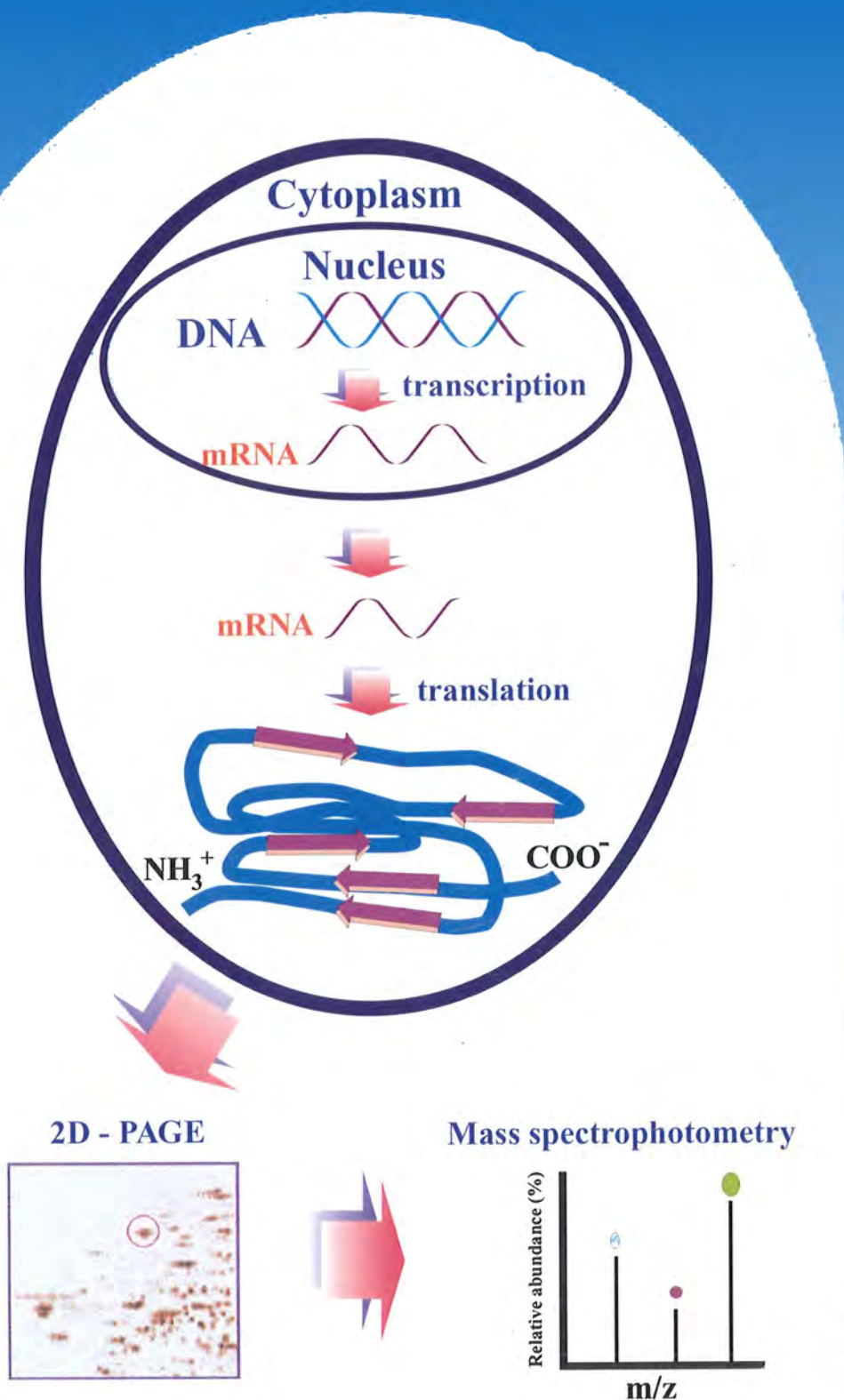
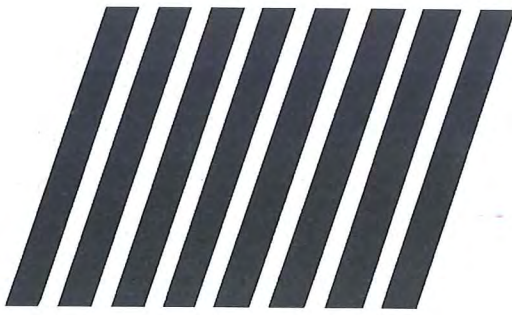






วารสาร
วิทยาศาสตร์ปู.
K K U S C I E N C E J O U R N A L

ISSN 0125-2364

เจ้าของ

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สำนักงาน

คณะวิทยาศาสตร์ ตึก 6

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อส่งเสริมและเผยแพร่วิทยาการ ในสาขาวิชาต่าง ๆ ทางด้านวิทยาศาสตร์
2. เพื่อเผยแพร่ผลงานด้านการวิจัย และการศึกษา ค้นคว้าของอาจารย์และนักศึกษา
3. เพื่อเป็นสื่อกลางการแลกเปลี่ยนความรู้และแนวความคิดทางวิชาการระหว่างอาจารย์ นักศึกษาและผู้สนใจ ทั้งภายในและภายนอกสถาบัน

กำหนดออก

ปีละ 4 ฉบับ

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

คำบารุง ปีละ 75 บาท ข่ายปลีก เล่มละ 20 บาท

การบอกรับเป็นสมาชิก

แจ้งความจำนงค์เป็นจดหมาย หรือกรอกใบสมัครเป็นสมาชิก พร้อมส่งคำบารุงเป็นธนาคติ หรือเช็คไปรษณีย์ในนามของนางบุญคุ้ม เหลือล้ำ ฝ่ายจัดการ ส่งจ่าย ป.ท.มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

ที่ปรึกษา

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
รองคณบดีฝ่ายวิชาการ

บรรณาธิการ

มานิตย์

โหมิตรระกูล

กองบรรณาธิการ

เฉลิม

เรืองวิริยะชัย

สมเดช

กนกเมธากุล

ศักดิ์สิทธิ์

จันทร์ไทย

บำรุง

สมสวัสดิ์

วิทยา

อมรกิจบำรุง

ประนอม

จันทร์โณทัย

นฤมล

แสงประดับ

เสาวนิต

ทองพิมพ์

พิสิฐฐ์

เจริญสุดใจ

เที่ยง

ภูมิสะอาด

อำนวยการ

มณีศรีวงศ์กุล

บุญทรัพย์

ไวคำ

ฝ่ายศิลป์และภาพ

กิเลน

ดิณนรเศรษฐ์

บุญส่ง

ทองสุข

ฝ่ายเหรียญ

บุญคุ้ม

เหลือล้ำ

ฝ่ายจัดการและ

เลขานุการ

ทัศนีย์

จิตตะกวี

สมศักดิ์

อุ้นจันทิ

สุคนธ์

กลินศกา

บทความและงานวิจัย

ได้รับการกลั่นกรอง

จากผู้ทรงคุณวุฒิ

บทความหรือข้อคิดเห็นใด ๆ ในวารสารนี้เป็นของผู้เขียน ไม่จำเป็นต้องสอดคล้องกับทัศนะของกองบรรณาธิการ

วารสาร

วิทยาศาสตร์ชุมชน

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

ปีที่ 30 ฉบับที่ 3

Volume 30 Number 3

บรรณาธิการแถลง

บทความ

- พื้นที่ของรูปสี่เหลี่ยมด้านขนานมีระยะของ
รูปทรงสี่หน้า
สกล คงบุญ..... 155
- Proteomics... ศาสตร์ของการแปลความหมาย
จากยีนสู่โปรตีน
สมปอง ธรรมศิริรักษ์..... 160
- วัสดุนาโนคอมโพสิตและสารประกอบ
อินเตอร์คาเลชัน
นิธิมา เคารพพงศ์..... 169
- การเปลี่ยนแปลงสภาพของเซลล์รากเหง้าจากตัวอ่อน
ชูชาติ กมลเลิศ..... 180

วารสาร

วิทยาศาสตร์ชุมชน

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

ปีที่ 30 ฉบับที่ 3

Volume 30 Number 3

งานวิจัย

- การเตรียมและทดสอบ $\text{ZnO} + 0.01\text{Nb}_2\text{O}_5$ เพื่อศึกษาการตอบสนองต่ออุณหภูมิ วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกและสารให้ความร้อน
ธัชชัย พันธเมธาฤทธิ์
วรภรณ์ อนันตพรพาณิชย์
กิ่งกานต์ เปาะทอง
พิกุล ราชพลแสน..... 188

- การเจริญเติบโตของผลกระทอนพันธุ์ปุยฝ้ายที่ได้รับ และไม่ได้รับการห่อ : ลักษณะภายนอก
จรรีรัตน์ นามประดิษฐ์
มานิตย์ ไชยิตตระกูล
สุมน มาสุธน
กวิศร์ วานิชกุล..... 199

- เปรียบวิธีผลต่างอันตะของปัญหาสถานะอยู่ตัว สำหรับรูปแบบการพา-การแพร่ของปัญหามลภาวะ ทางอากาศ
เพียงพบ มนต์นวลปรางค์
สุพจน์ ไท่ยางกูร..... 212



วิทยาศาสตร์
KKU SCIENCE JOURNAL

Publisher

Faculty of Science, Khon Kaen University,
Thailand.

Office

Faculty of Science, Building 6, Khon Kaen
University.

Objectives

1. To promote dissemination of knowledge in all fields of science.
2. To publish research results of faculty, researchers and students.
3. To be a medium for the exchange of knowledge and ideas among faculty, researchers and 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 |

Subscription rate

75 baht per annum. Single issue price
20 baht.

Membership

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

Advisory Committee

Dean, Faculty of Science
Associate Dean for Academic Affairs

Editor

Manit Kositrakun

Editorial Board

Chalerm	Ruangviriyachai
Somdej	Kanokmedhakul
Saksit	Chanthai
Bamrung	Somsasdi
Vittaya	Amornkitbamrung
Pranom	Chantaranothai
Narumon	Sangpradub
Saowanit	Tongpim
Pisit	Chareonsudjai
Tiang	Poomsa-ard
Annuay	maneesriwongkul
Boonsup	Waikham
Kilen	Tinnoraset
Boonsong	Koungsook
Boonkoom	Lualon
Tassanee	Jittaklawee
Somsak	Unjantee
Sukhon	Klinpaka

Artists

Treasurer

Managing Staff and Secretary

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

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

บรรณานุกรม *แดง*

เรียน ท่านสมาชิกวารสาร ฯ และท่านผู้อ่านที่รัก

มีปัจจัยหลายประการที่ทำให้วารสารส่วนมากออกไม่ตรงตามกำหนด ยิ่งล่าช้ากว่ากำหนดมากเท่าไร จำนวนบทความที่ส่งมาตีพิมพ์ก็ยิ่งมีน้อยลง เพราะผู้เขียนย่อมคาดหวังว่าบทความของเขาจะได้รับการตีพิมพ์โดยเร็ว เหตุการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นกับวารสารหลายเล่ม รวมทั้งวารสารวิทยาศาสตร์ มข. ด้วย

เป็นความตั้งใจของคณะผู้จัดทำวารสารฯ ที่จะทำให้วารสารฯ ปีที่ 30 (2545) ฉบับที่ 3 ออกมาก่อนที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จะจัดงานสัปดาห์วิทยาศาสตร์แห่งชาติระหว่างวันที่ 16-18 สิงหาคม 2545 นับตั้งแต่วันนี้เป็นต้นไป หวังว่านักวิจัยคงจะส่งบทความปริทัศน์และบทความวิจัยมาตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์ มข. มากขึ้น

ขอแจ้งให้ทราบอีกครั้งว่า ผู้ที่สมัครเป็นสมาชิกในปี พ.ศ. 2544 จะได้รับวารสารฯ ปีที่ 30 ฉบับที่ 3 เป็นการชดเชยเป็นฉบับสุดท้าย



พื้นที่ของรูปสี่เหลี่ยมด้านขนานมัยยะของรูปทรงสี่หน้า

สกล คงบุญ¹

บทนำ

ในเรขาคณิตยูคลิดเบื้องต้น เราสามารถหาพื้นที่ของสี่เหลี่ยมด้านขนานได้โดยไม่ต้องยากถ้ากำหนดความยาวของด้านมาให้ แต่สำหรับสี่เหลี่ยมด้านขนานที่เกิดจากการลากเส้นเชื่อมจุดบนระนาบเดียวกัน ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางของด้านสี่ด้านของรูปทรงสี่หน้า (tetrahedron) แม้ไม่ทราบความยาวของด้านสี่เหลี่ยมด้านขนาน หากทราบความยาวของด้านของรูปทรงสี่หน้าก็จะสามารถคำนวณหาพื้นที่ของสี่เหลี่ยมด้านขนานดังกล่าวได้เช่นกัน บทความนี้จะแสดงให้เห็นว่าสี่เหลี่ยมด้านขนานดังกล่าวเกิดขึ้นจริง พร้อมทั้งแสดงการหาสูตรพื้นที่ของสี่เหลี่ยมด้านขนานในเทอมของความยาวของด้านทั้งหกด้านของรูปทรงสี่หน้า ดังนี้

ความรู้พื้นฐาน

การแสดงว่าสี่เหลี่ยมด้านขนานที่เกิดขึ้นจากการลากเส้นเชื่อมจุดกึ่งกลางด้านของรูปทรงสี่หน้าเป็นสี่เหลี่ยมด้านขนานที่เกิดขึ้นได้จริงนั้น ได้นำเอาทฤษฎีของเรขาคณิตของยูคลิดมาช่วยสนับสนุนการพิสูจน์ และสามารถพิสูจน์ได้โดยไม่ต้องยาก ดังได้แสดงการพิสูจน์ไว้ใน ทฤษฎีบทที่ 1 ทฤษฎีเรขาคณิตดังกล่าว ได้แก่ “เส้นที่ลากเชื่อมจุดกึ่งกลางของด้านสองด้านของสามเหลี่ยมจะขนานและยาวเป็นครึ่งหนึ่งของด้านที่สาม” สำหรับความรู้ที่นำมาใช้ในการพิสูจน์ทฤษฎีบทที่ 2 เป็นความรู้เกี่ยวกับเวกเตอร์ ดังต่อไปนี้

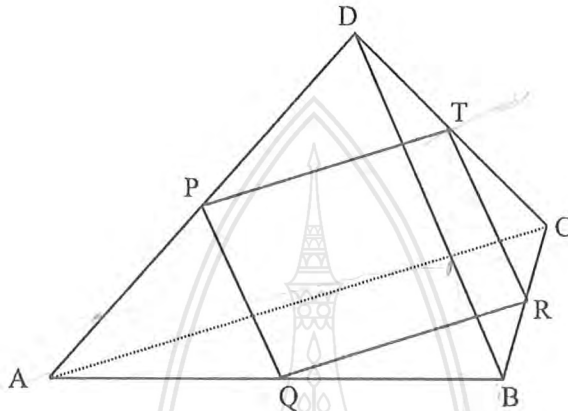
1. เวกเตอร์ตำแหน่ง การบวก การลบ และการคูณเวกเตอร์
2. ฟังก์ชันเชิงเส้นของเวกเตอร์ กล่าวคือ สำหรับเวกเตอร์ตำแหน่ง $\vec{i}$, $\vec{m}$ และ $\vec{n}$ ที่มีจุดเริ่มต้นที่จุดกำเนิด O เดียวกัน และจุดปลายของ $\vec{n}$ อยู่บนเส้นเชื่อมจุดปลายของ $\vec{i}$ กับ $\vec{m}$ จะได้ $\vec{n} = x\vec{i} + y\vec{m}$ เมื่อ $x + y = 1$
3. สี่เหลี่ยมด้านขนานที่มีด้านประกอบด้วย $\vec{u}$ และ $\vec{v}$ มีพื้นที่เท่ากับ $|\vec{u} \times \vec{v}|$
4. เอกลักษณ์ของลากรองจ์ (Lagrange's identity) $|\vec{u} \times \vec{v}|^2 = |\vec{u}|^2 |\vec{v}|^2 - (\vec{u} \cdot \vec{v})^2$

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

พื้นที่ของรูปสี่เหลี่ยมด้านขนานมัธยะ

ทฤษฎีบทที่ 1 กำหนดด้านสองด้านใดๆ ที่ไม่มีจุดร่วมกันของรูปทรงสี่หน้า จุดกึ่งกลางของด้านสี่ด้านที่เหลือจะอยู่บนระนาบเดียวกัน และเป็นจุดมุมของสี่เหลี่ยมด้านขนาน

พิสูจน์

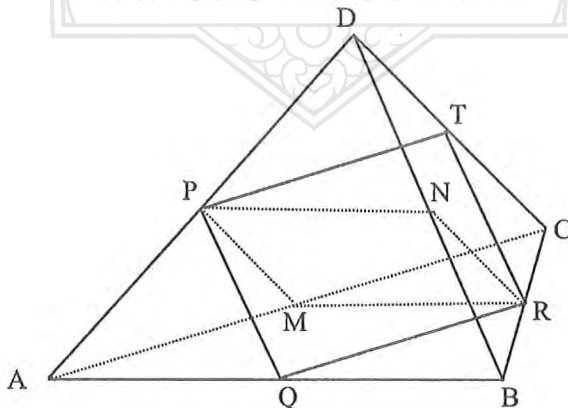


รูปที่ 1

กำหนดให้ AC และ BD เป็นด้านสองด้านที่ไม่มีจุดร่วมกันของรูปทรงสี่หน้า ABCD และ Q, R, T และ P เป็นจุดกึ่งกลางของด้าน AB, BC, CD และ AD ตามลำดับ

พิจารณาสามเหลี่ยม ABC จะได้ว่า $QR = \frac{1}{2} AC$ และ QR ขนานกับ AC ในทำนองเดียวกันจะได้ $PT = \frac{1}{2} AC$ และ PT ขนานกับ AC นั่นคือ P, Q, R และ T อยู่บนระนาบเดียวกัน และสี่เหลี่ยม PQRT เป็นสี่เหลี่ยมด้านขนาน $\square$

นิยาม สี่เหลี่ยมด้านขนานที่เกิดจากการลากเส้นเชื่อมจุดบนระนาบเดียวกันซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางของด้านสี่ด้านใดๆ ของรูปทรงสี่หน้า เรียกว่า สี่เหลี่ยมด้านขนานมัธยะ (medial parallelogram)



รูปที่ 2

จากรูปที่ 2 จะเห็นว่า ABCD คือรูปทรงสี่หน้า และ PQRT คือสี่เหลี่ยมด้านขนานมัธยะ ในขณะที่ PMRN คือสี่เหลี่ยมด้านขนานมัธยะอีกรูปหนึ่ง

หมายเหตุ ด้าน AC และ BD ซึ่งเป็นด้านสองด้านที่ไม่มีจุดร่วมกันของรูปทรงสี่หน้า ABCD เรียกว่าเป็นด้านที่ทำให้เกิด (determined) สี่เหลี่ยมด้านขนานมัธยะ PQRT

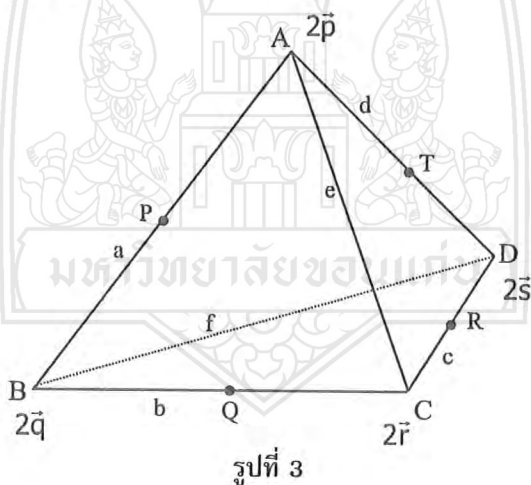
สำหรับการหาพื้นที่ของสี่เหลี่ยมด้านขนานมัธยะในเทอมของความยาวด้านทั้งหกของรูปทรงสี่หน้านั้น การหาสูตรของการหาพื้นที่จะใช้ความรู้เรื่องเวกเตอร์และกำหนดความยาวของด้านของรูปทรงสี่หน้า ดังการพิสูจน์ทฤษฎีบทต่อไปนี้

ทฤษฎีบทที่ 2 ในรูปทรงสี่หน้าใดๆ จะได้ว่า

- (1) ด้านที่ทำให้เกิดสี่เหลี่ยมด้านขนานมัธยะทั้งสองด้านจะขนานกับสี่เหลี่ยมด้านขนานมัธยะ
- (2) พื้นที่สี่เหลี่ยมด้านขนานมัธยะสามารถหาได้ในเทอมของความยาวด้านทั้งหกของรูปทรงสี่หน้า

พิสูจน์ (1)

กำหนดให้เวกเตอร์ตำแหน่งในปริภูมิสามมิติ R^3 ของจุดมุม A, B, C และ D ของรูปทรงสี่หน้าเป็น $2\vec{p}$, $2\vec{q}$, $2\vec{r}$ และ $2\vec{s}$ ตามลำดับ และกำหนดความยาวของด้าน $AB = a$, $BC = b$, $CD = c$, $AD = d$, $AC = e$ และ $BD = f$ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3

โดยใช้ความรู้เรื่องฟังก์ชันเชิงเส้นของเวกเตอร์ กล่าวคือ สำหรับเวกเตอร์ตำแหน่ง $\vec{l}$, $\vec{m}$ และ $\vec{n}$ ที่มีจุดเริ่มต้นที่จุด O เดียวกัน และจุดปลายของ $\vec{n}$ อยู่บนเส้นเชื่อมจุดปลายของ $\vec{l}$ กับ $\vec{m}$ จะได้ $\vec{n} = x\vec{l} + y\vec{m}$ เมื่อ $x + y = 1$ ดังนั้น ในกรณีนี้เมื่อกำหนดจุดมุมของสี่เหลี่ยมด้านขนานมัธยะ เป็น P, Q, R และ T ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางของด้านที่มีความยาว a, b, c และ d ตามลำดับ จะได้เวกเตอร์ตำแหน่งของจุด P, Q, R และ T ดังนี้

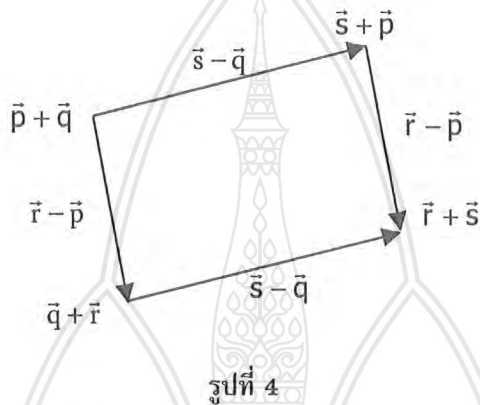
$$\overrightarrow{OP} = \frac{1}{2}(2\vec{p}) + \frac{1}{2}(2\vec{q}) = \vec{p} + \vec{q} \quad (O \text{ เป็นจุดกำเนิด})$$

ในทำนองเดียวกัน $\overrightarrow{OQ} = \vec{q} + \vec{r}$, $\overrightarrow{OR} = \vec{r} + \vec{s}$ และ $\overrightarrow{OT} = \vec{s} + \vec{p}$ และจะได้

$$a = 2|\vec{p} - \vec{q}|, b = 2|\vec{q} - \vec{r}|, c = 2|\vec{r} - \vec{s}|$$

$$d = 2|\vec{s} - \vec{p}|, e = 2|\vec{r} - \vec{p}|, f = 2|\vec{s} - \vec{q}|$$

ดังนั้น สี่เหลี่ยมด้านขนานมีระยะมีด้านประกอบเป็นเวกเตอร์ $\vec{u} = \vec{r} - \vec{p}$ และ $\vec{v} = \vec{s} - \vec{q}$ ดังรูปที่ 4



เวกเตอร์ตั้งฉากกับระนาบของสี่เหลี่ยมด้านขนานมีระยะคือ $\vec{u} \times \vec{v}$ และเวกเตอร์ของด้านที่มีความยาว e คือ $2(\vec{p} - \vec{r})$ พิจารณา $(\vec{u} \times \vec{v}) \cdot 2(\vec{p} - \vec{r})$ จะได้

$$(\vec{u} \times \vec{v}) \cdot 2(\vec{p} - \vec{r}) = 2[\{(\vec{r} - \vec{p}) \times (\vec{s} - \vec{q})\} \cdot (\vec{p} - \vec{r})] = 0$$

ดังนั้น ด้านที่มีความยาว e ขนานกับระนาบของสี่เหลี่ยมด้านขนานมีระยะ ในทำนองเดียวกันจะได้ด้านที่มีความยาว f ขนานกับระนาบของสี่เหลี่ยมด้านขนานมีระยะ

พิสูจน์ (2)

กำหนดให้ A เป็นพื้นที่ของสี่เหลี่ยมด้านขนานมีระยะ จะได้ $A = |\vec{u} \times \vec{v}|$ และโดยเอกลักษณ์ของลากรองจ์ (Lagrange's identity) จะได้

$$\begin{aligned} A^2 &= |\vec{u} \times \vec{v}|^2 = |\vec{u}|^2 |\vec{v}|^2 - (\vec{u} \cdot \vec{v})^2 \\ &= |\vec{r} - \vec{p}|^2 |\vec{s} - \vec{q}|^2 - [(\vec{r} - \vec{p}) \cdot (\vec{s} - \vec{q})]^2 \\ &= \frac{1}{16} e^2 f^2 - [\vec{r} \cdot \vec{s} - \vec{r} \cdot \vec{q} - \vec{p} \cdot \vec{s} + \vec{p} \cdot \vec{q}]^2 \\ &= \frac{1}{16} e^2 f^2 - \frac{1}{4} [-2\vec{r} \cdot \vec{s} - (-2)\vec{r} \cdot \vec{q} - (-2)\vec{p} \cdot \vec{s} + (-2)\vec{p} \cdot \vec{q}]^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{16}e^2f^2 - \frac{1}{4}[(|\vec{r}|^2 - 2\vec{r} \cdot \vec{s} + |\vec{s}|^2) - (|\vec{r}|^2 - 2\vec{r} \cdot \vec{q} + |\vec{q}|^2) \\
&\quad - (|\vec{p}|^2 - 2\vec{p} \cdot \vec{s} + |\vec{s}|^2) + (|\vec{p}|^2 - 2\vec{p} \cdot \vec{q} + |\vec{q}|^2)]^2 \\
&= \frac{1}{16}e^2f^2 - \frac{1}{4}[|\vec{r} - \vec{s}|^2 - |\vec{r} - \vec{q}|^2 - |\vec{p} - \vec{s}|^2 + |\vec{p} - \vec{q}|^2]^2 \\
&= \frac{1}{16}e^2f^2 - \frac{1}{4}\left[\left(\frac{c}{2}\right)^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2\right]^2 \\
&= \frac{1}{64}[4e^2f^2 - (a^2 - b^2 + c^2 - d^2)^2] \\
A &= \frac{1}{8}\sqrt{4e^2f^2 - (a^2 - b^2 + c^2 - d^2)^2} \quad \square
\end{aligned}$$

จากทฤษฎีบทที่ 2 นี้ ทำให้สามารถหาพื้นที่ของรูปสี่เหลี่ยมด้านขนานมัธยะของรูปทรงสี่หน้าได้

โดยง่าย โดยใช้สูตร $A = \frac{1}{8}\sqrt{4e^2f^2 - (a^2 - b^2 + c^2 - d^2)^2}$ ซึ่งอยู่ในเทอมของความยาวของด้านทั้งหก ด้านของรูปทรงสี่หน้า

บรรณานุกรม

- ศรีบุตร์ แวเวเจริญ. (2530). การวิเคราะห์เวกเตอร์. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. หน้า 206.
- Yetter, D.N. (1999). The area of the medial parallelogram of a tetrahedron. Amer. Math. Monthly. 106:956-958.
- Lass, H. (1950). Vector and Tensor Analysis. Tokyo: McGraw - Hill Kogakusha Ltd. p.1-11, 20.

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

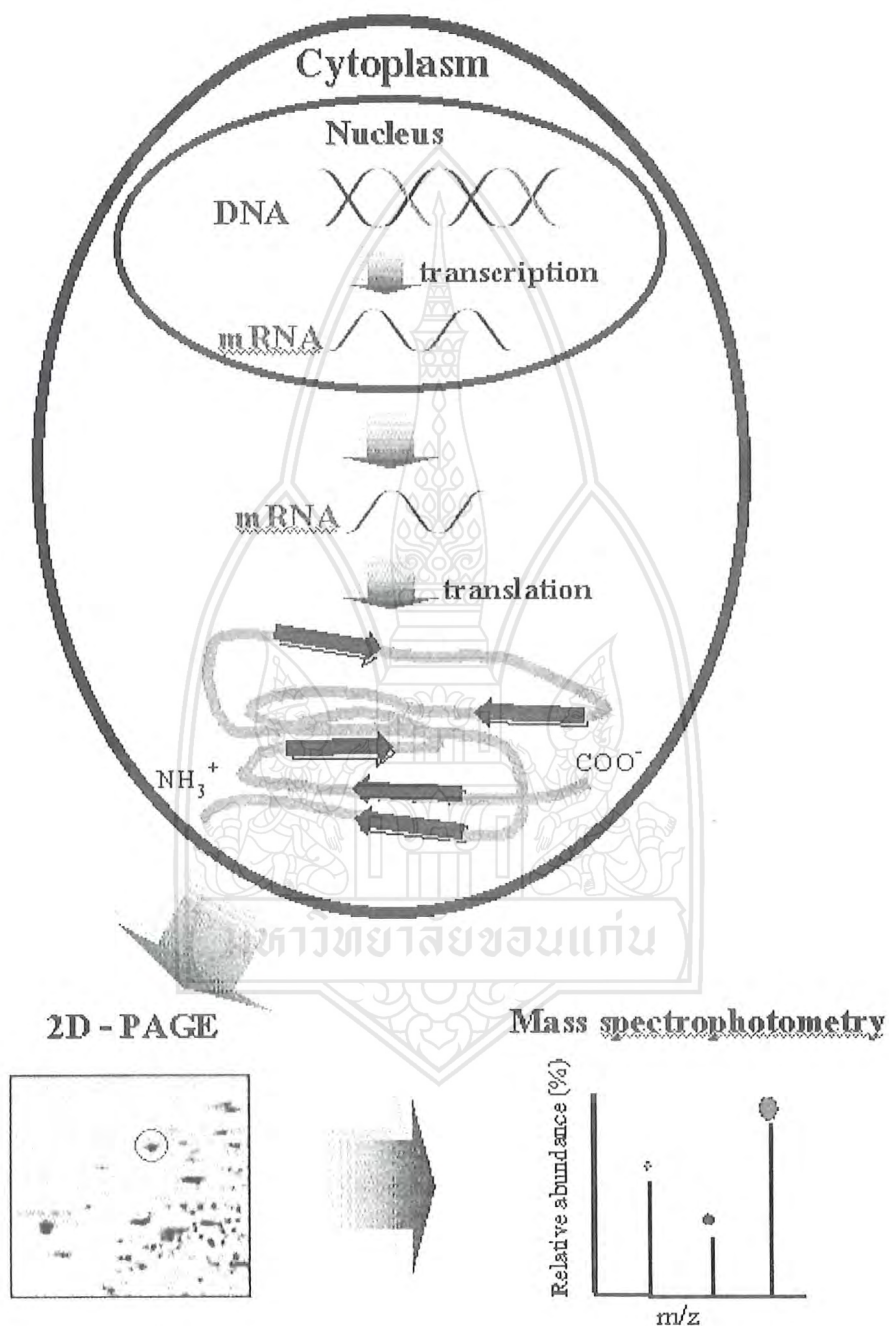
Proteomics...ศาสตร์ของการแปลความหมาย จากยีนสู่โปรตีน

สมปอง ธรรมศิริรักษ์¹

ในปี พ.ศ. 2533 โครงการพันธุกรรมของมนุษย์ (human genome project) ได้รับการก่อตั้งขึ้นจาก Department of Energy และ National Institute of Health ของสหรัฐอเมริกา โดยได้รับความร่วมมือ และการสนับสนุนจากนักวิทยาศาสตร์ในภาคเอกชนในประเทศดังกล่าว โครงการนี้จัดตั้งขึ้นเพื่อศึกษาลำดับนิวคลีโอไทด์ทั้งหมดที่มีอยู่ในโครโมโซมของมนุษย์ จนกระทั่งเมื่อวันที่ 26 มิถุนายน พ.ศ. 2543 นักวิทยาศาสตร์ที่อยู่ในโครงการได้ร่วมกันประกาศแจ้งให้ทั่วโลกทราบถึงความสำเร็จในการหาลำดับของนิวคลีโอไทด์ทั้งหมดที่มีอยู่ในโครโมโซมของมนุษย์ ความสำเร็จอันยิ่งใหญ่ดังกล่าวนี้ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร Nature ฉบับวันที่ 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2544 และวารสาร Science ฉบับวันที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2544 โดยรายงานว่ามีโครโมโซม 32 คู่ มียีนอยู่ประมาณ 32,000-40,000 ยีน ซึ่งทำให้เกิดความประหลาดใจแก่นักวิทยาศาสตร์จำนวนมาก ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลของการศึกษา ยีนและโครโมโซมของมนุษย์มีมานานกว่า 50 ปี ทำให้คาดกันว่าโครโมโซมของมนุษย์น่าจะมียีนอย่างน้อยหนึ่งแสนยีน เมื่อเปรียบเทียบกับยีนของสัตว์ชั้นต่ำ เช่น หนอนตัวกลม (*Caenorhabditis elegans*) ซึ่งมี 18,000 ยีน และแมลงหวี่ (*Drosophila melanogaster*) ซึ่งมี 13,000 ยีน รายงานของโครงการพันธุกรรมของมนุษย์ทำให้นักวิทยาศาสตร์สงสัยเป็นอย่างยิ่งว่าการทำงานของร่างกายมนุษย์ รวมทั้งการควบคุมสมดุลต่างๆ ในร่างกายเกิดขึ้นได้อย่างไรด้วยจำนวนยีนเพียงเท่านี้ อย่างไรก็ตาม นักวิทยาศาสตร์จำนวนหนึ่งมีความเห็นว่า ถ้าเป็นเช่นนั้นจริง ส่วนที่ไม่ถูกถอดรหัส (non-coding region) ของยีนอาจมีบทบาทสำคัญในการเป็นส่วนควบคุมหรือกำกับดูแลการทำงานของยีน (regulatory element) ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องศึกษากันต่อไป ดังนั้นการหาลำดับนิวคลีโอไทด์ทั้งหมดของมนุษย์จึงเป็นเพียงความสำเร็จก้าวแรกของการที่จะเข้าใจและหาความหมายที่มีอยู่ทั้งหมดในชีวิตของมนุษย์ เปรียบเสมือนการเริ่มต้นของเรื่องราวชีวิต โดยในขั้นตอนต่อไปจะเป็นเรื่องของ การดำเนินชีวิต ซึ่งก็คือการศึกษาหน้าที่ของแต่ละยีน และเนื่องจากยีนทำหน้าที่เป็นรหัสของกรดอะมิโนในโปรตีน ผลผลิตโดยตรงจากการแสดงออกของยีน (gene expression) จึงได้แก่โปรตีนนั่นเอง ในการแสดงออกของยีน จะเริ่มต้นจากการถอดรหัส (transcription) ยีนซึ่งอยู่บนเส้นดีเอ็นเอ ผลลัพธ์ของการถอดรหัส คือ อาร์เอ็นเอ ชนิดที่เรียกว่า messenger RNA หรือเรียกย่อ ๆ ว่า mRNA (รูปที่ 1) พบว่า mRNA มักจะได้รับการดัดแปลงด้วยกระบวนการต่าง ๆ ให้เหมาะต่อการนำไปใช้งาน จากนั้น mRNA ที่ดัดแปลงแล้วจะถูกใช้เป็นแม่แบบสำหรับกระบวนการแปลรหัส (translation) จนได้ผลผลิต คือ เส้นพอลิเพปไทด์ (polypeptide chain) และเส้นพอลิเพปไทด์อาจถูกดัดแปลงเพิ่มเติมเพื่อให้ได้โปรตีนที่ทำ

¹ ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

หน้าที่เฉพาะในเซลล์หนึ่ง ๆ นอกจากนี้โปรตีนบางชนิดอาจจะมีความสัมพันธ์กับโปรตีนต่างชนิดได้ (Dove, 1999)



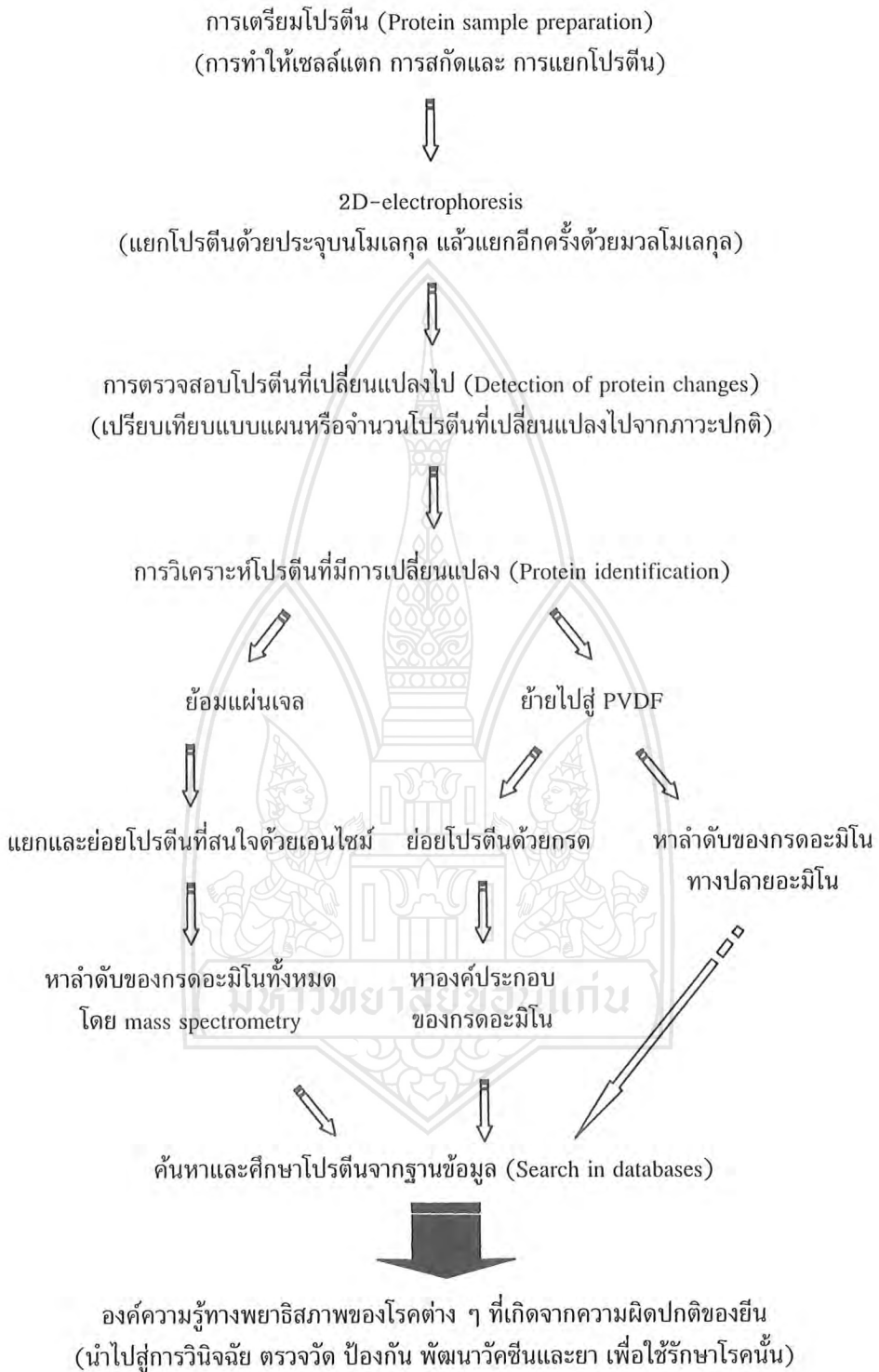
รูปที่ 1 แสดงภาพโดยรวมของการศึกษาทาง proteomics

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แสดงให้เห็นว่าหลังการถอดรหัสจีโนมมนุษย์เสร็จสิ้นลง งานสำคัญที่นักวิทยาศาสตร์ในสาขาต่างๆ ต้องศึกษาเพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจในหน้าที่ของแต่ละยีน จึงเป็นการศึกษาผลผลิตของยีน ซึ่งก็คือการศึกษาโปรตีนนั่นเอง และเป็นไปได้ว่าโปรตีนที่เป็นผลผลิตของยีนอาจจะมีจำนวนมากกว่าจำนวนยีนสองถึงสามเท่า ร่างกายมนุษย์จึงจะสามารถทำงานและควบคุมการทำงานได้ เพราะฉะนั้น การศึกษาโปรตีนที่เป็นผลผลิตของยีนจึงเป็นตัวสื่อความหมายที่แท้จริงของเซลล์และชีวิต ซึ่งการศึกษาโปรตีนที่เป็นผลผลิตของยีนนี้ เรียกว่า “proteomics”

คำว่า “proteomics” เป็นศัพท์ที่ค่อนข้างใหม่ในวงการชีวเคมีซึ่งบัญญัติขึ้นโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวออสเตรเลียชื่อ Marc Wilkins ในปี พ.ศ. 2537 นักวิทยาศาสตร์ท่านนี้ได้บัญญัติศัพท์ขึ้นมาสองคำ โดยคำแรก คือ “proteome” ซึ่งหมายถึง การศึกษาโปรตีนทั้งหมดที่มีอยู่ในเซลล์ในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง ส่วนคำที่สอง คือ “proteomics” หมายถึง การศึกษาถึงหน้าที่และสมบัติของโปรตีนที่มีอยู่ในเซลล์ในขณะนั้น โดยสรุปคำว่า “proteomics” จึงเป็นศาสตร์ของการแปลความหมายของรหัสลำดับนิวคลีโอไทด์ที่มีอยู่ในยีนไปเป็นผลผลิตของยีนนั้นซึ่งก็คือโปรตีน และยังรวมไปถึงการศึกษาหน้าที่และความสัมพันธ์ของโปรตีนต่างๆ ที่มีอยู่ในเซลล์นั้น (Roland, 2000)

การศึกษาหน้าที่และพฤติกรรมของโปรตีนที่เป็นผลผลิตของยีนนั้นมีความยากและไม่อาจจะคาดเดาได้จากลำดับนิวคลีโอไทด์ ซึ่งความยากในการศึกษาด้าน proteomics ก็คือ ยีนหนึ่งยีนที่ถูกแปลรหัสการแสดงออกไปเป็นโปรตีน อาจจะถูกควบคุมหรือกำหนดที่ระดับของการแปลรหัสหรือที่กระบวนการเปลี่ยนแปลงหลังการแปลรหัส (post-translational modification) เพื่อทำให้โปรตีนมีอายุและหน้าที่ที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงอายุของเซลล์นั้น รวมไปถึงการเดินทางไปทำหน้าที่ในส่วนต่างๆ ของเซลล์ ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมานี้เป็นการสร้างความหวังในการคาดเดาหน้าที่ของยีน เหตุผลที่สำคัญอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาโปรตีนทั้งหมดที่มีอยู่ในเซลล์ ซึ่งเป็นจุดมุ่งหมายของการศึกษา proteomics ก็คือ โรคหลายชนิดมีสาเหตุมาจากความผิดปกติของยีน การนำข้อมูลของโปรตีนที่เป็นผลผลิตของยีนมาใช้เพื่อบ่งบอกภาวะเริ่มต้นของการเกิดโรค อาจจะนำไปสู่การคิดค้นการวินิจฉัย ป้องกัน และการรักษาโรคต่างๆ ที่เกิดจากความผิดปกติของยีน และสุดท้ายเพื่อเป็นการพัฒนาวัคซีนและยาสำหรับนำไปใช้ในการรักษาโรคนั้น ๆ ต่อไป (Meri and Baumann, 2001)

การศึกษาด้าน proteomics ได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว เพราะมีเทคนิคที่ใช้ศึกษาอย่างจำเพาะและมีการพัฒนาโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการจัดการ การแปลผลการทดลอง การเก็บรวบรวมและสืบค้นข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น เทคนิค two-dimensional polyacrylamide gel electrophoresis (2D-PAGE) และ mass spectrometry ซึ่งเป็นวิธีที่ดีถือว่าเป็นเทคนิคพื้นฐานที่นิยมใช้ในการศึกษา proteomics นอกจากนี้ ยังมีเทคนิคต่างๆ ที่อยู่ระหว่างการพัฒนา เช่น microarrays ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้บอกระดับการแสดงออกของยีนหรือโปรตีน โดยอาจจะสรุปขั้นตอนการศึกษาทาง proteomics ดังแผนภาพที่ 2



รูปที่ 2 แสดงแผนผังของการศึกษา classical proteomics (Fountoulakis, 2001)

เทคนิคที่ใช้ในการศึกษา proteomics

1. 2D-PAGE (Two-dimensional gel electrophoresis) หลักการของ 2D-PAGE คือ โปรตีนในเซลล์จะถูกแยกครั้งแรกโดยอาศัยสมบัติที่แตกต่างกันของประจุ (pI) บนโมเลกุล หลังจากนั้นโปรตีนก็จะถูกแยกอีกครั้งโดยอาศัยสมบัติของขนาดของโมเลกุลที่แตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้เห็นแบบแผนของโปรตีนออกมาเป็นจุด (รูปที่ 1) การทำ 2D-PAGE ในขั้นตอนแรกที่แยกโปรตีนด้วย pI นั้น การสร้างเกรเดียนต์ของพีเอช จะทำได้โดยใช้สารตัวพาที่เรียกว่าแอมโฟไลต์ (ampholyte) ซึ่งเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและมีทั้งประจุบวกและลบอยู่ในโมเลกุล ระบบนี้โปรตีนจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับเกรเดียนต์ของพีเอชและโปรตีนจะหยุดการเคลื่อนที่เมื่อถึงบริเวณที่มีพีเอชตรงกับ pI ของโปรตีนนั้น (O'Farrell, 1975; Klose, 1975) ต่อมามีการพัฒนาใช้การตรึงเกรเดียนต์ของพีเอช (immobilized pH gradient, IPG) โดยใช้สารที่ชื่อว่า immobilines ซึ่งเป็นสารที่มีสมบัติเป็นบัฟเฟอร์ สามารถทำปฏิกิริยากับอะคริลาไมด์ทำให้เกิดสารโพลีเมอร์ร่วม (copolymerized) ขึ้นขณะเตรียมเจล ทำให้เกรเดียนต์ของพีเอชติดตรึงอยู่บนแผ่นเจล ในระบบนี้โปรตีนเท่านั้นที่เคลื่อนที่ไปในเจลตามประจุบนโมเลกุลของโปรตีน โปรตีนหยุดการเคลื่อนที่ที่พีเอชตรงกับ pI ใน IPG สำหรับการแยกด้วยขนาดโมเลกุลในขั้นตอนที่สองก็คือการแยกโดย sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) ในขั้นตอนนี้ SDS จะทำให้โปรตีนมีประจุเป็นลบแล้วแยกตามน้ำหนักโมเลกุล เมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนแรกที่แยกด้วย pI การทดลองจะง่ายต่อการควบคุม

ข้อดีของเทคนิค 2D-PAGE คือ สามารถแยกและมองเห็นจุดของโปรตีนได้มากกว่า 1,000 ชนิดต่อการแยกโปรตีนหนึ่งครั้ง แต่ข้อเสียของเทคนิคนี้คือจะมองเห็นเฉพาะโปรตีนที่มีปริมาณมากในเซลล์ ในกรณีที่โปรตีนมีความเข้มข้นต่ำ ต้องมีการทำให้เข้มข้นขึ้น อาจทำได้โดยการหมุนเหวี่ยง (centrifugation) การแยกโดยโครมาโทกราฟี (chromatographic technique) และการละลายโปรตีนในตัวทำละลายที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้ได้ผลการทดลองที่ดีขึ้น นอกจากนี้ 2D-PAGE ยังมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถใช้ได้กับโปรตีนที่มีน้ำหนักมากหรือน้อยเกินไป หรือโปรตีนที่มีค่า pI ต่ำหรือสูงกว่าที่กำหนดในเจล

2. Mass spectrometry เป็นเครื่องมือหรือเทคนิคที่สำคัญในขั้นตอนที่สองที่ใช้ในการศึกษา proteomics หลักการคือ ทำการแยกแล้ววิเคราะห์โปรตีนหรือเปปไทด์ที่อยู่ในรูปของการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) โดยเครื่องจะวัดสัดส่วนของมวลต่อประจุของไอออน (mass charge ratio, M/Z) ดังกล่าว เทคนิคนี้สามารถบอกการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนหลังการแปลรหัส (post-translational modifications) มีความไวสูงสามารถศึกษาโปรตีนในระดับถึง femtogram (10^{-15} g) โดยทั่วไปจะแสดงผลในรูปร้อยละสัมพัทธ์ (relative abundance (%)) กับ M/Z (mass charge ratio) (รูปที่ 1) ในขั้นตอนการศึกษา โปรตีนจะถูกตัดออกจากแผ่นเจลของ 2D-PAGE ต่อจากนั้นโปรตีนจะถูกย่อยในเจลโดย protease ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ trypsin แล้วนำชิ้นส่วนของเปปไทด์ที่ได้ไปศึกษาต่อโดยเทคนิค mass spectrometry โดยทั่วไปเทคนิคนี้จะมีการเปรียบเทียบกับน้ำหนักของเปปไทด์ที่วิเคราะห์ได้กับน้ำหนักของเปปไทด์ที่คำนวณได้ตามทฤษฎีที่มีอยู่ในฐานข้อมูล (peptide mass fingerprinting) วิธีการนี้จะทำให้ทราบข้อมูลของลำดับของกรดอะมิโนในโปรตีน (Henzel et al., 1993) ซึ่งสามารถนำไปค้นหาเปรียบเทียบกับโปรตีนต่างๆ ที่มีในฐานข้อมูล เพื่อจะบ่งชี้ว่าโปรตีนที่มีอยู่ในจุดของรูปแบบโปรตีนใน 2D-PAGE นั้นเป็นโปรตีนชนิดใด มีหน้าที่อะไรในเซลล์ ข้อดีของเทคนิคนี้คือ มีความไวและความแม่นยำสูง ข้อเสียคือ ในการวิเคราะห์บางครั้งให้ผลการทดลองที่

ไม่ชัดเจนและไม่สามารถบอกลำดับของกรดอะมิโนได้ (McLafferty, 2001)

ในปัจจุบันข้อมูลของโปรตีนในฐานข้อมูล SwissProt Sequence Database จะให้ข้อมูลของ peptide mass fingerprint และ รูปแบบของ 2D-PAGE ของโปรตีนทั้งจากมนุษย์และสิ่งมีชีวิตประเภทอื่น ๆ ซึ่งแสดงไว้ในเว็บไซต์ <http://us.expasy.org/ch2d> นอกจากนี้ยังมีภาคเอกชนเข้าร่วมมือเพื่อตั้งศูนย์รวบรวมข้อมูลจาก 2D-PAGE และ peptide mass fingerprint ทั้งยังมีการพัฒนาซอฟต์แวร์ต่างๆ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบของโปรตีนที่ได้จาก 2D-PAGE เช่น โปรแกรม Melanie 3 ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้ฟรีจากเว็บไซต์ของ ExPASy นอกจากนี้ ยังมีระบบฐานข้อมูลมากมายในอินเทอร์เน็ตที่ให้บริการสืบค้นการวิเคราะห์ต่างๆ ที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อรองรับการศึกษา proteome และ proteomics (Vihinen, 2001) ซึ่งได้สรุปไว้ในตารางที่ 1

3. Microarray เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อศึกษาการแสดงออกของยีนในจีโนม การแสดงออกของโปรตีนและการศึกษาการกลายพันธุ์ ตลอดจนการค้นหาใหม่ในเวลาอันรวดเร็ว โดยอาศัยการจับ DNA หรือ mRNA หรือโปรตีนไว้ในแผ่นค่าจูนซึ่งอาจเป็นแก้ว แล้วนำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ที่ติดฉลากไว้กับสารเรืองแสงมาทำไฮบริดเซชัน (hybridization) กับ mRNA DNA หรือโปรตีนนั้น ซึ่งวิธีนี้สามารถหาความเข้มของการแสดงออกของยีนในแต่ละสถานะของยีนได้ นอกจากนี้ยังสามารถศึกษาเกี่ยวกับ single nucleotide polymorphism (SNP) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนิวคลีโอไทด์หนึ่งตัวอาจเป็นส่วนสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการบ่งชี้ลักษณะทางพันธุกรรมของแต่ละบุคคลที่แตกต่างกัน microarray นี้มีประโยชน์อย่างมากต่อความเข้าใจในกลไกการก่อโรค ความสัมพันธ์ของการกลายพันธุ์กับโรคต่างๆ และความรู้ทางด้าน pharmacogenomics ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถศึกษาวิเคราะห์ยีนได้ทีละมากๆ ข้อเสียคือยังไม่มีมาตรฐานในการจัดเก็บรักษาและแปลผลข้อมูลเหมือน 2D-PAGE และ mass spectrometry

4. X-ray crystallography เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาโครงสร้างสามมิติของโปรตีนโดยอาศัยการตกผลึกโปรตีนในสภาพธรรมชาติ (native state) แล้วนำผลึกโปรตีนที่ได้มาผ่านด้วยแสง X-ray จากนั้นนำเอาการกระจายของรังสีที่เห็นจากแผ่นฟิล์มมาประมวลโดยคอมพิวเตอร์เพื่อบอกโครงสร้างของแต่ละอะตอมของโปรตีน เทคนิคด้านนี้มีประโยชน์ต่อการศึกษาความสัมพันธ์ของโครงสร้างและหน้าที่ของโปรตีน แต่ข้อเสียคือ เป็นเทคนิคที่แพงมาก ใช้เวลานานและต้องการความชำนาญสูงมาก อีกทั้งมีข้อจำกัดสำหรับโปรตีนบางชนิด

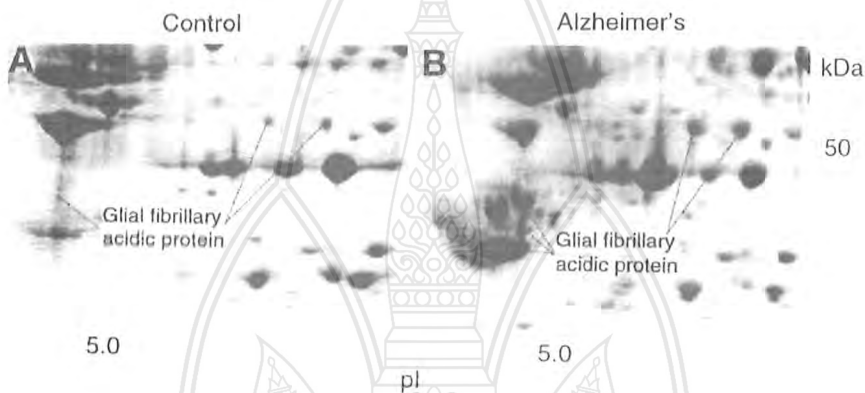
การประยุกต์ใช้ proteomics เพื่อการวินิจฉัยโรค

การวินิจฉัยโรคต่างๆ ได้ก่อนการเกิดอาการของโรค (preclinical diagnosis) มีความสำคัญอย่างมากต่อการวางแผนการรักษา ซึ่งในปัจจุบันเทคนิคทาง proteomics ได้ถูกนำมาใช้ในการตรวจวินิจฉัยโรคต่างๆ ที่ความผิดปกติทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับของโปรตีนในเซลล์ เช่น โรคมะเร็ง (cancer) โรคติดเชื้อต่างๆ (infectious diseases) โรคหัวใจ (heart disease) และโรคทางระบบประสาทส่วนกลาง (central nervous system disorders) เช่น อัลไซเมอร์ (alzheimer's disease) และ ดาวน์ซินโดรม (down syndrome) อัลไซเมอร์เป็นโรคที่มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง และพบว่าอาการผิดปกติเกิดจากการทำลายหรือสูญเสียเซลล์ประสาท ทำให้มีอาการหลงลืม โรคนี้มักจะเกิดในผู้สูงอายุ ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีวิธีการตรวจวัดผู้ป่วยโรคนี้เหมาะสม สำหรับดาวน์ซินโดรมเป็นโรคทางพันธุกรรมที่มีโครโมโซมผิดปกติ มีการทำลาย

ตารางที่ 1 เว็บไซต์ที่ใช้ในการสืบหาข้อมูลและการวิเคราะห์ลำดับกรดอะมิโน และนิวคลีโอไทด์

ชื่อของฐานข้อมูล (Name of data bank)	ชนิดของข้อมูล (Type of data)	ผู้ก่อตั้ง (Base)
Genbank www.ncbi.nlm.nih.gov/	รวบรวมข้อมูลของลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีนในมนุษย์และสิ่งมีชีวิตประเภทอื่นๆ	National Library of Medicine, Washington, D.C., U.S.A.
EMBL Data Library www.ebi.ac.uk/ebi_docs/embl_db/ebi/topembl.html	รวบรวมข้อมูลของลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีนในมนุษย์และสิ่งมีชีวิตประเภทอื่นๆ	European Bioinformatics Institute, Hinxton, U.K.
DNA Data Bank of Japan www.ddbj.nig.ac.jp/	รวบรวมข้อมูลของลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีนในมนุษย์และสิ่งมีชีวิตประเภทอื่นๆ	National Institute of Genetics, Mishima, Japan
Protein Identification Resource www-nbrf.georgetown.edu/pir/	รวบรวมข้อมูลของลำดับกรดอะมิโน โครงสร้างสามมิติของโปรตีน ที่มีในสิ่งมีชีวิตต่างๆ	Georgetown University, Washington, D.C., U.S.A.
Munich Information Center for Protein Sequences (MIPS) speedy.mips.biochem.mpg.de/	รวบรวมข้อมูลของลำดับกรดอะมิโนในสิ่งมีชีวิตต่างๆ	Max-Planck-Institute for Biochemie Martinsried, Germany
SWISS-PROT www.expasy.ch/sprot/	รวบรวมข้อมูลของลำดับกรดอะมิโน โครงสร้างสามมิติของโปรตีนที่มีในสิ่งมีชีวิต รวบรวมแบบแผนของจุดโปรตีนที่ได้จาก 2D-PAGE และข้อมูลของ mass spectrometry	Geneva, Switzerland and Hinxton, U.K.
Protein Data Bank www.rcsb.org	รวบรวมข้อมูลโครงสร้างสามมิติของโปรตีนในสิ่งมีชีวิตต่างๆที่ได้จาก X-ray crystallography NMR และ theoretical modeling	Rutgers University, New Jersey, U.S.A.
Nucleic Acid Data Bank Ndbserver.rutgers.edu/	รวบรวมโครงสร้างของ DNA และ RNA	Rutgers University, New Jersey, U.S.A.
BioMagResBank www.bmrb.wisc.edu/	รวบรวมข้อมูลโครงสร้างสามมิติของโปรตีนในสิ่งมีชีวิตต่างๆที่ได้จาก NMR technique	Madison, Wisconsin, U.S.A.

เซลล์ประสาททำให้มีอาการผิดปกติทางสมอง ซึ่งพยาธิสภาพของโรคนี้ยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แต่จากการศึกษาเปรียบเทียบเนื้อเยื่อสมองของคนไข้กลุ่มที่มีอาการผิดปกติทางสมองกับกลุ่มควบคุมในคนปกติ (control) โดยเทคนิค 2D-PAGE แล้วนำโปรตีนที่มีระดับความแตกต่างกันไปศึกษาต่อโดย mass spectrometry พบว่า จากแบบแผนของ 2D-PAGE ในกลุ่มคนที่เป็นโรคอัลไซเมอร์มีกลุ่มโปรตีนที่เรียกว่า glial fibrillary acidic protein สูงขึ้นถึงสี่เท่าจากกลุ่มคนปกติ (รูปที่ 3) ซึ่งถือได้ว่าโปรตีนตัวนี้เป็นตัวชี้แสดง (marker) ว่ามีการทำลายของเซลล์สมอง นอกจากนี้ ทั้งในกลุ่มคนไข้โรคอัลไซเมอร์และดาวนซินโดรมจะมีโปรตีนในกลุ่ม 14-3-3 γ และ 14-3-3 ϵ เพิ่มขึ้นประมาณ 1.5 เท่าจากคนปกติ โดยพบว่าโปรตีนกลุ่มนี้มีหน้าที่เกี่ยวกับการส่งสัญญาณประสาท



รูปที่ 3 แสดงรูปแบบของโปรตีนจากสมองบริเวณ parietal cortex lobe ของกลุ่มควบคุม (A) และของกลุ่มผู้ป่วยโรคอัลไซเมอร์(B) จากการวิเคราะห์ โดยวิธี 2D-PAGE (Fountoulakis, 2001)

การพบโปรตีนตัวนี้สูงขึ้นน่าจะแสดงว่ามีการตายของเซลล์สมอง (apoptosis) นอกจากนี้ยังพบว่าโปรตีนชนิด synaptosomal associated protein 25 kDa (snap-25) ที่เกี่ยวข้องกับจุดประสานประสาท (synaptic core complex) ของการส่งสารสื่อประสาท มีปริมาณลดลง การลดลงของ snap-25 อาจจะทำให้เกิดความเสียหายต่อการส่งสัญญาณประสาท นอกจากนี้การใช้เทคนิค proteomics ยังพบการเปลี่ยนแปลงของเอนไซม์ glycerol-3-phosphate dehydrogenase และกลุ่มโปรตีนที่สัมพันธ์กับ dihydropyrimidinase การศึกษาความสัมพันธ์ของโปรตีนเหล่านี้อาจนำไปสู่วิธีการรักษาและพัฒนาการตรวจวัดที่มีประสิทธิภาพที่กล่าวมาข้างต้นอาจเป็นเพียงบางตัวอย่างในการประยุกต์ใช้ proteomics ทางด้านโรคระบบประสาท ซึ่งในอนาคตอันใกล้นี้ จีโนมของสัตว์และพืชหลายๆ ชนิดจะได้รับการถอดรหัสให้สำเร็จลง อันจะนำไปสู่การประยุกต์ใช้ proteomics ในด้านต่างๆ ต่อไป

ถึงแม้ว่าจะมีการพัฒนาข้อมูลทางด้าน proteomics และ proteome อย่างรวดเร็ว เพราะมีวิธีการตรวจวัดและวิเคราะห์ที่ทันสมัย มีฐานข้อมูลต่างๆ ที่ใช้ในการสืบค้น เปรียบเทียบและวิเคราะห์มากมาย แต่เทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษายังต้องมีการพัฒนาเพื่อให้การศึกษาและวิเคราะห์ได้ข้อมูลที่ละเอียดถูกต้องมากที่สุด นอกจากนี้ การเปรียบเทียบข้อมูลจากฐานข้อมูลควรคำนึงถึงมาตรฐานของฐานข้อมูล เนื่องจากการเลือกใช้ฐานข้อมูลที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง สิ่งสำคัญที่นักวิทยาศาสตร์ต้องตระหนักอยู่เสมอคือการคิดค้นพัฒนาวิธีการที่จะนำข้อมูลที่จะเกิดขึ้นอีกมากมายหลังโครงการพันธุกรรมมนุษย์มาวางแผนใช้ให้ถูกต้องตามศีลธรรมและเกิดประโยชน์สูงสุดต่อมวลมนุษยชาติ

บรรณานุกรม

- Dove, A. (1999). Proteomics: translating genomics into products ? *Nature Biotechnology*. 17(3): 233-236.
- Fountoulakis, M. (2001). Proteomics: current technologies and applications in neurological disorders and toxicology. *Amino Acid*. 21:363-381.
- Henzel, W. J., Billeci, T. M., Stults, J. T., Wong, S. C., Grimley, C. and Watanabe, C. (1993). Identifying proteins from two-dimensional gels by molecular mass searching of peptide fragments in protein sequence databases. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 90(11):5011-5015.
- Klose, J. (1975). Protein mapping by combined isoelectric focusing and electrophoresis of mouse tissues. A novel approach to testing for induced point mutations in mammals. *Humangenetik*. 26(3):231-243
- McLafferty, F. W. (2001). Tandem mass spectrometric analysis of complex biological mixtures. *International Journal of Mass Spectrometry*. 212(1-3):81-87.
- Meri, S. and Baumann, M. (2001). Proteomics: posttranslational modifications, immune responses and current analytical tools. *Biomolecular Engineering*. 18(5):213-220.
- O'Farrell, P. H. (1975). High resolution two-dimensional electrophoresis of proteins. *J. Biol. Chem*. 250(10):4007-4021.
- Roland, K. (2000). Proteomics: concepts and perspectives. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*. 366:517-524.
- Vihinen, M. (2001). Bioinformatics in proteomics. *Biomolecular Engineering*. 18(5):241-248.

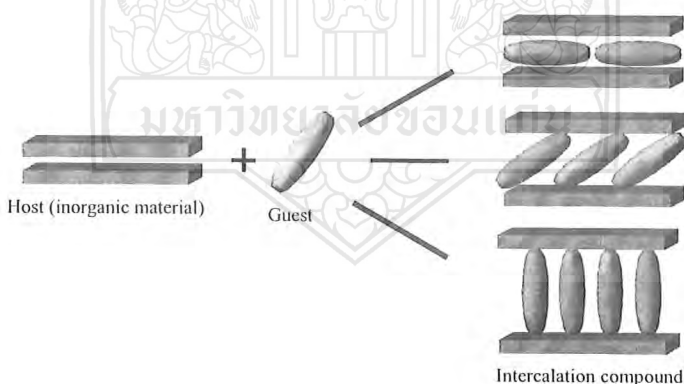
วัสดุนาโนคอมโพสิตและสารประกอบอินเตอร์คาเลชัน

นิธิตา เคารพพวงศ¹

บทนำ

การพัฒนาวัสดุผสมผสานระหว่างสารอนินทรีย์กับสารอินทรีย์ชนิดใหม่ เช่น วัสดุนาโนคอมโพสิต และสารประกอบอินเตอร์คาเลชัน กำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง ทั้งทางด้านวิทยาศาสตร์ และอุตสาหกรรม เพราะเป็นวิธีการหนึ่งที่จะควบคุมโครงสร้างและคุณสมบัติของวัสดุหรือสารประกอบใหม่ได้ (Ogawa and Kuroda, 1995; 1997) ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาการวิจัยด้านนาโนเทคโนโลยี*

ปฏิกิริยาอินเตอร์คาเลชัน หมายถึง ปฏิกิริยาการแทรกหรือใส่เกสต์ชนิดต่าง ๆ (guest species) เช่น ไอออน โมเลกุล หรือพอลิเมอร์ เข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นภายในโครงสร้าง (interlayer spaces) ของวัสดุโฮสต์ที่มีโครงสร้างเป็นชั้น ซึ่งในบทความนี้จะเรียกว่า วัสดุโฮสต์โฮสต์ (layered host materials) โดยลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของโฮสต์ไม่เปลี่ยนแปลง (Whittingham and Jacobson, 1982) (รูปที่ 1) สารประกอบที่ได้จากปฏิกิริยานี้เรียกว่า สารประกอบอินเตอร์คาเลชัน (intercalation compound) ซึ่งเป็น วัสดุนาโนคอมโพสิต (nanocomposite materials) ชนิดหนึ่ง (Schöllhorn, 1996) ดังรายละเอียดที่จะกล่าวต่อไป ด้วยวิธีการนี้ทำให้ได้สารใหม่ที่มีโครงสร้างในระดับไมโครเมตรหรือเล็กกว่าเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะส่งผลให้คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ เช่น การดูดซับ การเร่งปฏิกิริยา คุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางไฟฟ้า หรือคุณสมบัติอื่น ๆ เปลี่ยนแปลงไปด้วย



รูปที่ 1 ปฏิกิริยาอินเตอร์คาเลชัน

¹ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

* เทคโนโลยีใหม่ล่าสุดที่จะนำการปฏิวัติเทคโนโลยีในระบบปัจจุบันไปสู่การผลิตวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดขึ้นในกระบวนการพื้นฐานที่เล็กที่สุด และมีประสิทธิภาพสูงสุดในอนาคต

วัสดุอินทรีย์และธาตุที่นิยมใช้เป็นเลเยอร์โฮสต์ในปฏิกิริยาอินเตอร์คาเลชัน ได้แก่ เคลย์ (clays) แกรไฟต์ (graphite) เป็นต้น (ตารางที่ 1) เลเยอร์โฮสต์แต่ละชนิดจะมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกัน ทำให้ชนิดของเกสต์ที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเลเยอร์โฮสต์ชนิดนั้นๆ แตกต่างกันตามไปด้วย วิธีการเตรียมสารประกอบอินเตอร์คาเลชันจึงแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของโฮสต์และเกสต์ที่เข้าทำปฏิกิริยา

ตารางที่ 1 ตัวอย่างของเลเยอร์โฮสต์ที่สามารถเกิดสารประกอบอินเตอร์คาเลชัน
(Theng, 1974; Bruce and O'Hare, 1996)

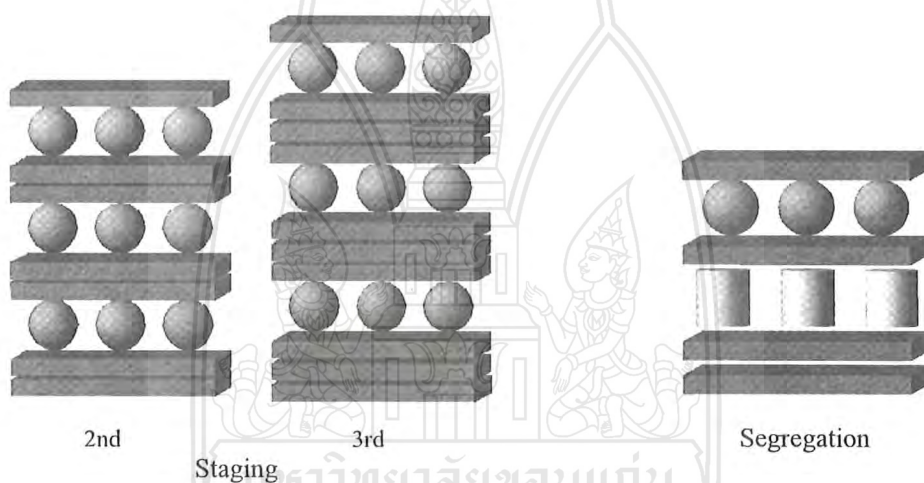
Layered host materials	Layer charge	Guest species
Elemental graphite	neutral	donor: alkali and alkaline earth metal, etc. Acceptor: halogen, metal chloride, acid (HNO_3 , H_2SO_4 , etc.)
Metal chalcogenides MX_2 (M = Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Mo, W; X = S, Se)	neutral	alkali and alkaline earth metal, amine, isocyanate, polymer, etc.
MPX_3 (M = Mg, V, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Cd, In; X = S, Se)	neutral	alkali and alkaline earth metal
Metal oxides and oxy-halides M_xO_y (MoO_3 , $\text{Mo}_{18}\text{O}_{52}$, V_2O_5 , LiNbO_2 , $\text{Li}_x\text{V}_3\text{O}_8$)	neutral	Py, RNC, RCN, RNO_2 , RCONH_2 , R_3PO , H^+
MOX (M = Ti, V, Cr, Fe; X = Cl, Br)	neutral	amine, alkali metal
titanates ($\text{K}_2\text{Ti}_4\text{O}_9$, KTiNbO_5 , $\text{H}_2\text{Ti}_4\text{O}_9$)	negative	methylviologen (MV^{2+}), $[\text{H}_2\text{TMPyP}]^{4+}$, CdS
Layered polysilicates	negative	alkylammonium ion, amide, polymer, etc.
Layered double hydroxides (LDH) $[\text{M}^{2+}_{1-x}\text{M}^{3+}_x(\text{OH})_2][\text{A}^{n-}]_{x/n} \cdot z\text{H}_2\text{O}$; $\text{M}^{2+} = \text{Mg}^{2+}, \text{Zn}^{2+}$; $\text{M}^{3+} = \text{Al}^{3+}, \text{Fe}^{3+}$	positive	amine, alcohol, polymer, etc.
Clay minerals smectites (montmorillonite, etc.)	negative	metal complex, polymer, etc.
kaolin (kaolinite, etc.)	neutral	alcohol, polymer, etc.

คุณลักษณะเฉพาะของปฏิกิริยาอินเตอร์คาล์เซชัน

ปฏิกิริยาอินเตอร์คาล์เซชันทำให้โครงสร้างภายในของเลเยอร์โฮสต์เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของเลเยอร์โฮสต์และเกสต์ที่เข้าทำปฏิกิริยา โดยทั่วไปเกสต์ที่เข้าทำปฏิกิริยาจะกระจายตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นภายในโครงสร้างของเลเยอร์โฮสต์ในลักษณะเดียวได้สม่ำเสมอทุกชั้น แต่ในบางครั้งการกระจายตัวของเกสต์ในเลเยอร์โฮสต์ของสารประกอบอินเตอร์คาล์เซชันอาจมีลักษณะที่ต่างออกไปบ้าง ซึ่งสรุปได้ ดังนี้

1. สเตจิง (Staging)

หมายถึงการเกิดปฏิกิริยาอินเตอร์คาล์เซชันโดยที่เกสต์จะเข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นภายในโครงสร้างของเลเยอร์โฮสต์เพียงบางชั้น ทำให้เลเยอร์โฮสต์เกิดการแยกตัวเพียงบางส่วนเท่านั้น (รูปที่ 2) ปฏิกิริยาในลักษณะนี้จะพบได้ในเลเยอร์ของแกรไฟต์, LDH และ ยิบไซด์ (gibbsite) เป็นต้น (Bruce and O'Hare, 1996)



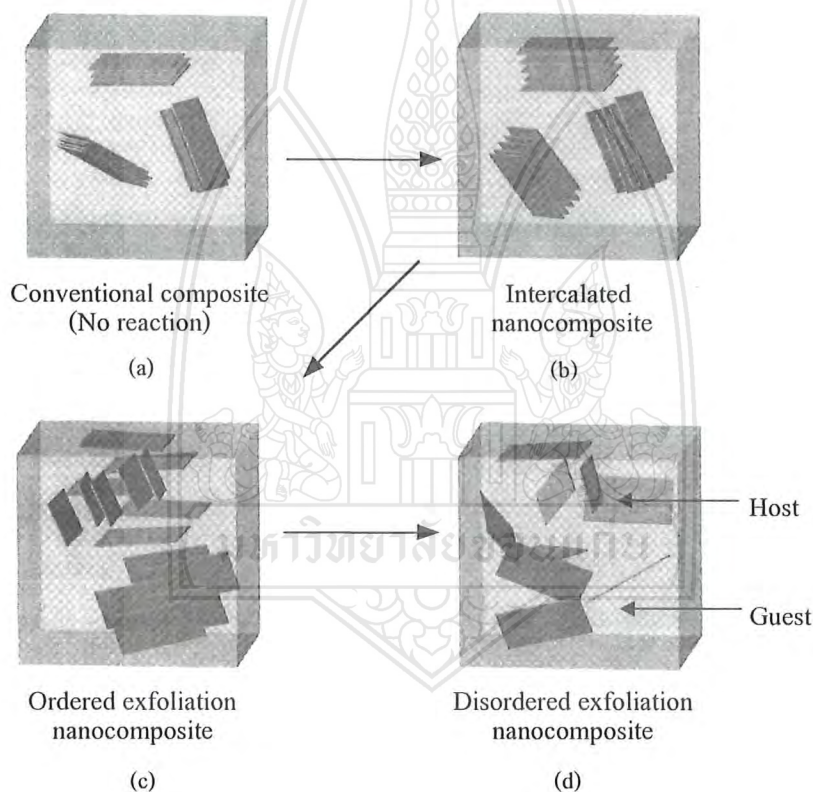
รูปที่ 2 ปฏิกิริยาอินเตอร์คาล์เซชันแบบสเตจิงและเซกรีเกชัน

2. เซกรีเกชัน (Segregation)

หมายถึง ปฏิกิริยาอินเตอร์คาล์เซชันที่โมเลกุลหรือไอออน (เกสต์) แทรกตัวเข้าไปในแต่ละชั้นภายในโครงสร้างของเลเยอร์โฮสต์ในลักษณะที่ต่างกันไป (รูปที่ 2) แม้ว่าจะยังไม่ทราบลักษณะของการเกิดปฏิกิริยาอินเตอร์คาล์เซชันแบบเซกรีเกชันของสารประกอบอินเตอร์คาล์เซชัน แต่คาดว่าจะเกิดจากการกระจายตัวของประจุที่ต่างกันในแต่ละชั้นของโครงสร้างของเลเยอร์โฮสต์หรืออาจจะเกิดจากอันตรกิริยาอย่างอ่อน ๆ ระหว่างเกสต์ (Bruce and O'Hare, 1996)

3. เอกซ์โฟเลียชัน (Exfoliation)

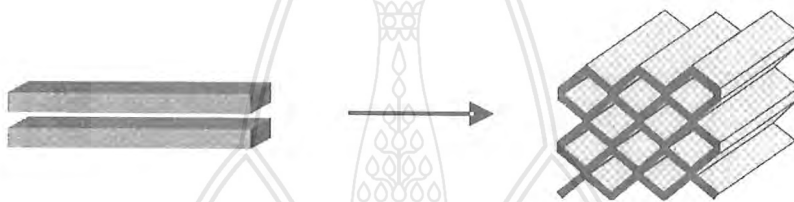
หมายถึง ปฏิกิริยาอินเตอร์คาเลชันที่เกิดจากการที่เลเยอร์ไฮดรอกไซด์บางชนิด เช่น สเมคไทต์ (smectites) และ V_2O_5 ยอมให้โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่มากเข้าไปกระจายตัวแทรกระหว่างเลเยอร์ได้ และทำให้ช่องว่างภายในโครงสร้างของเลเยอร์ไฮดรอกไซด์เกิดการขยายตัวได้มาก หรือเกิดการกระจายตัวของไฮดรอกไซด์ในเกสต์ (รูปที่ 3c-d) สารประกอบที่เกิดในลักษณะนี้จึงจัดเป็นวัสดุนาโนคอมโพสิตที่แท้จริง โดยจะแสดงคุณสมบัติที่แตกต่างไปจากสารประกอบอินเตอร์คาเลชัน (รูปที่ 3b) ที่เลเยอร์ไฮดรอกไซด์เกิดการขยายตัวของช่องว่างภายในโครงสร้างไม่มากนัก ทำให้สารประกอบนี้มีลักษณะพิเศษคือสามารถทำเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ ได้ง่าย วัสดุนาโนคอมโพสิตที่เกิดจากเอกซ์โฟเลียชัน เช่น สเมคไทต์-ไนลอน 6 (smectites-nylon 6) ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลดีกว่าไนลอน-6 มาก (Kojima, 1993) และสเมคไทต์-อีพอกซี (smectites-epoxy) ที่สามารถทนต่อแรงดึงได้ดี (LeBaron et al., 1999)



รูปที่ 3 ปฏิกิริยาอินเตอร์คาเลชันแบบเอกซ์โฟเลียชัน

4. การเปลี่ยนโครงสร้าง (Conversion of layered structure)

นอกจากปฏิกิริยาอินเตอร์คาเลชันจะทำให้เกิดการขยายตัวของเลเยอร์โฮสต์ในลักษณะต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว ยังพบว่า ปฏิกิริยาอินเตอร์คาเลชันระหว่างไอออนอัลคิลแอมโมเนียม (alkylamomium ion) กับคานไมต์ (kanemite, $\text{NaHSi}_2\text{O}_5 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเป็นเลเยอร์ซิลิเกตชนิดหนึ่ง ทำให้คานไมต์เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจากโครงสร้างที่เป็นเลเยอร์ไปเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นช่องว่างขนาดเล็ก ซึ่งเรียกว่าวัสดุเมโซพอร์ส (mesoporous materials) ได้ โดยเกิดการโค้งงอและการรวมตัวของเลเยอร์โฮสต์ของสารประกอบอินเตอร์คาเลชัน kanemite-alkylamomium แล้วทำให้เกิดเป็นโครงสร้างใหม่ที่มีลักษณะเป็นช่องว่างขนาดเล็ก (รูปที่ 4) โดยที่ขนาดของช่องว่างจะขึ้นอยู่กับความยาวของโซ่อัลคิล (Yanagisawa et al., 1990; Inagaki et al., 1993)

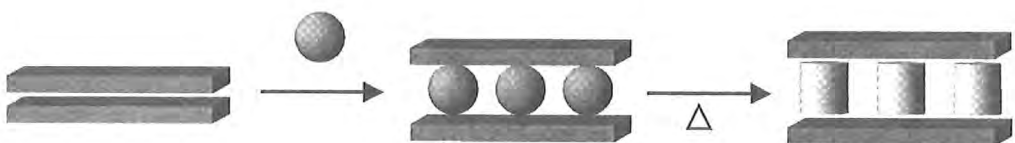


รูปที่ 4 การเกิดวัสดุเมโซพอร์ส

5. ปฏิกิริยาฟิลลาริง (Pillaring reaction)

หมายถึง ปฏิกิริยาอินเตอร์คาเลชันของเกสต์ที่เป็นไอออนบวกขนาดใหญ่เข้าไปแทรกในโครงสร้างของเคลย์บางชนิด และให้ความร้อนแก่ไอออนที่อยู่ภายในโครงสร้าง ทำให้ไอออนนั้นเปลี่ยนโครงสร้างเป็นแท่ง (pillar) เรียงตัวภายในชั้นของโครงสร้าง และเกิดเป็นช่องว่างขนาดเล็กขึ้นอย่างถาวร (รูปที่ 5) เรียกว่า ฟิลลาร์เคลย์ (pillared clay) ซึ่งเป็นวัสดุไมโครพอร์ส (microporous materials) ชนิดหนึ่ง ตัวอย่างของสารที่สามารถเกิดเป็นแท่งภายในโครงสร้าง ได้แก่ อะลูมิเนียมคลอไรด์ไฮเดรต (aluminium chlorohydrate, $[\text{Al}_3\text{O}_4(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}]^{7+}$)

ฟิลลาร์เคลย์สามารถนำไปใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ที่มีรูปร่างจำเพาะ ซึ่งคุณสมบัตินี้เหมาะแก่การใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของโมเลกุลน้ำมันปิโตรเลียมให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการใช้งาน (Bruce and O'Hare, 1996)

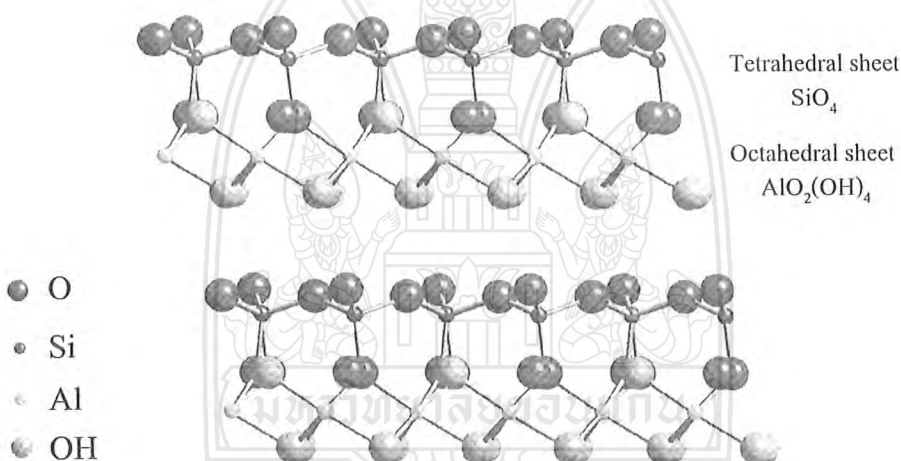


รูปที่ 5 การเกิดฟิลลาร์เคลย์

สารประกอบอินเตอร์คาเลชันของเกาลีไนต์

เกาลีไนต์ (kaolinite, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) หรือดินขาวเป็นเคลย์มีเนอรอลชนิดหนึ่ง ที่สามารถพบได้ในแถบภาคเหนือและบางจังหวัดทางภาคใต้ของประเทศไทย ในปัจจุบันได้มีการนำเกาลีไนต์ที่ผลิตได้ภายในประเทศไปใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวาง ดังนั้นการศึกษาการเกิดสารประกอบอินเตอร์คาเลชันของเกาลีไนต์จึงน่าจะเป็นแนวทางในการพัฒนาการวิจัยเกาลีไนต์อีกแนวทางหนึ่งที่จะก่อให้เกิดผลดีต่อการพัฒนาเทคโนโลยีของประเทศได้ในอนาคต

โครงสร้างของเกาลีไนต์ประกอบด้วยชั้นซิลิเกต (silicate sheet) และชั้นยิบไซต์ (gibbsite sheet) ที่รวมตัวกันในอัตราส่วน 1:1 เรียกว่าเลเยอร์ชนิด 1:1 (รูปที่ 6) และแต่ละชั้นของโครงสร้างของเกาลีไนต์จะเชื่อมต่อกันโดยมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) ของชั้นยิบไซต์สร้างพันธะไฮโดรเจนกับอะตอมของออกซิเจนที่อยู่บริเวณผิวของชั้นซิลิเกตที่อยู่ชั้นถัดไป ทำให้เกาลีไนต์เกิดปฏิกิริยาอินเตอร์คาเลชันได้ค่อนข้างยากมากเมื่อเปรียบเทียบกับเคลย์ชนิดอื่น (Theng, 1974; Whittingham and Jacobson, 1982) โครงสร้างแต่ละชั้นของเกาลีไนต์จะมีความหนาประมาณ 0.72 นาโนเมตร และเลเยอร์ของเกาลีไนต์มีลักษณะเป็นกลางทางไฟฟ้า แต่ที่จริงแล้วเกาลีไนต์จะมีประจุอยู่บ้างเล็กน้อย โดยประจุนั้นเกิดจากการที่ไอออนในโครงสร้างถูกแทนที่ด้วยไอออนอื่น



รูปที่ 6 โครงสร้างของเกาลีไนต์

การเตรียมสารประกอบอินเตอร์คาเลชันของเกาลีไนต์ทำได้ยาก เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนภายในโครงสร้าง แม้ว่าจะมีการพบหลักฐานการเกิดสารประกอบอินเตอร์คาเลชันของเกาลีไนต์กับสารอินทรีย์ตั้งแต่สมัยจีนโบราณก็ตาม แต่เริ่มมีรายงานการเตรียมสารประกอบอินเตอร์คาเลชันอย่างจริงจังในปี ค.ศ. 1961 โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Wada ซึ่งพบว่าเกลือของสารอนินทรีย์ เช่น โพแทสเซียมอะซิเตต (potassium acetate) สามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นภายในโครงสร้างของเกาลีไนต์ได้ และทำให้ชั้นโครงสร้างของเกาลีไนต์มีความหนาเพิ่มขึ้นจาก 0.72 นาโนเมตร เป็น 1.42 นาโนเมตร จากการรายงานผลการวิจัย

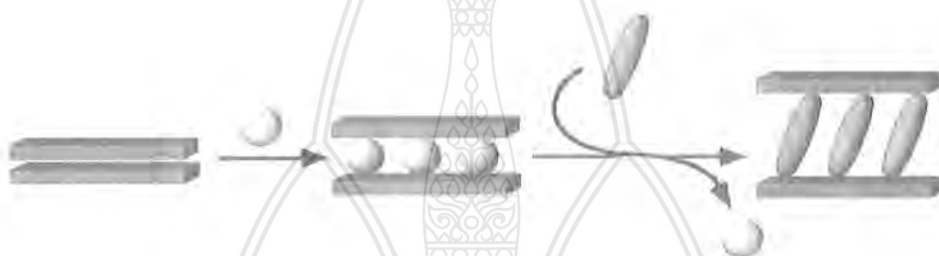
ของ Wada ในครั้งนั้น จึงเป็นจุดเริ่มต้นของการเตรียมและศึกษาคุณสมบัติของสารประกอบอินเตอร์คาเลชันของเกลีไนต์ขึ้นมาอย่างจริงจัง

การเตรียมสารประกอบอินเตอร์คาเลชันของเกลีไนต์ แบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ

(1) การทำปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างเกลีไนต์กับสารอินทรีย์ (เกสต์) ในสถานะของเหลวหรือทำปฏิกิริยากับสารละลายเข้มข้นของสารอินทรีย์

(2) การทำปฏิกิริยาโดยใช้สารเอนเทรนนิ่ง (entraining agent) ซึ่งเป็นสารที่ช่วยให้เกสต์สามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นภายในโครงสร้างของเกลีไนต์ได้ เช่น ไฮดราซีน (hydrazine)

(3) การทำปฏิกิริยาอินเตอร์คาเลชันแบบแทนที่ โดยการแทนที่สารตัวกลางที่สามารถเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างชั้นภายในโครงสร้างของเกลีไนต์ได้ด้วยเกสต์ (guest displacement method) ที่สนใจ (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 ปฏิกิริยาอินเตอร์คาเลชันแบบแทนที่

การเกิดปฏิกิริยาแบบที่ 1 เนื่องจากการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างชั้นภายในโครงสร้างของเกลีไนต์ ทำให้มีเพียงโมเลกุลของสารอินทรีย์ขนาดเล็ก เช่น ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (dimethyl sulfoxide, DMSO) และ เอ็น-เมทิลฟอร์มามิด (N-methylformamide, NMF) เท่านั้นที่สามารถเกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับเกลีไนต์ได้ (Komori et al., 1999a) ส่วนปฏิกิริยาแบบที่ 2 โดยการใช้สารละลายไฮดราซีน 24% วิธีนี้จะช่วยให้สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้นสามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นภายในโครงสร้างของเกลีไนต์ได้ก็จริง แต่การเกิดปฏิกิริยาแบบนี้มีข้อเสียคือ หลังการเกิดปฏิกิริยาอินเตอร์คาเลชันจะต้องมีการกำจัดไฮดราซีนออกโดยการให้ความร้อนแก่สารประกอบอินเตอร์คาเลชันที่เตรียมได้ (Weiss et al., 1966) ปฏิกิริยาแบบที่ 3 หรือปฏิกิริยาการแทนที่สารตัวกลาง จัดเป็นวิธีการที่ดีที่สุดสำหรับการเตรียมสารประกอบอินเตอร์คาเลชันของเกลีไนต์กับสารอินทรีย์ (เกสต์) สารตัวกลางที่ใช้สำหรับการเตรียมสารประกอบอินเตอร์คาเลชันของเกลีไนต์โดยปฏิกิริยาการแทนที่แสดงไว้ในตารางที่ 2 (Komori et al., 1998; 1999a-d; 2000a-b)

ตารางที่ 2 ตัวอย่างสารตัวกลางและเกสต์ชนิดต่าง ๆ ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาการแทนที่ในเกล็นด์

Intermediates	Guest species
NMF or DMSO	ethylene glycol 2-pyrrolidone, 2-piperidone ammonium acetate acrylamide acrylic acid poly(ethylene glycol) aminoalcohol 1-methyl-2-pyrrolidone methanol
ammonium acetate	alkylamines ammonium propionate acrylonitrile vinyl-2-pyrrolidone β -alanine
hydrated kaolinite (fluorinated)	pyridine alcohol
ammonium propionate	1,6-diaminohexane quaternary amine
methanol	alkylamines water ϵ -caprolactam <i>p</i> -nitroaniline poly(vinylpyrrolidone) 3-aminopropyltriethoxysilane

สารประกอบอินเตอร์คาเลชันของกาลิไนต์กับพอลิเมอร์

การเตรียมสารประกอบอินเตอร์คาเลชันกาลิไนต์-พอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ หรือ มอนอเมอร์ที่เข้าทำปฏิกิริยากับกาลิไนต์ ซึ่งวิธีการเตรียมสามารถแบ่งได้อย่างคร่าว ๆ เป็น 2 วิธี คือ

1. ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันภายใน (*In situ* polymerization)

วิธีการนี้เตรียมโดยการทำปฏิกิริยาอินเตอร์คาเลชันระหว่างกาลิไนต์กับมอนอเมอร์ก่อน ตามด้วยการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์ภายในโครงสร้างของกาลิไนต์

Sugahara et al. (1988; 1990; 1992) ได้รายงานการเตรียมสารประกอบอินเตอร์คาเลชัน กาลิไนต์-พอลิเมอร์ โดยวิธีการนี้ ซึ่งได้แก่

- kaolinite-poly(acrylonitrile) (PAN) เตรียมโดยใช้ kaolinite-ammonium acetate เป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยากับอะคริโลไนไตรล์ (acrylonitrile) ตามด้วยการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของอะคริโลไนไตรล์ภายในโครงสร้างของกาลิไนต์ ที่ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้เป็นพอลิอะคริโลไนไตรล์

- kaolinite-poly(acrylamide) เตรียมได้โดยใช้ kaolinite-NMF เป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยาอินเตอร์คาเลชันกับ 10% อะคริลาไมด์ (acrylamide) แล้วให้ความร้อนแก่สารประกอบอินเตอร์คาเลชัน kaolinite-acrylamide ที่ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- kaolinite-poly(vinylpyrrolidone) เตรียมได้จากปฏิกิริยาอินเตอร์คาเลชันระหว่าง kaolinite-ammonium acetate กับ เอ็น-ไวนิล-2-ไพร์โรลิโดน (*N*-vinyl-2-pyrrolidone, VP) แล้วทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน VP ในโครงสร้างของกาลิไนต์ โดยการให้ความร้อน ที่ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

อย่างไรก็ตาม ใช่ว่ามอนอเมอร์ที่อยู่ระหว่างชั้นภายในโครงสร้างจะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแล้วให้สารประกอบอินเตอร์คาเลชันกาลิไนต์-พอลิเมอร์ได้ทุกตัว เช่น กรดอะคริลิก (acrylic acid) ที่อยู่ระหว่างชั้นภายในโครงสร้างของกาลิไนต์ ไม่อาจเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันต่อไปได้ ที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุล DMSO ซึ่งเป็นสารตัวกลางที่ตกค้างในการเกิดปฏิกิริยาอินเตอร์คาเลชันอาจเป็นตัวไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของกรดอะคริลิก ก็เป็นไปได้

2. ปฏิกิริยาอินเตอร์คาเลชันโดยตรง (Direct intercalation reaction)

วิธีการนี้อาศัยการทำปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างกาลิไนต์กับพอลิเมอร์ที่สนใจ เช่น การเตรียม kaolinite-poly(ethylene glycol) (มวลโมเลกุล = 3400 และ 1000) โดยการแทนที่ DMSO ใน kaolinite-DMSO เนื่องจากพอลิเอทิลีนไกลคอล (poly(ethylene glycol)) ทำให้ชั้นของโครงสร้างของกาลิไนต์ขยายตัวได้เพียง 0.4 นาโนเมตร จึงคาดว่าพอลิเมอร์ชนิดนี้จะเรียงตัวเป็นแบบชั้นเดียว ในโครงสร้างของกาลิไนต์ โดยสายพอลิเมอร์จะขนานในแนวระนาบของเลเยอร์ของกาลิไนต์

Komori et al. (1998; 1999a-d; 2000a-b) ยังได้รายงานความสำเร็จในการเตรียมสารประกอบอินเตอร์คาเลชันของกาลิไนต์กับแกสต์อีกหลายชนิด เช่น อัลคิลามีน (alkylamine) น้ำเอพไซลอน-คาโพรแลคแทม (ϵ -caprolactam) พารา-ไนโตรอะนิลีน (*p*-nitroaniline) พอลิไวนิลไพร์โรลิโดน

(poly(vinylpyrrolidone)) 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีซิลาน (3-aminopropyltriethoxysilane) โดยอาศัยปฏิกิริยาการแทนที่เมทานอลในสารประกอบ kaolinite-methanol และจากผลการวิจัยทั้งหมด นักวิจัยกลุ่มนี้สรุปว่า เกล็ดในดินซึ่งเป็นเลเยอร์ที่ไม่เกิดการขยายตัวในน้ำ และเคยเชื่อกันว่าเกิดปฏิกิริยาอินเตอร์คาเลชันได้ยากนั้นสามารถที่จะใช้เป็นเลเยอร์โฮสต์ที่ดีในการเกิดปฏิกิริยาอินเตอร์คาเลชันได้เช่นกัน นอกจากนี้แล้วคาดว่าสารประกอบเกล็ดไนต์-พอลิเมอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้ดี เพราะมีความเป็นผลึกสูง มีอัตราส่วนของการเกิดพอลิเมอร์ในนาโนเลเยอร์ซิลิกेटสูง และพอลิเมอร์จะกระจายตัวอยู่ภายในสิ่งแวดล้อมที่มีขอบเขตจำกัด

ปฏิกิริยาอินเตอร์คาเลชันของเกล็ดไนต์สามารถใช้เตรียมสารประกอบอินเตอร์คาเลชันและวัสดุนาโนคอมโพสิตที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านนาโนเทคโนโลยี หรืองานด้านอื่นๆ เช่น ปฏิกิริยาที่ต้องการสารเร่งปฏิกิริยาที่มีความจำเพาะสูง ปฏิกิริยาการเตรียมสารอินทรีย์โดยการเลือกสรรทางสเตอริโอ และการก่อตัวของโมเลกุลที่จำเพาะด้วยวิธีการทางเคมี โฟโตเคมี และทางไฟฟ้า เป็นต้น

บรรณานุกรม

- Bruce, D.W. and O'Hare, D. (1996). *Inorganic Materials*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons.
- Inagaki, S., Fukushima, Y. and Kuroda, K. (1993). Synthesis of highly ordered mesoporous materials from a layered polysilicate. *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* 680-682.
- Kojima, Y., Usuki, A., Kawasumi, M., Okada, A., Kurauchi, T. and Kamigaito, O.J. (1993). Synthesis of nylon 6-clay hybrid by montmorillonite intercalated with ϵ -caprolactam. *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.* 31:983-986.
- Komori, Y., Sugahara, Y. and Kuroda, K. (1998). A kaolinite-NMF-methanol intercalation compound as a versatile intermediate for further intercalation reaction of kaolinite. *J. Mater. Res.* 13: 930-934.
- Komori, Y., Sugahara, Y. and Kuroda, K. (1999a). An acentric arrangement of *p*-nitroaniline molecules between the layers of kaolinite. *Chem. Commun.* 2253-2254.
- Komori, Y., Sugahara, Y. and Kuroda, K. (1999b). Direct intercalation of poly(vinylpyrrolidone) into kaolinite by a refined guest displacement method. *Chem. Mater.* 11:3-6.
- Komori, Y., Sugahara, Y. and Kuroda, K. (1999c). Intercalation of alkylamines and water into kaolinite with methanol kaolinite as an intermediate. *Appl. Clay Sci.* 15:241-252.
- Komori, Y., Sugahara, Y. and Kuroda, K. (1999d). Thermal transformation of a kaolinite-poly(acrylamide) intercalation compound. *J. Mater. Chem.* 9:3081-3085.
- Komori, Y., Enoto, H., Takenawa, R., Hayashi, S., Sugahara, Y. and Kuroda, K. (2000a). Modification of the interlayer surface of kaoline with methoxy groups. *Langmuir.* 16:5506-5508.
- Komori, Y., Matsumura, A., Itagaki, T., Sugahara, Y. and Kuroda, K. (2000b). Preparation of a kaolinite- ϵ -caprolactam intercalation compound. *Clay Sci.* 11:47-55.

- LeBaron, P.C., Wang, Z. and Pinnavaia, T.J. (1999). Polymer-layered silicate nanocomposites: an overview. *Appl. Clay Sci.* 15:11-29.
- Ogawa, M. and Kuroda, K. (1995). Photofunctions of intercalation compounds. *Chem. Rev.* 95: 399-438.
- Ogawa, M. and Kuroda, K. (1997). Preparation of inorganic-organic nanocomposites through intercalation of organoammonium ions into layered silicates. *Bull. Chem. Soc. Jpn.* 70:2593-2618.
- Schöllhorn, R. (1996). Intercalation systems as nanostructured functional materials. *Chem. Mater.* 8: 1747-1757.
- Sugahara, Y., Satokawa, S., Kuroda, K. and Kato, C. (1988). Evidence for the formation of interlayer poly(acrylonitrile) in kaolinite. *Clays Clay Miner.* 36:343-348.
- Sugahara, Y., Satokawa, S., Kuroda, K. and Kato, C. (1990). Preparation of a kaolinite-poly (acrylamide) intercalation compound. *Clays Clay Miner.* 37:143-150.
- Sugahara, Y., Sugiyama, T., Nagayama, T., Kuroda, K. and Kato, C. (1992). Clay-organic nanocomposites: preparation of a kaolinite-poly(vinylpyrrolidone) intercalation compound. *J. Ceram. Soc. Jpn.* 100:413-416.
- Theng, B.K.G. (1974). *The Chemistry of Clay-Organic Reactions*. London: Adam Hilger.
- Wada, K. (1961). Lattice expansion of kaolin minerals by treatment with potassium acetate. *Am. Miner.* 46:78-91.
- Weiss, A., Thielepape, W. and Orth, H. (1966). Neue kaolinit-einlagerungsverbindungen. *Proc. Int. Clay Conf., Jerusalem.* 1:277-293.
- Whittingham, M.S. and Jacobson, A.J. (eds.). (1982). *Intercalation Chemistry*. New York: Academic Press.
- Yanagisawa, T., Shimizu, T., Kuroda, K. and Kato, C. (1990). The preparation of alkyltrimethylammonium kanemite complexes and their conversion to mesoporous materials. *Bull. Chem. Soc. Jpn.* 63:988-992.

การเปลี่ยนสภาพของเซลล์รากเหง้าจากตัวอ่อน

ชูชาติ กมลเลิศ¹

บทนำ

แนวทางการรักษาโรคต่าง ๆ ที่ในปัจจุบันยังไม่สามารถรักษาให้หายได้นั้น นักวิทยาศาสตร์กำลังมีแนวคิดที่จะนำเอาวิธีการรักษาโรคที่เรียกว่า เซลล์บำบัด (cell therapies) หรือการเปลี่ยนถ่ายเซลล์ (cell transplantation) เข้ามาใช้ ซึ่งวิธีการรักษาโรคแบบนี้ทำได้โดยการเปลี่ยนถ่ายเซลล์ที่ปกติเข้าไปแทนที่เซลล์ที่ทำงานผิดปกติอันเป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคต่าง ๆ ขึ้น เซลล์บำบัดกำลังเป็นเทคนิคที่ได้รับความสนใจจากวงการแพทย์เป็นอย่างมาก และในปัจจุบันก็ได้มีการนำมาใช้ในการรักษาโรคบางชนิดอยู่แล้ว เช่น การเปลี่ยนถ่ายเซลล์รากเหง้าในไขกระดูกในผู้ป่วยที่เป็นโรคมะเร็งเม็ดเลือดขาว (Gorin, 2002; McKay, 2000) นอกจากนั้นเทคนิคการรักษาด้วยเซลล์บำบัดยังเป็นที่คาดหวังว่าจะสามารถนำมาใช้ในการรักษาโรคอีกหลายชนิดที่ปัจจุบันยังไม่มีวิธีการรักษาให้หายขาดได้ ไม่ว่าจะเป็นโรคเบาหวาน โรคพาร์กินสัน โรคอัลไซเมอร์ โรคทางพันธุกรรมต่าง ๆ ฯลฯ (McKay, 2000) อย่างไรก็ตาม เทคนิคการรักษาโรคด้วยวิธีดังกล่าวนี้ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเด็นของการหาแหล่งของเซลล์ที่ทำงานปกติที่จะนำไปใช้ในการเปลี่ยนถ่ายเซลล์ เนื่องจากร่างกายของคนหรือสัตว์ก็ตามจะมีปฏิกิริยาปฏิเสธหรือต่อต้านเซลล์เนื้อเยื่อ หรืออวัยวะที่ไม่ใช่ของตนเอง ซึ่งทำให้การเปลี่ยนถ่ายเซลล์ เนื้อเยื่อ หรืออวัยวะเกิดความล้มเหลวและอาจเป็นอันตรายถึงชีวิตของผู้ป่วยได้ การให้ยากดภูมิคุ้มกัน (immunosuppressive drugs) พบว่าได้ก่อให้เกิดผลที่ไม่พึงประสงค์ หรือผลข้างเคียงต่อร่างกายตามมาหลายประการ (Odorico et al., 2001) ดังนั้น เพื่อเป็นแนวทางแก้ไขปัญหานี้ นักวิทยาศาสตร์จึงได้มีการศึกษาถึงการที่จะนำเอาเทคนิคการทำโคลนนิ่งมาสร้างเซลล์รากเหง้าจากตัวอ่อน (embryonic stem cells, ESC) มาเป็นแหล่งของเซลล์ที่จะใช้ในการไปเปลี่ยนถ่ายให้กับผู้ป่วยเพื่อลดปัญหาการต่อต้านสิ่งแปลกปลอมของร่างกาย เช่นในกรณีของผู้ป่วยโรคเบาหวานที่เกิดจากการทำงานผิดปกติของ islets cells จากตัวอ่อนที่ไม่สามารถสร้างฮอร์โมนอินซูลินมาควบคุมระดับน้ำตาลในกระแสเลือดให้เป็นปกติได้ ก็จะมีการนำเอาเซลล์จากร่างกายของผู้ป่วยมาทำโคลนนิ่งเพื่อให้ได้เซลล์รากเหง้าที่จะนำไปสร้างเป็น islets cells ต่อไป (Watt and Hogan, 2000) อย่างไรก็ตามมีปัญหาว่า จะมีวิธีการอย่างไรที่จะควบคุมให้มีการเปลี่ยนสภาพไปเป็น islets cells ที่จะนำไปใช้ในการเปลี่ยนถ่ายเซลล์ได้ทั้งหมด เพราะที่ผ่านมายังไม่ปรากฏว่ามีรายงานใดที่แสดงให้เห็นว่านักวิทยาศาสตร์สามารถควบคุมการเปลี่ยนสภาพของเซลล์รากเหง้าจากตัวอ่อนไปเป็นเซลล์เฉพาะชนิดเพียงชนิดเดียวได้เลย

¹ ภาควิชากายวิภาคศาสตร์ คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

ชีววิทยาของเซลล์รากเหง้าจากตัวอ่อน

เซลล์รากเหง้าจากตัวอ่อน เป็นเซลล์ที่ยังไม่มีการเปลี่ยนสภาพ (undifferentiated cells) ไม่เป็นเซลล์จำเพาะ (unspecialized cells) มีคุณสมบัติที่สำคัญประการแรก คือ สามารถแบ่งตัวเพิ่มจำนวนในอาหารเลี้ยงเชื้ออย่างไม่สิ้นสุด เนื่องจากภายหลังการแบ่งเซลล์แต่ละครั้งจะมีเซลล์ลูก (daughter cells) อย่างน้อยจำนวน 1 เซลล์ที่ยังคงมีคุณสมบัติเป็นเซลล์รากเหง้าอยู่ และสามารถแบ่งตัวเพิ่มจำนวนต่อไปตลอดช่วงชีวิต และคุณสมบัติที่สำคัญประการที่สองของเซลล์รากเหง้า คือ สามารถที่จะเจริญไปเป็นเซลล์จำเพาะ (specialized cells) ต่าง ๆ ของร่างกายต่อไป เช่น เซลล์กล้ามเนื้อ เซลล์ประสาท เซลล์เม็ดเลือด ฯลฯ (Gearhart, 1998; McKay, 2000; Odorico et al., 2001; Pedersen, 1999; Pelled et al., 1999; Rossant, 2001; Watt and Hogan, 2000) ซึ่งเซลล์รากเหง้าจะมีการเปลี่ยนแปลงในแนวทางใดนั้นขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมทั้งภายในและภายนอกเซลล์ (Watt and Hogan, 2000) เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับเซลล์รากเหง้ามากขึ้น ต้องเข้าใจถึงจุดเริ่มต้นของชีวิตที่เริ่มจากการที่ตัวสุจิเข้าไปปฏิสนธิกับไข่ เกิดเป็นเซลล์ใหม่เซลล์หนึ่งซึ่งมีความสามารถที่จะเจริญไปเป็นร่างกายต่อไป เซลล์ใหม่ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ไซโกต (zygote) ในบางครั้งไซโกตถูกเรียกว่าเป็นเซลล์รากเหง้าชนิด totipotent stem cells (totus หมายถึงทั้งหมด) เนื่องจากเซลล์ ๆ นี้เพียงเซลล์เดียวสามารถที่จะเจริญต่อไปเป็นร่างกายได้นั้นเอง (McKay, 2000) ในตัวอ่อนของคนพบว่าประมาณ 1 ชั่วโมงหลังการปฏิสนธิ ไซโกตจะเริ่มเข้าสู่ระยะการแบ่งตัว (cleavage) โดยผลจากการแบ่งเซลล์ครั้งแรกจะได้เซลล์ลูก 2 เซลล์ ที่มีลักษณะเหมือนกัน เรียกว่า blastomere หรือ identical totipotent stem cells ประมาณวันที่ 3 หลังการปฏิสนธิไซโกตที่ได้จะมีลักษณะเป็นลูกกลมตัน ประกอบด้วย blastomere จำนวน 12 - 16 เซลล์ ในระยะนี้เรียกว่า morula และในวันที่ 4 เซลล์เหล่านี้จะมีการจัดเรียงตัวกันเป็นก้อนกลม เรียก blastocyst ซึ่งเป็นระยะที่มีเซลล์ blastomere จำนวน 32 เซลล์ และเซลล์เหล่านี้จะสร้างของเหลวออกมารวมกันอยู่ในช่องตรงกลางเซลล์ที่เรียกว่า blastotic cavity ระยะนี้ blastomere จะประกอบด้วยเซลล์ 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกจะอยู่ด้านนอกเป็นผนังของลูกกลม เรียกว่า trophoblast ซึ่งต่อไปจะเจริญไปเป็นรก (placenta) และเนื้อเยื่อเกี่ยวพันอื่น ๆ ที่จำเป็นต่อการเจริญของตัวอ่อน เซลล์กลุ่มที่สองจะจับกลุ่มอยู่ด้านในของลูกกลม เรียกว่า inner cell mass (ICM) ซึ่งเซลล์กลุ่มหลังนี้เจริญไปเป็นเนื้อเยื่อของตัวอ่อนต่อไป ดังนั้น เซลล์รากเหง้าจากตัวอ่อนที่มีการศึกษา จึงหมายถึงเซลล์ที่แยกได้จาก ICM ของตัวอ่อนระยะ blastocyst (อริคม สุภาพผล และ รุ่งตะวัน สุภาพผล, 2543)

ในส่วน of เซลล์ที่ได้จาก ICM นี้ แม้ในที่สุดจะสามารถเจริญและเปลี่ยนแปลงไปเป็นเนื้อเยื่อทั้งหมดของตัวอ่อนได้ และถ้าหากนำเอาเฉพาะเซลล์เหล่านี้ไปฝากในมดลูกที่เตรียมพร้อมสำหรับการตั้งท้อง เซลล์เหล่านี้ก็ไม่สามารถที่จะเจริญไปเป็นตัวอ่อนได้ เนื่องจากไม่สามารถเจริญไปเป็นส่วนของรกและเนื้อเยื่อเกี่ยวพันอื่นที่จำเป็นต่อการตั้งท้องได้ (McKay, 2000) จากความสามารถในการเจริญไปเป็นเซลล์ได้หลายชนิดนี้เอง บางครั้งจึงเรียกเซลล์รากเหง้าจากตัวอ่อนนี้ว่า pluripotent stem cells (plures หมายถึงจำนวนมาก) (Pedersen, 1999) อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับไซโกตแล้วก็จะเห็นว่าเซลล์ที่ได้จาก ICM จะมีความสามารถจำกัดเนื่องจากไม่สามารถเจริญไปเป็นรกและเนื้อเยื่อที่จำเป็นต่อการตั้งท้องได้

การเปลี่ยนสภาพเซลล์

การเปลี่ยนสภาพเซลล์เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงจากเซลล์ชนิดหนึ่งไปเป็นเซลล์ชนิดอื่น ๆ ที่ทำหน้าที่เฉพาะ กระบวนการดังกล่าวนี้เป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและมีผู้ให้ความสนใจศึกษาเป็นอย่างมาก เนื่องจากชีวิตเริ่มจากการปฏิสนธิระหว่างไข่กับตัวสุมิ ซึ่งหลังจากปฏิสนธิแล้วจะได้ไซโกต หลังจากนั้นไซโกตที่เป็นเพียงเซลล์ ๑ ตัว จะมีการแบ่งตัวเพิ่มจำนวนมากขึ้นเรื่อย ๆ และมีการเปลี่ยนแปลงจนเป็นตัวอ่อนและร่างกายที่สมบูรณ์ในที่สุด (ในคนจากไซโกตเพียงเซลล์เดียวจะเจริญและเปลี่ยนแปลงจนได้เซลล์ทั้งหมดของร่างกายประมาณ 10^{13} เซลล์) การเจริญเติบโตของคนแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ช่วงแรก เกิดภายหลังจากการปฏิสนธิ การเจริญเติบโตในช่วงนี้จะเป็นเรื่องของการเพิ่มขนาด มีการแบ่งตัวเพิ่มจำนวนมากขึ้น ช่วงที่สอง เป็นช่วงของการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่าง ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของเซลล์เหตุการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะมีลักษณะเป็นขั้นตอน หรือลำดับที่แน่นอน ส่วนช่วงที่สาม ซึ่งเป็นช่วงสุดท้ายนั้นจะเป็นช่วงของการเปลี่ยนสภาพเซลล์ เมื่อมีการเปลี่ยนสภาพเซลล์สิ้นสุด ร่างกายจะประกอบด้วยเนื้อเยื่อและอวัยวะที่ทำหน้าที่ที่จำเพาะต่อไป (Moore and Persaud, 1993)

ในระหว่างที่เกิดกระบวนการการเปลี่ยนสภาพของเซลล์นั้นถือว่าเป็นช่วงระยะเวลาที่สำคัญมาก และกระบวนการต่าง ๆ ดำเนินไปอย่างรวดเร็ว หากมี teratogen มากกระทบ เช่น ต้องเผชิญกับสารเคมีที่เป็นพิษต่อเซลล์ หรือติดเชื้อไวรัสบางชนิด อาจทำให้การเปลี่ยนสภาพของเซลล์นั้นเกิดความผิดปกติได้ และเป็นผลให้เกิดความผิดปกติตั้งแต่กำเนิดตามมา (Moore and Persaud, 1993) เพราะฉะนั้นเรื่องของการเปลี่ยนสภาพเซลล์จึงถือว่าเป็นเรื่องที่มีความสำคัญมากต่อทั้งคนและสัตว์ โดยเฉพาะในช่วงของการเจริญเติบโตขณะที่เป็นตัวอ่อนอยู่ในท้อง ซึ่งถือว่าเป็นช่วงที่มีความเสี่ยงสูงมากที่จะเกิดความผิดปกติมากขึ้น หากมีปัจจัยที่ไม่เหมาะสมไปกระทบการเปลี่ยนสภาพของเซลล์

การศึกษาถึงการเปลี่ยนสภาพของเซลล์จากเหง้าจากตัวอ่อน

การเปลี่ยนสภาพเซลล์ของเซลล์จากเหง้าจากตัวอ่อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการเจริญเติบโตนั้น มีปัจจัยจำนวนมากที่เข้ามาควบคุม และเซลล์หรือเนื้อเยื่อแต่ละชนิดจะมีปัจจัยควบคุมการเปลี่ยนสภาพที่แตกต่างกันไป โดยแบ่งออกเป็นปัจจัยภายในเซลล์ และที่อยู่นอกเซลล์ มีหลายปัจจัยที่ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบถึงแม้จะเป็นเพียงส่วนที่เล็กน้อยก็ตาม แต่ก็ทำให้นักวิทยาศาสตร์มีความเข้าใจถึงกระบวนการในการเปลี่ยนสภาพของเซลล์จากเหง้าจากตัวอ่อนมากขึ้น (Odorico et al., 2001) โดยเฉพาะหลังจากที่นักวิทยาศาสตร์สามารถแยกเอาเซลล์จากเหง้าจากตัวอ่อนของคนมาทำการเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อได้ จึงทำให้การศึกษาถึงการเปลี่ยนสภาพของเซลล์จากตัวอ่อนของคนได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์เป็นอย่างมาก ในปัจจุบันได้มีการนำเอา ESC ของคนมาทดลองเลี้ยงในห้องปฏิบัติการแล้วสังเกตการเจริญเติบโต และการเปลี่ยนสภาพไปเป็นเนื้อเยื่อทั้ง 3 ชั้นของร่างกาย ซึ่งประกอบด้วยเนื้อเยื่อชั้นใน (endoderm) เนื้อเยื่อชั้นนอก (ectoderm) และเนื้อเยื่อชั้นกลาง (mesoderm) (Amit et al., 2000; Boheler and Fiszman, 1999; Thomson et al., 1998) นอกจากนั้นยังมีผลงานวิจัยที่มีการควบคุมให้ ESC เปลี่ยนสภาพไปเป็นเซลล์ต่าง ๆ ได้อีกหลายชนิด เช่น เซลล์ประสาท เซลล์เม็ดเลือดขาว เซลล์ไขมัน เซลล์กระดูก เป็นต้น (Bain et al., 1995; Cibelli et al., 2002; Dani, 1999; Gottlieb and Huettner, 1999; Hayashi et al., 1998; Hole, 1999; Johe et al., 1996)

อันที่จริงแล้วนักวิทยาศาสตร์มีคำถามมากมายเกี่ยวกับการเปลี่ยนสภาพของเซลล์ ไม่ว่าจะเป็นปัจจัยทั้งภายในและภายนอกเซลล์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนสภาพ ช่วงระยะเวลาที่จะต้องมีการเปลี่ยนสภาพ ฯลฯ ซึ่งการศึกษาถึงการเปลี่ยนสภาพของ ESC ในปัจจุบันเน้นไปในเรื่องของการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับยีนและสารเร่งการเจริญเติบโตที่ทำหน้าที่ควบคุมการเปลี่ยนสภาพของ ESC ไปเป็นเซลล์ชนิดต่าง ๆ เช่น งานวิจัยชิ้นหนึ่งที่ได้ทำการศึกษาถึงผลของสารเร่งการเจริญเติบโตจำนวน 8 ชนิด ซึ่งได้แก่ basic fibroblast growth factor (bFGF), transforming growth factors- β 1 (TGF- β 1), activin-A, bone morphogenic protein-4 (BMP-4), hepatocyte growth factor (HGF), epidermal growth factor (EGF), beta-nerve growth factor (β -NGF) และ retinoic acid ต่อการเปลี่ยนสภาพของ ESC ของคน ซึ่งผลจากการศึกษาวิจัยในครั้งนั้นสามารถแบ่งสารเร่งการเจริญเติบโตที่นำมาทำการทดลองทั้งหมดออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่กระตุ้นการเจริญของเซลล์เนื้อเยื่อชั้นกลางเพียงอย่างเดียว สารในกลุ่มนี้ประกอบด้วย activin-A และ TGF- β 1 กลุ่มที่สองทำหน้าที่กระตุ้นการเจริญของเนื้อเยื่อชั้นกลางและเนื้อเยื่อชั้นนอก สารในกลุ่มนี้ประกอบด้วย retinoic acid, EGF, BMP-4 และ bFGF ส่วนกลุ่มที่ 3 กระตุ้นการเจริญของเนื้อเยื่อทั้งสามชั้นประกอบด้วย NGF และ HGF ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเจริญของ ESC ของคนไปเป็นเซลล์ในเนื้อเยื่อต่าง ๆ นั้นต้องอาศัยสารเร่งการเจริญเติบโตหลายชนิดร่วมกัน (Schuldiner et al., 2000) นอกจากนี้ในเรื่องของปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนสภาพของเซลล์ในเซลล์รากเหง้าจากตัวอ่อนของหนู พบว่า ต้องอาศัยสารภายในร่างกายชนิดหนึ่งที่เรียกว่า leukemia inhibitory factor (LIF) มาทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมให้การเปลี่ยนสภาพเซลล์เป็นไปในทิศทางที่เหมาะสม ในขณะที่เซลล์รากเหง้าจากตัวอ่อนของคนไม่จำเป็นต้องอาศัยสารตัวนี้แต่อย่างใด (Nikolova et al., 1997) และได้มีรายงานถึงผลของสารอนุพันธ์ของไวตามินเอที่เรียกว่า retinoic acid ที่สามารถชักนำ ให้ ESC ของหนูมีการเปลี่ยนสภาพไปเป็นเซลล์ประสาทได้ เซลล์ประสาทที่ได้จากการทดลองในครั้งนี้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเซลล์ประสาทโดยทั่ว ๆ ไป (อริคม สุภาพผล และ รุ่งตะวัน สุภาพผล, 2543) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอีกชิ้นหนึ่งที่ได้มีการควบคุมการเปลี่ยนสภาพเซลล์รากเหง้าจากตัวอ่อนให้ไปเป็น glial precursor cells ที่สามารถเจริญไปเป็นเซลล์ oligodendrocytes และ astrocytes แล้วทำการเปลี่ยนถ่ายเซลล์เหล่านั้นเข้าไปยังไขสันหลังของหนูที่มีความผิดปกติ อันเนื่องมาจากเซลล์ของร่างกายไม่สามารถสร้างเยื่อไมอีลินได้ เป็นตัวอย่างที่คล้ายกับโรคที่เกิดในคนที่เรียก Pelizaeus-Merzbacher disease ผลการทดลองปรากฏว่า เซลล์ที่เปลี่ยนถ่ายเข้าไปเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของหนูตัวรับและมีการสร้างเยื่อไมอีลินขึ้นมาในปลายประสาทสั่งการของเซลล์ประสาทในสมองและไขสันหลัง (Brustle et al., 1999) สำหรับปัจจัยที่ควบคุมการเปลี่ยนสภาพของเซลล์รากเหง้าตัวอ่อนที่มีการศึกษา เช่น STAT3 (signal transducer and activator of transcription) ซึ่งนักวิทยาศาสตร์เชื่อว่าน่าจะทำหน้าที่ยับยั้งการเปลี่ยนสภาพของเซลล์โดยกลไกต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ (1) กระตุ้นการทำงานของยีนที่ควบคุมให้เซลล์ยังคงมีสภาพเป็นเซลล์รากเหง้าอยู่ เช่น Oct-4 (Palmieri et al., 1994; Pesce et al., 1999) (2) มีผลต่อวัฏจักรของเซลล์ (3) ควบคุมยีนที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโต (4) ยับยั้งการทำงานของปัจจัยที่จะกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนสภาพ ในขณะเดียวกันก็เชื่อว่า ERK (extracellular signal-regulated kinase) ทำหน้าที่ตรงกันข้ามกับ STAT3 คือเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนสภาพของเซลล์ต้นแบบนั่นเอง (Niwa et al., 1998)

ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ยังไม่สามารถควบคุมการเปลี่ยนสภาพของเซลล์รากเหง้าจากตัวอ่อนได้ทั้งหมด 100% จึงยังเป็นปัญหาที่สำคัญมากในการที่จะใช้เป็นแหล่งของการสร้างเซลล์ที่จะนำไปใช้ในการรักษาโรคโดยวิธีเซลล์บำบัด โดยได้มีรายงานถึงการทดลองเพาะเลี้ยงเซลล์ของหนู เพื่อสังเกตการเปลี่ยนสภาพของเซลล์เหล่านั้น เมื่อมีการปรับส่วนประกอบของอาหารเลี้ยงเซลล์อย่างดีที่สุดแล้ว ก็จะได้กลุ่มเซลล์ที่เรียกว่า embryoid bodies ซึ่งประกอบด้วยเซลล์หัวใจ 50% เซลล์เม็ดเลือด 30% ส่วนอีก 20% เป็นเซลล์ชนิดอื่น (อริคม สุภาพผล และ รุ่งตะวัน สุภาพผล, 2543) อย่างไรก็ตาม มีรายงานว่ามีการวิจัยบางชิ้นที่บ่งชี้ว่า ในอนาคตนักวิจัยอาจจะสามารถควบคุมการเปลี่ยนสภาพของเซลล์ได้ทั้งหมด โดยการทดลองในครั้งนั้นได้ใช้ยีนที่ทนต่อสารปฏิชีวนะชนิดหนึ่งที่สามารถแสดงผลได้เฉพาะในเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจให้กับเซลล์รากเหง้าจากตัวอ่อนของหนู หลังจากนั้นได้นำเอา ESC ที่มียีนต้านสารตัวนี้ไปเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเซลล์ที่มีสารปฏิชีวนะ ดังนั้น เซลล์ที่จะมีชีวิตรอดอยู่ได้คือเซลล์ที่มียีนต้านสารปฏิชีวนะเท่านั้น ผลการทดลองปรากฏว่า ESC มีการเปลี่ยนสภาพไปเป็นเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจถึง 99% (Klug et al. 1996) การที่นักวิทยาศาสตร์ยังไม่สามารถควบคุมการเปลี่ยนสภาพของเซลล์รากเหง้าได้ทั้งหมดนี้ถือว่าเป็นอุปสรรคที่สำคัญมากในการนำเอาเซลล์เหล่านี้ไปใช้ในการรักษาโรคด้วยเซลล์บำบัด เนื่องจากมีหลายรายงานที่ระบุว่า บางครั้งการเปลี่ยนถ่าย ESC เข้าไปในอวัยวะของสัตว์ทดลองได้ก่อให้เกิดก้อนเนื้อร้ายที่เรียกว่า teratoma (เป็นก้อนเนื้อร้ายที่ประกอบด้วยเซลล์หลายชนิด) ตามมา (McKay, 2000; Pedersen, 1999) ซึ่งถือเป็นประเด็นที่ผู้เกี่ยวข้องต้องระมัดระวังเป็นอย่างมาก เพื่อที่จะไม่ให้เกิดความผิดพลาดหรือเกิดความผิดปกติขึ้นกับผู้ป่วยที่เข้ารับการบำบัดรักษาได้

สรุป

การควบคุมการเปลี่ยนสภาพของเซลล์รากเหง้าจากตัวอ่อนเพื่อให้ได้เซลล์ชนิดใดชนิดหนึ่งที่จะนำไปใช้ในการเปลี่ยนถ่ายเซลล์นั้น ถือว่าเป็นปัญหาสำคัญของการรักษาโรคโดยวิธีการที่เรียกว่า เซลล์บำบัด (นอกเหนือไปจากปฏิกิริยาการต่อต้านสิ่งแปลกปลอมของร่างกาย) เนื่องจากในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ยังไม่สามารถควบคุมการเปลี่ยนสภาพของเซลล์รากเหง้าจากตัวอ่อนได้ทั้งหมด อันเป็นผลสืบเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของเซลล์นั้นถูกควบคุมจากปัจจัยมากมายหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นปัจจัยภายนอกและจากภายในเซลล์เอง ดังนั้น การศึกษาเพื่อที่จะนำไปสู่การควบคุมการเปลี่ยนสภาพเซลล์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะนำเซลล์เหล่านั้นไปใช้ในการเปลี่ยนถ่ายเซลล์ในการรักษาโรคที่สำคัญๆ หลายชนิดที่ยังไม่มีหนทางเยียวยานั้น เป็นสิ่งที่นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกให้ความสนใจเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในปัจจุบันนี้มีแนวโน้มของการนำเอาเทคนิคการทำโคลนนิ่ง (cloning) หรือการเปลี่ยนถ่ายนิวเคลียส (somatic cells nuclear transfer) จากเซลล์ร่างกายของผู้ป่วยมาทำการศึกษาวิจัยเพื่อสร้างเซลล์รากเหง้าที่จะนำมาใช้ในการเปลี่ยนถ่ายเซลล์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการโคลนนิ่งเพื่อการรักษาโรค (therapeutic cloning) (Cibelli et al., 2002; Kind and Colman, 1999; Trouson and Pera, 1998; Wobus et al., 2000) และได้รับการยอมรับ จากบางประเทศที่ยินยอมให้สามารถทำได้ โดยจุดสำคัญที่สุดที่มีความต้องการที่จะนำเอาเทคนิคการทำโคลนนิ่งมาใช้ในการสร้างเซลล์ ก็เพื่อแก้ไขปัญหาการปฏิเสธเซลล์ของร่างกาย เนื่องจากเซลล์ที่เปลี่ยนถ่ายเข้าไปก็เปรียบเสมือนเซลล์ของผู้ที่ได้รับการเปลี่ยนถ่ายเซลล์นั่นเอง (McKay, 2000) แม้การโคลนนิ่งอาจจะช่วยแก้ปัญหาในเรื่องแหล่งของเซลล์ที่จะนำมาเปลี่ยนถ่ายได้ แต่อุปสรรคที่สำคัญยิ่งก็คือการควบคุม

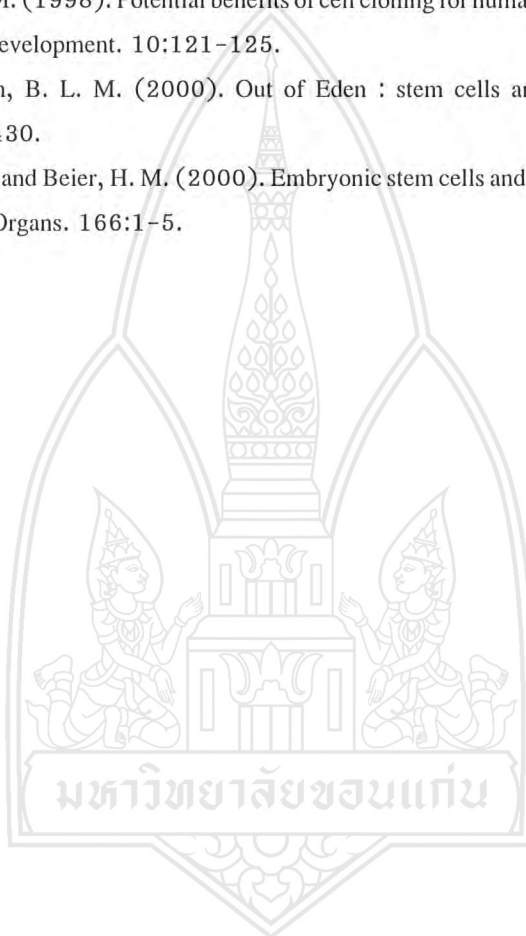
การเปลี่ยนสภาพเซลล์รากเหง้าที่ได้มาจากการทำโคลนนิ่งนี้เองว่า นักวิทยาศาสตร์จะต้องทำอะไรเพื่อให้ได้เซลล์เป้าหมายที่ต้องการนำไปใช้ ซึ่งถือเป็นสิ่งท้าทายอย่างยิ่งที่นักวิทยาศาสตร์จะต้องศึกษาค้นคว้ากันต่อไป

บรรณานุกรม

- อติคม สุภาพผล และ รุ่งตะวัน สุภาพผล. (2543). เซลล์ต้นกำเนิดของตัวอ่อน. วชิรเวชสาร. 44(1): 77-86.
- Amit, M., Carpenter, M. K., Inokuma, M. S., Chiu, C., Harris, C. P., Waknitz, M. A., Itskovitz-Eldor, J. and Thomson, J. A. (2000). Clonally derived human embryonic stem cell lines maintain pluripotency and proliferative potential for prolonged periods of culture. *Development Biology*. 227:271-278.
- Bain, G., Kitchens, D., Yao, M., Huettner, J. E. and Gottlieb, D. I. (1995). Embryonic stem cells express neuronal properties in vitro. *Development Biology*. 168(2):342-357.
- Boheler, K. R. and Fisman, M. Y. (1999). Can exogenous stem cells be used in transplantation. *Cells Tissues Organs*. 165(3-4):237-245.
- Brustle, O., Jone, N. K., Learish, R. D., Karan, K., Choudhary, K., Wiestler, O. D., Duncan, I. D. and McKay, R. D. G. (1999). Embryonic stem cell-derived glial precursors: a source of myelinating transplants. *Science*. 285:54-65.
- Cibelli, J. B., Grant, K. A., Chapman, K. B., Cunniff, K., Worst, T., Green, H. L., Walker, S. J., Gutin, P. H., Vilner, L., Tabar, V., Dominko, T., Kane, J., Wettstein, P. J., Lanza, R. P., Studer, L., Vrana, K. E. and West, M. D. (2002). Parthenogenetic stem cells in nonhuman primates. *Science*. 295:819.
- Cibelli, J. B., Lanza, R. P., West, M. D., and Ezzell, C. (2002). The first human cloned. *Scientific American*. 286(1):42-49.
- Dani, C. (1999). Embryonic stem cell-derived adipogenesis. *Cells Tissues Organs*. 165(3-4): 173-180.
- Gearhart, J. (1998). New potential for human embryonic stem cells. *Science*. 165:220-236.
- Gorin, N.C. (2002). Autologous stem cell transplantation in acute lymphocytic leukemia. *Stem Cells*. 20:3-10.
- Gottlieb, D. T. and Huettner, J. E. (1999). An in vitro pathway from embryonic stem cells to neurons and glia. *Cells Tissues Organs*. 165(3-4):165-172.
- Hayashi, S., Yamane, T., Miyamoto, A., Hemmi, H., Tagaya, H., Tanio, Y., Yamazaki, H. and Kunisada, T. (1998). Commitment and differentiation of stem cells to the osteoclast lineage. *Biochemistry Cell Biology*. 76:911-922.

- Hole, N. (1999). Embryonic stem cell-derived haematopoiesis. *Cells Tissues Organs*. 165 (3-4):181-189.
- Johe, K. K., Hazel, T. G., Muller, T., Dugich-Djordjevic, M. M. and McKay, R. D. (1996). Single factors direct the differentiation of stem cells from the fetal and adult central nervous system. *Genes & Development*. 10(24):3129-3140.
- Kind, A. and Colman, A. (1999). Therapeutic cloning: needs and prospects. *Seminars in Cell and Developmental Biology*. 10:279-286.
- Klug, M. G., Soonpaa, M. H., Koh, G. Y. and Field, L. J. (1996). Genetically selected cardiomyocytes from differentiating embryonic stem cells from stable intracardiac grafts. *J. Clin. Invest.* 98:216-224.
- McKay, R. (2000). Stem cell-hype and hope. *Nature*. 406:361-364.
- Moore, K. L. and Persaud, T. V. N. (1993). The developing human clinically oriented embryology. 5th ed. Philadelphia: W.B.Saunders Company.
- Nicola, N. A. and Thomson, J. A., Kalishman, J., Golos, T. G., Durning, M., Harris, C. P., Becker, A. R. and Hearn, J. P. (1995). Isolation of a primate embryonic stem cell line. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 92:7844-7848.
- Nikolova, D. B., Martinova, Y. S., Seidensticker, M. and Bellve, A. R. (1997). Leukemia inhibitory factor stimulates proliferation of prospermatogonial stem cells. *Reproduction, Fertility and Development*. 9:717-721.
- Niwa, H., Burdon, T., Chambess, I. and Smith, A. (1998). Self-renewal of pluripotent embryonic stem cells is mediated via activation of STAT3. *Genes & Development*. 12(13):2048-2060.
- Odorico, J. S., Kaufman, D.S. and Thomson, J.A. (2001). Multilineage differentiation from human embryonic stem cell lines. *Stem Cells*. 19:193-204.
- Palmieri, S. L., Peter, W., Hess, H. and Scholer, H. R. (1994). Oct-4 transcription factor is differentially expressed in the mouse embryo during establishment of the first two extraembryonic cell lineages involved in implantation. *Development Biology*. 166(1): 259-267.
- Pedersen, R. A. (1999). Embryonic stem cell for medicine. *Scientific American*. 280:44-49.
- Pesce, M., Anastassiadis, K. and Scholer, H. R. (1999). Oct-4: Lessons of totipotency from embryonic stem cells. *Cells Tissues Organs*. 165(3-4):144-152.
- Prelle, K., Vassiliev, I. M., Vassilieva, S. G., Wolf, E. and Wobus, A. M. (1999). Establishment of pluripotent cell lines from vertebrate species — present status and future prospects. *Cells Tissues Organs*. 165:220-236.
- Rossant, J. (2001). Stem cell from the mammalian blastocyst. *Stem Cells*. 19:477-482.

- Schuldiner, M., Yanuka, O., Itskovitz-Eldor, J., Melton, D. A. and Benvenisty, N. (2000). Effect of eight growth factors on the differentiation on cells derived from human embryonic stem cells. *Proc. Natl. Acad. USA.* 97(21):11307-11312.
- Thomson, J. A., Itskovitz-Eldor, J., Shapiro, S. S., Waknitz, M. A., Swiergiel, J. J., Marshall, V. S. and Jones, J. M. (1998). Embryonic stem cell lines derived from human blastocyst. *Science.* 282:1145-1147.
- Trounson, A. and Pera, M. (1998). Potential benefits of cell cloning for human medicine. *Reproduction, Fertility and Development.* 10:121-125.
- Watt, M. F. and Hogan, B. L. M. (2000). Out of Eden : stem cells and their niches. *Science.* 287:1427-1430.
- Wobus, A. M., Wolf, E. and Beier, H. M. (2000). Embryonic stem cells and nuclear transfer strategies. *Cells Tissues Organs.* 166:1-5.



การเตรียมและทดสอบ $\text{ZnO} + 0.01\text{Nb}_2\text{O}_5$ เพื่อศึกษาการตอบสนองต่ออุณหภูมิ วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกและสารให้ความร้อน

ธงชัย พันธุ์เมธาสุทธิ¹, วราภรณ์ อนันตพรพาณิชย์²,
กิ่งกานต์ เปาะทอง¹ และ พิกุล ราชพลแสน²

บทคัดย่อ

ก่อนการรูปร่าง $\text{ZnO} + 0.01\text{Nb}_2\text{O}_5$ เตรียมขึ้นมาโดยวิธีเทคนิคเซรามิกส์มาตรฐาน ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิเป็นแบบเชิงเส้นดังสมการ $R = -0.0433T + 8.5089$ อัตราการลดลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยอุณหภูมิมีค่าดังสมการ $\Delta R/\Delta T = -43.16$ โอห์ม/°ซ. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าความร้อนกับอุณหภูมิแสดงดังสมการ $\Delta V = -8 \times 10^{-6}T^2 + 0.0114T - 0.3166$ และสัมประสิทธิ์ซีเบค (α) มีค่า 9.72×10^{-6} โวลต์/°ซ. เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้า 200 โวลต์ให้แก่สารเป็นเวลา 3 นาที และ 26 วินาที พบว่า อุณหภูมิของสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้อง (24°ซ.) ไปเป็น 245°ซ. สารที่เตรียมได้นำไปประยุกต์ใช้งานเป็นหัววัดอุณหภูมิ วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกและสารให้ความร้อน

Abstract

Disc-shaped $\text{ZnO} + 0.01\text{Nb}_2\text{O}_5$ samples were prepared by standard ceramic techniques. The linear relation between resistance and temperature corresponds to $R = -0.0433T + 8.5089$. Resistance decreasing rate corresponds to $\Delta R/\Delta T = -43.16 \text{ } \Omega/^{\circ}\text{C}$. The relation between thermo-emf and temperature corresponds to $\Delta V = -8 \times 10^{-6}T^2 + 0.0114T - 0.3166$, and Seebeck coefficient (α) is $9.72 \times 10^{-6} \text{ V/^{\circ}C}$. When electric voltage of 220 Vac was supplied for 3 minutes and 26 seconds, sample temperature increased from room temperature (24°C) to 245°C. This prepared sample can be used as a temperature sensor, thermoelectric material and heating element.

¹ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

² ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

บทนำ

สารที่เกี่ยวข้องกับบทความนี้มี 3 ชนิด ได้แก่ สารให้ความร้อน (heating element) วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric material) และเทอร์มิสเตอร์ (thermistor) สารให้ความร้อนใช้ทำเป็นตัวกำเนิดความร้อนของเตาอบ วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกใช้แปลงความร้อนเป็นไฟฟ้าและเทอร์มิสเตอร์ใช้ทำเป็นหัววัดอุณหภูมิและสวิตช์ความร้อน

ก. สารให้ความร้อน

อุปกรณ์ให้ความร้อนใช้ทำขดลวดของเตาหลอม (furnace element) เมื่อพิจารณาจากค่าความต้านทาน พบว่า สามารถแบ่งอุปกรณ์ให้ความร้อนเป็น 2 กลุ่ม ด้วยกัน ดังนี้

1) อุปกรณ์ให้ความร้อนที่มีความต้านทานต่ำ (lowly resistive element) ซึ่งต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีแรงดันต่ำ (low voltage power supply)

2) อุปกรณ์ให้ความร้อนที่มีความต้านทานสูง (highly resistive element) ซึ่งต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีแรงดันสูง (high voltage power supply)

ตัวอย่างของสารให้ความร้อน (Moulson and Herbert, 1990) เช่น SiC ($1,650^{\circ}\text{C}$), MoSi_2 ($1,500^{\circ}\text{C}$), LaCrO_3 ($1,500^{\circ}\text{C}$), ZrO_2 ($1,800^{\circ}\text{C}$) และ $\text{SnO}_2 + 0.01\text{Sb}_2\text{O}_3$

ข. วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

Tanaka (1997) ได้เตรียมวัสดุที่ทำมาจากสังกะสีออกไซด์ (ZnO -based materials) สำหรับศึกษาคุณสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric properties) การเกิดเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric generation) เป็นการแปลงพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่า Z ดัง สมการ

$$Z = \alpha^2 \sigma / k \quad (1)$$

α เป็นสัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient) σ เป็นสภาพนำไฟฟ้า (electric conductivity) และ k เป็นสภาพนำความร้อน (thermal conductivity) สำหรับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดี Z , α และ σ มีค่ามาก แต่ k มีค่าน้อย วัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์กำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric generator) จะต้องมีค่า Z มาก ตัวอย่างสารที่ใช้ทำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่อุณหภูมิสูง (high temperature thermoelectric material) ได้แก่ FeSi_2 , CrSi_2 , SiC และ B_xC ZnO เป็นสารที่มีสภาพนำไฟฟ้าดีในช่วง อุณหภูมิที่กว้าง ZnO ที่ได้เติมสารได้ลงไปสามารถทำเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก สารนี้เตรียมขึ้นโดยวิธีเทคนิคเซรามิกมาตรฐานจากส่วนผสมของสาร $\text{ZnO} + 0.01\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{ZnO} + 0.01\text{TiO}_2$, $\text{ZnO} + 0.01\text{Nb}_2\text{O}_5$ และ $\text{ZnO} + 0.01\text{MoO}_3$ โดยเผาที่อุณหภูมิประมาณ $1,100^{\circ}\text{C}$ ชั่วไฟฟ้าทำจากกาวทองคำขาว (platinum paste) วัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าความร้อน (thermoelectric motive force) ที่อุณหภูมิต่างๆ คำนวณสัมประสิทธิ์ซีเบคที่อุณหภูมิต่างๆ

Ravinder (1994) ได้เตรียม Mn-Zn ferrite ซึ่งมีสูตร $\text{Mn}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x = 0.0, 0.2, 0.6$, และ 0.8) เผาที่อุณหภูมิ $1,200^{\circ}\text{C}$ วัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าความร้อน (thermo-emf) ที่อุณหภูมิต่างๆ หลังจากผ่านการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคหรือกำลังไฟฟ้าความร้อน พบว่า สัมประสิทธิ์ซีเบค (α) มีค่าลดลงในขณะที่อุณหภูมิ (T) เพิ่มขึ้น และยังได้วัดความสัมพันธ์ซีเบคของสารที่มีส่วนผสมต่างกันด้วย

Pujar (1996) ได้เตรียม $\text{Zn}_x\text{Mg}_{1-x}\text{Zr}_y\text{Fe}_{2-2y}\text{O}_4$ ($x = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$; $y = 0.01$,

0.03, 0.05, 0.07) แล้วนำสารไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษากำลังไฟฟ้า ความร้อนโดยการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบคตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 973°C . ผลการวัดพบว่า สารมีสภาพนำไฟฟ้าชนิดเอ็น (n-type conductivity) และสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าลดลงในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น

Bosman (1969) ได้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบคกับพลังงานเฟอร์มิ ดังสมการ

$$E_F = e\alpha T - A k_B T \quad (2)$$

เมื่อ E_F เป็นพลังงานเฟอร์มิ e เป็นประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน α เป็นสัมประสิทธิ์ซีเบค T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ A เป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน และ k_B เป็นค่าคงที่โบลต์ซมาน

Seok (1995) ได้เตรียม La_2CuO_4 เพื่อทำเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก La_2CuO_4 เป็นฉนวนแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร (antiferromagnetic insulator) $\text{La}_2\text{CuO}_{4.8}$ ที่มีออกซิเจนเกิน จะแสดงกำลังไฟฟ้า ความร้อนและสภาพนำไฟฟ้าที่มีค่าสูง สารที่เตรียมเพื่อทดสอบ อาทิ $\text{La}_2\text{Cu}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_4$, $\text{La}_2\text{Cu}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_4$, $\text{La}_2\text{Cu}_{0.9}\text{Co}_{0.1}\text{O}_4$ และ $\text{La}_2\text{Cu}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}\text{O}_4$

ค. เทอร์มิสเตอร์

ในปี ค.ศ. 1833 Faraday ได้ค้นพบและรายงานเกี่ยวกับพฤติกรรมกึ่งการนำไฟฟ้า (semi-conducting behavior) ของ Ag_2S หัวยืดอุณหภูมิที่ทำมาจากเซรามิกส์ที่ใช้ในทางการค้าเริ่มในปี ค.ศ. 1940 (Buchanan, 1991) และมีการผลิตเป็นอุตสาหกรรมกันอย่างกว้างขวางระหว่างปี ค.ศ. 1950-1960

เทอร์มิสเตอร์ คือ ตัวต้านทานที่มีความต้านทานเปลี่ยนแปลงในขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนไป เทอร์มิสเตอร์เป็นตัวต้านทานที่ไวต่อความร้อน (thermally sensitive resistor, TSR) เทอร์มิสเตอร์มี 2 ประเภท คือ แบบที่มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเป็นบวก (positive temperature coefficient, PTC) และแบบที่มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเป็นลบ (negative temperature coefficient, NTC) เทอร์มิสเตอร์ที่จะศึกษานี้เป็นแบบ NTC ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่เป็นลบ (negative temperature coefficient of resistance, NTCR) สูง

สารที่ใช้ทำเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC เป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ลักษณะสมบัติเชิงไฟฟ้าของวัสดุถูกกำหนดโดยสูตร $\rho = RA/L$ ρ เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ (material resistivity) R เป็นความต้านทาน (resistance) A เป็นพื้นที่ยังผล (effective area) และ L เป็นความหนาของสาร สภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ขึ้นกับอุณหภูมิดังสมการ (Moulson and Herbert, 1990)

$$\rho(T) = \rho_\alpha \exp(B/T) \quad (3)$$

เมื่อ $\rho(T)$ เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ T ใดๆ ρ_α เป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ และ B เป็นค่าคงที่ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับพลังงานที่ใช้ไปเพื่อให้อิเล็กตรอนนำกระแสไฟฟ้า เมื่อทำการหาอนุพันธ์ของสมการ (3) เทียบกับ T จะได้ค่า α ซึ่งเป็นค่า NTCR

$$\alpha = (1/\rho)(d\rho/dT) = -B/T^2 \quad (4)$$

สภาพนำไฟฟ้าของสารเกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนและไอออนบวก-ลบของอะตอม และเกี่ยวข้องกับช่องว่างแถบพลังงานของสาร

ตัวอย่างสูตรของสารสำหรับเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ได้แก่ $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnCr}_2\text{O}_4$, $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-MgCr}_2\text{O}_4$,

$(\text{NiMn})_3\text{O}_4$, $(\text{NiMnCo})_3\text{O}_4$, $(\text{NiMnFeCo})_3\text{O}_4$, $(\text{Fe,Ti})_2\text{O}_3$, $0.56\text{MnO} + 0.08\text{CoO} + 0.16\text{NiO} + 0.20\text{CuO}$ และ $\text{Mn}_x\text{Co}_{3-x}\text{O}_4$ (Buchanan, 1991)

เทอร์มิสเตอร์แบบ NTC สามารถนำไปประยุกต์ทำเป็นหัววัดอุณหภูมิ (temperature sensor) หัววัดการไหลของความร้อน (heat flow sensor) หัววัดการแผ่รังสี (radiation sensor) หัววัดสุญญากาศ (vacuum gauge) หัววัดความดัน (pressure gauge) และหัววัดการชดเชยอุณหภูมิ (temperature compensation sensor) (Buchanan, 1991)

Soliman (1993) ได้ศึกษาเทอร์มิสเตอร์ที่ใช้ในทางการค้าซึ่งเตรียมมาจากส่วนผสมของ NiO , Mn_2O_3 และ Co_2O_3 แล้ววัดความต้านทานไฟฟ้าของสารที่อุณหภูมิต่างๆ Martinez-Sarrion (1995) ได้เตรียม $\text{Fe}_{2.18}\text{Mn}_{0.21}\text{Ni}_{0.61}\text{O}_4$ ซึ่งเป็นเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC สารสูตรนี้อยู่ในกลุ่มเฟอร์ไรต์ วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ส่วนผสมต่างๆ ศึกษาเสถียรภาพทางไฟฟ้า (electrical stability) โดยการวัดการแปรค่าความต้านทานไฟฟ้ากับเวลา

ถึงแม้ว่า $\text{ZnO} + 0.01\text{Nb}_2\text{O}_5$ จะมีคุณสมบัติเป็นเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Tanaka, 1997) แต่ยังไม่มีการทดลองใช้ $\text{ZnO} + 0.01\text{Nb}_2\text{O}_5$ เป็นสารให้ความร้อนและเทอร์มิสเตอร์ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการฟิสิกส์วัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ พบว่า สาร $\text{ZnO} + 0.01\text{Nb}_2\text{O}_5$ มีสมบัติเป็นทั้งสารให้ความร้อน วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกและเทอร์มิสเตอร์ ซึ่งมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาสมบัติของสารนี้

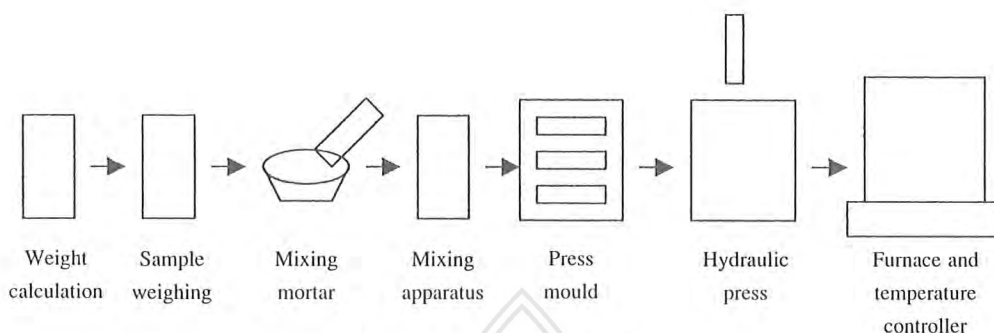
วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการเตรียมสาร $\text{ZnO} + 0.01\text{Nb}_2\text{O}_5$ โดยวิธีเทคนิคเซรามิกส์มาตรฐาน เพื่อทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิ วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกและสารให้ความร้อน

วิธีดำเนินงาน

1. การเตรียมสาร $\text{ZnO} + 0.01\text{Nb}_2\text{O}_5$

เตรียมสารโดยวิธีเทคนิคเซรามิกส์มาตรฐาน (standard ceramic techniques) เริ่มจากผง ZnO และ Nb_2O_5 ที่มีความบริสุทธิ์ 99.9 % คำนวณน้ำหนัก ชั่งผงของสารด้วยเครื่องชั่ง ผสมสารด้วยโกร่ง นำผงของสารใส่กระป๋องพลาสติก หมุนผสมสารด้วยเครื่องหมุน หยดพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมน้ำกลั่น นำผงของสารใส่เบ้าอัด นำเบ้าอัดไปติดตั้งที่เครื่องอัดสาร (RIIK 25 tons) อัดเป็นก้อน วางไว้หนึ่งวันแล้วนำก้อนสารวางในเตาหลอม (furnace) ที่ใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (FCR-13A-R/M) และใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (CA) (Model JB-35) เผาสองครั้งที่ 900°C และ $1,100^\circ\text{C}$ ตามลำดับ และใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $5^\circ\text{C} / \text{นาท}$ ขั้นตอนการเตรียมสารแสดงในรูปที่ 1

2. การขั้บลักษณะของสารด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) การวัดขนาดและการ



รูปที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมก้อนสาร

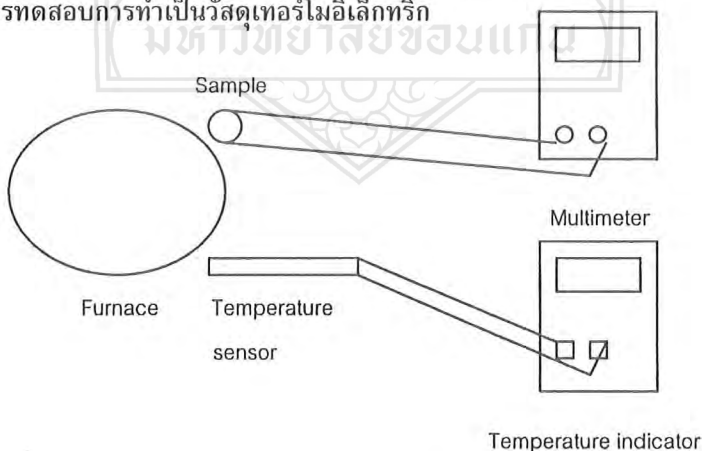
ทำซ้ำด้วยกาเงิน

นำก้อนสารที่ผ่านการเผาไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD (PW3710) เพื่อดูเฟสของสาร วัดความหนาและเส้นผ่าศูนย์กลางของสารด้วยไมโครมิเตอร์ ทำซ้ำด้วยกาเงิน โดยผสมเงินกับกาแล้วทาบนผิวของสารและอบด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 10 นาที

3. การทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิ

ใช้ตัวจับพร้อมขาตั้งยึดก้อนสารที่ทำซ้ำด้วยกาเงินให้อยู่เหนือเตาไฟฟ้าประมาณ 4 เซนติเมตร วัดความต้านทานไฟฟ้า (R) ด้วยเครื่องมือวัดมัลติมิเตอร์ (Fluke 45 Dual Display Multimeter) และอุณหภูมิ ด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิ (AVD M 890 C⁺) โดยที่ก้อนสารกับหัววัดอุณหภูมิอยู่ที่ระดับเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2 หลังจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิของสารอย่างช้า ๆ บันทึกความต้านทานไฟฟ้า (R) และอุณหภูมิ (T) ลงในตาราง พล็อตกราฟ R vs T คำนวณหาอัตราการลดลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยอุณหภูมิ ($\Delta R/\Delta T$) จากกราฟที่ได้

4. การทดสอบการทำให้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก



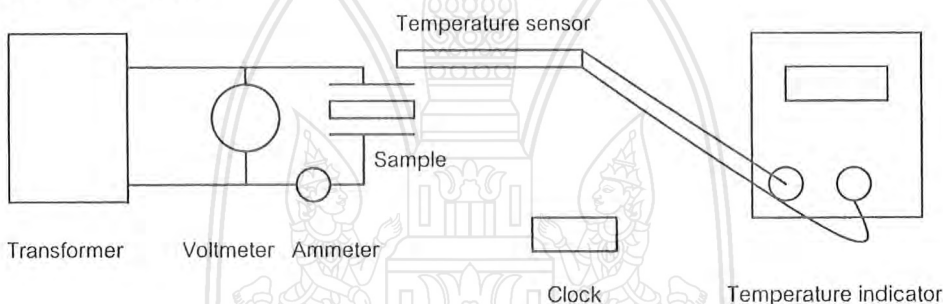
รูปที่ 2 การวัดความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ

จัดชุดทดลองทำนองเดียวกันกับรูปที่ 2 แต่เปลี่ยนสเกลเป็นแรงดันไฟตรง บันทึกความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าความร้อน (thermo-emf, V) กับอุณหภูมิ (T) พล็อตกราฟ V vs T คำนวณสัมประสิทธิ์ซีเบคโดยใช้จากกราฟและใช้สูตร $\alpha = \Delta V / \Delta T$

5. การทดสอบการทำเป็นสารให้ความร้อน

จัดชุดทดลองดังแสดงในรูปที่ 3 ป้อนแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ เข้าทาง input ของหม้อแปลงไฟฟ้า ป้อนแรงดัน out put 200 โวลต์ ที่ปรับได้ไปยังสารเป็นเวลา 3 นาที และ 26 วินาที พบว่า สารเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อน ใช้มัลติมิเตอร์ (Fluke 45 Dual Display Multimeter) วัดแรงดันไฟฟ้า (V) ใช้มัลติมิเตอร์ (Triplett Model 630) วัดกระแสไฟฟ้า (I) คำนวณกำลังไฟฟ้า (P) บันทึกค่าลงในตาราง แล้วพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารกับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่สาร (P vs T) หลังจากนั้นให้ทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสาร (T) กับเวลา (t) โดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ (AVD M 890 C°) และนาฬิกาจับเวลา ในการทดลองจะปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านสารเป็นเวลาเท่ากันกับการทดลองครั้งก่อน บันทึกค่า T และ t ลงในตารางแล้วพล็อตกราฟ T vs t

ผลการทดลองและวิจารณ์



รูปที่ 3 การทดสอบสารให้ทำหน้าที่เป็นสารให้ความร้อน

1. ผลการเตรียมสาร $\text{ZnO} + 0.01\text{Nb}_2\text{O}_5$

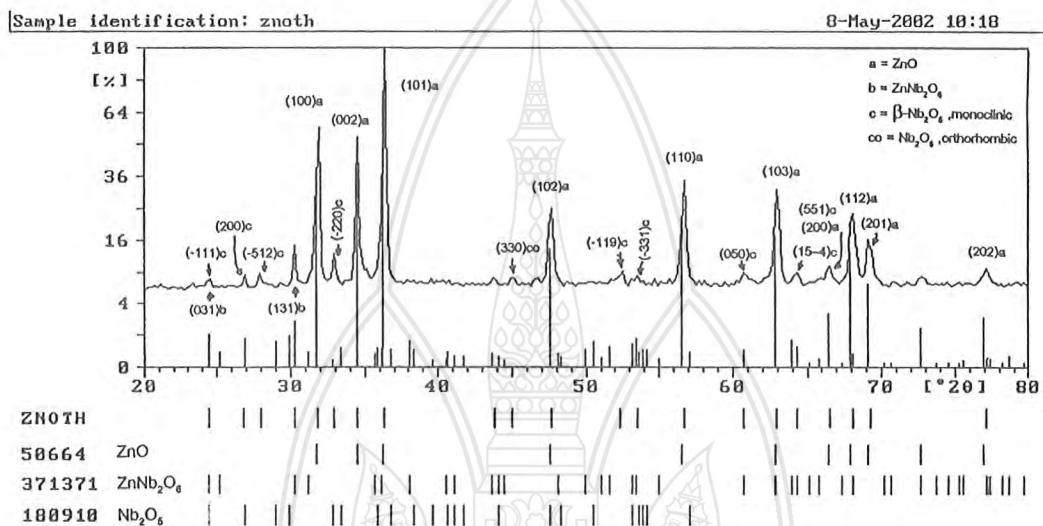
ได้ก้อนสารรูปงาน มีสีขาว-เหลืองอ่อน

2. ผลการขึ้นปลักษณะของสารด้วยเครื่อง XRD ขนาดของสารและการทำซ้ำด้วยกาเงิน

ภาพถ่าย XRD ดังแสดงในรูปที่ 4 ความหนาและเส้นผ่าศูนย์กลางของสารมีค่า 2.36 มิลลิเมตร และ 12.95 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบสาร ZnO , ZnNb_2O_6 และ Nb_2O_5 คาดว่าก้อนสารภายในประกอบด้วยเกรน 3 เกรน คือ เกรนของ ZnO , ZnNb_2O_6 และ Nb_2O_5 สาร ZnO อยู่ในระบบผลึกแบบเฮกซะโกนอล โดยมีค่าคงที่โครงผลึก a, b และ c เป็น 3.249 , 3.249 และ 5.205 อังสตรอม ตามลำดับ และมีโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซด์ (Moulson and Herbert, 1990) สาร ZnNb_2O_6 อยู่ในระบบออร์ทอรอมบิก และสาร Nb_2O_5 อยู่ในระบบโมโนคลินิกและออร์ทอรอมบิก ส่วนที่ขอบเขตของเกรนมีอะตอมที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (Moulson and Herbert, 1990) ผลจากภาพถ่ายพบว่า

ก่อนสารภายในประกอบด้วยสาร ZnO มากที่สุด สาร Nb_2O_5 และ ZnNb_2O_6 ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของ ZnO กับ Nb_2O_5 มีอยู่น้อย ระบายที่พบใน ZnO คือ (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201) และ (202) ระบายที่พบใน ZnNb_2O_6 คือ (031) และ (131) และระบายที่พบใน Nb_2O_5 คือ (-111), (200), (-512), (-220), (330), (-119), (-331), (050), (15-4) และ (551) เฉพาะระบาย (330) อยู่ในระบบออร์ทอโรมบิก นอกนั้นอยู่ในระบบโมโนคลินิกทั้งหมด

3. ผลการทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิ

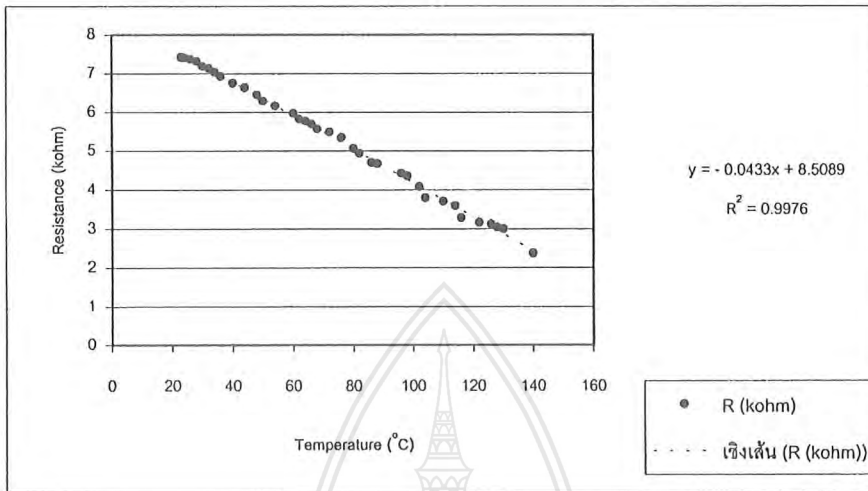


รูปที่ 4 ภาพถ่ายการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $\text{ZnO} + 0.01\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{ZnNb}_2\text{O}_6$

ผลการวัดความต้านทานไฟฟ้า (R) ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของสาร $\text{ZnO} + 0.01\text{Nb}_2\text{O}_5$ เป็นแบบเชิงเส้น กราฟเส้นตรงนี้เป็นสิ่งที่แตกต่างจากเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ทั่วไป ซึ่งมีกราฟเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Moulson and Herbert, 1990) การลดลงของสภาพต้านทานไฟฟ้ามีความแตกต่างจากสมการ (3) อัตราการลดลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยอุณหภูมิ (R_T) มีค่าดังสมการ

$$\Delta R / \Delta T = -43.16 \text{ โอห์ม/}^\circ\text{C.} \quad (5)$$

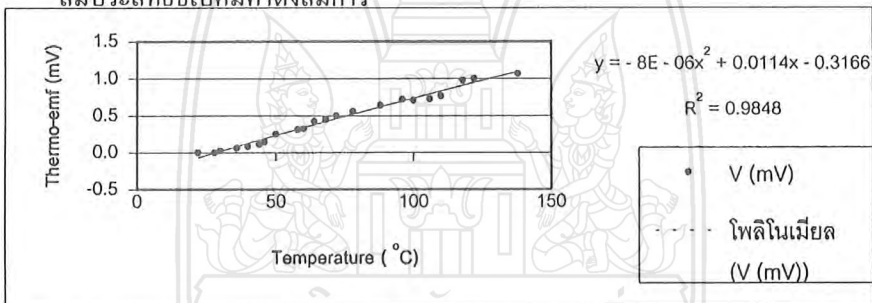
4. ผลการทดสอบการทำให้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก



รูปที่ 5 ความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ของ $\text{ZnO} + 0.01\text{Nb}_2\text{O}_5$

ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6

สัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าดังสมการ



รูปที่ 6 แรงเคลื่อนไฟฟ้าความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ของ $\text{ZnO} + 0.01\text{Nb}_2\text{O}_5$

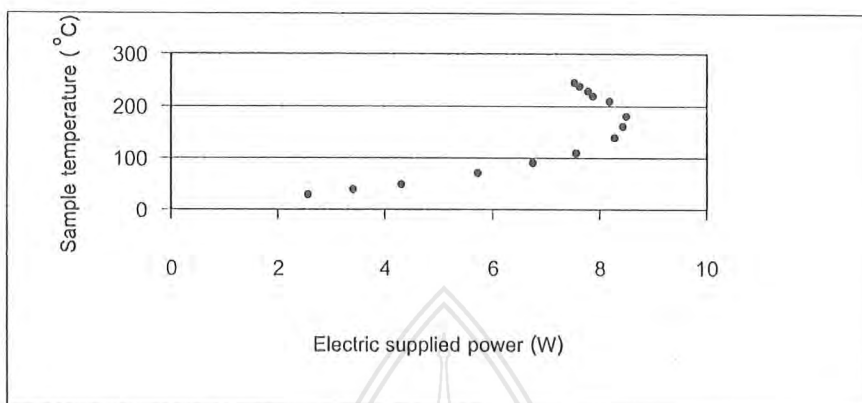
$$\alpha = \Delta V / \Delta T = 9.72 \times 10^{-6} \text{ โวลต์/°ซ.}$$

(6)

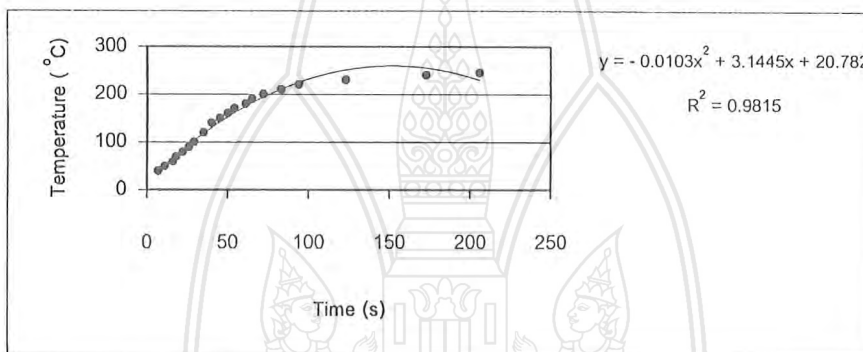
5. ผลการทดสอบการทำเป็นสารให้ความร้อน

ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8 พบว่า อุณหภูมิของสารเพิ่มขึ้นจาก 30° ซ. ถึง 180° ซ. เมื่อสารได้รับกำลังไฟฟ้าในช่วง 2.54 วัตต์ ถึง 8.52 วัตต์ แต่อุณหภูมิของสารในช่วง 180° ซ. ถึง 245° ซ. พบว่า กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์จะลดลงจาก 8.52 วัตต์ ไปเป็น 7.55 วัตต์ อุณหภูมิของสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้อง(24° ซ.) ไปเป็น 245° ซ.

บทสรุป



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารกับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่สาร $\text{ZnO} + 0.01\text{Nb}_2\text{O}_5$



รูปที่ 8 อุณหภูมิของสารให้ความร้อนที่เวลาต่างๆ ของ $\text{ZnO} + 0.01\text{Nb}_2\text{O}_5$

ก้อนสารรูปจาน $\text{ZnO} + 0.01\text{Nb}_2\text{O}_5$ มีสีขาว-เหลืองอ่อนและมีความหนา 2.36 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.95 มิลลิเมตร ผลการขึ้นบ่งลักษณะของสารด้วยเครื่อง XRD พบสาร ZnO , ZnNb_2O_6 และ Nb_2O_5

ผลการทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิ พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิเป็นแบบเชิงเส้นดังสมการ

$$R = -0.0433T + 8.5089 \quad (7)$$

อัตราการลดลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยอุณหภูมิมีค่าดังสมการ

$$\Delta R / \Delta T = -43.16 \text{ โอห์ม/}^\circ\text{ซ.} \quad (8)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ความต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็นที่น่าสนใจ เพราะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นหัววัดอุณหภูมิได้

ผลการทดสอบการทำเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้า

ความร้อน (ΔV) กับอุณหภูมิ (T) ต่างๆ ดังแสดงในสมการ

$$\Delta V = -8 \times 10^{-6} T^2 + 0.0114 T - 0.3166 \quad (9)$$

สัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าดังสมการ

$$\alpha = \Delta V / \Delta T = 9.72 \times 10^{-6} \text{ โวลต์/}^{\circ}\text{ซ.} \quad (10)$$

คุณสมบัติของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนี้สามารถนำไปใช้สำหรับการศึกษา และประยุกต์ทำเป็นอุปกรณ์แปลงอุณหภูมิเป็นแรงดันไฟฟ้าและอุปกรณ์ชั่งบอกการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิในช่วงแคบๆ ได้

ผลการทดสอบการทำให้เป็นสารให้ความร้อน พบว่า อุณหภูมิของสารเพิ่มขึ้นจาก 30°ซ. ถึง 180°ซ. เมื่อสารได้รับกำลังไฟฟ้าในช่วง 2.54 วัตต์ ถึง 8.52 วัตต์ แต่อุณหภูมิของสารในช่วง 180°ซ. ถึง 245°ซ. พบว่า กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่สารลดลงจาก 8.52 วัตต์ ไปเป็น 7.55 วัตต์ เพราะว่เมื่ออุณหภูมิของสารสูงขึ้น ความต้านทานของสารลดลง แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสารลดลงมาก แต่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นไม่มาก ผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าลดลงและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 180°ซ. ถึง 245°ซ. น้อยกว่าในช่วง 30°ซ. ถึง 180°ซ. กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่สารจึงมีค่าลดลง เมื่อปล่อยแรงดันไฟฟ้า 200 โวลต์ไปยังสาร เป็นเวลา 3 นาที และ 26 วินาที พบว่า อุณหภูมิของสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้อง (24°ซ.) ไปเป็น 245°ซ. คุณสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถประยุกต์เป็นสารให้ความร้อนของเตาอบได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการนักศึกษาของภาควิชาฟิสิกส์ ทุนทำงานแลกเปลี่ยน และทุนสนับสนุนการวิจัยจากเงินรายได้ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ประจำปี 2544-45 งานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์จากห้องปฏิบัติการฟิสิกส์วัสดุ หน่วยเครื่องมือกลาง ศูนย์เครื่องมือกลางและทุน STDB

เอกสารอ้างอิง

- Bosman, A. J. (1969). Relation between Seebeck coefficient and Fermi energy. *J. Phys. Chem. Solids.* 30:1151.
- Buchanan, R. C. (1991). *Ceramic materials for electronics*. 2nd edition. New York: Mercel Dekker, Inc.
- Martinez-Sarrion, M. L. (1995). Preparation and characterization of NTC thermistors based on $\text{Fe}_{2.18}\text{Mn}_{0.21}\text{Ni}_{0.61}\text{O}_4$. *J. Mater. Sci.* 30:2610-2615.
- Moulson, A.J. and Herbert, J.M. (1990). *Electroceramics*. London: Chapman & Hall.
- Pujar, R. B. (1996). Electrical properties of Zr^{4+} -substituted Mg-Zn ferrites. *J. Mater. Sci. Lett.* 15:1605-1607.
- Ravinder, D. (1994). Electrical conductivity of Mn-Zn ferrites. *J. Appl. Phys.* 75(10):6118-6120.
- Seok, S. I. (1995). The effect of Cu-sites doping on electrical properties of La_2CuO_4 as thermoelectric material. *J. Mater. Sci. : Mater. Elect.* 6:140-143.

- Soliman, F. A. S. (1993). Radiation effects on non-linear resistances. *J. Mater. Sci. : Mater. Elect.* 4:293-300.
- Tanaka, Y. (1997). Thermoelectric properties of ZnO-based materials. *J. Mater. Sci. Lett.* 16:155-157.



การเจริญเติบโตของผลกระทอนพันธุ์ปุ๋ยฝ้ายที่ได้รับ และไม่ได้รับการห่อ : ลักษณะภายนอก

จรีรัตน์ นามประดิษฐ์¹, มานิตย์ โฆษิตตระกูล², สุมณ มาสุธน³ และ กวิศร์ วานิชกุล⁴

บทคัดย่อ

การศึกษาการเจริญเติบโตของผลกระทอนพันธุ์ปุ๋ยฝ้ายที่ได้รับและไม่ได้รับการห่อ ณ ตำบล คลองน้ำเค็ม อำเภอแหลมสิงห์ จังหวัดจันทบุรี ระหว่างเดือน มิถุนายน 2542 ถึง เดือนตุลาคม 2543 ทำการห่อผลเมื่ออายุได้ 9 สัปดาห์ ในด้านลักษณะภายนอก พบว่าผลที่ได้รับและไม่ได้รับการห่อมีรูปแบบของการเติบโตเป็น single sigmoidal curve ผลเริ่มแก่ในสัปดาห์ที่ 15 และผลมีขนาดใหญ่สุดเมื่อมีอายุ 18 สัปดาห์หลังติดผล ผลแก่เต็มที่ร่วงหล่นประมาณสัปดาห์ที่ 18 หลังติดผลเป็นต้นไป มีแนวโน้มว่าผลที่ได้รับการห่อ มีขนาด น้ำหนัก ปริมาตร และลักษณะภายนอกที่ดีกว่าผลที่ไม่ได้รับการห่อ

Abstract

A study on the growth and development in bagged and nonbagged fruits of santol (*Sandoricum koetjape* (Burm. f.) Merr.) cv. Pui-phai was conducted at a fruit orchard in Klongnamkem subdistrict, Laemsing district, Chantaburi province during June 1999–October 2000. Fruits were bagged at the age of 9 weeks after fruit set. It was found that the growth pattern of fruit was characterized by a single sigmoidal curve. The period from fruit set to fruit maturation was 15 weeks. At the age of 18 weeks, fruit size was largest, and fully mature fruits began to drop. Fruit bagging tended to increase fruit size, weight, volume and external quality.

คำนำ

กระทอน มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Sandoricum koetjape* (Burm.f.) Merr. หรือมีชื่อพ้องว่า *Sandoricum indicum* Cav. เป็นไม้ผลยืนต้นอยู่ในวงศ์ Meliaceae (เต็ม สมิตินันท์, 2523; สะอาด บุญเกิด และคณะ, 2525) มีชื่อสามัญว่า santol ส่วนชื่อท้องถิ่นในประเทศไทยนั้นแตกต่างกันไปตามภาค เช่น ภาคกลางเรียก สะทอน หรือกระทอน ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เรียก มะตั้น มะต้อง ส่วนภาคใต้ เรียก ท้อน

¹ สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตร เขตที่ 6 อ.แหลมสิงห์ จ.จันทบุรี 22190

² ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

³ ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

⁴ ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

ลอน และเตียน เป็นต้น (กรมป่าไม้, 2491) จากรายงานของกรมส่งเสริมการเกษตร พบว่าในปี พ.ศ. 2538 มีพื้นที่ปลูกกระท้อนรวมทั้งประเทศถึง 67,950 ไร่ แยกเป็นกลุ่มพันธุ์กระท้อนห่อหรือกระท้อนหวาน ร้อยละ 86.10 ของพื้นที่รวม ส่วนที่เหลือเป็นกลุ่มพันธุ์กระท้อนเปรี้ยวผลผลิตรวมทั้งประเทศเท่ากับ 27,016 ตัน ทั้งนี้เป็นกระท้อนห่อถึงร้อยละ 72.88 โดยคิดเป็นมูลค่าการผลิตรวมทั้งสิ้นเกือบ 500 ล้านบาท (ฝ่ายส่งเสริมการเกษตร, 2541)

ปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการผลิตกระท้อนคือการห่อผล (นิรนาม, 2534) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคุณภาพของผลโดยตรง เกษตรกรถือว่าการห่อผลเป็นสิ่งจำเป็น โดยมีวัตถุประสงค์ 2 ประการ ประการแรกเพื่อป้องกันและลดการเข้าทำลายของแมลงวันทอง ผลที่ไม่ได้รับการห่อจะถูกแมลงวันทองเข้าทำลายร่วงหล่นเสียหาย และประการที่ 2 เพื่อเพิ่มคุณภาพของผล โดยเกษตรกรเชื่อว่าการห่อผลทำให้คุณภาพของผลดีขึ้น เช่น สีผิวของผลสวยงามสม่ำเสมอ ไม่กร้าน เนื้อผล (pericarp) นุ่ม ขนาดของผลใหญ่ขึ้น เป็นต้น (ววรรณ (นามแฝง), 2527; อีรพงษ์ พงษ์นิติก, 2535)

กระท้อนพันธุ์ปุ๋ยฝ้ายเป็นกระท้อนหวานพันธุ์หนัก ผลมีขนาดกลางถึงค่อนข้างใหญ่ น้ำหนักผลประมาณ 400–800 กรัม ทรงผลกลม หรือแป้น ด้านก้นผลเรียบ ด้านขั้วผลนูนขึ้น บางผลมีรอยขรุขระเล็กน้อย ขั้วผลสั้น เปลือกบาง ที่ผิวมีขนอ่อนนุ่ม ผิวของผลเมื่อสุกมีสีเหลืองอมน้ำตาล เนื้อผลมีรสหวานอมเปรี้ยวไม่ฝาด ปุยหุ้มเมล็ด (aril) หนาฟูและมีรสหวานจัด เมล็ดแบนมีขนาดใหญ่ (ทวีศักดิ์ ด่วงทอง, 2535) ใบรูปไข่ (ovate) ปลายใบเรียวแหลม (acuminate) และฐานใบตัด (truncate) (อัมพิกา ปุณณจิต, 2537) เชื่อว่ากระท้อนพันธุ์นี้กลายพันธุ์มาจากพันธุ์ทองหยิบ เนื่องจากมีลักษณะผลที่คล้ายคลึงกันมาก (อึ้ง ธรรมนิยกุล, 2528) กระท้อนพันธุ์ปุ๋ยฝ้ายมักให้ผลผลิตต่ำ (สุเมย์ ธัญญโนทัย, 2533)

การเพิ่มขนาดของผลเกิดจาก 2 กระบวนการหลักคือ การแบ่งเซลล์ และการขยายขนาดของเซลล์ โดยการแบ่งเซลล์เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้น ๆ อาจเกิดขึ้นในช่วงดอกบาน ระหว่างการถ่ายเรณูหรือหลังการปฏิสนธิแล้ว (Leopold and Kriedemann, 1975) ส่วนการขยายขนาดของเซลล์ในเนื้อผลนั้นเกิดขึ้นหลังจากมีการแบ่งเซลล์แล้ว (Nitsch, 1965) นอกจากสองกระบวนการหลักนี้แล้วยังเกี่ยวข้องกับการสะสมสารอินทรีย์บางชนิดด้วย เช่น กรดอินทรีย์ และน้ำตาล (Street and Opik, 1984)

โดยทั่วไปการเติบโตของผลที่ได้จากการชั่งน้ำหนักและวัดปริมาตรของผลมี 2 รูปแบบ รูปแบบแรกเรียกว่า single sigmoidal curve หรือ simple sigmoidal curve อาจแบ่งได้เป็น 3 ระยะ โดยระยะที่ 1 เป็นช่วงที่เกิดขึ้นหลังจากติดผล ช่วงนี้เป็นการเพิ่มจำนวนเซลล์ ผลมีการเพิ่มขนาดเพียงเล็กน้อย ระยะที่ 2 เป็นช่วงที่มีการเติบโตอย่างรวดเร็วเนื่องจากการขยายขนาดของเซลล์และการเพิ่มขึ้นของช่องระหว่างเซลล์ (intercellular space) โดยมีการเพิ่มขึ้นของปริมาตรมากกว่าน้ำหนักผล ส่วนในระยะที่ 3 ยังคงมีการขยายขนาดของเซลล์ แต่เกิดขึ้นในอัตราที่ลดลง ผลเริ่มเข้าสู่ระยะเต็มวัย มีการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ เพื่อเข้าสู่กระบวนการสุก (ripening) ตัวอย่างของผลที่มีการเติบโตในรูปแบบนี้ ได้แก่ กล้วยน้ำว่าค่อม (วนิดา คุณาวุฒิ, 2534) มังคุด (กวีศรี วานิชกุล, 2522) มะม่วง (ดวงตรา กสานติกุล, 2526; สมชาย รัตนมาลี, 2530; สมบัติ ตงเต้า, 2533) มะละกอ (กาญจนา กุลวิฑิต, 2536; ดวงทิพย์ ม้าทอง, 2537) ส้ม (มนตรี อิศระไกรศีล, 2527; Bain, 1958) ทับทิม (Shulman et al., 1984) แผลชันฟูรด (Enamorado et al., 1995) และมะกอกน้ำ (กานดา ไหมคำมิ, 2542)

รูปแบบที่ 2 เรียกว่า double sigmoidal curve มักพบในผลเมล็ดเดี่ยวแข็ง (drupe) โดยการเติบโตแบ่งเป็น 3 ระยะเช่นเดียวกัน คือ ระยะที่ 1 เป็นช่วงที่มีการขยายขนาดค่อนข้างช้า อันเนื่องมาจากการแบ่งเซลล์ ระยะที่ 2 มีการขยายขนาดช้ามาก มีการสะสมลิกนินที่ผนังผลชั้นใน (endocarp) ทำให้บริเวณนั้นแข็ง ระยะที่ 3 หลังจากผนังผลชั้นในแข็งตัวแล้ว ผลมีอัตราการเติบโตเพิ่มมากขึ้นอีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากการขยายขนาดของเซลล์ในผนังผลชั้นกลางเป็นส่วนใหญ่ ตัวอย่างของผลที่มีการเติบโตในรูปแบบนี้ได้แก่ เชอร์รี่ มะกอกฝรั่ง (อมรรัช อุณจะนำ, 2512) พลัม เนคทารีน (สุรนนต์ สุภัทรพันธุ์, 2526) ท้อ (Masia et al., 1992) วอลนัทพันธุ์ Ashley และ Hartley (Pinney และ Polito, 1983) และฝรั่ง (ทัศนัวรรณ ทองพูน, 2539)

ในปัจจุบันงานวิจัยเกี่ยวกับกระถ่อนในประเทศไทยมีน้อยมาก และยังไม่เคยมีการศึกษาในเรื่องการเจริญเติบโตของผล ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาในเรื่องดังกล่าว ทั้งภายใต้สภาพที่มีการห่อและไม่มีการห่อ เพื่อใช้เป็นข้อมูลขั้นพื้นฐานสำหรับประกอบการผลิตและควบคุมคุณภาพของผล และเพื่อศึกษาอิทธิพลของการห่อต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะภายนอกกระหว่างการเจริญเติบโตของผล

อุปกรณ์และวิธีการ

เลือกต้นกระถ่อนพันธุ์ปูยฝ้ายที่มีขนาดของทรงพุ่มและความสมบูรณ์ใกล้เคียงกัน ได้รับการปฏิบัติดูแลเหมือนกัน อายุประมาณ 8 ปี จำนวน 10 ต้น จากสวนของเกษตรกรในตำบลคลองน้ำเค็ม อำเภอสทิงพระ จังหวัดสงขลา ใช้ผ้าพลาสติกผูกทำเครื่องหมายกับผลที่ติดในรุ่นเดียวกันประมาณ 240 ผล โดยแยกออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กัน ส่วนหนึ่งใช้ในการศึกษาการเจริญเติบโตของผลที่ไม่ได้รับการห่อ ส่วนที่เหลือใช้ศึกษาการเจริญเติบโตของผลที่ได้รับการห่อ สุ่มเก็บตัวอย่างผลทั้งที่ได้รับการและไม่ได้รับการห่อ ตัวอย่างละ 6 ผลทุกสัปดาห์ ตั้งแต่ผลมีอายุได้ 7 วันหลังติดผลไปจนกระทั่งผลแก่ และทำการห่อผลด้วยถุงกระดาษสีน้ำตาลเมื่อผลมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5 เซนติเมตร หรือเมื่อมีอายุประมาณ 9 สัปดาห์ หลังติดผล ผลที่สุ่มเก็บมาแต่ละสัปดาห์ใช้เป็นตัวแทนในการศึกษาลักษณะภายนอก ดังนี้ วัดส่วนที่กว้างและยาวที่สุดของผลโดยใช้เวอร์เนียร์แคลิเปอร์ส ซึ่งน้ำหนักผล วัดปริมาตรของผลโดยการแทนที่น้ำแล้วคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะ เปรียบเทียบสีผิวของผลกับแผ่นเทียบสีของ the Royal Horticultural Society แล้วเปลี่ยนเป็นค่าความสว่าง (Y) ซึ่งมีหน่วยเป็นลักซ์ (lux) และสังเกตลักษณะผิวของผลผ่านแว่นขยาย

ผลการทดลอง

ในการศึกษาการเจริญเติบโตของผลกระถ่อนพันธุ์ปูยฝ้ายที่ได้รับการและไม่ได้รับการห่อ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของลักษณะภายนอกตามอายุผลดังนี้

1. ลักษณะในเชิงปริมาณ

การเติบโตของผลที่ได้จากการวัดขนาด (ความกว้างและความยาว) การชั่งน้ำหนัก การหาปริมาตร และการหาค่าความถ่วงจำเพาะ มีรูปแบบเป็น single sigmoidal curve (รูปที่ 1, 2, 3 และ 4)

ขนาดผล ผลซึ่งไม่ได้รับการห่อหุ้มที่มีอายุ 1 สัปดาห์หลังติดผล มีความกว้างของผลน้อยกว่าความยาว โดยมีความกว้างและความยาวเท่ากับ 0.47 และ 0.62 เซนติเมตร ตามลำดับ ผลที่มีอายุ 2-3 สัปดาห์ มีความกว้างและความยาวของผลใกล้เคียงกัน หลังจากอายุ 3 สัปดาห์ขึ้นไปขนาดของผลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในสัปดาห์ที่ 15 ผลมีความกว้าง 9.04 เซนติเมตร และความยาว 8.91 เซนติเมตร หลังจากนั้นขนาดของผลเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ผลมีขนาดใหญ่ที่สุดในสัปดาห์ 18 โดยมีความกว้างและความยาวเป็น 9.43 และ 9.32 เซนติเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 1)

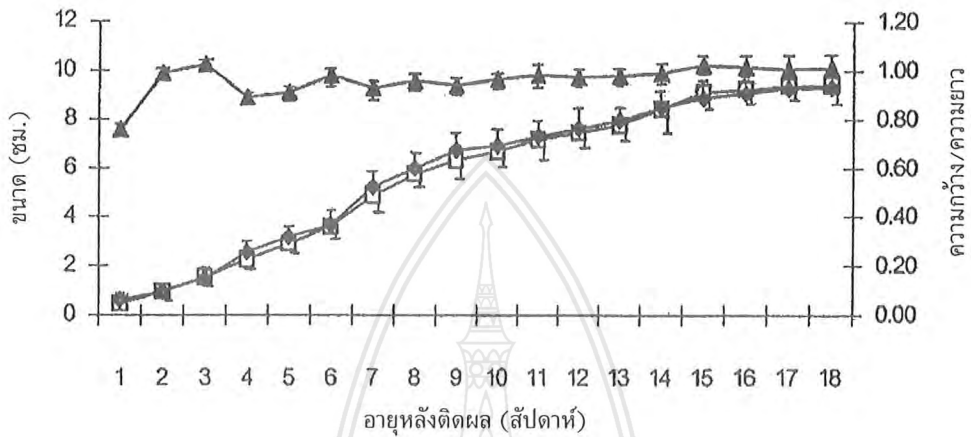
ผลที่ได้รับการห่อหุ้มขนาดและรูปร่างที่อายุต่าง ๆ กันคล้ายคลึงกับผลที่ไม่ได้รับการห่อ แต่หลังจากสัปดาห์ที่ 11 ผลที่ได้รับการห่อมีการเพิ่มของขนาดมากกว่าผลที่ไม่ได้รับการห่อเล็กน้อย โดยผลที่มีอายุ 15 สัปดาห์หลังติดผลมีความกว้างของผล 9.41 เซนติเมตร และความยาวของผล 9.26 เซนติเมตร และในที่สุดมีความกว้างและความยาวของผลเป็น 10.14 และ 9.85 เซนติเมตร ตามลำดับในสัปดาห์ที่ 18 (รูปที่ 2)

น้ำหนักและปริมาตรของผล และความถ่วงจำเพาะ น้ำหนักและปริมาตรของผลที่ไม่ได้รับการห่อ มีการเปลี่ยนแปลงที่สามารถแบ่งได้เป็น 3 ระยะ (รูปที่ 3) ระยะที่ 1 ผลมีอายุ 1-6 สัปดาห์ น้ำหนักและปริมาตรของผลเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ โดยน้ำหนักของผลเพิ่มจาก 0.30 เป็น 26.47 กรัม ขณะที่ปริมาตรของผลเพิ่มจาก 0.27 เป็น 25.42 ลูกบาศก์เซนติเมตร ระยะที่ 2 ผลมีอายุ 7-15 สัปดาห์ ทั้งน้ำหนักและปริมาตรของผลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 66.64 เป็น 401.36 กรัม และ 63.72 เป็น 426.98 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ระยะที่ 3 ผลมีอายุ 15 สัปดาห์ขึ้นไป น้ำหนักและปริมาตรของผลเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยมีน้ำหนักและปริมาตรสูงสุดเท่ากับ 433 กรัม และ 456.33 ลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อผลมีอายุ 18 สัปดาห์

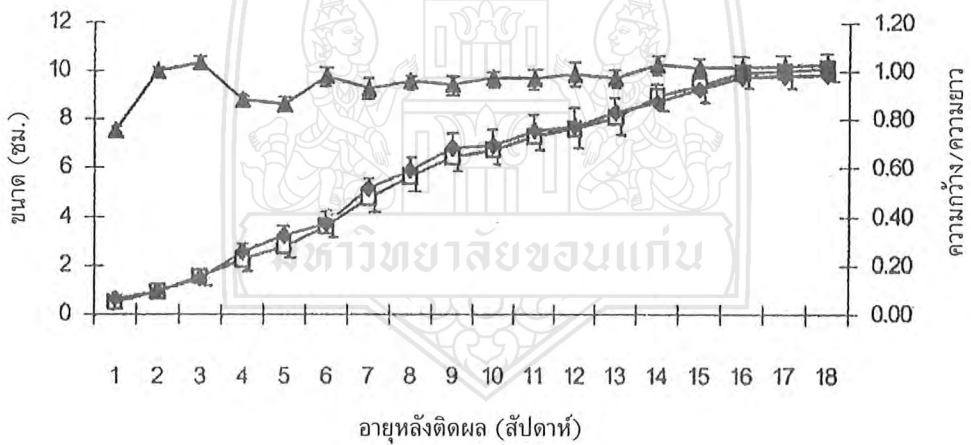
น้ำหนักและปริมาตรของผลที่ได้รับการห่อมีการเปลี่ยนแปลงในทำนองเดียวกันกับผลที่ไม่ได้รับการห่อ อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้รับการห่อมีน้ำหนักและปริมาตรมากกว่าผลที่ไม่ได้รับการห่อค่อนข้างชัดเจนหลังจากผลมีอายุ 15 สัปดาห์เป็นต้นไป โดยที่อายุ 15 สัปดาห์ ผลมีน้ำหนัก 472.41 กรัม และมีปริมาตรผล 487.02 ลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ยังพบว่า ผลที่ไม่ได้รับการห่อเมื่ออายุ 9 สัปดาห์ มีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่า 1 (รูปที่ 3) ความถ่วงจำเพาะมีค่าสูงสุดในสัปดาห์ที่ 4 (1.42) จากนั้นความถ่วงจำเพาะลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าต่ำกว่า 1 และค่อนข้างคงที่ จากสัปดาห์ที่ 13 จนถึงช่วงท้าย ๆ ของการเจริญเติบโตของผล ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะในช่วง 0.94-0.96 ส่วนความถ่วงจำเพาะของผลที่ได้รับการห่อ นั้นมีการเปลี่ยนแปลงในทำนองเดียวกันกับผลที่ไม่ได้รับการห่อ (รูปที่ 4)

2. ลักษณะในเชิงคุณภาพ

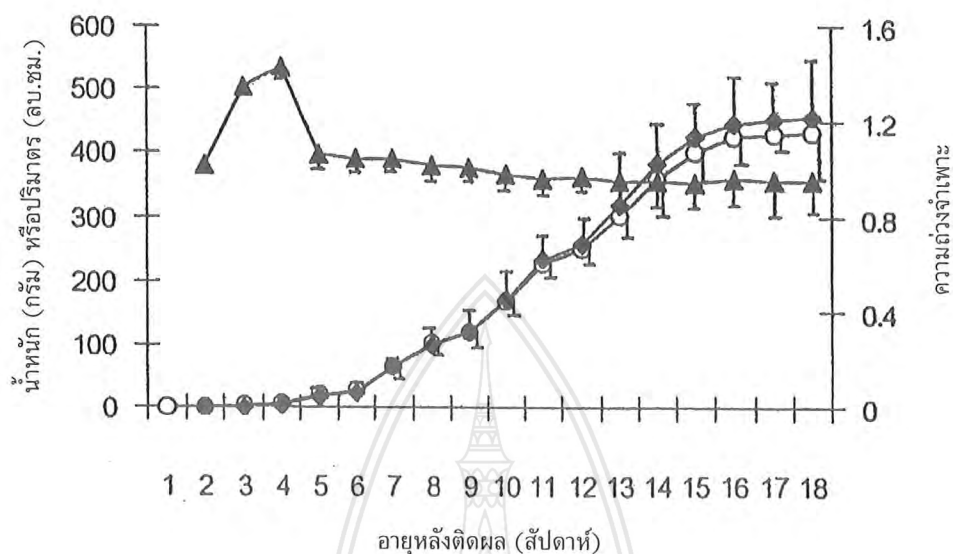
สีและลักษณะผิวของผล ผลกระทอนพันธุ์ปุ๋ยฝ้ายในช่วงอายุ 8 สัปดาห์แรกมีสีเขียวเข้ม (YG 146A-B) ผิวของผลมีขนละเอียดอ่อนนุ่มคล้ายกำมะหยี่ ผิวด้านขั้วผลเริ่มมีร่องตามยาวจากขั้วผลไปหาปลายผลในสัปดาห์ที่ 8 จากนั้นความเข้มของสีเขียวลดลง (YG 146C-D) ขณะที่ผิวของผลด้านขั้วผลเริ่มเรียบในสัปดาห์ที่ 10 ผลที่ไม่ได้รับการห่อมีผิวของผลเป็นสีเขียวปนเหลือง (YG 153A) ในสัปดาห์ที่ 14 แล้วค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีเหลืองมากขึ้นเป็นเหลืองปนเขียว (GY 1B) ในสัปดาห์ที่ 15 และเปลี่ยนเป็นสีเหลือง (Y 3A) เมื่อผลมีอายุ 16 สัปดาห์ จากนั้นสีผิวของผลเปลี่ยนเป็นสีส้มปนเหลือง (YO 20A) ใน



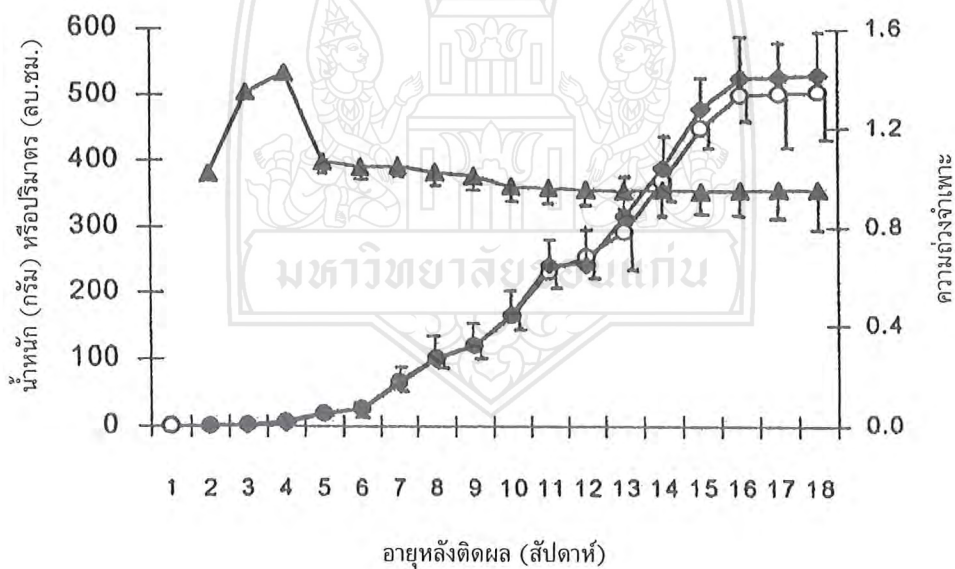
รูปที่ 1 ความกว้าง (-□-) ความยาว (-◆-) และอัตราส่วนความกว้าง/ความยาว (-▲-) ของผลกระทอนพันธุ์ปุยฝ้ายที่ไม่ได้รับการห่อ (I = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n = 6)



รูปที่ 2 ความกว้าง (-□-) ความยาว (-◆-) และอัตราส่วนความกว้าง/ความยาว (-▲-) ของผลกระทอนพันธุ์ปุยฝ้ายที่ได้รับการห่อ (I = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n = 6)



รูปที่ 3 น้ำหนัก (-□-) ปริมาตร (-◆-) และความตึงจำเพาะ (-▲-) ของผลกระท่อนพันธุ์ปุ๋ยฝ้ายที่ไม่ได้รับการห่อ (I = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n = 6)



รูปที่ 4 น้ำหนัก (-□-) ปริมาตร (-◆-) และความตึงจำเพาะ (-▲-) ของผลกระท่อนพันธุ์ปุ๋ยฝ้ายที่ได้รับการห่อ (I = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n = 6)

ที่สุดก่อนผลร่วงหล่น (สัปดาห์ที่ 18) ผิวของผลมีสีส้มปนเหลืองมากขึ้น (YO 22A) สำหรับลักษณะผิวของผลนั้นหลังจากผลมีอายุได้ 12 สัปดาห์จะเริ่มปรากฏร่องรอยการเข้าทำลายของแมลงวันทอง และรอยขีดข่วนที่เกิดจากการเสียดสี ทำให้ผิวของผลโดยทั่วไปหยาบกร้านมากยิ่งขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 1)

หลังจากทำการห่อผลที่มีอายุ 9 สัปดาห์หลังติดผลแล้ว พบว่าสีผิวของผลในแต่ละช่วงอายุมีการเปลี่ยนแปลงในทำนองเดียวกันกับผลที่ไม่ได้รับการห่อ (ตารางที่ 2) แต่สีผิวของผลอ่อนกว่า สีมืดความสม่ำเสมอมากกว่า มีตำหนิน้อยมาก และเมื่อผลมีอายุตั้งแต่ 16 สัปดาห์เป็นต้นไป สีผิวของผลมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ยังคงเป็นสีเหลืองนวล (YO 10B) จนกระทั่งผลร่วงหล่น ส่วนลักษณะผิวสัมผัสนั้นไม่หยาบกร้าน แม้ผลมีอายุมากขึ้นจนถึงระยะสุดท้ายของการเจริญเติบโตก็ตาม

เมื่อทำการเปลี่ยนสีผิวของผลเป็นค่าความสว่าง (Y) พบว่าผลที่ไม่ได้รับการห่อมีค่าความสว่างเพิ่มขึ้นตามอายุ (ตารางที่ 1) โดยผลซึ่งมีอายุ 1-2 สัปดาห์ มีค่าความสว่างต่ำสุด (11.8 ลักซ์) จากนั้นความสว่างเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนมีค่าสูงสุด (79.5 ลักซ์) ที่อายุผล 16 สัปดาห์ และลดลงอีกครั้งในช่วงท้ายของการเจริญเติบโตของผล

ผลที่ได้รับการห่อมีค่าความสว่างของผิวสูงกว่าผลที่ไม่ได้รับการห่อ (ตารางที่ 2) ยกเว้นที่อายุผล 15-16 สัปดาห์ ซึ่งมีค่าความสว่างใกล้เคียงกันกับผลที่ไม่ได้รับการห่อ หลังจากสัปดาห์ที่ 16 ค่าความสว่างเกือบไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของสีผิว

ตารางที่ 1 สีผิว ค่าความสว่าง (Y) และลักษณะผิวของผลกระทอนพันธุ์ปุยฝ้ายที่ไม่ได้รับการห่อ

อายุผล (สัปดาห์)	สีผิว ^๑	ค่าความสว่าง (Y) (ลักซ์)	ลักษณะผิวของผล
1-7	(YG 146A-B)	11.8-18.2	มีขนละเอียดนุ่มคล้ายกำมะหยี่ ผิวเรียบ
8-9	(YG 146B)	18.2	มีขนละเอียด ผิวของผลมีร่องตามยาวจากขั้วผลไปหาปลายผล ด้านขั้วผลมีร่องลึกกว่าด้านปลายผล
10-11	(YG 146C)	25.1	มีขนละเอียด ร่องตามยาวค่อย ๆ ตื้นขึ้น
12-13	(YG 146D)	31.5	มีขนละเอียด ผิวของผลยังคงมีร่องตามยาวเล็กน้อย เริ่มมีตำหนิจากการเข้าทำลายของแมลงและมีรอยขีดข่วนที่เกิดจากการเสียดสี
14	(YG 153A)	35.4	มีขนละเอียด ผิวของผลยังคงมีร่องตามยาวเล็กน้อย มีตำหนิบ้าง
15	(GY 1B)	76.0	มีขนละเอียด ผิวเรียบ มีตำหนิเพิ่มขึ้น
16	(Y 3A)	79.5	ผิวสัมผัสกร้าน มีรอยตำหนิมาก
17	(YO 20A)	59.8	ผิวสัมผัสกร้าน มีรอยตำหนิมาก
18	(YO 22A)	50.9	ผิวสัมผัสกร้าน มีรอยตำหนิมาก

^๑ เปรียบเทียบกับแผ่นเทียบสีของ the Royal Horticultural Society ตัวอักษรและตัวเลขในวงเล็บเป็นรหัสประจำสี

ตารางที่ 2 สีผิว ค่าความสว่าง (Y) และลักษณะผิวของผลกระทอนพันธุ์ปุ๋ยฝ้ายที่ได้รับการห่อ

อายุผล (สัปดาห์)	สีผิว ^{1/}	ค่าความสว่าง (Y) (ลักซ์)	ลักษณะผิวของผล
1-7	(YG 146A-B)	11.8-18.2	มีขนละเอียดนุ่มคล้ายกำมะหยี่ ผิวเรียบ
8-9	(YG 146B)	18.2	มีขนละเอียด ผิวของผลมีร่องตามยาวจากขั้วผล ไปหาปลายผล ด้านขั้วผลมีร่องลึกกว่าด้าน ปลายผล
10-11	(YG 146C)	25.1	มีขนละเอียด ร่องตามยาวค่อย ๆ ตื้นขึ้น
12	(YG 151A)	42.5	มีขนละเอียด ผิวของผลมีร่องตื้นตามยาวเล็กน้อย
13	(YG 145B)	52.0	มีขนละเอียด ผิวเรียบเนียน มีร่องตามยาวเล็กน้อย
14	(YG 153D)	50.0	มีขนละเอียด ผิวเรียบเนียน มีร่องตื้น ๆ ตามยาว
15	(GY 1A)	76.5	มีขนละเอียด ผิวเรียบเนียน มีร่องตื้น ๆ ตามยาว
16	(Y 8A)	78.0	มีขนละเอียด ผิวเรียบเนียน มีร่องตื้น ๆ ตามยาว
17	(Y 10B)	78.8	มีขนละเอียด ผิวเรียบเนียน มีร่องตื้น ๆ ตามยาว
18	(Y 10B)	78.8	มีขนละเอียด ผิวเรียบเนียน มีร่องตื้น ๆ ตามยาว

^{1/} เปรียบเทียบกับแผ่นเทียบสีของ the Royal Horticultural Society ตัวอักษรและตัวเลขในวงเล็บเป็นรหัสประจำสี

วิจารณ์

จากการศึกษาการเจริญเติบโตของผลกระทอนพันธุ์ปุ๋ยฝ้ายที่ได้รับและไม่ได้รับการห่อ พบว่ามีรูปแบบของการเติบโตที่ไม่แตกต่างกัน โดยมีการเติบโตเป็นแบบ single sigmoidal curve เช่นเดียวกันกับกล้วยน้ำว้าค่อม (วนิดา คุณาวุฒิ, 2534) มังคุด (กวิศร์ วานิชกุล, 2522) มะม่วง (ดวงตรา กสานติกุล, 2526; สมบัติ ตงเต้า, 2533; สมชาย รัตนมาลี, 2539) และผลไม้่ออื่นอีกหลายชนิด

น้ำหนักสดและปริมาตรของผลมีอัตราการเพิ่มขึ้นช้ามากในระยะแรก คือ ในช่วง 6 สัปดาห์หลังการติดผล ระหว่างสัปดาห์ที่ 6-15 ผลเติบโตอย่างรวดเร็ว และในระยะสุดท้าย (ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 15 เป็นต้นไป) ผลเติบโตอย่างช้า ๆ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากระยะแรกเป็นการแบ่งเซลล์ จึงทำให้มีการเพิ่มขนาดเพียงเล็กน้อย ช่วงที่สองเป็นการขยายขนาดของเซลล์ และการเพิ่มของช่องระหว่างเซลล์ โดยเฉพาะในชั้นของเนื้อผล และปุยหุ้มเมล็ด ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สำหรับในระยะที่ 3 นั้น อัตราการขยายขนาดของเซลล์ค่อนข้างต่ำ มีการสะสมสารอินทรีย์และการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและชีวเคมีก่อนเข้าสู่ระยะที่มีการเสื่อมตามอายุ

น้ำหนักของผลมีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวน ปริมาตร และความหนาแน่นของเซลล์ โดยจำนวนและปริมาตรของเซลล์ในระยะที่ผลเจริญเต็มวัยขึ้นกับจำนวนและปริมาตรของเซลล์ในระยะดอกบาน รวมทั้งการแบ่งเซลล์และการขยายขนาดของเซลล์ในเวลาต่อมา (Coombe, 1976) จากการทดลองพบว่าผลกระทอนที่ได้รับการห่อมีขนาดและน้ำหนักมากกว่าผลที่ไม่ได้รับการห่อเล็กน้อย เช่นเดียวกันกับอิทธิพลของการห่อผลในองุ่น (ทวีศักดิ์ แสงอุดม, 2531; อนุชา พิตรประยูร, 2534) มะม่วง (โกศล เจริญสม,

2527; วิจิตร วังใน, 2529; ฉลองชัย แบบประเสริฐ, 2533) และทับทิม (Hussein et al., 1994; Padmavathamma and Hulamani, 1996) สาเหตุที่ผลซึ่งได้รับการห่อมีขนาดและน้ำหนักมากกว่าผลซึ่งไม่ได้รับการห่อไม่น่าจะเกิดจากอิทธิพลของการห่อที่มีต่อการแบ่งเซลล์เพราะผลที่ได้รับการห่อที่อายุประมาณ 9 สัปดาห์หลังติดผลซึ่งเป็นช่วงที่ผลเลยระยะแบ่งเซลล์ไปแล้ว แต่อยู่ในช่วงที่มีการขยายขนาดของเซลล์เป็นหลัก ดังนั้นเป็นไปได้ที่การห่อผลช่วยให้เซลล์ขยายขนาดเพิ่มขึ้น การที่เซลล์ของผลซึ่งได้รับการห่อมีการขยายขนาดมากขึ้นอาจเนื่องมาจากการสะสมความร้อนภายในถุงที่ใช้ห่อ ทำให้อุณหภูมิสม่ำเสมอและอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของผล (กมล คำนิล, 2528) การห่อยังช่วยรักษาความชื้นรอบๆ ผล ผลจึงอยู่ภายใต้ความชื้นที่ค่อนข้างคงที่ (ทวีศักดิ์ แสงอุดม, 2532) สภาพดังกล่าวอาจส่งเสริมการเจริญเติบโตของผล ผิวของผลที่ได้รับการห่อไม่มีรอยแผลและตำหนิอันอาจจะเป็นอุปสรรคต่อการเพิ่มขนาดของเซลล์ จึงมีขนาดและน้ำหนักมากกว่าผลที่ไม่ได้รับการห่อ

เมื่ออายุมากขึ้น ผลกระทอนพันธุ์ปูยฝ้ายมีอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาตรสูงกว่าการเพิ่มขึ้นของน้ำหนัก เนื่องจากมีช่องระหว่างเซลล์ หรือโพรงอากาศภายในผลมากขึ้น คล้ายคลึงกับการเติบโตของผลแอปเปิล แต่ตรงกันข้ามกับผลองุ่นที่มีอัตราการเพิ่มของน้ำหนักมากกว่าปริมาตร ทั้งนี้เป็นผลมาจากการสะสมของแข็งต่าง ๆ มากขึ้น (Leopold และ Kriedemann, 1975)

การเปลี่ยนแปลงสีผิวของผลกระทอนจากเขียวไปเป็นเหลืองเมื่อผลเจริญเต็มวัยเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับผลไม้หลายชนิด โดยทั่วไปพบว่ามี การเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ กิจกรรมของเอนไซม์ chlorophyllase เพิ่มขึ้น เนื่องจากคลอโรฟิลล์ถูกทำลาย ทำให้แคโรทีนอยด์เผยโฉมออกมา เช่น ในผลกล้วยและส้ม อย่างไรก็ตามในผลไม้บางชนิด เช่น มะเขือเทศ จะมีการสะสมของแคโรทีนอยด์ในขณะที่ผลมีอายุมากขึ้นหรือสุก (สายชล เกตุษา, 2528; จิรา ณ หนองคาย, 2531; จรินทร์ ศิริพานิช, 2541)

เมื่อพิจารณาการเจริญเติบโตของผลกระทอนพันธุ์ปูยฝ้ายที่ได้รับการห่อ พบว่าสีผิวของผลที่กำลังเจริญเติบโตมีสีเขียวอ่อนมากกว่า และเมื่อเจริญเต็มวัยมีสีเหลืองนวลสม่ำเสมอสวยงามกว่าผลที่ไม่ได้รับการห่อ ทั้งนี้เนื่องจากมีปริมาณคลอโรฟิลล์น้อยกว่าผลที่ไม่ได้รับการห่อ สอดคล้องกับการศึกษาของ Hong et al. (1989) ที่รายงานว่า การห่อผลสาลี่ด้วยวัสดุต่างๆ มีอิทธิพลต่อคุณภาพของผล โดยทำให้ผลมีปริมาณคลอโรฟิลล์น้อยกว่าผลที่ไม่ได้รับการห่อเล็กน้อย ในทำนองเดียวกัน Byun et al. (1989) พบว่าการห่อผลแอปเปิลพันธุ์ฟูจิ ทำให้สีผิวของผลสวยงามกว่าผลที่ไม่ได้รับการห่อ เนื่องจากการห่อทำให้ผิวของผลมีปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง แต่มีปริมาณแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้น นอกจากสีผิวของผลต่างกันแล้ว การห่อยังทำให้ผิวของผลกระทอนมีคุณภาพดีกว่าผลที่ไม่ได้รับการห่อ สีผิวของผลมีความสม่ำเสมอ ลักษณะผิวไม่หยาบกร้าน ไม่มีตำหนิที่เกิดจากการเข้าทำลายของแมลงวันทองและศัตรูพืชอื่นๆ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการห่อผลสามารถป้องกันการเข้าทำลายของแมลงวันทองและแมลงศัตรูรวมทั้งสัตว์ต่างๆ ขณะเดียวกันการห่อก็สามารถป้องกันการขีดข่วนที่ผิวของผลได้อีกด้วย ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Kim and Kim (1989) และ Kikuchi et al. (1997) นอกจากนี้ การห่อยังสามารถปรับปรุงคุณภาพของผลไม้ชนิดอื่นด้วย เช่น องุ่น (ทวีศักดิ์ แสงอุดม, 2531; อนุชา พิตรประยูร, 2534; Proctor and Loughheed, 1976) แตงเทศ (บุญชัย ฉัตรชัยอุดมสุข, 2529) ทับทิม (Hussein et al., 1994) มะม่วง (โกศล เจริญสม, 2527) และลิ้นจี่ (วีระชัย จงสุวรรณวัฒนา, 2523; กมล คำนิล, 2528; อุดม ไชหมู, 2529)

สรุป

จากการศึกษาลักษณะภายนอกกระหว่างการเจริญเติบโตของผลกระท่อนพันธุ์ปุยฝ้ายที่ได้รับและไม่ได้รับการห่อ สรุปได้ดังนี้

1. ผลที่ได้รับและไม่ได้รับการห่อ มีลักษณะการเติบโตที่ไม่แตกต่างกัน โดยมีรูปแบบเป็น single sigmoidal curve และใช้ระยะเวลาดังแต่ติดผลจนกระทั่งผลแก่ประมาณ 15 สัปดาห์ ผลแก่เต็มที่เริ่มร่วงหล่นในสัปดาห์ที่ 18
2. มีแนวโน้มว่าผลที่ได้รับการห่อมีขนาด น้ำหนัก และ ปริมาตร รวมทั้งลักษณะภายนอกที่สวยงามมากกว่าผลที่ไม่ได้รับการห่อ

เอกสารอ้างอิง

- กมล คำนิล. (2528). การเปรียบเทียบวัสดุห่อผลล้นชนิดต่าง ๆ ที่มีต่อคุณภาพของผลล้นจี่พันธุ์สงฮวย. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี. สถาบันเทคโนโลยีการเกษตรแม่โจ้, เชียงใหม่.
- กรมป่าไม้. (2491). ชื่อพรรณไม้แห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์สุริยรัตน์ จำกัด.
- กวิศร์ วานิชกุล. (2522). การเจริญเติบโต ดัชนีการเก็บเกี่ยว และการเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวของผลมังคุด. ปัญหาพิเศษปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- กาญจนา กุลวิฑิต. (2536). พัฒนาการและสรีรวิทยาหลังการเก็บเกี่ยวของผลมะละกอพันธุ์ปากช่อง 1. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- กานดา ใหม่คามิ. (2542). การศึกษาชีววิทยาของดอก และการเติบโตของผลมะกอกน้ำพันธุ์แก้วหม่อม. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.
- โกศล เจริญสม. (2527). การห่อผลมะม่วงเพื่อป้องกันแมลงวันทอง. ใน : รายงานวิจัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปี 2527. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. น.194
- จริงแท้ ศิริพานิช. (2541). สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จิรา ณ หนองคาย. (2531). เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. กรุงเทพฯ : แมสพับลิชชิง.
- ฉลองชัย แบบประเสริฐ. (2533). การปฏิบัติบำรุงสวนมะม่วง. ใน : ไพบุลย์ ไพรีพ่ายฤทธิ์ (ผู้รวบรวม). การทำสวนมะม่วง. สำนักส่งเสริมและฝึกอบรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม. น.47-65.
- ดวงตรา กสานติกุล. (2526). การศึกษาการเจริญเติบโต การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี และดัชนีการเก็บเกี่ยวของผลมะม่วง (*Mangifera indica*L.) พันธุ์น้ำดอกไม้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ดวงทิพย์ ม้าทอง. (2537). การเติบโตของผลมะละกอพันธุ์แขกดำที่เกิดจากดอกเพศเมียและดอกสมบูรณ์เพศ. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.
- เต็ม สมิตินันท์. (2523). ชื่อพันธุ์ไม้แห่งประเทศไทย. ชื่อพฤกษศาสตร์-ชื่อพื้นเมือง. กรมป่าไม้ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- ทวีศักดิ์ ตัวทอง. (2535). กระท่อน. คำแนะนำที่ 50. กรมส่งเสริมการเกษตร, กรุงเทพฯ.

- ทวีศักดิ์ แสงอุดม. (2531). ผลของวัสดุห่อชนิดต่าง ๆ ที่มีต่อคุณภาพของผลองุ่นพันธุ์ Loose Perlette และ พันธุ์ Beauty Seedless. ปัญหาพิเศษปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ทวีศักดิ์ แสงอุดม. (2532). ผลของหลังคาพลาสติกและการห่อหุ้มผลที่มีต่อคุณภาพขององุ่นพันธุ์ Loose Perlette ที่ปลูกบนดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่ในฤดูฝน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ทัศนวรรณ ทองพูน. (2539). การศึกษาการเจริญเติบโตของผลฝรั่งพันธุ์กลมสามสี. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.
- อึ้ง ธรรมนิตยกุล. (2528). การปลูกกระถ่อนของชาวสวนนนทบุรี. เกษตรเกษตร. 9(106):23-29.
- ธีรพงศ์ พงษ์นิตกร. (2535). กระถ่อนยังเป็นไม้ผลที่ตลาดต้องการ. อาชีพชาวเกษตร. 12(30):6-7.
- นิรนาม. (2534). กระถ่อนไม้ผลทองของจังหวัดนนทบุรี. เกษตรเกษตร. 15(8):71-85.
- บุญชัย จัตรชัยอุดมสุข. (2529). อิทธิพลของวัสดุห่อที่มีต่อคุณภาพของแตงเทศ. ปัญหาพิเศษ ปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.
- ฝ่ายส่งเสริมการเกษตร. (2541). สถิติการปลูกไม้ผลยืนต้นปี 2538. กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวง เกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- มนตรี อิศระไกรศีล. (2527). การศึกษาการเจริญเติบโตของผล ดัชนีการเก็บเกี่ยว และการเปลี่ยนแปลง ภายหลังการเก็บเกี่ยวของผลส้มเขียวหวานและส้มตรา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- วนิดา คุณาวุฒิ. (2534). การเติบโตของช่อดอกและผลของกล้วยน้ำว้าค่อม. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.
- วรวรรณ (นามแฝง). (2527). กระถ่อนปลูกง่ายทนแล้ง. เกษตรเกษตร. 7(91):10-13.
- วิจิตร วังไ. (2529). มะม่วง. ภาควิชาพืชสวน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- วีระชัย จงสุวรรณวัฒนา. (2523). การศึกษาการห่อผลลิ้นจี่. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี. มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สมชาย รัตนมาลี. (2530). การเจริญเติบโต การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี และดัชนีการเก็บเกี่ยวของผล มะม่วง (*Mangifera indica* L.) พันธุ์ทองดำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สมบัติ ดงเต้า. (2533). การเจริญเติบโต ดัชนีการเก็บเกี่ยว และการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ภายหลังการ เก็บเกี่ยวของผลมะม่วง (*Mangifera indica* L.) พันธุ์เรด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สะอาด บุญเกิด, จเร สดากกร และ ทิพย์พรรณ สดากกร. (2525). ชื่อพันธุ์ไม้ในเมืองไทย. กองทุน จัดพิมพ์ตำราป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สายชล เกตุษา. (2528). สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. ศูนย์ส่งเสริมและ ฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.
- สุณีย์ ัญญโนทัย. (2533). กระถ่อนไม้ผลดี ยังมีระดับ. เกษตรเกษตร. 14(7):65-71.

- สรนันต์ สุภัทรพันธุ์. (2526). สรีรวิทยาการพัฒนาดของพืชสวน. ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- อนุชา พิตรประยูร. (2534). ผลของวัสดุห่อหุ้มที่มีต่อคุณภาพของผลองุ่น Beauty Seedless และ พันธุ์ Loose Perlette. ปัญหาพิเศษปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- อมรรัช อุดมนำ. (2512). การเจริญเติบโตของผล. วารสารพืชสวน. 5(2):51-55.
- อัมพิกา ปุณณจิต. (2537). พันธุ์กระถ่อนที่น่าสนใจ. เกษตรก้าวหน้า. 9(6):15-22.
- อุดม ไจหมทา. (2529). การป้องกันแมลงทำลายผลผลิตลิ้นจี่โดยใช้วิธีการคลุมผลด้วยวัสดุคลุมผลชนิดต่าง ๆ. ใน : กวีศรี วานิชกุล (ผู้รวบรวม). งานวิจัยไม้ผลในประเทศไทย พ.ศ. 2526-2537 เล่ม 3. ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. น.31.
- Bain, J. M. (1958). Morphological, anatomical and physiological changes in the developing fruit of Valencia orange (*Citrus sinensis* L.). Aust. J. Bot. 6:1-24.
- Byun, J. K., Byun, B. Y. and Ghong, K. H. (1989). Effect of fruit bagging and application of additional nitrogen fertilizer on color development of Fuji apples. J. Korean Soc. Hort. Sci. 30:271-277.
- Coombe, B.G. (1976). The development of fleshy fruits. Ann. Rev. Plant. Physiol. 27:507-528.
- Enamorado, H. E. P., Finger, F. L., Barros, R. S. and Puschmann, R. (1995). Development and ripening of yellow passion fruit. J. Hort. Sci. 70:573- 576.
- Hong, K., Kim, J., Choi, J. H., Han, J. W. and Yun, C. J. (1989). Effect of the kinds of fruit bags and the bagging time on fruit quality of 'Whangkeum Bae' pear. Res. Rpt. Rural Devel. Admin. (Korea) 31(4):26-33.
- Hussein, A. A., Abdel, A. G. R. and Ahmed, R. B. (1994). Effectiveness of fruit bagging on yield and fruit quality of pomegranate (*Punica granatum*. L.). Ann. Agric. Sci. 32:949-957.
- Kim, S. B. and Kim, C. S. (1989). Studies on chemical spray systems in apple orchard: reduction of spray frequency of agricultural chemicals by means of fruit bagging. Res. Rpt. Rural Devel. Admin. (Korea). 39(2):15-21.
- Kikuchi, T., Arakawa, O. and Norton, R. N. (1997). Improving skin color of 'Fuji' apple in Japan. Fruit Var. J. 51(2):71-75.
- Leopold, A. C. and Kriedemann, P. E. (1975). Plant Growth and Development. McGraw-Hill, New Delhi.
- Masia, A., Zanchin, A., Rascio, N. and Amina, A. (1992). Some biochemical and ultrastructural aspects of peach fruit development. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 117:808-815.
- Nitsch, J. P. (1965). Physiology of flower and fruit development. In : Ruhland, W. (ed.). Encyclopedia of Plant Physiology. Berlin : Springer Verlag. p.597-1647.
- Padmavathamma, A. S. and Hulamani, N. C. (1996). Studies on the effect of fruit bagging on size, quality and color development of pomegranate. J. Res.-ANGRA. 24(1-2):96-99.

- Pinney, K. and Polito, V.S. (1983). English walnut fruit growth and development. *Scientia Hortic.* 21:19-28.
- Proctor, J. T. A. and Loughheed, E. C. (1976). The effect of covering apples during development. *HortSci.* 11:108-109.
- Shulman, Y., Fainberstein, L. and Kavee, S. (1984). Pomegranate fruit development and maturation. *J. Hort. Sci.* 59:265-274.
- Street, H.E. and Opik, H. (1984). *The Physiology of Flowering Plants*. London : Edward Arnold (Publishers) Ltd.



ระเบียบวิธีผลต่างอันตะของปัญหาสถานะอยู่ตัวสำหรับ รูปแบบการพา-การแพร่ของปัญหามลภาวะทางอากาศ

เพียงพบ มนต์นวลปรางค์¹ และ สุพจน์ ไวทยากร²

บทคัดย่อ

การนำเสนอระเบียบวิธีผลต่างอันตะสำหรับการแก้ปัญหาคาร์พา-การแพร่มลภาวะทางอากาศสถานะอยู่ตัว โดยโดเมนของตัวแปรอิสระเป็นโดเมนที่มีขอบเขตด้วยเงื่อนไขขอบ ซึ่งได้เสนอตัวอย่างของผลเฉลยของปัญหาดังกล่าว

Abstract

The finite difference methods for solving the steady state problem for model of advection-diffusion of air pollution are presented. The domain of the independent variables is assumed to be the bounded domain, with a particular form of boundary conditions. An example problem is illustrated.

บทนำ

จุดมุ่งหมายหลักของงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาพฤติกรรมของความเข้มข้นมลภาวะทางอากาศในปริภูมิสองมิติที่อยู่ในสถานะอยู่ตัว ซึ่งถูกปล่อยไปในบรรยากาศจากปล่องควัน และอยู่ในระดับผกผัน ซึ่งเป็นระดับกีดกันฟลักซ์ของมลภาวะไปยังระดับที่สูงกว่าในบรรยากาศ ความเข้มข้นของมลภาวะทางอากาศซึ่งถูกปล่อยจากปล่องควันซึ่งสูง h จากพื้นดินและมีลมพัดในทิศทางแนวนอนเป็นฟังก์ชันของการแก้ปัญหานี้โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างอันตะ โดยมีเงื่อนไขขอบ คือ ฟลักซ์ของมลภาวะทางอากาศเป็นศูนย์ที่พื้นดินและระดับผกผันที่สูง H จากพื้นดิน ความเข้มข้นของมลภาวะที่เส้นกำเนิดเป็นฟังก์ชัน δ ซึ่งความเข้มข้นสูงขึ้นด้วยอัตราการกระจายคงที่ Q ของมลภาวะจากเส้นกำเนิด

รูปแบบทางคณิตศาสตร์

จากมลภาวะทางอากาศสามารถอธิบายด้วยรูปแบบทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นสมการการพา-การแพร่ได้ ดังสมการ

¹ โปรแกรมวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏเพชรบุรีวิทยาการณปทุมธานี 13180

² ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (1)$$

เมื่อ c เป็นความเข้มข้นของมลภาวะทางอากาศ t เป็นเวลา u และ w เป็นความเร็วลมตามแนวนอนและแนวตั้งของความเร็วลม $u = (u, 0, w)$ ตามลำดับ K_x , K_y และ K_z เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ตามแกน X , Y และแกน Z ตามลำดับ

กำหนดให้มลภาวะทางอากาศอยู่สถานะอยู่ตัว นั่นคือ

$$\frac{\partial c}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

ดังนั้น สมการ (1) จะเป็นสมการ

$$u \frac{\partial c}{\partial x} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (3)$$

สมมติให้ในแนวนอน การพามีความเด่นชัดมากกว่าการแพร่ และในแนวตั้ง การแพร่มีความเด่นชัดมากกว่าการพา นั่นคือ

$$u \frac{\partial c}{\partial x} \gg \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (4)$$

และ

$$w \frac{\partial c}{\partial z} \ll \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (5)$$

ดังนั้น หากจะไม่นำพจน์ที่มีค่าน้อย รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของมลภาวะทางอากาศในสมการ (3) ลดรูปเป็น

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (6)$$

และ หากสมมติเส้นกำเนิดมลภาวะทางอากาศอยู่ในแนวตามแกน Y ดังนั้น จะได้

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (7)$$

ในปัญหานี้กำหนดให้ความเร็วลมในทิศทางตามแกน X และสัมประสิทธิ์การแพร่ทิศทางตามแกน Z เป็นอิสระกับตัวแปร x ดังนั้น สมการ (7) จะอยู่ในรูปแบบ

$$u(z) \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(z) \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (8)$$

แหล่งกำเนิดของมลภาวะทางอากาศอยู่ที่ความสูง h ตามแกน Z เป็นฟังก์ชัน δ และสมมติให้ในระดับพื้นดินและระดับความสูง H ซึ่งเป็นความสูงระดับล่างของระดับผกผันมีฟลักซ์เป็นศูนย์ ดังนั้นการแก้ปัญห (8) สำหรับปริภูมิ $\{x > 0\} \times \{0 < z < H\}$ โดยมีเงื่อนไขขอบ บนแกน Z คือ

$$c(0, z) = \frac{Q}{u(z)} \delta(z-h) \quad \text{สำหรับทุก } 0 < z < H \quad (9)$$

เมื่อ h เป็นความสูงของแหล่งกำเนิดจากพื้นดิน และ Q เป็นอัตราการกระจาย และเงื่อนไขขอบบนระดับพื้นดินและระดับผกผัน คือ

$$K(0) \frac{\partial c(x, 0)}{\partial z} = 0 \quad \text{สำหรับทุก } x > 0 \quad (10)$$

และ

$$K(H) \frac{\partial c(x, H)}{\partial z} = 0 \quad \text{สำหรับทุก } x > 0 \quad (11)$$

ตามลำดับ

จากสมการ (8) - (11) เปลี่ยนให้เป็นไร้มิติ โดยการหารตัวแปร x, z, h, c, u และ K ด้วยนิพจน์ $\frac{H^2 u(H)}{K(H)}, H, H, \frac{Q}{u(H)H}, u(H)$ และ $K(H)$ ตามลำดับ ตัวแปรใหม่ในไร้มิติจะใช้ตัวแปรเดิม ดังนั้น จะได้ระบบสมการเป็น

$$u(z) \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(z) \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad \text{สำหรับทุก } x > 0, 0 < z < 1 \quad (12)$$

เงื่อนไขขอบ คือ

$$c(0, z) = \frac{\delta(z-h)}{u(z)} \quad \text{สำหรับทุก } 0 < z < 1 \quad (13)$$

$$K(0) \frac{\partial c(x, 0)}{\partial z} = 0 \quad \text{สำหรับทุก } x > 0 \quad (14)$$

และ

$$K(1) \frac{\partial c(x, 1)}{\partial z} = 0 \quad \text{สำหรับทุก } x > 0 \quad (15)$$

ในงานวิจัยนี้จะใช้ระเบียบวิธีผลต่างอันดับหนึ่งเพื่อหาคำตอบของระบบสมการ (12) - (15)

ผลเฉลยเชิงตัวเลข

เพื่อที่จะเตรียมผลเฉลยที่ดี เนื่องจากความเข้มข้นใกล้แหล่งกำเนิดจะเกิดการแพร่มาก จึงใช้การกระจายของจุดต่อแนวตั้งหนาแน่นใกล้แหล่งกำเนิด ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\Delta z_v} &= \frac{1}{\Delta z_s} \exp[-A_i (z_k - h)^2], & v=k, i=1 \text{ for } z_k > h \\ & & v=k-1, i=2 \text{ for } z_k \leq h \\ & & k=2, 3, \dots, n-1 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

เมื่อ

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= 0 \\ z_k &= \sum_{i=1}^{k-1} \Delta z_i, \quad k = 2, 3, \dots, n-1 \\ z_n &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Δz_s เป็นความกว้างของช่วงตอนแรกทางบนและล่างจากแหล่งกำเนิด A_1 และ A_2 เป็นพารามิเตอร์ของการกระจาย n เป็นจำนวนจุดต่อในแนวดิ่ง Δz_s และ n เป็นพารามิเตอร์อิสระ เมื่อกำหนด Δz_s และ n ให้แล้วค่าของ A_1 และ A_2 จะเป็นค่าที่สอดคล้องในความสัมพันธ์ (16) และ (17) และมีค่าที่ใกล้เคียงที่เป็นไปได้มากกว่าค่าอื่น ๆ สำหรับการให้จำนวนจุดต่อ n คำน้อยสุดของ Δz_s หมายถึง เอกรูปเล็กสุดของการกระจาย นั่นคือความเข้มข้นบนจุดต่อ จะมากเมื่อใกล้แหล่งกำเนิด โดยการเลือก Δz_s ในช่วงพิสัย

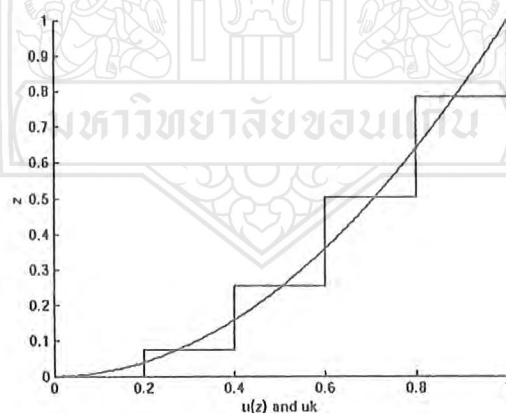
$$\frac{1}{2(n-1)} < \Delta z_s < \frac{1}{n-1}$$

ความกว้างของช่วงในแนวดิ่ง Δz_k มีค่าเปลี่ยนแปลงโดยการกำหนดค่าของ Δz_s และ n ค่า Δz_k และ z_k รวมทั้ง A_1 และ A_2 เป็นการคำนวณโดยวิธีทำซ้ำจากความสัมพันธ์ (16) และ (17)

ในตอนแรกจะประมาณค่าของความเร็วลม $u(z)$ ด้วยฟังก์ชันขั้นบันได ซึ่งจะเป็นค่าของ u_k ซึ่งจะเป็นค่าของความเร็วลม ณ จุดต่อ k ตามแนวดิ่ง ซึ่งเป็นเศษส่วนของความเร็วลมมากที่สุด u_{max} ดังนี้

$$u_k = \frac{p_k}{q} u_{max}, \quad p_k \leq q, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

เมื่อ p_k และ q เป็นจำนวนเต็มบวก และ n เป็นจำนวนจุดต่อในแนวดิ่ง โดยระยะห่างของช่วงในแนวดิ่งเป็น Δz_k



รูปที่ 1 แสดงความเร็วลม $u(z) = z^{0.5}$ และฟังก์ชันขั้นบันได u_k เมื่อ $q = 5$

ฟังก์ชันชั้นบันได u_k เป็นค่าประมาณของความเร็วลม $u(z)$ ซึ่งสามารถหาได้ ดังนี้
 หาค่าเฉลี่ยของความเร็ว $\bar{u}_k$ เมื่อ $\bar{u}_k$ เป็นการคำนวณบนครึ่งช่วงแนวตั้ง 2 ช่วงที่อยู่ติดกันซึ่งอยู่ในรูปแบบ คือ

$$\bar{u}_k = \frac{2}{\Delta z_{k-1} + \Delta z_k} \int_{z_k - \Delta z_{k-1}/2}^{z_k + \Delta z_{k-1}/2} u(z) dz \quad (19)$$

ให้ p_k เป็นจำนวนเต็มทีใกล้เคียงที่สุดของการประมาณค่า $\bar{u}_k$ แทนค่า p_k ในสมการ (18) จะได้ฟังก์ชันชั้นบันได u_k

ความเข้มข้นของมลภาวะ ณ แหล่งกำเนิดแสดงด้วยฟังก์ชัน δ ในเงื่อนไขขอบ (9) สามารถหาได้โดยการคำนวณค่าประมาณเชิงตัวเลขโดยฟังก์ชันชั้นบันได คือ สมการ

$$c(0, z) = \begin{cases} 0, & 0 \leq z < h - \frac{\Delta z_s}{2} \\ \frac{1}{u_s \Delta z_s}, & h - \frac{\Delta z_s}{2} \leq z \leq h + \frac{\Delta z_s}{2} \\ 0, & h + \frac{\Delta z_s}{2} < z \leq 1 \end{cases} \quad (20)$$

เมื่อ $u_s = u_k$ ณ แหล่งกำเนิด

ขั้นตอนต่อมาจะแก้ปัญหาโดยระเบียบวิธีผลต่างอันตะมาตรฐาน ดังสมการ

$$u_k \frac{c_k^{x+\Delta x} - c_k^x}{\Delta x} = \frac{2}{\Delta z_k (\Delta z_k + \Delta z_{k-1})} \{ \theta \cdot D[c_k^{x+\Delta x}] + (1-\theta) \cdot D[c_k^x] \} \quad (21)$$

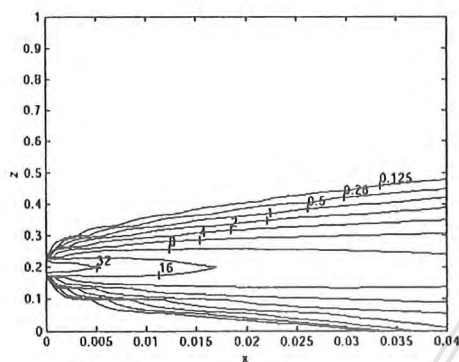
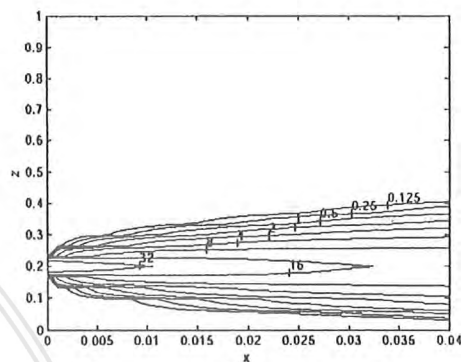
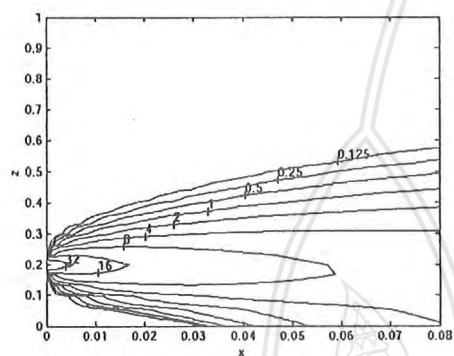
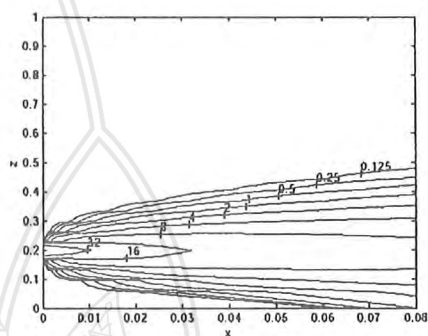
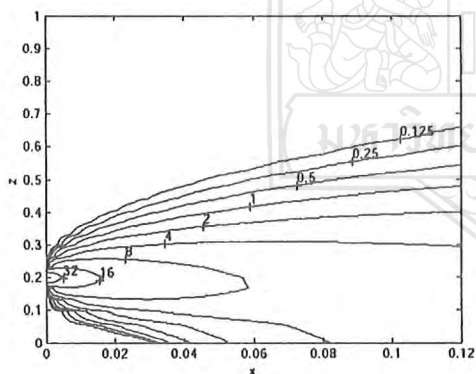
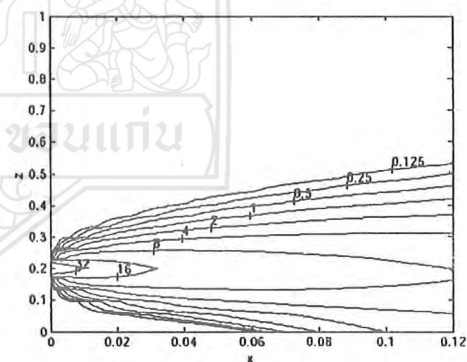
โดยที่

$$D[c_k] = \frac{\Delta z_k}{\Delta z_{k-1}} K_{k-1/2} c_{k-1} - \left(\frac{\Delta z_k}{\Delta z_{k-1}} K_{k-1/2} + K_{k+1/2} \right) c_k + K_{k+1/2} c_{k+1}$$

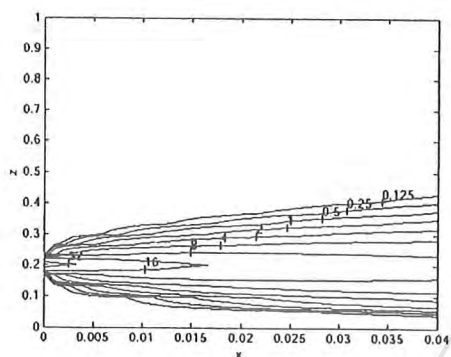
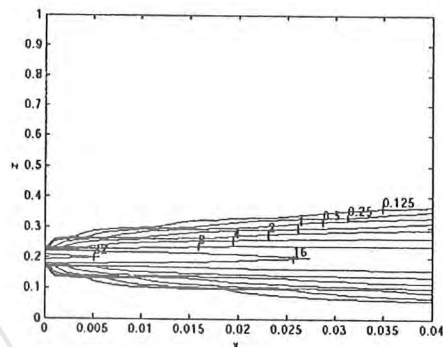
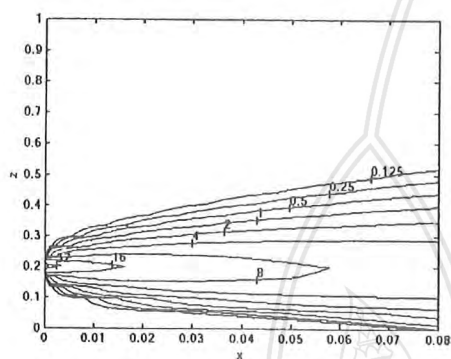
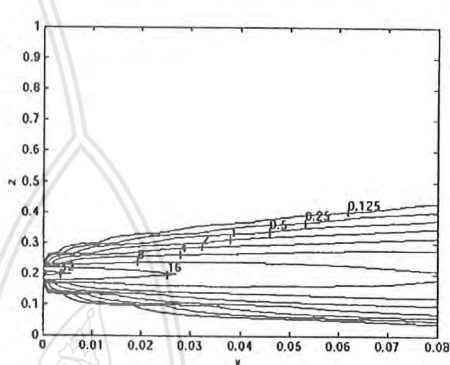
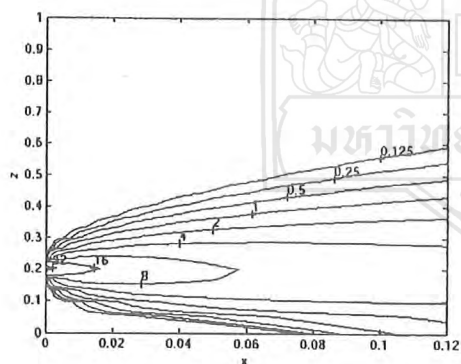
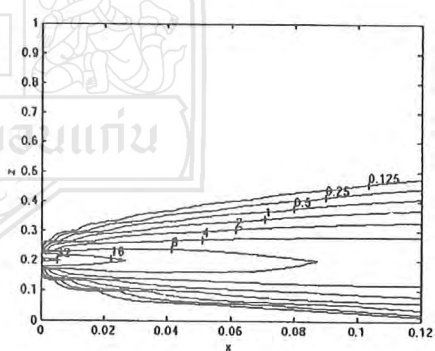
เมื่อ Δz_k เป็นความกว้างของช่วงแนวตั้งบนจุดต่อ k และ θ เป็นพารามิเตอร์คงตัว ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจะเสถียร เมื่อเลือก θ ซึ่ง $\frac{1}{2} \leq \theta \leq 1$

ผลการทดลองเชิงตัวเลข

ในการคำนวณจะเขียนโปรแกรมคำนวณและเขียนกราฟโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป MatLab รุ่น 12 โดยกำหนดให้ $n = 21$, $h = 0.2$, $\Delta x = 10^{-3}$, $K(z) = Z$, $\Delta Z_s = 0.033$

รูปที่ 2 (ก1) เมื่อ $q = 5$, $x = 40\Delta x$ รูปที่ 2 (ก2) เมื่อ $q = 10$, $x = 40\Delta x$ รูปที่ 2 (ข1) เมื่อ $q = 5$, $x = 80\Delta x$ รูปที่ 2 (ข2) เมื่อ $q = 10$, $x = 80\Delta x$ รูปที่ 2 (ค1) เมื่อ $q = 5$, $x = 120\Delta x$ รูปที่ 2 (ค2) เมื่อ $q = 10$, $x = 120\Delta x$

รูปที่ 2 แสดงลำดับการกระจายความเข้มข้นของมลภาวะทางอากาศ ณ ระยะต่าง ๆ ในระนาบ XZ ผลคำนวณเมื่อ $u(z) = z^{0.5}$ เมื่อ $q = 5$ และ $q = 10$ ตามลำดับ

รูปที่ 3 (ก1) เมื่อ $q = 5$, $x = 40\Delta x$ รูปที่ 3 (ก2) เมื่อ $q = 10$, $x = 40\Delta x$ รูปที่ 3 (ข1) เมื่อ $q = 5$, $x = 80\Delta x$ รูปที่ 3 (ข2) เมื่อ $q = 10$, $x = 80\Delta x$ รูปที่ 3 (ค1) เมื่อ $q = 5$, $x = 120\Delta x$ รูปที่ 3 (ค2) เมื่อ $q = 10$, $x = 120\Delta x$

รูปที่ 3 แสดงลำดับการกระจายความเข้มข้นของมลภาวะทางอากาศ ณ ระยะต่าง ๆ ในระนาบ XZ ผลคำนวณเมื่อ $u(z) = z^{0.2}$ เมื่อ $q = 5$ และ $q = 10$ ตามลำดับ

สรุปผลและงานอนาคต

งานวิจัยนี้จะพบว่า การใช้ระเบียบวิธีผลต่างอันดับแก้ปัญหารูปแบบคณิตศาสตร์ของมลภาวะทางอากาศสถานะอยู่ตัว โดยการประมาณค่าความเร็วลมที่เป็นฟังก์ชันของ z ด้วยฟังก์ชันชั้นบันได แล้วคำนวณหาผลเฉลี่ยด้วยวิธีผลต่างอันดับมาตรฐาน ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากวิธีหนึ่ง

จากการวิจัยนี้ ทำให้มีปัญหที่น่าสนใจอีกคือ

- แก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีชั้นประกอบอันดับ
- ทดลองการประมาณที่แตกต่างของฟลักซ์ในเงื่อนไขขอบ
- ศึกษาผลกระทบของต่ายไม่เป็นแบบเดียวกันมากบ้างน้อยบ้างในทิศทาง Z
- แก้ปัญหาในทำนองเดียวกันในปัญหาสามมิติ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ กองทุนพัฒนาและส่งเสริมด้านวิชาการของสถาบันราชภัฏเพชรบุรีวิทยาลัยฯ ในพระบรมราชูปถัมภ์ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สุวรรณ ถังมณี สาขาวิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และ Prof. Dr. John J.H. Miller, Department of Mathematics, Trinity College, Dublin, Ireland ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำผู้ทำการวิจัยตลอดมา และขอขอบคุณโปรแกรมวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏเพชรบุรีวิทยาลัยฯ ในพระบรมราชูปถัมภ์ และภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่อำนวยความสะดวกในการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Hoffman, J. D. (1992). Numerical Methods for Engineers and Scientists. New York: McGraw-Hill, Inc.
2. Runca, E. and Sardei, F. (1975). Numerical treatment of time-dependent advection and diffusion of air pollutants. Atm. Env. 9:69-80.

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ข้อแนะนำในการเขียนบทความลงวารสาร วิทยาศาสตร์ มข.

ประเภทของเรื่องที่จะตีพิมพ์

1. รายงานผลวิจัยและค้นคว้าหรือการสำรวจที่ยังไม่เคยตีพิมพ์ในวารสารหรือหนังสืออื่นมาก่อน
2. บทความปริทัศน์ ได้แก่งานเขียนที่รวบรวมหรือเรียบเรียงจากเอกสารหรือหนังสือต่าง ๆ เพื่อเผยแพร่และฟื้นฟูงานด้านวิชาการระดับต่าง ๆ
3. บทความแสดงข้อคิดเห็นหรือข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในด้านวิชาการ เรื่องแปล ข่าววิชาการ ย่อความจากงานวิจัยหรือหนังสือใหม่ที่น่าสนใจ

รูปแบบของการเขียนและการเตรียมต้นฉบับ

1. ต้นฉบับ ต้องเป็นตัวพิมพ์ปกติ มีช่วงห่างระยะบรรทัดตามมาตรฐาน พิมพ์ลงในกระดาษขาว A4 (โรเนียวสัน) โดยใช้กระดาษหน้าเดียว ความยาวไม่เกิน 10 หน้า ส่งต้นฉบับ 2 ชุด หรือต้นฉบับพิมพ์ 1 ชุด และ Diskette ของบทความนั้น
2. ต้นฉบับ จะถูกพิจารณาโดยกองบรรณาธิการ และจะตอบรับการได้รับบทความโดยไม่ส่งต้นฉบับคืน ผู้เขียนควรจะต้องสำเนาเก็บไว้เป็นหลักฐานของตัวเอง 1 ฉบับ
3. ต้นฉบับ จะต้องมีความถูกต้องทั้งในด้านเนื้อหา และการใช้ภาษา รวมทั้งมีความสมบูรณ์ในรูปแบบพร้อมที่จะนำลงตีพิมพ์ได้
4. ชื่อเรื่อง ให้ใช้ภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ไม่ยาวเกินไป และหลีกเลี่ยงการใช้คำย่อโดยไม่จำเป็น
5. ชื่อผู้เขียน เขียนชื่อภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษพร้อมทั้งบอกสถานที่ทำงานให้ชัดเจน
6. เนื้อเรื่อง ให้ได้ทั้งภาษาไทยล้วนหรือภาษาอังกฤษล้วน ถ้าใช้ภาษาไทย ภาษาอังกฤษที่ใช้ปนกับภาษาไทยนั้นให้พยายามแปลเป็นไทยเท่าที่จะทำได้และให้เขียนคำเดิมกำกับในวงเล็บ การทับศัพท์ภาษาอังกฤษตลอดทั้งการเขียนตัวสะกดการันต์ในภาษาไทยให้ใช้ตามแบบราชบัณฑิตยสถาน
7. ในกรณีของบทความวิจัย ต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ และแบ่งเนื้อหาของบทความเป็นบทนำ วิธีดำเนินงาน ผลการวิเคราะห์ บทสรุปและวิจารณ์
8. เชิงอรรถ (footnote) ให้เฉพาะที่จำเป็นเพื่อขยายหรือให้รายละเอียดเพิ่มเติมแก่ใจความเฉพาะตอนในบทความ
9. ตารางและภาพประกอบ คำบรรยายประกอบตารางหรือภาพประกอบควรจะสั้นและชัดเจน ถ้าเป็นภาพถ่ายให้ใช้ภาพขาว - ดำ ขนาดโปสการ์ด ภาพเขียนลายเส้นควรเขียนด้วยหมึกดำ ภาพที่เขียนต้องชัดเจนและมีขนาดที่เหมาะสม
10. เอกสารอ้างอิง หรือบรรณานุกรม แนะนำให้เขียนตามแบบที่ทางวารสารกำหนด

ส่งต้นฉบับมาที่

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

อภิสิทธิ์สำหรับการสำหรับผู้เขียน

เรื่องที่ได้รับการตีพิมพ์ ผู้เขียนจะได้รับวารสารฉบับนั้น 2 เล่ม และสำเนาพิมพ์อีก 15 ชุด

การเขียนเอกสารอ้างอิงในวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

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

บรรณานุกรม (Bibliography) หมายถึง เอกสารที่ใช้อ้างอิงในลักษณะที่สรุปเป็นหลักการหรือทฤษฎีโดยมีอ้างอิงหรือแปลมาโดยตรง

การเขียนเอกสารอ้างอิง หรือบรรณานุกรม มีแนวทางการเขียนดังนี้

1. หนังสือ

ก. ภาษาไทย

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

ข. ภาษาอังกฤษ

ชื่อสกุล, อักษรย่อชื่อต้น. อักษรย่อชื่อรอง. (เลขปี ค.ศ.). ชื่อหนังสือ. (เล่มที่). (พิมพ์ครั้งที่). เมืองที่พิมพ์ : โรงพิมพ์ หรือสำนักงานพิมพ์. เลขหน้าเริ่มต้น-เลขหน้าสุดท้ายที่อ้างอิง.

2. เอกสารราชการ

ชื่อหน่วยราชการ. (เลขปี พ.ศ. หรือ ค.ศ.). ชื่อเรื่อง. ชื่อหนังสือ. เมืองที่พิมพ์ : โรงพิมพ์ หรือสำนักพิมพ์.

3. วารสาร

ก. ภาษาไทย

ชื่อตัว นามสกุลของผู้แต่ง. (เลขปี พ.ศ.). ชื่อบทความ. ชื่อวารสาร. เล่มที่ (ฉบับที่) : เลขหน้าเริ่มต้น-เลขหน้าสุดท้าย.

ข. ภาษาอังกฤษ

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

หมายเหตุ

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

