

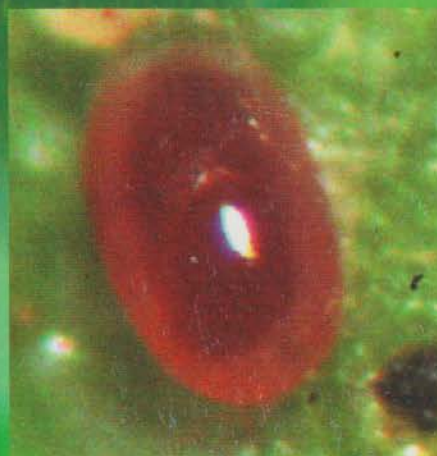


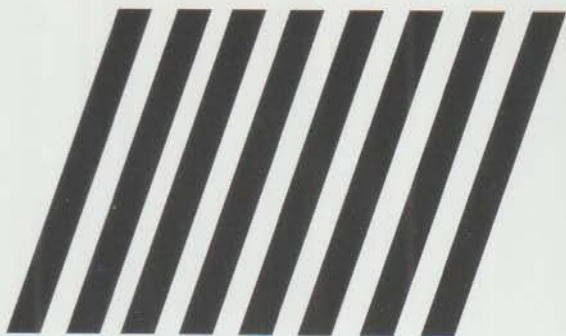
วารสาร

# วิทยาศาสตร์ชุมชน.

KKU SCIENCE JOURNAL

ปีที่ 35 ฉบับที่ 3 (ก.ค. - ก.ย. 50) Vol. 35 No. 3 (Jul. - Sep. 07)





วารสาร  
**วิทยาศาสตร์ปู.**  
KKU SCIENCE JOURNAL

ISSN 0125 - 2364

### เจ้าของ

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

### สำนักงาน

คณะวิทยาศาสตร์ ตึก 6 มหาวิทยาลัยขอนแก่น

อ.เมือง จ.ขอนแก่น 400002

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

### วัตถุประสงค์

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

### กำหนดออก ปีละ 4 ฉบับ

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

### ที่ปรึกษา

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ละออศรี เสนาะเมือง)  
รองคณบดีฝ่ายวิชาการ  
(เอกพรรณ สวัสดิ์ชิตัง)

### บรรณาธิการ

นฤมล แสงประดับ

### กองบรรณาธิการ

กิตติกร นาคประสิทธิ์  
งานนิย อาจอินทร์  
ชุติมา หาญจวนิช  
ประเสริฐ แข่งขัน  
สมปอง ธรรมศิริรักษ์  
สมเดช กนกเมธากุล  
สุพรรณิ อึ้งปัญสดวงศ์  
เสาวนิต ทองพิมพ์  
อัจฉราภรณ์ ภักดี  
ธรรมพิเชษฐ แผ่งโยธา  
นุชรินทร์ พงศ์นพรัตน์

### ฝ่ายศิลป์และภาพ

กิลเลน คิณนรเศรษฐ์  
สุชาติ เทพภูเขียว

### ฝ่ายเทคนิค

บุญคุ้ม เหลือล้ำ

### ฝ่ายจัดการและ เลขานุการ

ศุภลักษณ์ ทองปัน  
สมศักดิ์ อุ่นจันทิ

**บทความและงานวิจัย  
ได้รับการกลั่นกรอง  
จากผู้ทรงคุณวุฒิ**

บทความหรือข้อคิดเห็นใด ๆ ในวารสารนี้เป็นของผู้เขียน ไม่จำเป็นต้องสอดคล้องกับทัศนะของกองบรรณาธิการ

# วิทยาศาสตร์ชุมชน

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

ปีที่ 35 ฉบับที่ 3

Volume 35 Number 3

บรรณาธิการแถลง

บทความ

- ไบโอดีเซลจากน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก  
Biodiesel from microalgal oil  
รัตน์กรณ์ ลีสิงห์..... 135
- บทประยุกต์ของการหมุนแกนและการเลื่อนแกน  
ทางขนานในการหาจุดสะท้อน  
วิจารณ์ สดศิริ เรืองอุไร เมธาวิ..... 144
- สีสรรจากการคำนวณ  
ประเสริฐ แข่งขัน..... 151

งานวิจัย

- Isolation and partial characterization of  
*Salmonella typhi*-specific bacteriophage  
การคัดแยกและลักษณะสมบัติบางประการของ  
แบคทีริโอเฟจจำเพาะต่อ *S. typhi*  
กัญญ์จนา นิกดี..... 162
- การเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาของด้วงเต่าหัวไร  
*Stethorus pauperculus* (Weise) และ  
*Stethorus siphonulus* Kapur  
Comparative morphology of acarophagous  
lady beetles, *Stethorus pauperculus* (Weise)  
and *Stethorus siphonulus* Kapur  
จุรีรัตน์ รัตนทิพย์ นุชรีย์ ศิริ  
อังศุมลย์ จันทราปัดย์..... 170

# วิทยาศาสตร์ชุมชน

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

ปีที่ 35 ฉบับที่ 3

Volume 35 Number 3

งานวิจัย

- ❑ การออกดอกของกล้วยไม้หวายเหลืองจันทบูร  
(*Dendrobium friedericksianum* Rchb.f.)  
ในหลอดทดลอง

สมพร ประเสริฐสงสกุล  
วิฑูล ไชยภักดี.....

180
- ❑ สารฟีนาคีนที่ผลิตจาก *Pseudomonas* spp.  
เฉลิม เรืองวิริยะชัย.....

186
- ❑ การคำนวณเชิงตัวเลขของการเคลื่อนที่ของวัตถุ  
ในแนวดิ่งภายใต้แรงโน้มถ่วง

Numerical Calculation of Motion of  
a Falling Body under Gravitational Force  
ชาญเรืองฤทธิ์ จันทร์นอก.....

195



วิทยาศาสตร์  
KKU SCIENCE JOURNAL

ISSN 0125 - 2364

#### Publisher

Faculty of Science, Khon Kaen University,  
Thailand.

#### Office

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

#### Objectives

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

#### Publishing frequency

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

Number 1 January - March

Number 2 April - June

Number 3 July - September

Number 4 October - December

#### Advisory Committee

Dean, Faculty of Science

(La-Orsri Sanoamuang)

Associate Dean for Academic Affairs

(Ekaphan Swatsitang)

#### Editor

Narumon Sangpradub

#### Editorial Board

Kittikorn Nakpasit

Ngamnij Arch-int

Chutima Hanjavanit

Prasert Kaengkan

Sompong Thammasirak

Somdej Kanokmedhakul

Supunnee Ungpansattawong

Soawanit Tongpim

Adcharaporn Pagdee

Thampichet Pangyotha

Nucharin Phongnopparat

#### Artists

Kilen Tinnoraset

Suchart Thepphukhieo

#### Treasurer

Boonkoom Lualon

#### Managing Staff

Suphaluk Tongpun

#### and Secretary

Somsak Unjantee

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

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

# บรรณาธิการ

# แถลง

## สวัสดิ์คะ ท่านผู้อ่านที่รักและเคารพทุกท่าน

งานสัปดาห์วิทยาศาสตร์แห่งชาติที่เพิ่งผ่านไปเมื่อเดือนสิงหาคม 2550 นี้ มีเรื่องน่ารู้ น่าสนใจสมกับที่เรารอคอย และที่น่าปลื้มปิติ คือ การได้รับรางวัลนักวิทยาศาสตร์รุ่นใหม่ ดีเด่น ประจำปี 2550 จากมูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์ ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สันติ แม้นศิริ อาจารย์สังกัดภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วินิจ พรหมอารักษ์ อาจารย์สังกัด ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ซึ่งท่านทั้งสอง เป็นศิษย์เก่า คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ชาวดีนี่คงเป็นกำลังใจแก่นักวิทยาศาสตร์รุ่นน้อง ทั้งที่อยู่ในมหาวิทยาลัยต่างๆ และที่ยังเป็นนักศึกษาอยู่นะคะ

ท่านผู้อ่านฉบับนี้พลาดไม่ได้กับบทความเรื่องไบโอดีเซลจากสาหร่ายขนาดเล็ก กำลังอินเทรนด์พอดี รวมทั้งเรื่องน่าสนใจอื่นๆ ทั้งบทความและงานวิจัย และพบกันใหม่ ฉบับเดือนธันวาคมคะ

บรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

## ไบโอดีเซลจากน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก (Biodiesel from microalgal oil)

รัตนภรณ์ ลีสิงห์<sup>1</sup>

### บทนำ

จากสถานการณ์ความไม่แน่นอนของราคาและปริมาณน้ำมันดิบรวมทั้งปัญหาภาวะโลกร้อนทำให้ประเทศต่างๆ มีความตื่นตัวในเรื่องของพลังงาน โดยได้เร่งศึกษาวิจัยเพื่อหาแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันปิโตรเลียม อาทิ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานชีวมวล (biomass) และแก๊สชีวภาพ (biogas) เป็นต้น และที่ได้รับความสนใจมากที่สุดอย่างหนึ่งในตอนนี้เห็นจะเป็นไบโอดีเซล ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่มีคุณสมบัติในการเผาไหม้เหมือนกับดีเซลและไม่มีการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศจึงเป็นเชื้อเพลิงที่ดีในการช่วยบรรเทาภาวะโลกร้อน (Lang et al., 2001; Antolin et al., 2002) อย่างไรก็ตามราคาน้ำมันไบโอดีเซลในปัจจุบันยังคงสูง อันเนื่องมาจากราคาของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต รัฐบาลของประเทศต่างๆ จึงมีนโยบายส่งเสริมการปลูกพืชน้ำมันเพื่อลดต้นทุนของวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล รัฐบาลไทยเองมีนโยบายในการส่งเสริมการปลูกปาล์มน้ำมันและสบู่ดำ แต่การปลูกพืชน้ำมันนั้นต้องการพื้นที่ในการเพาะปลูกสูง ด้วยเหตุนี้นักวิจัยของหลายๆ ประเทศจึงได้พุ่งความสนใจไปที่การใช้ไขมันจากสาหร่ายขนาดเล็กมากขึ้น ทั้งนี้เพราะข้อได้เปรียบของการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กคือต้องการพื้นที่ในการเพาะเลี้ยงน้อย เจริญเร็ว และไม่ขึ้นกับฤดูกาล นอกจากนั้นยังสามารถเพาะ

เลี้ยงในอาหารแบบง่ายๆ ในระดับการผลิตขนาดใหญ่ได้ (Woft et al., 1985; Sawayama et al., 1995) การใช้สาหร่ายขนาดเล็กเป็นพลังงานทดแทนทำได้โดยการนำไขมันหรือน้ำมันในเซลล์มาผลิตไบโอดีเซลโดยผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (transesterification) หรือการใช้เซลล์สาหร่ายขนาดเล็กผสมโดยตรงกับน้ำมันดีเซลหรือไบโอดีเซล (Sheehan et al., 1998; Illman et al., 2000; Scragg et al., 2003)

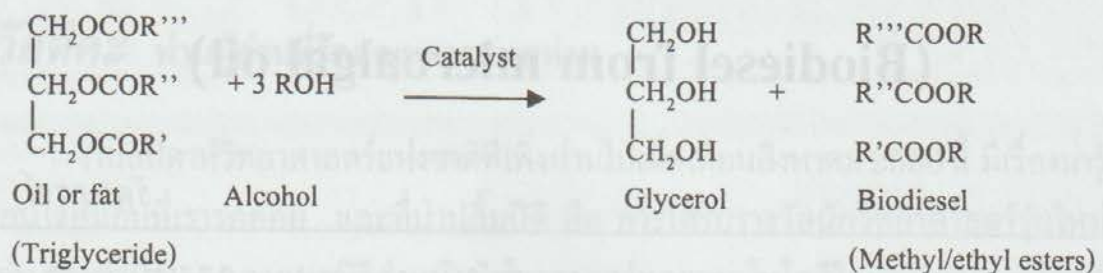
### ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงดีเซลที่ผลิตจากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน เช่น น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ นำมาผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (รูปที่1) โดยการเติมแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอลหรือเอทานอล และมีกรดหรือด่างหรือเอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนไขมันให้เป็นไบโอดีเซลในรูปเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acid methyl ester: FAME) หรือเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acid ethyl ester: FAEE) ขึ้นอยู่กับประเภทของแอลกอฮอล์ที่ใช้และมีกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ (Antolin et al., 2002) ปัจจุบันการผลิตไบโอดีเซลในทางอุตสาหกรรมนั้นผลิตมาจากน้ำมันพืชเป็นส่วนใหญ่ ส่วนการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากไขมันสาหร่ายขนาดเล็กที่ผ่านมานั้นนำไปใช้ประโยชน์ใน

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

ทางอุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง (Belarbi et al., 2000) และเมื่อเร็วนี้ๆ มีการลงนามระหว่างบริษัท Solazyme และบริษัท Imperium renewables แห่งสหรัฐอเมริกา โดยบริษัท Solazyme ซึ่งเป็น

ผู้เชี่ยวชาญทางเทคโนโลยีของสาหร่ายทำหน้าที่ผลิตและสกัดน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็กส่งป้อนให้โรงงานของบริษัท Imperium renewables เพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซล (Dillon, 2007)



รูปที่ 1 กระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชันเพื่อการผลิตไบโอดีเซล (Fukuda et al., 2001)

### ศักยภาพของสาหร่ายขนาดเล็กต่อการผลิตไบโอดีเซล

จากข้อจำกัดในเรื่องพื้นที่สำหรับการเพาะปลูกพืชน้ำมันทำให้นักวิจัยมุ่งความสนใจไปที่น้ำมันสาหร่ายขนาดเล็กซึ่งมีข้อได้เปรียบในเรื่องของพื้นที่ในการเพาะเลี้ยง จากข้อมูลการวิจัยด้านการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็กให้ได้ปริมาณร้อยละ 50 ของน้ำมันดีเซลที่ใช้ในระบบขนส่งของสหรัฐอเมริกาต้องการพื้นที่ในการเลี้ยงสาหร่ายเพียงร้อยละ 1 ถึง 3 ของพื้นที่ทั้งหมดที่ใช้ในการปลูกพืชน้ำมัน (ตารางที่ 1) สาหร่ายขนาดเล็กบางชนิดมีการสะสมน้ำมันในเซลล์สูงถึงร้อยละ 80 ของน้ำหนักแห้ง

(Metting, 1996; Spolaore et al., 2006) (ตารางที่ 2) โดยน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็กมีคุณสมบัติคล้ายน้ำมันพืชคือมีส่วนประกอบเป็นไตรกลีเซอไรด์ซึ่งมีจำนวนคาร์บอนอยู่ระหว่าง 12-22 อะตอมต่อโมเลกุล (Chelf, 1990; Ratledge, 1991) (ตารางที่ 3) สาหร่ายขนาดเล็กที่มีรายงานการศึกษาวิจัยเพื่อการผลิตน้ำมัน เช่น *Neochloris oleoabundans*, *Scenedesmus dimorphus*, *Euglena gracilis*, *Phaeodactylum tricornutum*, *Isochrysis galbana*, *Botryococcus braunii*, *Dunaliella tertiolecta*, *Spirulina* sp. *Chlorella vulgaris*, *Chlorella protothecoides* และสาหร่ายกลุ่มไดอะตอม (www.oilgae.com)

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบแหล่งของไบโอดีเซล (Chisti, 2007)

| แหล่งของน้ำมัน               | ผลผลิตน้ำมัน<br>(ลิตร/เฮกตาร์) | พื้นที่ที่ต้องการ<br>(ล้านเฮกตาร์) <sup>1</sup> | ร้อยละของพื้นที่การเพาะปลูก<br>ในสหรัฐอเมริกา <sup>1</sup> |
|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| ข้าวโพด                      | 172                            | 1540                                            | 846                                                        |
| คาโนลา (canola)              | 1190                           | 223                                             | 122                                                        |
| ปาล์มน้ำมัน <sup>2</sup>     | 45                             | 24                                              |                                                            |
| สาหร่ายขนาดเล็ก <sup>2</sup> | 136,900                        | 2                                               | 1.1                                                        |
| สาหร่ายขนาดเล็ก <sup>3</sup> | 58,700                         | 4.5                                             | 2.5                                                        |

<sup>1</sup> เพื่อใช้ในระบบขนส่งร้อยละ 50 ของเชื้อเพลิงที่ใช้ต้องการทั้งหมดในสหรัฐอเมริกา

<sup>2</sup> น้ำมันสาหร่ายร้อยละ 70 ของน้ำหนักเซลล์ (การผลิตในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแสง)

<sup>3</sup> น้ำมันสาหร่ายร้อยละ 30 ของน้ำหนักเซลล์ (การผลิตในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแสง)

ตารางที่ 2 ปริมาณน้ำมันของสาหร่ายขนาดเล็กบางชนิด (Chisti, 2007)

| สาหร่ายขนาดเล็ก              | ปริมาณน้ำมัน<br>(% ของน้ำหนักแห้ง) | สาหร่ายขนาดเล็ก                  | ปริมาณน้ำมัน<br>(% ของน้ำหนักแห้ง) |
|------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| <i>Botryococcus braunii</i>  | 25-75                              | <i>Nannochloropsis</i> sp.       | 31-68                              |
| <i>Chlorella</i> sp.         | 28-32                              | <i>Neochloris oleoabundans</i>   | 35-54                              |
| <i>Cryptocodinium cohnii</i> | 20                                 | <i>Nitzschia</i> sp.             | 45-47                              |
| <i>Cylindrotheca</i> sp.     | 16-37                              | <i>Phaeodactylum tricornutum</i> | 20-30                              |
| <i>Dunaliella primolecta</i> | 23                                 | <i>Schizochytrium</i> sp.        | 50-77                              |
| <i>Isochrysis</i> sp.        | 25-33                              | <i>Tetraselmis sueica</i>        | 15-23                              |

ตารางที่ 3 ชนิดของกรดไขมันที่พบในสาหร่ายขนาดเล็กบางสายพันธุ์เมื่อเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีปริมาณไนโตรเจนเพียงพอและขาดไนโตรเจน (Chelf, 1990)

| สายพันธุ์สาหร่าย            | อาหารที่มีไนโตรเจนเพียงพอ                     | อาหารที่มีการจำกัดปริมาณไนโตรเจน        |
|-----------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|
| <i>Ankistrodesmus</i> sp.   | 16:0, 16:4, 18:1, 18:3                        | 16:0, 18:1, 18:3                        |
| <i>Botryococcus braunii</i> | 16:0, 18:1, 18:2, 18:3                        | 16:0, 18:1, 18:3, 20:5                  |
| <i>Dunaliella salina</i>    | 14:0/14:1, 16:0, 16:3, 16:4, 18:2, 18:3       | 16:0, 16:3, 18:1, 18:2, 18:3            |
| <i>Isochrysis</i> sp.       | 14:0/14:1, 16:0, 16:1, 18:1, 18:3, 18:4, 22:6 | 14:0/14:1, 18:1, 18:2, 18:3, 18:4, 22:6 |
| <i>Nannochloris</i> sp.     | 14:0/14:1, 16:0, 16:1, 16:2, 16:3, 20:5       | Not determined                          |

### การผลิตเซลล์สาหร่ายขนาดเล็ก

การผลิตเซลล์สาหร่ายขนาดเล็กเพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซลสามารถผลิตได้ 2 แบบคือ การเลี้ยงสาหร่ายแบบใช้แสง (photoautotrophic cultivation) และการเลี้ยงแบบไม่มีแสงโดยใช้อินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งคาร์บอนหรือการเลี้ยงแบบเฮเทโรโทรฟิก (heterotrophic cultivation)

#### การเลี้ยงสาหร่ายแบบใช้แสง

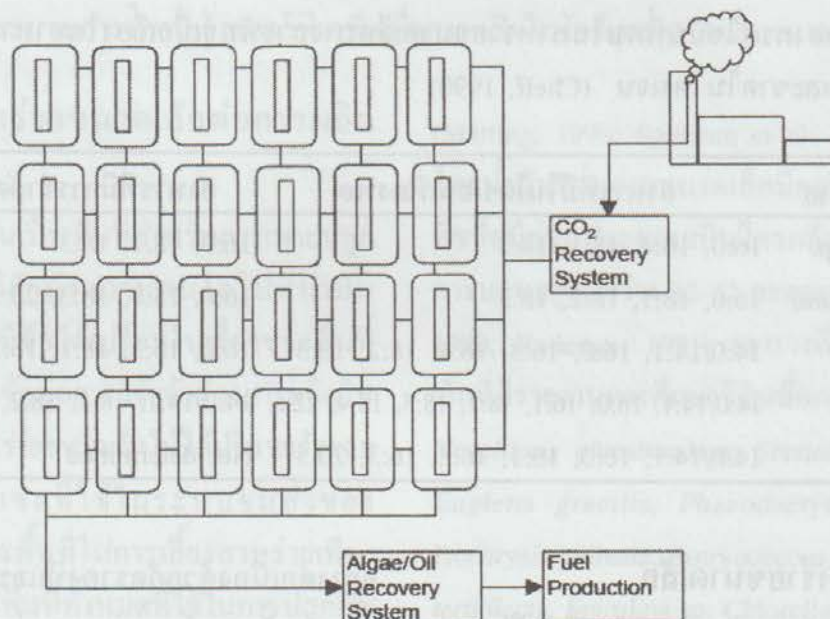
การเจริญของสาหร่ายขนาดเล็กแบบนี้ต้องการแสง คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและเกลืออนินทรีย์ อุณหภูมิในการเพาะเลี้ยงควรอยู่ประมาณ 20-30 องศาเซลเซียส การผลิตเซลล์สาหร่ายขนาดเล็กในระดับใหญ่โดยทั่วไปเป็นการเลี้ยงแบบต่อเนื่อง (continuous cultivation) โดยในช่วงกลางวันที่มีแสงแดดจะมีการให้คาร์บอนไดออกไซด์และมีเดิมอาหารเลี้ยงเชื้อ

อย่างต่อเนื่องด้วยอัตราคงที่และมีการนำอาหารเลี้ยงเชื้อรวมทั้งเซลล์สาหร่ายบางส่วนออกไปด้วยอัตราที่เท่ากัน การเติมอาหารจะหยุดในช่วงกลางคืนแต่ยังต้องมีการกวนผสมผสานตลอดเวลาเพื่อป้องกันการตกตะกอนของเซลล์ (Molina Grima et al., 1999) การใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยมาจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นการลดต้นทุนในการเลี้ยงสาหร่าย และยังลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศได้อีกทางหนึ่ง (Sawayama et al., 1995; Yun et al., 1997) เทคนิคที่นิยมใช้ในการเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระดับใหญ่ คือ การเลี้ยงในระบบบ่อเปิดแบบรางคู่ (raceway pond) และในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแสง (photobioreactor) (Terry and Raymond, 1985; Molina Grima et al., 1999)

### ระบบบ่อเปิดแบบรางคู่

ระบบบ่อเปิดแบบรางคู่เป็นระบบบ่อที่มีการไหลเวียนของอาหารเลี้ยงเชื้อและเซลล์สาหร่ายตลอดเวลา โดยปกติบ่อซึ่งอาจทำจากคอนกรีตหรือดินอัดแน่นจะมีความลึกประมาณ 0.3 เมตร (รูปที่ 2) การไหลเวียนทำโดยใช้ใบพัดและมีแผ่นกั้นเพื่อให้เกิดการผสมผสานที่ดี การเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในบ่อเปิดแบบรางคู่เริ่มดำเนินการงานตั้งแต่ ค.ศ. 1950 ดังนั้นจึงเป็นวิธีที่มีข้อมูลความพร้อมทั้งทางเทคนิคการสร้างบ่อและการดำเนินการเพาะเลี้ยง ส่วนปัญหาที่พบคือ

ประสิทธิภาพการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย และการผสมผสานในบ่อค่อนข้างต่ำรวมทั้งการระบายความร้อนออกจากระบบเกิดขึ้นจากการระเหยเท่านั้น นอกจากนั้นยังมีความเสี่ยงสูงต่อการปนเปื้อนจากสาหร่ายและจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ ส่วนข้อดีคือราคาค่าก่อสร้างบ่อและค่าการดำเนินการไม่สูง ตัวอย่างการเลี้ยงสาหร่ายด้วยระบบนี้ เช่น การผลิตเซลล์ของสาหร่ายกลุ่มไซยาโนแบคทีเรียในบ่อขนาดใหญ่ประมาณ 440,000 ตารางเมตร ของบริษัท Earthrise Nutritionals (Spolaore et al., 2006; Chisti, 2007)



รูปที่ 2 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายในบ่อเปิดแบบรางคู่ (Sheehan et al., 1998)

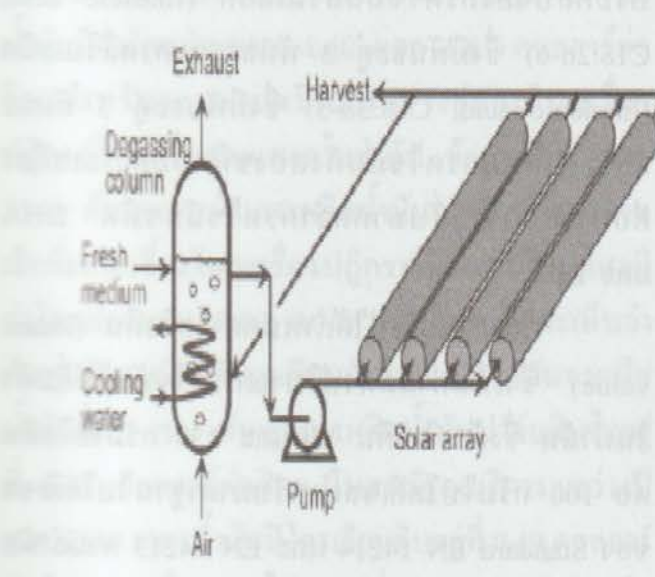
### เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแสง

เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแสงประสบความสำเร็จเป็นอย่างดีในการผลิตเซลล์สาหร่ายขนาดเล็กให้ได้ปริมาณสูง (Molina Grima et al., 1999; Carvalho et al., 2006) ตัวอย่างเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแสง เช่น เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแสงชนิดท่อ (tubular photobioreactor) ประกอบด้วยท่อใสโดยอาจทำจากพลาสติกใสหรือแก้วซึ่งสามารถให้แสงแดดส่องผ่านได้อย่างทั่วถึง (รูปที่ 3) โดยปกติท่อจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10 เซนติเมตรหรือเล็กกว่าปกติท่อจะเรียงขนานกันในแนวนอน (รูปที่ 3 (1))

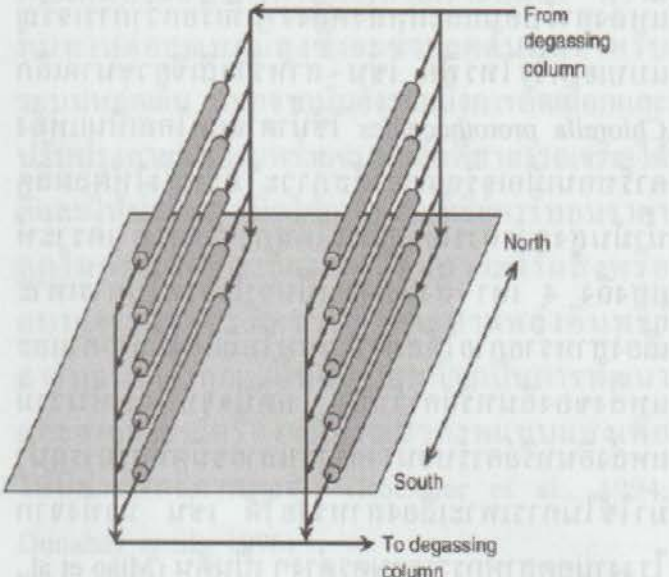
แต่ก็มีการออกแบบให้ท่อวางซ้อนกันในแนวตั้งซึ่งสามารถเพิ่มจำนวนท่อได้มากขึ้น (รูปที่ 3 (2)) การตกตะกอนของเซลล์สาหร่ายในท่อป้องกันได้โดยต้องมีการไหลเวียนของน้ำหมักด้วยความเร็วสูงซึ่งทำได้โดยการใช้ปั๊มแรงกลทั่วไปหรือใช้ระบบปั๊มแบบอากาศยก (airlift pump) การใช้ปั๊มแรงกลเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำความเสียหายให้กับเซลล์แต่ระบบง่ายต่อการออกแบบ การดำเนินงานและการติดตั้ง (Gracia Camacho et al., 2001; Mazzuca Sobczuck et al., 2006) ส่วนระบบแบบอากาศยกให้ผลการผสมผสานดีและมีผลในการทำลายเซลล์ต่ำ การออกแบบ

ระบบก็ใช้หลักการเช่นเดียวกันกับการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกทั่วๆ ไป (Chisti and Moo-Young, 1993;1994) การระบายความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแสงชนิดที่อาจเป็นระบบท่อน้ำหล่อเย็นหรือการพ่นน้ำเย็นผ่านท่อ นอกจากนั้น

เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแสงชนิดที่ขนาดใหญ่สามารถควบคุมอุณหภูมิของระบบได้โดยการติดตั้งในโรงเรือนควบคุมอุณหภูมิแต่ราคาคำนึงการสูงซึ่งจะทำให้ต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลสูงตามไปด้วย (Pulz, 2001)



(1) ท่อเรียงในแนวนอน



(2) ท่อเรียงในแนวตั้ง

รูปที่ 3 เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแสงชนิดท่อ (Chisti, 2007)

การเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแสงให้ผลผลิตน้ำมันมากกว่าการเลี้ยงในบ่อเปิดแบบรางคู่ (ตารางที่ 4) เนื่องจากผลผลิตต่อปริมาตรของเซลล์สาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแสงสูงกว่าระบบบ่อเปิดแบบราง

คู่ถึง 13 เท่า อย่างไรก็ตามทั้ง 2 ระบบมีความสามารถในการใช้ผลิตเซลล์สาหร่ายเพื่อการค้าได้ (Molina Grima, 1999; Pulz, 2001; Lorenz and Cysewski, 2003; Spolaore et al., 2006)

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบการเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแสงและบ่อเปิดแบบรางคู่ (Chisti, 2007)

| ค่าต่างๆ                                              | เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแสง | ระบบบ่อเปิดแบบรางคู่ |
|-------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| กำลังการผลิตปริมาณเซลล์ต่อปี (kg)                     | 100,000                    | 100,000              |
| ผลผลิตต่อปริมาตร ( $\text{kg m}^{-3} \text{d}^{-1}$ ) | 1.535                      | 0.117                |
| ผลผลิตต่อพื้นที่ ( $\text{kg m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) | 0.072                      | 0.035                |
| ปริมาณของเซลล์สาหร่ายในน้ำหมัก ( $\text{kg m}^{-3}$ ) | 4.00                       | 0.14                 |
| อัตราการเจริญ (d <sup>-1</sup> )                      | 0.384                      | 0.250                |
| พื้นที่ที่ต้องการ (m <sup>2</sup> )                   | 5681                       | 7828                 |
| ผลผลิตน้ำมัน ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ )          | 136.7 <sup>a</sup>         | 99.4 <sup>a</sup>    |
|                                                       | 58.7 <sup>b</sup>          | 42.6 <sup>b</sup>    |
| ปริมาณการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี (kg)                | 183,333                    | 183,333              |

<sup>a</sup> ปริมาณน้ำมันที่ได้เท่ากับร้อยละ 70 ของน้ำหนักแห้ง, <sup>b</sup> ปริมาณน้ำมันที่ได้เท่ากับร้อยละ 30 ของน้ำหนักแห้ง

## การผลิตเซลล์สาหร่ายโดยการเลี้ยงแบบเฮเทโรโทรฟิก

สาหร่ายขนาดเล็กบางสายพันธุ์สามารถเจริญได้ทั้งภายใต้การสังเคราะห์แสงและภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสงโดยการใช้อินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานที่เรียกว่าการเจริญแบบเฮเทโรโทรฟิก เช่น สาหร่ายสีเขียวขนาดเล็ก *Chlorella protothecoides* ใช้น้ำตาลกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนเมื่อเจริญภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสงให้ผลผลิตน้ำมันสูงกว่าการเจริญภายใต้สภาวะการสังเคราะห์แสงถึง 4 เท่า สิ่งที่น่าจะเป็นอุปสรรคในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายภายใต้สภาวะแบบไม่มีแสงคือราคาและแหล่งของอินทรีย์คาร์บอน แต่ปัจจุบันจะเห็นว่ามีแหล่งอินทรีย์คาร์บอนราคาถูกหลายชนิดที่สามารถนำมาใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายได้ เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเกษตรต่างๆ เป็นต้น (Miao et al., 2004; Miao and Wu, 2006)

## การยอมรับไบโอดีเซลจากน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก

เพื่อการยอมรับไบโอดีเซลจากน้ำมันสาหร่ายของผู้บริโภค ไบโอดีเซลจากน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็กจะต้องมีมาตรฐานเดียวกับไบโอดีเซลที่ผลิตจากแหล่งอื่นๆ ในสหรัฐอเมริกาได้กำหนดมาตรฐานไบโอดีเซลตาม The ASTM Biodiesel Standard D6751 ส่วนในสหภาพยุโรปมาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซลแบ่งออกเป็น 2 มาตรฐานตามลักษณะการใช้น้ำมันคือ Standard EN 14214 เป็นมาตรฐานไบโอดีเซลเพื่อการใช้กับยานยนต์และ Standard EN 14213 เป็นมาตรฐานไบโอดีเซลที่ใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน (Knothe, 2006)

น้ำมันสาหร่ายขนาดเล็กมีส่วนประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัวอย่างยิ่งยวด (polyunsaturated fatty acids) ซึ่งมีพันธะคู่ 4 คู่หรือมากกว่า (Belarbi et al., 2000) อาทิเช่น eicosapentaenoic acid (EPA, C20:5n-3) มีพันธะคู่ 5 พันธะและ docosahexaenoic acid (DHA, C22:6n-3) มีพันธะคู่ 6 พันธะ กรดไขมันและเมทิล

เอสเทอร์ของกรดไขมันที่มีพันธะคู่ 4 คู่หรือมากกว่า อาจเกิดการออกซิเดชันในระหว่างเก็บรักษาและเป็นสาเหตุหนึ่งที่จะลดการยอมรับไบโอดีเซลจากสาหร่ายขนาดเล็ก น้ำมันพืชบางชนิดก็มีปัญหาเช่นเดียวกัน เช่น น้ำมันเมล็ดเรพ (rape seed หรือ canola) มีส่วนประกอบของกรดไขมันลิโนเลอิก (linoleic acid, C18:2n-6) ซึ่งมีพันธะคู่ 2 พันธะและกรดลิโนเลนิก (linolenic acid, C18:3n-3) ซึ่งมีพันธะคู่ 3 พันธะ อย่างไรก็ตามกรดไขมันทั้งสองชนิดนี้มีความเสถียรต่อการออกซิเดชันมากกว่ากรดไขมันชนิด DHA และ EPA

สหภาพยุโรปได้กำหนดค่าไอโอดีน (iodine value) ซึ่งเป็นค่าแสดงปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวในน้ำมัน ซึ่งต้องไม่เกิน 120 และ 130 กรัมไอโอดีนต่อ 100 กรัมไบโอดีเซลสำหรับมาตรฐานไบโอดีเซลของ Standard EN 14214 และ EN 14213 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็กที่มีพันธะคู่มากกว่า 4 พันธะนั้นอาจมีปัญหาในการผลิตไบโอดีเซลให้ได้ตามมาตรฐานไบโอดีเซลของยุโรป แต่เหตุผลนี้ไม่ใช่ข้อจำกัดในใช้น้ำมันสาหร่ายขนาดเล็กเนื่องจากสามารถลดจำนวนพันธะคู่ลงได้ด้วยการทำปฏิกิริยาไฮโดรเจนชันบางส่วน (partial catalytic hydrogenation) ซึ่งเป็นเทคนิคเดียวกับการใช้ผลิตภัณฑ์จากน้ำมันพืช (Dijkstra, 2006)

## เศรษฐศาสตร์การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก

ราคาคำนวณรวมของการผลิตเซลล์สาหร่าย ประกอบด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ค่าใช้จ่ายในระหว่างการดำเนินการเพาะเลี้ยงและการเก็บเกี่ยวเซลล์สาหร่ายเพื่อสกัดน้ำมัน โดยทั่วไปการผลิตเซลล์สาหร่าย 1 กิโลกรัมมีราคาคำนวณโดยประมาณอยู่ที่ 2.95 และ 3.80 ดอลลาร์ในระบบบ่อเปิดแบบรางคู่และในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าประมาณการที่ไม่รวมค่าใช้จ่ายในกรณีที่ต้องซื้อคาร์บอนไดออกไซด์ (Molina Grima et al., 2003)

การผลิตเซลล์สาหร่ายปริมาณ 10,000 ต้นต่อปีนั้น ราคาต้นทุนการผลิตจะลดลงเหลือเพียง 0.47 ดอลลาร์ และ 0.60 ดอลลาร์ต่อกิโลกรัมสำหรับระบบบ่อเปิดแบบรางคู่และในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแสงตามลำดับ กรณีสาหร่ายขนาดเล็กมีปริมาณน้ำมันสะสมร้อยละ 30 ของน้ำหนักเซลล์ราคาต้นทุนการผลิตน้ำมันมีค่าโดยประมาณ 1.40 และ 1.81 ดอลลาร์ต่อลิตรสำหรับระบบบ่อเปิดแบบรางคู่และในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแสงตามลำดับ ข้อมูลในปี พ.ศ. 2549 ต้นทุนรวมในการผลิตน้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็กที่เพาะเลี้ยงโดยเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแสงมีค่าโดยประมาณ 2.80 ดอลลาร์ต่อลิตร ซึ่งจะเห็นว่าต้นทุนยังสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตน้ำมันจากพืชน้ำมันอื่นๆ เช่น ต้นทุนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบจะอยู่ที่ 0.52 ดอลลาร์ต่อลิตร ในสหรัฐอเมริกาช่วงปี พ.ศ. 2549 ราคาน้ำมันปิโตรเลียมดิบอยู่ที่ 0.49 ดอลลาร์ต่อลิตรและเมื่อรวมภาษีการกลั่นและการขนส่งราคาจะอยู่ที่ 0.66-0.79 ดอลลาร์ต่อลิตร ส่วนไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มราคาอยู่ที่ประมาณ 0.66 ดอลลาร์ต่อลิตรหรือสูงกว่า ดังนั้นการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มเพื่อแข่งขันการตลาดให้ได้ราคาน้ำมันปาล์มดิบต้องไม่เกิน 0.48 ดอลลาร์ต่อลิตร และเมื่อใช้หลักเกณฑ์เดียวกันในการประเมินราคาน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็กเพื่อใช้ผลิตไบโอดีเซลนั้นราคาต้องลดลงจาก 2.80 ดอลลาร์ต่อลิตรมาอยู่ที่ 0.48 ดอลลาร์ต่อลิตรหรือต่ำกว่าจึงจะสามารถแข่งขันทางการตลาดกับน้ำมันดีเซลได้ (Chisti, 2007)

### การลดต้นทุนในการผลิตน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็ก

การลดต้นทุนการผลิตน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็กสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การนำเทคนิคทางชีววิธีมาใช้ในกระบวนการแยกและสกัดน้ำมันโดยจะมีกากเซลล์ซึ่งประกอบด้วยไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรตและสารอาหารอื่นๆ เป็นผลพลอยได้ (Sanchez Miron et al., 2003) ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นส่วนประกอบสำหรับอาหารสัตว์และบางส่วนนำ

ไปใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อการผลิตแก๊สชีวภาพแบบไร้อากาศ (Mata-Alvarez et al., 2000; Raven and Gregersen, 2007) นอกจากนี้วิธีการลดต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสาหร่ายที่สำคัญคือ การปรับปรุงสายพันธุ์สาหร่ายขนาดเล็กด้วยเทคนิคทางพันธุวิศวกรรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสง ความทนทานต่ออุณหภูมิสูงซึ่งจะช่วยลดต้นทุนสำหรับระบบหล่อเย็น นอกจากนี้ยังรวมถึงการคัดเลือกและปรับปรุงสายพันธุ์สาหร่ายขนาดเล็กที่สามารถเจริญได้ดีและให้น้ำมันสูงเมื่อใช้แหล่งอินทรีย์คาร์บอนราคาถูกในกรณีที่เพาะเลี้ยงภายใต้สภาวะไร้แสงหรือแบบเฮเทโรโทrophicรวมทั้งการหาแหล่งอินทรีย์คาร์บอนราคาถูก เป็นต้น สุดท้ายเป็นการพัฒนาและออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแสงเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด (Roessler et al., 1994; Dunahay et al., 1996)

### บทสรุป

แนวความคิดในการนำน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็กมาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อการผลิตเป็นไบโอดีเซลไม่ใช่เรื่องใหม่แต่จากวิกฤตการณ์น้ำมันรวมทั้งภาวะโลกร้อนทำให้นักวิจัยมุ่งความสนใจไปที่สาหร่ายสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กๆ ที่ศักยภาพไม่เล็ก ดังนั้นคำว่าวิกฤติสร้างโอกาสสามารถใช้ได้เสมอไม่ว่าแต่การศึกษาวิจัยเพื่อนำน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็กมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซล และสิ่งที่สำคัญเร่งด่วนก็คือทำอย่างไรให้ราคาต้นทุนการผลิตน้ำมันสาหร่ายขนาดเล็กลดลงอยู่ในระดับที่สามารถแข่งขันทางการตลาดกับไบโอดีเซลจากพืชน้ำมันชนิดต่างๆ รวมถึงน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมได้ อีกทั้งยังต้องมีการรณรงค์ส่งเสริมแบบคู่ขนานระหว่างการแสวงหาแหล่งวัตถุดิบราคาถูกและการยอมรับน้ำมันไบโอดีเซลของผู้บริโภค

## บรรณานุกรม

- Algal oil yield. (2007). (Cited 11 June 2007). Available from: <http://www.oilgae.com>
- Antolin, G., Tinaut, F.V., Briceno, Y., Castano, V., Perez, C., Ramirez, A.I. (2002). Optimization of biodiesel production by sunflower oil transesterification. *Bioresour. Technol.* 83:111-114.
- Belarbi, E.H., Molina Grima, E., Chiti, Y. (2000). A process for high yield and scaleable recovery of high purity eicosapentanoic acid esters from microalgae and fish oil. *Enzyme Microbiol., Technol.* 26:516-259.
- Carvalho, A.P., Meireles, L.A., Malcata, F.X. (2006). Microalgal reactors: a review of enclosed system designs and performances. *Biotechnol. Prog.* 22:1490-1506.
- Chelf, P.(1990). Environment control of lipid and biomass production in two diatom species. *J. Appl. Phycol.* 2:121-129.
- Chisti, Y., Moo-Young, M. (1993). Improve the performance of airlift reactors. *Chem. Eng. Prog.* 89:38-45.
- Chisti, Y., Moo-Young, M. (1994). Clean-in-place systems for industrial bioreactors: design, validation and operation. *J. Ind. Microbiol.* 13:201-207.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnol. Adv.* 25:294-306.
- Dijkstra, A.J. (2006). Revisiting the formation of trans isomers during partial hydrogenation of triglycerol oils. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 108:249-264.
- Dillon, H. (2007). Solazyme and Imperium Renewables Enter Algal Oil Feedstock Agreement for Biodiesel Production. (Cited 7 June 2007). Available from: <http://www.greencarcongress.com>
- Dunahay, T.G., Jarvis, E.E., Dias, S.S., Roessler, P.G. (1996). Manipulation of microalgal lipid production using genetic engineering. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 57:223-231.
- Fukuda, H., Kondo, A., Noda, H. (2001). Biodiesel fuel production by transesterification of oils. *J. Biosci. Bioeng.* 92:405-416.
- Garcia Camacho, F., Molina Grima, E. Sanchez Miron, A., Gonzalez Pascual, V., Chisti, Y. (2001). Carboxymethyl cellulose protects algal cells against hydrodynamic stress. *Enzyme Microbiol. Technol.* 29:602-610.
- Illman, A.M., Scragg, A.H., Shales, S.W. (2000). Increase in *Chlorella* strains calorific values when grow in low nitrogen medium. *Enzyme Microb. Technol.* 27:631-635.
- Knothe, G. (2006). Analyzing biodiesel: standards and other methods. *J. Am Oil Chem. Soc.* 83:823-833.
- Lang, X., Dalai, A.K., Bakhshi, N.N., Reaney, M.J., Hertz, P.B. (2001). Preparation and characterization of bio-diesel from various bio-oils. *Bioresour. Technol.* 80:53-62.
- Lorenz, R.T., Cyseski, G.R. (2003). Commercial potential of *Haematococcus* microalga as a natural source of astaxanthin. *Trends Biotechnol.* 22:45-52.
- Mata-Alvarez, J., Mace, S., Llabres, P. (2000). Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresour. Technol.* 74:3-16.
- Mazzuca Sobczuk, T., Garcia Camacho, F., Molina Grima, E., Chisti, Y. (2006). Effect of agitation on the microalgae *Phaeodactylum tricornutum* and *Porphyridium cruentum*. *Bioprocess Biosyst. Eng.* 28:243-250.

- Metting, F.B. (1996). Biodiversity and application of microalgae. *J. Ind. Microbiol.* 17:477-489.
- Miao, X., Wu, Q., Yang, C. (2004). Fast pyrolysis of microalgae to produce renewable fuels. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 71:855-865.
- Miao, X., Wu, Q. (2006). Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil. *Bioresour. Technol.* 97:841-846.
- Molina Grima, E., Acien Fernandez, F.G., Garcia Camacho, F., Chisti, Y. (1999). Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup. *J. Biotechnol.* 70:231-247.
- Molina Grima, E., Fernandez, J., Acien Fernandez, F.G., Chisti, Y. (2001). Tubular photobioreactor design for algal cultures. *J. Biotechnol.* 92:113-131.
- Molina Grima, E., Belarbi, E.H., Acien Fernandez, F.G., Robles Medina, A., Chisti, Y. (2003). Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnol. Adv.* 20:491-515.
- Pulz, O. (2001). Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 57:287-293.
- Ratledge, C. (1991). Microorganisms for lipids. *Acta Biotechnol.* 11:429-438.
- Raven, R.P.J.M., Gregersen, K.H. (2007). Biogas plants in Denmark: successes and setbacks. *Renew. Sustain Energy Rev.* 11:116-132.
- Roessler, P.G., Brown, L.M., Dunahay, T.G., Heacox, D.A., Jarvis, E.E., Schneider, J.C. (1994). Genetic engineering approaches for enhanced production of biodiesel fuel from microalgae. *ACS Symp. Ser.* 566:255-270.
- Sanchez Miron, A., Ceron Garcia, M.C., Contreras Gomez, A. Garcia Camacho, F., Molina Grima, E., Chisti, Y. (2003). Shere stress tolerance and biochemical characterization of *Phaeodactylum trocornutum* in guasi steady state continuous culture in outdoor photobioreactors. *Biochem. Eng. J.* 16:287-297.
- Sawayama, S., Inoue, S., Dote, Y., Yokoyama, S.Y. (1995). CO<sub>2</sub> fixation and oil production through microalga. *Energy Convers Man-*  
*age.* 36:729-731.
- Scragg, A.H., Morrison, J., Shales, S.W. (2003). The use of a fuel containing *Chlorella vulgaris* in a diesel engine. *Enzyme Microb. Technol.* 33:884-889.
- Sheehan, J., Dunahay, T., Bebemann, J., Roessler, P. (1998). A look back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program- Biodiesel from algae. NREL/TP-580-24190. National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy's Office of fuels development. Colorado, USA.
- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E., Isambert, A. (2006). Commercial application of microalgae. *J. Biosci. Bioeng.* 101:87-96.
- Terry, K.L., Raymond, L.P. (1985). System design for the autotrophic production of microalgae. *Enzyme Microbiol. Technol.* 7:474-487.
- Woft, F.R., Nonomura, A.M., Bassam, J.A. (1985). Growth and branched hydrocarbon production in a strain of *Botryococcus braunii* (chlorophyta). *J. Phycol.* 21:388-396.
- Yun, Y.S., Lee, S.B., Park, J.M., Lee, C.I., Yang, J.W. (1997). Carbondioxide fixation by algal cultivation using wastewater nutrients. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 69:451-455.

## บทประยุกต์ของการหมุนแกนและการเลื่อนแกน ทางขนานในการหาจุดสะท้อน

วิจารณ์ สดศิริ<sup>1</sup> และเรืองอุไร เมธาวิ<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

การหาจุดสะท้อนของจุดใด ๆ บนระนาบ  $XY$  เทียบกับเส้นตรงที่ขนานกับแกน  $X$  หรือแกน  $Y$  นั้นง่ายมาก แต่ในการหาจุดสะท้อนเทียบกับเส้นตรง  $l$  ใด ๆ ที่ไม่ขนานกับแกนพิกัดจะมีความยุ่งยากมากขึ้น ในงานวิจัยนี้ เราพยายามสร้างแกนพิกัดขึ้นมาใหม่โดยให้เส้นตรง  $l$  เป็นแกนพิกัด  $X$  อันใหม่ที่ได้จากการหมุนแกนและการเลื่อนแกนทางขนานของแกนพิกัด  $X$  และ  $Y$  เดิมเพื่อที่จะหาพิกัดของจุดสะท้อนของจุดที่กำหนดให้เทียบกับเส้นตรง  $l$  ได้สะดวกมากขึ้น

### Abstract

It is very easy to find the reflection point of a given point on the  $XY$ -plane with respect to a straight line parallel to either the  $X$ -axis or the  $Y$ -axis, but it is a bit harder to find a reflection point with respect to any straight line  $l$  not parallel to the coordinate axes. In this research, we regard  $l$  as a new  $X$ -axis obtained from rotation and translation of coordinate axes  $X$  and  $Y$  in order to find the reflection point of a given point with respect to  $l$  more conveniently.

### 1. บทนำ

การหาจุดสะท้อนของจุดใด ๆ บนระนาบ  $XY$  เทียบกับเส้นตรงที่ขนานกับแกน  $X$  หรือแกน  $Y$  นั้นทำได้ไม่ยาก น่าสนใจที่ เราจะพิจารณาการหาจุดสะท้อนของจุดใด ๆ บนระนาบ  $XY$  เทียบกับเส้นตรง  $l$  ที่ไม่ขนานกับแกน  $Y$  ในงานวิจัยนี้ เราสร้างแกนพิกัดขึ้นมาใหม่โดยให้เส้นตรง  $l$  เป็นแกนพิกัด  $X$  อันใหม่ที่ได้จากการหมุนแกนและ/หรือการเลื่อนแกนทางขนานของแกนพิกัด  $X$  และ  $Y$  เดิมเพื่อที่จะหาพิกัดของจุดสะท้อนของจุดที่กำหนดให้เทียบ

กับเส้นตรง  $l$  ได้สะดวกมากขึ้น ยิ่งกว่านั้น สูตรการหาจุดสะท้อนโดยวิธีนี้ยังง่ายต่อการจดจำอีกด้วย

### 2. ข้อตกลง

1. ต่อจากนี้ไปเราจะสมมุติว่า  $P(x,y)$ ,  $P_0(x_0,y_0)$  และ  $P(\bar{x},\bar{y})$  เป็นจุดในระบบพิกัดฉาก  $XY$  และ  $l: y = mx + c$  เป็นเส้นตรงบนระนาบ  $XY$  โดยที่  $m, c$  เป็นจำนวนจริงใด ๆ

2. เพื่อความสะดวกในการคำนวณ ในบางครั้ง เราจะแทนพิกัดของจุด  $P(x,y)$  ด้วย  $\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$  หรือ  $\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$

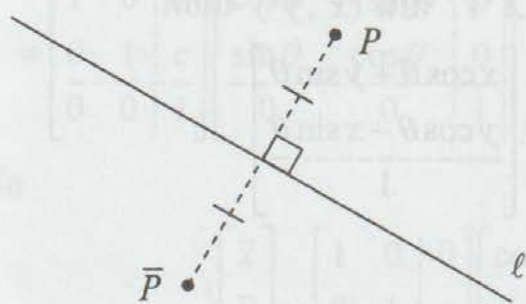
<sup>1</sup> ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมืองขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

<sup>2</sup> หมวดวิชาคณิตศาสตร์ โรงเรียนโพธิทองพัฒนวิทยา อ.โพธิทอง จ.ร้อยเอ็ด 45110

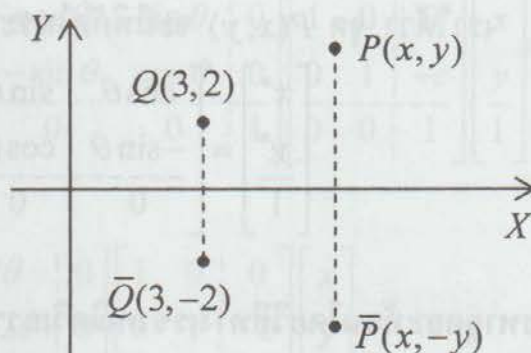
### 3. ความรู้พื้นฐาน

**บทนิยาม 3.1** เราจะกล่าวว่าจุด  $\bar{P}(\bar{x}, \bar{y})$  เป็น จุดสะท้อน (reflection point) ของจุด  $P(x, y)$  เทียบกับเส้นตรง  $\ell$  ก็ต่อเมื่อ จุด  $\bar{P}$  สอดคล้องกับสมบัติต่อไปนี้

- (i) ถ้าจุด  $P$  อยู่บนเส้นตรง  $\ell$  แล้ว  $\bar{P}(\bar{x}, \bar{y}) = P(x, y)$
- (ii) ถ้าจุด  $P$  ไม่อยู่บนเส้นตรง  $\ell$  แล้ว จุด  $P$  และ  $\bar{P}$  อยู่บนเส้นตรงที่ตั้งฉากกับ  $\ell$  และทั้ง  $P$  และ  $\bar{P}$  ต่างอยู่ห่างจาก  $\ell$  เป็นระยะทางเท่ากัน (ดูภาพประกอบ 1)



ภาพประกอบ 1 จุดสะท้อนเทียบกับ  $\ell$



ภาพประกอบ 2 จุดสะท้อนเทียบกับแกน  $X$

**ตัวอย่าง 3.2** จุดสะท้อนของจุด  $Q(3, 2)$  เทียบกับแกน  $X$  คือจุด  $\bar{Q}(3, -2)$  ดังนั้น โดยทั่วไป จุดสะท้อนของจุด  $P(x, y)$  เทียบกับแกน  $X$  คือจุด  $\bar{P}(x, -y)$  ซึ่งสรุปได้ตามทฤษฎีบท 3.3

**ทฤษฎีบท 3.3** ถ้า  $\bar{P}(\bar{x}, \bar{y})$  เป็นจุดสะท้อนของจุด  $P(x, y)$  เทียบกับแกน  $X$  แล้ว

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & | & 0 \\ 0 & -1 & | & 0 \\ 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ -y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

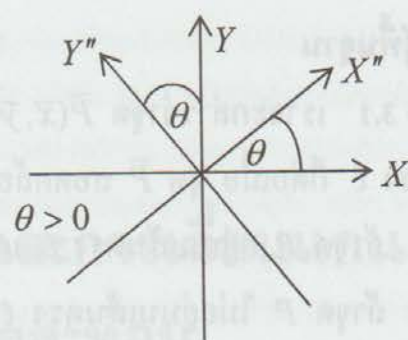
**ทฤษฎีบท 3.4 (การเลื่อนแกนทางขนาน)** (คณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์, 2537) ถ้าระบบพิกัดฉาก  $X'Y'$  เกิดจากการเลื่อนแกนทางขนานของระบบพิกัดฉาก  $XY$  โดยมีจุดกำเนิดใหม่อยู่ที่จุด  $P_0(x_0, y_0)$  แล้วจุด  $P(x, y)$  จะมีพิกัดในระบบพิกัดฉาก  $X'Y'$  เป็น  $(x', y')$  โดยที่

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & | & -x_0 \\ 0 & 1 & | & -y_0 \\ 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

**ทฤษฎีบท 3.5 (การหมุนแกน)** (คณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์, 2537) ให้ระบบพิกัดฉาก  $X''Y''$  เกิดจากการหมุนแกนของระบบพิกัดฉาก  $XY$  เป็นมุม  $\theta$  หน่วยอย่างทิศทศทาง กล่าวคือ

(i) ถ้า  $\theta \geq 0$  แล้วระบบพิกัดฉาก  $X''Y''$  เกิดจากการหมุนแกนของระบบพิกัดฉาก  $XY$  เป็นมุมขนาด  $\theta$  หน่วยในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

(ii) ถ้า  $\theta < 0$  แล้วระบบพิกัดฉาก  $X''Y''$  เกิดจากการหมุนแกนของระบบพิกัดฉาก  $XY$  เป็นมุมขนาด  $-\theta$  หน่วยในทิศทางตามเข็มนาฬิกา



ภาพประกอบ 3 การหมุนแกน

เราได้ว่า จุด  $P(x, y)$  จะมีพิกัดในระบบพิกัดฉาก  $X''Y''$  เป็น  $(x'', y'')$  โดยที่

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \cos \theta + y \sin \theta \\ y \cos \theta - x \sin \theta \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

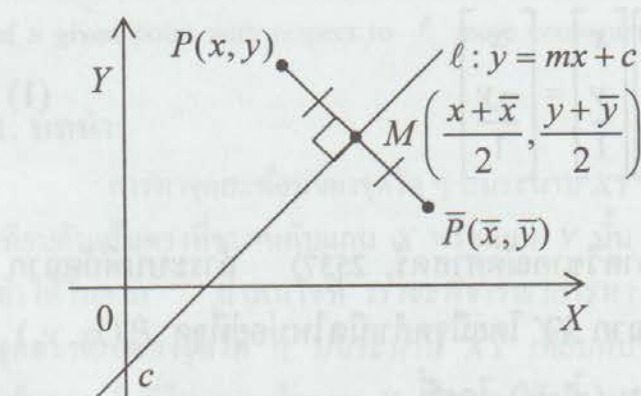
#### 4. การหาจุดสะท้อนโดยวิธีทางเรขาคณิตวิเคราะห์

ทฤษฎีบท 4.1 ถ้า  $\bar{P}(\bar{x}, \bar{y})$  เป็นจุดสะท้อนของจุด  $P(x, y)$  เทียบกับเส้นตรง  $\ell: y = mx + c$  แล้ว

$$\bar{x} = \frac{(1-m^2)x + 2my - 2mc}{1+m^2} \quad (4)$$

$$\bar{y} = \frac{2mx - (1-m^2)y + 2c}{1+m^2} \quad (5)$$

บทพิสูจน์ ถ้า  $m = 0$  แล้ว  $\ell: y = c$  เราสามารถแสดงได้ไม่ยากว่าจุด  $\bar{P}$  มีพิกัดเป็น  $(x, 2c - y)$  ซึ่งสอดคล้องกับสมการ (4) และ (5)



เพราะฉะนั้น

ต่อไปนี้จะสมมติว่า  $m \neq 0$  ให้  $M$  เป็นจุดบนเส้นตรง  $\ell$  ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางระหว่างจุด  $P$  และจุด  $\bar{P}$  เพราะฉะนั้น  $M$  มีพิกัดเป็น  $\left(\frac{x+\bar{x}}{2}, \frac{y+\bar{y}}{2}\right)$  ดังนั้น

$$m\left(\frac{x+\bar{x}}{2}\right) - \left(\frac{y+\bar{y}}{2}\right) + c = 0$$

$$mx + m\bar{x} - y - \bar{y} + 2c = 0 \quad (6)$$

เนื่องจากส่วนของเส้นตรง  $\overline{P\bar{P}}$  ตั้งฉากกับเส้นตรง  $\ell$  ดังนั้น  $\frac{y-\bar{y}}{x-\bar{x}} = -\frac{1}{m}$  เพราะฉะนั้น

$$x - \bar{x} + my - m\bar{y} = 0 \quad (7)$$

จากสมการ (6) และ (7) เราสรุปได้ว่า  $\bar{x}$  และ  $\bar{y}$  สอดคล้องกับสมการ (4) และ (5)  $\square$

5. การหาจุดสะท้อนโดยใช้การหมุนแกนและการเลื่อนแกนทางขนาน

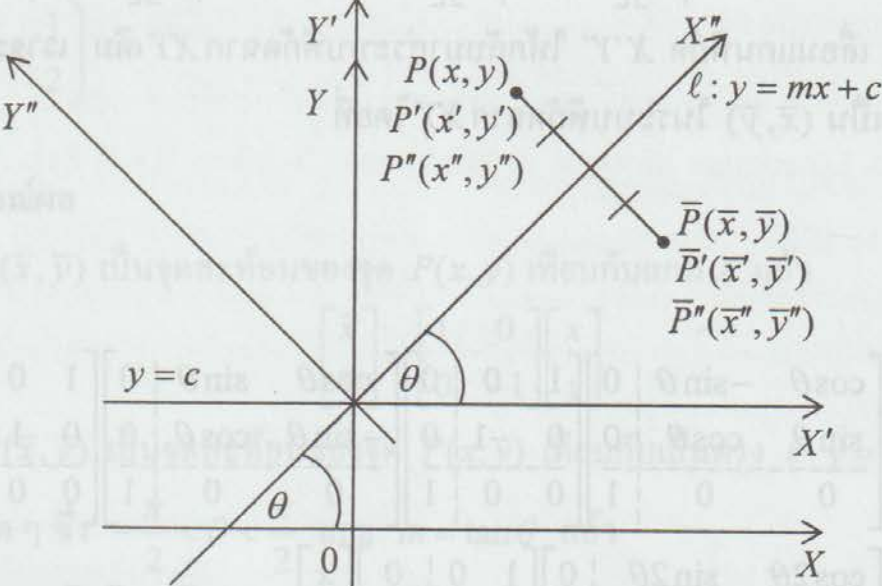
ทฤษฎีบท 5.1 สมมติว่า  $\bar{P}(\bar{x}, \bar{y})$  เป็นจุดสะท้อนของจุด  $P(x, y)$  เทียบกับเส้นตรง  $\ell: y = mx + c$  และ  $\theta$  เป็นมุมที่เส้นตรง  $\ell$  ทำกับแกน  $X$  ด้านบวกโดยที่  $-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$  จะได้ว่า

$$\left[ \begin{array}{c} \bar{x} \\ \bar{y} \\ 1 \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & c & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[ \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[ \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -c & 0 & 1 & -c \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} x \\ y \\ 1 \end{array} \right] \quad (8)$$

หรือ

$$\left[ \begin{array}{c} \bar{x} \\ \bar{y} \\ 1 \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ 0 & 1 & c & \sin 2\theta & -\cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[ \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -c & 0 & 1 & -c \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} x \\ y \\ 1 \end{array} \right] \quad (9)$$

บทพิสูจน์ ขั้นตอนการหาพิกัดของจุด  $\bar{P}(\bar{x}, \bar{y})$  มีทั้งหมด 5 ขั้นตอนดังต่อไปนี้



ขั้นตอนที่ 1 สร้างระบบพิกัดฉาก  $X'Y'$  จากระบบพิกัดฉาก  $XY$  ด้วยการเลื่อนแกนทางขนาน โดยให้ระบบพิกัดฉาก  $X'Y'$  มีจุดกำเนิดอยู่ที่จุด  $(0, c)$  ในระบบพิกัดฉาก  $XY$  เดิม ทั้งนี้เพื่อที่จะทำ ให้เส้นตรง  $\ell$  ผ่านจุดกำเนิดของระบบพิกัดฉาก  $X'Y'$  จะได้ว่าจุด  $P$  มีพิกัด  $(x', y')$  ในระบบพิกัดฉาก  $X'Y'$  ซึ่ง

$$\left[ \begin{array}{c} x' \\ y' \\ 1 \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -c & 0 & 1 & -c \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} x \\ y \\ 1 \end{array} \right]$$

ขั้นตอนที่ 2 ให้  $X''Y''$  เป็นระบบพิกัดฉากที่เกิดจากการหมุนแกนพิกัด  $X'Y'$  โดยให้แกน  $X''$  ทับพอดีกับเส้นตรง  $l$  ที่ทำมุม  $\theta$  กับแกน  $X'$  เราจะได้พิกัด  $(x'', y'')$  ของจุด  $P$  เทียบกับระบบพิกัดฉาก  $X''Y''$  สอดคล้องกับสมการ

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

ขั้นตอนที่ 3 หาจุดสะท้อน  $\bar{P}''(\bar{x}'', \bar{y}'')$  ของจุด  $P''(x'', y'')$  ในระบบพิกัดฉาก  $X''Y''$  เทียบกับแกน  $X''$  โดยทฤษฎีบท 3.3 เราได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \bar{x}'' \\ \bar{y}'' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

ขั้นตอนที่ 4 หมุนแกนพิกัด  $X''Y''$  เป็นมุม  $-\theta$  หน่วยเพื่อที่จะแปลงพิกัดของจุด  $\bar{P}''(\bar{x}'', \bar{y}'')$  ให้มาเป็น  $\bar{P}'(\bar{x}', \bar{y}')$  ในระบบพิกัดฉาก  $X'Y'$  เพราะฉะนั้น

$$\begin{bmatrix} \bar{x}' \\ \bar{y}' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

ขั้นตอนที่ 5 เลื่อนแกนพิกัด  $X'Y'$  ให้กลับมามู่ระบบพิกัดฉาก  $XY$  เดิม เราจะได้ว่าพิกัดของจุด  $\bar{P}'(\bar{x}', \bar{y}')$  กลายเป็น  $(\bar{x}, \bar{y})$  ในระบบพิกัดฉาก  $XY$  โดยที่

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

เนื่องจาก  $m$  เป็นความชันของ  $l: y = mx + c$  ดังนั้น  $\tan \theta = m$  เมื่อ  $-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$  ทำให้ได้  $\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1+m^2}}$  และ  $\sin \theta = \frac{m}{\sqrt{1+m^2}}$  เมื่อแทน  $\cos \theta$  และ  $\sin \theta$  ที่ได้ลงในสมการ (8) เราจะได้เห็นว่า  $\bar{x}$  และ  $\bar{y}$  สอดคล้องกับสมการ (4) และ (5) ตามลำดับ นั่นแสดงว่าพิกัด  $(\bar{x}, \bar{y})$  ของจุด  $\bar{P}$  ที่เราหาได้เป็นพิกัดของจุดสะท้อนของจุด  $P(x, y)$  ตามต้องการ  $\square$

ตัวอย่าง 5.2 จงหาจุดสะท้อนของจุด  $(2,3)$  เทียบกับเส้นตรง  $l: y = \sqrt{3}x - 2$

วิธีทำที่ 1 (จากสูตรโดยวิธีทางเรขาคณิตวิเคราะห์) จากโจทย์จะได้จุด  $P$  คือ  $(2,3)$ ,  $m = \sqrt{3}$  และ  $c = -2$  แทนค่าลงในสมการ (4) และ (5) จะได้

$$\bar{x} = \frac{(1-3)(2) + 2(\sqrt{3})(3) - 2(\sqrt{3})(-2)}{1+3} = -1 + \frac{5\sqrt{3}}{2}$$

และ

$$\bar{y} = \frac{2(\sqrt{3})(2) - (1-3)(3) + 2(-2)}{1+3} = \sqrt{3} + \frac{1}{2}$$

วิธีทำที่ 2 (จากสูตรโดยบทประยุกต์ของการหมุนแกนและการเลื่อนแกนทางขนาน) จากสมการของเส้นตรง  $l$  จะได้ว่า  $\tan \theta = \sqrt{3}$  ดังนั้น  $\theta = 60^\circ$  เพราะฉะนั้นโดยสมการ (9) เราได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 120^\circ & \sin 120^\circ & 0 \\ \sin 120^\circ & -\cos 120^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 + \frac{5\sqrt{3}}{2} \\ \sqrt{3} + \frac{1}{2} \\ 1 \end{bmatrix}$$

จากทั้งสองวิธี เราสรุปได้ผลเหมือนกันว่าจุดสะท้อนของจุด  $(2,3)$  เทียบกับเส้นตรง  $l$  คือ  $\left(-1 + \frac{5\sqrt{3}}{2}, \sqrt{3} + \frac{1}{2}\right)$

### บทสรุปและวิจารณ์ผล

1. ถ้า  $\bar{P}(\bar{x}, \bar{y})$  เป็นจุดสะท้อนของจุด  $P(x, y)$  เทียบกับแกน  $X$  แล้ว

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

2. ถ้า  $\bar{P}(\bar{x}, \bar{y})$  เป็นจุดสะท้อนของจุด  $P(x, y)$  เทียบกับเส้นตรง  $l: y = mx$  เมื่อ  $m$  และ  $\theta$  เป็นจำนวนจริงใดๆ ซึ่ง  $-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$  และ  $m = \tan \theta$  แล้ว

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \end{aligned}$$

3. ถ้า  $\bar{P}(\bar{x}, \bar{y})$  เป็นจุดสะท้อนของจุด  $P(x, y)$  เทียบกับเส้นตรง  $l: y = mx + c$  เมื่อ  $m, c$  และ  $\theta$  เป็นจำนวนจริงใดๆ ซึ่ง  $-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$  และ  $m = \tan \theta$  แล้ว

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

4. จากการหาจุดสะท้อนเทียบกับเส้นตรงใด ๆ ที่ไม่ขนานกับแกน  $Y$  โดยใช้ความรู้ทางเรขาคณิตวิเคราะห์และความรู้เรื่องการหมุนแกนและการเลื่อนแกนทางขนาน พบว่าสูตรในการหาจุดสะท้อนโดยใช้การหมุนแกนและการเลื่อนแกนทางขนานอยู่ในรูปที่ง่ายต่อการจดจำ (ถ้าหากเราเข้าใจหลักการหาจุดสะท้อนโดยวิธีนี้เป็นอย่างดี)

### บรรณานุกรม

คณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์. (2537). เอกสารประกอบคำสอนวิชาคณิตศาสตร์ 1. (พิมพ์ครั้งที่ 2).

ขอนแก่น : ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

Sodsiri, W. (2006). Lorentzian Motions in Minkowski 3-space. *KKU Sci. J.* 34(3) : 242–249.



## สืบสรจากการคำนวณ

ประเสริฐ แข่งขัน<sup>1</sup>

แปลจาก colourful calculations ของ Christine Davies, Physics World, December 2006, 20-26

การคำนวณโดยใช้แลตทิซ QCD ทำให้นักวิจัยสามารถทำนายแรงที่ยึดเหนี่ยวควาร์กในนิวตรอนและในโปรตอนให้อยู่ด้วยกันได้

การได้ทำความเข้าใจเกี่ยวกับกฎเกณฑ์พื้นฐานของการเกิดสภาพที่เป็นอยู่ของโลกก็คล้ายกับการปอกหัวหอม ชั้นนอกสุดของหัวหอมเปรียบได้กับอะตอมซึ่งเราได้รู้จักมานานนับร้อยปี โครงสร้างชั้นในถัดจากนั้นเป็นชั้นของโครงสร้างที่รัทเธอร์ฟอร์ดเป็นผู้เปิดเผยในปี ค.ศ. 1911 ทำให้เห็นนิวเคลียสของอะตอมที่มีขนาดเล็กมากและเป็นที่อยู่ของมวลเกือบทั้งหมดของอะตอม หลังจากนั้นประมาณ 20 ปีนักฟิสิกส์จึงทราบว่า นิวเคลียสประกอบขึ้นด้วยอนุภาคพื้นฐานที่เรียกว่า โปรตอนและนิวตรอน การปอกชั้นถัดไปของหัวหอมนี้จะได้อะไร ยังเป็นสิ่งเป็นที่ยุ่งยากและท้าทายมาก

ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่า โปรตอนและนิวตรอนเกิดจากอนุภาคมีประจุที่เรียกว่า ควาร์ก (quark) ในโปรตอนมีควาร์กที่เรียกว่า อัป (up) 2 ตัวกับควาร์กที่เรียกว่า ดาวน์ (down) อีก 1 ตัว สำหรับนิวตรอนประกอบด้วยควาร์ก 2 ตัวกับอัปอีก 1 ตัว ควาร์กมีทั้งหมด 6 ชนิดด้วยกัน แต่ไม่มีชนิดใดเลยที่อยู่ได้อย่างอิสระ ตัวอย่างเช่น การทำให้โปรตอนเกิดการแตกตัวโดยการเร่งให้มีพลังงานจลน์มากๆ แล้วทำให้เกิดการชนกันในเครื่องเร่งอนุภาค สิ่งที่ได้ไม่ใช่

ควาร์กเดี่ยวๆ แต่เป็นอนุภาคที่ประกอบด้วยควาร์กหลายตัว เช่น เซตรอน (hadron) ซึ่งแบ่งย่อยได้อีกหลายร้อยจำพวก บางจำพวกเรียกว่า แบรีออน (baryon) ซึ่งประกอบด้วยควาร์ก 3 ตัว ส่วนที่เหลือเรียกว่า เมซอน (meson) ซึ่งประกอบด้วยคู่ของควาร์กและแอนติควาร์ก พอถึงจุดนี้นักฟิสิกส์ก็ยังไม่รู้ลึกซึ้งอย่างที่คนในปี ค.ศ. 1960 รู้ลึก คือ ที่แกนของหัวหอมนี้ยังมีอะไรซ่อนอยู่อีกมาก

วิธีที่จะช่วยให้เข้าใจคุณสมบัติของควาร์กมีอยู่เพียงวิธีเดียวคือ การเปรียบเทียบผลการทดลองวัดสมบัติของเซตรอนกับผลการคำนวณที่อยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีควอนตัมโครโมไดนามิกส์ (quantum chromodynamics, QCD) ซึ่งเป็นทฤษฎีของแรงที่มีค่ามาก (strong force) ที่ยึดเหนี่ยวควาร์กเอาไว้ด้วยกัน (ดูในบทแทรก ก.) แม้ว่าทฤษฎีนี้จะมีมานานมากกว่า 30 ปี แต่เป็นที่รู้กันว่าสมการจากทฤษฎีนี้แก้ได้ยากมาก ทำให้การทำนายคุณสมบัติของเซตรอนทำได้ถูกต้องไม่เกิน 10 %

เมื่อเร็วๆ นี้สถานการณ์ได้เปลี่ยนแปลงไป มีเทคนิคการคำนวณที่เรียกว่า แลตทิซ QCD เกิดขึ้นและได้รับการพัฒนาไปมาก ทำให้สามารถแก้สมการของ QCD โดยวิธีเชิงตัวเลขที่มีความถูกต้องมากขึ้น ทำให้สามารถทำนายและทดสอบคุณสมบัติของเซตรอนได้ เช่น การคำนวณมวลของ ชาร์ม-บี เมซอน (charmed B-meson) ซึ่งได้ผลสอดคล้องกับ

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

ผลการทดลองที่เทวาตรอน คอลไลเดอร์ (Tevatron collider) ที่สหรัฐอเมริกาเมื่อปี ค.ศ. 2005 เป็นอย่างดี สิ่งต่อไปที่น่าสนใจก็คือคุณสมบัติของตัวควาร์กเอง นั้นเป็นอย่างไร ขั้นตอนนี้เปรียบเสมือนการปอก เพื่อดูชั้นในสุดของหัวหอมนั่นเอง

บทแทรก ก.

แลทธิช QCD คืออะไร

- ทฤษฎีที่ใช้อธิบายอนุภาคขนาดเล็กกว่าอะตอมที่เรียกว่า ควาร์ก (quark) และกลูออน (gluon) เรียกว่าทฤษฎี ควอนตัมโครโมไดนามิกส์ (quantum chromodynamics, QCD)
- เนื่องจากควาร์กและกลูออนต่างอยู่ในอนุภาคแฮดรอน (hadron) เช่น โปรตอน จึงทำให้ไม่สามารถแก้มการแบบเชิงวิเคราะห์โดยเริ่มจากสิ่งที่มีอยู่จริงตามทฤษฎี QCD เพื่อศึกษาคุณสมบัติของแฮดรอนได้
- แลทธิช QCD ทำให้นักวิจัยสามารถแก้มการ QCD ที่จุดบางจุดในแลทธิช 4 มิติ ที่เป็นตัวแทนตำแหน่ง และเวลาแบบไม่ต่อเนื่องได้
- การแก้โจทย์ที่เกี่ยวกับควาร์กในแลทธิช QCD เป็นสิ่งที่ ยากและต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง ทำให้ ในช่วง 30 ปีที่ผ่านมาทฤษฎีต้องใช้วิธีพิจารณาโดยการประมาณว่าอนุภาคอยู่ที่ตำแหน่งและเวลาที่คงที่ค่าหนึ่ง (quenched approximation) เท่านั้น
- ในช่วง 5 ปีที่ผ่านมาถือว่าได้ว่าเป็นยุคที่การคำนวณโดยใช้แลทธิช QCD มีความถูกต้องมากทำให้สามารถ ทำนายคุณสมบัติของแฮดรอนได้

ทฤษฎีไม่ต่อเนื่อง

ทฤษฎีแลทธิช QCD เริ่มมีบทบาทขึ้นมา เมื่อเคน วิลสัน (Ken Wilson) ซึ่งเป็นนักฟิสิกส์จาก มหาวิทยาลัยคอนเนลล์ในสหรัฐอเมริกาซึ่งต่อมาได้รับ รางวัลโนเบลได้เขียนบทความวิจัยเรื่องนี้ขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1974 หลังจากนั้นไม่นานทฤษฎี QCD ก็เป็นที่ ยอมรับ ทฤษฎี QCD เป็นแบบจำลองที่ได้รับการ ยอมรับให้เป็นหนึ่งในแบบจำลองมาตรฐานที่ใช้ อธิบายอนุภาคมูลฐานทางฟิสิกส์เป็นหนึ่งในทฤษฎี ควอนตัมของสนาม (quantum field theory) ที่ใช้

อธิบายอันตรกิริยาระหว่างควาร์กผ่านอนุภาคที่ไม่มี มวลที่เรียกว่า กลูออน (gluon) (ดูในบทแทรก ข. และ ค.) อันตรกิริยานี้ต่างจากอันตรกิริยาระหว่างอนุภาค แบบดั้งเดิม เช่น อันตรกิริยาระหว่างลูกบิลเลียดซึ่ง สามารถคำนวณปริมาณต่างๆ ที่มีค่าแน่นอนได้ ทฤษฎี QCD อธิบายอันตรกิริยาระหว่างควาร์กและ กลูออนในรูปผลการอินทิเกรตสนามควอนตัมซึ่งเป็น ตัวแทนของอนุภาคที่ตำแหน่งและเวลาต่างๆ สนาม ที่ว่านี้เกี่ยวข้องกับความน่าจะเป็นที่จะพบอนุภาค

แม้ว่า การแก้สมการของทฤษฎี QCD ทำ โดยวิธีเชิงวิเคราะห์ไม่ได้ วิลสันพบว่า การอินทิเกรตอาจทำได้ด้วยวิธีเชิงตัวเลขโดยการแทนตำแหน่ง และเวลาด้วยจุดแลทธิชใน 4 มิติและแสดงค่า

บทแทรก ข.

ควาร์กในรูปสี

แรงที่มีค่ามากทางนิวเคลียร์ (the strong nuclear force) ได้ถูกเสนอขึ้นมารั้งแรกเพื่ออธิบายว่าทำไม นิวเคลียสของอะตอมจึงยังคงอยู่ได้โดยไม่แตกแยกออกจากกันทั้งที่มีแรงผลักกันทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างโปรตอน ภายหลังนักฟิสิกส์จึงตระหนักว่ามีแรงดึงดูดระหว่าง นิวตรอนและโปรตอนซึ่งเกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง อนุภาคมูลฐานที่เรียกว่า ควาร์ก (quark) ควาร์กเป็นอนุภาค ที่มีประจุซึ่งอาจแทนได้ด้วยสี (colour charge) ซึ่งคล้ายกับ ประจุไฟฟ้าในอิเล็กตรอน แตกต่างกันเพียงเพราะประจุ ของควาร์กแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ แดง เขียว และน้ำเงิน ใน QCD อันตรกิริยาระหว่างควาร์กเกิดจากการแลกเปลี่ยนอนุภาคกลูออน (gluon) ที่ไม่มีมวลแต่มีสีเช่นกัน ทำให้เกิดอันตรกิริยาต่อกันเกิดเป็นแรงดึงดูดที่มีค่ามาก

บทแทรก ค.

การอยู่ด้วยกันตลอดไป

แรงที่มีค่ามาก (the strong force) นี้ต่างจากแรงตาม ธรรมชาติชนิดอื่นอีก 3 แรงตรงที่แรงนี้ไม่ลดลงเมื่อระยะ ห่างมีค่ามากขึ้น เราอาจเปรียบเทียบการเกิดแรงที่มีค่ามาก นี้ได้กับการเล่นเกมสตั๊กบอลให้แกว่งไปมา ดังรูปที่ 1 ใน เกมสตั๊กบอลผู้คิดเข้ากับปลายของแท่งยางและที่ปลาย อีกด้านหนึ่งของแท่งยางนี้ติดอยู่กับเสาอีกทีหนึ่ง ผู้เล่นยืน อยู่คนละข้างของลูกบอล ถ้าผู้เล่นคนหนึ่งตีลูกบอล ลูกบอล

จะเคลื่อนที่ได้แต่ไม่หลุดไปไหน ในทำนองเดียวกัน ควาร์กแต่ละอันในนิวเคลียสอยู่ห่างกันไม่เกิน  $10^{-16}$  m มีแรงที่มีค่ามากกระทำต่อกันมีลักษณะคล้ายแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้า ขนาดของแรงแปรตาม  $g^2/r^2$  โดยที่  $g$  เป็นขนาดของประจุสีในควาร์กและ  $r$  เป็นระยะห่างระหว่างควาร์ก และแตกต่างจากแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยที่เมื่อ  $r$  ลดค่า  $g$  จะลดเร็วกว่า ทำให้แรงมีค่าน้อยลง



รูปที่ 1 เกมสตั๊ดลูกบอล

พฤติกรรมประหลาดเช่นนี้เกิดจากการมีกลูออนเคลื่อนที่ไปมาระหว่างควาร์ก ซึ่งไม่เพียงแต่จะทำให้เกิดพันธะเข้าคู่กันของควาร์กและแอนติควาร์ก และเกิดการบังประจุ (สี) เช่นเดียวกับการบังกันของประจุในสารไดอิเล็กทริกเท่านั้น แต่ทว่ามีการเข้าคู่กันของกลูออนซึ่งลดการบังประจุด้วย

ผลสุดท้ายการลดการบังประจุมีอิทธิพลมากกว่าผลที่ได้นี้ทำให้นักทฤษฎีที่ทำงานเกี่ยวกับ QCD 3 คนได้รับรางวัลโนเบลในปี ค.ศ. 2004 ในทางตรงกันข้ามที่ระยะห่างระหว่างควาร์กที่มากขึ้นแรงระหว่างควาร์กจะมากขึ้นและดึงดูดอนุภาคที่มีประจุ (สี) เหล่านี้ไว้ด้วยกัน ทำให้ควาร์ก แอนติควาร์ก และกลูออนเหล่านี้ต้องอยู่ด้วยกันเกิดเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นที่เรียกว่าแฮดรอน (hadron)

สนามด้วยค่าที่จุดนั้นๆ ในการคำนวณขั้นแรก ต้องสร้างภาพให้ได้ว่าในเวลานั้นสนามหรือความน่าจะเป็นในการพบกลูออนมีค่ามากที่ตำแหน่งใดบ้าง จากนั้นจึงคำนวณปริมาณต่างๆ ที่เกิดจากการวางตัวของกลูออนในลักษณะดังกล่าว แล้วจึงเปลี่ยนรูปแบบการจัดตัวหรือลักษณะสนามใหม่ และคำนวณความน่าจะเป็นและปริมาณต่างๆ ใหม่ ทำแบบนี้กับหลายร้อยรูปแบบที่เวลาต่างๆ กัน จากนั้นจึงนำมาหาค่าเฉลี่ยของปริมาณที่เกี่ยวข้องโดยคิดตามสัดส่วนความน่าจะเป็น เช่น การหามวลของแฮดรอนอันหนึ่ง ปกติแลตทิซที่ใช้ในการคำนวณมีลักษณะเป็นรูปกล่องลูกบาศก์ ขนาดความกว้างประมาณ 2.5 fm ( $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ ) ซึ่งเป็นขนาดที่ใหญ่กว่าแฮดรอนเพื่อป้องกันไม่ให้แฮดรอนที่ได้จากการคำนวณถูกบีบให้อยู่ในบริเวณที่แคบๆ ซึ่งจะขัดกันกับความเป็นจริง ถ้าให้จุดแลตทิซที่ใกล้กันอยู่ห่างกัน 0.1 fm จะทำให้มีจุดแลตทิซที่เกี่ยวข้องในการคำนวณทั้งหมดประมาณ 400,000 จุด (ดูบทแทรก ง.)

การคำนวณโดยใช้แลตทิซ- QCD ในระยะแรกเริ่มโดย ไมค์ ครีอูทซ์ (Mike Creutz) ที่ห้องปฏิบัติการแห่งชาติบรูคเฮเวน (Brookhaven National Laboratory) ในสหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ. 1979 โดยศึกษาโครงสร้างที่มีเฉพาะแถบของกลูออน ทำให้ได้ผลที่เป็นไปตามทฤษฎีเชลฟคอนซิสเทนท์ ผลการศึกษานี้สนับสนุนความสำเร็จของการประมาณแบบแลตทิซ - QCD (lattice QCD approximation) แต่จากการทดลองเราพบว่า ในแฮดรอนมีควาร์กอยู่ด้วย และจากการสลายตัวของแฮดรอนหนึ่งกลายเป็นแฮดรอนอีกประเภทหนึ่ง ทำให้เราพบว่าแฮดรอนแต่ละชนิดประกอบด้วยอะไรบ้าง การคำนวณตามแบบจำลองของครีอูทซ์ไม่สามารถทำให้เราทำนายคุณสมบัติของแฮดรอนจริงๆ ที่ประกอบด้วยควาร์กและกลูออนได้

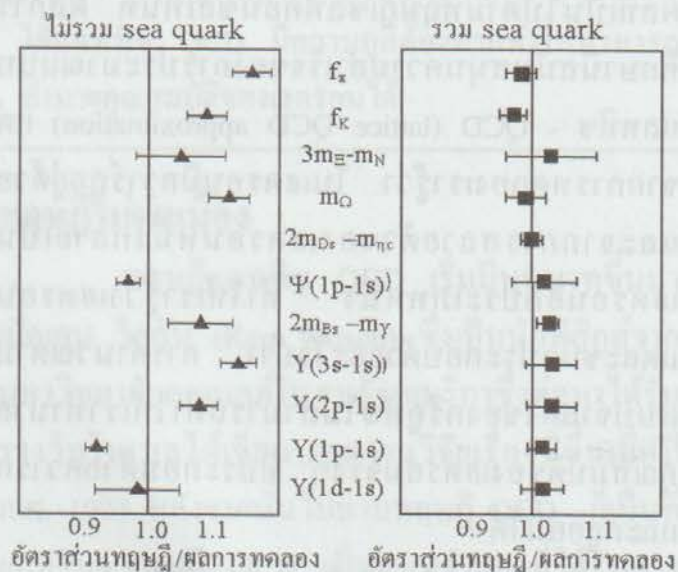
กลุ่มควาร์กหลักในแฮดรอนที่ทำให้แฮดรอนมีค่าสุทธิของประจุ สปินและปริมาณอื่นๆ ได้แก่ ควาร์กที่อยู่วนนอก (valence quark) ในความเป็นจริง

เวลาอธิบายคุณสมบัติของแฮดรอนโดยใช้ทฤษฎีสนามควอนตัมอย่างเช่น QCD การอธิบายทำได้ไม่ย้งตัวอย่างเช่น การอธิบายมวลของโปรตอนที่มีควาร์กวงนอกอยู่ 3 ตัว มวลเกือบทั้งหมด (99 %) ของมวลโปรตอนไม่ได้เกิดจากมวลของควาร์กที่อยู่วงนอก แต่ที่ว่ามาจากพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างควาร์กวงนอกนี้กับกลูออนและคู่ ควาร์กและแอนตี้ควาร์กที่อยู่วงในด้วย ควาร์กเหล่านี้ไม่ได้หยุดนิ่งแต่ทว่ามีการเคลื่อนที่กลับไปมา ทำให้มีความไม่แน่นอนของพลังงานซึ่งเมื่อกำนวณคุณสมบัติของแฮดรอนก็ต้องเอาความไม่แน่นอนนี้เข้าไปคิดด้วย

บทแทรก ก.

ความถูกต้องของ QCD

เมื่อไม่นานมานี้ นักทฤษฎีสามารถใช้ทฤษฎีแลตทิซ QCD ในการพิจารณาแบบจำลองที่ประกอบด้วยควาร์กจำนวนน้อยๆ ที่ลอยอยู่ในทะเลของกลูออน (sea quark) ทำให้สามารถทำนายคุณสมบัติของแฮดรอนได้ถูกต้องมากกว่าเดิม คุณสมบัติของแฮดรอนที่ทำนายได้แก่ มวล และ ค่าคงที่ของการสลายตัว แบบจำลองแบบเดิมที่คิดเฉพาะผลจากควาร์กวงนอก (quenched approximation) ให้ความถูกต้องเพียงประมาณ 10% เมื่อเทียบกับผลการทดลอง แต่เมื่อกำนวณแบบเต็มรูปแบบทำให้ได้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้น ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เปรียบเทียบผลการคำนวณแบบที่รวมและไม่รวมแบบจำลองควาร์กในทะเลกลูออน (sea quark)

การคำนวณทางแลตทิซ QCD ที่มีควาร์กร่วมอยู่ในแบบจำลองด้วยทำได้ไม่ย้ง ในระยะแรกได้นำเอาควาร์กเข้าไปในแบบจำลองโดยนำควาร์กยังผลใส่เข้าไปในกลูออนที่ได้จากแบบจำลองของครีอุทซ์ จากนั้นจึงปล่อยให้ควาร์กมีการเคลื่อนที่และมีอันตรกิริยากับกลูออน แล้วพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่แต่ละจุดเวลา (quenched approximation) การคำนวณแบบนี้เริ่มทำได้โดยใช้คอมพิวเตอร์เมื่อต้นปี ค.ศ. 1980 จากนั้นจึงมีการคำนวณตามทฤษฎี QCD อย่างจริงจังโดยอาศัยการขยายตัวของซูเปอร์คอมพิวเตอร์ ในขณะที่การคำนวณทำได้ถูกต้องมากขึ้น ก็มีความผิดพลาดอย่างเป็นระบบซึ่งเกิดจากการพิจารณาที่ละจุดเวลาเกิดขึ้นด้วย

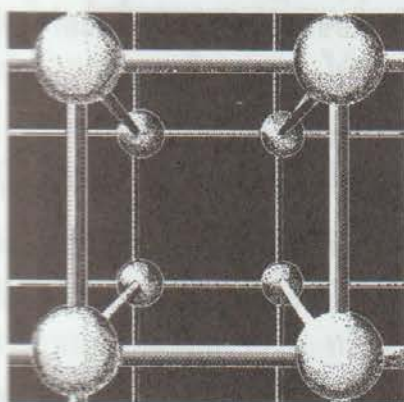
ในปี ค.ศ. 1990 นักทฤษฎีเริ่มตระหนักว่าสิ่งที่ต้องทำคือ การคำนวณ QCD อย่างเต็มรูปแบบ นั่นคือ ต้องพิจารณาควาร์กและกลูออนให้มีลักษณะต่อเนื่องเหมือนเป็นทะเล (sea quark) เพราะว่ากลูออนที่อยู่ในแฮดรอนบางขณะก็มีการแยกออกเป็นคู่ของควาร์กและแอนตี้ควาร์ก ซึ่งจะปลดปล่อยกลูออน

บทแทรก จ.

การแก้เมตริกซ์ขนาดใหญ่

แลตทิซ QCD ทำให้นักทฤษฎีสามารถแก้สมการ QCD (ซึ่งไม่มีวิธีอื่นแก้ได้เลย) ได้ โดยการประมาณให้อยู่ในรูปค่าตามจุดแลตทิซใน 4 มิติตามตำแหน่งและเวลาได้ การแปลงสมการ QCD ให้เป็นค่าต่างๆตามจุดแลตทิซทำตามหลักการของวิธีเชิงตัวเลข เช่น การแทนอนุพันธ์ด้วยผลต่างระหว่างจุดและการแปลงปริมาณที่ต่อเนื่องให้เป็นค่าต่างๆ ที่ไม่ต่อเนื่องตามจุดแลตทิซ ซึ่งทำให้เกิดความผิดพลาดอย่างมีระบบ การลดความผิดพลาดนี้ทำได้โดยการลดระยะห่างระหว่างจุดแลตทิซหรือการใช้วิธีหาผลต่างที่สลับซับซ้อนมากขึ้น แต่ถึงกระนั้นก็ยังมีย้อเสีย เช่น การลดระยะห่างระหว่างจุดแลตทิซทำให้จำนวนจุดที่ต้องคำนวณเพิ่มขึ้นบางครั้งมากถึง 26 เท่าของจำนวนเดิม ส่วนการหาอนุพันธ์ในรูปผลต่างที่สลับซับซ้อนมากขึ้นตามวิธีเชิงตัวเลขทำให้เกิดความไม่สอดคล้องกันของค่าฟังก์ชันคลื่นของกลูออน (มีความยาวคลื่นสั้น) ที่คำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลขกับวิธีที่ให้ตำแหน่งและเวลามีค่าต่อเนื่อง

โซลิตีที่แรงระหว่างอนุภาคที่มีค่ามากนี้กลับมีค่าน้อยลงเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กันมากขึ้น ดังนั้นเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กันมากขึ้นเราจึงพิจารณาแรงกระทำได้โดยใช้วิธีเชิงวิเคราะห์ ทำให้สามารถลดความผิดพลาดในการคำนวณลงได้อีก 2-3% สิ่งเหล่านี้ทำให้เกิดการสะสมการปรับปรุงสูตรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ ทำให้สามารถใช้แบบจำลองที่มีควาร์กกลอยอยู่ในทะเลของกลูออนได้ ทำให้จำลองปรากฏการณ์ที่กลูออนทำให้เกิดคู่ควาร์กและแอนติควาร์กได้เป็นครั้งแรก



รูปที่ 8 แลตทิซใน 3 มิติ

เนื่องจากควาร์กมีสปินเป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนเต็มจึงต้องเป็นไปตามหลักห้ามซ้อน (exclusion principle) ทฤษฎีสถานของควาร์กจึงต้องเกี่ยวข้องกับปริมาณที่สลับลำดับการวัดกันไม่ได้ (anticommuting numbers) ซึ่งคอมพิวเตอร์จัดการเรื่องแบบนี้ไม่ได้ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้จึงต้องมีการอินทิเกรตสนามควอนตัมของควาร์กแบบเชิงวิเคราะห์ ทำให้ได้เป็นฟังก์ชันที่สลับซับซ้อนของสนามกลูออน ทำให้ได้ผลของควาร์กยังผลในรูปของอินเวอร์สของเมตริกซ์ (M) ที่มีขนาดใหญ่ มีจำนวนแถวและจำนวนคอลัมน์มากเป็นจำนวนหลายเท่าของจำนวนจุดแลตทิซ และแต่ละค่าของตัวเลขในเมตริกซ์เป็นฟังก์ชันของสนามกลูออน

การคำนวณอินเวอร์สของเมตริกซ์นี้เทียบได้กับอะไรได้ควาร์กเคลื่อนที่เข้าไปในสนามของกลูออนและเกิดอันตรกิริยาค่อกันตามทฤษฎี QCD แบบจำลองที่คิดเฉพาะควาร์กที่อยู่วนนอกเป็นการประมาณไม่ให้ตัวอื่นเกิดอันตรกิริยา (quenched approximation) การใช้แบบจำลองที่ให้ควาร์กกลอยอยู่ในทะเลของกลูออนจะใช้เวลาในการคำนวณนานมากเป็นหลายพันเท่าของแบบจำลอง

เดิมเพราะต้องมีการคำนวณดีเทอร์มิแนนต์ของ M เพื่อหาสนามของกลูออนด้วย ปัญหาสุดท้ายของนักทฤษฎีที่ศึกษาแลตทิซ QCD คือ ปัญหาที่แสดงให้เห็นความสำคัญของแบบจำลองควาร์กกลอยอยู่ในทะเลกลูออนซึ่งต้องใช้ในการคำนวณมวลของควาร์กที่เบามากๆ ประเภทอัพและดาวน์ และต้องใช้เวลาในการคำนวณนานมาก

และกลูออนนี้สามารถปลดปล่อยควาร์กและคู่ของกลูออนออกมาได้อีก การคำนวณแบบนี้ต้องลงทุนมากกว่าการมีเฉพาะควาร์กวงนอกมาก (ดูบทแทรก จ.) เมื่อถึงต้นปี ค.ศ. 2000 ประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์เพิ่มขึ้นมากพอที่จะคำนวณแลตทิซ QCD ที่มีขนาดแถวละ 26 จุดได้ มีกลุ่มนักทฤษฎี 4 กลุ่มได้คำนวณแลตทิซ QCD อย่างจริงจัง มีการรวมควาร์กที่มีลักษณะต่อเนื่องเหมือนอยู่ในทะเลเข้าไปในแบบจำลองด้วย เป็นการเปิดยุคการคำนวณ แลตทิซ QCD ที่ให้ความถูกต้องมาก กลุ่มนักวิจัยต่างๆ ดังกล่าวได้แก่ กลุ่ม FNAL มีฐานอยู่ที่ห้องปฏิบัติการเฟอร์มิ (Fermilab) กลุ่ม HPQCD เป็นนักฟิสิกส์จากอังกฤษ สหรัฐ และแคนาดา กลุ่ม MILC ประกอบด้วยนักวิจัยจากสหรัฐและอังกฤษ และกลุ่ม UKQCD ที่มีฐานอยู่ที่อังกฤษ

## การทำนายมวล

ทฤษฎีทางฟิสิกส์ที่ได้นั้นต้องสามารถทำนายปริมาณต่างๆได้โดยใช้จำนวนพารามิเตอร์ที่ไม่มากนัก ทฤษฎี QCD เป็นหนึ่งในทฤษฎีนั้น พารามิเตอร์ที่ต้องใช้มีเพียงมวลของควาร์กแต่ละอันและค่าประจุสี ( $g$ ) ซึ่งมักจะเขียนในรูปค่าความแรงของการคู่ควบ (strong coupling constant,  $\alpha_s = g^2/4\pi$ ) ค่าของพารามิเตอร์เหล่านี้หาได้โดยการคำนวณทางทฤษฎีเมื่อศึกษาปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับแฮดรอนประเภทต่างๆ แล้วเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์เหล่านี้แล้วทฤษฎีที่ได้ก็จะอยู่ในรูปแบบที่สมบูรณ์และสามารถใช้ทำนายสิ่งต่างๆ ได้

กรณีที่ง่ายที่สุดได้แก่การคำนวณแลตทิซ QCD ที่ประกอบด้วยควาร์ก 4 ตัว โดยเลือกเอาตัวที่

เบาที่สุดที่เป็นพวกอัพและพวกดาวน์และไม่รวมควาร์กที่หนักที่เรียกว่า ท็อป (top) ค่ามวลเหล่านี้ได้จากการวัดมวลของแฮดรอน 4 ตัว คือ  $\pi$  ซึ่งประกอบด้วยควาร์กประเภทอัพและดาวน์  $K$  ที่ประกอบด้วยควาร์กประเภทอัพหรือดาวน์และสเตรจ (strange)  $D_s$  ที่ประกอบด้วย ควาร์กที่เรียกว่า ชาร์ม (charm) และสเตรจ และ  $Y$  หรืออัพซิลอน (upsilon) ซึ่งประกอบด้วยควาร์กประเภทบอททอม(bottom) การคำนวณทำได้โดยการปรับมวลของควาร์กแต่ละอันจนกระทั่งได้มวลของแฮดรอนที่สอดคล้องกับผลการทดลอง การหาค่าความแรงของการคู่ควบซึ่งสอดคล้องกับระยะห่างระหว่างจุดแลตทิซพิจารณาได้จากผลต่างของมวล  $Y$  ในสถานะพื้นและมวลในสถานะถูกกระตุ้น ( $Y'$ )

จากนี้ก็สามารถคำนวณมวลของแฮดรอนอีก 9 ชนิด และคำนวณค่าคงที่ของการสลายตัวของพายเมซอน ( $\pi$  meson) และเคเมซอน ( $K$  meson) ได้ สอดคล้องกับค่าที่วัดได้และเป็นที่ยอมรับกันอยู่โดยทั่วไป การคำนวณต้องอาศัยการทำงานร่วมกันเป็นทีมโดยนักฟิสิกส์ที่มหาวิทยาลัยคอเนลล์และมหาวิทยาลัยโอไฮโอในสหรัฐอเมริกาและมหาวิทยาลัยกลาสโกว์ในอังกฤษ (ภายใต้ความร่วมมือกันของ HPQCD และ UKQCD) ได้ศึกษาแฮดรอนที่ประกอบด้วยควาร์กประเภทบอททอม นักฟิสิกส์ที่ FNAL ศึกษาแฮดรอนที่ประกอบด้วยควาร์กประเภทชาร์ม นักฟิสิกส์ที่ MILC ที่กระจายกันอยู่ในสหรัฐอเมริกาศึกษาแฮดรอนที่เบาที่สุดที่ประกอบด้วยควาร์กพวก อัพ ดาวน์ และ สเตรจ

การคำนวณใช้เวลา 2 ปีเต็มโดยเวลาส่วนใหญ่ใช้ในการจัดวางตัวของกลูออน ผลที่ออกมาในปลายปี ค.ศ. 2002 สอดคล้องกับผลการทดลองทั้งหมด นำความยินดีมาให้กลุ่มผู้คำนวณ

### ชัยชนะอย่างท่วมท้นของ QCD

ผลที่ได้จากการคำนวณแลตทิซ QCD อย่างเต็มรูปแบบไม่ได้เกิดจากการมีคอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถมากในการคำนวณเท่านั้น แต่ทว่าเป็นผลจาก

ความพยายามนานนับปีในการวิจัยและพัฒนาวิธีการคำนวณโดยแบ่งแฮดรอนออกเป็นส่วนๆ ที่ไม่ต่อเนื่อง ในปี ค.ศ. 1998/1999 วิธีการนี้ได้ชักนำให้นักวิจัยที่มหาวิทยาลัยคอเนลล์ มหาวิทยาลัยอริโซนา และที่ห้องปฏิบัติการแห่งชาติอาร์กอนได้มีสูตรที่เป็นผลจากการพัฒนาวิธีการคำนวณ ทำให้เมื่อรวมกับการพัฒนาของซูเปอร์คอมพิวเตอร์แล้วสามารถคำนวณแฮดรอนเบาที่ประกอบด้วยควาร์กประเภท อัพ ดาวน์ และ สเตรจ ได้เร็วขึ้น

ข้อเสียของการคำนวณนี้ได้แก่ การที่ควาร์กแต่ละตัวต้องประกอบด้วยตัวแปรกำหนด ตำแหน่ง 4 ตัว การคำนวณต้องทำใน 4 มิติ 4 รอบ ค่าที่ได้จึงต้องนำมาเฉลี่ย ถ้าจุดแลตทิซอยู่ใกล้กันมากความผิดพลาดจะน้อยลง แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการคำนวณแสดงให้เห็นว่า ระยะห่างของแลตทิซที่ใช้อยู่เป็นค่าที่ใช้ได้

เซตของควาร์กที่อยู่ในทะเลกลูออนที่นักวิจัยที่ MILC ทำอยู่เป็นการศึกษาแฮดรอนที่ประกอบด้วยควาร์กหนักที่เรียกว่า ชาร์ม และ บอททอม เป็นการคำนวณโดยใช้ QCD เต็มรูปแบบ แฮดรอนประเภทนี้กำลังได้รับความสนใจจากนักทดลองทั่วโลก การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณที่ได้จะเป็นตัวบ่งชี้ว่า แบบจำลองที่ถือว่าเป็นแบบจำลองมาตรฐานเหล่านี้ยังคงใช้ได้หรือไม่

แม้ว่าควาร์กประเภทชาร์มและบอททอมจะหนักมาก เกิดการขยับที่ไม่มากนักเมื่ออยู่ในแฮดรอนและไม่น่าจะรบกวนควาร์กอื่นมากนัก แต่ก็ไม่ได้หมายความว่า การคำนวณจะทำได้ง่าย แม้ว่าจะให้ชาร์มและบอททอมเป็นควาร์กที่อยู่รอบนอก มวลที่มากนี้ก็ยังคงทำให้การคำนวณทำได้ยากอยู่มาก ทั้งนี้เพราะมวลที่มากทำให้ความยาวคลื่นของอนุภาคที่เกี่ยวข้องสั้น ทำให้ต้องมีการขยับระยะห่างระหว่างจุดแลตทิซใหม่

ข้อดีของการพิจารณาแฮดรอนประเภทนี้คือ แม้ว่ามวลจะมากแต่พลังงานยึดเหนี่ยวภายในไม่ได้มากด้วย สิ่งที่เราต้องการคือค่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่

ถูกต้อง มาถึงทุกวันนี้แฮดรอนที่ศึกษาโดยใช้แลตทิซ QCD เรียบร้อยแล้วได้แก่ เมซอนที่ประกอบด้วย ควาร์กประเภทบอทอดมและแอนตี้ควาร์ก ผลที่ได้ สอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี แสดงให้เห็นว่า วิธีการคำนวณในส่วนที่เกี่ยวกับควาร์กประเภทบอทอดมได้ทำถูกต้องแล้ว

ถ้านักทฤษฎีสามารถทำนายมวลของแฮดรอนได้ถูกต้องก่อนที่จะมีรายงานผลการทดลองจะทำให้ให้นักทฤษฎีมีความมั่นใจในวิธีการคำนวณของตนเองมากขึ้น โอกาสของการพิสูจน์ตัวเองของกลุ่มนักวิจัยที่ทำงานเกี่ยวกับแลตทิซ QCD ได้เกิดขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 2004 ก่อนหน้าที่จะมีการพบและวัดมวลของบีซีเมซอน ( $B_c$ -meson) เป็นครั้งแรกที่ห้องปฏิบัติการเทวาตรอนในการทดลอง CDF โดยแฮดรอนประเภทนี้มีคุณสมบัติเสมือนว่าประกอบด้วย ควาร์กประเภทบอทอดมและชาร์ม หรือแอนตี้ควาร์ก ผลการคำนวณที่นำหน้าผลการทดลองนี้เกิดจากความร่วมมือของกลุ่ม HPQCD ที่กลาสโกว์และกลุ่มที่ห้องปฏิบัติการเฟอร์มิ แฮดรอนที่ประกอบด้วย ควาร์กประเภทชาร์มซึ่งบางทีเรียกว่า  $\psi$  หรือ ชาร์โมนีเนียม (charmonium) ผลครั้งนี้ทำให้การวิจัยโดยใช้แลตทิซ QCD เป็นงานที่มีความสำคัญและเป็นที่ยอมรับมากขึ้นหลังจากที่มีความพยายามในการวิจัยเรื่องนี้มายาวนานถึง 30 ปี (ดูใน Physics World July 2005 pp22-33)

การคำนวณมวลของเมซอน  $B_c$  ทำได้โดยการให้ควาร์กประเภทชาร์มและบอทอดมเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในสนามกลูออนที่กลุ่มนักวิจัย MILC สร้างขึ้นมา จากนั้นจึงหามวลของ  $B_c$  โดยการคำนวณหามวลนี้มีค่าต่างจากมวลที่น้อยที่สุดของเมซอน  $Y$  และ  $\psi$  เท่ากับเท่าไร ความจริงผู้เขียน (Christine Davie) และทีมแลตทิซ QCD ที่กลาสโกว์ได้ทำการคำนวณค่านี้เมื่อห้าปีที่แล้วโดยใช้การประมาณการเปลี่ยนแปลงที่ละจุดเวลา (quenched approximation) แต่ได้ผลที่ไม่ดี กล่าวคือ มีความผิดพลาดอย่างมี

ระบบเกิดขึ้นมากและคาดว่าความผิดพลาดนี้เกิดจากการที่ไม่พิจารณาการที่กลูออนสามารถแตกตัวออกเป็นคู่ของควาร์กและแอนตี้ควาร์ก (sea quarks) ได้ การพัฒนาสูตรต่างๆ ที่ได้สะสมกันมาทำให้สามารถรวมผลของการแตกตัวของกลูออนเข้าไปในแบบจำลองได้ทำให้สามารถจัดการความผิดพลาดเหล่านั้นได้ในที่สุด

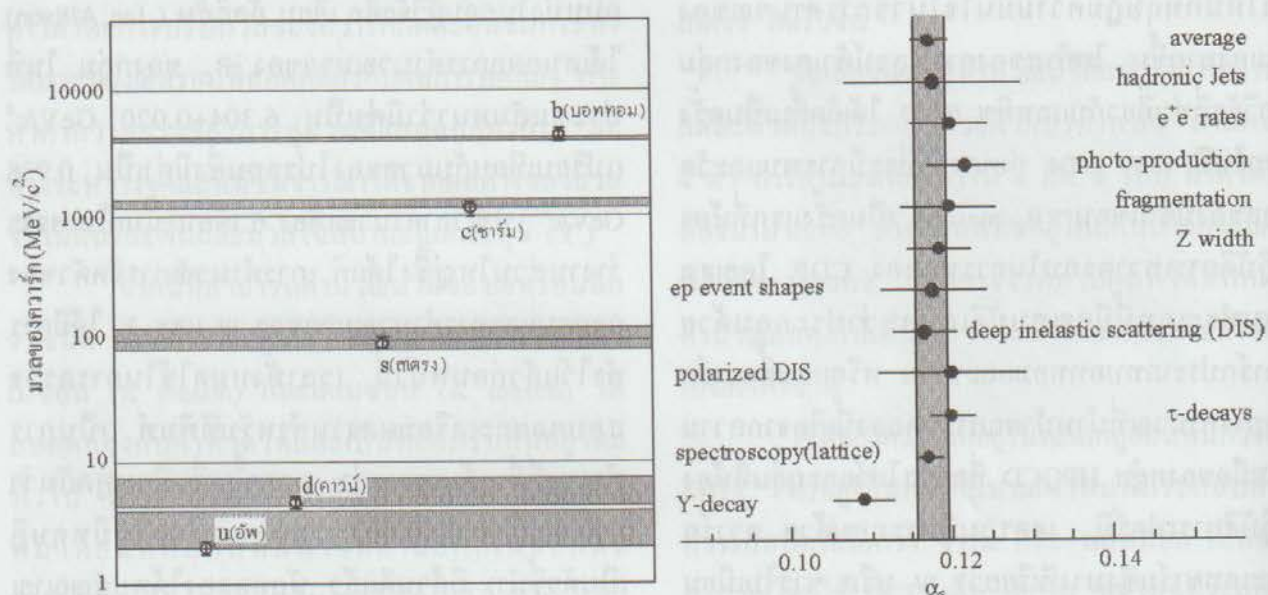
ในเดือนมิถุนายน ปี ค.ศ. 2004 นักศึกษาคนหนึ่งในกลุ่มผู้วิจัยคือ เอียน อัลลิสัน (Ian Allison) ได้เสนอผลการคำนวณมวลของ  $B_c$  ของกลุ่ม ในที่ประชุมสัมมนาว่ามีค่าเป็น  $6.304 \pm 0.020 \text{ GeV}/c^2$  (เปรียบเทียบกับมวลของโปรตอนซึ่งมีค่าเป็น  $0.938 \text{ GeV}/c^2$ ) ใช้เวลาคำนวณเพียง 6 เดือน นั่นเป็นเพราะว่างานส่วนใหญ่ซึ่งได้แก่ การคำนวณการจัดตัวของกลูออนและการคำนวณมวลของ  $\psi$  และ  $Y$  ได้มีการทำไว้แล้วก่อนหน้านี้ เวลาทั้งหมดใช้ในการตรวจสอบผลและเตรียมผลงานสำหรับตีพิมพ์ เป็นการงานที่ตื่นเต้นเพราะว่า ตอนนั้นเริ่มมีคนพูดกันว่า หลังจากวิเคราะห์ผลการทดลอง (โดยไม่มีทฤษฎีเป็นตัวชี้นำ) ถัดวันดีแล้ว นักทดลองได้พบสัญญาณของการเกิด  $B_c$

ระดับความเครียดได้เพิ่มขึ้นในขณะที่กลุ่มนักทฤษฎีส่งผลงานสำหรับตีพิมพ์ลงใน arXiv preprint server และรอฟังการประกาศผลการทดลองอย่างเป็นทางการ การนอนหลับคงเกิดได้ง่ายกว่านี้ถ้าหากว่าผู้เขียนเป็นนักทฤษฎีที่ทำเรื่องเกี่ยวกับทฤษฎีสตริง จากนั้นในการสัมมนาที่ห้องปฏิบัติการเฟอร์มิในเดือนธันวาคม ค.ศ. 2004 ซาเวรีโอ ดี ออเรีย (Saverio D'Auria) จากมหาวิทยาลัยกลาสโกว์ก็ได้ประกาศว่ากลุ่มนักวิจัย CDF ได้วัดมวลของ  $B_c$  ได้  $6.287 \pm 0.005 \text{ GeV}/c^2$  ใกล้เคียงกับค่าที่กลุ่มของผู้เขียนคำนวณได้ ทำให้รู้สึกโล่งอกขึ้นเป็นอย่างมาก แต่งานทั้งทางด้านทฤษฎีและการทดลองยังคงต้องทำต่อไปเพื่อปรับปรุงให้ได้ค่าที่ดีขึ้น

บทแทรก จ.

### หัวใจของ QCD

ถ้าไม่มีแลตทิซ QCD ก็เกือบจะเป็นไปไม่ได้เลยที่จะคำนวณค่ามวลของควาร์กแต่ละอัน ในรูปที่ 4 ด้านซ้าย เป็นมวลของควาร์กชนิดต่างๆ ยกเว้นควาร์กที่หนักที่สุด ผลของมวลของควาร์กเบา ที่คำนวณใหม่โดยใช้แลตทิซ QCD (วงกลม) มีความถูกต้องมากกว่าผลที่คำนวณโดยทางทฤษฎี QCD ด้วยวิธีอื่นเมื่อเทียบกับค่า ที่ได้จากการทดลอง (เส้นในแนวนอน) เมื่อไม่นานมานี้ก็มีการใช้แลตทิซ QCD ในการคำนวณค่าความแรงของการคู่ควบ ( $\alpha_s$ ) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4 ทางขวา ในกราฟทั้งสองรูปส่วนที่ไม่ใช่ผลการคำนวณโดยใช้แลตทิซ QCD ได้มาจากผลการรวบรวมของกลุ่มนักฟิสิกส์ที่ศึกษาอนุภาคมูลฐาน



รูปที่ 4 มวลของควาร์กประเภทต่างๆ และค่าความแรงของการคู่ควบ

### แก่นของ QCD

แลตทิซ QCD ทำให้นักทฤษฎีสามารถคำนวณคุณสมบัติของแฮดรอนซึ่งซ่อนอยู่ภายใต้แรงที่มีค่ามาก ประโยชน์ของการคำนวณไม่ได้มีเพียงเท่านั้น การคำนวณนี้ยังเป็นแนวทางที่ทำให้เรา สามารถคำนวณมวลของควาร์กแต่ละชนิดตลอดทั้งความแรงของการคู่ควบกันซึ่งต่างก็เป็นตัวแปรสำคัญของ QCD ถ้าไม่มีแลตทิซ QCD ก็จะเป็นการยากที่จะหามวลของอนุภาคที่เราวัดโดยตรงไม่ได้ แม้ว่าเราจะไม่มีทางวัดมวลของควาร์กแต่ละอันได้โดยตรง การรู้ว่าควาร์กแต่ละชนิดมีมวลเท่ากับเท่าไรก็สำคัญเพราะว่า เราต้องใช้ในการคำนวณอื่นๆ โดยเฉพาะในบางทฤษฎีที่พยายามรวมแรงพื้นฐานทางธรรมชาติให้อยู่ภายใต้

กฎเกณฑ์เดียวกัน มีการพยายามหาความสัมพันธ์ระหว่างมวลของควาร์กกับเลปตอน (lepton) เช่น ในอิเล็กตรอนและนิวตริโน

เพื่อที่จะหามวลของควาร์กโดยใช้แลตทิซ QCD เราต้องปรับค่ามวลของควาร์กที่เราป้อนเข้าไปในโปรแกรม (โดยปรับค่าให้อยู่ระหว่างค่าที่ใช้ก่อนหน้า หรือเพิ่มหรือลดจากค่าเดิม) จนกระทั่งได้มวลของแฮดรอนที่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลอง สำหรับมวลของแฮดรอนที่พิจารณาต้องพิจารณาเฉพาะค่าที่มีการวัดได้ถูกต้องมากที่สุด (นั่นคือ ถ้าจะคำนวณมวลของบอท ทอมควาร์กก็ต้องเลือก  $Y$  แฮดรอน) ความยากจึงอยู่ที่การเปลี่ยนมวลของควาร์กเหล่านี้ให้อยู่ในรูปมวลของอนุภาคที่วัดได้

การเปลี่ยนมวลของควาร์กให้เป็นมวลของอนุภาคที่วัดได้ทำได้โดยการคำนวณแล้วเทียบมวล โดยต้องมีการพิจารณาผลของกลูออนที่มีความยาวคลื่นสั้นที่ควาร์กหรือกลูออนตัวอื่นที่อยู่ในเฮดรอนปลดปล่อยและดูดกลืน โดยเฉพาะกลูออนที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าระยะระหว่างแลตทิซซึ่งอนุภาคพวกนี้คำนวณโดยใช้แลตทิซ QCD ไม่ได้ แต่ทำได้โดยใช้การคำนวณแบบต่อเนื่อง เมื่ออนุภาคเหล่านี้อยู่ใกล้กันมากๆ แรงกระทำต่อกันจะมีค่าน้อย การคำนวณจึงทำได้โดยการกระจายแรงให้อยู่ในรูปอนุกรมยกกำลังของค่าความแรงของการคู่ควบ ( $\alpha_s$ ) เมื่อต้นปี ค.ศ. 2005 สมาชิกในกลุ่ม HPQCD จากมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ คอเนลล์ และ ซิมอน-ฟราเซอร์ใช้การกระจายเช่นนี้ (กระจายถึง  $\alpha_s^2$ ) ในการคำนวณมวลของควาร์กต่างๆ ที่เบาทำให้ได้ค่าที่ความผิดพลาดน้อยกว่าค่าก่อนหน้านี้ที่มีวิธีแลตทิซ QCD (ดูรูปที่ 4 ด้านขวาในบทแทรก จ.)

การกำหนดคุณสมบัติที่แน่นอนของควาร์กยังมีผลต่อแบบจำลองมาตรฐานที่ไม่ได้เกี่ยวข้องโดยตรงกับทฤษฎี QCD โดยเฉพาะอย่างยิ่งการอธิบายว่าอันตรกิริยาระหว่างควาร์กเกี่ยวข้องอย่างไรกับแรงนิวเคลียร์ซึ่งมีค่าน้อย ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่จะใช้อธิบายกลไกที่บอกความแตกต่างระหว่างสสาร (matter) กับตัวต้านสสาร (antimatter) ประเด็นนี้ท้าทายความสามารถของนักฟิสิกส์ที่ศึกษาอนุภาคมูลฐาน แรงที่มีค่าน้อยพบครั้งแรกในการศึกษาการสลายตัวของนิวเคลียสที่ให้อนุภาคเบต้า โดยควาร์กประเภทดาว์นในนิวเคลียส เกิดการสลายตัวกลายเป็นควาร์กประเภทอัปพร้อมกับปลดปล่อยอนุภาคดับเบิลโบซอน (W-boson, ซึ่งสลายตัวกลายเป็นอิเล็กตรอนและแอนตินิวตริโนทันที) ควาร์กต่างๆ สามารถเปลี่ยนรูปได้ด้วยวิธีนี้ ความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนรูปของควาร์กอธิบายได้โดยใช้เมตริกซ์ขนาด  $3 \times 3$  ที่เรียกว่าเมตริกซ์คาบิบโบะ-โคบายาชิ-มาสคาว่า (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa, CKM matrix)

นักฟิสิกส์ที่ศึกษาอนุภาคมูลฐานหลายร้อยคนที่กระจายกันอยู่ทั่วโลกพยายามที่จะวัดความ

น่าจะเป็นเหล่านี้ให้ได้ถูกต้องมากที่สุดเพื่อที่จะตรวจสอบว่า แบบจำลองมาตรฐานของ ควาร์กที่มีอยู่ถูกต้องจริงหรือไม่ แม้ว่าการวัดจะเกี่ยวข้องกับการสลายตัวของควาร์กแต่ละตัว การคำนวณจะต้องเริ่มจากการศึกษาเฮดรอนซึ่งส่วนใหญ่ได้แก่ บีเมซอน (B-meson) ซึ่งประกอบด้วยควาร์กประเภทบอททอมเพื่อที่จะศึกษาว่าควาร์กในเฮดรอนเหล่านี้อยู่กันอย่างไรจึงทำให้เกิดการสลายตัวให้ควาร์กออกมา ต้องทำการคำนวณแลตทิซ QCD ที่มีความถูกต้องแม่นยำมาก วิธีการเดิมๆใช้ไม่ได้ ผลการพัฒนาแลตทิซ QCD ในระยะหลังให้ความหวังมาก ในการคำนวณจึงต้องมีการตรวจสอบอยู่เสมอว่า แลตทิซ QCD ให้ผลถูกต้องสอดคล้องกับผลการทดลองจริงหรือไม่ตลอดเวลา

ในขณะนี้ นักฟิสิกส์ที่ศึกษาอนุภาคมูลฐานกลุ่ม CLEO ได้ศึกษาการชนกันของอิเล็กตรอนและโพสิตรอนที่มหาวิทยาลัยคอเนลล์และได้เสนอให้กลุ่มนักทฤษฎีคำนวณความน่าจะเป็นในการสลายตัวของดีเมซอน (D-meson) ซึ่งประกอบด้วยควาร์กประเภทชาร์ม เนื่องจากผลการคำนวณจากเมตริกซ์ CKM สำหรับการสลายตัวของอนุภาคนี้นี้หาได้ จึงสามารถใช้เป็นตัวทดสอบความถูกต้องของแลตทิซ QCD ได้ และสามารถใช้หลักการเดียวกันนี้คำนวณการสลายตัวของบีเมซอนได้

ในปี ค.ศ. 2003 นักทฤษฎีที่ศึกษาเกี่ยวกับแลตทิซ QCD กลุ่ม FNAL และกลุ่ม MILC ได้รับทำงานนี้และในเดือนมิถุนายนก็ได้ประกาศผลอัตราการสลายตัวของดีเมซอนกลายเป็นดับเบิลโบซอนและสุดท้ายกลายเป็นอิเล็กตรอนและแอนตินิวตริโน โดยให้ค่าคงที่ของการสลายตัวนี้เป็น  $10$  ซึ่งเป็นตัวเดียวกันกับการสลายตัวของพายเมซอนและเคเมซอน ดังแสดงในรูปที่ 2 ในภาคผนวก ง. ผลจากการคำนวณโดยวิธีแลตทิซ QCD ได้พลังงาน  $201 \pm 17$  MeV ในขณะที่กลุ่ม CLEO ประกาศผลได้ค่าเป็น  $223 \pm 17$  MeV ในระยะเวลาใกล้เคียงกัน ความถูกต้องของวิธีแลตทิซ QCD ขึ้นอยู่กับระยะห่าง

ระหว่างแลททิซ ซึ่งมีการปรับค่าเมื่อคำนวณปริมาณ  
ต่างๆ เกี่ยวกับควาร์กประเภทชาร์ม

### ความเป็นจริง

การคำนวณโดยใช้แลททิซ QCD กำลัง  
จะให้ผลที่เป็นรูปธรรมหลังจากความพยายามในการ  
พัฒนาเป็นระยะเวลานานกว่า 30 ปีและกำลังจะกลายเป็น  
เครื่องมือที่ให้ความถูกต้องมากในการคำนวณของ  
นักฟิสิกส์ที่ศึกษาอนุภาคมูลฐาน ทำให้สามารถบอก  
เปลือกชั้นในชั้นถัดไปของหอมหัวใหญ่นี้ได้ซึ่งจะช่วย  
ให้เราเข้าใจธรรมชาติของอนุภาคมูลฐานและอันตร  
กิริยาระหว่างอนุภาคเหล่านี้ ผลการคำนวณได้มีการ  
ตรวจสอบเทียบกับผลจากการทดลอง ผลการทำนาย  
ที่ทำไว้ล่วงหน้าก็มีการทดสอบด้วยผลการทดลอง  
ในขณะเดียวกันนักทฤษฎีก็ลองนำแบบจำลองของ  
ควาร์กที่ลอยอยู่ในทะเลของกลูออนมาใช้หลังจากที่  
คอมพิวเตอร์มีการพัฒนาขึ้นมามาก

ในช่วงสองหรือสามปีข้างหน้าการคำนวณ  
การสลายตัวของบีเมซอนและดีเมซอน จะมีความถูก  
ต้องมากขึ้นทำให้สามารถหาค่าองค์ประกอบของ  
เมตริกซ์ CKM ได้ แม้ว่าจะเป็นงานที่หนักแต่ผลที่ได้  
ก็เปรียบเสมือนรางวัลที่สามารถทำให้ผู้ที่ทำงานด้าน  
ทฤษฎีสามารถทำงานเคียงบ่าเคียงไหล่หรือนำหน้า  
นักทดลองได้

### บรรณานุกรม

Artuso, M., Boulahouache, C., Blusk, S., Butt, J.,  
Dorjkhaidav, O., Li, J., Menaa, N.,  
Mountain, R., Nandakumar, R.,  
Randrianarivony, K., Redjimi, R., Sia, R.,  
Skwarnicki, T., Stone, S., Wang, J. C., Zhang,  
K., Csorna, S.E., Bonvicini, G., Cinabro,  
D., Dubrovin, M., Lincoln, A., Briere, R.  
A., Chen, G. P., Chen, J., Ferguson, T.,  
Tatishvili, G., Vogel, H., Watkins, M. E.,  
Rosner, J. L., Adam, N. E., Alexander, J.

P., Berkelman, K., Cassel, D. G., Crede, V.,  
Duboscq, J. E., Ecklund, K. M., Ehrlich, R.,  
Fields, L., Gibbons, L., Gittelmann, B., Gray,  
R., Gray, S. W., Hartill, D. L., Heltsley, B.  
K., Hertz, D., Jones, C. D., Kandaswamy,  
J., Kreinick, D. L., Kuznetsov, V. E., Mahlke-  
Kruger, H., Meyer, T. O., Onyisi, P. U. E.,  
Patterson, J. R., Peterson, D., Phillips, E.  
A., Pivarski, J., Riley, D., Ryd, A., Sadoff,  
A. J., Schwarthoff, H., Shi, X., Shepherd,  
M. R., Stroiney, S., Sun, W. M., Urner, D.,  
Wilksen, T., Weaver, K. M., Weinberger,  
M., Athar, S. B., Avery, P., Brevia-Newell,  
L., Patel, R., Potlia, V., Stoeck, H., Yelton,  
J., Rubin, P., Cawfield, C., Eisenstein, B. I.,  
Gollin, G. D., Karliner, I., Kim, D., Lowrey,  
N., Naik, P., Sedlack, C., Selen, M., White,  
E. J., Williams, J., Wiss, J., Asner, D. M.,  
Edwards, K. W., Besson, D., Pedlar, T. K.,  
Cronin-Hennessy, D., Gao, K. Y., Gong, D.  
T., Hietala, J., Kubota, Y., Klein, T., Lang,  
B. W., Li, S. Z., Poling, R., Scott, A. W.,  
Smith, A., Dobbs, S., Metreveli, Z., Seth,  
K. K., Tomaradze, A., Zweber, P., Ernst, J.,  
Severini, H., Dytman, S. A., Love, W.,  
Mehrabyan, S., Muller, J. A., Savinov, V.,  
Li, Z., Lopez, A., Mendez, H., Ramirez, J.,  
Huang, G. S., Miller, D. H., Pavlunin, V.,  
Sanghi, B., Shipsey, I. P. J., Adams, G. S.,  
Anderson, M., Cumming, J. P., Danko, I.,  
Napolitano, J., He, Q., Muramatsu, H., Park,  
C. S., Thorndike, E. H., Coan, T. E., Gao,  
Y. S., and Liu, F. (2005). Improved  
measurement of  $B(D^+ \rightarrow \mu^+ \nu)$  and the  
pseudoscalar decay constant  $f_{D^+}$ . Phys. Rev.  
Lett. 95(25) : 1801.

- Davies, C. (2006). Precision lattice QCD calculations and predictions of fundamental physics in heavy quark systems. *J. Phys.: Conf. Ser.* 46 :107-121.
- Davies, C. T. H., Follana, E., Gray, A., Lepage, G. P., Mason, O., Nobes, M., Shigemitsu, J., Trotter, H. D., and Wingate, M., Aubin, C., Bernard, C., Burch, T., Detar, C., Gottlieb, S., Gregory, E. B., Heller, U. M., Hetrick, J. E., Osborn, J., Sugar, R., Toussaint, D., Pierro, M. Di, El-Khadra, A., Kronfeld, A. S., Mackenzie, P. B., Menscher, D. and Simone, J. (2004). High-precision lattice QCD confronts experiment. *Phys. Rev. Lett.* 92: 022001.
- Kronfeld, A. (2006). Predictions with lattice QCD. *J. Phys.: Conf. Ser.* 46: 147-151.
- Shipsey, I. (2005). Particle physics: weighty questions. *Nature.* 436 :186-187.



# Isolation and partial characterization of *Salmonella typhi*-specific bacteriophage

## การคัดแยกและลักษณะสมบัติบางประการของ แบคทีริโอเฟาจจำเพาะต่อ *Salmonella typhi*

กัญญา นีกดี<sup>1\*</sup>

### บทคัดย่อ

แบคทีริโอเฟาจ จำเพาะต่อเชื้อ *Salmonella typhi* DMS5784 แยกได้จากน้ำเสียของสถานบำบัดน้ำเสีย เทศบาลจังหวัดอุบลราชธานี ทำการแยกฟาจให้บริสุทธิ์โดยการคัดเลือกได้ที่ passage ที่ 10 ทำการศึกษาชนิด เซลล์เจ้าบ้านที่มีความไวรับ (host range) โดยทดสอบฟาจกับแบคทีเรีย 6 ชนิด พบว่าแบคทีเรีย *S. typhi* DMS5784 มีความไวรับและถูกทำลายได้เพียงชนิดเดียว เมื่อติดตามการเจริญพบว่าฟาจมีไตเตอร์สูงสุดประมาณ  $7.5 \times 10^9$  PFU/ml ที่เวลา 150 นาที ฟาจสามารถอยู่ได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อ Trypticase soy broth ที่อุณหภูมิห้องได้นานกว่า 2 เดือน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และทนต่อ pH ในช่วงกว้างเมื่อฟาจอยู่ในอาหารเลี้ยงเชื้อข้ามคืน ทำการย้อมสีเนกาทีฟ (negative staining) เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของฟาจที่แยกได้ด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน พบว่าส่วนหัวมีรูปร่างเป็น แบบ icosahedral (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ  $44-47 \times 43-51$  นาโนเมตร) และส่วนหางมีลักษณะสั้นมาก

### Abstract

A lytic specific bacteriophage (phage) of *Salmonella typhi* DMS5784 was isolated from a local sewage treatment plant in Ubon Rajathanee province. The plaque purification had been carried out in *S. typhi* until the 10<sup>th</sup> passages. Determining the bacteriophage host ranges was performed against 6 bacterial strains. Phage formed clear zones of lysis only on *S. typhi* DMS5784. The growth pattern of bacteriophage in *S. typhi* demonstrated that the highest titer of the phage was approximately  $7.5 \times 10^9$  PFU/ml in 150 minutes post-infection. Phage was stable in Trypticase soy broth for over 2 month at room temperature. The phage tolerated temperature as high as 60°C for up to 3 hrs and was stable after overnight exposure to a wide range of pH. By negative staining and transmission electron microscopy (TEM) examination, it was shown that the phage had an icosahedral head ( $44-47 \times 43-51$  nm in diameter) and very short tail.

คำสำคัญ: แบคทีริโอเฟาจ, ฟาจ

Key words: *Salmonella typhi*, bacteriophage, phage

<sup>1</sup> ภาควิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

\* corresponding author, e-mail: kanjana@sci.ubu.ac.th

## 1. INTRODUCTION

Salmonellas are Gram-negative facultative rods with peritrichous flagella. They are members of the family *Enterobacteriaceae* (Pelczar et al., 1993). *Salmonella* infection is the cause of foodborne illness in most developing countries. Meat, poultry, and dairy products are frequently implicated in outbreaks.

Bacterial viruses (generally called bacteriophages or simply phages) were discovered independently by Twort and d'Herelle as filtrable, transmissible agents of bacterial lysis (Campbell, 2001). In the early years, it was hoped that phage might be used to combat pathogenic bacteria (either therapeutically or in decontamination of the environment, such as in purifying water supplies). Efforts toward that goal have been renewed (Merril et al., 1996). Phages have been proposed as natural antimicrobial agents to fight bacterial infections in humans, in animals or in crops of agricultural importance (Chen and Griffiths, 1996; Ellis and Delbruck, 1939). Phages were widely used in the typing of bacterial strains of medical interest. There is a large population of bacteriophage in aquatic environments (Chen and Griffiths, 1996; Wommack and Colwell, 2000).

The objectives of this study were to isolate, purify, determine the host ranges, and examine for morphology of the bacteriophages.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1 Bacterial strains and water samples

Sewage samples for the study were collected from a local sewage treatment plant (Ubon Rajathanee Thailand). *S. typhi* DMS5784 was used as the host of bacteriophages throughout this study. It was

originally obtained from the Ruth Berker collection Dundee, Scotland and maintained at the laboratory of the Department of Biological Science, Faculty of Science, Ubon Rajathanee University, Ubon Rajathanee, Thailand.

### 2.2 Isolation of bacteriophage

Sewage samples were centrifuged at a low speed (1,000 x g) to precipitate debris for 10 minutes in a Universal 30 RF (Hettich, Tuttlingen, Germany). *S. typhi* DMS5784 was used as potential recipients to detect the presence of possible phages. Logarithmic phase-cells (0.5 ml) of each bacterial strain in Trypticase soy broth (Hardy diagnostics, USA) were mixed with sewage sample (4.5 ml) and 10x Trypticase soy broth (0.5 ml). The mixture was incubated at 37°C with shaking at 180 rpm for 48 hrs. At the end of incubation period, the suspension was clarified by centrifugation at 1,000 x g for 10 minutes and the supernatant was filtered through 0.22-µm-pore-size filters (Millipore Corporation, Bedford, Mass.) to exclude bacteria. The suspension of expected phages was kept at 4°C.

### 2.3 Plaque assay

The suspension of expected phages (0.1 ml) was added an overnight bacterial cells (0.2 ml) in Trypticase soy broth and then mixed with 2.5-ml aliquots of soft agar (Trypticase soy broth containing 0.7% Bacto Agar [Difco]). The mixtures were subsequently overlaid on Trypticase soy agar (Hardy diagnostics, USA) plates prior to an overnight incubation at 37°C. A sample was indicated positive for phage when a lytic plaque type was observed on the plates.

## 2.4 Phage stock preparation

To amplify the phages, 10 ml of an overnight culture of bacterial cells ( $10^9$  CFU/ml) and 1 ml of the phage ( $10^{11}$  PFU/ml) were added to 500 ml of Trypticase soy broth and incubated with shaking at  $37^\circ\text{C}$  for 5 h. After incubation which lysis occurred, the bacterium-phage suspension was treated with 10 ml of chloroform to release any progeny phage which might still have been in the host cells, and the suspension was incubated for an additional 10 min with shaking at  $37^\circ\text{C}$ . To remove bacterial debris, the suspension was centrifuged at  $5,000 \times g$  for 15 min, and the supernatant was withdrawn and filtered through  $0.22\text{-}\mu\text{m}$ -pore-size filters. The phage lysates were stored at  $4^\circ\text{C}$  (Goodridge et al., 2001).

## 2.5 Phage purification

A single discrete plaque was purified three times by plaque assay with *S. typhi*. An overnight bacterial culture was diluted 1:100 in fresh Trypticase soy broth and incubated at  $37^\circ\text{C}$  for 4 h. The culture was then inoculated with phage from a single plaque. The bacterium-phage culture was incubated for 18 h at  $37^\circ\text{C}$  for lysis of most bacteria to occur. The culture was centrifuged at  $10,000 \times g$  for 20 min, and chloroform (final volume, 1%) (VWR International Lt., England) was added to the supernatant to kill unlysed bacteria. The supernatant was kept at  $4^\circ\text{C}$  for 20 hrs. The number of phage particles in the supernatant was determined by the plaque assay.

## 2.6 Host range determination

Six bacterial strains (Figure 3) were used to determine the host range of phages. These strains consisted of *Shigella dysenteriae* DMS2137, *S. typhi* DMS5784, *Escherichia coli* ATCC25922, *Enterobacter*

*aerogenes*, *Staphylococcus aureus* ATCC25923 and *Proteus vulgaris* ATCC13315. Bacteriophage lysis assays were carried out using spot plaque technique. An overnight culture of bacteria was spread on Trypticase soy agar and then a single drop of phage stock solution ( $10^8$  PFU/ml) was added on bacterial law. The plates were inverted, incubated at  $37^\circ\text{C}$  overnight, and then examined for the presence of clear zones of lysis.

## 2.7 Growth curve

The growth pattern of *S. typhi* specific phage was determined by using a 1 ml bacterial suspension ( $10^6$  CFU/ml). One ml of the virus suspension ( $10^5$  CFU/ml) was added into bacterial suspension. The bacterium-phage culture was incubated with shaking at  $37^\circ\text{C}$ . The culture samples were harvested at various time intervals and chloroform was added to the supernatant to kill any unlysed bacteria. The number of phage particles was determined by plaque assay. The plaques were counted and recorded by naked eyes. Virus titers were estimated and expressed as plaque forming unit per milliliter (PFU/ml). The bacterial cell number was determined by using plate count technique.

## 2.8 Stability of bacteriophage

Using double-layer plaque technique with phage, the heat stability of phage was tested at 37, 42, 50, 60 and  $70^\circ\text{C}$  for 3 hrs in Trypticase soy broth pH 7.0 by incubation in water bath.

To test pH stability, phage was incubated overnight in Trypticase soy broth with pH varying from pH 2-11. Upon re-adjustment to pH 7.0, double-layer plaque techniques were performed. In addition, phage stability was tested by storing a phage suspension

in Trypticase soy broth for more than 2 months at room temperature and tested for viability at weekly intervals by double-layer plaque technique.

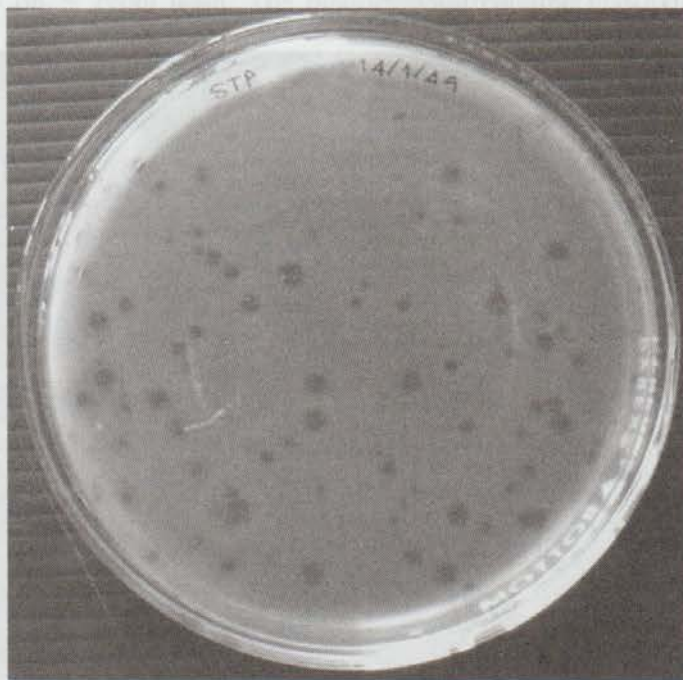
## 2.9 Electron microscopy

To observe *Salmonella* phage morphology, phage stock solution was fixed by addition of 2.5% glutaraldehyde in 0.1 M phosphate buffer (pH 7.3) for 3 hrs and a drop of this solution was placed on a Formvar-carbon-coated copper grid (200 mesh) for transmission electron microscopy (TEM). After waiting 30 min for settlement, excess liquid was removed and the grid was allowed to dry. Next, a drop of 2% uranyl acetate was added for 1 min and the excess liquid was removed with a piece of filter paper before further drying. The sample on a copper grid was examined by TEM (Jeol, model JEM-1010).

## 3. RESULTS

### 3.1 Isolation of *S. typhi* specific bacteriophage

Plaque produced by *S. typhi* DMS5784 specific bacteriophage was shown in Figure 1-2. The original passage of phage infecting *S. typhi* contained a mixture of several plaque types. The plaques produced by phage in the first passage were a mixture of plaques, large, medium and small in size. The plaque purification had been carried out in *S. typhi* until the 10<sup>th</sup> passage. The plaque population produced by phage samples of the 10<sup>th</sup> passage was predominantly consisted of the large plaque size approximately 70-80 % of the total population. The ratios between small plaque size and large plaque size were relatively constant during the process of plaque selection in *S. typhi*. The large plaque variant approximately 3 mm in size, given strain name STP, was harvested and kept at 4°C for further studies. The plaques produced by STP strain were illustrated in Figures 1 and 2.



**Figure 1** Morphology of wild-type plaque formed on *S. typhi* DMS5784 lawn infected with specific bacteriophage. The plaque assays were carried out at 37°C.

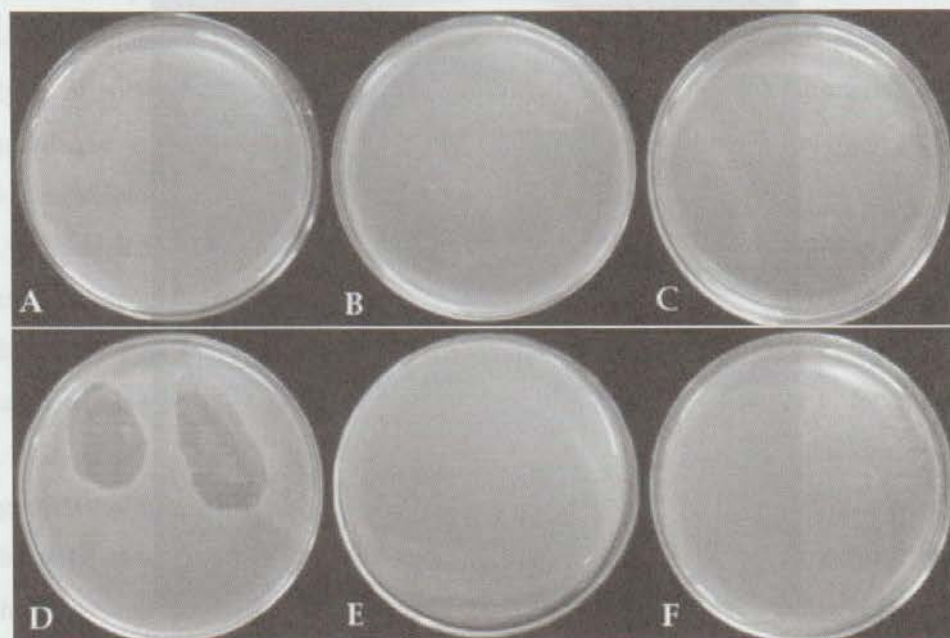


**Figure 2** Morphology of the large plaque variant formed on *S. typhi* DMS5784 lawn infected with strain STP. The plaque assays were carried out at 37°C.

### 3.2 The host specificity of bacteriophage

A total of 6 bacterial strains were used for host range studies and phage propagation. Phages were tested against members of the *Enterobacteriaceae* (*S. dysenteriae* DMS2137, *S. typhi* DMS5784,

*E. coli* ATCC25922, *E. aerogenes*, and *P. vulgaris*) and non-members of the *Enterobacteriaceae* (*S. aureus*). Specific phage formed clear zones of lysis only on *S. typhi* DMS5784 (Figure 3).



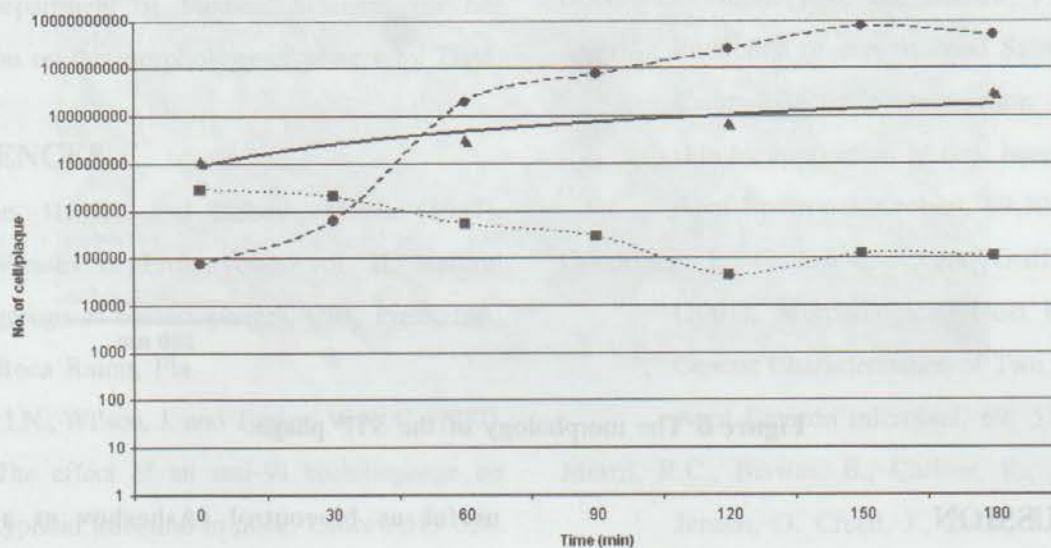
**Figure 3** The study of STP phage ( $10^8$  PFU/ml) specificity on bacterial host:

A) *E. coli*, B) *E. aerogenes*, C) *S. dysenteriae* D) *S. typhi*, E) *S. aureus* and F) *P. vulgaris*.

### 3.3 Growth of bacteriophage strain STP in *S. typhi* DMS5784

Growth pattern of the STP in *S. typhi* was determined at 37°C. Figure 4 demonstrated the growth pattern of virus replicated at 37°C. The highest titer of the virus was approximately  $7.5 \times 10^9$  PFU/ml

in 150 minutes post-infection. The number of bacteria cell was shown to decrease steadily during the entire experiment of 180 minutes. In contrast *S. typhi* in a culture without STP phage did not decrease in number. In fact it increased slightly with time.



**Figure 4** Growth curves of bacteriophage strain STP in *S. typhi* lawn incubated at 37°C. Bacterial cells at the concentration of  $1 \times 10^7$  cells / ml were inoculated with the phage at multiplicity of infection (m.o.i.) of 0.01 PFU/cell. The virus samples were harvested at various time intervals and assayed by plaque assay on *S. typhi* lawn. The plaques were counted and expressed in term of PFU/ml.

Legend:

- No. of *S. typhi* (CFU/ml) in a culture with the presence of STP phage
- No. of plaque (PFU/ml) formed by STP phage infection on *S. typhi*
- ▲— Control (No. of *S. typhi* (CFU/ml) in a culture without STP phage

### 3.4 Stability of STP phage

STP phage was stable in Trypticase soy broth for over 2 months at room temperature. It was also relatively stable with no decrease in infectious titer upon treatment at high temperature for 3 hrs, at 37, 42 and 50°C, but showing some decrease at 60°C. However upon similar treatment at 70°C, no phage was detected. This indicated that STP phage could not tolerate such high temperature.

For an overnight treatment under various pH, no phage was detected after the treatment with pH 2 and 3. However STP phage remained infectious after treatment with pH 4-11.

### 3.5 Bacteriophage morphology

Electron microscopy using negative staining was employed to observe the morphology of phages. A particle of STP phage consisted of an

icosahedral head (44-47 x 43-51 nm in diameter) and a short rigid non-contractile tail without a collar or terminal fibers (Figure 5).

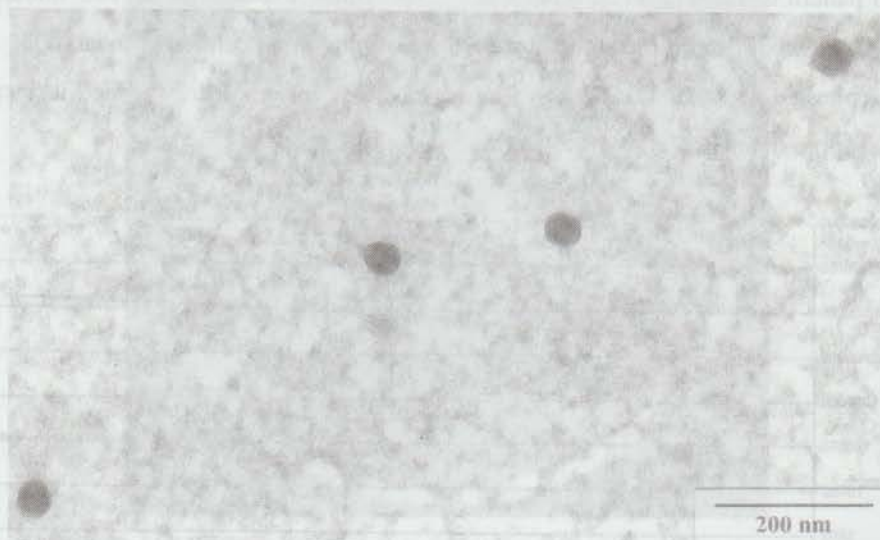


Figure 5 The morphology of the STP phage.

#### 4. DISCUSSION

Bacteriophages represent the largest of all virus groups. They occur in archaea and bacteria and are found in enormous numbers in many diverse natural habitats (Ackermann and Dubow, 1987). Phages are easy to isolate and inexpensive to purify. The isolation of bacteriophages (STP) that infect *S. typhi* provided an opportunity to characterize the bacteriophages and to determine their host range, growth pattern, heat stability and pH stability. A virus of bacteria consisted of an icosahedral head (approximately 44-47 x 43-51 nm in diameter) and a very short tail. The tolerance of STP phage to relatively high temperature and a broad range of pH, suggests that it may be relatively stable in the waste water environment. Phage can be detected after thermal treatment of sludge and sewage (Mocé-Llivina et al., 2003). Phages represent a group of viruses that specifically infect and replicate in bacteria. Phages specific for *S. typhi* may be

useful as biocontrol (Asheshov et al., 1937), therapeutic, or diagnostic agents to control and detect the prevalence of *S. typhi* in animals and food. Phage can be used as biocontrol to reduce of *Salmonella* and *Campylobacter* contamination of chicken skin (Goode et al., 2003). The successful treatment of experimental *E. coli* infections in Chickens and Calves using phages was previously tested (Barrow et al., 1998). Several review the detection by using phages such as to detect *Salmonella* in eggs (Chen and Griffiths, 1996), broth and food (Favrin et al., 2001; Favrin et al., 2003) were reported.

In conclusion, we have isolated and partially characterized a bacteriophage of *S. typhi* that can be easily propagated in the laboratory and used to study the interaction with *S. typhi*. Further research will be conducted in order to determine and analyse the genome of bacteriophage.

## ACKNOWLEDGMENTS

I would like to thank Department of Biological Science, Faculty of Science, Ubon Rajathanee University for support in our laboratory to study this research and Ms. Prukswan Chetanachan, Electron microscopy section, National Institute of Health, Department of Medical Sciences for her examination on the morphology of phages by TEM.

## REFERENCES

- Ackermann, H. W., and Dubow, M. S. (1987). Viruses of Prokaryotes, vol. II. Natural groups of bacteriophages. CRC Press, Inc., Boca Raton, Fla.
- Asheshov, I.N., Wilson, J. and Topley, W.W.C. (1937). The effect of an anti-Vi bacteriophage on typhoid infection in mice. *Lancet*: 319-320.
- Barrow P, Lovell M and Berchieri A. Jr. (1998). Use of Lytic Bacteriophage for Control of Experimental *Escherichia coli* Septicemia and Meningitis in Chickens and Calves. *Clin Diagn Lab Immunol*. 5: 294-298.
- Campbell, M.A. (2001). Bacteriophage. In Knipe, D.M., Howley, P.M. and Griffin, D.E. *Fields Virology* (4<sup>th</sup> edition), Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins. 659-682.
- Chen, J. and Griffiths, M.W. (1996). *Salmonella* detection in eggs using *lux*<sup>+</sup> bacteriophages. *J Food Prot*. 59:908-914.
- Ellis, E.L. and Delbruck, M. (1939). The growth of bacteriophage. *J Gen Physiol*. 22:365-384.
- Favrin, S.J., Jassim, S.A. and Griffiths, M.W. (2003). Application of a novel immunomagnetic separation-bacteriophage assay for the detection of *Salmonella enteritidis* and *Escherichia coli* O157:H7 in food. *Int J Food Microbiol*. 15; 85(1-2): 63-71.
- Favrin, S.J., Jassim, S.A. and Griffiths, M.W. (2001). Development and optimization of a novel immunomagnetic separation- bacteriophage assay for detection of *Salmonella enterica* serovar Enteritidis in broth. *Appl Environ Microbiol*. 67(1): 217-24.
- Goode, D., Allen, V.M. and Barrow, P.A. (2003). Reduction of experimental *Salmonella* and *Campylobacter* contamination of chicken skin by application of lytic bacteriophages. *Appl Environ Microbiol*. 69:5032-5036.
- Goodridge, L., Gallaccio, A. and Griffiths, W.M. (2001). Morphological, Host Range, and Genetic Characterization of Two Coliphages. *Appl Environ microbial*. 69: 5364-5371.
- Merril, R.C., Biswas, B., Carlton, R., Nicole, C., Jensen, G. Creed, J., Zullo, S., Adhya S. (1996). Long-circulating bacteriophage as antibacterial agents. *Proc Natl Acad Sci USA*. 93:3188-3192.
- Mocé-Llivina L., Muniesa, M., Pimenta-Vale, H, Lucena, F., Jofre, J. (2003). Survival of Bacterial Indicator Species and Bacteriophages after Thermal Treatment of Sludge and Sewage. *Appl Envir Microbiol*. 69: 1452-1456.
- Pelczar, M.J. Jr, Chan, E.C.S., and Krieg, N.R. (1993). *Microbiology Concepts and Application*. 1<sup>st</sup> ed. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Wolf, A., Wiese, J., Jost, G., Witzel K. (2003). Wide geographic distribution of bacteriophages that lyse the same indigenous freshwater isolate (*Sphingomonas* sp. Strain B18). *Appl Environ Microbiol*. 69: 2395-2398.
- Wommack, K.E. and Colwell, R.R. (2000). Virioplankton: viruses in aquatic ecosystems. *Microbiol Mol Biol Rev*. 64:69-114

## การเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาของด้วงเต่าห้ำไร

*Stethorus pauperculus* (Weise) และ *Stethorus siphonulus* Kapur

Comparative morphology of acarophagous lady beetles,

*Stethorus pauperculus* (Weise) and *Stethorus siphonulus* Kapur

จุรีรัตน์ รัตนทิพย์<sup>1</sup> นุชรีย์ ศิริ<sup>1,2</sup> และอังศุมาลย์ จันทราปิตย์<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาแต่ละระยะของด้วงเต่าห้ำไร *Stethorus pauperculus* (Weise) และ *Stethorus siphonulus* Kapur โดยเลี้ยงที่อุณหภูมิ 27-28 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70-75 % พบว่า ตัวเต็มวัยด้วงเต่าห้ำไรทั้ง 2 ชนิด มีลำตัวรูปไข่ สีดำ สันหลังโค้งนูน *S. pauperculus* มีขนาดลำตัวยาว  $0.86 \pm 0.04$  มิลลิเมตร กว้าง  $0.58 \pm 0.02$  มิลลิเมตร และ *S. siphonulus* มีขนาดลำตัวยาว  $1.14 \pm 0.05$  มิลลิเมตร กว้าง  $0.84 \pm 0.04$  มิลลิเมตร ส่วนหัวสีดำ หนวดสีเหลืองถึงน้ำตาล ทารไช 4-4-4 มีขนทั่วลำตัว ไข่ของ *S. pauperculus* ขาวรี เปลือกไข่มีลักษณะเรียบ มีสีเหลือง ก่อนที่ไข่ฟักจะปรากฏจุดสีแดง 2 จุดที่ปลายไข่ วางไข่ฟองเดี่ยวได้ใบพืช ส่วนไข่ของ *S. siphonulus* มีลักษณะขาวรี เปลือกไข่เป็นร่างแห มีสีแดง ก่อนฟักจะปรากฏจุดสีดำ 2 จุดที่ปลายไข่ วางไข่ฟองเดี่ยวหรือเป็นกลุ่มทั้งได้ใบพืชและบนใบพืช ระยะหนอนมี 4 ระยะ หนอนของ *S. pauperculus* มีสีเหลืองใสถึงเหลืองปนน้ำตาล ลำตัวกลมรี หนอนของ *S. siphonulus* ลำตัวแบน สีเทาถึงน้ำตาลปนเหลือง ระยะดักแด้ของทั้ง 2 ชนิดมีสีน้ำตาลถึงดำ มีลักษณะแบน ส่วนหัวป้าน ท้ายแหลม มีขนปกคลุมทั่วไป ขนของดักแด้ *S. pauperculus* มีลักษณะคล้ายหยดน้ำตรงส่วนปลาย และสั้นกว่าขนของดักแด้ *S. siphonulus* ซึ่งมีปลายแหลม เนื่องจากด้วงทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะคล้ายคลึงกันมากจึงใช้วิธีเพาะเพศสืบพันธุ์ผู้ในการจำแนกชนิด โดยวิธีเพาะเพศสืบพันธุ์ผู้ของ *S. pauperculus* มีส่วนของ siphon ก่อนข้างอ้วนสั้น แผ่นกลางของ tegmen ยาวกว่าแผ่นด้านข้าง ส่วนอวัยวะสืบพันธุ์เพศผู้ของ *S. siphonulus* มีส่วนของ siphon โค้ง และยาวเรียว แผ่นกลางของ tegmen ขาวรี และค่อนข้างโค้งงอ แผ่นด้านข้างเรียวเล็ก

<sup>1</sup> สาขาชีววิทยา ภาควิชาพืชศาสตร์และทรัพยากรการเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

<sup>2</sup> ศูนย์วิจัยควบคุมศัตรูพืชโดยชีวินทรีย์แห่งชาติ ภาควิชาอนุกรมวิธานเห็บเห็บตอนบน มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ. ขอนแก่น 40002

<sup>3</sup> ภาควิชาชีววิทยา คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

## ABSTRACT

The morphology on different stages of two acarophagous lady beetles, *Stethorus pauperculus* (Weise) and *Stethorus siphonulus* Kapur was investigated under 27-28 °C and 70-75 % RH condition. The adults of both species were tiny shiny black beetles, oval body and convex, with  $0.86 \pm 0.04$  mm. and  $1.14 \pm 0.05$  mm. length,  $0.58 \pm 0.02$  mm. and  $0.84 \pm 0.04$  mm. width for *S. pauperculus* and *S. siphonulus*, respectively. Head were black, with yellow to brownish antennae, 4-4-4 tarsal formula and hairy body. *S. pauperculus* eggs were elongate, smooth, yellow, two red eyespots developed before hatching, laid singly eggs at lower surface of leaves. Whereas, *S. siphonulus* eggs were elongate, mesh, red and two black eyespots developed prior to hatch. They laid either singly or group of eggs lower or upper surface of leaves. There were four instar larvae. Larval colour of *S. pauperculus* varied from clearly yellow to brownish yellow with rounded shaped. *S. siphonulus* larvae were flattened shaped with blackish grey to yellowish brown colour. Both two species of pupae were brown to black, flattened, subtruncate anteriorly and tapered posteriorly. Body was covered with hair like setae, of which *S. pauperculus* was dropended setae and shorter than *S. siphonulus* which had sharp ended setae. Due to the similar characteristic of the both species, therefore they could be differentiate by the male genitalia. *S. pauperculus* male genitalia were stout and short siphon, median piece of tegmen was longer than lateral pieces. Whereas, *S. siphonulus* siphon was curved with slender apex, median piece of tegmen was very long and slender and somewhat bent, lateral pieces of tegmen were very narrow.

**คำสำคัญ:** สัตววิทยา, *Stethorus pauperculus* (Weise), *Stethorus siphonulus* Kapur

**Keyword:** morphology, *Stethorus pauperculus* (Weise), *Stethorus siphonulus* Kapur

## คำนำ

ไรสองจุด *T. urticae* วงศ์ Tetranychidae เป็นไรที่แพร่ระบาดทั่วโลก ทำลายพืชเศรษฐกิจได้มากกว่า 200 ชนิด สามารถเพิ่มประชากรอย่างรวดเร็ว มีการเจริญเติบโตจากไข่ถึงตัวเต็มวัยประมาณ 8-9 วัน ตัวเมีย 1 ตัวสามารถผลิตไข่ได้ 122 ฟอง ในระยะเวลาประมาณ 17 วัน เป็นศัตรูสำคัญของสตรอเบอรี่ และยังทำลาย กุหลาบ หน้าวัว ลิ้นมังกร ถั่วฝักยาว (วัฒนา จารณศรีและคณะ, 2544) มีการระบาดของไรสองจุดในแปลงปลูกซึ่งกำจัดได้ยากด้วยสารเคมี เนื่องจากไรมีขนาดเล็กมาก ขณะเดียวกันกว่า เกษตรกรจะสังเกตพบไรก็ทำความเสียหายให้กับ ผลผลิตเป็นอย่างมาก เมื่อพบการทำลายเกษตรกร มักจะใช้สารเคมีค่อนข้างมาก ดังนั้นการหลีกเลี่ยง

อันตรายจากพืชตกค้างบนผลผลิต โดยทิ้งระยะก่อน การเก็บเกี่ยวหลังพ่นสารจึงเป็นไปได้ยาก เพื่อเป็นการ แก้ปัญหาดังกล่าว การควบคุมไรสองจุดโดยชีววิธี และการควบคุมไรแบบผสมผสาน จึงเป็นวิธีการที่มี การศึกษาอย่างกว้างขวางเพื่อลดการใช้สารกำจัดไร (มานิตา คงชื่นสินและคณะ, 2539) แนวทางหนึ่งคือ การใช้ศัตรูธรรมชาติซึ่งมีหลายชนิด เช่น เพลี้ยไฟตัวห้ำ หนอนแมลงวันดอกไม้ มวนตัวห้ำ แมงมุม ไรตัวห้ำ และด้วงเต่าตัวห้ำ (อังศุมาลย์ จันทราปัดย์, 2535) ในประเทศไทยมีรายงานการใช้ไรตัวห้ำ *Amblyseius longispinosus* (Evans) ในการควบคุมไรศัตรูพืช ซึ่งจะมีประสิทธิภาพทำลายไข่ไรสองจุดได้เฉลี่ยวันละ 80 ฟอง กินตัวอ่อนไรได้วันละ 12-13 ตัว (มานิตา คงชื่นสินและคณะ, 2539) แต่มีการทำลายเหยื่อได้

น้อยกว่าด้วงเต่าห้ำไรสกุล *Stethorus* และยังไม่มียารายงานการใช้ด้วงเต่าชนิดนี้ในการควบคุมไรศัตรูพืช ขณะที่ *Stethorus* spp. หลายชนิดเป็นตัวห้ำที่มีศักยภาพที่จะสามารถนำมาใช้เพื่อการควบคุมไรศัตรูพืชในแปลงปลูกได้ (Ragkou et al., 2004)

ด้วงเต่าห้ำไรสกุล *Stethorus* วงศ์ Coccinellidae วงศ์ย่อย Scymninae เผ่า Stethorini เป็นด้วงเต่าขนาดเล็ก ลำตัวสีดำปกคลุมด้วยขนเล็กๆ ยาวประมาณ 1.00 - 1.50 มิลลิเมตรแต่ละชนิดมีรูปร่างคล้ายกันมากยากต่อการใช้ลักษณะภายนอกจำแนกชนิด การใช้ลักษณะของอวัยวะเพศผู้ (male genitalia) อวัยวะเพศเมีย (female genitalia) จะทำให้สามารถจำแนกชนิดได้ถูกต้องขึ้น ในประเทศไทยพบ 6 ชนิด คือ *Stethorus indira* Kapur, *S. pauperculus* (Weise), *S. rani* Kapur, *S. siphonulus* Kapur, *S. tetranychii* Kapur และ *S. vinsoni* Kapur (สมหมาย, 2545) ด้วงเต่า *S. pauperculus* ทำลายไรศัตรูพืชหลายชนิด เช่น ไรข้าวฟ่าง (*Oligonychus indicus* (Hirst)) ไรแดงหมอน (*Tetranychus truncatus* Ehara) ด้วงเต่าห้ำไรมีเขตการแพร่กระจายในประเทศไทยที่จังหวัดฉะเชิงเทรา จังหวัดชลบุรี จังหวัดราชบุรี (สมหมาย, 2545) Basavanna (1977) อ้างตาม Ullah (2000) รายงานว่าระยะเวลาในการเจริญเติบโตของ *S. pauperculus* เป็นดังนี้คือ ระยะไข่ 4.36 วัน ตัวหนอน 7.63 วัน ดักแด้ 3.80 - 4.00 วัน และตัวเต็มวัยมีอายุ 29.80 - 32.40 วัน ขณะที่นุชริย์ชโยพิทักษ์ (2526) รายงานว่าตัวเต็มวัยมีอายุ 136 วัน ตลอดอายุขัยสามารถวางไข่เฉลี่ย  $215.15 \pm 75.74$  ฟองต่อตัว อัตราการรอดชีวิตจากไข่เป็นตัวเต็มวัยร้อยละ 71.47 ตัวหนอนวัยที่ 1 มีเปอร์เซ็นต์การตายมากที่สุดร้อยละ 12.59 หนอนวัยที่ 4 มีประสิทธิภาพในการทำลายไข่ไรได้มากที่สุด 186 ฟอง (เฉลี่ย 89.35 ฟองต่อวัน) *S. pauperculus* เป็นศัตรูธรรมชาติที่สำคัญของไรแมงมุม ไข่มีสีขาวยาว ลักษณะทรงกระบอกวางเป็นกลุ่มได้ใบพืช ระยะหนอนมีสีเทาหรือน้ำตาล หนอนวัยที่ 1 กินเฉพาะไข่และตัวอ่อนไร ดักแด้มี

สีดำลักษณะแบนพัฒนาการจากไข่ถึงตัวเต็มวัยประมาณ 2 เดือน (Irshad, 2001) ส่วน *S. siphonulus* มีชื่อเดิมว่า *Stethorus vagans* Blackburn (Bishop museum, 2002) ไข่มีลักษณะทรงกระบอก หัวท้ายมน ผิวเรียบไข่เพิ่งฟักใหม่ๆ มีสีขาวยาว และจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองในเวลาต่อมา มีขนาด  $0.36 \times 0.19$  มิลลิเมตรวางไข่ได้ใบพืชในแนวนอน ไข่วางเป็นฟองเดี่ยวและก่อนฟักจะปรากฏตาสีแดง 2 อัน ระยะหนอนมี 4 วัย หนอนเพิ่งฟักใหม่ๆ มีสีขาวยาวและเปลี่ยนเป็นสีเหลืองครีมในเวลาต่อมา ดักแด้มีลักษณะแบนและมีสีดำ มีขนปกคลุม (Ullah, 2000) ขณะที่นุชริย์ชโยพิทักษ์ (2517) รายงานว่า *S. vegans* ไข่วางใหม่ๆ มีสีแดงคล้ายทับทิม ต่อมาจะมี reticulatrin chorion ซึ่งมีลักษณะคล้ายร่างแหเกิดขึ้นบนเปลือกไข่

การศึกษารั้วนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทราบลักษณะสัณฐานวิทยาของด้วงเต่าห้ำไรทั้ง 2 ชนิด คือ ด้วงเต่า *S. pauperculus* และ ด้วงเต่า *S. siphonulus* เพื่อจะเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการจำแนกด้วงเต่าห้ำไร

## อุปกรณ์และวิธีการ

การเลี้ยงด้วงเต่าห้ำไร นำด้วงเต่าห้ำไรทั้ง 2 ชนิด ทุกระยะที่สำรวจพบจากแปลงปลูกพืชที่พบการระบาดของไรศัตรูพืช เช่น มะละกอ หม่อน และมันสำปะหลัง มาเลี้ยงด้วยไรสองจุดในห้องปฏิบัติการควบคุมศัตรูพืชโดยชีววิธีแห่งชาติ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน ที่อุบลภูมิ 27-28 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70-75% โดยเลี้ยงด้วงเต่าบนใบหม่อนที่มีไรสองจุด วางใบหม่อนบนกระดาษทิชชูชุบน้ำหมาด ๆ เปลี่ยนไรทุกวัน

การศึกษาสัณฐานวิทยาของด้วงเต่าห้ำไรทั้ง 2 ชนิด โดยนำไข่ด้วงเต่าห้ำไร 1 ฟอง วางบนกระดาษซับ เมื่อไข่ฟักเป็นตัวหนอน จึงนำตัวหนอนวัย 1 มาเลี้ยงบนใบหม่อนที่มีไรสองจุดในกล่องเลี้ยงขนาด 6x6 เซนติเมตร ฝากล่องเจาะรูและปิดด้วยมุ้งตาข่ายเพื่อการระบายอากาศ บันทึก การเปลี่ยนแปลงของรูปร่างลักษณะต่างๆ วัดขนาดตั้งแต่ระยะไข่จนถึงตัว

เต็มวัยภายใต้กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ บันทึกระยะเวลาการเจริญเติบโตของด้วงเต่าตั้งแต่ระยะไข่ตัวหนอนคืบคืบ จนถึงตัวเต็มวัย ทดลองจำนวน 20 ซ้ำ

## ผลการศึกษา

### 1. ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของด้วงเต่าหัวไร

ตัวเต็มวัยของด้วงเต่าหัวไรทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาบางลักษณะใกล้เคียงกันมากยากที่จะสังเกตด้วยตาเปล่าได้ บางครั้งจึงจำเป็นต้องใช้ลักษณะภายนอกจากกระดิ่งอื่นๆ ประกอบการพิจารณาด้วย ผลจากการศึกษาด้วงเต่าหัวไร *S. pauperculus* และ *S. siphonulus* แต่ละระยะมีรูปร่างลักษณะแตกต่างกันดังนี้ (รูปที่ 1-3 และตารางที่ 1-3)

#### 1.1 ระยะไข่

ไข่ของด้วงเต่าหัวไร ที่วางใหม่ๆ พบว่าเปลือกไข่บาง ไข่ของ *S. pauperculus* มีสีเหลืองใส มีความกว้าง  $0.15 \pm 0.01$  มิลลิเมตร ยาว  $0.28 \pm 0.01$  มิลลิเมตร (รูปที่ 1 ก) ส่วนไข่ของ *S. siphonulus* มีสีแสดอมชมพู มีความกว้าง  $0.15 \pm 0.01$  มิลลิเมตร ยาว  $0.27 \pm 0.02$  มิลลิเมตร (รูปที่ 1 ข) เมื่อใช้ฟู่กันเขี่ยไข่จะแตกได้ง่าย จึงไม่ควรเคลื่อนย้ายไข่ในระยะนี้ ระยะนี้ใช้เวลา 1 วัน ต่อมาเปลือกไข่หนาขึ้นเมื่อใช้ฟู่กันเขี่ยไข่จะไม่แตก สีไข่ของ *S. pauperculus* มีสีเหลืองเข้มขึ้น ไข่มีจุดสีแสด 2 จุดบนส่วนปลายไข่ ไข่ของ *S. siphonulus* มีสีแสดอมส้มเปลือกไข่มีลักษณะเป็นร่างแห ระยะนี้ใช้เวลา 1-2 วัน ต่อมาไข่มีจุดสีดำ 2 จุดบนส่วนปลายไข่ ระยะนี้ใช้เวลา 1-2 วัน ไข่วางแยกกันเป็นฟองเดี่ยวๆ กระจายบนใบพืช โดยตัวเต็มวัยมักวางไข่ด้านใต้ใบทั้ง 2 ชนิด แต่ *S. siphonulus* พบวางไข่บนใบพืชด้วย

#### 1.2 ระยะหนอน

ระยะหนอนเป็นแบบ campodeiform ด้วงเต่าหัวไร *S. pauperculus* มีลำตัวสีเหลืองอ่อนปนน้ำตาล สีลำตัวค่อนข้างใส เห็นอวัยวะภายในค่อนข้างชัดเจน

โดยเฉพาะระบบทางเดินอาหาร ระยะหนอนของ *S. siphonulus* มีลักษณะแบน มีสีเทาถึงน้ำตาลปนเหลือง มองเห็นอวัยวะภายในไม่ชัดเจน ตัวหนอนของด้วงทั้ง 2 ชนิดลำตัวมี 13 ปล้อง ปล้องท้อง 10 ปล้อง ปล้องที่ 10 มีขนาดเล็กลักษณะคล้ายขาเทียม ซึ่งใช้ยึดเกาะได้ดี ซ่อนอยู่ในปล้องที่ 9 บริเวณด้านหลังและด้านข้างลำตัวมีเส้นขน สีดำยื่นออกมา เส้นขนเหล่านี้มีลักษณะเรียวเล็กตอนปลาย ส่วนหัวและปล้องอกที่ 1-3 มีปุ่มขนน้อยกว่าปล้องท้องที่ 1-8 ซึ่งมีเส้นขนเรียงกันเป็นแถว ส่วนปล้องท้องที่ 9-10 มีเส้นขนเล็กน้อย ระยะหนอนของทั้ง 2 ชนิด มี 4 ระยะหนอนกินเหยื่อโดยการกัดเปลือกไข่หรือผนังลำตัวไรให้ขาดออกแล้วดูดกินของเหลวภายในไข่เข้าสู่ลำตัว และพ่นของเหลวบางส่วนกลับออกสู่ไข่หรือลำตัวไรเช่นเดิมทำต่อเนื่องจนกระทั่งของเหลวภายในไข่ไรหมด ตัวหนอนแต่ละวัยมีลักษณะแตกต่างดังนี้

หนอนวัยที่ 1 ตัวหนอนของ *S. pauperculus* มีลำตัวสีเหลืองอ่อนและขาสีขาว สามารถมองเห็นอวัยวะภายในเป็นแถบสีส้มอ่อน เมื่อตัวหนอนกินอาหารสามารถมองเห็นการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของอาหารและสีของอวัยวะภายในจะมีสีส้มเข้มขึ้น ด้านหลังและด้านข้างลำตัวมีเส้นขนสีดำเรียงตัวกันเป็นระเบียบ มีความกว้าง  $0.14 \pm 0.01$  มิลลิเมตร ยาว  $0.46 \pm 0.04$  มิลลิเมตร ความกว้างของหัวกะโหลก  $0.12 \pm 0.00$  มิลลิเมตร ส่วนตัวหนอนของ *S. siphonulus* มีลำตัวและขาสีเทาหรือน้ำตาล ลำตัวแบน มีความกว้าง  $0.17 \pm 0.02$  มิลลิเมตร ยาว  $0.44 \pm 0.05$  มิลลิเมตร ความกว้างของหัวกะโหลก  $0.12 \pm 0.00$  มิลลิเมตร เส้นขนบริเวณด้านหลังและด้านข้างสีขาวมีความยาวกว่าเส้นขนของ *S. pauperculus*

หนอนวัยที่ 2 ตัวหนอนของ *S. pauperculus* ลำตัวสีเหลืองเข้มขึ้นเล็กน้อย สามารถมองเห็นอวัยวะภายใน ซึ่งทางเดินอาหารจะมีสีน้ำตาลปนดำ เส้นขนบริเวณด้านหลังและด้านข้างชัดเจนมากกว่าเดิม มีความกว้าง  $0.20 \pm 0.02$  มิลลิเมตร ยาว  $0.54 \pm 0.08$  มิลลิเมตร ความกว้างของหัวกะโหลก  $0.14 \pm 0.01$

มิลลิเมตร ตัวหนอนของ *S. siphonulus* มีลำตัวสีน้ำตาลเข้ม เส้นขนบริเวณด้านหลังและด้านข้างเริ่มมีสีดำมีความยาวและจำนวนเส้นขนมากกว่าเส้นขนของ *S. pauperculus* มีความกว้าง  $0.29 \pm 0.03$  มิลลิเมตร ยาว  $0.84 \pm 0.09$  มิลลิเมตร ความกว้างของหัวกะโหลก  $0.16 \pm 0.01$  มิลลิเมตร

**หนอนวัยที่ 3** ตัวหนอนทั้ง 2 ชนิดมีสีของลำตัวและอวัยวะภายในมีสีเข้มขึ้นกว่าหนอนวัยที่ 2 เส้นขนบริเวณด้านหลังและด้านข้างชัดเจนมากกว่าเดิม ตัวหนอนของ *S. pauperculus* มีความกว้าง  $0.27 \pm 0.03$  มิลลิเมตร ยาว  $1.07 \pm 0.10$  มิลลิเมตร ความกว้างของหัวกะโหลก  $0.16 \pm 0.00$  มิลลิเมตร โดยตัวหนอนของ *S. siphonulus* ฐานขนชัดเจนขึ้นกว่าเดิม มีความกว้าง  $0.39 \pm 0.07$  มิลลิเมตร ยาว  $1.15 \pm 0.12$  มิลลิเมตร ความกว้างของหัวกะโหลก  $0.19 \pm 0.01$  มิลลิเมตร การเคลื่อนที่รวดเร็วกว่าหนอนวัยที่ 1 และ 2 โดยจะเคลื่อนที่เกือบตลอดเวลา

**หนอนวัยที่ 4** ตัวหนอนของ *S. pauperculus* ลำตัวมีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าเดิมมาก และไม่เรียวยาวเหมือนตัวหนอนวัยที่ 1-3 สีของส่วนหัวและลำตัวเข้มขึ้นกว่าเดิมเป็นสีเหลืองอ่อนทึบ จนไม่สามารถมองเห็นอวัยวะภายในได้มีความกว้าง  $0.39 \pm 0.04$  มิลลิเมตร ยาว  $1.55 \pm 0.17$  มิลลิเมตร ความกว้างของหัวกะโหลก  $0.20 \pm 0.00$  มิลลิเมตร (รูปที่ 1 ค) ส่วนตัวหนอนของ *S. siphonulus* มีลำตัวสีน้ำตาลปนเหลือง เห็นแผ่นแข็งบริเวณส่วนอกชัดเจน มีความกว้าง  $0.54 \pm 0.06$  มิลลิเมตร ยาว  $1.48 \pm 0.14$  มิลลิเมตร ความกว้างของหัวกะโหลก  $0.24 \pm 0.00$  มิลลิเมตร (รูปที่ 1 ง) ตัวหนอนในระยะนี้เคลื่อนที่รวดเร็วกว่าทุกวัย เมื่อเข้าดักแด้จะหยุดนิ่งไม่กินอาหาร และใช้ส่วนท้องปล้องสุดท้ายยึดติดกับใบพืช

### 1.3 ระยะดักแด้

ดักแด้ของด้วงทั้ง 2 ชนิด เป็นแบบ exarate มีลักษณะส่วนหัวกลมป้าน ส่วนปลายเรียวยาวเล็ก การลอกคราบจากหนอนวัยที่ 4 เข้าสู่ระยะดักแด้ขึ้น

คราบกระจุยอยู่บริเวณตรงปลายด้านล่างของดักแด้ โดยที่คราบไม่หลุดจากดักแด้ เมื่อเข้าดักแด้ใหม่ๆ มีสีเหลืองนวล ผนังของดักแด้ค่อนข้างนุ่ม เมื่อผ่านไปสักครู่ดักแด้เปลี่ยนเป็นสีดำ ผนังของดักแด้แข็งกว่าเดิม บริเวณผนังของดักแด้มีเส้นขนสีดำกระจายอยู่ทั่วไป ซึ่งดักแด้ของ *S. pauperculus* มีความกว้าง  $0.61 \pm 0.24$  มิลลิเมตร ยาว  $0.92 \pm 0.04$  มิลลิเมตร เส้นขนบริเวณผนังดักแด้สั้นกว่าของ *S. siphonulus* และส่วนปลายของเส้นขนมีลักษณะคล้ายหยดน้ำเกาะอยู่ (รูปที่ 1 จ) ดักแด้ของ *S. siphonulus* มีความกว้าง  $0.80 \pm 0.04$  มิลลิเมตร ยาว  $1.14 \pm 0.05$  มิลลิเมตร เส้นขนบริเวณผนังดักแด้ยาวและเรียวยาวเล็กน้อยปลาย (รูปที่ 1 ฉ)

### 1.4 ตัวเต็มวัย

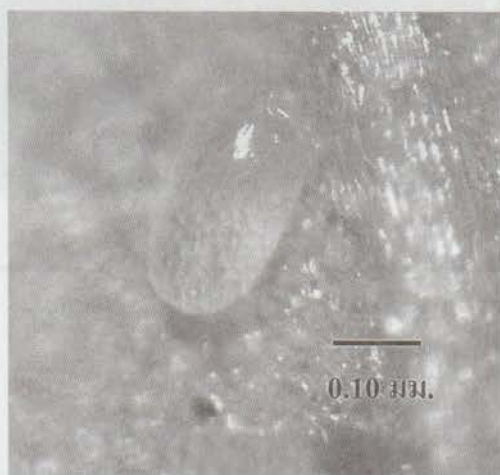
ตัวเต็มวัยของด้วงทั้ง 2 ชนิด คล้ายคลึงกันมาก โดยทั้ง 2 ชนิดมีลำตัวรูปไข่ ด้านหลังลำตัวโค้งนูน มีขนกระจายอยู่ทั่วลำตัว ด้านล่างลำตัวแบนราบ ส่วนหัวซ่อนอยู่ใต้อกปล้องแรก หนวดแบบกระบองมี 11 ปล้อง ปล้องที่ 1 และ 2 ค่อนข้างใหญ่และยาวกว่าปล้องอื่น เพศผู้มีปล้องท้อง 10 ปล้องเห็นชัดเจนเพียง 6 ปล้อง เพศผู้มี 6 ปล้อง tarsi 4-4-4 แต่เนื่องจาก tarsi ปล้องที่ 3 มีขนาดเล็กมาก จึงเห็นชัดเจนเพียง 3 ปล้อง ตัวเต็มวัยของ *S. pauperculus* มีความกว้าง  $0.58 \pm 0.02$  มิลลิเมตร ยาว  $0.86 \pm 0.04$  มิลลิเมตร (รูปที่ 2 ก) ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าตัวเต็มวัยของ *S. siphonulus* ที่มีความกว้าง  $0.84 \pm 0.04$  มิลลิเมตร ยาว  $1.14 \pm 0.05$  มิลลิเมตร (รูปที่ 2 ข)

### 1.5 อวัยวะสืบพันธุ์เพศผู้

อวัยวะสืบพันธุ์เพศผู้ของ *S. pauperculus* มีส่วนของ siphon อ้วนสั้น ความยาวใกล้เคียงกับส่วนของ tegmen แผ่นกลางของ tegmen กว้างเล็กน้อย และตอนปลายค่อยๆ แคบลง แผ่นด้านข้างของ tegmen สั้นกว่าแผ่นกลาง มีลักษณะค่อนข้างเรียวยาวและแคบตรงช่วงปลาย (รูปที่ 3 ก) ส่วนอวัยวะ

สืบพันธุ์เพศผู้ของ *S. siphonulus* มีส่วนของ siphon โค้งและเรียวยาว ส่วนปลายเรียวแหลม แผ่นกลางของ tegmen ยาวรี และค่อนข้างโค้งงอ แผ่นด้านข้าง

ของ tegmen สั้นกว่าแผ่นกลางและมีขนาด แคบมาก (รูปที่ 3 ข)



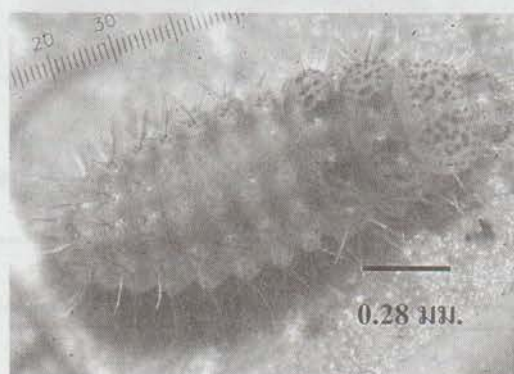
ก



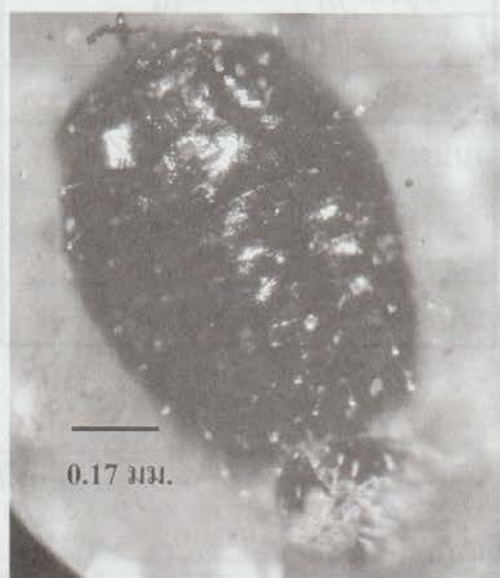
ข



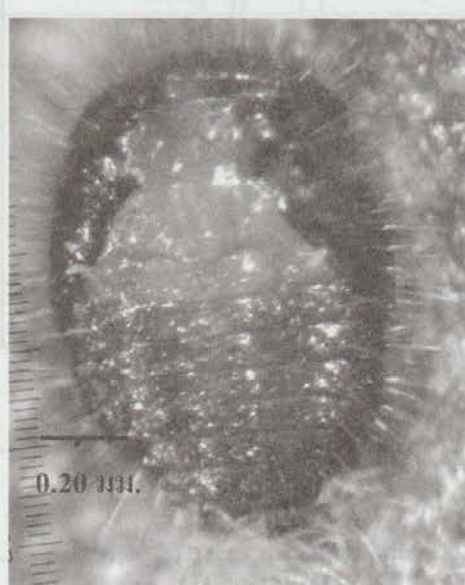
ค



ง

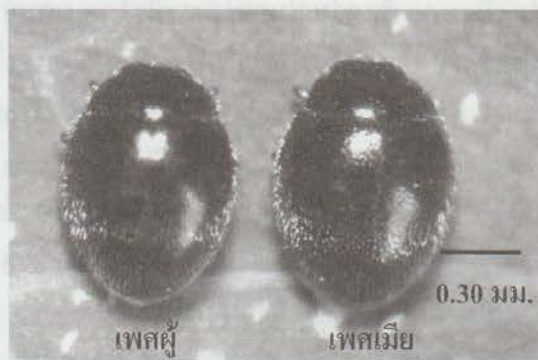


จ

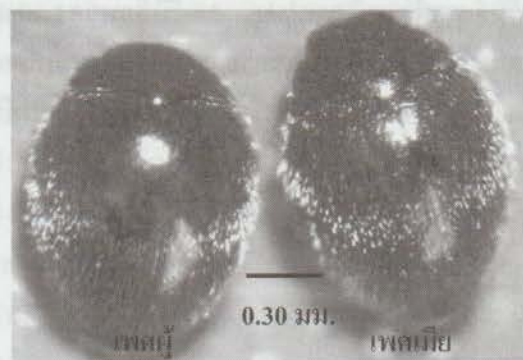


ฉ

รูปที่ 1 ระยะไข่ ตัวหนอน และดักแด้ของด้วงเต่าหัวไร *S. pauperculus* (ก, ค, จ) และ *S. siphonulus* (ข, ง, ฉ)

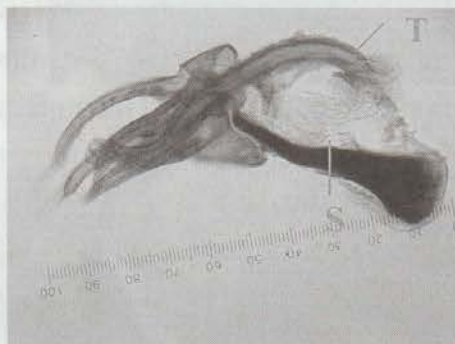


ก

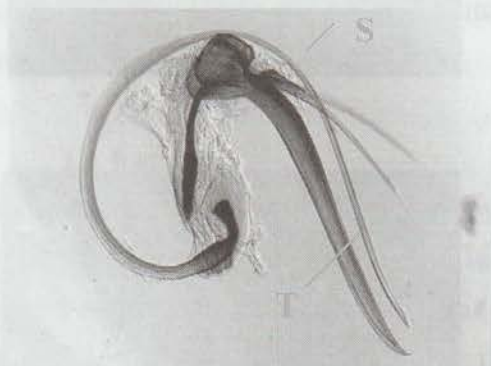


ข

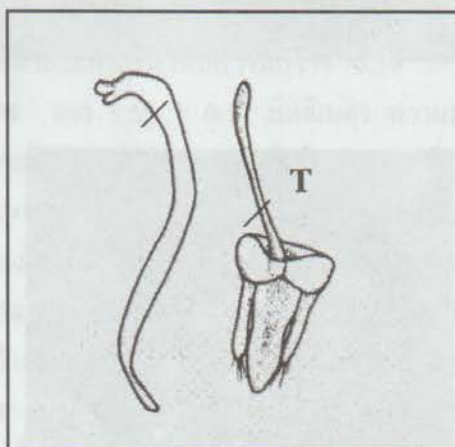
รูปที่ 2 ระยะตัวเต็มวัยเพศผู้ และเพศเมียของด้วงเต่าหัวไร *S. pauperculus* (ก) และ *S. siphonulus* (ข)



ก

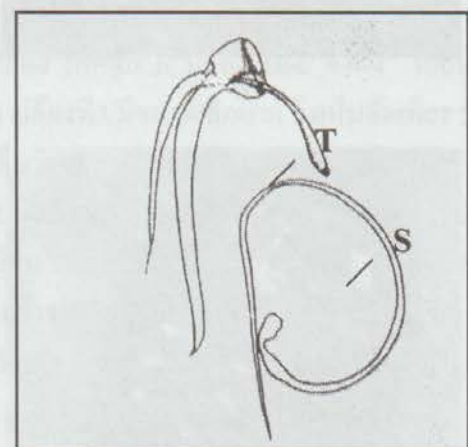


ข



ค

(สมหมาย ชื่นราม, 2545)



ง

(สมหมาย ชื่นราม, 2545)

รูปที่ 3 อวัยวะสืบพันธุ์เพศผู้ ของ *S. pauperculus* (ก, ค) *S. siphonulus* (ข, ง )

S = Siphon, T = Tegmen

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาระยะไข่ ตัวหนอน และดักแด้ของด้วงเต่าห้าไรทั้ง 2 ชนิด

| ระยะ            | ลักษณะ     | <i>S. pauperculus</i>                     | <i>S. siphonulus</i>             |
|-----------------|------------|-------------------------------------------|----------------------------------|
| ไข่             | รูปร่าง    | รูปไข่ ยาวรี                              | รูปไข่ ยาวรี                     |
| ไข่อายุ 1 วัน   | สี         | เหลืองอ่อนและใส                           | แดง                              |
| ไข่อายุ 2-3 วัน | สี         | เหลืองเข้มขึ้น มีจุดสีแดง 2 จุดที่ปลายไข่ | แดงส้ม มีจุดสีดำ 2 จุดที่ปลายไข่ |
| การวางไข่       | เปลือกไข่  | เรียบ                                     | ร่างแห                           |
|                 | ตำแหน่ง    | แนวนอน ใต้ใบพืช                           | แนวนอน บนใบพืชหรือใต้ใบพืช       |
|                 | จำนวน      | เดี่ยว                                    | เดี่ยวหรือกลุ่ม                  |
| หนอน            | รูปร่าง    | กลมรี                                     | แบน                              |
|                 | สี         | เหลืองปนน้ำตาล                            | น้ำตาลปนเหลือง                   |
|                 | เส้นขน     | ด้านบนและด้านข้างลำตัว                    | ด้านบนและด้านข้างลำตัว           |
|                 | ปล้องท้อง  | 10                                        | 10                               |
| ดักแด้          | สี         | ดำ                                        | น้ำตาลถึงดำ                      |
|                 | เส้นขน     | ตอนปลายคล้ายหยดน้ำ                        | ตอนปลายเรียวแหลม                 |
|                 | ขนาดเส้นขน | สั้น ความยาว 0.06 - 0.1 มม.               | ยาว ความยาว 0.12 - 0.2 มม.       |

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาระยะตัวเต็มวัยของด้วงเต่าห้าไรทั้ง 2 ชนิด

| ส่วนต่างๆ             | ลักษณะ   | <i>S. pauperculus</i>        | <i>S. siphonulus</i>   |
|-----------------------|----------|------------------------------|------------------------|
| ลำตัว                 | รูปร่าง  | รูปไข่                       | รูปไข่                 |
|                       | สี       | ดำ                           | ดำ                     |
|                       | สันหลัง  | โค้งนูน                      | โค้งนูน                |
| หัว                   | สี       | ดำ                           | ดำ                     |
| ปาก                   | สี       | เหลืองปนน้ำตาล               | น้ำตาลปนเหลือง         |
| หนวด                  | สี       | เหลืองปนน้ำตาล               | น้ำตาลปนเหลือง         |
|                       | ปล้อง    | 11                           | 11                     |
|                       | ลักษณะ   | กระบอง                       | กระบอง                 |
| Tibia                 | สี       | น้ำตาลปนเหลือง               | น้ำตาลอ่อน             |
| Tarsi                 | formular | 4-4-4                        | 4-4-4                  |
|                       | เห็นชัด  | 3-3-3                        | 3-3-3                  |
| ปล้องท้องเพศเมีย      | ปล้อง    | 10                           | 6                      |
|                       | เห็นชัด  | 6                            | 6                      |
| ปล้องท้องเพศผู้       | ปล้อง    | 6                            | 6                      |
| อวัยวะสืบพันธุ์เพศผู้ | sipho    | ค่อนข้างอ้วน และสั้น         | โค้งและเรียวยาวตอนปลาย |
|                       | tegmen   | แผ่นกลางสั้นกว่าแผ่นด้านข้าง | แผ่นกลางยาว และเรียว   |

ตารางที่ 3 ขนาดความกว้าง และความยาวของลำตัวด้วงเต่าหัวไร *S. pauperculus* และ *S. siphonulus* แต่ละระยะการเจริญเติบโต

| ระยะ         | <i>S. pauperculus</i> |             |                  | <i>S. siphonulus</i> |             |                  |
|--------------|-----------------------|-------------|------------------|----------------------|-------------|------------------|
|              | ความยาว               | ความกว้าง   | ความกว้าง        | ความยาว              | ความกว้าง   | ความกว้าง        |
|              | ± SD                  | ± SD        | หัวกะโหลก        | ± SD                 | ± SD        | หัวกะโหลก        |
|              | (มิลลิเมตร)           | (มิลลิเมตร) | ? SD (มิลลิเมตร) | (มิลลิเมตร)          | (มิลลิเมตร) | ± SD (มิลลิเมตร) |
| ไข่          | 0.28 ± 0.01           | 0.15 ± 0.01 | -                | 0.27 ± 0.02          | 0.15 ± 0.01 | -                |
| หนอน         |                       |             |                  |                      |             |                  |
| หนอนวัยที่ 1 | 0.46 ± 0.04           | 0.14 ± 0.01 | 0.12 ± 0.00      | 0.44 ± 0.05          | 0.17 ± 0.02 | 0.12 ± 0.00      |
| หนอนวัยที่ 2 | 0.84 ± 0.08           | 0.20 ± 0.02 | 0.14 ± 0.00      | 0.84 ± 0.09          | 0.29 ± 0.03 | 0.16 ± 0.01      |
| หนอนวัยที่ 3 | 1.07 ± 0.10           | 0.27 ± 0.03 | 0.16 ± 0.00      | 1.15 ± 0.12          | 0.39 ± 0.07 | 0.19 ± 0.01      |
| หนอนวัยที่ 4 | 1.55 ± 0.17           | 0.39 ± 0.04 | 0.20 ± 0.00      | 1.48 ± 0.14          | 0.54 ± 0.06 | 0.24 ± 0.00      |
| ดักแด้       | 0.92 ± 0.04           | 0.61 ± 0.24 | -                | 1.14 ± 0.05          | 0.80 ± 0.04 | -                |
| ตัวเต็มวัย   | 0.86 ± 0.04           | 0.58 ± 0.02 | -                | 1.14 ± 0.05          | 0.84 ± 0.04 | -                |

### สรุปและวิจารณ์ผลการศึกษา

ด้วงเต่าหัวไรทั้ง 2 ชนิดมีรูปร่างลักษณะทางสัณฐานวิทยา และขนาดใกล้เคียงกัน โดย *S. siphonulus* มีขนาดใหญ่กว่าเล็กน้อย แต่ด้วงเต่าหัวไรทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะบางอย่างที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถเป็นข้อมูลสำหรับจำแนกชนิดของด้วงเต่าหัวไรได้ คือไข่ของ *S. pauperculus* มีสีเหลืองใส เปลือกไข่บางเรียบ สอดคล้องกับนุสรีย์ โชยพิทักษ์ (2526) ที่พบว่าไข่ ของ *S. pauperculus* มีสีเหลืองใส แต่แตกต่างจาก Irshad (2001) ที่รายงานไข่ ของ *S. pauperculus* มีสีขาว ส่วนไข่ของ *S. siphonulus* มีสีแดงส้ม เปลือกไข่มีลักษณะเป็นร่างแห สอดคล้องกับ นัตรชัย ศฤงฆไพบุลย์ (2517) แต่ Ullah (2000) พบว่าไข่ของ *S. siphonulus* (*S. vegans*) มีสีขาวถึงเหลือง ตัวหนอนของ *S. pauperculus* มีลำตัวสีเหลืองอ่อนปนน้ำตาล สีลำตัวค่อนข้างใส เห็นอวัยวะภายในค่อนข้างชัดเจน ตัวหนอนของ *S. siphonulus* มีลักษณะแบน สีน้ำตาลปนเหลือง มองเห็นอวัยวะภายในไม่ชัดเจน มีขนาดใหญ่กว่าตัวหนอนของ *S. pauperculus* เล็กน้อย

ระยะดักแด้ส่วนหัวกลมป้าน ส่วนปลายเรียวเล็ก บริเวณผนังของดักแด้มีเส้นขนสีน้ำตาลถึงดำกระจายอยู่ทั่วไป ซึ่งดักแด้ของ *S. pauperculus* มีลักษณะเส้นขนบริเวณผนังดักแด้สั้นกว่าของ *S. siphonulus* และส่วนปลายของเส้นจะมีลักษณะคล้ายหยดน้ำเกาะอยู่ ส่วนดักแด้ของ *S. siphonulus* มี เส้นขนบริเวณผนังดักแด้ยาวและเรียวเล็กตอนปลาย ตัวเต็มวัยของด้วงทั้ง 2 ชนิด คล้ายคลึงกันมาก โดยทั้ง 2 ชนิดมีลำตัวรูปไข่ สีดำ ลำตัวด้านหลังโค้งนูน มีขนกระจายอยู่ทั่วตัว จึงต้องแยกความแตกต่างโดยใช้ลักษณะของอวัยวะเพศผู้ (male genitalia) โดยอวัยวะสืบพันธุ์เพศผู้ของ *S. pauperculus* มีส่วนของ siphon ก่อนข้างอ้วน และสั้นกว่าของ *S. siphonulus* แผ่นกลางของ tegmen ยาวกว่าแผ่นด้านข้าง ส่วนอวัยวะสืบพันธุ์เพศผู้ของ *S. siphonulus* มีส่วนของ siphon โค้งและยาวเรียวแหลมตอนปลาย แผ่นกลางของ tegmen เรียวยาวและค่อนข้างโค้งงอ

## เอกสารอ้างอิง

ฉัตรชัย ศฤงฆไพบูลย์. 2517. การศึกษาเกี่ยวกับชีววิทยาและประสิทธิภาพในการทำลายของแมลงตัวห้ำปีกแข็ง *Stethorus vegans* Blackburn ที่มีต่อไรแดง *Tetranychus cinnabarinus* Boisduval. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชากีฏวิทยา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นุชรีย์ ชโยพิทักษ์. 2526. การศึกษาชีววิทยา, ประสิทธิภาพในการทำลายของด้วงตัวห้ำ (*Stethorus pauperculus* (Weise)) ต่อไรแดง (*Tetranychus hydrangeae* Prithchard and Baker) และผลของยาปราบศัตรูพืชบางชนิดต่อด้วงตัวห้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชากีฏวิทยา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มานิตา คงชื่นสิน, วัฒนา จารณศรี, เทวินทร์ กุลปิยะวัฒน์, โอชา ประจวบเหมาะ, พุทธวรรณ ชันตันธง. 2539. การใช้ไรตัวห้ำ, *Amblyseius longispinosus* (Evans) ควบคุมไรสองจุด ศัตรูสำคัญของสตรอเบอรี่. วารสารวิชาการ เกษตร. 14(3) : 157-183

วัฒนา จารณศรี มานิตา คงชื่นสิน เทวินทร์ กุลปิยะวัฒน์ และพิเชฐ เขาวนวัฒนาวงศ์. 2544. เอกสารวิชาการไรศัตรูพืชและการป้องกันกำจัด. กลุ่มงานวิจัยไรและแมงมุม กองกีฏและสัตววิทยา กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

สมหมาย ชื่นราม. 2545. ด้วงเต่าในประเทศไทย. กลุ่มงานอนุกรมวิธานแมลง กองกีฏและสัตววิทยา กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ. 211 หน้า.

อังศุมาลย์ จันทราปัดย์. 2535. เทคนิคการขยายพันธุ์ไรตัวห้ำ (Acarina: Phytoseiidae) ให้มีปริมาณมากเพื่อใช้กำจัดไรแดงศัตรูพืช (Acarina: Tetranychidae). ภาควิชากีฏวิทยา คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Bishop museum. 2002. Arthropod Checklist Query Results. Cite 14 June 2007. Available from: URL: [http:// www2. bishopmuseum.org/HBS/checklist/species.asp](http://www2.bishopmuseum.org/HBS/checklist/species.asp)

Irshad, M. 2001. Distribution, Hosts, Ecology and Biotic Potential of CoccinellidS of Pakistan. Pakistan Journal of Biological Sciences. 4(10): 1259-1263

Ragkou, V.S., Athanassiou, C.G., Kavalieratos, N.G. and Tomanovic, Z. 2004. Daily consumption and predation Rate of Different *Stethorus punctillum* Instars Feeding on *Tetranychus urticae*. Phytoparasitica. 32(2) : 154-159

Ullah, I. 2000. Aspects of the biology of the ladybird Beetal *Stethorus vagans* (Blackburn) (Coleoptera: Coccinellidae). Cite 1 June 2006. Available from: URL: [http:// library.uws.edu.au/adt-NUWS/public/adt-NUWS 20031103132342/index](http://library.uws.edu.au/adt-NUWS/public/adt-NUWS 20031103132342/index)



## การออกดอกของกล้วยไม้หวายเหลืองจันทบูร (*Dendrobium friedericksianum* Rchb. f) ในหลอดทดลอง

สมพร ประเสริฐส่งสกุล<sup>1</sup> และวิฑูล ไชยภักดี<sup>1</sup>

### บทคัดย่อ

นำต้นกล้วยไม้หวายเหลืองจันทบูรที่ได้จากการเพาะเมล็ด เลี้ยงในอาหารสูตร Vacin and Went (1949) เป็นเวลา 1 ปี ก่อนที่จะนำมาทดลอง เมื่อตัดรากออกนำต้นกล้วยไม้ไปวางเลี้ยงในอาหารสูตร VW ที่เติมน้ำมะพร้าว และอาหารสูตร Murashige and Skoog (MS) ที่มีความเข้มข้นของเบนซิลอะดีนีน (BA) ที่ระดับ 2 5 10 และ 20 มก./ล. สามารถเกิดดอกได้ 3.3-23.3 เปอร์เซ็นต์ในช่วง 40-80 วัน ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการเกิดดอกในต้นกล้วยไม้หวายเหลืองจันทบูรขึ้นกับอาหารเสริมและความเข้มข้นของ BA

### Abstract

Seedlings of *Dendrobium friedericksianum* Rchb. F, obtained from germination of seeds, were culture on Vacin and Went (1949) medium for 1 year before further experiment. Then, the resulting plants without roots were transferred to VW medium containing coconut water and Murashige and Skoog (MS) medium supplemented with 2, 5, 10 and 20 mg/L benzyladenine (BA). After 40-80 days, the flowers were observed in 3.3-23.3%. The results showed that the growth supplement and the concentration of BA influenced on flower formation.

### บทนำ

กล้วยไม้เหลืองจันทบูร (*Dendrobium friedericksianum* Rchb.f) เป็นกล้วยไม้พื้นเมืองที่พบเฉพาะในประเทศไทยเท่านั้น อยู่ในวงศ์ Orchidaceae เป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญของไทยมีดอกและสีอันสวยงาม เป็นไม้ตัดดอกที่นิยมกันมาก มีเขตการกระจายพันธุ์อยู่ในป่าดิบทางภาคตะวันออกบริเวณจังหวัดจันทบุรี และตราด (ขวลิต คานแก้ว, 2542) ลักษณะทั่วไปของกล้วยไม้เหลือง จันทบูร จะมีระบบ

รากเป็นรากกิ่งอากาศ ลักษณะลำต้นเป็นลำลูกกล้วย เป็นแท่งโคนเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางต้น 1-1.5 เซนติเมตร ผิวเปลือกแห้งเป็นสันและมีร่องตามยาว ใบเป็นรูปหอกยาวประมาณ 8-10 เซนติเมตร กว้างประมาณ 2-2.5 เซนติเมตร แผ่นใบค่อนข้างบางเหนียว ใบออกสองข้างตาม ลำต้นโดยเรียงสลับเกือบตลอดทั้งต้น ช่อดอกจะเกิดใกล้ปลายต้น ออกดอกในช่วงเดือนมกราคม-เมษายน ดอกจะบานประมาณ 3-4 สัปดาห์ อายุฝักที่เหมาะสมต่อการเพาะเมล็ดประมาณ 5-6 เดือน

<sup>1</sup>ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี อ.เมือง จ.ปัตตานี 94000

หลังจากได้รับการผสม ลักษณะเมล็ดภายในฝักเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีเหลือง เมล็ดค่อนข้างร่วนสามารถเขี่ยออกได้ง่าย (นงนุช เครือสนธิ, 2544) โดยปกติกล้วยไม้ป่าจะติดฝักหรือผลง่าย เมล็ดมีเพียงเอ็มบริโออยู่ในเปลือกเมล็ดบางๆ ไม่มีอาหารสะสม การงอกธรรมชาติจึงต้องอาศัยอาหารจากเชื้อราบางชนิดซึ่งอยู่บริเวณรากของต้นแม่ช่วยในการงอก ดังนั้นจึงมีการใช้เทคนิคการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อเข้ามาช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการงอกของเมล็ดกล้วยไม้ และช่วยขยายพันธุ์เพิ่มจำนวนได้อย่างรวดเร็ว เป็นการช่วยอนุรักษ์พันธุ์กล้วยไม้หายากเหลือจันทบูร สมพร ประเสริฐส่งสกุล และนัยนา ศรีชัย (2547) รายงานความสำเร็จในการขยายพันธุ์กล้วยไม้หายากเหลือจันทบูรด้วยเทคนิคการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช ในส่วนของการชักนำการออกดอกของกล้วยไม้หายากเหลือจันทบูรยังไม่มีรายงานการศึกษา ซึ่งปัจจัยที่ควบคุมการออกดอกมีหลายประการ เช่น สารควบคุมการเจริญเติบโต ชนิดของอาหาร (Simon et al., 1996) ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการชักนำให้กล้วยไม้หายากเหลือจันทบูรออกดอกในหลอดทดลอง

## อุปกรณ์และวิธีการ

### การเตรียมพืชทดลอง

นำต้นกล้วยไม้หายากเหลือจันทบูรที่ได้จากการเพาะเมล็ด วางเลี้ยงในอาหารสูตร Vacin and Went (1949) เป็นเวลา 1 ปี โดยมีการย้ายลงอาหารขวดใหม่ (subculture) ทุก ๆ 1 เดือน นำมาเลี้ยงในอาหาร Vacin and Went เป็นเวลา 3 สัปดาห์ก่อนที่จะนำไปทำการทดลอง

### วิธีการทดลอง

ผลของสารเติมแต่งและสารควบคุมการเจริญเติบโตที่มีผลต่อการออกดอกของกล้วยไม้

ย้ายต้นกล้วยไม้หายากเหลือจันทบูรลงบนอาหารสูตร Vacin and Went (VW) (ที่ไม่มีการ

เติมอาหารเสริม กับที่มีการเติมน้ำมะพร้าว 15 เปอร์เซ็นต์ และกล้วย 10 เปอร์เซ็นต์) และสูตร Murashige and Skoog (MS) โดยการแปรผันปริมาณสารควบคุมการเจริญเติบโต BA ที่ความเข้มข้น 2 5 10 และ 20 มก./ล. โดยตัดรากออกก่อนที่จะวางเลี้ยงในอาหาร สภาพการวางเลี้ยงเนื้อเยื่อภายใต้สภาพแสง 16 ชั่วโมง/วัน ความเข้มแสง 2000 lux อุณหภูมิ  $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$  จัดบันทึกลักษณะของต้นและจำนวนดอกที่เกิดขึ้น

### การบันทึกผล

บันทึกผลจำนวนดอกที่เกิดขึ้นและลักษณะของต้นกล้วยไม้หายากเหลือจันทบูร ภายหลังจากเลี้ยงเป็นเวลา 30 40 50 60 70 และ 80 วัน บันทึกจำนวนดอกเป็นเปอร์เซ็นต์

### การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) ทำการทดลอง 30 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลโดยค่าสัดส่วนและความเชื่อมั่นที่ 95% ของการเกิดดอกในแต่ละการทดลอง

### ผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของอาหารเสริม (growth supplement) และสารควบคุมการเจริญเติบโตที่มีผลต่อการออกดอกของกล้วยไม้ โดยนำต้นกล้วยไม้หายากเหลือจันทบูรเลี้ยงบนอาหารสูตร Vacin and Went ที่ไม่เติมอาหารเสริม กับที่เติมน้ำมะพร้าว และกล้วย นอกจากนี้เลี้ยงบนอาหารสูตร MS ที่แปรผันปริมาณสารควบคุมการเจริญเติบโต BA ที่ความเข้มข้น 2 5 10 และ 20 มก./ล. เป็นเวลา 80 วัน ต้นกล้วยไม้หายากเหลือจันทบูรสามารถออกดอกได้ในอาหารต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปอร์เซ็นต์การออกดอกของต้นกล้วยไม้หวายเหลืองจันทร์บูร เมื่อเพาะเลี้ยงในอาหารสูตรต่าง ๆ ในระยะเวลา 80 วัน

| สูตรอาหาร             | การตัดราก | % การเกิดดอก |        |        |        |        |        |
|-----------------------|-----------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                       |           | 30 วัน       | 40 วัน | 50 วัน | 60 วัน | 70 วัน | 80 วัน |
| VW (%)                |           |              |        |        |        |        |        |
| ไม่เติมอาหารเสริม     | -         | 0            | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| 15% น้ำมะพร้าว (v/v)  | +         | 0            | 3.3    | 3.3    | 3.3    | 3.3    | 3.3    |
| 10% กล้วย (w/v)       | +         | 0            | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| MS + BA (mg/L)        |           |              |        |        |        |        |        |
| 0 (ไม่เติมอาหารเสริม) | -         | 0            | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| 2                     | +         | 0            | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| 5                     | +         | 0            | 0      | 6.6    | 6.6    | 6.6    | 6.6    |
| 10                    | +         | 0            | 3.3    | 6.6    | 16.0   | 16.0   | 23.3   |
| 20                    | +         | 0            | 3.3    | 3.3    | 6.6    | 16.0   | 16.0   |

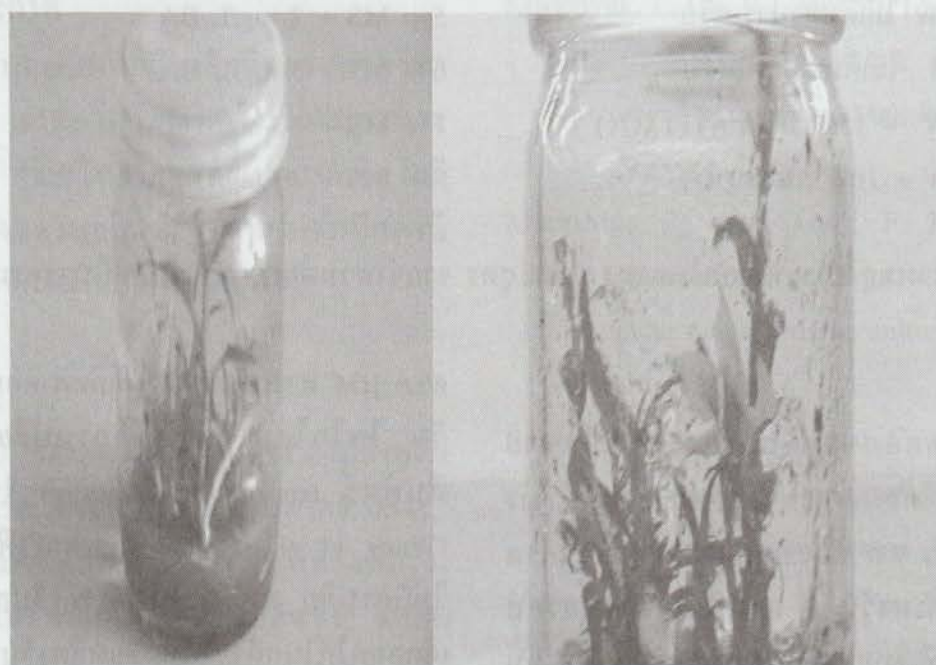
- ไม่ตัดราก  
+ ตัดราก

จากตารางที่ 1 พบว่าเมื่อนำต้นกล้วยไม้หวายเหลืองจันทร์บูรมาเลี้ยงลงในอาหารสูตรต่าง ๆ โดยการตัดรากออก สังเกตการออกดอกโดยคิดจากจำนวนต้นที่ออกดอกจากจำนวนต้นกล้วยไม้ทั้งหมด 30 ต้น นำมาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ที่เวลาต่าง ๆ กัน สูตรอาหาร VW ที่ไม่มีการเติมอาหารเสริม และ สารควบคุมการเจริญเติบโต ไม่มีการออกดอก เมื่อมีการเติมน้ำมะพร้าว จะมีการออกดอก โดยสูตรอาหาร VW ที่เติมน้ำมะพร้าวเริ่มมีการออกดอก เมื่อเลี้ยงอยู่ในอาหารเป็นเวลา 40 วัน และคงสภาพไว้ เมื่อเลี้ยง

อยู่ในอาหารเป็นเวลา 80 วัน สำหรับสูตรอาหาร MS ที่ไม่มีการเติมอาหารเสริม จะไม่มีการออกดอก ขณะที่สูตรอาหาร MS ที่เติมสารควบคุมการเจริญเติบโต BA ที่ระดับความเข้มข้นสูง ๆ จะชักนำให้มีการออกดอกมากขึ้น โดยระดับ BA ที่ความเข้มข้น 10 มก./ล. ให้จำนวนดอกมากที่สุดเมื่อเลี้ยงเป็นเวลา 50 วัน และมีการเพิ่มจำนวนดอกมากขึ้นตามลำดับ ลักษณะดอกกล้วยไม้ที่เกิดขึ้นมีสีเหลืองขนาดเล็ก (รูปที่ 1 และ 2)



รูปที่ 1 ลักษณะของการเกิดก้านชูดอก (flower stalk) ในระยะแรก เพาะเลี้ยงในอาหารสูตร MS ที่มี BA 10 มก./ล. เป็นระยะเวลา 40 วัน

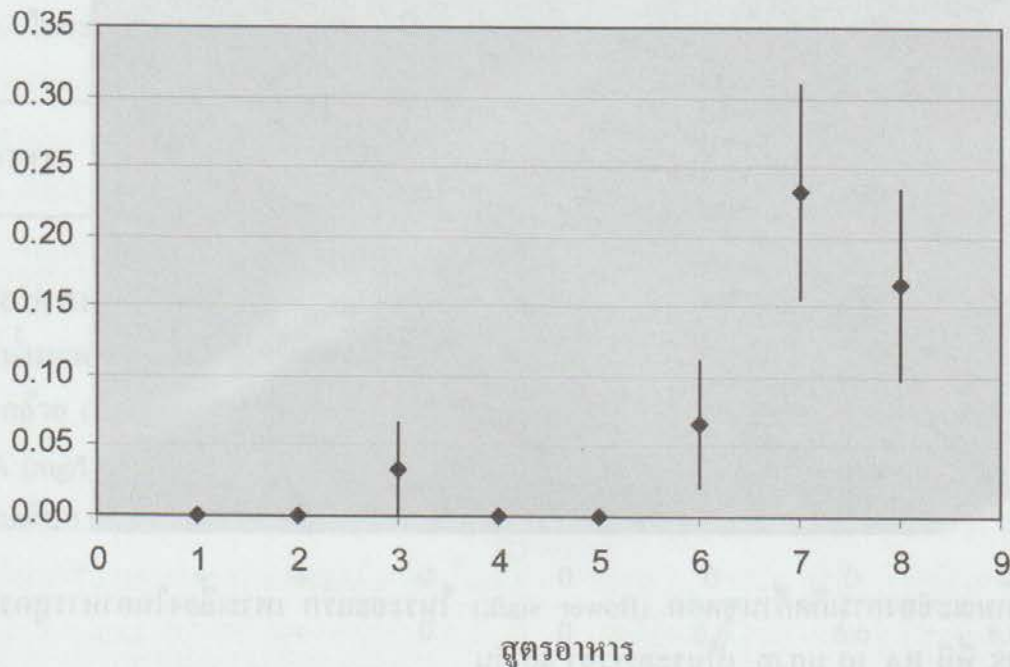


รูปที่ 2 ลักษณะของการเกิดดอกในระยะแรก เพาะเลี้ยงในอาหารสูตร MS ที่มี BA 10 มก./ล. เป็นระยะเวลา 60 วัน

เมื่อนำผลจากตารางที่ 1 มาหาค่าสัดส่วนของการเกิดดอกจากจำนวนต้นทั้งหมดในแต่ละสูตรอาหาร พบว่าอาหารสูตร VW ที่เติมน้ำมะพร้าวมีสัดส่วนการออกดอก 3.3% น้อยกว่าสูตรอาหาร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 5 10 และ 20 มก./ล. ซึ่ง

สัดส่วนการออกดอกในสูตรอาหาร MS ที่มี BA ความเข้มข้น 10 และ 20 มก./ล. ไม่แตกต่างกัน ส่วนสูตรอาหารที่มี BA ความเข้มข้น 5 มก./ล. มีสัดส่วนการออกดอกต่างจากความเข้มข้นของ BA ที่สูงขึ้น เมื่อดูจากค่าสัดส่วนและความเชื่อมั่นที่ 95% (รูปที่ 3)

สัดส่วนการออกดอก (proportion &amp; 95% CI)



หมายเหตุ สัดส่วนการออกดอก (proportion & 95 % CI; confidence interval)

1 = VW ไม่เติมอาหารเสริม

5 = MS + 2 mg/L BA

2 = MS ไม่เติมอาหารเสริม

6 = MS + 5 mg/L BA

3 = VW + 15% น้ำมะพร้าว (v/v)

7 = MS + 10 mg/L BA

4 = VW + 10% กล้วย (w/v)

8 = MS + 20 mg/L BA

รูปที่ 3 สัดส่วนของการเกิดดอกในอาหารแต่ละสูตร จากจำนวนดอกรวมทั้งหมดเป็นระยะเวลา 80 วัน

## วิจารณ์

การเกิดดอกของต้นกล้วยไม้หวายเหลืองจันทร์บุรี ที่ได้จากการเพาะเมล็ดและต้นกล้าวางเลี้ยงบนอาหารสูตร VW ที่ประกอบด้วยน้ำตาลซูโครส 20 กรัม/ลิตร และผงวุ้น 8 กรัม/ลิตร วางเลี้ยงบนอาหารสูตร VW ที่เติมอาหารเสริม และสูตร MS ที่มีสารควบคุมการเจริญเติบโต BA ระดับความเข้มข้นต่างๆ พบว่าการเกิดดอกในหลอดทดลองขึ้นอยู่กับปัจจัยของอาหารเสริม และความเข้มข้นของ BA ซึ่งสารควบคุมนี้อยู่ในกลุ่มไซโทไคนิน มีรายงานเกี่ยวกับการชักนำให้เกิดดอกในกล้วยไม้หลายฉบับ ดวงพร ไรจนวงศ์ และคณะ (2006) ศึกษาการนำต้นกล้วยไม้ฟาแลนนอปปิส 'Silky Moon' อายุ 2 เดือน ที่วางเลี้ยงบนอาหารสูตร VW มาเลี้ยงต่อบนอาหารสูตรดัดแปลง VW ที่มี BA ความเข้มข้นช่วง 22.2-

66.6  $\mu\text{M}$  สามารถชักนำให้เกิดตาออกในช่วง 60-120 วัน ไซโทไคนิน มีผลต่อการเปลี่ยนเป็นช่วงระยะสืบพันธุ์ (reproductive stage) ในหลอดทดลอง (Wang et al., 1993) จากผลการศึกษานี้พบว่าเมื่อไม่มีการเติม BA ลงในอาหาร ไม่สามารถชักนำให้เกิดดอกได้ในกล้วยไม้หวายเหลืองจันทร์บุรี เมื่อให้ BA ความเข้มข้น 5 มก./ล. สามารถชักนำให้ออกดอกได้ภายใน 50 วัน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ BA มากขึ้นพบว่าสามารถช่วยให้การออกดอกเร็วขึ้นภายใน 40 วัน และมีจำนวนดอกมากขึ้นด้วย ซึ่งจากผลการทดลองนี้ BA น่าจะมีผลต่อการกระตุ้นการออกดอกของกล้วยไม้ ซึ่งการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ Kostenyuk et al. (1999) ศึกษาการชักนำการออกดอกของกล้วยไม้ *Cymbidium niveo-marginatum* Mak ในหลอดทดลองพบว่าเมื่อให้ BA เติมลงไปในการอาหารสามารถทำให้

การเกิดดอกเพิ่มขึ้นถึง 97.5% นอกจากนี้มีการศึกษาใน *Doriella Tiny* (*Doritis pulcherrima* x *Kingiella philippinensis*) และฟาแลนนอปซิส Pink Leopard เมื่อมีสารควบคุมการเจริญเติบโตพวกไซโทไคนินจะช่วยชักนำให้เกิดดอกได้ (Duan and Yazawa, 1995) จากการทดลองเมื่อเลี้ยงกล้วยไม้หวายเหลืองจินทบูร ในอาหาร VW ที่มีการเติมอาหารเสริม ได้แก่ น้ำมะพร้าว และกล้วย พบว่าในสูตรที่มีน้ำมะพร้าว สามารถเกิดดอกได้ น้ำมะพร้าวถือว่าเป็นแหล่งของ ไซโทไคนิน การตัดรากมีผลต่อการชักนำให้เกิดดอก ถึงแม้ว่าไซโทไคนินจะมีการสร้างบริเวณรากในพืชชั้นสูง เมื่อมี BA ร่วมอยู่จึงช่วยเสริมให้มีการออกดอก

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณแผนกวิชาชีววิทยา ภาควิชาวิทยาศาสตร์ และภาควิชาเทคโนโลยีและการอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ที่ได้สนับสนุนอุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

ชลิต ดาบแก้ว. 2542. การปลูกเลี้ยงกล้วยไม้สำหรับ ผู้เริ่มแรก. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. 2541.  
เทคโนโลยีการผลิตกล้วยไม้. พิมพ์ครั้งที่ 1, อมรินทร์พริ้นติ้ง แอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด, กรุงเทพมหานคร.  
ดวงพร ไรจนวงศ, โชคพิศิษฐ์ เทพสิทธิ์า และอารีย์ ทองภักดี. 2006. การชักนำให้เกิดตาออกใน หลอดทดลองของ *Phalaenopsis cygnus* 'Silky Moon' จากการเพาะเมล็ด. (ออนไลน์) สืบค้นจาก: [www.scisoc.or.th](http://www.scisoc.or.th) [18 ธันวาคม 2549].

นงนุช เครือสนิท. 2544. การเพาะเลี้ยงเมล็ดกล้วยไม้ หวายเหลืองจินทบูร (*Dendrobium friedericksianum* Rehb. f) ปัญหาพิเศษระดับปริญญาตรี ภาควิชาเทคโนโลยีและการอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สมพร ประเสริฐส่งสกุล และนัยนา ศรีชัย. 2547. ผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตและผง ถ่านกัมมันต์ต่อการพัฒนาการขยายพันธุ์ กล้วยไม้หวายเหลืองจินทบูร. ว. สงขลา นครินทร์ วทท. 26(5): 757-763.

Duan, J.-X. and Yazawa, S. 1995. Floral induction and development in *Phalaenopsis* in vitro. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 43: 71-74.

Kostenyuk, I., Oh, B.J. and So, I.S. 1999. Induction of early flowering in *Cymbidium niveo-marginatum* Mak in vitro. *Plant Cell Reports.* 19: 1-5.

Murashige, T. and Skoog, F. 1962. A revised medium for rapid growth and bio-assays with tobacco tissue culture. *Physiol. Plant.* 15: 473-497.

Simon, R. Igeno, M.I. and Coupland, G. 1996. Activation of floral meristem identity genes in *Arabidopsis*. *Nature.* 384: 59-62.

Vacin, E. and Went, F. 1949. Some pH change in nutrient solution. *Botan. Gaz.* 110: 605-613.

Wang, G.-Y., Xu, Z.-H., Chia, T.-P. and Chua, N.-H. 1993. In vitro flowering of orchid (*Dendrobium candidum*). In: You, B (ed) *Biotechnology in Agriculture*. Kluwer. Amsterdam, pp. 373-378.



## สารฟีนาซีนที่ผลิตจาก *Pseudomonas* spp.

เฉลิม เรืองวิริยะชัย<sup>1</sup>

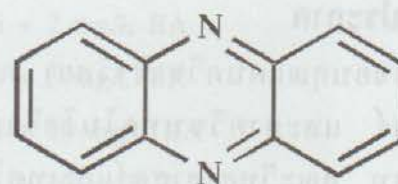
### บทนำ

การศึกษาเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ธรรมชาติที่ผลิตจากแบคทีเรียชนิดนั้น มีอยู่ด้วยกันหลายสายพันธุ์ โดยงานวิจัยที่ทำของกลุ่มวิจัยที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ผ่านมาและในปัจจุบันนั้นได้เน้นการศึกษาเกี่ยวกับสารไซเคโอโรฟอรัส (siderophore) และการประยุกต์ใช้ ซึ่งเป็นสารที่สามารถเกิดการเรืองแสงได้ภายใต้แสงยูวี และมีสมบัติเป็นลิแกนด์ที่มีความเฉพาะเจาะจงกับโลหะหนักได้ดี โดยไซเคโอโรฟอรัสเป็นสารเมตาบอไลต์ทุติยภูมิ ซึ่งผลิตได้จากแบคทีเรียในกลุ่ม *Pseudomonas* spp. และชนิดแกรมลบอื่น ๆ ซึ่งแบคทีเรียเหล่านั้นพบว่า สามารถผลิตไซเคโอโรฟอรัสได้เมื่อเพาะเลี้ยงภายใต้ภาวะที่ไม่มีโลหะหนักหรือน้อยมากในภาวะที่เหมาะสม ดังรายงานการวิจัยที่มีการตีพิมพ์ออกมาจำนวนหลายผลงาน (Ruangviriyachai et al., 2000; Ruangviriyachai et al., 2001; Ruangviriyachai et al., 2004; Sutthiparinyanont et al., 2005)

งานวิจัยที่น่าสนใจที่สำคัญ คือ การนำเอาแบคทีเรียสายพันธุ์ต่าง ๆ จาก *Pseudomonas* spp. ที่ศึกษามาแล้วเหล่านั้น มาศึกษาการผลิตสารประเภทอื่นๆ ที่เป็นสารเมตาบอไลต์ทุติยภูมิประเภทอื่น ๆ โดยเฉพาะเลี้ยงภายใต้ภาวะที่แตกต่างกัน ให้มีปริมาณฟอสเฟตต่ำ ๆ สารที่น่าสนใจศึกษานั้นก็คือ สารฟีนาซีนและอนุพันธ์ของสารฟีนาซีน โดยพบว่า

*Pseudomonas* spp. เป็นแบคทีเรียสายพันธุ์แรกที่สามารถผลิตสารฟีนาซีนได้ (Laursen and Nielsen, 2004)

### ลักษณะโครงสร้างและสมบัติทางเคมีของสารฟีนาซีน



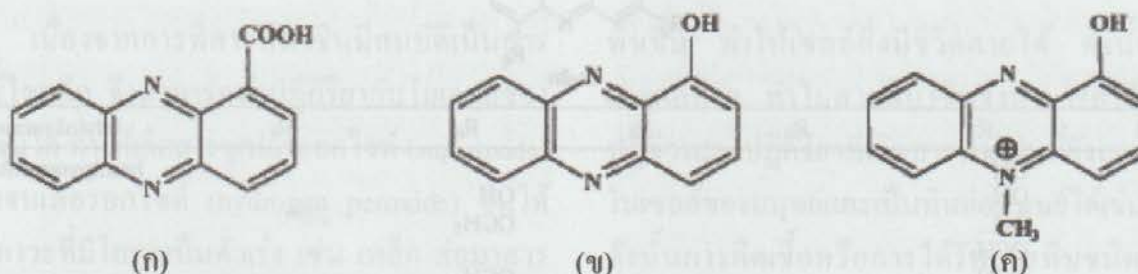
รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างหลักของสารฟีนาซีน (Ohfuji et al., 2004)

สารฟีนาซีนมีโครงสร้างหลัก แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งสารอนุพันธ์ของฟีนาซีนส่วนใหญ่แสดงสมบัติเป็นสารปฏิชีวนะ (antibiotic) สารต้านมาเลเรีย (antimalaria) สารต้านเนื้องอก (antitumor) และสารต้านปรสิต (antiparasitic) (Laursen and Nielsen, 2004) มีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 243-244 องศาเซลเซียส สามารถดูดกลืนแสงยูวี-เอ (UV-A) และยูวี-บี (UV-B) ได้ดี ให้ผลการศึกษาที่กว้าง (Fernández and Pizarro, 1999) เกิดการฟลูออเรสเซนซ์ได้น้อยมาก แต่สามารถเกิดการฟอสฟอเรสเซนซ์ได้มากกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในภาวะกระตุ้น อิเล็กตรอนในโครงสร้างของสารฟีนาซีนนั้น สามารถเกิดการเคลื่อนย้ายแบบข้ามระบบ (intersystem crossing) ได้

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

ดีกว่าการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ (Choudhury and Basu, 2003) นอกจากนั้น หากพิจารณาโครงสร้างทางเคมีของสารฟีนาซีน จะเห็นได้ว่า เป็นสารประกอบประเภทเฮเทอโรไซคลิก (heterocyclic compound) ที่มีไนโตรเจนอะตอมอยู่ในโมเลกุล (Pierson III and Pierson, 1996) และยังเป็นสารประเภทรีดอกซ์ไซคลิก (redox cyclic) ที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้อย่างอัตโนมัติ (autooxidation) และมีลักษณะพิเศษที่สามารถเกิดการถ่ายเทประจุได้ดี รวมทั้งในโครงสร้างหลักของสารฟีนาซีนนั้นมีไนโตรเจนอะตอมในโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวอยู่ด้วยนั่นเอง ทั้งแบคทีเรียชนิดแกรมลบ เช่น *Pseudomonas* spp. และแบคทีเรียแกรมบวก เช่น *Streptomyces* spp. รวมถึงกลุ่มแบคทีเรียทางทะเลสามารถผลิตสารฟีนาซีนได้เช่นกัน เมื่อเลี้ยงภายใต้ภาวะที่มีฟอสเฟตปริมาณน้อย ๆ (Fernández and Pizarro, 1997) เนื่องจากสารฟีนาซีนเป็นสารเมแทบอไลต์ทุติยภูมิที่เกิดขึ้นหลังจากเซลล์หยุดการแบ่งตัวและมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ดังนั้นในการผลิตสารฟีนาซีน รวมทั้งสารเมแทบอไลต์ทุติยภูมิอื่น ๆ นั้น จำเป็นต้องควบคุมปริมาณสารเมแทบอไลต์ปฐมภูมิของแบคทีเรียเหล่านั้นให้เกิดขึ้นน้อยลง (Laursen and Nielsen, 2004)

ในปัจจุบัน พบสารอนุพันธ์ของฟีนาซีน มากกว่า 6,000 ชนิด ซึ่งเกิดจากการแทนที่ในตำแหน่งที่แตกต่างกันด้วยหมู่แทนที่ที่แตกต่างกัน บนโครงสร้างหลักของสารฟีนาซีน (พิจารณาจากรูปที่ 1) และจากการแทนที่ด้วยหมู่แตกต่างกันนั้น ทำให้ได้สารอนุพันธ์ของฟีนาซีนหลายชนิด และมีสมบัติแตกต่างกัน เช่น สมบัติในการเป็นสารปฏิชีวนะได้ ตลอดจนการนำไปประยุกต์ใช้ที่แตกต่างกันอีกด้วย สารอนุพันธ์ของฟีนาซีนที่พบทั่วไป ซึ่งผลิตจาก *Pseudomonas* spp. ได้แก่ Pyocyanin (PYO) ที่มีสีน้ำเงิน ส่วน phenazine-1-carboxylic acid (PCA) และ phenazine-1-carboxamide (PCN) ที่มีสีเหลือง รวมทั้ง hydroxyl phenazine เป็นต้น (Brisbane et al., 1987) นักวิทยาศาสตร์เชื่อกันว่า PCA เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารอนุพันธ์ของฟีนาซีนตัวอื่น ๆ ที่มีโครงสร้างซับซ้อนมากขึ้นได้ เช่น ได้สารที่สามารถยับยั้งการเจริญของ *Mycobacterium tuberculosis* (Laursen and Nielsen, 2004) ไพโอไซยานินเป็นอนุพันธ์ฟีนาซีนที่มีความเสถียรค่อนข้างต่ำ ในภาวะที่มีค่า pH ที่เปลี่ยนแปลง และอนุมูลไมคงที่ในการเก็บสารจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของสารไพโอไซยานิน การเก็บสารไพโอไซยานินที่อุณหภูมิ -4 องศาเซลเซียส ช่วยชะลอการสลายตัวของสารไพโอไซยานินได้ดีกว่าการเก็บที่อุณหภูมิห้อง (Saosoong et al., 2007; Tongtumma et al., 2007a)



รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างของ (ก) สาร Phenazine-1-carboxylic acid (PCA) (ข) สาร 1-hydroxy phenazine (1-OH-Phz) และ (ค) สาร Pyocyanin (PYO) ตามลำดับ (Brisbane et al., 1987)

ตารางที่ 1 แสดงสารอนินทรีย์ของฟีนิกซ์อย่างง่ายที่ผลิตได้จาก *Pseudomonas* spp. (Laursen and Nielsen, 2004)

สารฟีนาซีน นอกจากจะผลิตได้จากแบคทีเรียแล้ว ยังสามารถเตรียมได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี แต่เนื่องจากข้อจำกัด เรื่องการควบคุมตำแหน่งการแทนที่และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างหลักของสารฟีนาซีนนั้น จึงทำให้ยังไม่มีวิธีการสังเคราะห์วิธีใด ๆ ที่มีประสิทธิภาพดีพอ

ในการยอมรับของวิธีการสังเคราะห์ ที่มีหลายวิธีภายใต้ภาวะที่แตกต่างกัน (Laursen and Nielsen, 2004) *Pseudomonas* spp. หลายสายพันธุ์ สามารถผลิตสารอนุพันธ์ของฟีนาซีนได้ในอาหารที่ใช้เลี้ยงที่แตกต่างกัน ซึ่งมีอยู่มากมายหลายชนิด ดังเอกสารที่มีรายงานและได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงสายพันธุ์ของ *Pseudomonas* spp. และอาหารที่ใช้เลี้ยงในการผลิตสารอนุพันธ์ของฟีนาซีน

| สายพันธุ์แบคทีเรีย     | อาหารที่ใช้เลี้ยง                                                                                                                                                                            | เอกสารอ้างอิง                                                                                                                                                             |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>P. aeruginosa</i>   | - Mineral salt medium<br>- King's A medium *<br>- Modified of King's A medium*<br>- Luria-Bertani medium (LB)<br>- TYS broth<br>- Ingram and Blackwood broth I, II, III *<br>- Ethanol broth | Kanner et al., 1978<br>Fernández and Pizarro, 1997<br>Byng et al., 1979<br>Audenaert et al., 2002<br>Hassett et al., 1992<br>Ohfujii et al., 2004<br>Ohfujii et al., 2004 |
| <i>P. fluorescens</i>  | - Luria-Bertani medium (LB)<br>- M9 medium *                                                                                                                                                 | Huang et al., 2004<br>Huang et al., 2004                                                                                                                                  |
| <i>P. aureofaciens</i> | - King's B medium *<br>- Pigment production medium (PPMD)*<br>- Luria-Bertani medium (LB)<br>- M9 minimal medium*                                                                            | Chancey et al., 1999<br>Chancey et al., 1999<br>Whistler et al., 2003<br>Whistler et al., 2003                                                                            |

หมายเหตุ: \* เป็นสูตรอาหารที่นิยมใช้เลี้ยง และสามารถผลิตสารอนุพันธ์ของฟีนาซีนได้เป็นอย่างดี

เนื่องจากการที่สารฟีนาซีนมีสมบัติเป็นสารรีดอกซ์ไซคลิก จึงสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของออกซิเจนได้ ทำให้เกิดสารซูเปอร์ออกไซด์ (superoxide) ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) ขึ้นได้ ภายใต้ภาวะที่มีโลหะเป็นตัวเร่ง เช่น เหล็ก ต่อมาสารเหล่านั้นเปลี่ยนไปเป็นไฮดรอกไซด์เรดิคัล (hydroxide radical, OH<sup>•</sup>) โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารฟีนาซีนกับโมเลกุลของออกซิเจนเช่นนี้ จึงเป็นสาเหตุของการเกิดอนุพันธ์ของออกซิเจนที่เป็น

พิษขึ้น ทำให้เซลล์สิ่งมีชีวิตตายได้ ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ว่า ทำไมสารฟีนาซีนจึงสามารถใช้เป็นสารปฏิชีวนะ ปฏิกิริยาที่เกิดสารพิษเช่นนี้ยังสามารถเกิดในเซลล์ของมนุษย์และเป็นพิษต่อมนุษย์ ได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นการติดเชื้อหรือการได้รับสารพิษชนิดนี้เข้าไป จะก่อให้เกิดการทำลายเซลล์ และยังสามารถทำให้เกิดการเจริญเติบโตของผนังเซลล์ เช่น การลด-ขาดของเนื้อเยื่อชั้นผิว และยังสามารถยับยั้งการฟื้นตัวของเม็ดเลือดขาวได้อีกด้วย (Hassett et al., 1992)

## การตรวจสอบสารฟินาซีน

การตรวจสอบสารฟินาซีนนั้นมีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดและสายพันธุ์ของแบคทีเรียที่ผลิตออกมา รวมทั้งชนิดของอาหารที่ใช้เลี้ยงและผลิตภัณฑ์ของสารฟินาซีนที่สนใจ วิธีที่นิยมใช้ทั่วไปในการวิเคราะห์และหาปริมาณของสารฟินาซีนนั้นมีหลายวิธี เช่นอาศัยวิธีการดูกลิ่นแสง โดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (Mavrodi et al., 2001) ส่วนการตรวจสอบความบริสุทธิ์สามารถตรวจได้ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (Fernández and Pizarro, 1997) แต่ก่อนตรวจวัดมักใช้วิธีการสกัดสารฟินาซีนด้วยการสกัดแบบของเหลว-ของเหลวก่อน ตัวอย่างเช่น

หลังเพาะเลี้ยง *Pseudomonas aureofaciens* ในอาหารเหลวสูตร PPMD จากนั้นนำไปเหวี่ยงแยกเก็บเฉพาะส่วนที่เป็นของเหลว มาปรับ pH เท่ากับ 2 ด้วยกรด HCl สกัดสารฟินาซีนด้วยเบนซีน ซ้ำ 2 ครั้ง จากนั้นนำสารละลายในชั้นของเบนซีนที่ได้มารวมกัน แล้วนำไประเหยแห้ง นำสารที่ได้ละลายในสารละลาย 0.1 N NaOH ไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวิสิเบิล-อัลตราไวโอเล็ต สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 367 นาโนเมตร (Whistler and Pierson III, 2003) หรือหลังเพาะเลี้ยงเชื้อ *Pseudomonas aeruginosa* ที่ 28 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 96 ชั่วโมง ในอาหารเหลวสูตร *Pseudomonas* P ปริมาตร 25 มิลลิลิตร นำไปเหวี่ยงแยก เพื่อแยกเอาส่วนที่เป็นของเหลวออก สกัดสารฟินาซีนด้วยคลอโรฟอร์ม ซ้ำ 2 ครั้ง นำชั้นของคลอโรฟอร์ม ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวิสิเบิล-อัลตราไวโอเล็ต สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 367 นาโนเมตร (Audenaert et al., 2002)

## การตรวจสอบฤทธิ์ทางชีวภาพของสารฟินาซีน (Bioassay)

การทดสอบสารฟินาซีนในการเป็นสารปฏิชีวนะนั้น ทำได้โดยใช้อาหารสูตร PDA นำมา

ปรับค่า pH ให้เหมาะสมด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ ที่ประกอบไปด้วยฟอสเฟต เข้มข้น 20 mM และซิเตรต เข้มข้น 20 mM แทนน้ำกลั่นสำหรับใช้ทดสอบกับเชื้อรา และการผสมเซลล์แบคทีเรีย กับ 2% ของวุ้นอาหาร ที่อุณหภูมิ 1% peptone (น้ำหนักต่อปริมาตร) สำหรับใช้ทดสอบกับเชื้อแบคทีเรีย ส่วนการเตรียมแผ่น paper disc ที่มีสารปฏิชีวนะเคลือบอยู่บนแผ่น paper disc นั้น โดยระเหยสาร phenazine-1-carboxylic acid เข้มข้น 1.5 mM ในเมทานอลที่หยดบนแผ่น paper disc และวางแผ่น paper disc ดังกล่าว ลงบนอาหารแข็งที่มีจุลินทรีย์ที่ต้องการทดสอบอยู่ หรือจะใช้วิธีการเจาะหลุมเล็กๆ บนอาหารวุ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร และใส่สารฟินาซีนที่ต้องการทดสอบลงไปหลังจากการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์ที่ต้องการทดสอบเป็นเวลา 2-3 วัน (Brisbane et al., 1987) และตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

แบคทีเรียที่นิยมใช้ในการตรวจสอบทางชีวภาพของสารฟินาซีน นั้น ได้แก่ *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli* และยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* โดยมีวิธีการศึกษาดังนี้ เลี้ยงแบคทีเรียที่ใช้ทดสอบในอาหารที่เชื้อนั้นสามารถเจริญได้ดี เพื่อใช้เตรียม culture ต่อไป จากนั้นอุ่นวุ้นอาหารให้อยู่ในภาวะที่เป็นของเหลว เดิมเซลล์ของจุลินทรีย์ลงในวุ้นอาหารที่อุ่นๆ ผสมให้เข้ากัน นำไปเทลงบน plate แล้วปล่อยให้เย็นลง จากนั้นหยดสารปฏิชีวนะที่ต้องการทดสอบลงบน plate ที่เป็นหลุม แล้วเก็บ plate นั้นไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับเชื้อแต่ละชนิด ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 วัน แล้ววัดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณที่เกิดการยับยั้ง เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (Stead et al., 1996)

## ประโยชน์ของสารฟินาซีนและสารอนุพันธ์ของฟินาซีน

ประโยชน์ของสารฟินาซีนนั้นมีมากมาย ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นด้านต่าง ๆ เช่น

- ด้านเกษตรกรรม จากการที่สารฟีนาซีนมีสมบัติเป็นสารต้านแบคทีเรียและเชื้อรา ดังนั้นสามารถลดการเกิดโรค Take-all ในรากข้าวโพดอันเป็นสาเหตุมาจากเชื้อ *Gaeumannomyces graminis* var *tritici* รวมทั้งสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราที่ก่อโรคพืชชนิดอื่นๆ ได้เช่นเดียวกัน (Pierson III and Pierson, 1996)

- ด้านการแพทย์ พบว่า สารฟีนาซีนบางชนิดมีสมบัติในการเป็นสารต้านมะเร็งได้ แต่อย่างไรก็ตาม สารอนุพันธ์ของฟีนาซีนประเภทนี้มักมีโครงสร้างทางเคมีที่ค่อนข้างซับซ้อน (Lee et al., 2004) pyocyanin และ 1-hydroxyphenazine มีสมบัติเป็นสารปฏิชีวนะในการยับยั้งการเจริญของเชื้อราชนิด *Candida albicans* และ *Aspergillus fumigatus* ซึ่งเป็นปัจจัยเสี่ยงในการเกิดโรค pulmonary candidiasis ในคน (Kerr et al., 1999) และนอกจากนั้นสาร pyocyanin ยังถูกนำไปใช้ในกระบวนการทางเภสัชกรรมในการต้านในตริกออกไซด์ (Reszka et al., 2004)

- ด้านอุตสาหกรรม เนื่องจากสารฟีนาซีนมีสมบัติเป็นสารที่สามารถเกิดการรีดอกซ์ได้ง่าย จึงนำไปประยุกต์ใช้ทางด้าน Bioelectronic และ Biosensors โดยเป็นสารตัวกลาง (Mediator) ในระบบ Glucose sensors ได้ (Ohfujii et al., 2004) นอกจากนี้มีการนำสาร pyocyanin ไปใช้ลดการเสื่อมสภาพของน้ำมันดิบที่มีผลกระทบจากแบคทีเรีย (Sean Norman et al., 2004) และสารฟีนาซีนยังถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในแผงวงจรเซลล์สุริยะ (Solar cell) (Jana, 2000) และใช้ในการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าในงานวิจัยด้านเคมีไฟฟ้าได้อีกด้วย (Puskás and Inzel, 2005)

สำหรับในด้านเกษตรกรรมได้มีการนำ *Pseudomonas* spp. มาผลิตสารควบคุมโรคพืชทางชีวภาพ เพื่อลดการใช้สารควบคุมทางเคมี ซึ่งอาจใช้สารเพียงชนิดเดียวหรือว่าใช้ร่วมกันก็ได้ จึงทำให้ใช้สารเคมีสังเคราะห์ลดน้อยลง ทำให้ผลผลิตทางเกษตรเพิ่มขึ้น และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ตัวอย่าง

สารอนุพันธ์ของฟีนาซีนที่เข้าสู่ตลาดทางการค้ามากกว่า 30 ปีแล้ว ได้แก่ สาร Cedomon จากบริษัท BioAgri AB จำกัด จากเมือง Uppsala ประเทศสวีเดน โดยให้นำเมล็ดพืชมาอบด้วยสารฟีนาซีน ที่ผลิตจาก *Pseudomonas chlororaphis* เพื่อช่วยในการป้องกันโรคในข้าวบาเลย์และข้าวโอต และยิ่งไปกว่านั้นได้มีการเพิ่มความสนใจในการพัฒนาสารควบคุมโรคพืชทางชีวภาพชนิดใหม่ เพื่อขยายงานของการประยุกต์ใช้และการควบคุมช่วงที่เกิดโรคพืชขึ้น (Chin-A-Woeng et al., 2003)

สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับประโยชน์ของ *Pseudomonas* spp. ที่พบในประเทศไทย กลุ่มผู้วิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ได้มีการศึกษาพบว่าสารอนุพันธ์ฟีนาซีนชนิดหนึ่งคือ สาร PCN ที่ผลิตได้จาก *Pseudomonas aeruginosa* R' สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียทั่วไป ได้แก่ *Escherichia coli* ที่ก่อให้เกิดโรคท้องร่วงในคนและในสัตว์ *Bacillus subtilis* ที่ทำให้เกิดการติดเชื้อแบบฉวยโอกาสในคนและในสัตว์ *Staphylococcus aureus* ที่ก่อให้เกิดโรคปอดบวม โรคผิวหนัง ไชกระดูกอักเสบ และนอกจากนั้นยังสามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียหลายสายพันธุ์ที่ก่อโรคในพืชเศรษฐกิจไทยบางชนิด เช่น *Ralstonia solanacearum*, *Erwinia carotovora* และ *Xanthomonas campestris* pv. *vesicatoria* ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคใน มะเขือเทศ กะหล่ำปลี และพริก ตามลำดับ (Hongtani et al., 2007) สาร 1-hydroxyphenazine ที่ผลิตได้จาก *Pseudomonas aeruginosa* ยังสามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียชนิดต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น ได้เช่นกัน และนอกจากนั้นสารชนิดนี้ยังสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราชนิด *Candida albicans* ซึ่งเป็นปัจจัยเสี่ยงในการเกิดโรค pulmonary candidiasis ในคนได้ด้วย (Saosoong et al., 2007; Tongtumma et al., 2007b) นอกจากนี้ยังใช้ PCA PCN pyocyanin และ 1-hydroxyphenazine ที่ผลิตได้จากแบคทีเรีย *Pseudomonas* spp. ในการควบคุมแมลงได้ (Jander et al., 2000)

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ นางสาววิภาดา หงส์ทะนิตี คุณกานดา เสาสูง คุณสันติ ทองธรรมมา ที่ได้ช่วยกันรวบรวมข้อมูลและได้ช่วยทำงานวิจัยในเรื่องสารฟีนาซีน ในขณะที่กำลังศึกษาอยู่ในระดับบัณฑิตศึกษา ของสาขาเคมีวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอขอบคุณ ศูนย์นวัตกรรมทางเคมี: โครงการพัฒนานักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา และการวิจัยทางเคมี (PERCH-CIC) ที่ให้ทุนการศึกษาแก่นักศึกษา และขอขอบคุณกองทุนพัฒนาและส่งเสริมด้านวิชาการของคณะวิทยาศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2549 และทุนอุดหนุนวิจัยทั่วไปของมหาวิทยาลัยขอนแก่น ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2549 ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านทุนวิจัยในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- Audenaert, K., Pattery, T., Cornelis, P. and H?fte, M. (2002). Induction of systemic resistance to *Botrytis cinerea* in tomato by *Pseudomonas aeruginosa* TNSK2: Role of salicylic acid, pyochelin, and pyocyanin. *Mol. Plant-Microbe Interact.* 15(11):1147-1156.
- Brisbane, P.G., Janik, L.J., Tate, M.E. and Warren, R.F.O. (1987). Revised structure for the phenazine antibiotic from *Pseudomonas fluorescens* 2-79 (NRRL B-15132). *Antimicrob. Agents Chemother.* 31(12):1967-1971.
- Byng, G.S., Eustice, D.C. and Jensen, R.A. (1979). Biosynthesis of phenazine pigments in mutant and wild-type cultures of *Pseudomonas aeruginosa*. *J. Bacteriol.* 138(3):846-852.
- Chancey, S.T., Wood, D.W. and Pierson III, L.S. (1999). Two-component transcriptional regulation of N-acyl-homoserine lactone production in *Pseudomonas aureofaciens*. *Appl. Environ. Microbiol.* 65(6):2294-2299.
- Chin-A-Woeng, T.F.C., Bloembergen, G.V. and Lugtenberg B.J.J. (2003). Phenazines and their role in biocontrol by *Pseudomonas bacteria*. *New. Phytol.* 157:503-523.
- Choudhury, S.D. and Basu, S. (2003). Singlet state exciplex formation of phenazine with some aromatic amines. *Chem. Phys. Lett.* 373:67-71.
- Fernández, R.O. and Pizarro, R.A. (1997). High-performance liquid chromatographic analysis of *Pseudomonas aeruginosa* phenazines. *J. Chromatogr. A.* 771:99-104.
- Fernández, R.O. and Pizarro, R.A.. (1999). *Pseudomonas aeruginosa* UV-A-induced lethal effect: Influence of salts, nutrition stress and pyocyanine. *J. Photochem. Photobiol. B:Biol.* 50:59-65.
- Hassett, D.J., Charniga, L., Bean, K., Ohman, D.E. and Cohen, M.S. (1992). Response of *Pseudomonas aeruginosa* to pyocyanin: Mechanisms of resistance, antioxidant defenses, and demonstration of a manganese-cofactored superoxide dismutase. *Infect. Immun.* 60(2):328-336.
- Hongthani, W., Chanthai, S., Bunyatrachata, W. and Ruangviriyachai, C. (2007). Production and analysis of antibiotic phenazine from *Pseudomonas aeruginosa*. *KKU Sci. J.* 35(1):in press.
- Huang, Z., Bonsall, R.F., Mavrodi, D.V., Weller, D.M. and Thomashow, L.S. (2004). Transformation of *Pseudomonas fluorescens* with genes for biosynthesis of phenazine-1-carboxylic acid improves biocontrol of rhizoctonia root rot and in situ antibiotic production. *FEMS Microbiol. Ecol.* 49:243-251.

- Jana, A.K. (2000). Solar cells based on dyes. J. Photochem. Photobiol., A. 132:1-17.
- Jander, G., Rahme, L.G. and Ausubel, F.M. (2000). Positive correlation between virulence of *Pseudomonas aeruginosa* mutants in mice and insects. J. Bacteriol. 182(13):3843-3845.
- Kanner, D., Gerber, N.N. and Bartha, R. (1978). Pattern of phenazine pigment production by a strain of *Pseudomonas aeruginosa*. J. Bacteriol. 134(2):690-692.
- Kerr, J.R., Taylor, G.W., Rutman, A., Hoiby, N., Cole, P.J. and Wilson, R. (1999). *Pseudomonas aeruginosa* pyocyanin and 1-hydroxyphenazine inhibit fungal growth. J. Clin. Pathol. 52:385-387.
- Laursen, J.B. and Nielsen, J. (2004). Phenazine natural products: Biosynthesis, synthetic analogues, and biological activity. Chem. Rev. 104:1663-1685.
- Lee, H.J., Kim, J.S., Park, S.Y., Suh, M.E., Kim, H.J., Seo, E.K. and Lee, C.O. (2004). Synthesis and cytotoxicity evaluation of 6,11-dihydro-pyridazo-and 6,11-dihydro-pyrido [2,3-b] phenazine-6,11-diones. Bioorg. Med. Chem. 12:1623-1628.
- Mavrodi, D.V., Bonsall, R.F., Delaney, S.M., Soule, M.J., Phillips, G. and Thomashow, L.S. (2001). Functional analysis of genes for biosynthesis of pyocyanin and phenazine-1-carboxamide from *Pseudomonas aeruginosa* PAO1. J. Bacteriol. 183(21):6454-6465.
- Ohfuji, K., Sato, N., Hamada-Sato, N., Kobayashi, T., Imada, C., Okuma, H., Watanabe, E. (2004). Construction of a glucose sensor based on a screen-printed electrode and a novel mediator pyocyanin from *Pseudomonas aeruginosa*. Biosens. Bioelectron. 19:1237-1244.
- Pierson III, L.S. and Pierson, E.A. (1996). Phenazine antibiotic production in *Pseudomonas aureofaciens*: Role in rhizosphere ecology and pathogen suppression. FEMS Microbiol. Lett. 136:101-108.
- Puskás, Z. and Inzel, G. (2005). Formation and redox transformations of polyphenazine. Electrochim. Acta. 50:1481-1490.
- Reszka, K.J., O'Malley, Y., McCormick, M.L., Dening, G.M. and Britigan, B.E. (2004). Oxidation of pyocyanin, a cytotoxic product from *Pseudomonas aeruginosa*, by microperoxidase 11 and hydrogenperoxide. Free Radic. Biomed. 36(11):1448-1459.
- Ruangviriyachai, C., Barelmann, I., Fuchs, R. and Budzikiewicz, H. (2000). An exceptionally large pyoverdine from a *Pseudomonas* strain collected in Thailand. Z. Naturforsch. 55C:323-327.
- Ruangviriyachai, C., Fernández, D.U., Fuchs, R., Meyer, J.M. and Budzikiewicz, H. (2001). A new pyoverdine from *Pseudomonas aeruginosa* R'. Z. Naturforsch. 56C:933-938.
- Ruangviriyachai, C., Fernández, D. U., Sahüfer, M. and Budzikiewicz, H. (2004). Structural proposal for a new pyoverdine from a Thai *Pseudomonas putida* strain. Spectroscopy. 18:453-458.
- Saosoong, K., Tongtumma, S., Chanthai, S., Wongphathanakul, W., Bunyatratchata, W. and Ruangviriyachai, C. (2007). Isolation and study on chemical properties of pyocyanin produced from *Pseudomonas aeruginosa* TISTR 781 (ATCC 9027). KRU Res. J. 12(1):24-32.

- Sean Norman, R., Moeller, P., McDonald, T.J., and Morris, P.J. (2004). Effect of pyocyanin on a crude-oil-degrading microbial community. *Appl. Environ. Microbiol.* 70(7):4004-4011.
- Stead, P., Rudd, B.A.M, Bradshaw, H., Noble, D. and Dawson, M.J. (1996). Induction of phenazine biosynthesis in cultures of *Pseudomonas aeruginosa* by L-N-(3-oxohexanoyl) homoserine lactone. *FEMS Microbiol. Lett.* 140:15-22.
- Sutthiparinyanont, S., Ruangviriyachai, C., Priprem, A. and Chanthai, S. (2005). Effect of *Pseudomonas putida* siderophore on plasma iron. *KKU Res. J. (GS).* 5(2):74-79.
- Tongtumma, S., Ruangviriyachai, C., Chanthai, S. and Bunyatratchata, W. (2007a). Study on effective of pH, light and temperature result in changing of pyocyanin. *KKU Sci. J.* in press.
- Tongtumma, S., Tansupo, P., Bunyatratchata, W., Chanthai, S. and Ruangviriyachai, C. (2007b). Capability in inhibition some bacterial growth using phenazine-producing *Pseudomonas aeruginosa*. *Naresuan Agriculture Journal.* 10(1):41-45.
- Whistler, C.A. and Pierson III, L.S. (2003). Repression of phenazine antibiotic production in *Pseudomonas aureofaciens* strain 30-84 by RpeA. *J. Bacteriol.* 185(13):3718-3725.



## การคำนวณเชิงตัวเลขของการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวดิ่ง ภายใต้แรงโน้มถ่วง

### Numerical Calculation of Motion of a Falling Body under Gravitational Force

ชาญเรืองฤทธิ์ จันทร์นอก<sup>1</sup>

#### บทคัดย่อ

การคำนวณผลเชิงตัวเลขในการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ตกลงสู่พื้นโลกภายใต้แรงโน้มถ่วงโลก ซึ่งในปรากฏการณ์จริงทางฟิสิกส์นั้นมีรูปแบบของการเคลื่อนที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ทำให้ไม่สามารถแก้ปัญหาคำนวณด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์ได้ การคำนวณเชิงตัวเลขได้ถูกนำมาใช้สำหรับแก้ปัญหาดังกล่าว โดยประยุกต์ใช้วิธีการรุงเง-กัตตาอันดับที่ 4 (4<sup>th</sup> order Runge-Kutta Method) พบว่าการผลการคำนวณที่ได้สามารถใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวดิ่งได้ที่ระดับความสูงมากๆ

#### Abstract

The motion of a falling body to the Earth under gravitational force was calculated. In the real physical phenomenon, the form of equation of motion is a non-linear ordinary differential equation. This problem cannot solve with analytical method. A numerical method was used to solve this problem by applying the 4<sup>th</sup> order Runge-Kutta Method. We found that numerical results could explain the motion of falling body at very high level.

คำสำคัญ: ฟิสิกส์เชิงคำนวณ, วิธีการเชิงตัวเลข, กลศาสตร์ดั้งเดิม

Keywords: computational physics, numerical method, classical mechanics

## บทนำ

การคำนวณการเคลื่อนที่ของวัตถุ เป็นการแก้ ปัญหาที่สำคัญทางกลศาสตร์ฟิสิกส์ทั้งในระดับพื้น ฐานและในระดับขั้นสูง ซึ่งรูปแบบการเคลื่อนที่แบบ ต่างๆ นั้นมีความซับซ้อนในรูปแบบที่แตกต่างกันออก ไป ไม่ว่าจะเป็นการเคลื่อนที่ในแนวระดับ แนวโค้ง แบบเป็นวงกลม แบบสั่น แบบหมุน เป็นต้น

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยพิจารณาการเคลื่อนที่ของ วัตถุที่ตกลงบนพื้นโลก ภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก โดยหลักการทางฟิสิกส์ การเคลื่อนที่ของวัตถุใน แนวโค้งที่เกิดขึ้นภายใต้แรงโน้มถ่วงของดาวเคราะห์ ซึ่งเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างมวลของวัตถุ โดยแรง โน้มถ่วงของดาวเคราะห์มีค่าที่แตกต่างกันออกไปขึ้น กับขนาดและมวลของดาวเคราะห์นั้นๆ (McCuskey 1963)

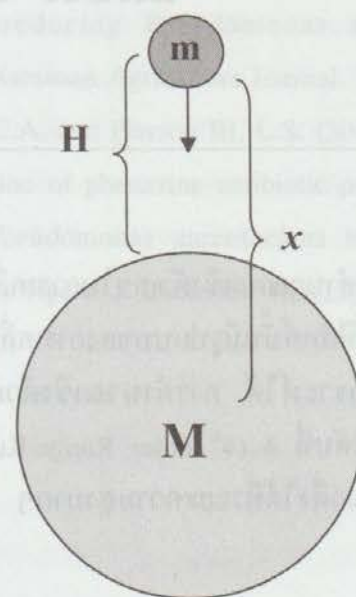
ในการแก้ปัญหาทางกลศาสตร์สามารถใช้ สมการเชิงอนุพันธ์ (Zill and Cullen 2001) ในการ เชื่อมโยงกับปัญหาเพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของวัตถุใน รูปแบบต่างๆ แต่การหาคำตอบในรูปแบบสมการเชิง วิเคราะห์ ของสมการการเคลื่อนที่ (Rignen 1981) พบว่าไม่สามารถใช้อธิบายปัญหาการเคลื่อนที่ของ วัตถุที่มีสมการการเคลื่อนที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ แบบไม่เชิงเส้น(non linear differential equation) ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (Press et al. 1988, Carcia 2000) เพื่อคำนวณการ เคลื่อนที่ของวัตถุในแนวโค้งภายใต้แรงโน้มถ่วง โดยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ เพื่อใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวโค้งภายใต้ แรงโน้มถ่วง ที่ระดับความสูงต่างๆ กัน

## ทฤษฎี

การเคลื่อนที่ของวัตถุทุกชนิดนั้น เกิดขึ้น เนื่องจากแรงกระทำภายนอกที่มีต่อวัตถุ นักฟิสิกส์ สามารถอธิบายลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุใดๆ โดย ประยุกต์ใช้ทฤษฎีทางกลศาสตร์ดั้งเดิม (Marion 1965, Fowles and Cassiday 2005, Thornton and Marion

2004) เช่น กลศาสตร์ลากรางจ์ (Lagrangian Mechanics) กลศาสตร์นิวตัน (Newtonian Mechanics) หรือ กลศาสตร์ แฮมิลตัน (Hamiltonian Mechanics) เพื่อแก้ปัญหา จากสมการการเคลื่อนที่ของวัตถุในปรากฏการณ์ทาง กายภาพที่มีเงื่อนไขต่างๆ กัน

พิจารณาการเคลื่อนที่ของวัตถุ ภายใต้แรง โน้มถ่วง ซึ่งเกิดจากแรงเนื่องจากมวลของดาวเคราะห์ (M) กระทำต่อวัตถุ (m) ในลักษณะดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเคลื่อนที่ของวัตถุมวล m เนื่องจาก แรงดึงดูดจากมวลใหญ่ M ที่ระยะห่างจาก จุดศูนย์กลางของมวล M เป็นระยะ x โดย X เป็นระยะจากผิวมวล M ไปยังวัตถุ m

ในรูปที่ 1 วัตถุ m มีการเคลื่อนที่ได้ เนื่องจากผลของแรงกระทำจากวัตถุ M ซึ่งใช้แนวคิด จากกลศาสตร์นิวตัน สมการของแรง (F) ที่กระทำต่อ วัตถุ m คือ

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} \quad (1)$$

โดยที่ v คือความเร็วของวัตถุ และ t คือ ตัวแปร ของเวลา เมื่อพิจารณาที่ตัวแปรของตำแหน่ง (x) สมการ (1) จะเขียนในรูปสมการเชิงอนุพันธ์อันดับ สองได้คือ

$$F = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (2)$$

สำหรับแรงกระทำต่อวัตถุ  $m$  เนื่องจากวัตถุมวล  $M$  ที่อยู่ห่างกัน  $x$  มีความสัมพันธ์ในรูป

$$F = -\frac{GMm}{x^2} \quad (3)$$

โดยที่  $G$  คือ ค่าคงที่สากลของแรงดึงดูดระหว่างมวล (Groom et al. 2000, Hewitt 2002)

พิจารณาแรงจากสมการ (2) และ (3) จะได้

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{GMm}{x^2} \quad (4)$$

เราสามารถเขียนสมการ (4) ในรูป

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{GM}{x^2} \quad (5)$$

สมการ (5) นี้เป็นสมการการเคลื่อนที่ของวัตถุ  $m$  ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้ได้จริงกับสถานการณ์ทางฟิสิกส์ อย่างไรก็ตามรูปแบบของสมการ (5) นั้นเป็นสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้น (เนื่องจากเทอม  $-1/x^2$ ) ดังนั้นการหาคำตอบเชิงวิเคราะห์ (analytical solution) จึงมีความซับซ้อนในการแก้ปัญหานี้

ในฟิสิกส์ระดับพื้นฐาน หรือระดับมหาวิทยาลัยชั้นปีที่หนึ่ง ส่วนใหญ่จะพิจารณาสมการการเคลื่อนที่ในสมการ (5) ให้มีรูปแบบที่ง่ายขึ้นเพื่อให้สามารถแก้สมการเชิงคณิตศาสตร์วิเคราะห์ได้ จึงคิดประมาณให้ทางซ้ายมือของสมการ (5) เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง สามารถเขียนสมการ (5) ได้ในรูปที่ไม่ขึ้นกับตัวแปร  $x$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -g \quad (6)$$

โดยที่  $g$  คือ  $\frac{GM}{x^2}$  เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง

$G$  คือ ค่าคงที่สากลของแรงดึงดูดระหว่างมวล ซึ่งมีค่า  $6.673 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

$M$  คือ มวลของวัตถุขนาดใหญ่ที่มีผลต่อแรงของวัตถุ

$x$  คือ ระยะทางซึ่งประมาณให้มีค่าเท่ากับรัศมีของของวัตถุขนาดใหญ่

เมื่อพิจารณาค่าคงที่  $g$  ที่เกิดขึ้นบนโลก จาก มวลของโลก คือ  $5.974 \times 10^{24} \text{ kg}$  (Groom et al. 2000) และรัศมีของโลก คือ  $6,378,140 \text{ m}$  (Groom et al. 2000)

จะได้ค่าคงที่  $g = (6.673 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}) (5.974 \times 10^{24} \text{ kg}) / (6378140 \text{ m})^2 = 9.8 \text{ m/s}^2$

สำหรับสมการการเคลื่อนที่ในสมการที่ (6) เมื่อค่า  $g$  เป็นค่าคงที่ โดยที่ค่า  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$  เป็นค่าที่ใช้กันโดยทั่วไปในกรณีที่วัตถุเคลื่อนที่ลงบนพื้นโลก (Hewitt 2002) ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้เฉพาะในกรณีที่วัตถุมีความสูงจากพื้นโลกไม่มากนัก

โดยคำตอบเชิงวิเคราะห์ของสมการเชิงอนุพันธ์รูปแบบที่ง่าย (สมการ 6) คือ

$$x(t) = x_0 + v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (7)$$

โดยที่  $x_0$  คือ ตำแหน่งเริ่มต้นของวัตถุ  $v_0$  คือ ความเร็วเริ่มต้นของวัตถุ

อย่างไรก็ตาม ผลเฉลยในสมการ (7) ถึงแม้จะมีการใช้ในทางฟิสิกส์ในระดับพื้นฐานอย่างกว้างขวาง แต่ไม่สามารถใช้ได้ในกรณีที่วัตถุอยู่สูงจากพื้นโลก ในระดับที่มีความสูงมาก ๆ ดังนั้นจึงทำการแก้สมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้น (สมการ 5) ด้วยวิธีการเชิงตัวเลข เพื่ออธิบายผลการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ตกลงบนพื้นโลกที่ระยะต่างๆ กัน และเปรียบเทียบกับคำตอบเชิงวิเคราะห์ในสมการ (7)

### วิธีการและขั้นตอนการคำนวณ

การประยุกต์ใช้วิธีการเชิงตัวเลข สำหรับใช้ในการคำนวณเพื่อแก้ปัญหาในสมการ (5) โดยใช้วิธีการรุงเง-กัตตาอันดับที่ 4 (4<sup>th</sup> order Runge-Kutta Method) (Landau and Paez 1997, Garcia 2000) ซึ่งวิธีการนี้เหมาะสมในกรณีปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์แบบค่าเริ่มต้น (initial value problem) โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้ คือ

1. พิจารณาค่าตัวแปรในสถานการณ์ที่ใช้ใน

การคำนวณเชิงตัวเลข โดยพิจารณาในกรณีวัตถุเคลื่อนที่เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างมวลของโลก โดยมีตัวแปรต่างๆ คือ

G ค่าคงที่สากลของแรงดึงดูดระหว่างมวล ซึ่งมีค่า  $6.673 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

M มวลของโลก

R รัศมีของโลก

2. กำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของวัตถุ  $x_0$  (ตำแหน่งเริ่มต้นของวัตถุ),  $v_0$  (ความเร็วเริ่มต้นของวัตถุ) โดยในการคำนวณให้  $x_0 = H+R$  และ  $v_0 = 0$

3. กำหนดช่วงระยะเวลาในการคำนวณ  $\Delta t$  ซึ่งค่าของ  $\Delta t$  ที่น้อยๆ จะมีผลต่อความแม่นยำในการคำนวณสูง ในที่นี้ใช้ตัวแปร  $h = \Delta t = 0.00001$  วินาที

4. กำหนดให้ฟังก์ชันของตัวแปร  $x$  และ  $v$  คือ

$$dv(x, v) = -GM/x^2$$

$$dx(x, v) = v$$

5. คำนวณตำแหน่งของวัตถุ ( $x$ ) ที่เคลื่อนที่และความเร็วของวัตถุ ( $v$ ) จากเงื่อนไขค่าเริ่มต้นของ  $x_0$  และ  $v_0$  โดยวิธีการรุงเง-กัตตาอันดับที่ 4 (โดยใช้ฟังก์ชันจากขั้นตอนที่ 4)

5.1 คำนวณค่า

$$kv1 = h \cdot dv(x, v)$$

$$kx1 = h \cdot dx(x, v)$$

$$kv2 = h \cdot dv(x + 0.5 \cdot kx1, v + 0.5 \cdot kv1)$$

$$kx2 = h \cdot dx(x + 0.5 \cdot kx1, v + 0.5 \cdot kv1)$$

$$kv3 = h \cdot dv(x + 0.5 \cdot kx2, v + 0.5 \cdot kv2)$$

$$kx3 = h \cdot dx(x + 0.5 \cdot kx2, v + 0.5 \cdot kv2)$$

$$kv4 = h \cdot dv(x + kx3, v + kv3)$$

$$kx4 = h \cdot dx(x + kx3, v + kv3)$$

5.2 จาก  $kv1, kv2, kv3, kv4, kx1, kx2, kx3$  และ  $kx4$  ที่ได้

คำนวณค่า  $x$  และ  $v$  จะได้

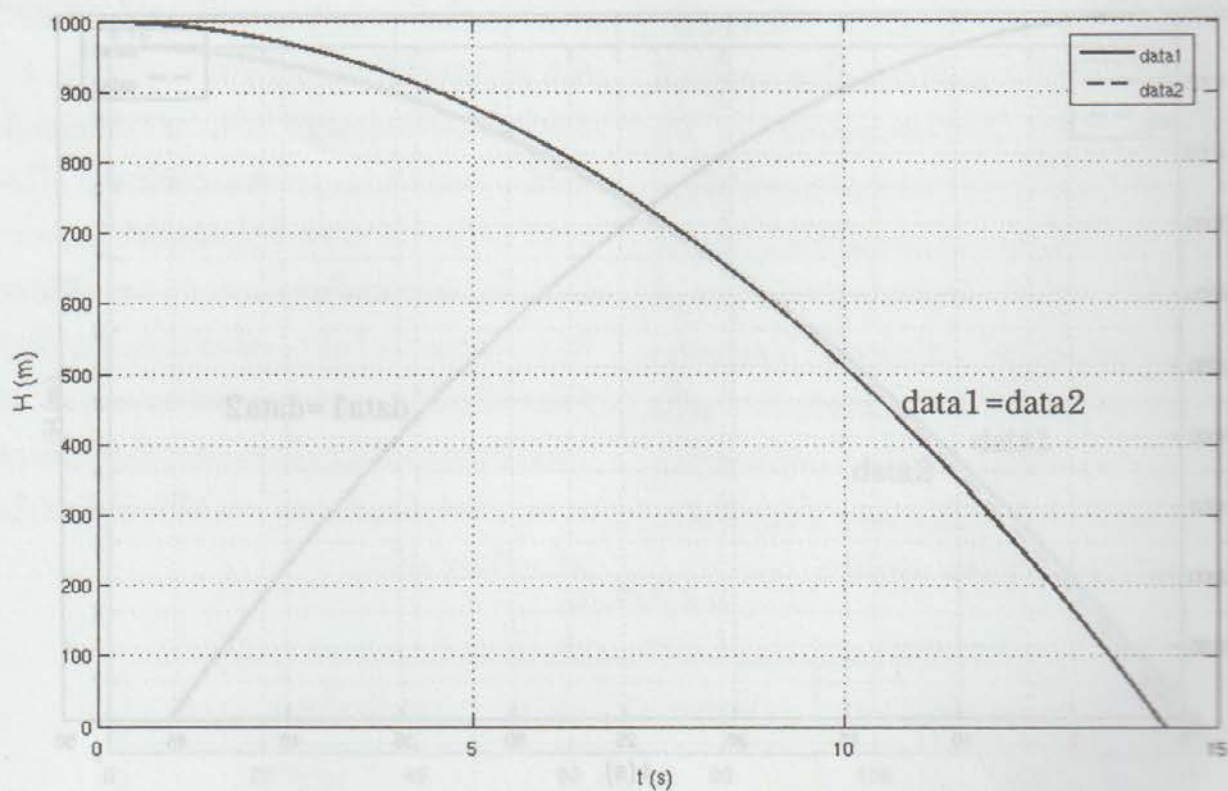
$$x = x + (kx1 + 2 \cdot kx2 + 2 \cdot kx3 + kx4) / 6$$

$$v = v + (kv1 + 2 \cdot kv2 + 2 \cdot kv3 + kv4) / 6$$

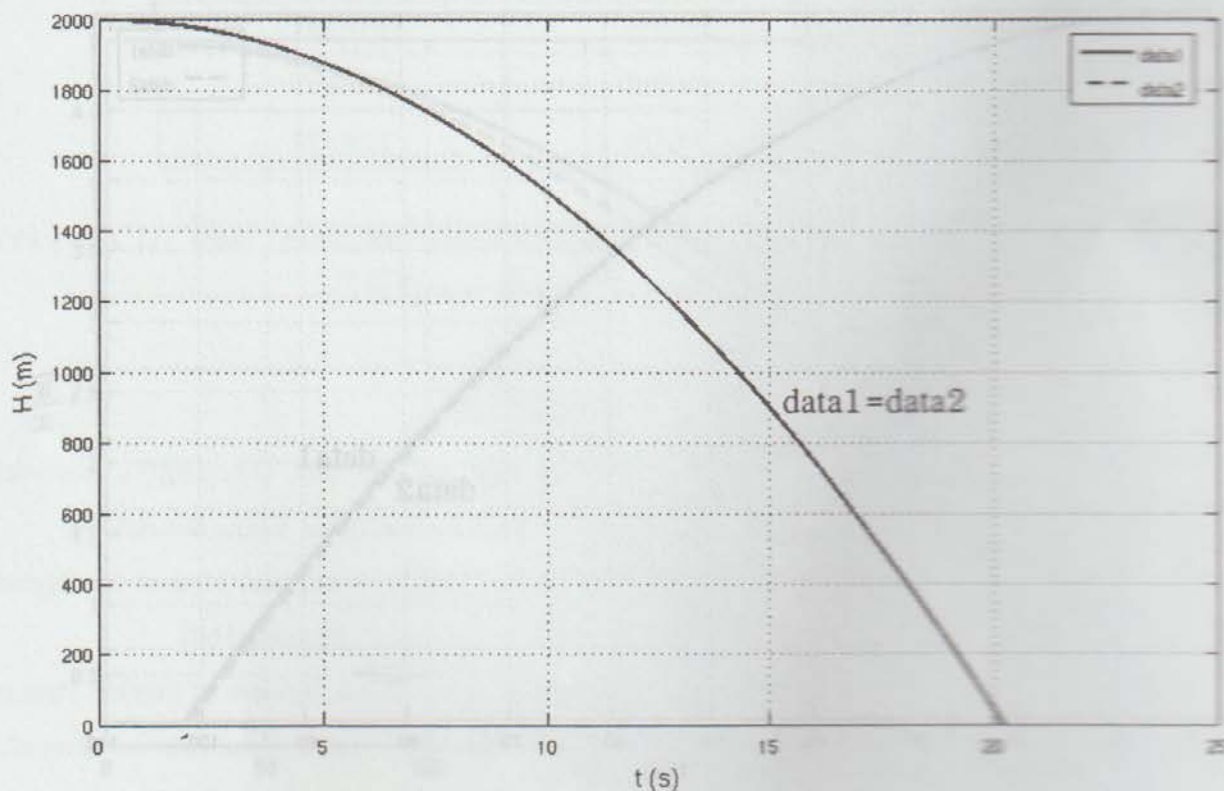
6. นำค่า  $x$  และ  $v$  ที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 5 นำไปคำนวณซ้ำเรื่อยๆจนกว่าจะได้เวลาสุดท้าย ( $T$ ) (โดยที่จำนวนที่ทำการคำนวณซ้ำ ( $N$ ) จะเท่ากับ  $T/h$ )

## ผลการคำนวณ

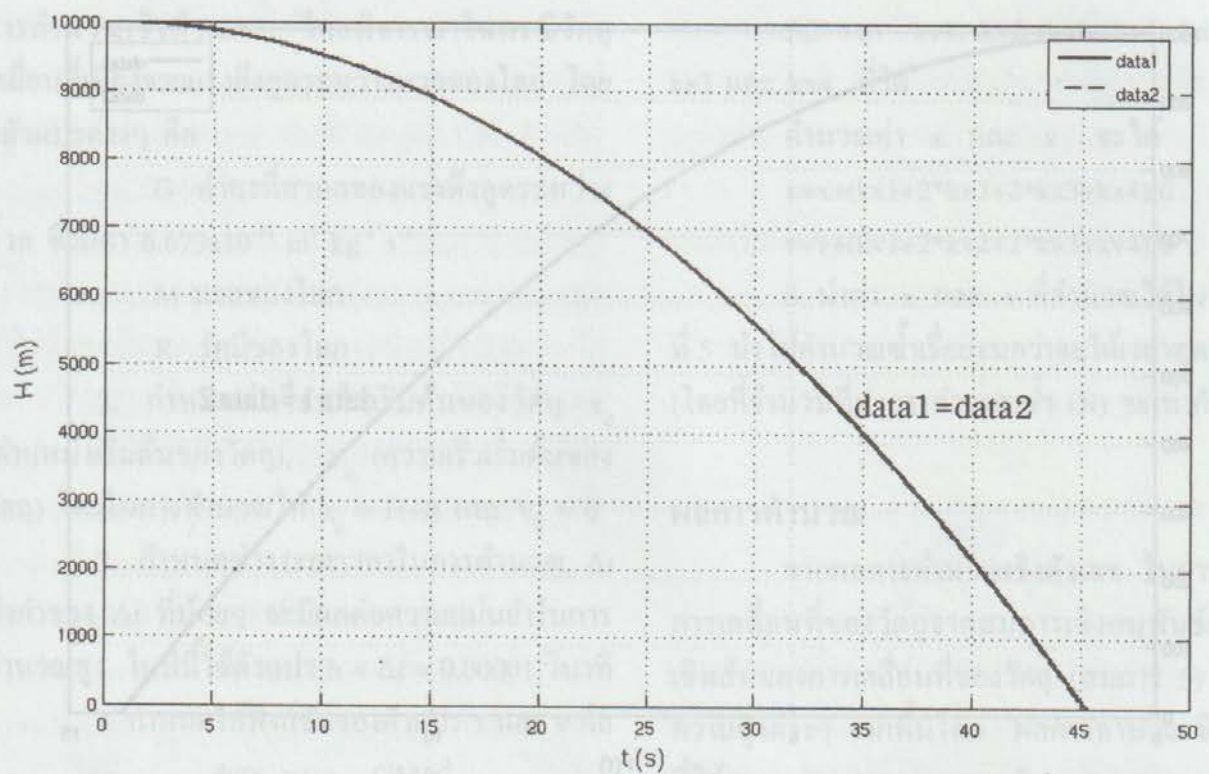
จากผลการคำนวณเชิงตัวเลข ในการจำลองการเคลื่อนที่ของวัตถุจากสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้นของการเคลื่อนที่ของวัตถุ (สมการ 5) ที่ระยะความสูงต่างๆ จากพื้นโลก ผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้ของระยะความสูง ( $H$ ) กับ เวลา ( $t$ ) แสดงดังรูปที่ 2 ถึง รูปที่ 7 โดยในแต่ละรูปนั้น ได้เปรียบเทียบกับผลเฉลยสมการการเคลื่อนที่ของวัตถุในกรณีอย่างง่าย (สมการ 7)



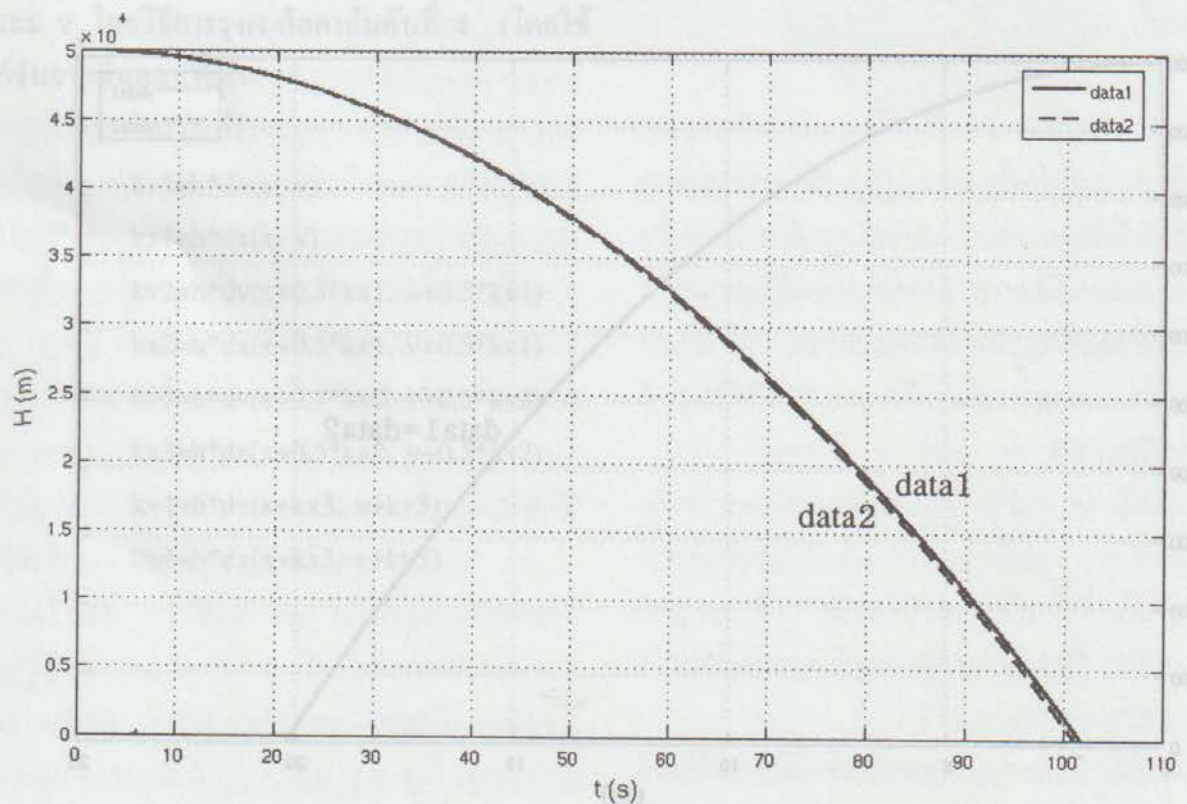
รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา(t) กับตำแหน่งของวัตถุ(H) เมื่อวัตถุเคลื่อนที่จากระยะ 1,000 เมตร โดยที่ data1 คือผลการคำนวณที่ได้จาก สมการ(5) และ data2 คือ ผลที่ได้จาก สมการ(7)



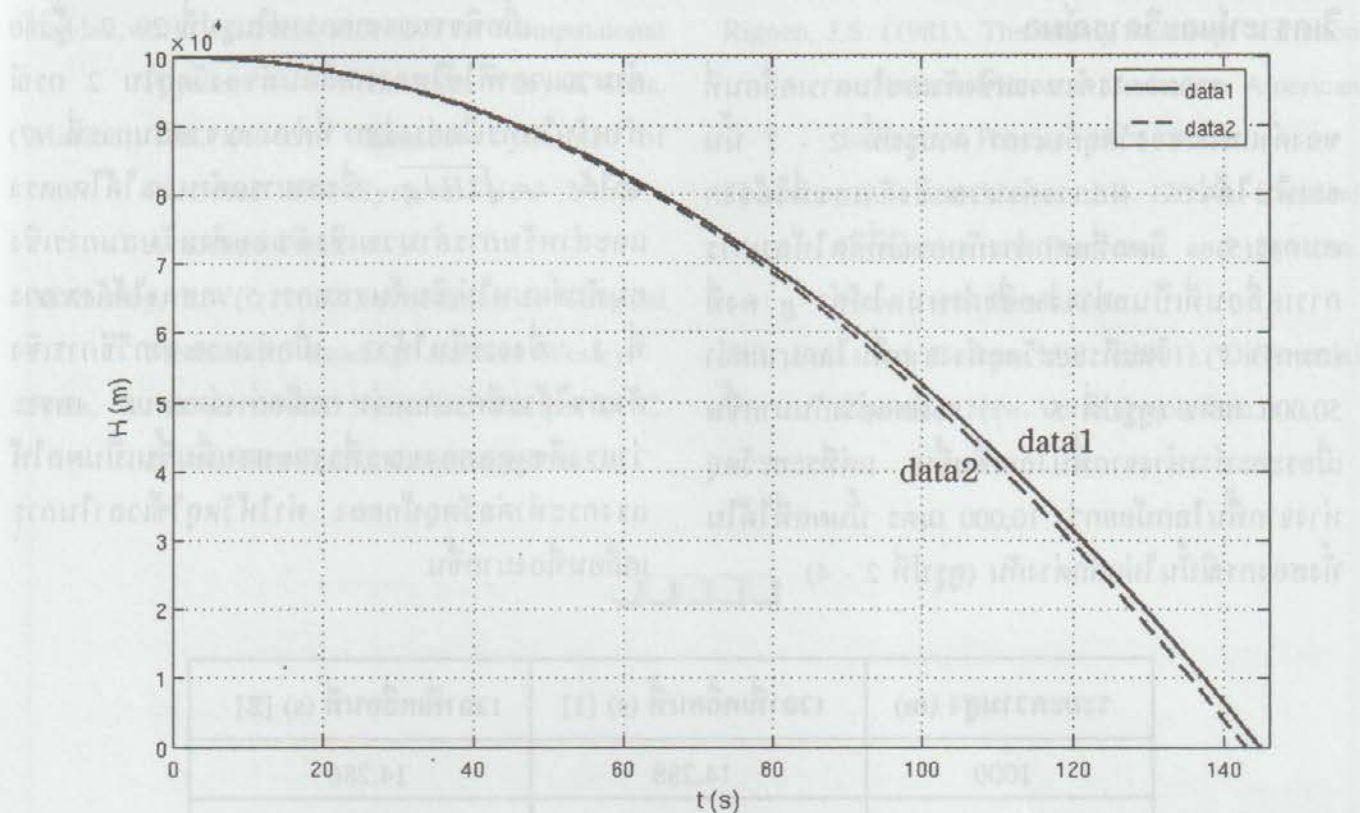
รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา(t) กับตำแหน่งของวัตถุ(H) เมื่อวัตถุเคลื่อนที่จากระยะ 2,000 เมตร โดยที่ data1 คือผลการคำนวณที่ได้จาก สมการ(5) และ data2 คือ ผลที่ได้จาก สมการ(7)



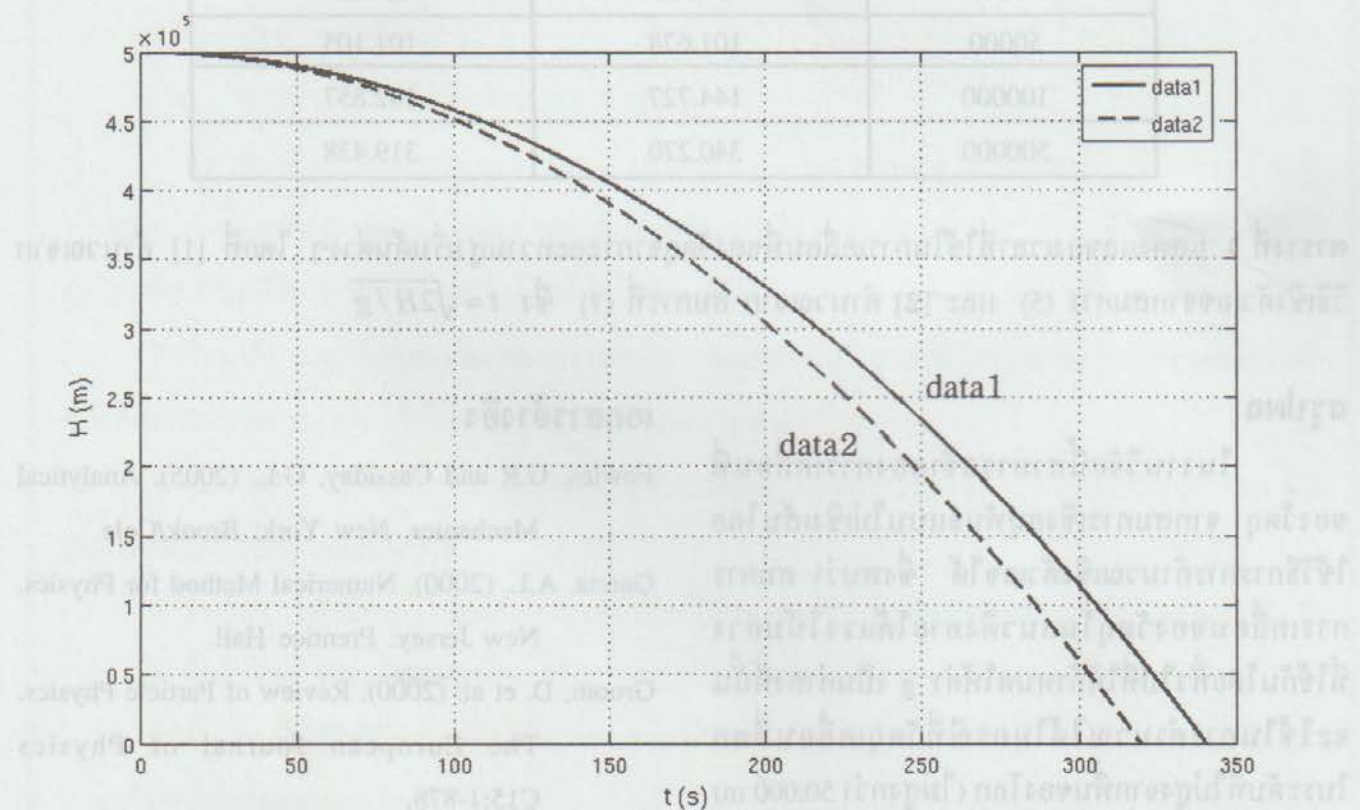
รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา(t) กับตำแหน่งของวัตถุ(H) เมื่อวัตถุเคลื่อนที่จากระยะ 10,000 เมตร โดยที่ **data1** คือผลการคำนวณที่ได้จาก สมการ(5) และ **data2** คือ ผลที่ได้จาก สมการ(7)



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา(t) กับตำแหน่งของวัตถุ(H) เมื่อวัตถุเคลื่อนที่จากระยะ 50,000 เมตร โดยที่ **data1** คือผลการคำนวณที่ได้จาก สมการ (5) และ **data2** คือ ผลที่ได้จาก สมการ (7)



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา(t) กับตำแหน่งของวัตถุ(H) เมื่อวัตถุเคลื่อนที่จากระยะ 100,000 เมตร โดยที่ **data1** คือผลการคำนวณที่ได้จาก สมการ (5) และ **data2** คือ ผลที่ได้จาก สมการ (7)



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา(t) กับตำแหน่งของวัตถุ(H) เมื่อวัตถุเคลื่อนที่จากระยะ 500,000 เมตร โดยที่ **data1** คือผลการคำนวณที่ได้จาก สมการ (5) และ **data2** คือ ผลที่ได้จาก สมการ (7)

## วิเคราะห์และวิจารณ์ผล

จากผลการคำนวณเชิงตัวเลขในการเคลื่อนที่ของตำแหน่งของวัตถุกับเวลา ตามรูปที่ 2 - 7 นั้น จะเห็นได้ว่า ผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้จากสมการ (5) มีผลที่แตกต่างกับกรณีที่เกิดให้สมการเคลื่อนที่เป็นอย่างง่ายซึ่งกำหนดให้ค่า  $g$  คงที่ (สมการ 7) โดยที่ระยะวัตถุห่างจากพื้นโลกมากกว่า 50,000 เมตร (ดูรูปที่ 5 - 7) จะมีผลต่างกันมากขึ้น เมื่อระยะห่างจากพื้นโลกเพิ่มขึ้น แต่ที่ระยะวัตถุห่างจากพื้นโลกน้อยกว่า 10,000 เมตร นั้นผลที่ได้ในทั้งสองกรณีนั้นไม่แตกต่างกัน (ดูรูปที่ 2 - 4)

เมื่อพิจารณาจากกราฟในรูปที่ 2 - 7 ผู้วิจัยคำนวณเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของวัตถุใน 2 กรณีสำหรับในกรณีอย่างง่าย ที่คำนวณจากสมการที่ (7) จะได้  $t = \sqrt{2H/g}$  ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยตรง และสำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้น (สมการ 5) แสดงได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อคำนวณจากวิธีการเชิงตัวเลขได้จะมีค่ามากกว่า กรณีอย่างง่ายเสมอ เพราะว่าแรงดึงดูดลดลงขณะที่ระยะทางเพิ่มขึ้นเป็นผลให้แรงกระทำต่อวัตถุน้อยลง ทำให้วัตถุใช้เวลาในการเคลื่อนที่ลงมากขึ้น

| ระยะความสูง (m) | เวลาที่เคลื่อนที่ (s) [1] | เวลาที่เคลื่อนที่ (s) [2] |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|
| 1000            | 14.288                    | 14.286                    |
| 2000            | 20.209                    | 20.203                    |
| 5000            | 31.965                    | 31.944                    |
| 10000           | 45.235                    | 45.175                    |
| 20000           | 64.056                    | 63.888                    |
| 50000           | 101.678                   | 101.105                   |
| 100000          | 144.727                   | 142.857                   |
| 500000          | 340.270                   | 319.438                   |

ตารางที่ 1 แสดงผลของเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของวัตถุจากระยะความสูงเริ่มต้นต่างๆ โดยที่ [1] คำนวณจากวิธีเชิงตัวเลขจากสมการ (5) และ [2] คำนวณจาก สมการที่ (7) ซึ่ง  $t = \sqrt{2H/g}$

## สรุปผล

ในงานวิจัยนี้สามารถจำลองการเคลื่อนที่ของวัตถุ จากสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้นโดยใช้วิธีการการคำนวณเชิงตัวเลขได้ ซึ่งพบว่า สมการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวตั้งภายใต้แรงโน้มถ่วงที่ใช้กันโดยทั่วไปที่ให้กำหนดให้ค่า  $g$  เป็นค่าคงที่นั้น จะใช้ในการคำนวณได้ในกรณีที่วัตถุเคลื่อนที่ตกในระดับที่ไม่สูงจากพื้นของโลก (ไม่สูงกว่า 50,000 m) หากวัตถุเคลื่อนที่ตกในระดับความสูงมากกว่านั้นต้องพิจารณาจากสมการการเคลื่อนที่ที่มีรูปแบบไม่เชิงเส้น (สมการ 5) เนื่องจากค่า  $g$  มีค่าไม่คงที่

## เอกสารอ้างอิง

- Fowles, G.R and Cassiday, G.L. (2005). Analytical Mechanics. New York: Brook/Cole
- Garcia, A.L. (2000). Numerical Method for Physics. New Jersey: Prentice Hall.
- Groom, D. et al. (2000). Review of Particle Physics. The European Journal of Physics C15:1-878.
- Hewitt, P. (2002). Conceptual Physics 9<sup>th</sup> ed. San Francisco: Addison Wesley.

- Landau, R.H. and Paez, M.J. (1997). Computaional Physics. New York: John Wiley & Sons.
- Marion, J.B. (1965). Classical Dynamics of Particles and System. New York : Academic Press.
- McCuskey, S.W. (1963). Introduction to Celestial Mechanics. Reading: Addison Wesley.
- Press, W. et al. (1992). Numerical Recipes in C. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Cambridge Press.
- Rignen, J.S. (1981). The falling raindrop: Variation on theme of Newton Mechanics. American Journal of Physics. 49: 113-116.
- Thornton, S.T. and Marion, J.B. (2004). Classical Dynamics of Particles and System. New York: Brook/Cole.
- Zill, D.G. and Cullen, M.R. (2001). Differential Equation. New York: Brook/Cole.





# ข้อแนะนำในการเขียนบทความลงวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

## ประเภทของเรื่องที่จะตีพิมพ์

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

## รูปแบบของการเขียนและเตรียมต้นฉบับ

1. ต้นฉบับ ต้องเป็นตัวพิมพ์ Angsana New
  - 1.1 ชื่อเรื่อง ขนาดตัวอักษร 20 ตัวเข้ม ตำแหน่งตรงกลาง
  - 1.2 ชื่อผู้เขียน ขนาดตัวอักษร 16 เอน ตำแหน่งขวาสุด และใส่หมายเลขไว้ท้ายนามสกุล เพื่อการระบุที่อยู่ด้านล่าง
  - 1.3 หัวข้อใหญ่ในแต่ละส่วน ขนาดตัวอักษร 16 ตัวเข้ม ตำแหน่งซ้ายสุด ยกเว้น บทคัดย่อ และ Abstract อยู่ตรงกลาง หัวข้อย่อยตามความเหมาะสม
  - 1.4 เนื้อความ ขนาดตัวอักษร 14
  - 1.5 คำว่า รูปที่ x และตารางที่ x ขนาดตัวอักษร 14 ตัวเข้ม ส่วนข้อความบรรยายต่อท้ายตัวปกติ
  - 1.6 ที่อยู่ ขนาดอักษร 12
  - 1.7 ช่องว่างระหว่างบรรทัดตามมาตรฐาน
  - 1.8 พิมพ์ลงในกระดาษขาว A4 (โรเนียวสัน) โดยใช้กระดาษหน้าเดียว ความยาวไม่เกิน 10 หน้า ส่งต้นฉบับ 2 ชุด (ไม่ต้องส่งแผ่นดิสก์ หรือแผ่นซีดีในขั้นตอนนี้ เมื่อได้รับแจ้งว่าได้ลงพิมพ์แล้ว ผู้เขียนส่งฉบับแก้ไข 1 ชุด พร้อมแผ่นดิสก์ หรือแผ่นซีดี)
2. ต้นฉบับ จะถูกพิจารณาโดยกองบรรณาธิการ และจะตอบรับการได้รับบทความโดยไม่ส่งต้นฉบับคืน ผู้เขียนควรจะทำสำเนาเก็บไว้เป็นหลักฐานของตัวเอง 1 ฉบับ
3. ต้นฉบับ จะต้องมีความถูกต้องทั้งในด้านเนื้อหา และการใช้ภาษา รวมทั้งมีความสมบูรณ์ในรูปแบบพร้อมที่จะนำลงตีพิมพ์ได้
4. ชื่อเรื่อง ให้ใช้ภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ไม่ยาวเกินไป และหลีกเลี่ยงการใช้คำย่อโดยไม่จำเป็น
5. ชื่อผู้เขียน เขียนชื่อภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษพร้อมทั้งบอกสถานที่ทำงานให้ชัดเจน
6. เนื้อเรื่อง ใช้ได้ทั้งภาษาไทยล้วนและภาษาอังกฤษล้วน ถ้าใช้ภาษาไทย ภาษาอังกฤษที่ใช้ปนกับภาษาไทยนั้นให้พยายามแปลเป็นไทยเท่าที่จะทำได้ และให้เขียนคำเดิมกำกับในวงเล็บ การทับศัพท์ภาษาอังกฤษ ตลอดทั้งการเขียนตัวสะกด การันต์ ในภาษาไทยให้ใช้ตามแบบราชบัณฑิตยสถาน

## ข้อแนะนำในการเขียนบทความลงวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

7. ในกรณีของบทความวิจัย ต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ และแบ่งเนื้อหาของบทความเป็นบทนำ วิธีดำเนินงาน ผลการวิเคราะห์ บทสรุปและวิจารณ์

8. เชิงอรรถ (footnote) ใช้เฉพาะที่จำเป็นเพื่อขยายหรือให้รายละเอียดเพิ่มเติมแก่ใจความเฉพาะตอนในบทความ

9. ตารางและภาพประกอบ คำบรรยายประกอบตารางหรือภาพประกอบควรจะสั้นและชัดเจน ถ้าเป็นภาพถ่ายให้ใช้ภาพขาว-ดำ ขนาดโปสการ์ด ภาพเขียนลายเส้นควรเขียนด้วยหมึกดำ ภาพที่เขียนต้องชัดเจนและมีขนาดที่เหมาะสม

10. เอกสารอ้างอิง หรือบรรณานุกรม แนะนำให้เขียนตามแบบที่ทางวารสารกำหนด

### ส่งต้นฉบับมาที่

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

### อภินันทนาการสำหรับผู้เขียน

เรื่องที่ได้รับการตีพิมพ์ ผู้เขียนจะได้รับวารสารฉบับนั้น 2 เล่ม และสำเนาพิมพ์อีก 15 ชุด

## ตัวอย่าง

# การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันและกรดไขมันของจิ้งหรีดทองลาย (*Gryllus* sp.) ที่เลี้ยงเพื่อการค้า

บรรจง เชื้อเมืองพาน<sup>1</sup> วิรัช ว่องพัฒน์กุล<sup>2</sup> และ ปวีณา พงษ์ดนตรี<sup>1\*</sup>

## บทคัดย่อ

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX  
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

## บทนำ

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX  
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX  
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

## วิธีการ

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX  
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX  
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

รูปที่ 1 XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

ตารางที่ 1 XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

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

<sup>2</sup> ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

\* correspondening author, E-mail

## การเขียนเอกสารอ้างอิงในวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

**เอกสารอ้างอิง (Reference)** หมายถึง เอกสารหรือส่วนหนึ่งของเอกสารที่อ้างอิงถึงหรือแปลมาโดยตรง การเขียนเอกสารอ้างอิงในเนื้อหานี้ ให้ใช้ระบบชื่อและปี เช่น Williams (2001) รายงานว่า... หรือ... (Williams, 2001) การเขียนเอกสารอ้างอิงในตอนท้ายบทความนั้น ให้ใส่เฉพาะเล่มที่มีการอ้างอิงไว้ในเนื้อหาเท่านั้น หากอ้างอิงจาก เล่มภาษาไทย ต้องเขียนทั้งชื่อและนามสกุล

**บรรณานุกรม (Bibliography)** หมายถึง เอกสารที่ใช้อ้างอิงในลักษณะที่สรุปเป็นหลักการหรือทฤษฎีโดยมิได้อ้างอิงหรือแปลมาโดยตรง

การเขียนเอกสารอ้างอิง หรือบรรณานุกรม มีแนวทางการเขียนดังนี้

### 1. หนังสือ

ก. ภาษาไทย

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

ข. ภาษาอังกฤษ

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

### 2. เอกสารราชการ

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

### 3. วารสาร

ก. ภาษาไทย

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

ข. ภาษาอังกฤษ

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

### หมายเหตุ

- 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

# หนังสือในโครงการผลิตตำรา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



## สถิติพื้นฐาน

พร้อมตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม  
MINITAB SPSS และ SAS

รองศาสตราจารย์ ชัชวาลย์ เรืองประพันธ์  
พิมพ์ครั้งที่ 5 2543 • 510 หน้า

ISBN 974-675-666-4

ราคา 180 บาท



## แมงป่องข้าง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทักดา ดาแดง  
นางสาวนันท์วัน เอื้อวงศ์กุล

2547 • 64 หน้า

ISBN 974-435-571-9

ราคา 160 บาท



## หลักการเบื้องต้นและการประยุกต์ใช้ เทคนิคคู่ควบในเคมีวิเคราะห์

รองศาสตราจารย์ ดร. ทักดิษฐ์ จันทน์ไทย

2543 • 202 หน้า

ISBN 974-678-333-2

ราคา 150 บาท



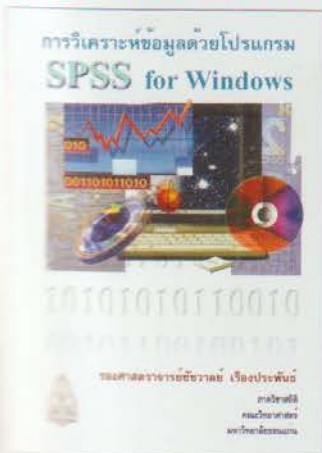
## สเปกโทรสโกปี ในการพิสูจน์ โครงสร้างของสารอินทรีย์

รองศาสตราจารย์ ดร. สมเดช กนกเมธากุล

2547 • 238 หน้า

ISBN 974-435-348-1

ราคา 150 บาท



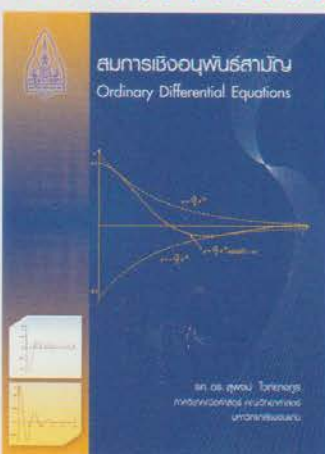
## การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม SPSS for Windows

รองศาสตราจารย์ ชัชวาลย์ เรืองประพันธ์

2544 • 620 หน้า

ISBN 974-654-608-2

ราคา 300 บาท



## สมการเชิงอนุพันธ์สามัญ Ordinary Differential Equations

รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ ไวทย์ยางกูร

2550 • 470 หน้า

ISBN 978-974-7707-55-7

ราคา 240 บาท



## การวิเคราะห์ฟังก์ชันคลื่นแนะนำ

รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ ไวทย์ยางกูร

2547 • 344 หน้า

ISBN 974-367-958-8

ราคา 200 บาท



## เคมีเฮเทอโรไซคลิกแอโรแมติก Aromatic Heterocyclic Chemistry

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ หาญวงนงศ์

2550 • 122 หน้า

ISBN 978-974-7707-71-7

ราคา 90 บาท

