ นำไปทอดโดยควบคุมอุณหภูมิให้ได้ประมาณ 180 องศาเซลเซียส นาน 3 นาที (นิรนาม , 2551)

2.2 การศึกษาปริมาณการเติมกากถั่วเหลืองในหมูก้อน ทำการศึกษาโดยแปรปริมาณของกากถั่วเหลืองที่เติมเป็นร้อยละ 50 45 40 35 และ 30 โดยน้ำหนักของเนื้อหมูและมันหมูในสูตร ทำการผสมและนำหมูก้อนไปทอดตามวิธีการข้อ 2.1 ก่อนนำไปทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยวิธีหาอัตราส่วนความชอบคะแนน 9 ระดับ (Hedonic-9-point scales) ในคุณลักษณะทางด้านสี กลิ่นรส รสหวาน รสเค็ม ความนุ่ม ความเป็นเนื้อเดียวกัน และความชอบโดยรวมใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน เพื่อคัดเลือกสูตรที่เหมาะสม

3. การปรับปรุงรสชาติของผลิตภัณฑ์หมูก้อน

ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการคัดเลือกการใช้ปริมาณกากถั่วเหลือง นำมาทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยวิธีวัดความพอดี (Just About Right หรือ JAR) (Meilgaard et al, 1999) วางแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย 3 ระดับ (9 สิ่งทดลอง) ปัจจัยที่ต้องปรับ คือ ปริมาณน้ำตาล 3 ระดับ คือร้อยละ 2.4 2.2 และร้อยละ 2.0 ของสูตรและ ปริมาณเกลือ 3 ระดับ คือร้อยละ 1.0 1.2 และร้อยละ 1.4 ของสูตร

ทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยวิธีหาอัตราส่วนความชอบคะแนน 9 ระดับ ในคุณลักษณะทางด้านรสหวาน รสเค็ม และความชอบรวมโดยใช้เทคนิคในการสุ่มเสิร์ฟตัวอย่างแบบบลอกไม่สมบูรณ์แบบสมดุลย์ (Balance Incomplete Block Design หรือ BIB) (สุรพล อุปดิสสกุล, 2537) โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนซึ่งผู้ทดสอบ 1 คน ทดสอบตัวอย่าง 4 ตัวอย่าง แต่ละตัวอย่างผ่านการทดสอบ 32 ครั้ง ใช้ผู้ทดสอบรวมทั้งหมด 72 คน ผลการทดสอบนำไปสร้างโครงร่างพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology หรือ RSM) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS 10 และ Statistica 5.0

4. การประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการปรับรสชาติ

4.1 คุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยวิธีหาอัตราส่วนความชอบคะแนน 9 ระดับ ในคุณลักษณะทางด้านสี กลิ่นรส รสหวาน รสเค็ม ความนุ่ม ความเป็นเนื้อเดียวกัน และความชอบรวม ใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน

4.2 คุณภาพทางกายภาพ

1) การวัดค่าสี L^* a^* b^* โดยใช้เครื่อง Colorimeter (Color Flex, ประเทศไต้หวัน)

2) การวัดเนื้อสัมผัส ความแข็งและการยึดเกาะ โดยใช้เครื่อง Texture analyzer (TA.XT plus ประเทศอังกฤษ)

4.3 คุณภาพทางเคมี โดยทำการวิเคราะห์ความชื้น โปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้า และ คาร์โบไฮเดรต (วิธีการตามข้อ 1)

4.4 คุณภาพทางจุลินทรีย์ โดยวิเคราะห์ จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด และจำนวนยีสต์และรา (AOAC, 1995)

5. การทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค

ทดสอบการยอมรับผลิตภัณฑ์หมูก้อนที่ผสมถั่วเหลืองที่พัฒนาแล้วโดยใช้แบบสอบถามพร้อมกับนำเสนอตัวอย่าง กับกลุ่มเป้าหมายที่เป็นผู้บริโภคทั่วไป จำนวน 100 คน โดยคำนวณหาค่าความถี่ ร้อยละ และค่าเฉลี่ยของข้อมูล

6. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษา

ศึกษาอายุการเก็บผลิตภัณฑ์หมูก้อนที่ผสมกากถั่วเหลืองโดยนำไปแช่แข็งอย่างรวดเร็ว (Plate Freezer) และเก็บที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ -2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 เดือน วิเคราะห์คุณภาพทุกๆ 2 สัปดาห์ โดยวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ (ตามวิธีในข้อ 4.2) จุลินทรีย์ (ตามวิธีในข้อ 4.4) และ ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยหาอัตราส่วนความชอบคะแนน 9 ระดับ ในคุณลักษณะทางด้านสี กลิ่นรส รสหวาน รสเค็ม ความนุ่ม ความเป็นเนื้อเดียวกัน และความชอบรวม โดยผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน

ผลการทดลอง

องค์ประกอบทางเคมีของกากถั่วเหลือง

จากการสุ่มตัวอย่างกากถั่วเหลืองจำนวน 3 ครั้ง จากตลาดวงเวียนนเรศวร จังหวัดปราจีนบุรี มาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี พบว่า ตัวอย่างที่สุ่มแต่ละครั้งมีองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกัน ประกอบด้วยความชื้นร้อยละ 65.67 โปรตีนร้อยละ 3.16 ไขมันร้อยละ 1.19 เส้นใยร้อยละ 21.12 เถ้าร้อยละ 8.07 และคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 0.79 ดังตารางที่ 1 ซึ่งสอดคล้องกับ ยุพร พืชกมุทร (2550) รายงานว่า กากถั่วเหลืองประกอบด้วย ความชื้นร้อยละ 76-80 โปรตีนร้อยละ 3.5-4.0 เมื่ออบแห้งประกอบด้วยโปรตีนร้อยละ 24-28 ไขมันร้อยละ 8-12 เส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำร้อยละ 40-44 เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำร้อยละ 12-15

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของกากถั่วเหลือง

สุ่มครั้งที่	ความชื้น	โปรตีน	ไขมัน	เส้นใย	เถ้า	คาร์โบไฮเดรต
1	65.80 ± 0.00	3.13 ± 0.01	1.18 ± 0.02	21.18 ± 0.09	8.00 ± 0.12	0.71 ± 0.01
2	65.60 ± 0.10	3.18 ± 0.01	1.20 ± 0.00	21.00 ± 0.00	8.20 ± 0.20	0.82 ± 0.02
3	65.60 ± 0.00	3.18 ± 0.00	1.20 ± 0.02	21.18 ± 0.09	8.00 ± 0.20	0.84 ± 0.02
เฉลี่ยรวม	**65.67± 0.12**	**3.16 ± 0.03**	**1.19 ± 0.01**	**21.12 ± 0.10**	**8.07 ± 0.12**	**0.79 ± 0.07**

1. การศึกษาปริมาณการใช้กากถั่วเหลืองในผลิตภัณฑ์

จากการใช้กากถั่วเหลืองในผลิตภัณฑ์หมูก้อนร้อยละ 50 45 40 35 และ 30 โดยน้ำหนักของเนื้อและมันหมูในสูตร นำมาทอดแล้วประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยวิธีหาอัตราความชอบคะแนน 9 ระดับ พบว่า การใช้ปริมาณกากถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นส่งผลต่อคะแนนความชอบในคุณลักษณะความเป็นเนื้อเดียวกันและความชอบโดยรวมลดลง ส่วนคุณลักษณะด้าน สี รสหวาน รสเค็มและ ความนุ่มไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อพิจารณาสูตรที่มีใช้กากถั่วเหลืองร้อยละ 40

35 และ 30 มีความชอบรวมไม่ความแตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต จึงเลือกสูตรที่มีปริมาณกากถั่วเหลืองร้อยละ 40 ของปริมาณเนื้อและมันหมู ผลการทดลองดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คะแนนความชอบของผลิตภัณฑ์หมูก้อนที่มีการใช้กากถั่วเหลืองในระดับต่างๆ

กาก ถั่วเหลือง	สี	กลิ่นรส	รสหวาน	รสเค็ม	ความนุ่ม	ความเป็นเนื้อเดียวกัน	ความชอบรวม
50%	5.63 ± 1.35^{a}	5.60 ± 1.35^{ab}	5.500 ± 1.64^{a}	5.17 ± 0.98^{a}	6.27 ± 1.36^{a}	5.83 ± 1.12^{bc}	5.60 ± 1.25^{b}
45%	5.50 ± 1.14^{a}	4.87 ± 1.61^{b}	4.80 ± 1.45^{a}	4.90 ± 1.27^{a}	5.83 ± 1.14^{a}	5.53 ± 1.07^{c}	5.70 ± 1.47^{b}
40%	5.40 ± 1.25^{a}	5.37 ± 1.61^{ab}	5.17 ± 1.34^{a}	5.07 ± 1.26^{a}	6.27 ± 1.11^{a}	6.47 ± 0.97^{a}	6.27 ± 1.43^{a}
35%	5.53 ± 1.48^{a}	5.53 ± 1.53^{ab}	5.23 ± 1.74^{a}	5.63 ± 1.56^{a}	6.27 ± 1.20^{a}	6.73 ± 1.20^{a}	6.30 ± 1.07^{a}
30%	5.80 ± 1.27^{a}	5.97 ± 1.25^{a}	4.97 ± 1.40^{a}	5.30 ± 1.42^{a}	6.00 ± 1.26^{a}	6.33 ± 1.03^{ab}	6.31 ± 1.17^{a}

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งมีความแตกต่างกันที่นัยสำคัญ ($p < 0.05$)

การปรับปรุงและพัฒนารสชาติของผลิตภัณฑ์

ผลการศึกษาปริมาณกากถั่วเหลืองในข้อ 2 นำมาผลิตผลิตภัณฑ์เพื่อทดสอบคุณภาพโดยวิธีการวัดความพอดี (JAR) ผลการวัดความพอดี พบว่า คุณภาพที่ต้องปรับปรุงคือ รสหวานและรสเค็ม จึงได้ทำศึกษาปริมาณน้ำตาล 3 ระดับ คือร้อยละ 2.4 2.2 และ 2.0 ของสูตรผลิตภัณฑ์ ปริมาณเกลือร้อยละ 1.0 1.2 และ 1.4 ของสูตรผลิตภัณฑ์ แล้วนำผลิตภัณฑ์มาทดสอบทางประสาทสัมผัส ในคุณลักษณะทางด้านรสหวาน รสเค็ม และความชอบรวม ผลการทดลองดังตารางที่ 3 เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ ของคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านรสหวาน รสเค็ม และความชอบรวม

โดยกำหนดให้ X คือ ปริมาณเกลือ และ Y คือ ปริมาณน้ำตาล ได้ดังสมการที่ ดังนี้

รสหวาน $= -15.14 - 15.44X + 29.4Y + 4.08X^2 + 1.06XY - 6.80Y^2$ ($R^2 = 0.977$)

รสเค็ม $= -97.89 - 12.95X + 102.78Y - 2.54X^2 + 8.13XY - 25.42Y^2$ ($R^2 = 0.974$)

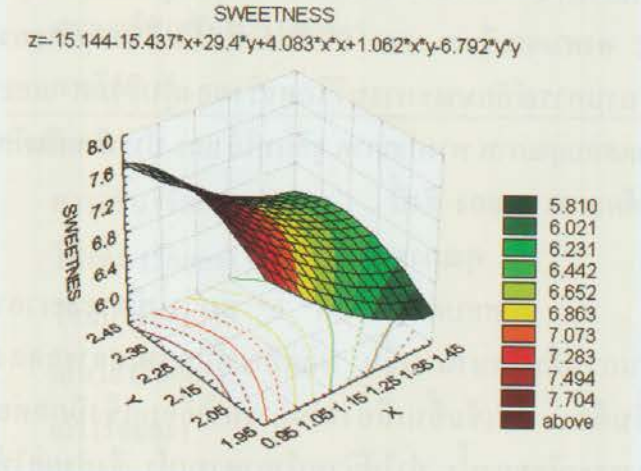
ความชอบรวม $= -34.55 + 2.24X + 36.97Y - 6.5X^2 + 8.13XY - 25.42Y^2$ ($R^2 = 0.952$)

สมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้ดังกล่าวนำไปสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม โดยกำหนดให้คะแนนความชอบของผลิตภัณฑ์ทั้งรสหวาน รสเค็ม และความชอบรวม สูงกว่า 7 คะแนน ได้สภาวะที่เหมาะสมคือมีปริมาณน้ำตาลร้อยละ 2.2 และเกลือร้อยละ 1.1 (รูปที่ 1 ถึง 3)

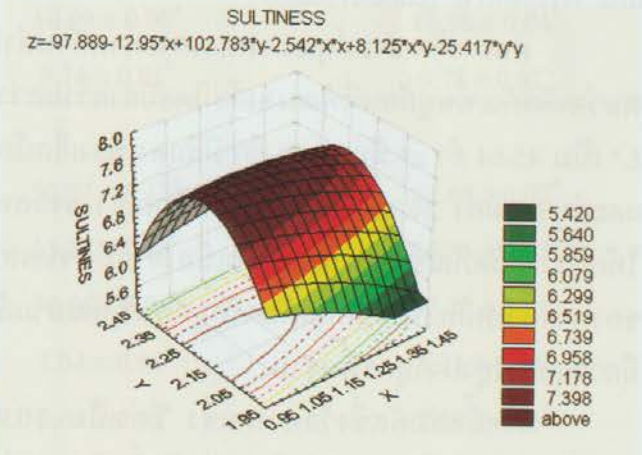
ตารางที่ 3 คะแนนความชอบรวมผลิตภัณฑ์หมูก้อนที่ได้รับการปรับปริมาณเกลือและน้ำตาล

สูตร	อัตราส่วน (%)		คุณลักษณะ		
	เกลือ	น้ำตาล	รสหวาน	รสเค็ม	ความชอบรวม
1	1.0	2.4	7.53 ± 0.68^{b}	6.47 ± 0.78^{c}	6.67 ± 0.55^{bc}
2	1.0	2.2	7.70 ± 0.45^{a}	7.53 ± 0.43^{a}	7.23 ± 0.43^{a}
3	1.0	2.0	7.17 ± 0.79^{c}	6.77 ± 0.94^{c}	6.77 ± 0.43^{bc}
4	1.2	2.4	6.63 ± 0.61^{de}	6.57 ± 0.73^{c}	6.73 ± 0.45^{bc}
5	1.2	2.2	6.73 ± 0.52^{d}	7.37 ± 0.89^{b}	7.03 ± 0.38^{b}
6	1.2	2.0	6.57 ± 0.50^{ef}	6.43 ± 0.50^{c}	6.77 ± 0.43^{bc}
7	1.4	2.4	6.30 ± 0.47^{f}	6.53 ± 0.51^{c}	6.53 ± 0.51^{c}
8	1.4	2.2	6.37 ± 0.49^{ef}	7.30 ± 0.84^{b}	6.53 ± 0.51^{c}
9	1.4	2.0	5.77 ± 0.43^{g}	5.53 ± 0.51^{d}	5.77 ± 0.43^{d}

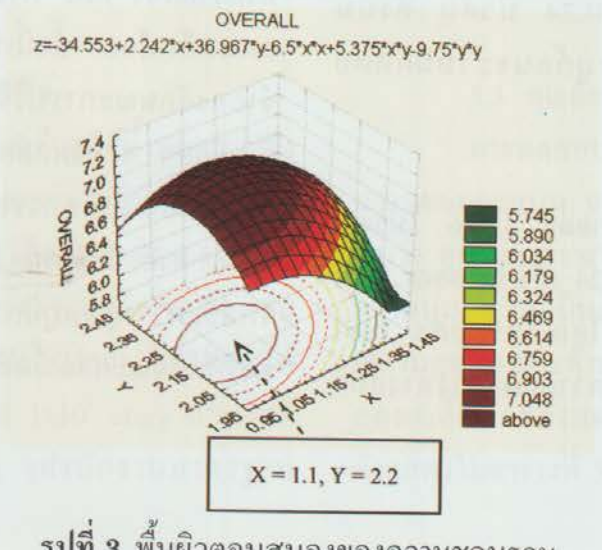
หมายเหตุ : ตัวอักษร a - f ที่ต่างกันหมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวตั้งมีความแตกต่างกัน ($p < 0.05$)



รูปที่ 1 พื้นผิวตอบสนองของรสหวาน



รูปที่ 2 พื้นผิวตอบสนองของรสเค็ม



รูปที่ 3 พื้นผิวตอบสนองของความชอบรวม

2. วิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์หมูก้อนที่พัฒนา

การวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์หมูก้อนที่พัฒนาแล้ว โดยนำมาทดสอบคุณภาพ ทางประสาทสัมผัส กายภาพ และเคมี และจุลินทรีย์ ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4

2.1 คุณภาพทางประสาทสัมผัส

ทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสวิธีหาอัตราความชอบคะแนน 9 ระดับ ใช้ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน พบว่า คะแนนความชอบรวมของผลิตภัณฑ์หมูก้อนที่พัฒนาแล้วมีคะแนนความชอบรวมอยู่ในระดับชอบมาก ซึ่งมีค่าเป็น 7.78 เมื่อเทียบกับสูตรพื้นฐานจะเห็นได้ว่าคะแนนความชอบรวมสูงกว่าสูตรพื้นฐาน

2.2 คุณภาพทางกายภาพ

การทดสอบคุณภาพด้านค่าสี *L* a* b** และค่าเนื้อสัมผัสแบบแรงกด โดยหาค่าความแข็ง (hardness) และ การยึดเกาะ (cohesiveness)

ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพด้านค่าสี พบว่าผลิตภัณฑ์หมูก้อนที่พัฒนาแล้ว โดยมีค่าความสว่าง *L** เป็น 45.64 ค่า *a** มีค่า 6.08 คือ มีสีแดงเพียงเล็กน้อย และค่า *b** มีค่า 24.28 คือมีความเป็นสีเหลือง จึงแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์มีสีน้ำตาลอ่อนเนื่องจากมีส่วนผสมของกากถั่วเหลืองทำให้ผลิตภัณฑ์หมูก้อนที่พัฒนาแล้วมีความสว่างสูงกว่าสูตรพื้นฐาน

ค่าเนื้อสัมผัสซึ่งวัดความแข็ง มีค่าเป็น 10.98 นิวตัน และค่าการยึดเกาะ มีค่าเป็น 0.78 นิวตัน ไม่แตกต่างกับผลิตภัณฑ์หมูก้อนสูตรพื้นฐานที่มีค่าความแข็ง 10.99 นิวตัน และ ค่าการยึดเกาะ 0.74 นิวตัน ดังนั้นการเติมกากถั่วเหลือง ในหมูก้อนจะไม่มีผลต่อค่าเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์

2.3 คุณภาพทางเคมี

ผลิตภัณฑ์มีความชื้นร้อยละ 52.46 โปรตีนร้อยละ 16.03 ไขมันร้อยละ 27.24 เส้นใยร้อยละ 1.21 เถ้าร้อยละ 2.39 และคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 0.67 เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการพัฒนามีความชื้น โปรตีน เส้นใยและคาร์โบไฮเดรตสูงกว่าผลิตภัณฑ์สูตรพื้นฐาน และมีปริมาณไขมันและเถ้าน้อยกว่าผลิตภัณฑ์สูตรพื้นฐาน

2.4 คุณภาพทางจุลินทรีย์

คุณภาพด้านจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์หมูก้อนผสมกากถั่วเหลืองที่พัฒนาแล้ว พบว่า ทั้งจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด และจำนวน ยีสต์ และรา น้อยกว่า 10 cfu/g (ค่าประมาณ) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผลิตภัณฑ์ (มผช.1362/2550) ผลิตภัณฑ์ทอดมันหมู (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2550)

3. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษา

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษาได้จากการนำผลิตภัณฑ์ไปแช่แข็งแบบเร็ว (plate freezer) หลังจากนั้นนำไปเก็บที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำไปแช่ที่ตู้เย็นมีอุณหภูมิ -2 องศาเซลเซียส นาน 8 สัปดาห์ ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์ลักษณะการบริโภคจริงของผู้บริโภค และทดสอบคุณภาพ ทางกายภาพ จุลินทรีย์ และ ประสาทสัมผัส ได้ผลการทดลอง ดังนี้

3.1 คุณภาพทางกายภาพ

ทดสอบค่าสี *L* a* b** พบว่า เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษานานขึ้น ผลิตภัณฑ์มีความสว่างลดลง นั่นคือ มีสีเข้มขึ้นเนื่องจากการแช่เยือกแข็งมีผลต่อการระเหิดของน้ำ ทำให้ผิวหน้าอาหารแห้ง จึงส่งผลให้สีเข้มขึ้น (วิไล รังสาดทอง, 2546) ทางด้านเนื้อสัมผัส ค่าความแข็ง และ การยึดเกาะ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีค่าลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะการเก็บเป็นการจำลองลักษณะการบริโภคจริง ในบางครั้งมีการเปิดตู้เย็นบ่อยๆ จะส่งผลต่ออุณหภูมิในตู้เย็นเปลี่ยนแปลงน้ำในผลิตภัณฑ์เกิดการละลายและเกิดผลึกน้ำแข็งใหม่ รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต (2535) กล่าวว่า การเกิดผลึกน้ำแข็งใหม่ระหว่างอุณหภูมิการเก็บที่ขึ้นๆ ลงๆ (fluctuation) ทำให้ลักษณะและเนื้อสัมผัสของอาหารไม่เป็นที่ต้องการ

ตารางที่ 4 คุณภาพทางประสาทสัมผัส กายภาพ และ เคมี ของผลิตภัณฑ์หมูก้อน

คุณภาพ	สูตรพื้นฐาน	สูตรที่พัฒนา
ทางประสาทสัมผัส (คะแนนความชอบ)		
สี	6.54 ± 1.3^{b}	7.61 ± 0.81^{a}
กลิ่นรส	7.64 ± 1.41^{a}	7.54 ± 0.68^{b}
รสหวาน	7.54 ± 1.21^{a}	7.32 ± 0.65^{b}
รสเค็ม	7.36 ± 1.14^{a}	7.28 ± 0.55^{a}
ความนุ่ม	7.22 ± 0.89^{b}	7.73 ± 0.87^{a}
ความเป็นเนื้อเดียวกัน	7.70 ± 1.15^{a}	7.55 ± 0.70^{b}
ความชอบรวม	7.66 ± 0.98^{b}	7.78 ± 0.74^{a}
ทางกายภาพ		
สี L^*	24.84 ± 0.03^{b}	45.64 ± 0.05^{a}
a^*	9.51 ± 0.11^{a}	6.08 ± 0.04^{b}
b^*	20.40 ± 0.15^{b}	24.28 ± 0.03^{a}
ความแข็ง (กรัม/ตารางเมตร)	10.99 ± 0.00^{a}	10.98 ± 0.04^{a}
การยึดเกาะ	0.74 ± 0.01^{b}	0.78 ± 0.02^{a}
ทางเคมี		
ความชื้น (ร้อยละ)	50.57 ± 0.12^{b}	52.46 ± 0.07^{a}
โปรตีน (ร้อยละ)	15.27 ± 0.08^{b}	16.03 ± 0.02^{a}
ไขมัน (ร้อยละ)	30.56 ± 0.24^{a}	27.24 ± 0.03^{b}
เส้นใย (ร้อยละ)	1.04 ± 0.01^{b}	1.21 ± 0.04^{a}
เถ้า (ร้อยละ)	2.48 ± 0.85^{a}	2.39 ± 0.05^{b}
คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)	1.12 ± 0.03^{b}	1.88 ± 0.02^{a}

หมายเหตุ : ตัวอักษร a - b ที่ต่างกันหมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวนอนมีความแตกต่างกัน ($p < 0.05$)

3.2 คุณภาพทางจุลินทรีย์

การทดสอบทั้งทางด้านจุลินทรีย์ทั้งหมด รวมถึงยีสต์ และรา ของผลิตภัณฑ์ พบว่า จุลินทรีย์ทั้งหมด 1.7x102 cfu/g (ค่าประมาณ) ยีสต์และรา 64 cfu/g (ค่าประมาณ) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ผลิตภัณฑ์ทอดมันหมู (มผช.1362/2550) ที่กำหนดให้จำนวน จุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกิน $1x10^3$ cfu/g ส่วนยีสต์และราไม่เกิน $5x10^2$ cfu/g (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2550)

3.3 คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส

การทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยวิธีหาอัตราความชอบคะแนน 9 ระดับ ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน พบว่า คุณลักษณะทางด้านสี กลิ่นรส รสหวาน รสเค็ม ความนุ่ม ความเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ยกเว้นคุณลักษณะด้านความชอบรวมมีคะแนนความชอบลดลงเล็กน้อยตั้งแต่สัปดาห์ที่ 4 ถึงสัปดาห์ที่ 8 ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ จุลินทรีย์ และ ประสาทสัมผัสของหมูก้อนผสมกากถั่วเหลือง

คุณภาพ\ระยะเวลา	2 สัปดาห์	4 สัปดาห์	6 สัปดาห์	8 สัปดาห์
ทางกายภาพ				
ค่าสี *L**	39.38 ± 0.07^{a}	32.68 ± 4.97^{b}	32.11 ± 0.05^{b}	29.98 ± 0.02^{b}
*a**	8.62 ± 0.04^{c}	8.82 ± 0.04^{b}	9.00 ± 0.04^{a}	8.47 ± 0.04^{c}
*b**	19.68 ± 0.09^{a}	16.59 ± 0.23^{b}	14.95 ± 0.05^{c}	12.76 ± 0.04^{d}
เนื้อสัมผัส ความแข็ง (g/mm^2)	10.61 ± 0.05^{b}	10.80 ± 0.05^{a}	10.48 ± 0.01^{c}	10.28 ± 0.03^{d}
การยึดเกาะ	0.77 ± 0.01^{a}	0.78 ± 0.01^{a}	0.78 ± 0.00^{a}	0.59 ± 0.01^{b}
ทางประสาทสัมผัส (คะแนนความชอบ)				
สี ^{ns}	6.93 ± 0.78	7.16 ± 0.86	7.10 ± 0.71	7.00 ± 0.64
กลิ่นรส ^{ns}	7.30 ± 0.79	7.16 ± 0.79	7.20 ± 0.76	7.36 ± 0.61
รสหวาน ^{ns}	7.03 ± 0.66	6.83 ± 0.79	6.63 ± 0.66	6.63 ± 0.71
รสเค็ม ^{ns}	7.26 ± 0.76	7.16 ± 0.72	7.23 ± 0.66	7.16 ± 0.72
ความนุ่ม ^{ns}	7.47 ± 0.89	7.43 ± 0.89	7.28 ± 0.73	7.23 ± 0.71
ความเป็นเนื้อเดียวกัน ^{ns}	7.40 ± 0.75	7.36 ± 0.66	7.26 ± 0.52	7.23 ± 0.50
ความชอบรวม	7.68 ± 0.77^{a}	7.36 ± 0.63^{b}	7.23 ± 0.49^{b}	7.26 ± 0.63^{b}

หมายเหตุ: a และ d ที่ต่างกันหมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวนอนมีความแตกต่างกัน ($p < 0.05$) ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกัน ($p < 0.05$)

4. การทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค

การทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์หมูก้อนโดยทำการสำรวจตัวอย่างจำนวน 100 พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง มีอายุระหว่าง 20-30 ปี การศึกษาส่วนใหญ่อยู่ในระดับปริญญาตรี เป็นนักเรียน/นักศึกษา และมีรายได้น้อยกว่า 5,000 บาท ผู้บริโภคส่วนใหญ่เคยรับประทานหมูก้อนทอดร้อยละ 83 ปัจจัยที่มีผลต่อการรับประทานหมูก้อนมากที่สุด คือ รสชาติอร่อยร้อยละ 71

ผู้บริโภคยอมรับผลิตภัณฑ์ร้อยละ 99 และสนใจซื้อผลิตภัณฑ์ร้อยละ 95 เหตุผลที่ซื้อมากที่สุด คือ มีความแปลกใหม่ร้อยละ 57 รองลงมา คือ รสชาติอร่อยร้อยละ 54 และมีคุณค่าทางโภชนาการร้อยละ 44 ผู้ตอบแบบสอบถามไม่ซื้อผลิตภัณฑ์ร้อยละ 5 ให้เหตุที่ไม่ซื้อผลิตภัณฑ์ว่า ไม่ชอบรับประทานถั่วเหลือง

สรุป

ผลิตภัณฑ์หมูก้อนผสมกากถั่วเหลือง สามารถใช้กากถั่วเหลืองทดแทนการใช้หมูและมันหมูในสูตรพื้นฐานได้ร้อยละ 40 ของน้ำหนักหมูที่ใช้ สูตรผลิตภัณฑ์ที่ได้ ประกอบด้วยเนื้อหมูร้อยละ 28.8 กากถั่วเหลืองร้อยละ 24.1 มันหมู ร้อยละ 7.2 แป้งมันร้อยละ 3.3 ไข่ไก่ร้อยละ 10.0 กระเทียมร้อยละ 3.3 พริกไทยเม็ดร้อยละ 1.7 ลูกผักชีร้อยละ 0.8 น้ำตาลร้อยละ 2.2 เกลือร้อยละ 1.1ซีอิ๊วขาวร้อยละ 2.4 และเกล็ดขนมปังร้อยละ 15.0 ผลิตภัณฑ์หมูก้อนทอดที่มีส่วนผสมของกากถั่วเหลืองมีความสว่างสูงกว่าหมูก้อนสูตรพื้นฐาน เนื้อสัมผัสด้านความแข็ง และค่าการเกาะตัวใกล้เคียงกับหมูก้อนสูตรพื้นฐาน ทางด้านคุณภาพทางเคมี ผลิตภัณฑ์หมูก้อนที่มีการใช้กากถั่วเหลืองมีโปรตีนสูงกว่าสูตรพื้นฐาน และมีไขมันน้อยกว่าสูตรพื้นฐาน โดยองค์ประกอบทางเคมี

ประกอบด้วย ความชื้นร้อยละ 52.46 โปรตีนร้อยละ 16.03 ไขมัน ร้อยละ 27.24 เส้นใยร้อยละ 1.21 เถ้าร้อยละ 2.39 และคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 1.88 ผู้บริโภคยอมรับผลิตภัณฑ์ร้อยละ 99 และสนใจซื้อผลิตภัณฑ์ร้อยละ 95

การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ -2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ พบว่า ผลิตภัณฑ์ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ทั้งทางด้านกายภาพ จุลินทรีย์ และประสาทสัมผัส

เอกสารอ้างอิง

นิรนาม. (2551). U can cook Thai [online]. Available: http://www.ucancookthai.com/language-english/thai-recipes/deep-fried/content-ground-pork-df.htm [8 กรกฎาคม 2551].

ยุพร พืชกมุทร และ กานดา แซ่จิว. (2548). การใช้ประโยชน์จากโอคาราเพื่อทดแทนแป้งสาลีในคุ้กกี้เนย. วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง. 13(3): 30 - 38.

ยุพร พืชกมุทร. (2550). การใช้ประโยชน์จากกากถั่วเหลือง. วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง. 15(2): 34 - 41.

รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. (2535). วิศวกรรมแปรรูปอาหาร: การถนอมอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 1 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ โอเดียนสโตร์. หน้า 120 -157.

วิไล รังสาดทอง. (2546). เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 3. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. กรุงเทพฯ : บริษัทเท็กซ์แอนด์เจอร์นัลพับลิเคชั่น จำกัด. 500 หน้า

สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร. (2527). ถั่วเหลืองและการใช้ประโยชน์ในประเทศไทย. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 9-39

สุรพล อุปดิสสกุล. (2537). สถิติการวางแผนการทดลองเล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ.

สมชาย ประภาวัตร. (2524). ผลิตภัณฑ์อาหารถั่วเหลืองที่เหมาะสม. วารสารอาหาร. 13(3): 160-163.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2550). มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ทอดมันหมู (มผช.1362/2550). กรุงเทพฯ.

AOAC. (1995). The association of analysis chemists, official method of analysis.16th edition. Arlington, Virginia,

Meilgaard, M., G. V., Civille, and B. T., Carr. (1999). Sensory Evaluation Techniques. 3rd ed., Boca Raton. Florida: CRC Press LLC.

ว.วิทย. มข. 38(1) 124-132 (2553) KKU Sci. J.38(1) 124-132 (2010)

ประสิทธิภาพของน้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพรในการฆ่าไรดีด *Formicomotes heteromorphus* Magowski โดยวิธีการสัมผัส

Effectives of Essential Oils of Medicinal Plants Against Mushroom Mite, *Formicomotes heteromorphus* Magowski by Residual Contact Method

จรงค์ศักดิ์ พุมนวน[1] พิฆเนศ รองพล[1] และอำมร อินทร์สังข์[1]*

บทคัดย่อ

จากการทดสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพร 29 ชนิด ต่อไรดีด (*Formicomotes heteromorphus* Magowski) โดยวิธีการสัมผัสในหลอดแก้วปลายเปิดและปิดด้วยตาข่ายไนลอนทั้งสองข้าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 เซนติเมตร ยาว 3 เซนติเมตร ทดสอบเบื้องต้น ที่ความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหย 0 (เอทานอล 95%) และ 1.5% (99 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร) โดยใช้ปริมาตร 25 ไมโครลิตร ตรวจนับอัตราการตายที่ 12 และ 24 ชั่วโมง พบว่าน้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพร 10 ชนิด มีประสิทธิภาพในการฆ่าไรดีดได้มากกว่าร้อยละ 90 ที่ 12 ชั่วโมง และฆ่าไรดีดได้ร้อยละ 100 ที่ 24 ชั่วโมงได้แก่ กานพลู (*Syzygium aromaticum*) เปลือกหุ้มเมล็ดพริกไทยดำ (*Piper nigrum*; seed kernel) เนื้อเมล็ดพริกไทยดำ (*P. nigrum*; seed) ตะไคร้หอม (*Cymbopogon nardus*) ตะไคร้บ้าน (*Cymbopogon citratus*) ขมิ้นชัน (*Curcuma longa*) อบเชย (*Cinnamomum bejolghota*) มะนาว (*Citrus aurantifolia*) โหระพา (*Ocimum basilicum*) และ ไพล (*Zingiber cassumunas*) และเมื่อนำมาทดสอบต่อที่ความเข้มข้น 0 0.001 0.005 0.01 0.05 0.1 0.5 1.0 และ 1.5% (ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร) พบว่าน้ำมันหอมระเหยจากกานพลูมีประสิทธิภาพในการฆ่าไรดีดดีที่สุดโดยมีค่า LD_{50} เท่ากับ 2.154 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร รองลงมาคือน้ำมันหอมระเหยจากเมล็ดพริกไทยดำที่สกัดจากเปลือก เมล็ดพริกไทยดำที่สกัดจากเนื้อ ตะไคร้บ้าน ตะไคร้หอม ขมิ้นชัน อบเชย มะนาว โหระพา และไพลโดยมีค่า LD_{50} เท่ากับ 2.405 2.428 2.555 2.918 5.665 6.855 11.017 15.942 และ 22.244 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

[1] คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

* Corresponding Author, E-mail: kpjarong@kmitl.ac.th

Abstract

Acaricidal activitity of essential oils obtained from 29 selected medicinal plants against mushroom mite, *Formicomotes heteromorphus* Magowski was investigated by using residual contact method. The bioassay was done in a glass tube, 0.4 cm in diameter and 3 cm long and covered with fine nylon mesh on both ends. The preliminary tests were 1.5% (99 $\mu g/cm^2$) of various essential oils and 95% ethanol was used as the control and each glass tube was treated internally with 25 µl essential oils. Observations were made at 12 and 24 hrs after treatment and the number of dead mites was recorded. The results presented that at the dose of 1.5% (99 $\mu g/cm^2$), essential oils of clove (*Syzygium aromaticum*), seed kernel and seed of black pepper (*Piper nigrum*), lemon grass (*Cymbopogon citratus*), citronella grass (*Cymbopogon nardus*), turmeric (*Curcuma longa*), cinnamon (*Cinnamomum bejolghota*), lemon (*Citrus aurantifolia*), sweet basil (*Ocimum basilicum*) and cassumunas ginger (*Zingiber cassumunar*) were highly toxic to *F. heteromorphus*. Therefore, more than 90 and 100% mite mortality were observed at 12 and 24 hrs, respectively. Dry film effect of those essential oils at various concentrations (0, 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0 and 1.5% equaling to 0, 0.066, 0.33 0.66, 3.3, 6.6, 33, 66 and 99 $\mu l/cm^2$, respectively) was further investigated by the same way, mortalities of mites were observed at 12 hrs. Based upon 12 hrs LD_{50} values, the essential oil of clove was the most toxic to the mites in which presented high activity of 2.154 $\mu g/cm^2$, followed by essential oils of kernel of black pepper, seed of black pepper, lemon grass, citronella grass, turmeric, cinnamon, lemon, sweet basil and cassumunas ginger showed of 2.405, 2.428, 2.555, 2.918, 5.665, 6.855, 11.017, 15.942 and 22.244 $\mu g/cm^2$, respectively.

คำสำคัญ: น้ำมันหอมระเหย ไรดีด วิธีการสัมผัส

Keywords: Essential Oil, *Formicomotes heteromorphus*, Residual contact method

คำนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการปรับปรุงและพัฒนาการเพาะเห็ดอย่างมาก จนกลายเป็นอาชีพหลักที่สำคัญของเกษตรกรอีกอาชีพหนึ่ง ซึ่งประเทศไทยมีผลผลิตเห็ดปีละประมาณ 120,000 ตัน คิดเป็นมูลค่าประมาณ 7,014 ล้านบาท ในการผลิตนี้ยังก่อให้เกิดธุรกิจติดตามหมุนเวียนอีกมากมาย มูลค่าไม่ต่ำกว่า 12,000 ล้านบาท โดยเห็ดสกุลนางรมมีปริมาณการผลิตประมาณ 20% ของเห็ดทั้งหมด (ชาญยุทธ์ ภาณุทัต, 2551) เห็ดนางรมฮังการีเป็นเห็ดนางรมสายพันธุ์หนึ่งที่เกษตรกรนิยมเพาะกันมาก เนื่องจากเป็นเห็ดที่ให้ผลผลิตเร็วกว่าเห็ดชนิดอื่น ราคาดี เป็นที่ต้องการของตลาด นอกจากนี้จากการวิเคราะห์แนวโน้มของการบริโภคเห็ดในตลาดโลก พบว่าความนิยมการบริโภคเห็ดที่มีแหล่งกำเนิดจากโลกตะวันออกเพิ่มสูงขึ้น ทำให้มีการผลิตเห็ดสกุลนางรมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี (ศิริพร หัสสรังสี และคณะ, 2551) อย่างไรก็ตามการเพาะเห็ดยังคงประสบปัญหาการเข้าทำลายของศัตรูหลายชนิด ได้แก่โรคศัตรูเห็ดที่เกิดจากเชื้อรา แบคทีเรีย ไวรัส และแมลงศัตรูเห็ดที่สำคัญ ได้แก่ หนอนผีเสื้อกินเห็ด หนอนแมลงวันเซียริด แมลงหวี่เห็ด และแมลงหางดีด นอกจากนี้ยังมีศัตรูอีกชนิดหนึ่งที่สำคัญมาก คือ ไรดีด *Formicomotes heteromorphus* Magowski (เทวินทร์ กุลปิยะวัฒน์ และคณะ, 2551) ซึ่งจัดเป็นไรที่มีขนาดเล็ก ตัวเต็มวัยเพศเมียระยะก่อนท้องมีลำตัวขาวใส ความยาวเฉลี่ย 0.103 มิลลิเมตร กว้าง 0.058 มิลลิเมตร หัวท้ายมนขาสั้น อวัยวะส่วนปากยื่นโผล่ออกจากส่วนของลำตัว

เล็กน้อยท้ายสุดของลำตัวจะมีขนเส้นใหญ่ยาวและแข็งแรง 1 คู่ ขนนี้มีส่วนช่วยในการดีดตัวของไรชนิดนี้ ตัวเต็มวัยระยะตั้งท้อง มีลักษณะส่วนท้องขยายพองออกเป็นหลอดยาว สีขาวขุ่นเกาะติดแน่นอยู่กับวัสดุเพาะและที่ถุงพลาสติก สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (วัฒนา จารณศรี และคณะ, 2529) ไรชนิดนี้ชอบทำลายเส้นใยเห็ดในขั้นตอนต่างๆ ของการเพาะเห็ด ไรดีดทำลายเส้นใยเห็ดทำให้เส้นใยเห็ดสีขาวที่เดินเต็มถุงแล้วฝ่อไป เหลือแต่วัสดุที่ใช้เพาะซึ่งเป็นก้อนขี้เลื่อยสีน้ำตาลแดง ซึ่งชาวบ้านมักเรียกไรชนิดนี้ว่าไรแดง การเข้าทำลายของไรดีดส่งผลให้เห็ดไม่สามารถให้ดอกได้ ความเสียหายรุนแรงมากจนมีผลให้เกษตรกรบางรายต้องเลิกกิจการไป และหากไรเข้าทำลายในระยะเปิดดอกจะทำให้ดอกเห็ดแคระแกรนไม่สามารถจำหน่ายได้ (เทวินทร์ กุลปิยะวัฒน์ และคณะ, 2546)

การป้องกันไรศัตรูเห็ดโดยใช้สารเคมีเป็นวิธีการที่เกษตรกรนิยมใช้ เนื่องจากสะดวกและได้ผลดี แต่ก็สามารถกระทำได้อย่างจำกัด คือไม่สามารถพ่นสารเคมีได้ขณะเปิดดอกเห็ด และเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค เกษตรกร และสภาพแวดล้อมโดยตรง รวมถึงแนวโน้มการเกิดความต้านทานต่อสารเคมีของไร

การใช้พืชสมุนไพรที่มีคุณสมบัติของการเป็นสารกำจัดไรศัตรูพืชจึงเป็นแนวทางเลือกที่น่าสนใจ จากการศึกษาของ Pumnuan และคณะ (2008) พบว่าสารสกัดหยาบจากกานพลู และอบเชย มีประสิทธิภาพในการกำจัดไรไข่ปลา *Luciaphorus perniciosus* และไรดีด *F. heteromorphus* ในห้องปฏิบัติการ นอกจากนั้น Insung และคณะ (2008) ได้พบว่าสารสกัดหยาบจากพืชป่าบางชนิด ได้แก่ ตะไคร้ต้น เสม็ด และหมีบัง มีประสิทธิภาพในการกำจัดไรศัตรูเห็ดทั้งสองชนิดข้างต้นอีกด้วย ส่วน พิฆเนศ รองพล และคณะ (2552) ได้ทดลองใช้น้ำมันหอมระเหยจากตะไคร้หอม พริกไทยดำ ตะไคร้บ้าน กานพลู ส้มโอ และขมิ้นชัน ในการฆ่าไรไข่ปลา *L. perniciosus* โดยวิธีการรม พบว่ามีประสิทธิภาพดีมากในห้องปฏิบัติการ

ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของน้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพรชนิดต่างๆ ที่คาดว่ามีผลในการกำจัดไรดีด *F. heteromorphus* ซึ่งจะเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำน้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพรไปพัฒนาและปรับใช้ในการควบคุมไรศัตรูเห็ดทดแทนสารเคมีในสภาพฟาร์มต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

วิธีการเลี้ยงไร

เตรียมการขยายเชื้อเห็ด โดยใช้เมล็ดข้าวฟ่างแช่น้ำ 12 ชั่วโมง ล้างน้ำให้สะอาดแล้วนำมานึ่งจนเมล็ดสุก ผึ่งให้แห้งพอหมาดๆ ในร่ม บรรจุลงขวดแก้วขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร ในอัตรา 50 กรัม/ขวด และนำไปอบฆ่าเชื้อใน autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 psi เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทิ้งไว้ให้ขวดแก้วเย็นที่อุณหภูมิห้อง ทำการเขี่ยเชื้อเห็ดนางรมฮังการี *Pleurotus ostreatus* (Jacq. Fr.) Kummer ลงไปในขวดข้าวฟ่างที่ทำการฆ่าเชื้อเรียบร้อยแล้ว ทิ้งไว้ 7-9 วัน เมื่อเห็นเส้นใยเชื้อเห็ดเจริญเติบโตครอบคลุมทั่วเมล็ดข้าวฟ่าง จึงปล่อยไรดีดระยะก่อนท้องประมาณ 100 ตัวต่อขวด นำไรรุ่นที่สองระยะก่อนท้องมาทดสอบกับน้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพร

การสกัดน้ำมันหอมระเหย

พืชสมุนไพรที่ใช้ในการทดลองเพื่อกำจัดไรดีด *F. heteromorphus* มีจำนวน 29 ชนิด (ตารางที่ 1) การคัดเลือกพืชที่นำมาใช้ทดลอง ใช้วิธีศึกษาผลงานวิจัยและเอกสารทางวิชาการที่มีการนำพืชสมุนไพรมาใช้ทดสอบประสิทธิภาพกับไรชนิดอื่น หรือแมลงศัตรูพืชอื่นๆ นำพืชสมุนไพรแต่ละชนิดมาสกัดน้ำมันหอมระเหยด้วยเครื่องสกัดน้ำมันด้วยวิธีการกลั่นโดยใช้น้ำ (water distillation) โดยเติมน้ำให้พอท่วม ต้มจนเดือดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ไขส่วนที่เป็นน้ำมันหอมระเหยเก็บไว้ในภาชนะทึบแสง ในตู้เย็นอุณหภูมิ 12 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการทดสอบกับไรต่อไป

การทดสอบโดยวิธีการสัมผัส

การทดสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพรแต่ละชนิดและแต่ละความเข้มข้นกับไรดีด *F. heteromorphus* โดยวิธีการสัมผัส วางแผนการทดลองแบบ completely randomized design (CRD) จำนวน 30 ซ้ำการทดลอง ทำการทดสอบเบื้องต้นโดยหยดสารละลายน้ำมันหอมระเหยจากพืชความเข้มข้น 1.5% ปริมาตร 25 ไมโครลิตรที่ละลายใน 95% เอทานอลในหลอดแก้วปลายเปิดทั้งสองด้านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.4 เซนติเมตร ยาว 3 เซนติเมตร แล้วกลิ้งหลอดแก้วเพื่อให้น้ำมันหอมระเหยได้เคลือบหลอดแก้วด้านใน จะได้ปริมาณสาร 99 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร เขี่ยไรดีดจำนวน 10 ตัว ลงในหลอดแก้ว ปิดปลายหลอดแก้วด้วยผ้าขาวบาง ตรวจนับอัตราการตายที่ 12 และ 24 ชั่วโมง คัดเลือกน้ำมันหอมระเหยที่มีประสิทธิภาพในการฆ่าไรดีดที่ได้มากกว่าร้อยละ 90 ใน 12 ชั่วโมง มาทำการทดสอบต่อที่ความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหย 0 0.001 0.005 0.01 0.05 0.1 0.5 1 และ 1.5% (0 0.066 0.33 0.66 3.3 6.6 33 66 และ 99 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร) ตามลำดับ ตรวจนับอัตราการตายที่ 12 ชั่วโมง

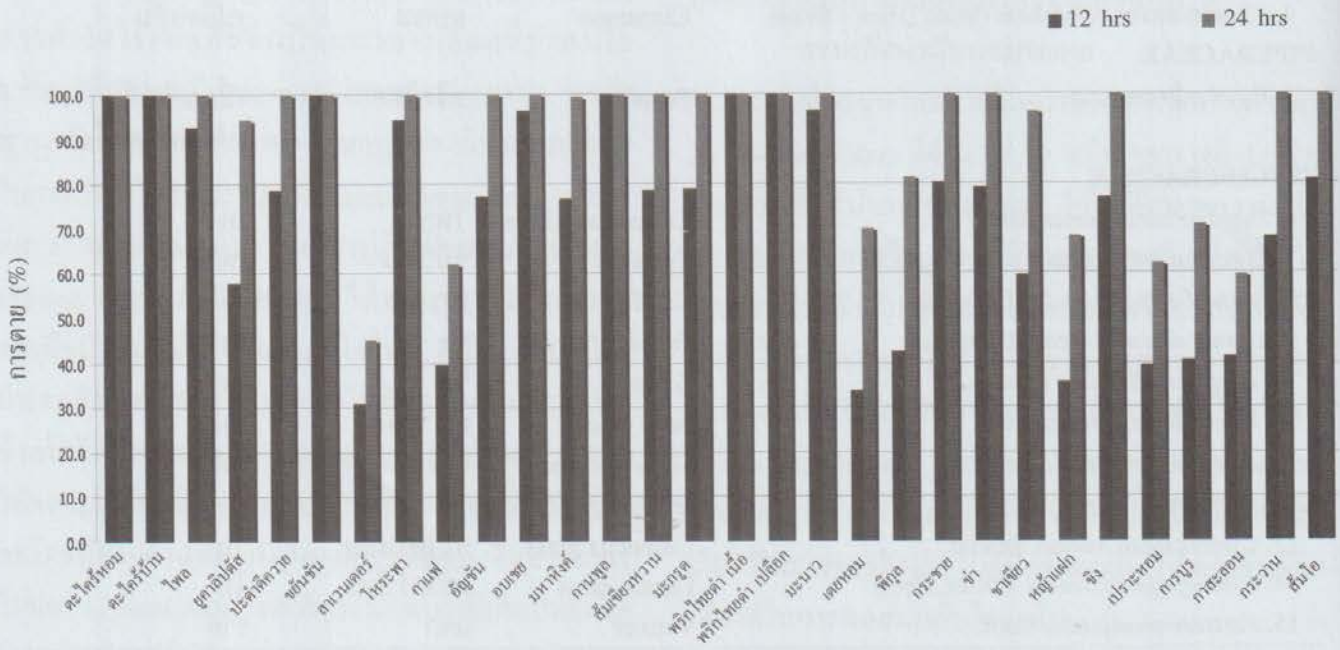
การหาความแตกต่างทางสถิติของค่าเฉลี่ย

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SAS (statistical analysis system) โดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธีการ DMRT (Duncan's Multiple Range Test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และหาค่า Median Lethal Dose (LD_{50}) ของน้ำมันหอมระเหยโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS probit analysis

ตารางที่ 1 น้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพรที่ใช้ในการทดลองเพื่อกำจัดไรดีด *Formicomotes heteromorphus* Magowski

วงศ์ / ชื่อวิทยาศาสตร์	ชื่อสามัญ	ชื่อภาษาไทย	ส่วนของพืชที่ใช้
MYRTACEAE			
1. *Syzygium aromaticum* (L.) Merr.&L.M. Perry	Clove	กานพลู	ช่อดอก
2. *Eucalyptus globulus* Labill.	Blue gum	ยูคาลิปตัส	ใบ
LAURACEAE			
3. *Cinnamomum camphora* (L.) J.S. Presl	Camphor tree	การบูร	เปลือกต้น
4. *Cinnamomum bejolghota* (Buch.-Ham.) Sweet	Cinnamon	อบเชย	เปลือกต้น
PIPERACEAE			
5. *Piper nigrum* Linn.	Pepper	พริกไทย	เนื้อเมล็ด เปลือกหุ้มเมล็ด
ZINGIBERACEAE			
6. *Zingiber cassumunar* Roxb	Cassumunar ginger	ไพล	เหง้า
7. *Curcuma longa* Linn.	Turmeric	ขมิ้นชัน	เหง้า
8. *Boesenbergia rotunda* (L.) Mansf.	Krachai	กระชาย	เหง้า
9. *Alpinia nigra* (Gaertn.) Burtt	Galanga	ข่า	เหง้า
10. *Zingiber officinale* Roscoe	Ginger	ขิง	เหง้า
11. *Kaempferia galanga* Linn.	Sand ginger	เปราะหอม	เหง้า
12. *Amomum krervanh* Pierre	Siam cardamom	กระวาน	เมล็ด
GRAMINEAE			
13. *Cymbopogon nardus* Rendle.	Citronella grass	ตะไคร้หอม	ใบ
14. *Cymbopogon citratus* (Dc.ex.Nees)	Lemon grass	ตะไคร้บ้าน	ใบ
15. *Vertiver zizanioides* Stapf.	Vetiver	แฝก	ราก

วงศ์ / ชื่อวิทยาศาสตร์	ชื่อสามัญ	ชื่อภาษาไทย	ส่วนของพืชที่ใช้
RUTACEAE			
16. *Citrus aurantifolia* Swing.	Lemon	มะนาว	ผิวเปลือก
17. *Citrus maxima* (Burm.) Merr.	Pummelo	ส้มโอ	ผิวเปลือก
18. *Citrus reticulate* Blanco	Tangerine	ส้มเขียวหวาน	ผิวเปลือก
19. *Citrus hystrix* DC.	Kaffir lime	มะกรูด	ผิวเปลือก
LABIATE			
20. *Ocimum basilicum* L.	Sweet basil	โหระพา	ใบ
SAPINDACEAE			
21. *Sapindus emarginatus* Wall.	Soap nut tree	มะคำดีควาย	เปลือกหุ้มเมล็ด
LAMIACEAE			
22. *Lavandula officinalis* Chaix	Lavender	ลาเวนเดอร์	ดอก
SAPOTAVEAE			
23. *Mimusops elengi* Linn.	Bakula	พิกุล	ดอก
RUBIACEAE			
24. *Coffee arabica* Linn.	Arabian coffee	กาแฟ	เมล็ด
LEGUMINOSAE			
25. *Clitoria ternatea* Linn.	Butterfly pea	อัญชัน	ดอก
UMBELLIFERAE			
26. *Ferula assa-foetida* Linn.	Asa-foetida	มหาหิงคุ์	เหง้า
PANDANACEAE			
27. *Pandunus odorus* Ridi	Screw pine	เตยหอม	ใบ
THEACEAE			
28. *Camellia sinensis* Linn.	Green tea	ชาเขียว	ใบ
BIGNONIACEAE			
29. *Millingtonai hortensis* L.f.	Cork tree	กาสะลอง	ดอก



รูปที่ 1 ร้อยละการตายของไรดิด *Formicomotes heteromorphus* Magowski หลังจากการสัมผัสน้ำมันหอมระเหยจากพืชชนิดต่างๆ ความเข้มข้น 1.5% (99 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร) ที่ 12 และ 24 ชั่วโมง

ผลการทดลอง

จากการทดสอบน้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพรเบื้องต้นทั้ง 29 ชนิด คือ ตะไคร้หอม ตะไคร้บ้าน ไพล ยูคาลิปตัส มะคำดีควาย ขมิ้นชัน ลาเวนเดอร์ โหระพา กาแฟ อัญชัน อบเชย มหาหิงคุ์ กานพลู ส้มเขียวหวาน มะกรูด เนื้อเมล็ดพริกไทยดำ เปลือกหุ้มเมล็ดพริกไทยดำ มะนาว เตยหอม พิกุล กระชาย ข่า ชาเขียว หญ้าแฝก ขิง เปราะหอม การบูร กาสะลอง กระวาน และส้มโอ ในการกำจัดไรดีด *F. heteromorphus* โดยวิธีการสัมผัส พบว่า น้ำมันหอมระเหยจากพืช 10 ชนิด ประกอบด้วย ตะไคร้หอม ตะไคร้บ้าน ไพล ขมิ้นชัน โหระพา อบเชย กานพลู เนื้อเมล็ดพริกไทยดำ เปลือกหุ้มเมล็ดพริกไทยดำ และมะนาว ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.5 (99 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร) มีประสิทธิภาพในการฆ่าไรดีดมากกว่าร้อยละ 90 และร้อยละ 100 ที่ 12 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ (รูปที่ 1)

เมื่อนำน้ำมันหอมระเหยจากพืชทั้ง 10 ชนิด มาทำการทดสอบกับไรดีดต่อที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 0.005 0.01 0.05 0.1 0.5 1.0 และ 1.5 (0 0.066 0.33 0.66 3.3 6.6 33 66 และ 99 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร) ตามลำดับ ตรวจนับเปอร์เซ็นต์การตายที่ 12 ชั่วโมง พบว่าเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น น้ำมันหอมระเหยพืชทั้ง 9 ชนิด สามารถฆ่าไรดีดได้สูงขึ้น น้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพรส่วนใหญ่ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.0 (66 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร) มีประสิทธิภาพในการฆ่าไรดีดได้มากกว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 (33 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร) ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แต่ทั้งสองความเข้มข้นมีประสิทธิภาพในการฆ่าไรดีดได้น้อยกว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.5 (99 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร) แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยน้ำมันหอมระเหยจากกานพลู เปลือกหุ้มเมล็ดพริกไทยดำ เนื้อเมล็ดพริกไทยดำ ตะไคร้บ้าน ตะไคร้หอม และขมิ้นชัน ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.5 (99 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร) สามารถฆ่าไรดีดได้ร้อยละ 100 ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ส่วนน้ำมันหอมระเหยจากอบเชย มะนาว โหระพา และไพล สามารถฆ่าไรดีดได้ร้อยละ 92.7-96.4 (ตารางที่ 2)

น้ำมันหอมระเหยจากกานพลูเนื้อเมล็ดพริกไทยดำ ตะไคร้หอม ตะไคร้บ้าน และอบเชย ที่ความเข้มข้น 0.5% (33 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร) สามารถฆ่าไรดีดได้ร้อยละ 95.0 94.7 93.0 90.7 และร้อยละ 90.0 ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ส่วนน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกเมล็ดพริกไทยดำ ขมิ้นชัน มะนาว ไพล และโหระพา สามารถฆ่าไรดีดได้ร้อยละ 87.7 87.3 83.0 77.0 และร้อยละ 73.0 ตามลำดับ และพบว่าน้ำมันหอมระเหยจากกานพลูมีประสิทธิภาพในการฆ่าไรดีดดีที่สุดโดยมีค่า LD_{50} เท่ากับ 2.154 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร รองลงมาคือน้ำมันหอมระเหยจากเมล็ดพริกไทยดำที่สกัดจากเปลือกเมล็ดพริกไทยดำที่สกัดจากเนื้อ ตะไคร้บ้าน ตะไคร้หอม ขมิ้นชัน อบเชย มะนาว โหระพา และไพลโดยมีค่า LD_{50} เท่ากับ 2.405 2.428 2.555 2.918 5.665 6.855 11.017 15.942 และ 22.244 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า น้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพรที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดไรดีด *F. heteromorphus* ได้แก่ กานพลู เปลือกหุ้มเมล็ดพริกไทยดำ เนื้อเมล็ดพริกไทยดำ ตะไคร้บ้าน และตะไคร้หอม มีประสิทธิภาพสูงในการฆ่าไรดีด คือมีค่า LD_{50} ที่ 12 ชั่วโมง น้อยกว่า 3.0 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร จากการศึกษาประสิทธิภาพของสารสกัดเมทธานอลจากผลอ่อนของพริกไทยดำ (พริกไทยเบา), *Piper nigrum* กับไรเหลืองส้ม *Eoteranychus cedanai* โดย Sornlek (2001) พบว่าสาร caryophyllene oxide มีฤทธิ์ดีที่สุด โดยมีค่า LD_{50} เท่ากับ 11.3 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร รองลงมาคือ caryohyllene และ piperine ซึ่งมีค่า LD_{50} เท่ากับ 22 และ 36.9 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ตามลำดับ นอกจากนั้นน้ำมันหอมระเหยจากพริกไทยดำทั้งที่แยกสกัดจากเปลือกหุ้มเมล็ดและเนื้อของเมล็ดพริกไทยดำ

ยังมีประสิทธิภาพในการฆ่า การไล่ และยับยั้งการวางไข่ของไรแดงแอฟริกัน, *Eutetranychus africanus* (Tucker) ศัตรูส้มอีกด้วย (จรงค์ศักดิ์ พุมนวน และคณะ, 2552) การศึกษาของ Pumnuan และคณะ (2008) เกี่ยวกับการใช้สารสกัดจากพืชสมุนไพรต่อไรดีด *F. heteromorphus* โดยวิธีการสัมผัส พบว่า สารสกัดจากกานพลูที่สกัดด้วย dichloromethane มีประสิทธิภาพในการกำจัดไรดีด คือมีค่า LD_{50} เท่ากับ 20.44 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร ขณะที่ Insung และคณะ (2008) ได้ใช้สารสกัดจากตะไคร้ต้น *Litsea cubeba* (Lour.) Pers. ที่สกัดด้วย hexane ในการกำจัดไรดีด พบว่ามีค่า LD_{50} เท่ากับ 27.99 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร ที่ 24 ชั่วโมง นอกจากนั้น พิฆเนศ รองพล และคณะ (2551) ได้ศึกษาผลของน้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพรต่อไรไข่ปลา *L. perniciosus* ซึ่งเป็นไรศัตรูเห็ดที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง โดยวิธีการสัมผัส พบว่า น้ำมันหอมระเหยจากกานพลู มีประสิทธิภาพในการฆ่าไรไข่ปลาได้ดีที่สุดโดยมีค่า LD_{50} เท่ากับ 0.468 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร รองลงมาคือพริกไทยดำและตะไคร้บ้าน โดยมีค่า LD_{50} เท่ากับ 0.645 และ 0.804 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และต่อมาพิฆเนศ รองพล และคณะ (2552) ได้ทดสอบต่อโดยวิธีการรม พบว่า น้ำมันหอมระเหยจากตะไคร้หอมมีประสิทธิภาพในการฆ่าไรไข่ปลาได้ดีที่สุดโดยมีค่า LD_{50} เท่ากับ 0.082 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร รองลงมาคือ พริกไทยดำ ตะไคร้บ้าน กานพลู ส้มโอ และขมิ้นชัน โดยมีค่า LD_{50} เท่ากับ 0.127 0.242 0.295 0.382 และ 0.538 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความเป็นไปได้มากที่จะมีการพัฒนาสูตรน้ำมันหอมระเหยจากพืชเพื่อการป้องกันกำจัดไรศัตรูเห็ด

อย่างไรก็ตามแม้น้ำมันหอมระเหยจากพืชหลายชนิดมีผลต่อไรศัตรูเห็ด แต่ก็ยังไม่พบหรือมีรายงานว่าสารสมุนไพรเหล่านั้นมีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อเห็ดหรือไม่ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาถึงผลจากการใช้น้ำมันหอมระเหยต่อประสิทธิภาพการให้ผลผลิตของเห็ดที่เพาะเลี้ยง นอกจากนี้ยังควรศึกษารูปแบบการใช้และอัตราการใช้ในสภาพฟาร์มเพิ่มเติมเช่นกัน

สรุป

น้ำมันหอมระเหยจากกานพลู เปลือกหุ้มเมล็ดพริกไทยดำ เนื้อเมล็ดพริกไทยดำ ตะไคร้บ้าน และตะไคร้หอม มีประสิทธิภาพในการกำจัดไรดีด *F. heteromorphus* โดยวิธีการสัมผัสได้ร้อยละ 100 ที่ 12 ชั่วโมง โดยมีค่า LD_{50} น้อยกว่า 3.0 ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร ที่ 12 ชั่วโมง น้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพรเหล่านี้จึงอาจสามารถนำไปพัฒนาและปรับปรุงสูตรเพื่อใช้ในการควบคุมไรดีดศัตรูเห็ดในอนาคตได้

เอกสารอ้างอิง

จรงค์ศักดิ์ พุมนวน วรเดช จันทรสร อำมร อินทร์สังข์ และพิฆเนศ รองพล. (2552). ผลของน้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพรผลของน้ำมันหอมระเหยจากพริกไทยดำ (*Piper nigrum* Linn.) ในการฆ่าไรแดงแอฟริกัน (*Eutetranychus africanus* (Tucker)) (Actinedida: Tetranychidae). วารสารเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 25(2): 169-176.

ชาญยุทธ์ ภาณุทัต. (2551). แนวทางในการตัดสินใจเลือกเพาะเห็ด. เห็ดไทย (2552). สมาคมนักวิจัยและเพาะเห็ดแห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ: หน้า 79-90

เทวินทร์ กุลปิยะวัฒน์ อัจฉรา พยัพพานนท์ วิภาดา วังศิลาบัตร มานิตา คงชื่นสิน พิเชฐ เชาน์วัฒนวงศ์ และพลอยชมพู กรวิภาสเรือง. (2551). การป้องกันกำจัดไรดีดในเห็ดนางรม. เห็ดไทย (2552). สมาคมนักวิจัยและเพาะเห็ดแห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ: หน้า 120-131.

เทวินทร์ กุลปิยะวัฒน์, วัฒนา จารณศรี และ ศุภนิตย์ หิรัญประดิษฐ์. (2546). การป้องกันกำจัดไรดีดในเห็ดนางรม. รายงานผลการค้นคว้าและวิจัยประจำปี 2546. กลุ่มกีฏและสัตววิทยา, สำนักวิจัยพัฒนาการอารักขาพืช, กรมวิชาการเกษตร.

พิฆเนศ รองพล จรงค์ศักดิ์ พุมนวน และอำมร อินทร์สังข์. (2551). ผลของน้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพรต่อไรไข่ปลา, *Luciaphorus perniciosus* Rack. การประชุมวิชาการ การนำเสนอผลงานวิจัย ระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 1 (28 สิงหาคม 2551) ณ สำนักบริหารวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

พิฆเนศ รองพล จรงค์ศักดิ์ พุมนวน และอำมร อินทร์สังข์. (2552). ผลของการรมน้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพรต่อไร ไข่ปลา, *Luciaphorus perniciosus* Rack. การประชุมพืชสวนแห่งชาติ ครั้งที่ 8 (6-9 พฤษภาคม 2552) ณ โรงแรมดิแอ็มเพรส จ.เชียงใหม่.

วัฒนา จารณศรี ฉัตรชัย ศฤงฆไพบูลย์ มานิตา คงชื่นสิน และนวลศรี วงศ์ศิริ. (2529). การศึกษาลักษณะทางอนุกรมวิธานของไรศัตรูเห็ดในประเทศไทย. รายงานผลการค้นคว้าและวิจัยประจำปี 2529. กลุ่มงานอนุกรมวิธานและวิจัยไร, กองกีฏและสัตววิทยา, กรมวิชาการเกษตร.

ศิริพร หัสสรังสี สุทัด ปินตาเสน และนารี จันทร์เขียว. (2551). การใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรบางชนิดในเขตภาคเหนือตอนบน เพื่อการเพาะเห็ดนางฟ้าภูฐาน เห็ดเป๋าฮื้อ และเห็ดนางรมฮังการี. เห็ดไทย 2551. สมาคมนักวิจัยและเพาะเห็ดแห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ: หน้า 38-46

Insung, A., Pumnuan, J. and Chandrapatya, A. (2008). Acaricidal activities of wild plant extracts against *Luciaphorus perniciosus* Rack (Acari: Pygmephoridae) and *Formicomotes heteromorphus* Magowski (Acari: Dolichocybidae). Systematic & Applied Acarology. 13: 188-194.

Pumnuan, J., Insung, A and Chandrapatya, A. (2008). Acaricidal effects of herd extracts on the mushroom mites, *Luciaphorus perniciosus* Rack and *Formicomotes heteromorphus* Magowski. Systematic & Applied Acarology. 13: 33-38.

Sornlek, S. (2001). Isolation of acaricidal constituents against the citrus yellow mite, *Eotetranychus cendanai* Rimando (Acarina: Tetranychidae) from undeveloped fruit of *Piper nigrum* L. M.S. Thesis. Mahidol University, Thailand.

ตารางที่ 2 ร้อยละการตายของไรดีด *Formicomotes heteromorphus* Magowski หลังจากการสัมผัสน้ำมันหอมระเหยจากพืชชนิดและความเข้มข้นต่างๆ ที่ 12 ชั่วโมง

น้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพร	เปอร์เซ็นต์การตาย[1/]											
	ความเข้มข้น (% (ไมโครกรัม/ตารางเซนติเมตร))									LD_{50}		
	0 (0.0)	0.001 (0.066)	0.005 (0.33)	0.01 (0.66)	0.05 (3.3)	0.1 (6.6)	0.5 (33.0)	1.0 (66.0)	1.5 (99.0)	LD_{50} ($\mu g/cm^2$)	slope	SE
กานพลู	0.0±0.0 G	34.7±9.0 abF	48.3±7.5 bcE	52.3±10.4 bD	79.7±11.0 aC	82.7±10.8 aC	95.0±5.1 aB	96.0±4.1 abB	100.0±0.0 aA	2.154	0.042	0.004
เมล็ดพริกไทยดำ (เปลือกหุ้มเมล็ด)	0.0±0.0 F	39.0±9.6 aE	57.3±4.5 aD	61.0±9.6 aD	67.0±18.2 bcdC	71.0±20.6 bC	87.7±10.4 bB	92.3±7.7 bB	100.0±0.0 aA	2.405	0.030	0.003
เมล็ดพริกไทยดำ (เนื้อเมล็ด)	0.0±0.0 H	31.0±16.5 bcG	51.7±5.9 abF	61.7±8.3 aE	68.7±10.1 bcdD	81.3±10.7 aC	94.7±6.3 aB	96.0±5.0 abAB	100.0±0.0 aA	2.428	0.041	0.004
ตะไคร้บ้าน	0.0±0.0 G	35.0±6.8 abF	52.0±8.5 abE	64.3±11.7 aD	70.0±15.1 bcC	72.0± 18.6 bC	90.7±6.4 abB	93.3±8.8 bB	100.0±0.0 aA	2.555	0.032	0.003
ตะไคร้หอม	0.0±0.0 G	38.3±12.6 aF	50.7±13.4 bE	50.0±7.9 bcE	70.7±11.7 bD	80.0±9.1 aC	93.0 ± 7.0 abB	100.0±0.0 aA	100.0±0.0 aA	2.918	0.064	0.007
ขมิ้นชัน	0.0±0.0 G	34.7±10.4 abF	49.7±7.2 bcE	53.3±7.1 bE	64.7±10.4 bcdD	66.3±13.5 bcD	87.3±9.4 bC	94.7±5.1 bB	100.0±0.0 aA	5.665	0.034	0.003
อบเชย	0.0±0.0 F	29.0±14.7 bcE	52.7±11.4 abD	55.0±9.4 bD	61.0±14.7 dC	63.0±11.2 cC	90.0±11.1 abB	92.0±7.6 bAB	96.4±5.2 bcA	6.855	0.026	0.002
มะนาว	0.0±0.0 F	25.7±16.3 cE	41.0±18.4 dD	45.3±10.7 cD	61.7±27.4 cdC	68.0±13.5 bcC	83.0±12.6 bB	87.7±10.4 cB	96.3±4.9 bA	11.017	0.025	0.002
โหระพา	0.0±0.0 G	30.7±9.1 bcF	44.0±2.2 cdE	45.3±7.8 cE	51.0±12.4 eD	61.0±9.6 cC	73.0±15.1 cB	78.0±16.9 dB	94.3±7.3 bcA	15.942	0.020	0.002
ไพล	0.0±0.0 G	17.0±12.1 dF	32.0±11.0 eE	35.3±15.7 dE	47.0±13.7 eD	54.0±13.8 dC	77.0±17.4 cB	80.0±12.7 dB	92.7±7.8 cA	22.244	0.022	0.002

[1/]อักษรพิมพ์ใหญ่เหมือนกันในแนวนอน และอักษรพิมพ์เล็กเหมือนกันในแนวตั้ง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ว.วิทย. มข. 38(1) 133-142 (2553) KKU Sci. J.38(1) 133-142 (2010)

แบบจำลองการไหลแบบหนืดที่ไม่อัดตัวโดยวิธีสมาชิกจำกัด

Simulation of Incompressible Viscous Flows by Finite Element Methods

อัจฉริยา นามไพร[1] และ สุพจน์ ไวท์ยางกูร[1]*

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ เป็นการเสนอการจำลองการไหลแบบหนืดที่ไม่อัดตัวภายใต้ระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ โดยวิธีสมาชิกจำกัด โดเมนที่ศึกษามีลักษณะเป็นช่องทางเปิดซึ่งประกอบด้วยทางที่ของไหลไหลเข้า 2 ทาง และทางที่ของไหลไหลออก 2 ทาง ซึ่งแต่ละโดเมนจะกำหนดค่าความหนืดให้แตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบลักษณะการไหล การคำนวณเชิงตัวเลขใช้โปรแกรม FlexPDE ในส่วนของผลลัพธ์ที่ได้แสดงด้วยภาพทิศทางการไหล ความเร็ววน ความเร็วของการไหล และการกระจายความดันของการไหล

Abstract

In this research, we present the Navier-Stokes equations for simulation of incompressible viscous flows, and we use finite element method to solve problem. The boundary domain is an open channel consisting of 2 inflow parts of domain and 2 outflow parts of domain. Each domain is assigned different viscosities to compare fluid appearance. We use FlexPDE program to calculate numerically. The solutions are illustrated by vectors, vorticities, velocities and fluid pressures.

คำสำคัญ : สมการนาเวียร์-สโตกส์ วิธีสมาชิกจำกัด การไหลแบบหนืดที่ไม่อัดตัว

Keywords : Navier-Stokes equation, Finite Element Method, Incompressible Viscous Flow

[1] ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

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

บทนำ

ปัญหาการไหลแบบหนืดที่ไม่อัดตัว (incompressible viscous flow) เป็นปัญหาที่ความหนืดมีผลต่อความเร็วการไหลและความหนาแน่นมีค่าคงที่ตลอดการไหล การอธิบายลักษณะการไหลนี้อาศัยการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย คือ สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equations) และการหาผลเฉลยแม่นตรงสำหรับปัญหาการไหลนี้ทำได้ยาก จึงได้นำวิธีสมาชิกจำกัด (finite element method) ซึ่งเป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขรูปแบบหนึ่งมาใช้วิเคราะห์หาผลเฉลยโดยประมาณ

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะการไหลแบบหนืดที่ไม่อัดตัวในสองมิติ ภายใต้ระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ ซึ่งมีช่องทางที่ของไหลไหลเข้าโดเมน 2 ช่องทาง และช่องทางที่ของไหลไหลออกจากโดเมน 2 ช่องทาง โดยใช้วิธีสมาชิกจำกัดด้วยโปรแกรม FlexPDE

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยสำหรับปัญหาการไหล

ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ใช้ในการคำนวณหาลักษณะการไหลแบบหนืดที่ไม่อัดตัวในสองมิติสามารถคำนวณได้จากระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ซึ่งประกอบด้วยสมการของการอนุรักษ์มวล (conservation of mass equation) และสมการอนุรักษ์โมเมนตัม (conservation of momentum equation) ในแนวแกน x และ y ดังนี้

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{1.1}$$

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \rho f_x \tag{1.2}$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \rho f_y \tag{1.3}$$

โดยที่

u	แทนความเร็วในแนวแกน x
v	แทนความเร็วในแนวแกน y
ρ	แทนความหนาแน่น
p	แทนความดัน
τ_{xx}	แทนความเค้นตั้งฉากในแนวแกน x
τ_{yy}	แทนความเค้นตั้งฉากในแนวแกน y
τ_{yx}	แทนความเค้นเฉือนในแนวแกน x
τ_{xy}	แทนความเค้นเฉือนในแนวแกน y
t	แทนเวลา
ρf_x	แทนแรงเนื่องจากน้ำหนักของของไหลในแนวแกน x
ρf_y	แทนแรงเนื่องจากน้ำหนักของของไหลในแนวแกน y

สำหรับของไหลแบบนิวโทเนียน (newtonian fluid) ซึ่งมีคุณสมบัติว่าค่าความเค้นแปรผันตรงกับการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว (velocity gradient) และเป็นปัญหาการไหลแบบไม่อัดตัว สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\tau_{xx} = 2\mu\frac{\partial u}{\partial x} \tag{2.1}$$

$$\tau_{yy} = 2\mu\frac{\partial v}{\partial y} \tag{2.2}$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right) \tag{2.3}$$

โดย μ แทนค่าความหนืดพลศาสตร์ (dynamic viscosity)

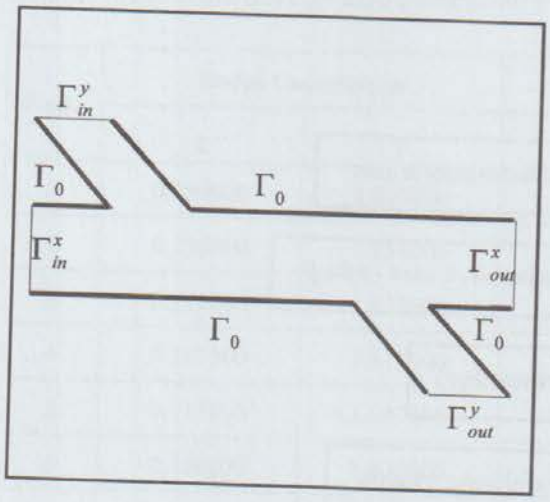
สำหรับการไหลแบบไม่อัดตัวในสองมิติหากละทิ้งแรงเนื่องจากน้ำหนักของของไหลภายใต้สถานะคงตัว ซึ่งสภาพการไหล ณ จุดใดจุดหนึ่งในของไหลคงที่ไม่เปลี่ยนตามเวลา และเมื่อแทนค่าความเค้นต่างๆ ที่อยู่ในรูปของความเร็วจากสมการ (2.1) - (2.3) ลงในสมการ (1.1) - (1.3) จะทำให้สมการนาเวียร์-สโตกส์ลดรูปลงเป็น

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{3.1}$$

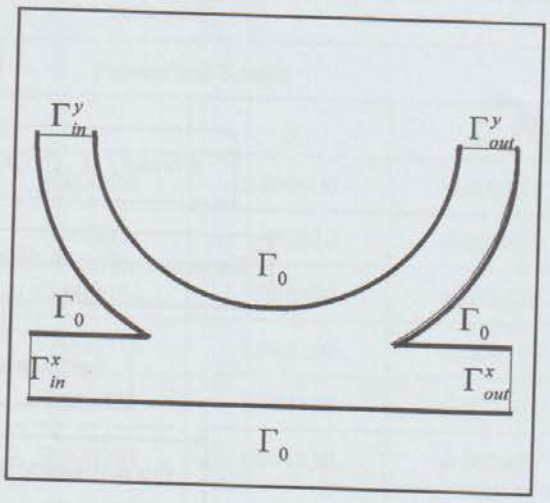
$$\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial p}{\partial x} = \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \tag{3.2}$$

$$\rho\left(u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial p}{\partial y} = \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \tag{3.3}$$

ระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ (3.1) - (3.3) นี้ประกอบด้วย 3 สมการ และตัวไม่ทราบค่า 3 ตัว คือ ความเร็ว ในทิศแกน x ความเร็ว v ในทิศแกน y และความดัน p ซึ่งการแก้ระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ (3.1) - (3.3) นี้ จำเป็นต้องแก้ควบคู่ไปกับเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา ซึ่งประกอบไปด้วย การกำหนดขอบเขตของการไหลเข้า (inflow) การกำหนดขอบเขตของผนังแบบหนืด (viscous wall) และการกำหนดขอบเขตของการไหลออก (outflow) ดังต่อไปนี้



(1)



(2)

รูปที่ 1 การกำหนดโดเมนที่ใช้ในการศึกษา

(1) โดเมนที่ 1

(2) โดเมนที่ 2

โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ดังนี้

$\Gamma_0 : u=v=0 , \frac{\partial p}{\partial \bar{n}}=0$ หมายถึงผนังของโดเมนซึ่งเป็นส่วนที่ของไหลไหลผ่านไม่ได้

$\Gamma_{in}^{x} : \frac{\partial u}{\partial \bar{n}}=0 , v=0 , p=p_0$ หมายถึงทางที่ของไหลไหลเข้าสู่โดเมนในแนวแกน x

$\Gamma_{in}^{y} : \frac{\partial v}{\partial \bar{n}}=0 , u=0, p=p_0$ หมายถึงทางที่ของไหลไหลเข้าสู่โดเมนในแนวแกน y

$\Gamma_{out}^{x} : \frac{\partial u}{\partial \bar{n}}=0 , v=0, p=0$ หมายถึงทางที่ของไหลไหลออกจากโดเมนในแนวแกน x

$\Gamma_{out}^{y} : \frac{\partial v}{\partial \bar{n}}=0 , u=0, p=0$ หมายถึงทางที่ของไหลไหลออกจากโดเมนในแนวแกน y

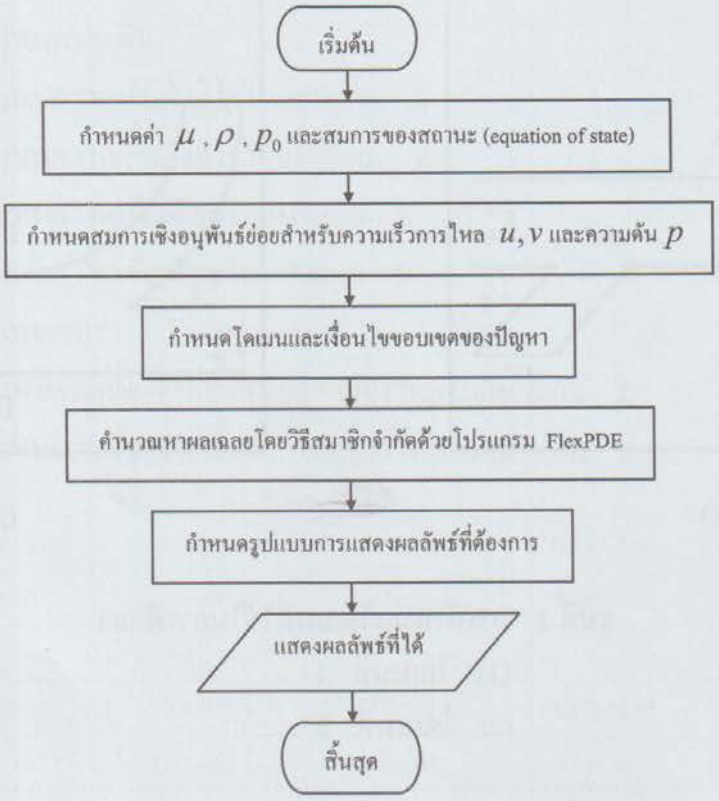
เมื่อ $\bar{n}$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับขอบของโดเมน

p_0 เป็นความดันบรรยากาศเริ่มต้น

2. วิธีสมาชิกจำกัดด้วยโปรแกรม FlexPDE

วิธีสมาชิกจำกัดมีหลักการคร่าว ๆ คือ เริ่มจากการแบ่งขอบเขตของปัญหาที่จะทำการวิเคราะห์ออกเป็นเอลิเมนต์ (elements) ย่อยๆ แล้วจึงเลือกฟังก์ชันการประมาณภายใน (interpolation function) เพื่อประมาณค่าของตัวไม่ทราบค่า (unknowns) คือความเร็วของการไหลและความดันบนเอลิเมนต์นั้นๆ และประดิษฐ์สมการสมาชิกจำกัด (finite element)ที่สอดคล้องกับสมการอนุพันธ์ของปัญหาโดยจะประดิษฐ์ให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ของแต่ละเอลิเมนต์ย่อย ๆ จากนั้นจึงนำเอลิเมนต์เมทริกซ์เหล่านี้มารวมกันเป็นระบบสมการ (system of equations) และประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม สุดท้ายจึงทำการแก้ระบบสมการเพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณของตัวไม่ทราบค่าเหล่านั้น

วิธีสมาชิกจำกัดด้วยโปรแกรม FlexPDE สำหรับปัญหาการไหลแบบหนืดที่ไม่อัดตัวมีกระบวนการทำงานดังนี้



ผลการวิจัย

ผลการคำนวณเชิงตัวเลขโดยใช้วิธีสมาชิกจำกัดด้วยโปรแกรม FlexPDE เมื่อกำหนดค่าความหนืดในแต่ละโดเมนให้แตกต่างกันคือ $\mu = 0.1$ และ $\mu = 10$ ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 1 แสดงผลเฉลยเชิงตัวเลขของความเร็ว ความดันและความเร็ววนที่ $\mu = 0.1$ ในโดเมนที่ 1

Node	Nodal Coordinates		Numerical Result			
	x	y	u	v	p	$curl$
1	0.250000	2.000000	0.000000	-0.041347	2.000000	-0.230797
2	0.250000	1.750000	0.000000	0.000000	1.982240	-0.393594
3	0.375000	1.875000	0.008251	-0.071471	1.986540	-0.280976
4	0.312500	1.812500	0.006547	-0.038837	1.983290	-0.337285
5	0.312500	1.937500	0.003303	-0.057902	1.994420	-0.255887
6	0.250000	1.875000	0.003479	-0.031154	1.991130	-0.312196
7	5.750000	-1.000000	0.000000	-0.038837	0.000000	0.202330
8	5.750000	-0.750000	0.000000	0.000000	0.017793	0.378369
9	5.625000	-0.875000	0.011237	-0.066696	0.013481	0.249748
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
804	0.750000	1.812500	0.037547	-0.152138	1.955700	0.134478
805	0.843750	1.906250	0.022287	-0.143461	1.972070	0.498178

ตารางที่ 2 แสดงผลเฉลยเชิงตัวเลขของความเร็ว ความดันและความเร็ววนที่ $\mu = 10$ ในโดเมนที่ 1

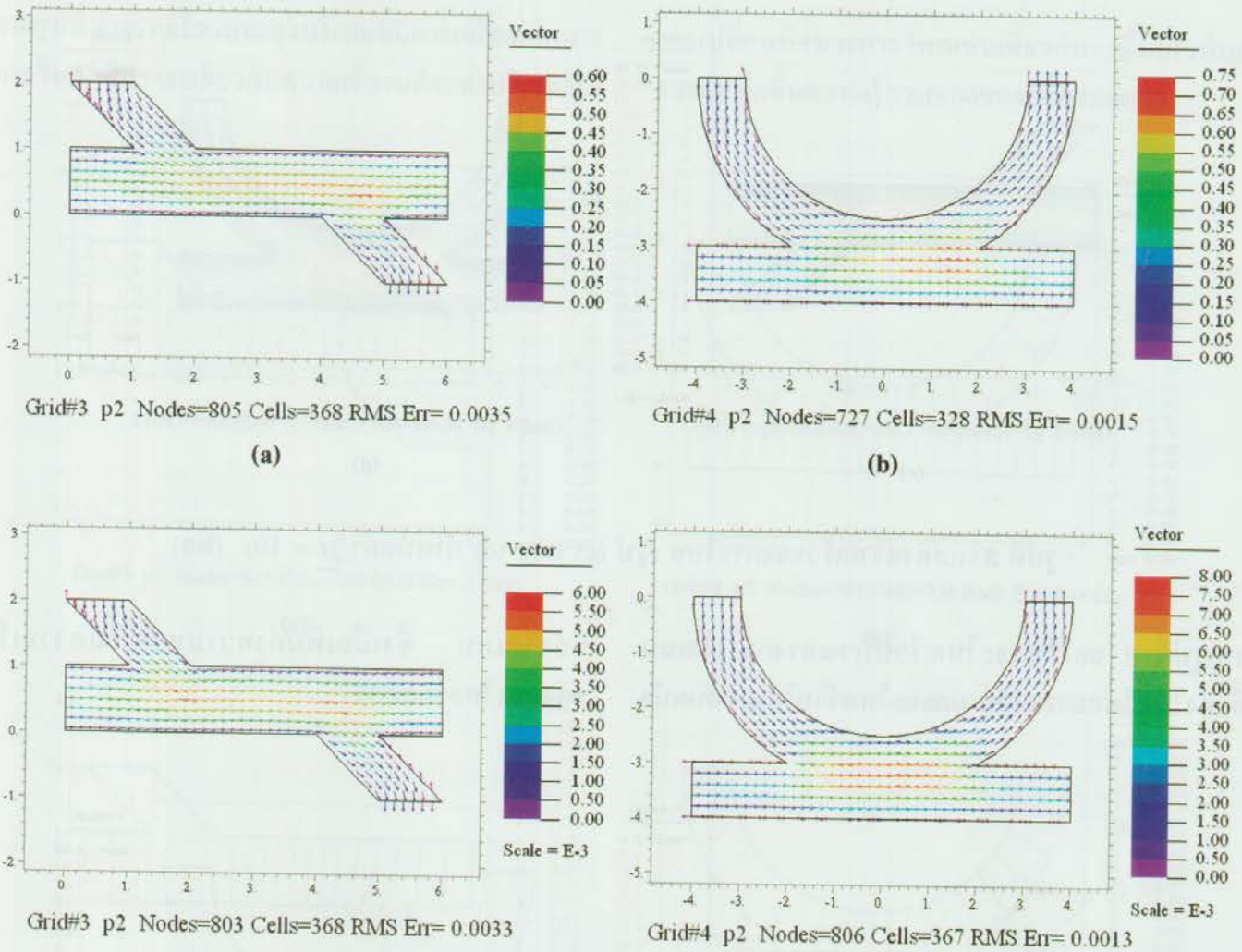
Node	Nodal Coordinates		Numerical Result			
	x	y	u	v	p	$curl$
1	0.250000	2.000000	0.000000	-0.000398	2.000000	-0.002155
2	0.250000	1.750000	0.000000	0.000000	1.982110	-0.003803
3	0.375000	1.875000	0.000094	-0.000683	1.986490	-0.002626
4	0.312500	1.812500	0.000072	-0.000370	1.983190	-0.003215
5	0.312500	1.937500	0.000037	-0.000555	1.994380	-0.002391
6	0.250000	1.875000	0.000038	-0.000298	1.991030	-0.002979
7	5.750000	-1.000000	0.000000	-0.000398	0.000000	0.002155
8	5.750000	-0.750000	0.000000	0.000000	0.017894	0.003803
9	5.625000	-0.875000	0.000094	-0.000683	0.013515	0.002626
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
802	4.912200	0.254770	0.003777	-0.000911	0.260874	-0.003167
803	4.972300	0.158914	0.002809	-0.000710	0.241182	-0.006336

ตารางที่ 3 แสดงผลเฉลยเชิงตัวเลขของความเร็ว ความดันและความเร็ววนที่ $\mu = 0.1$ ในโดเมนที่ 2

Node	Nodal Coordinates		Numerical Result			
	x	y	u	v	p	$curl$
1	3.707200	-0.239393	0.019335	0.156497	0.036819	-0.295477
2	3.500000	0.000000	0.000000	0.204503	0.000000	0.087974
3	3.414400	-0.478786	0.050405	0.199454	0.081367	0.103957
4	3.457200	-0.239393	0.028157	0.203416	0.040349	0.095965
5	3.560800	-0.359090	0.035959	0.191856	0.058032	-0.095760
6	3.603600	-0.119697	0.013401	0.189824	0.019141	-0.103751
7	3.904700	-0.751649	0.000000	0.000000	0.106015	-0.756921
8	3.659550	-0.615218	0.041837	0.148562	0.094999	-0.332868
9	3.817830	-0.496650	0.019453	0.088719	0.072995	-0.523902
10	3.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.939387
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
726	2.127260	-3.164990	0.371775	0.002437	0.479897	1.512040
727	2.126860	-3.129130	0.310452	0.002088	0.480568	1.793570

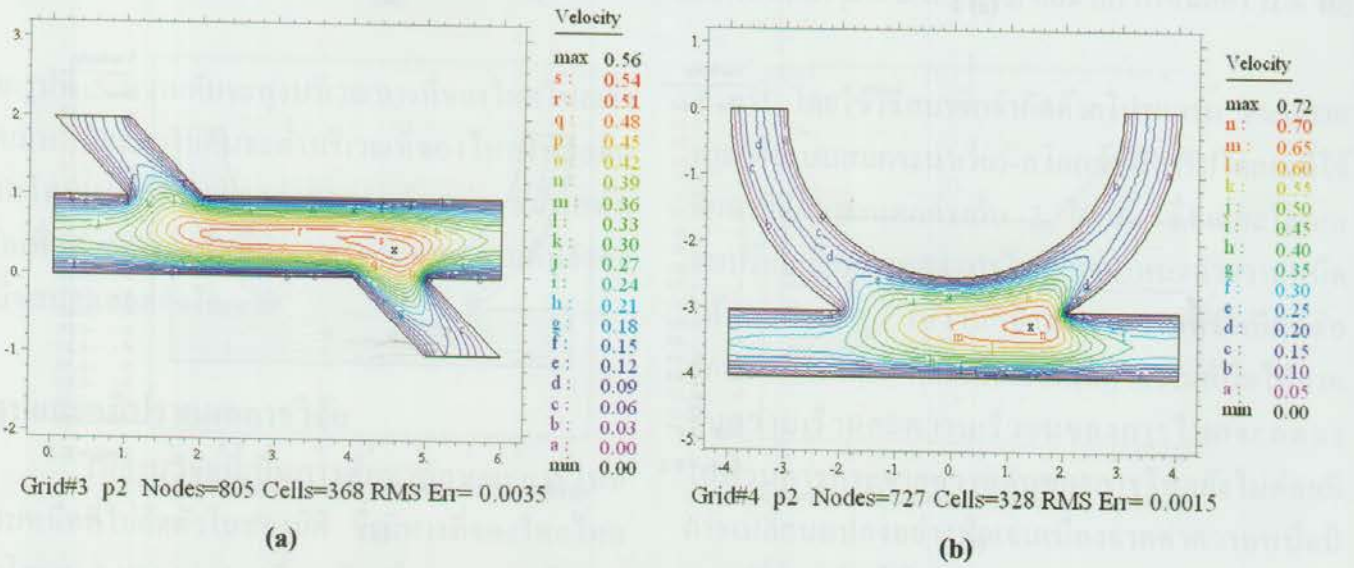
ตารางที่ 4 แสดงผลเฉลยเชิงตัวเลขของความเร็ว ความดันและความเร็ววนที่ $\mu = 10$ ในโดเมนที่ 2

Node	Nodal Coordinates		Numerical Result			
	x	y	u	v	p	$curl$
1	3.707200	-0.239393	0.000131	0.001541	0.036022	-0.003153
2	3.457200	-0.239393	0.000188	0.002016	0.039554	0.000679
3	3.414400	-0.478786	0.000375	0.001989	0.079771	0.000954
4	3.435800	-0.359090	0.000280	0.002004	0.059627	0.000817
5	3.560800	-0.359090	0.000254	0.001898	0.056848	-0.001100
6	3.582200	-0.239393	0.000169	0.001892	0.037706	-0.001237
7	3.904700	-0.751649	0.000000	0.000000	0.103707	-0.007372
8	3.659550	-0.615218	0.000326	0.001473	0.092976	-0.003311
9	3.817830	-0.496650	0.000148	0.000874	0.071394	-0.005191
10	3.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.009300
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
805	-2.809010	-1.526390	0.001125	-0.001482	1.713160	0.003125
806	-2.903500	-1.582630	0.001207	-0.001604	1.715170	0.001039

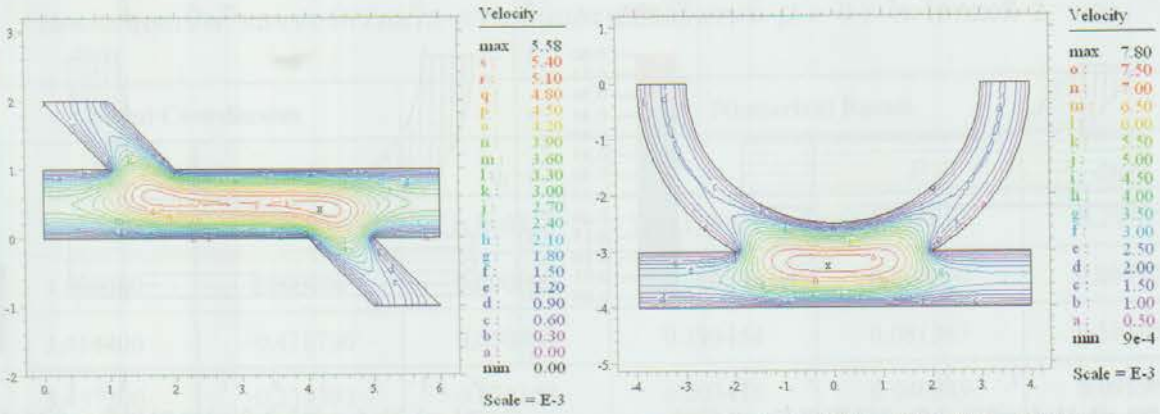


รูปที่ 2 แสดงทิศทางการไหล (รูป (a) และ (b) กำหนดค่า μ = 0.1, รูป (c) และ (d) กำหนดค่า μ = 10)

จากรูปที่ 2 ของไหลไหลเข้าโดเมนทางด้านบน (ซ้าย) และด้านซ้ายมารวมกันตรงกลางโดเมนในทิศทางเดียวกัน และแยกไหลออกจากโดเมนทางด้านขวา ซึ่งเมื่อเพิ่มค่าความหนืดขึ้นของไหลจะไหลช้าลง



รูปที่ 3 แสดงความเร็วของการไหล (รูป (a) และ (b) กำหนดค่า μ = 0.1)

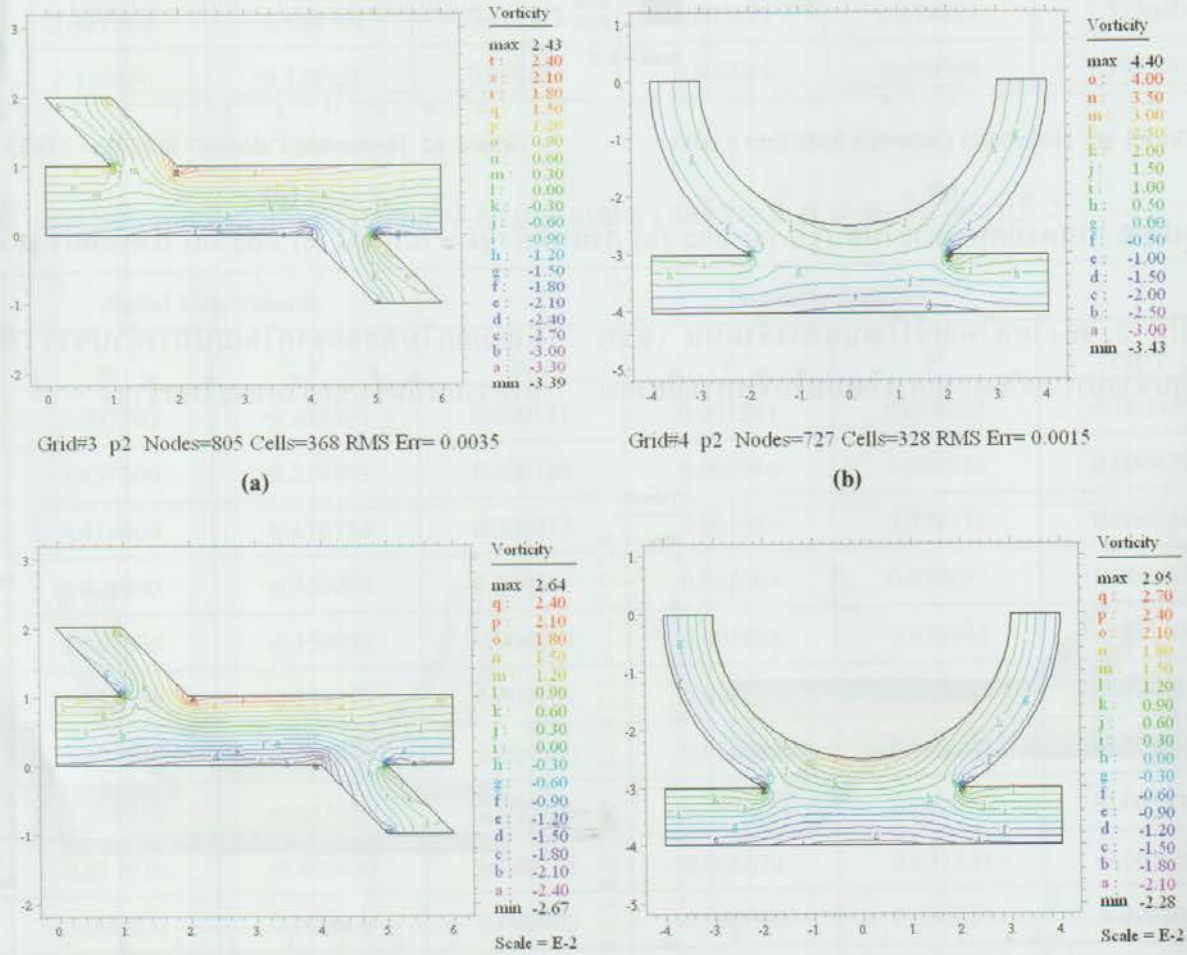


Grid#3 p2 Nodes=803 Cells=368 RMS Err= 0.0033 Grid#4 p2 Nodes=806 Cells=367 RMS Err= 0.0013

(c) (d)

รูปที่ 3 แสดงความเร็วของการไหล (รูป (c) และ (d) กำหนดค่า μ = 10) (ต่อ)

จากรูปที่ 3 ของไหลจะไหลเร็วบริเวณตรงกลางโดเมนที่ของไหลไหลมารวมกัน และจะไหลช้าบริเวณขอบผนังของโดเมน ซึ่งเมื่อเพิ่มค่าความหนืดขึ้นความเร็วของของไหลจะลดลง



Grid#3 p2 Nodes=805 Cells=368 RMS Err= 0.0035 Grid#4 p2 Nodes=727 Cells=328 RMS Err= 0.0015

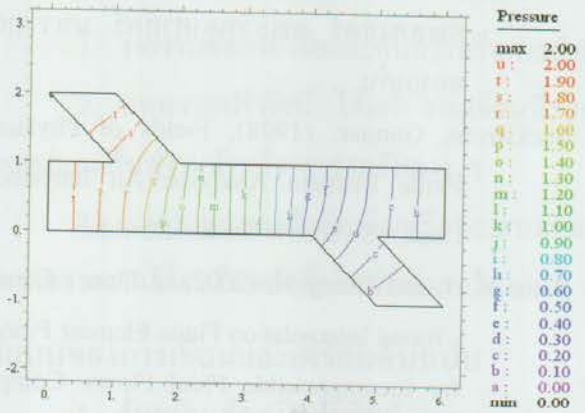
(a) (b)

Grid#3 p2 Nodes=803 Cells=368 RMS Err= 0.0033 Grid#4 p2 Nodes=806 Cells=367 RMS Err= 0.0013

(c) (d)

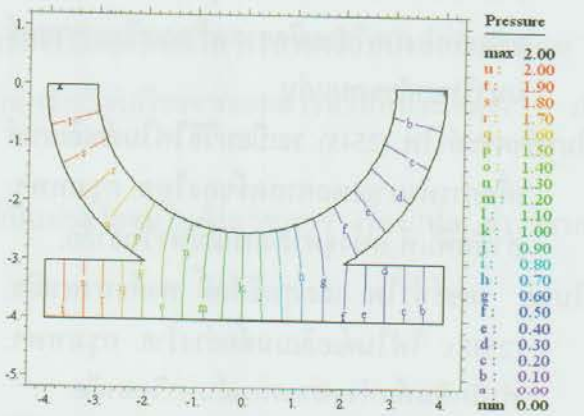
รูปที่ 4 แสดงความเร็ววน (รูป (a) และ (b) กำหนดค่า μ = 0.1, รูป (c) และ (d) กำหนดค่า μ = 10)

จากรูปที่ 4 ความเร็ววนจะสูงบริเวณที่มีการเปลี่ยนทิศทางการไหล ในขณะเดียวกันความเร็ววนก็จะต่ำบริเวณที่มีการเปลี่ยนทิศทางการไหลเช่นเดียวกัน ซึ่งเมื่อเพิ่มค่าความหนืดขึ้นความเร็ววนของของไหลจะลดลง



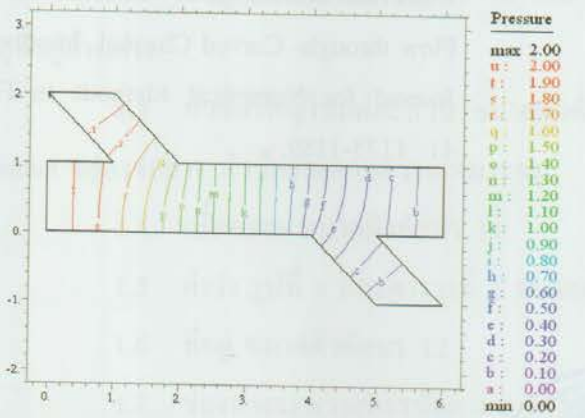
Grid#3 p2 Nodes=805 Cells=368 RMS Err= 0.0035

(a)



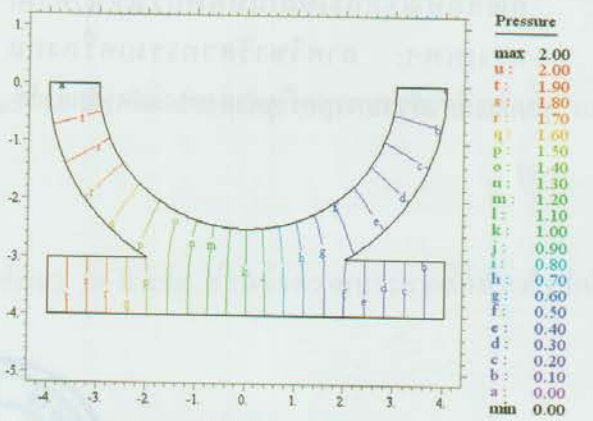
Grid#4 p2 Nodes=727 Cells=328 RMS Err= 0.0015

(b)



Grid#3 p2 Nodes=803 Cells=368 RMS Err= 0.0033

(c)



Grid#4 p2 Nodes=806 Cells=367 RMS Err= 0.0013

(d)

รูปที่ 5 แสดงการกระจายความดันของการไหล (รูป (a) และ (b) กำหนดค่า μ = 0.1, รูป (c) และ (d) กำหนดค่า μ = 10)

จากรูปที่ 5 ความดันจะสูงบริเวณทางที่ของไหลไหลเข้าโดเมน และความดันจะต่ำบริเวณที่ของไหลไหลออกจากโดเมน มีการกระจายความดันอย่างสม่ำเสมอเมื่อเพิ่มค่าความหนืดขึ้น การกระจายความดันยังคงสม่ำเสมอตลอดทั้งโดเมน

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะการไหลแบบหนืดที่ไม่อัดตัวในสองมิติ ซึ่งมีทางที่ของไหลไหลเข้าโดเมน 2 ทาง และทางที่ของไหลไหลออกจากโดเมน 2 ทาง โดยใช้วิธีสมาชิกจำกัดด้วยโปรแกรม FlexPDE ภายใต้ระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ สำหรับโดเมนที่ใช้ศึกษามีลักษณะแตกต่างกัน 2 โดเมน ซึ่งแต่ละโดเมนจะเปรียบเทียบลักษณะการไหลโดยกำหนดค่าความหนืดให้แตกต่างกัน ในงานวิจัยพบว่าความหนืดมีผลต่อลักษณะการไหล กล่าวคือเมื่อเพิ่มค่าความหนืดให้มากขึ้นความเร็วและความเร็ววนของการไหลจะลดลง ในส่วนการกระจายความดันของการไหลยังไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเนื่องจากค่าความหนืดมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

เอกสารอ้างอิง

จุรี สุวรรณศรี. (2551). วิธีสมาชิกจำกัดสำหรับปัญหาการไหลผ่านของของไหลอุดมคติที่อัดไม่ได้. ขอนแก่น: ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2545). ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการคำนวณพลศาสตร์ของไหล. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปราโมทย์ เดชะอำไพ และสุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพาณิช. (2548). ไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างง่าย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พัชรี ธีระเอก. (2547). การวิเคราะห์การไหลแบบหนืดแต่ไม่อัดตัวโดยระเบียบวิธีการแยกด้วยคุณลักษณะและเอลิเมนต์ที่ปรับขนาดได้. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สำลี บุญสิทธิ์. (2551). วิธีสมาชิกจำกัดสำหรับปัญหาการไหลผ่านของของไหลอุดมคติที่อัดไม่ได้ด้วยโปรแกรม FlexPDE. ขอนแก่น: ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

Backstrom, Gunnar. (1998). Fields of Physics by Finite Element Analysis: An Introduction. Lund, (Sweden): Studentlitteratur.

Bathe, K. J. and Zhang, H. (2002). A Flow - Condition - Based Interpolation Finite Element Procedure for Incompressible Fluid Flows. Computers and Structures. 80: 1267-1277.

Moshkin, N. P. and Mounnamprang, P. (2003). Numerical Simulation of Vertical Ideal Fluid Flow through Curved Channel. International Journal for Numerical Methods in Fluids. 41: 1173-1189.

ข้อแนะนำในการเขียนบทความลงวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ประเภทของเรื่องที่จะตีพิมพ์

1. รายงานผลการวิจัยและค้นคว้าหรือการสำรวจที่ยังไม่เคยตีพิมพ์ในวารสารผรือหนังสืออื่นมาก่อน

2. บทความปริทัศน์ ได้แก่ งานเขียนที่รวบรวมหรือเรียบเรียงจากเอกสารหรือหนังสือต่าง ๆ เพื่อเผยแพร่และฟื้นฟูงานด้านวิชาการระดับต่าง ๆ

3. บทความแสดงข้อคิดเห็นหรือข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในด้านวิชาการ เรื่องแปล ข่าววิชาการ ย่อความจากงานวิจัยหรือหนังสือใหม่ที่น่าสนใจ

รูปแบบของการเขียนและเตรียมต้นฉบับ

1. ต้นฉบับ ต้องเป็นตัวพิมพ์ Angsana New

1.1 ชื่อเรื่อง ขนาดตัวอักษร 20 ตัวเข้ม ตำแหน่งตรงกลาง มีทั้งชื่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

1.2 ชื่อผู้เขียน ขนาดตัวอักษร 16 เอน ตำแหน่งขวาสุดและใส่หมายเลขไว้ท้ายนามสกุล เพื่อการระบุที่อยู่ด้านล่าง

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

1.4 เนื้อความ ขนาดตัวอักษร 14

1.5 คำว่า รูปที่ x และตารางที่ x ขนาดตัวอักษร 14 ตัวเข้ม ส่วนข้อความบรรยายต่อท้ายตัวปกติ

1.6 ที่อยู่ ขนาดตัวอักษร 12

1.7 ช่องห่างระหว่างบรรทัดตามมาตรฐาน

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

2. ต้นฉบับ จะถูกพิจารณาโดยกองบรรณาธิการ และจะตอบรับการได้รับบทความโดยไม่ส่งต้นฉบับคืน ผู้เขียนควรจะอัดสำเนาเก็บไว้เป็นหลักฐานของตนเอง 1 ฉบับ

3. ต้นฉบับ จะต้องมีความถูกต้องทั้งในด้านเนื้อหา และการใช้ภาษา รวมทั้งมีความสมบูรณ์ในรูปแบบพร้อมที่จะนำลงตีพิมพ์ได้

4. ชื่อเรื่อง ให้ใช้ภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ **ไม่ยาวเกินไป** และหลีกเลี่ยงการใช้คำย่อโดยไม่จำเป็น

5. ชื่อผู้เขียน เขียนชื่อภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษพร้อมทั้งบอกสถานที่ทำงานให้ชัดเจน

6. เนื้อเรื่อง ใช้ได้ทั้งภาษาไทยล้วนและภาษาอังกฤษล้วน ถ้าใช้ภาษาไทย ภาษาอังกฤษที่ใช้ปนกับภาษาไทยนั้นให้พยายามแปลเป็นไทยเท่าที่จะทำได้ และให้เขียนคำเดิมกำกับในวงเล็บ การทับศัพท์ภาษาอังกฤษตลอดทั้งการเขียนตัวสะกด การันต์ ในภาษาไทยให้ใช้ตามแบบราชบัณฑิตยสถาน

ข้อแนะนำในการเขียนบทความลงวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

7. ในกรณีของบทความวิจัย **ต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ** และแบ่งเนื้อหาของบทความเป็น บทนำ วิธีดำเนินงาน ผลการวิเคราะห์ บทสรุปและวิจารณ์

8. เชิงอรรถ (footnote) ใช้เฉพาะที่จำเป็นเพื่อขยายหรือให้รายละเอียดเพิ่มเติมแก่ใจความเฉพาะตอนในบทความ

9. ตารางและภาพประกอบ คำบรรยายประกอบตารางหรือภาพประกอบควรจะสั้นและชัดเจน ถ้าเป็นภาพถ่ายให้ใช้ภาพขาว-ดำ ขนาดโปสการ์ด ภาพเขียนรายเส้นควรเขียนด้วยหมึกดำภาพที่เขียนต้องชัดเจนและมีขนาดที่เหมาะสม

10. เอกสารอ้างอิง หรือบรรณานุกรม แนะนำให้เขียนตามแบบที่วารสารกำหนด

11. หากไม่ปฏิบัติตามข้อแนะนำในการเขียนบทความ บทความของท่านอาจไม่ได้รับการตีพิมพ์หรือตีพิมพ์ล่าช้า

ส่งต้นฉบับมาที่

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ. ขอนแก่น 40002

E-mail : kku_scijournal@kku.ac.th

อภินันทนาการจากผู้เขียน

เรื่องที่ได้รับการตีพิมพ์ ผู้เขียนจะได้รับวารสารฉบับนั้น 1 เล่ม

ตัวอย่าง

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันและกรดไขมันจิ้งหรีดทองลาย (*Gryllus* sp.) ที่เลี้ยงเพื่อการค้า

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

บทคัดย่อ

Xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

บทนำ

Xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

วิธีการ

Xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

รูปที่ 1 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

ตารางที่ 1 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

---

[1] ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ. ขอนแก่น 40002

[2] ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ. ขอนแก่น 40002

[*] Corresponding Author, E-mail :

การเขียนเอกสารอ้างอิงในวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

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

บรรณานุกรม (Bibliography) หมายถึง เอกสารที่ใช้อ้างถึงในลักษณะสรุปเป็นหลักการหรือทฤษฎีโดยมิได้อ้างอิงหรือแปลมาโดยตรง

การเขียนเอกสารอ้างอิง หรือบรรณานุกรม มีแนวทางการเขียนดังนี้

1. หนังสือ

ก. ภาษาไทย

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

ข. ภาษาอังกฤษ

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

2. เอกสารราชการ

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

3. วารสาร

ก. ภาษาไทย

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

ข. ภาษาอังกฤษ

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

หมายเหตุ

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

พิมพ์ที่: หจก.โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา 232/199 ถนนรำนาร ตำบลเมือง อำเภอเมือง ขอนแก่น 40000
Tel.0-4332-8589-91 Fax.0-4332-8592 E-mail: klungpress@hotmail.com 2553

หนังสือในโครงการผลิตตำรา คณะวิ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สถิติพื้นฐาน

พร้อมตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม
MINITAB SPSS และ SAS

รองศาสตราจารย์ชัชวาลย์ เรืองประพันธ์

พิมพ์ครั้งที่ 5 2543 • 510 หน้า

ISBN 974-675-666-4

ราคา 180 บาท

สมการเชิงอนุพันธ์สามัญ

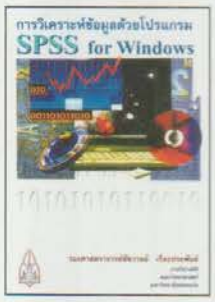
Ordimary Differentian Equations

รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ ไวท์ยางกูร

2550 • 470 หน้า

ISBN 978-974-7707-55-7

ราคา 240 บาท



การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม SPSS for Windows

รองศาสตราจารย์ชัชวาลย์ เรืองประพันธ์

2544 • 620 หน้า

ISBN 974-654-608-2

ราคา 300 บาท

เคมีเฮเทอโรไซคลิกแอโรแมติก

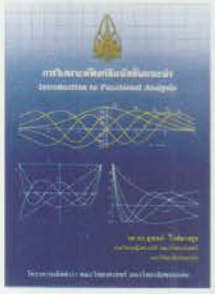
Aromatic Heterocyclic Chemistry

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ หาญวจนวงศ์

2550 • 122 หน้า

ISBN 978-974-7707-71-7

ราคา 90 บาท



การวิเคราะห์ฟังก์ชันนัลขั้นแนะนำ

รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ ไวท์ยางกูร

2547 • 344 หน้า

ISBN 974-367-958-8

ราคา 200 บาท

หลักการของพันธุวิศวกรรมในโพรแคริโอต

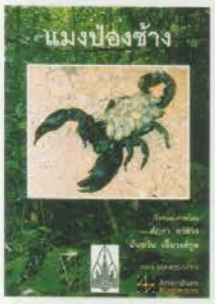
Principles of Genetic Engineering in Prokaryote

รองศาสตราจารย์ ดร.นิสันต์ สัตยาศัย

2551 • 164 หน้า

ISBN 978-974-10-2673-9

ราคา 120 บาท



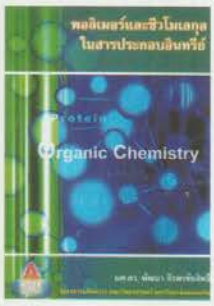
แมงป่องช้าง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศักดา ดาดวง
นางสาวนันทวัน เอื้อวงศ์กูล

2547 • 64 หน้า

ISBN 974-435-571-9

ราคา 160 บาท



พอลิเมอร์ และชีวโมเลกุล ในสารประกอบอินทรีย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พัฒนา ธีรพรชัยสิทธิ์

ISBN 978-616-7183-57-2

2553 • 112 หน้า

ราคา 80 บาท

สเปกโทรสโกปี ในการพิสูจน์ โครงสร้างของสารอินทรีย์

รองศาสตราจารย์ ดร.สมเดช กนกเมธากุล

2547 • 238 หน้า

ISBN 974-435-348-1

ราคา 150 บาท

ท่านที่สนใจหนังสือในโครงการผลิตตำรา ติดต่อสั่งซื้อได้ที่... รองศาสตรจารย์ชัชวาลย์ เรืองประพันธ์

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