

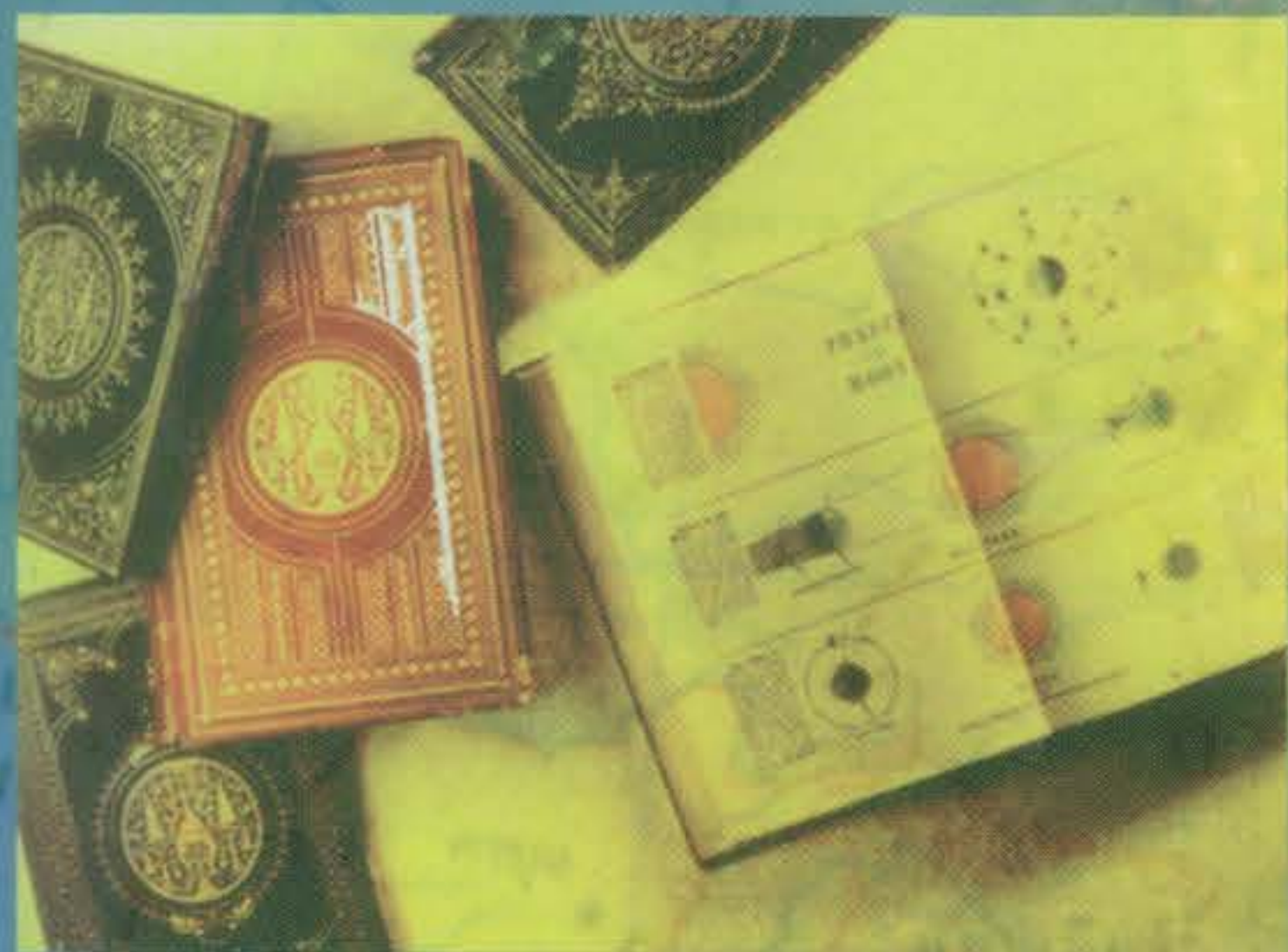


วารสาร

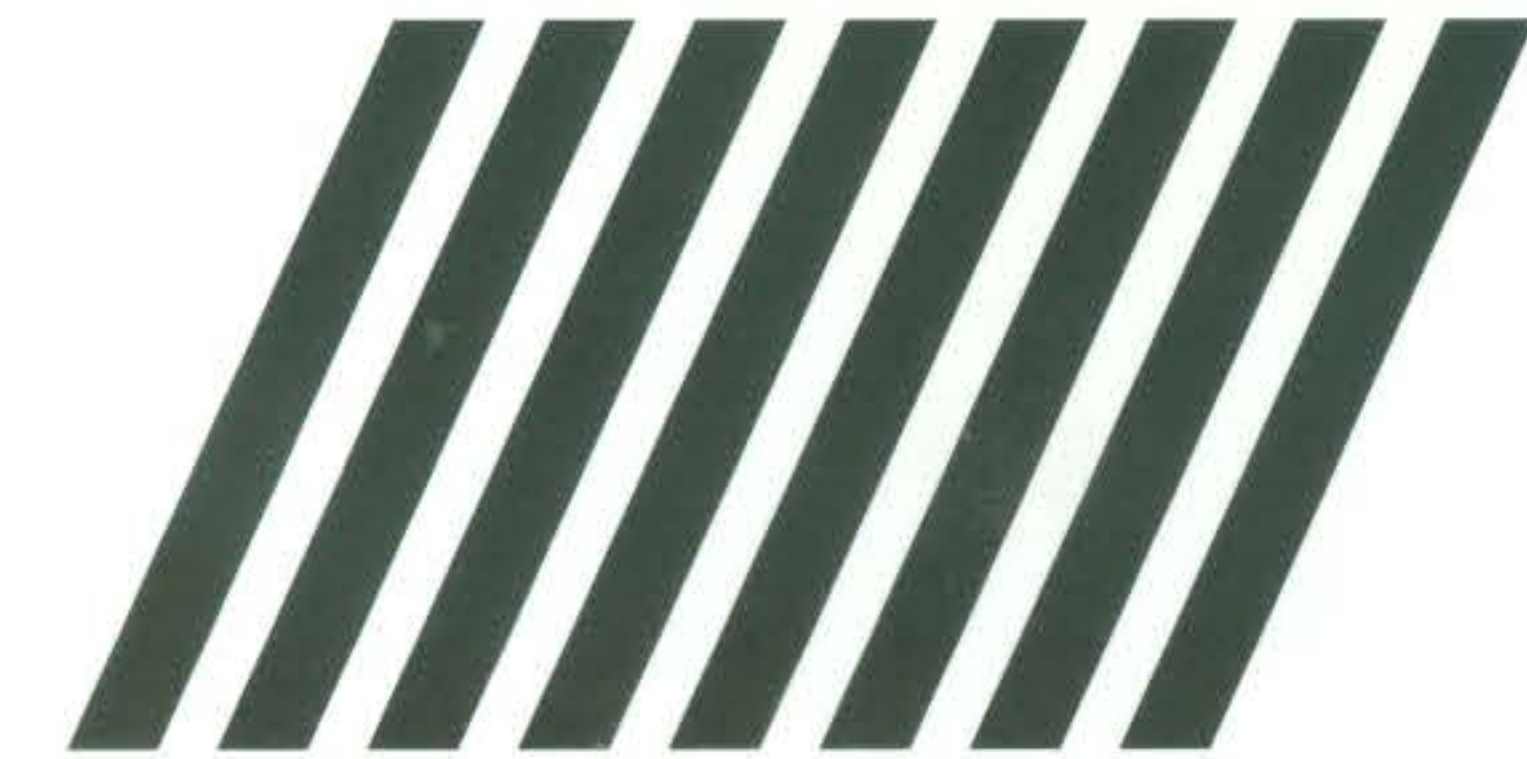
วิทยาศาสตร์มข.

KKU SCIENCE JOURNAL

ปีที่ 32 ฉบับที่ 4 (ค.ศ.-จ.ศ. 47) Vol.32 No. 4 (Oct.-Dec. '04)



20.-



วารสาร
วิทยาศาสตร์ปูช.
KKU SCIENCE JOURNAL

เจ้าของ

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สำนักงาน

คณะวิทยาศาสตร์ ตึก 6 มหาวิทยาลัยขอนแก่น

วัตถุประสงค์

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

กำหนดออก ปีละ 4 ฉบับ

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

ค่าบำรุง ปีละ 75 บาท ขายปลีกเล่มละ 20 บาท

การบอกรับเป็นสมาชิก

แจ้งความจำนงค์เป็นจดหมายหรือกรอกใบสมัครเป็นสมาชิก พร้อมค่าบำรุงเป็นธนาคัตติ หรือเช็คไปรษณีย์ ในนามของนางบุญคุ้ม เหลือล้น ฝ่ายจัดการส่งจ่าย ป.ท. มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

ที่ปรึกษา

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
รองคณบดีฝ่ายวิชาการ

บรรณาธิการ

มานิตย์ โหมิตตระกูล

กองบรรณาธิการ

เฉลิม เรืองวิริยะชัย

สมเดช กนกเมธากุล

ศักดิ์สิทธิ์ จันทรไทย

บำรุง สมสวัสดิ์

วิทยา อมรกิจบำรุง

ประนอม จันทรโณทัย

นฤมล แสงประดับ

เสาวนิต ทองพิมพ์

พิสิฏฐ์ เจริญสุดใจ

เที่ยง ภูมิสะอาด

อำนวย มณีศรีวงศ์กุล

บุญทรัพย์ ไวกำ

ฝ่ายศิลปและภาพ

กิเลน ดิณนรเศรษฐ์

บุญส่ง กองสุข

ฝ่ายเหรียญก

บุญคุ้ม เหลือล้น

ฝ่ายจัดการและ

ทัศนีย์ จิตตะกวี

เลขานุการ

สมศักดิ์ อุ้นจันท์

สุคนธ์ กลิ่นผกา

**บทความและงานวิจัย
ได้รับการกลั่นกรอง
จากผู้ทรงคุณวุฒิ**

บทความหรือข้อคิดเห็นใด ๆ ในวารสารนี้เป็นของผู้เขียน ไม่จำเป็นต้องสอดคล้องกับทัศนะของกองบรรณาธิการ

วารสาร

วิทยาศาสตร์ชุมชน

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

ปีที่ 32 ฉบับที่ 4

Volume 32 Number 4

บรรณาธิการแถลง

บทความ

- ☐ พระอัจฉริยภาพทางวิทยาศาสตร์ใน
พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว
 ชาว เหมือนวงศ์..... 201
- ☐ วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกและเทคโนโลยี
 จินดา เข้มประสิทธิ์..... 240
- ☐ เซลล์ต้นตอจากตัวอ่อน: แนวทางใหม่
ในการรักษาโรค
 ชูชาติ กมลเลิศ..... 250
- ☐ การสันฟ้องแม่เหล็กนิวเคลียส
 วิวัฒน์ ยงค์..... 259

วารสาร

วิทยาศาสตร์สุขภาพ

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

ปีที่ 32 ฉบับที่ 4

Volume 32 Number 4

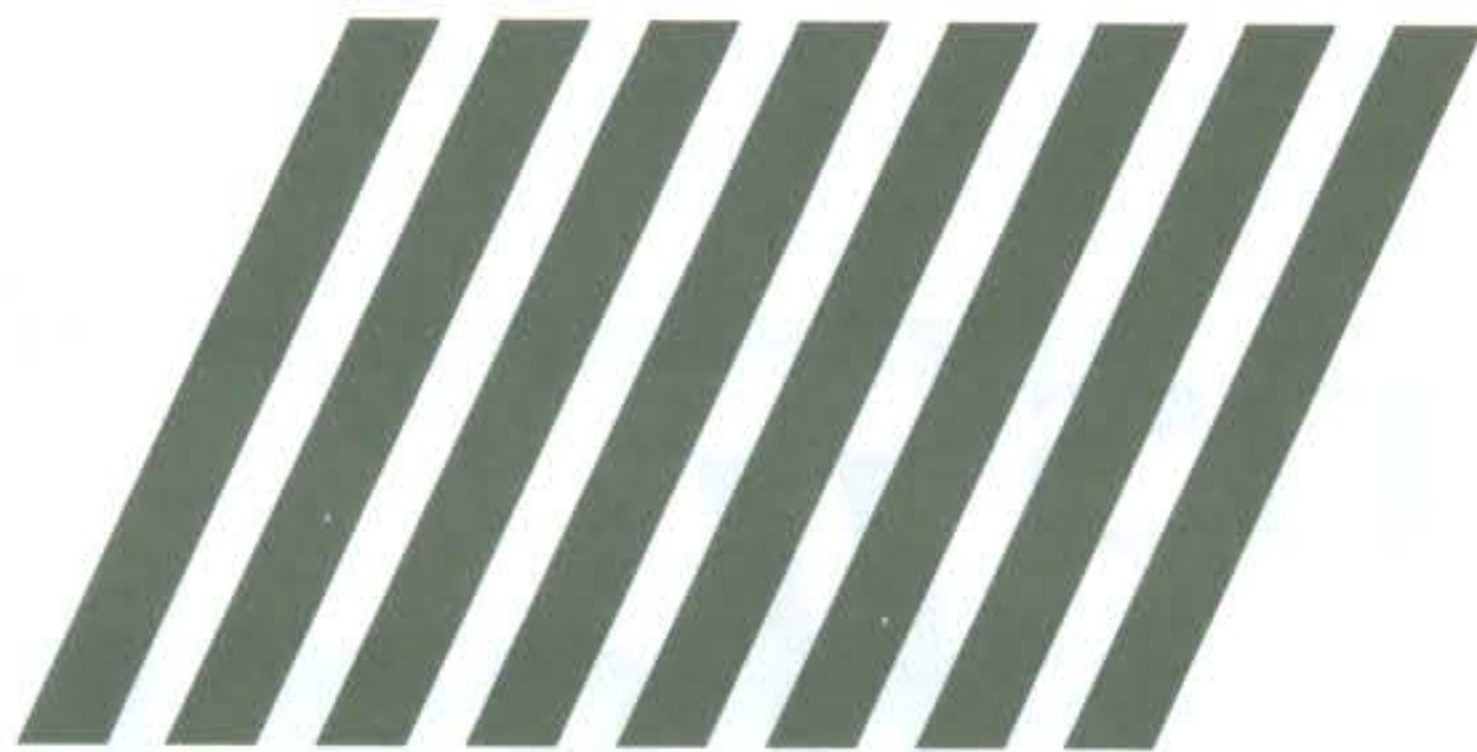
งานวิจัย

- ☐ Biological Activities of Coumarins from
Lepisanthes rubiginosa (Roxb.) Leenh.
Chavi Yenjai Supawadee Daodee
Varima Wongpanich and Prasat Kittakoop..... 265

- ☐ ความสัมพันธ์ระหว่างสีของเนื้อเหง้ากระชายดำ
กับฤทธิ์ต้านการเกิดอนุมูลอิสระ
เสริมสกุล พจนการุณ และไชยขง รุจจนเวท 270

- ☐ ผลของ Indole Acetic Acid และ Benzyl Adenine
ต่อการเจริญเติบโตของปลายยอดว่านน้ำ
(*Acorus calamus* Linn.) ในสภาพปลอดเชื้อ
ศรีสุลักษณ์ ธีรานุพัฒนา กอบเกียรติ แสงนิล
และอารยา จาติเสถียร..... 278

- ☐ วิธีสมาชิกจำกัดกาเลอรีน สำหรับปัญหามลพิษ
ทางอากาศสถานะอยู่ตัว
สุวรรณ มุลสาร และสุพจน์ ไวทยางกูร..... 286



วิทยาาสตร์
KKU SCIENCE JOURNAL

Publisher

Faculty of Science, Khon Kaen University,
Thailand.

Office

Faculty of Science, Building 6, Khon Kaen
University.

Objectives

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

Publishing frequency

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

Number 1 January - March

Number 2 April - June

Number 3 July - September

Number 4 October - December

Subscription rate

75 baht per annum. Single issue price 20 baht.

Membership

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

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

Editor Maniit Kosittrakun

Editorial Board Chalerm Rungviriyachai
Somdej Kanokmedhakul
Saksit Chanthai
Bamrung Somsawasdi
Vittaya Amornkitbamrung
Pranom Chantaranonthai
Narumom Sangpradub
Saowanit Tongpim
Pisit Chareonsudjai
Tiang Poomksa-ard
Amnuay Maneesriwongkul
Boonsup Waikham

Artists Kilen Tinnoraset

Boonsong Koungsook

Treasurer Boonkoom Lualon

Manging Staff Tassanee Jittakhawee
And Secretary Somsak Unjantee
Sukhon Klinpaka

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

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

บรรณาธิการ

แสง

กองบรรณาธิการฯ ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิดังต่อไปนี้ที่ได้พิจารณาบทความซึ่งได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์ มข. ปีที่ 32 ฉบับที่ 1-ฉบับที่ 4

- ผศ.งามนิจ นนทโส
- ดร.จันทร์เพ็ญ โทมัส
- รศ.ดร.เฉลิม เรืองวิริยะชัย
- รศ.ดร.ฉลอง วชิราภากร
- ผศ.ดร.ชูศักดิ์ พูนสวัสดิ์
- รศ.ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง
- ดร.ธนุสิทธิ์ บุรินทร์ประโคน
- ผศ.ดร.นิภา มลิณฑวิสมัย
- รศ.ดร.นิรันดร์ สัตยาชัย
- ผศ.นิยะดา ห่อนาค
- ผศ.ดร.นฤมล แสงประดับ
- รศ.ดร.ประสิทธิ์ ใจศีล
- ผศ.ปัญญาพล หอระตะ
- ดร.วัฒนา เกาว์ทิพย์
- ผศ.ดร.ศาสตรา วงศ์ธนวุธ
- ดร.สัมภาษณ์ คุณสุข
- รศ.ดร.สุนนทิพย์ บุนนาค
- รศ.ดร.สมเดช กนกเมธากุล
- ผศ.ดร.อังฉรา ธรรมถาวร
- ผศ.เอก วัฒนา

บรรณาธิการ

พระอัจฉริยภาพทางวิทยาศาสตร์ ใน พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว

ชาว เหมือนวงศ์¹



บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงพระอัจฉริยภาพทางวิทยาศาสตร์ และพระปรีชาสามารถทางการคำนวณชั้นสูง ในองค์พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว จากการที่ได้ทรงมีพระราชกรณียกิจที่สำคัญ ๒ ประการ คือ ทรงสถาปนาระบบเวลามาตรฐานของประเทศไทยและทรงคำนวณพยากรณ์การเกิดสุริยุปราคาที่มีคัมภีร์ดวง ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อวันที่ ๑๘ สิงหาคม พ.ศ. ๒๔๑๑ ล่วงหน้า และได้เสด็จพระราชดำเนินสังเกตการณ์เพื่อทดสอบ ณ หวัดกอ ประจวบคีรีขันธ์ ได้ผลถูกต้องตามที่ทรงคำนวณ จึงทรงได้รับการถวายพระราชสมัญญาว่าพระบิดาแห่งวิทยาศาสตร์ไทยในวาระสมโภชกรุงรัตนโกสินทร์ ๒๐๐ ปีเมื่อปี พ.ศ. ๒๕๒๕ จึงถือว่าวันที่ ๑๘ สิงหาคม ของทุกปี เป็นวันวิทยาศาสตร์แห่งชาติ เพื่อเทิดพระเกียรติพระองค์ผู้ทรงเป็นผู้พระราชทานปฐมบทและทรงวางรากฐานทางวิทยาศาสตร์ของชาติ นำมาซึ่งเกียรติภูมิอันสูงส่งของประเทศไทย

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

บทนำ

เนื่องในวโรกาสฉลองกรุงรัตนโกสินทร์ มีอายุครบ ๒๐๐ ปีในปี พ.ศ. ๒๕๒๕ สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ เห็นเป็นการสมควรให้ทำการศึกษาหาความจริงในเหตุการณ์ซึ่งได้ปรากฏในพระราชพงศาวดารกรุงรัตนโกสินทร์ว่าพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวรัชกาลที่ ๔ ได้ทรงคำนวณพยากรณ์ล่วงหน้าการเกิดสุริยุปราคาเมื่อวันที่ ๑๘ สิงหาคม ๒๔๑๑ เป็นความจริงถูกต้องเพียงใด ทั้งนี้ต้องกระทำให้ละเอียดถูกต้องตามหลักวิชาดาราศาสตร์แห่งตะวันตกและตะวันออกด้วยความบริสุทธิ์เป็นกลาง ผลการศึกษาค้นคว้าครั้งนั้นสรุปได้ว่าพระองค์ท่านได้ทรงคำนวณด้วยพระองค์เองจริง ด้วยวิทยาการแผนใหม่ทั้งทางด้านดาราศาสตร์และคณิตศาสตร์ แม้ว่าอาจจะทรงใช้คัมภีร์เกตุมูลฐานของตะวันออกด้วยก็คงเป็นเพียงเพื่อการตรวจสอบกันเท่านั้น อีกทั้งปรากฏว่าผลการคำนวณของพระองค์ยังสามารถบอกได้ละเอียดด้วยว่าสุริยุปราคานั้นจะเห็นมีคติมืดดวงในประเทศไทยทางใต้ตั้งแต่ชุมพรถึงปราณบุรี แต่ที่กรุงเทพจะเห็นเป็นมืดบางส่วนและ ณ พลับพลาที่ประทับหัวกอ ประจวบคีรีขันธ์ จะเห็นมีคติมืดดวงตั้งแต่เวลาใด นานเท่าใด ซึ่งแตกต่างจากข้อมูลที่ปรากฏในคู่มือนักเดินเรือประจำปี ค.ศ. ๑๘๖๘ ที่หอูดาวกรีนนิชแห่งประเทศอังกฤษได้พิมพ์ออกเผยแพร่ให้นายเรือใช้ ซึ่งแสดงให้เห็นเพียงแนวทางเงามืดเพียงเส้นเดียวผ่านภาคใต้ประเทศไทย โดยเหตุนี้สมาคม ฯ จึงได้เสนอรัฐบาลให้นำความขึ้นกราบบังคมทูลพระกรุณาขอพระราชทานพระบรมราชานุญาตถวายพระราชสมัญญาแด่พระองค์ท่านว่าพระบิดาวิทยาศาสตร์แห่งชาติ ในวาระเฉลิมฉลองกรุงรัตนโกสินทร์มีอายุครบ ๒๐๐ ปี เพื่อเป็นมิ่งขวัญแก่วงการวิทยาศาสตร์ของชาติสืบไป

ผลจากการศึกษาการทรงคำนวณเนื่องในวาระฉลองกรุงครั้งนั้น ทำให้ได้พบความจริงที่เกี่ยวกับ

พระอัจฉริยภาพทางวิทยาศาสตร์ในพระจอมเกล้าเพิ่มอีกหลายประการ ที่นับว่าสำคัญมากต่อการถวายพระราชสมัญญา คือการที่พระองค์ท่านได้ทรงสถาปนาระบบเวลามาตรฐานประเทศไทย โดยได้ทรงใช้เส้นแวงที่ ๑๐๐ องศาตะวันออกซึ่งผ่านจังหวัดเพชรบุรีเป็นเส้นแวงหลักของเวลามาตรฐานไทยในสมัยนั้น โดยพระองค์ได้ทรงคำนวณเวลาการเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าย่ำรุ่ง และย่ำค่ำ เป็นรายวันทุกวันนับแต่ปี พ.ศ. ๒๔๐๐ พระราชทานให้เจ้าหน้าที่หอ นาฬิกาหลวงในพระบรมมหาราชวัง ทำการสังเกตการเกิดปรากฏการณ์นั้นแล้วตั้งเวลาให้นาฬิกาหลวงตามเวลาที่ได้ทรงคำนวณไว้ล่วงหน้า และได้ทรงใช้ระบบเวลานี้เป็นหลักในการทรงคำนวณการเกิดสุริยุปราคาในพระองค์ โดยเหตุนี้ทำให้สันนิษฐานได้ว่ามูลเหตุแห่งการสร้างพระนครคีรีที่เขาวังเพชรบุรีในปี ๒๔๐๒ นั้นก็เพราะเป็นสถานที่เส้นแวงหลักที่ ๑๐๐ องศาตะวันออกเมืองนี้ คงเป็นพระประสงค์ที่จะให้พระนครคีรีเป็นพระนครสำหรับรักษาเวลามาตรฐานไทย ทำนองเดียวกับที่อังกฤษได้สร้างกรีนนิชเป็นเมืองรักษาเวลามาตรฐานอยู่นอกกรุงลอนดอน และใช้เส้นแวงที่ผ่านเมืองนี้เป็นเส้นแวงหลักเพื่อรักษาเวลามาตรฐานของประเทศและต่อมาได้กลายมาเป็น prime meridian ของโลก

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาพบสิ่งอัศจรรย์ในพระบารมีแห่งองค์พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวอีกอย่าง คือ ได้พบว่าสุริยุปราคาในพระองค์ที่ทรงคำนวณว่าจะเห็นเป็นสรรพคราสในประเทศไทยในวันที่ ๑๘ สิงหาคม ๒๔๑๑ นั้น แท้จริงแล้วสมเด็จพระนารายณ์มหาราชได้ทอดพระเนตรที่ลพบุรีมาก่อนแล้ว คือเมื่อครั้งที่เกิดขึ้น เมื่อวันที่ ๓๐ เมษายน ๒๒๓๑ แต่โดยที่ในครั้งนั้นแนวสรรพคราสมิได้ผ่านประเทศไทย จึงทรงเห็นเป็นสุริยุปราคามืดบางส่วนเท่านั้น ทั้งนี้เพราะสุริยุปราคานี้อยู่ในสายพันธุ์ Saros เดียวกัน และได้ย้อนกลับมาเกิดให้เห็นในทุกๆรอบ Saros หรือ ทุก ๆ ช่วง ๖๕๘๕.๓ วัน

รัฐบาลจึงได้จัดงานที่ระลึกเพื่อเฉลิมฉลอง ชื่อว่า "๓๐๐ ปีพระนารายณ์ - ๑๒๐ ปีพระจอมเกล้า" เมื่อวันที่ ๓๐ เมษายน ๒๕๓๑ โดย สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ได้เสด็จพระราชดำเนินเป็นองค์ประธานเปิดงาน ณ พระนารายณ์ราชนิเวศลพบุรี โดยมีคณะทูตานุทูตของประเทศที่เคยมีความสัมพันธ์ทางการทูตกับไทยมาแต่สมัยกรุงศรีอยุธยาได้รับเชิญให้มาร่วมงาน เพื่อเป็นสักขีพยานในเกียรติภูมิทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของประเทศไทยนับแต่อดีตกาล และพระมหากษัตริย์ทั้งสองพระองค์นี้ได้ทรงมีพระมหากรุณาธิคุณอย่างยิ่งใหญ่ที่ได้ทรงรักษาเอกราชของชาติไทยให้รอดพ้นจากการเป็นอาณานิคมของมหาอำนาจในรัชสมัยของพระองค์โดยมิได้ทรงใช้การทหาร แต่โดยทรงใช้พระปรีชาสามารถอันสูงส่ง ทำให้ไทยคงเป็นไทยอยู่ได้ทุกวันนี้

โดยที่ในปี พ.ศ. ๒๕๔๗ นี้เป็นปีครบรอบ ๒๐๐ ปีแห่งพระราชสมภพในพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว องค์พระบิดาแห่งศาสตร์และศิลป์ในหลายสาขาวิชาการ และ วิชาชีพ ของประเทศไทย นอกเหนือจากด้านวิทยาศาสตร์ศาสตร์ จึงถือเป็นปีที่มีความสำคัญยิ่งของประเทศ สมควรที่หน่วยงานทั้งภาครัฐ เอกชน จะได้ร่วมกันจัดงานเพื่อเฉลิมฉลองในวาระมหามงคลนี้โดยทั่วกัน ซึ่งจะยังประโยชน์แก่การพัฒนาประเทศชาติ ทั้งทางด้านเศรษฐกิจและวิชาการโดยรวมต่อไป อีกทั้งยังก่อให้เกิดความสนใจในวิทยาการสาขาต่างๆของชาติในหมู่นุชน ให้มีกำลังใจมานะพยายามศึกษาพัฒนาให้เจริญยิ่งขึ้นเป็นประโยชน์แก่ประเทศชาติสืบไป

วันพระราชสมภพ

เนื่องในวโรกาส ๒๐๐ ปีแห่งวันพระราชสมภพในพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว รัชกาลที่ ๔ แห่งราชจักรีวงศ์ จึงเห็นเป็นการสมควรที่จะได้วิเคราะห์เหตุการณ์สำคัญยิ่งที่ได้บันทึกไว้ใน

ปลายรัชสมัยของพระองค์ คือ การที่ได้ทรงมาและอำลาที่ประชุมพระสงฆ์ก่อนสวรรคตเป็นภาษามคร ซึ่งตอนหนึ่งกล่าวเป็นคำแปลโดยสรุปว่า พระองค์จะต้องเสด็จสวรรคตใน วันมหาปวารณา ขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๑๑ นี้ซึ่งเป็นวันเดียวกันกับวันประสูติ และเป็นวันพทุหัสดีด้วยกันทั้งสองวาระ จึงขอมาต่อสงฆ์ และขอลา

พร้อมกันนี้ก็ได้อธิโอภาสแสดง พระประวัติโดยย่อ แห่งพระมหากษัตริย์เจ้าในราชจักรีวงศ์ จากรัชกาลที่ ๑ ถึง ที่ ๔ ที่กล่าวถึงเฉพาะวันสำคัญที่เกี่ยวข้องกับแต่ละพระองค์ โดยผู้เขียนได้ทำการชำระปฏิทิน ในการเปลี่ยนระบบระหว่างระบบปฏิทินประเพณีดั้งเดิมของไทยและระบบสากลแล้ว ด้วยหวังว่าจะเป็นประโยชน์แก่ท่านที่สนใจ

ปัญหาการเทียบปฏิทินของไทย เกิดจากการที่เราจำเป็นจะต้องใช้ปฏิทินระบบทางจันทรคติ เพราะประเทศไทยเป็นเมืองพุทธ จำเป็นจะต้องประกอบพิธีกรรมในวันสำคัญทางพุทธศาสนา เช่น วันมาฆบูชา วันวิสาขบูชา วันเข้าพรรษา จึงต้องใช้วันขึ้นแรม เป็นหลัก ซึ่งปรากฏว่า คติดวงจันทร์ไม่มีความสัมพันธ์กับการกำหนดวันที่ในปฏิทินสากล ซึ่งเป็นระบบสุริยคติ การเทียบวันเดือนปีระหว่างสองระบบจึงมีความจำเป็น แต่ปรากฏว่ามีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นมาก ปัญหาใหญ่เกิดจากระบบการเปลี่ยนปีเปลี่ยนวันที่สำคัญ พอสรุปได้ ดังนี้

๑. ปีคริสต์ศักราช (ค.ศ.) ในระบบสุริยคติสากล เปลี่ยนปีวันที่ ๑ มกราคม

๒. ปีนักษัตรของไทย (ปีชวด ฉลู ขาลเถาะ) เปลี่ยนปีในวันขึ้น ๑ ค่ำ เดือน ๕ หรือ อีกนัยหนึ่งเดือนสุดท้ายของปี คือ เดือน ๔ มิใช่เดือน ๑๒

๓. ปีจันทรคติ เป็นปีอย่างเดียวกันกับปีนักษัตร แต่เดือนสุดท้ายของปีเป็น เดือน ๑๒ เปลี่ยนปี วันขึ้น ๑ ค่ำเดือนหนึ่ง หรือ เดือนอ้ายแบ่งเป็น ๓ ชนิด คือ

๓.๑ ปีปรกติมาส ปรกติวาร มี ๑๒ เดือน ให้เดือนที่เป็นเดือนขาด มี ๒๕ วัน เดือนคู่เป็นเดือนเต็ม มี ๓๐ วัน รวมทั้งปีมี ๓๕๔ วัน

๓.๒ ปีปรกติมาส อธิกวาร มี ๑๒ เดือน แต่ให้เดือน ๗ เป็นเดือนเต็ม รวมทั้งปีมี ๓๕๕ วัน

๓.๓ ปีอธิกมาส ปรกติวาร มี ๑๓ เดือน โดยให้เพิ่มเดือน ๘ อีกหนึ่งเดือน รวมทั้งปีมี ๓๕๔ วัน การที่ต้องเพิ่มเดือน ๘ ก็เพราะต้องการจะไล่ฤดูฝนให้ทัน เพราะปีจันทรคติมีจำนวนวันน้อยกว่าปีสุริยคติ ดังนั้น ในปีอธิกมาส วันอาสาฬหบูชา จึงเป็นวันเพ็ญเดือน ๘ หลัง วันรุ่งขึ้นเข้าพรรษา ก็จะทำให้ช่วงเวลาไตรมาสต่อไปอยู่ในฤดูฝนได้ เมื่อเป็นเช่นนี้ ทำให้ต้องเลื่อนวันวิสาขบูชาขึ้นมาเป็นวันเพ็ญเดือน ๗ แล้วยังต้องเลื่อนวันมาฆบูชาขึ้นมาเป็นวันเพ็ญเดือน ๔ ด้วยเพราะถือเป็นปีทางจันทรคติปีเดียวกัน แต่เป็นปีนักขัตตคณละครปี เช่น ปี พ.ศ. ๒๕๔๗ นี้ เป็น ปีอธิกมาส ปรกติวาร

ขอยกตัวอย่างเหตุการณ์ในประวัติศาสตร์ คือ รัชกาลที่ ๒ ประสูติวันขึ้น ๗ ค่ำเดือน ๔ ปีกุน กรุงศรีอยุธยาแตก วันขึ้น ๕ ค่ำ เดือน ๕ ปีกุน แสดงว่ากรุงแตกก่อนประสูติประมาณ ๑๑ เดือน เพราะเป็นคนละครปีทางจันทรคติ แต่ถ้าจะให้ประสูติก่อนกรุงแตกประมาณ ๑ เดือน ก็ต้องประสูติ เดือน ๔ ปีจอ ก็จะเป็นปีเดียวกันทางปีจันทรคติจึงต้องเป็นคนละครปีทางปีนักขัตต รายละเอียดมีอยู่ข้างล่างนี้ ซึ่งจะช่วยให้เรื่องนี้กระจ่างขึ้น และจะได้มองเห็นความชาญฉลาดของบรรพบุรุษไทยที่ท่านกำหนดปีไว้ให้ใช้หลายชนิดเพื่อป้องกันความสับสน การที่ท่านสามารถรักษาวนข้างขึ้นข้างแรมไว้ให้พระสงฆ์ได้ประกอบพิธีกรรมทางพุทธศาสนาอย่างถูกต้องตามพุทธบัญญัติ ไม่ว่าจะเป็นวันเพ็ญเดือนใดในปฏิทินทางจันทรคติของไทยเมื่อแหงนหน้าดูจันทร์ในวันนั้นจะต้องเห็นพระจันทร์เต็มดวงเสมอไป และยังสามารถรักษาวนข้างเข้าพรรษาให้ตรงกับฤดูฝนไว้ได้ตลอดมาเกิดเป็นผลดีต่อกิจการบ้านเมืองต้องถือเป็นความสามารถที่ขอดเยื่อน่าภาคภูมิใจของคนไทย

๔. ปีพุทธศักราช (พ.ศ.) ของไทยสมัยก่อนเปลี่ยนปีวันที่ ๑ เมษายน เพราะใกล้เคียงกับวันเถลิงศกกลางเดือนเมษายน

๕. ปีจุลศักราช (จ.ศ.) ของไทยเปลี่ยนปีเมื่อเข้าสงกรานต์แล้ว ๒ วันเรียกวันเถลิงศก ปรกติจะตรงกับวันที่ ๑๕ เมษายน แต่สมัยก่อนไม่ได้ใช้ปฏิทินทางสุริยคติ จึงไม่ใช่ของง่ายที่จะทราบว่าจะตรงกับวันขึ้นแรมอะไรเมื่อต้องการทราบวันสงกรานต์ตรงกับวันทางจันทรคติวันใดในปีประสงค์ต้องทำการคำนวณหาวันที่ดวงอาทิตย์ยกเข้าราศีเมษก่อน จะได้เป็นวันมหาสงกรานต์ แล้วจึงเพิ่มอีก ๒ วัน ก็จะเป็นวันเปลี่ยนปี จ.ศ. แต่โดยที่การคำนวณเช่นนี้เป็นหน้าที่ของกรมโหราหลวงคนทั่วไปทำไม่ได้ ดังนั้น จึงอาจมีการอนุโลมให้เปลี่ยนปี จ.ศ. ในวันขึ้น ๑ ค่ำเดือน ๕ ในหนังสือเก่าได้ ซึ่งทำให้เกิดการสับสนได้มากสำหรับคนรุ่นหลัง แต่สำหรับคนสมัยเดียวกันจะเข้าใจกันได้ไม่ยากนักเนื่องจาก โดยเฉลี่ยแล้ววันสงกรานต์จะอยู่ประมาณเดือน ๕ และเราสามารถจะตรวจสอบไล่เรียงได้ แต่เมื่อนานวันไป จะต้องอาศัยความชำนาญการทำการวิเคราะห์จากการที่ท่านระบุให้มาทั้ง วันในสัปดาห์ วันขึ้นแรม เดือนทางจันทรคติ ปีนักขัตต และศก ซึ่งข้อมูลทั้งห้าอย่างนี้ พอเพียงที่จะหา วัน เดือน ปี ในปฏิทินทางสุริยคติสากลในยุคสมัยเดียวกันได้อย่างถูกต้อง

๖. นอกเหนือจากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นแล้วยังมีสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาถึง คือ โดยที่จะต้องอาศัยหลัก วิชาพหุศาสตร์ เพื่อหา พรหมลิขิต ของคนเราที่เกิดมา ซึ่งหัวใจสำคัญอยู่ที่การหาดาวพระเคราะห์ที่มีฐานะเป็น ดาวเดช ดาวศรี ดาวมนตรี ดาวกาลกิณี และ ดาวอื่นๆ ประจำตัวของแต่ละคน ดังนั้นทำให้คนไทยต้องถือหลักว่า วันในสัปดาห์ เปลี่ยนตอนรุ่งเช้า ไม่ใช่ ตอนเที่ยงคืน ซึ่งต่างจากการเปลี่ยน วันที่ ทางสากล ดังนั้น คนที่เกิดในช่วงหลังเที่ยงคืน แม้ วันที่ จะเป็นของวันใหม่ แต่ วันในสัปดาห์ ยังคงต้องเป็นของวันเก่า และคนไทยจะมี

ความจำอย่างแม่นยำไม่มีพลาดว่า ใครเกิดวันอะไร เช่น วันอาทิตย์ หรือ วันจันทร์ สามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นที่สำคัญยิ่งในการสืบค้นต่อไปได้

ทั้งหมดที่กล่าวมานี้ต้องนำมาใช้พิจารณาประกอบในการเทียบ วัน เดือน ปี ระหว่างระบบไทยเดิม กับ ระบบสากลเพื่อการศึกษาค้นคว้าทางประวัติศาสตร์ไทยโดยถือหลักโอนอ่อนผ่อนตามเพื่อการลงตัวที่ดีที่สุด แต่ต้องไม่ให้เสียหลักการทั้งทางดั้งเดิมของไทยและทางสากล

ในที่นี้ เราจะนำหลักการนี้มาวิเคราะห์ว่า พระมหากษัตริย์ตั้งแต่รัชกาลที่ ๑ ถึง ๔ แห่งพระบรมราชจักรีวงศ์ ทรงมีวันสำคัญประจำพระองค์ในระบบปฏิทินประเพณีไทยตรงกับระบบสากลอย่างไร โดยอาศัยข้อมูลพื้นฐานจากพระราชพงสาวดารและจดหมายเหตุที่มีอยู่ร่วมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เทียบศักราช จากนั้นเราจะไปพิจารณาวันมหาปวารณา ใน พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว

พระมหากษัตริย์แห่งราชวงศ์จักรี รัชกาลที่ ๑ ถึง ๔

รัชกาลที่ ๑ พระบาทสมเด็จพระพุทธยอดฟ้าจุฬาโลก

พระนามเดิม ทองด้วง เป็นพระโอรสองค์ที่ ๔ ของสมเด็จพระปฐมบรมมหาชนกและพระอัครชายาหยกซึ่งทรงมีพระโอรสธิดารวม ๕ พระองค์ คือ

๑. กรมสมเด็จพระเทพสุดาวิ (สา)
(เจ้ากรมเป็นพระยา)
๒. พระเจ้ารามณรงค์
๓. กรมสมเด็จพระศรีสุดารักษ์ (แก้ว)
๔. พระบาทสมเด็จพระพุทธยอดฟ้าจุฬาโลก
๕. สมเด็จพระบวรราชเจ้ามหาสุรสีหนาท
(บุญมา)

ประสูติวันที่ ๒๑ มีนาคม ๒๒๗๕ เวลา ๓ น. ตรงกับวันพุธ แรม ๕ ค่ำ เดือน ๔ ปีมะโรง อัฐศก จ.ศ. ๑๐๕๘ (ประสูติคืนวันพุธที่ ๒๐ - เข้าวันพฤหัสบดีที่ ๒๑)

เมื่อพระชนม์ ๔๖ พรรษาเสด็จผ่านพิภพปราบดาภิเษก เสด็จถวัลย์ราชสมบัติเมื่อปีชวด พ.ศ. ๒๓๒๕ ดำรงสิริราชสมบัติอยู่ ๒๘ พรรษา

เสด็จสวรรคตวันที่ ๘ กันยายน พ.ศ. ๒๓๕๒ เวลา ๓ นาฬิกา ๗ บาท ตรงกับวันพฤหัสบดี แรม ๑๓ ค่ำ เดือน ๙ ปีมะเส็ง เอกศก (จ.ศ. ๑๑๗๑) พระชนมายุ ๗๓ พรรษา (เสด็จสวรรคต คืนวันพฤหัสบดี ที่ ๗ - เข้ารุ่งขึ้นเป็นวันศุกร์ ที่ ๘ กันยายน)

รัชกาลที่ ๒ พระบาทสมเด็จพระพุทธเลิศหล้านภาลัย

พระนามเดิม เจ้าฟ้าชายฉิม เป็นพระโอรสองค์ที่ ๔ ในพระบาทสมเด็จพระพุทธยอดฟ้าจุฬาโลกและสมเด็จพระอมรินทราบรมราชินี

พระราชโอรสพระราชธิดารวม ๘ พระองค์ ในพระบาทสมเด็จพระพุทธยอดฟ้าจุฬาโลกและสมเด็จพระอมรินทราบรมราชินีนั้น มีพระราชโอรส ๒ พระองค์ที่ทรงพระชนม์ชีพอยู่คือเจ้าฟ้าชายฉิม และพระอนุชาเจ้าฟ้าชายจุ้ย และมีพระธิดาทรงพระชนม์ชีพอีก ๓ พระองค์

ประสูติวันที่ ๒๔ กุมภาพันธ์ พ.ศ. ๒๓๑๐ เวลา ๑๑ น. ตรงกับวันพุธ ขึ้น ๗ ค่ำ เดือน ๔ ปีกุน นพศก (จ.ศ. ๑๑๒๕)

พระราชพงสาวดารกรุงศรีอยุธยา ฉบับสมเด็จพระพนรัตน์ระบุว่ากรุงศรีอยุธยาแตกวันอังคาร ขึ้น ๕ ค่ำ เดือน ๕ ปีกุน นพศก (จ.ศ. ๑๑๒๕) ซึ่งได้ทำการตรวจสอบแล้วตรงกับวันที่ ๗ เมษายน พ.ศ. ๒๓๑๐ หรือ ค.ศ. ๑๗๖๗ แต่ยังไม่ถึงสงกรานต์จึงยังคงเป็นอัฐศก แต่ท่านให้เป็นนพศก แสดงว่าท่านอนุโลมให้วันเปลี่ยนปี จ.ศ. เป็นวันเดียวกันกับวันเปลี่ยนปีนักษัตร คือวันขึ้น ๑ ค่ำ เดือน ๕

นั่นคือกรุงแตกต้นปี พ.ศ. ๒๓๑๐ เป็นต้นปีกุน แต่เป็นปลายปี จ.ศ. ๑๑๒๘ ตรงกับ ค.ศ. ๑๗๖๗ แต่ทรงพระประสูติปลายปี พ.ศ. ๒๓๑๐ และ เป็นปลายปีกุน ปลายปี จ.ศ. ๑๑๒๘ ตรงกับปี ค.ศ. ๑๗๖๘ คือ ประสูติหลังกรุงแตกแล้ว ๑ ปี หรือก็คือประสูติหลังพระเจ้าตากสินกู้ชาติโดยยกทัพจากจันทบุรีตีค่ายโพธิ์สามต้นแตกในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. ๒๓๑๐ แล้วตั้งกรุงธนบุรีแต่ยังไม่ได้ทำพิธีปราบดาภิเษกซึ่งกระทำในเดือนธันวาคม พ.ศ. ๒๓๑๑ ซึ่งผิดจากที่หนังสือหลายเล่มกล่าววว่ารัชกาลที่ ๒ แห่งกรุงรัตนโกสินทร์ประสูติก่อนกรุงแตก ๑ เดือน และขณะประสูตินั้นภายในกรุงกำลังเล่นละครในเรื่องอิเหนาตอนสักขีทำให้โปรดเรื่องอิเหนาเป็นพิเศษทั้งนี้เพราะเห็นว่าประสูติเดือน ๔ กรุงแตกเดือน ๕ นพศก ด้วยกัน จะให้บอกว่ากรุงแตกก่อนประสูติได้อย่างไร โดยมีได้พิจารณาว่า เป็นปีกุนเดียวกันเดือน ๕ ต้องมาก่อนเดือน ๔

สรุปได้ว่าพระบาทสมเด็จพระพุทธเลิศหล้านภาลัย องค์เอกอัครศิลปินทรงพระประสูติหลังจากที่คนไทยได้รวบรวมกำลังทำการขับไล่อริราชศัตรูไปพ้นจากแผ่นดินแล้ว และบ้านเมืองได้กลับฟื้นคืนเป็นไทตามเดิมแล้ว

ทรงได้รับพระมหากรุณาฯ โปรดเกล้าฯ สถาปนาขึ้นทรงกรมเป็นเจ้าฟ้ากรมหลวงอิศรสุนทรต่อมาได้รับพระราชทานอุปราชภิเษกเป็นมหาอุปราชกรมพระราชวังบวรสถานมงคลเมื่อวันที่ ๑๕ มีนาคม พ.ศ. ๒๓๔๕ ตรงกับวันอาทิตย์ เดือน ๔ ขึ้น ๗ ค่ำ ปีชวด อัฐศก (จ.ศ. ๑๑๖๘) เมื่อพระชนมายุ ๓๕ พรรษา

เสด็จเถลิงถวัลย์ราชสมบัติปีมะเส็ง พ.ศ. ๒๓๕๒ เมื่อพระชนมายุ ๔๑ พรรษา ทรงดำรงราชสมบัติ ๑๖ พรรษา

เสด็จสวรรคตเมื่อวันที่ ๒๑ กรกฎาคม ๒๓๖๗ เวลา ๑ ทุ่ม ตรงกับวันพุธ แรม ๑๑ ค่ำ เดือน ๘ ปีวอก ฉศก (จ.ศ. ๑๑๘๖) พระชนมายุ ๕๗ พรรษา

รัชกาลที่ ๓ พระบาทสมเด็จพระนั่งเกล้าเจ้าอยู่หัว

พระนามเดิม หม่อมเจ้าชายทับ เป็นพระโอรสในเจ้าฟ้ากรมหลวงอิศรสุนทรและเจ้าจอมมารดาเรียบ ครั้นเมื่อพระราชบิดาได้รับอุปราชภิเษกในปี พ.ศ. ๒๓๔๕ จึงได้เลื่อนเป็นพระองค์เจ้า

ประสูติวันที่ ๓๑ มีนาคม พ.ศ. ๒๓๓๐ เวลา ๔ น. ตรงกับวันอาทิตย์ เดือน ๔ แรม ๑๐ ค่ำ ปีมะแม นพศก (จ.ศ. ๑๑๔๕) (ประสูติกลางคืนวันอาทิตย์ที่ ๓๐ - เช้าวันจันทร์ ที่ ๓๑ มีนาคม)

ได้ทรงรับการสถาปนาเป็นกรมหมื่นเจษฎาบดินทร์ เมื่อ พ.ศ. ๒๓๕๖ เบญจศก (จ.ศ. ๑๑๗๕) ภายหลังพระราชบิดาได้เสด็จขึ้นครองราชย์แล้ว ๔ ปี

เสด็จผ่านพิภพ พ.ศ. ๒๓๖๗ เมื่อพระชนมายุ ๓๗ พรรษา ทรงดำรงราชสมบัติอยู่เป็นเวลา ๒๗ พรรษา

เสด็จสวรรคตเมื่อวันที่ ๒ เมษายน ๒๓๘๔ เวลา ๘ นาฬิกา ๕ บาท ตรงกับวันพุธ ขึ้น ๑ ค่ำ เดือน ๕ ปีกุน ยังเป็นโทศก (จ.ศ. ๑๒๑๒) พระชนมายุ ๖๔ พรรษา (ในพระราชพงศาวดารกรุงรัตนโกสินทร์เล่ม ๒ รัชกาลที่ ๓ - ๔ ให้เป็น ตรีก)

รัชกาลที่ ๔ พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว

พระนามเดิม คือ เจ้าฟ้ามงกุฎ เป็นพระราชโอรสพระองค์ที่ ๒ ในพระบาทสมเด็จพระพุทธเลิศหล้านภาลัย และสมเด็จพระศรีสุริเยนทราธิบดีพระบรมราชินี โดยพระราชโอรสองค์ที่ ๑ ได้สิ้นพระชนม์แต่ยังทรงพระเยาว์ จึงทรงเป็นพระราชโอรสขึ้นเจ้าฟ้าพระองค์ใหญ่ โดยมีเจ้าน้อยหรือเจ้าฟ้ายุฑาธมมิเป็นพระอนุชา รวมเป็น ๒ พระองค์ด้วยกัน

ทรงมีพระราชสมภพในขณะที่พระราชบิดายังมิได้ขึ้นครองราชย์ และยังมีได้ขึ้นครอง

อุปราชภิเษกสมบัติ ทรงมีพระฐานะเป็นเจ้าฟ้าใน
ทันทีที่ประสูติเพราะทั้งพระชนกชนนีทรงดำรงพระ
ยศเป็นเจ้าฟ้าทั้งสองพระองค์ คือเจ้าฟ้ากรมหลวง
อิสรสุนทรและเจ้าฟ้าบุญรอด พระธิดาในกรมสมเด็จพระ
ศรีสุदारักษ์ ทั้งนี้เป็นไปตามพระราชประเพณีแต่
ครั้งกรุงเก่า

ทรงพระผนวชเป็นสามเณรเมื่อวันที่ ๒๔
กรกฎาคม พ.ศ. ๒๓๖๐ ตรงกับวันพฤหัสบดี ขึ้น ๑๑
ค่ำ เดือน ๘ (หลัง) ปีมะเส็ง นพศก (จ.ศ. ๑๑๗๕) ด้วย
พระราชศรัทธาจึงทรงจำพรรษาอยู่เป็นเวลาตลอด
เข้าพรรษาแล้วอยู่เลยออกมาอีก ๕ เดือน สามารถเทศน์
มหาชาติโปรดพระญาติวงศ์ เป็นที่ปลื้มปิติอย่างยิ่ง

ทรงพระผนวชเป็นพระภิกษุเมื่อวันที่ ๗
กรกฎาคม ๒๓๖๗ ตรงกับวันพุธ ขึ้น ๑๒ ค่ำ เดือน
๘ ปีวอก นศก (จ.ศ. ๑๑๘๖) พระชนมายุ ๑๕ พรรษา
๘ เดือน ๒๖ วัน ทรงรับพระฉายาว่า 'วชิรญาณภิกขุ'
ต่อมาอีกสองสัปดาห์ คือวันที่ ๒๑ กรกฎาคม สมเด็จพระ
บรมชนกนาถก็เสด็จสวรรคต พระองค์ก็ได้ทรง
พรตอยู่ต่อไปตลอดเวลา ๒๗ ปีในแผ่นดินพระบาท
สมเด็จพระนั่งเกล้าเจ้าอยู่หัว

ได้ทรงใช้เวลาตลอด ๒๗ ปีนี้เพื่อการศึกษา
ทั้งทางด้านพระศาสนา ปรัชญา ภาษาศาสตร์ ทั้งทาง
ฝ่ายตะวันออกและตะวันตก และที่สำคัญคือการ
ศึกษาทางด้านคณิตศาสตร์ ดาราศาสตร์ ด้วยพระองค์
เอง นอกจากนี้ยังได้ทรงศึกษาเหตุการณ์ความเป็นไป
ของโลก จากการที่ได้มีชาวต่างประเทศเข้าเฝ้าที่
พระอารามที่ประทับอยู่เสมอ และจากการได้ทอด
พระเนตรหนังสือพิมพ์ข่าวสารจากต่างประเทศ

เมื่อสิ้นแผ่นดินรัชกาลที่ ๓ จึงได้รับอัญเชิญ
เสด็จขึ้นเถลิงถวัลย์ราชสมบัติ เมื่อพ.ศ. ๒๓๕๔ พระ
ชนมายุ ๔๗ พรรษา ทรงดำรงราชสมบัติอยู่ ๑๘
พรรษา

ได้เสด็จสวรรคตเมื่อวันที่ ๑ ตุลาคม พ.ศ.
๒๔๑๑ เวลาสามทุ่ม ตรงกับวันพฤหัสบดี ขึ้น ๑๕ ค่ำ
เดือน ๑๑ ปีมะโรง สัมฤทธิศก (จ.ศ. ๑๒๓๐)

พระชนมายุ ๖๔ พรรษา ด้วยพระโรคไข้ป่าที่ทรง
ได้รับจากการเสด็จพระราชดำเนินทอดพระเนตรการ
เกิดสุริยุปราคาในพระองค์ที่หว่ากอ ประจวบคีรีขันธ์

ได้มีการเขียนจดหมายเหตุเรื่องพระบาท
สมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวทรงพระประจวรและ
สวรรคตถึง ๓ ฉบับ คือฉบับของเจ้าพระยา
มหินทรศักดิ์ธำรง (เพ็ง เพ็ญกุล) ผู้ซึ่งได้ทรงโปรด
ชุบเลี้ยงตั้งแต่เป็นเด็กอายุ ๑๓ ขวบสมัยยังทรงเป็น
พระภิกษุ และได้ติดตามเข้ามาเป็นมหาดเล็กข้างพระที่
เมื่อขึ้นครองราชย์เป็นที่โปรดปรานอย่างยิ่งถึงขนาด
ทรงรับไว้เป็น บุตรบุญธรรม ท่านเจ้าคุณได้อยู่เฝ้า
ถวายงานตลอดเวลาที่ทรงพระประจวร เป็นผู้รู้เห็น
เหตุการณ์สำคัญก่อนเสด็จสวรรคตเป็นอย่างดี ฉบับ
ที่สองเป็นของเจ้าพระยาทิพากรวงศ์ (ขำ บุนนาค)
เขียนขึ้นมาจากการศึกษาค้นคว้าในภายหลัง และ
ฉบับที่สามเป็นพระนิพนธ์ในสมเด็จพระยาดำรง
ราชานุภาพ ทรงเริ่มต้นเขียนเมื่อท่านเจ้าคุณทั้งสอง
ได้สิ้นไปแล้ว ทรงเขียนจากการที่ได้สัมภาษณ์
พระธิดาในพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าฯ ซึ่งได้
ทรงเข้าเฝ้าถวายอยู่ ณ ที่ห้องบรรทมขณะทรง
พระประจวร ทั้งสามฉบับมีข้อความที่สำคัญยิ่งอย่าง
หนึ่งตรงกัน คือพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่
หัวได้รับสั่งว่า พระองค์จะสวรรคตวันเดียวกันกับ
วันประสูติคือวันพฤหัสบดี ขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๑๑
ซึ่งเป็นวันมหาปวารณา ก่อนวันออกพรรษา และได้
โปรดให้เจ้าหน้าที่สังฆการีมาจดคำขมาและลา
พระสงฆ์ ที่รับสั่งเป็นภาษามคร เพื่ออัญเชิญไปอ่าน
ในที่ชุมนุมพระสงฆ์ในวันมหาปวารณานี้ ณ วัดราช
ประดิษฐ์ ตามความโดยสรุปที่ว่าไว้ข้างบนนี้นั้น

ในพระราชพงศาวดารกรุงรัตนโกสินทร์
รัชกาลที่ ๔ ของเจ้าพระยาทิพากรวงศ์ กล่าวว่า
ประสูติวันพฤหัสบดีขึ้น ๑๔ ค่ำเดือน ๑๑ ปีชวด นศก
(จ.ศ. ๑๑๖๖) ซึ่งได้ตรวจสอบแล้ว ตรงกับวันที่
๑๘ ตุลาคม พ.ศ. ๒๓๔๗ ซึ่งย่อมไม่ใช่วันมหา
ปวารณา ดังที่ได้รับสั่งไว้ แต่ต้องเป็นวันรุ่งขึ้น คือ
วันที่ ๑๙ ตุลาคม จึงจะเป็นวันขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๑๑

พระองค์ท่านรับสั่งผิดหรือ ?

ไม่ !

คนรุ่นหลังไม่ได้พิจารณาถึงการถือการเปลี่ยนวันในสัปดาห์ตามหลักวิชาพรหมศาสตร์และขาดความละเอียดรอบคอบพิจารณาถึงเวลาที่ทรงมีพระประสูติกาล ทำให้เสมือนหนึ่งเป็นการหมิ่นพระราชดำรัส

ในจดหมายเหตุโหรระบุว่าดีสี่คือเวลาพระประสูติกาล

นั่นก็คือพระองค์ทรงพระประสูติเวลาดีสี่ของเช้าวันศุกร์ ที่ ๑๕ ตุลาคม พ.ศ. ๒๓๔๗ ตรงกับวันขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๑๑ ซึ่งยังไม่รุ่งเช้า จึงต้องถือว่าเป็นวันพฤหัสบดีตามหลักวิชาพรหมศาสตร์

สาเหตุที่ทำให้เชื่อกันมาว่าพระองค์ทรงพระประสูติวันขึ้น ๑๔ ค่ำ เดือน ๑๑ จ.ศ. ๑๑๖๖ คงเป็นเพราะทราบกันว่าพระองค์ประสูติวันพฤหัสบดี ซึ่งคนไทยเราจำแม่นนักหนาในเรื่องวันในสัปดาห์และเห็นว่าวันขึ้น ๑๔ ค่ำเป็นวันพฤหัสบดี จึงบันทึกกันต่อมาว่าประสูติวันพฤหัสบดี ขึ้น ๑๔ ค่ำ เดือน ๑๑ จ.ศ. ๑๑๖๖ แล้วคนรุ่นหลังจึงเทียบให้ว่าตรงกับวันที่ ๑๘ ตุลาคม พ.ศ. ๒๓๔๗

นั่นคือพระองค์ทรงพระประสูติวันเดียวกันกับวันสวรรคตจริงตามรับสั่ง และเป็นวันสำคัญทางพุทธศาสนาด้วย คือ วันมหาปวารณา วันขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๑๑ และเป็นวันพฤหัสบดี วันครูวันเดียวกัน อันเป็นลักษณะแห่ง พระมหาบุรุษ จึงทำให้พระองค์ท่านทรงมีพระบุญญาภพสูงถึงขนาดทรงสถาปนาธรรมยุติกายขึ้นประดิษฐานไว้ในสยามประเทศนี้ เฉกเช่นเดียวกันกับพระมหาบุรุษผู้ประสูติ ตรัสรู้ และปรินิพพาน ในวันเดียวกันได้ทรงสถาปนาพระพุทธศาสนาไว้ในโลก

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวทรงพระราชสมภพในวันพฤหัสบดี ขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๑๑ จ.ศ. ๑๑๖๖ ตรงกับสากลวันที่ ๑๕ ตุลาคม พ.ศ. ๒๓๔๗

ในจดหมายเหตุ ๓ ฉบับ ที่กล่าวถึงข้างต้นนั้น มีเพียงฉบับของเจ้าพระยามหินทรศักดิ์ธำรงฉบับเดียวเท่านั้นที่ระบุอย่างชัดเจนด้วยความเชื่อมั่นในพระราชกฤษฎาณินหารว่า

"พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวทรงพระประจวร ณ วันอาทิตย์ เดือน ๑๐ ขึ้น ๑๓ ค่ำ เวลาทุ่มเศษ ถึง ณ วันพฤหัสบดี เดือน ๑๑ ขึ้น ๑๕ ค่ำ สวรรคตเวลาบ่ายหนึ่ง ดำรงอยู่ในสิริราชสมบัติ ๑๘ พรรษา

พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวประสูติ ณ วันพฤหัสบดี เดือน ๑๑ ขึ้น ๑๕ ค่ำ ปีชวด นศก ศักราช ๑๑๖๖ปี"

ทรงสถาปนาระบบเวลามาตรฐานประเทศไทย



เมื่อพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวได้เสด็จขึ้นครองราชย์ในปี พ.ศ. ๒๓๕๔ ก็ได้โปรดให้สร้างหุ่มพระที่นั่งพระอภิเนาวนิเวศน์ ขึ้นในปี พ.ศ. ๒๓๕๕ ในพระบรมมหาราชวังบริเวณที่เคยเป็นสวนขวา ประกอบด้วยพระที่นั่งทรงยุโรปหลายองค์ เช่นพระที่นั่งอนันตสมาคมและองค์อื่นๆ แต่ที่สำคัญที่จะกล่าวถึงในที่นี้คือพระที่นั่งภูวดลทัศไนยเป็นหอนาฬิกาสูง ๕ ชั้น ชั้นบนสุดติดตั้งนาฬิกาที่หน้าบันทั้งสี่ เพื่อให้สามารถมองดูเวลาได้แต่ไกลทางด้านพระราชวังสราญรมย์และต่อมาได้โปรดให้สร้างอีก



แห่งหนึ่งที่ทิมดาบขวาเพื่อให้มองเห็นได้จากเรือในแม่น้ำเจ้าพระยาขณะแล่นผ่านพระบรมมหาราชวัง

ในสมัยนี้เมื่อเราซื้อนาฬิกามาใช้ เราก็จะต้องเทียบเวลาจากสัญญาณวิทยุกรมประชาสัมพันธ์ ซึ่งรับสัญญาณเทียบเวลามาจากกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ซึ่งมีนาฬิกาปรมาณู Caesium-133 เดินอยู่ด้วยความเที่ยงตรงสูง แต่นาฬิกาปรมาณูนี้ก็ต้องเทียบเวลาด้วยการรับสัญญาณวิทยุจากหอดูดาวหลักของโลก เช่นหอดูดาวกรีนวิชของอังกฤษในสมัยก่อน หรือ The International Time Bureau แห่งกรุงปารีส ในสมัยปัจจุบัน เป็นต้น เพราะสถาบันเหล่านี้มีหอดูดาวสมรรถนะสูงในสังกัดทั่วโลกเพื่อสังเกตการณ์หุนรอบตัวเองของโลกเมื่อเทียบกับดาว แล้วนำมาตั้งเวลาและปรับแก้ให้แก่นาฬิกาปรมาณู ให้เดินตรงกับจังหวะการหมุนของโลกในช่วงฤดูกาลต่างๆ ตลอดทั้งปี นั่นหมายความว่าแม้ในปัจจุบันนี้ประเทศไทยเรายังต้องเทียบเวลามาตรฐานจากสัญญาณวิทยุต่างประเทศ ให้กับนาฬิกาปรมาณูของเรา

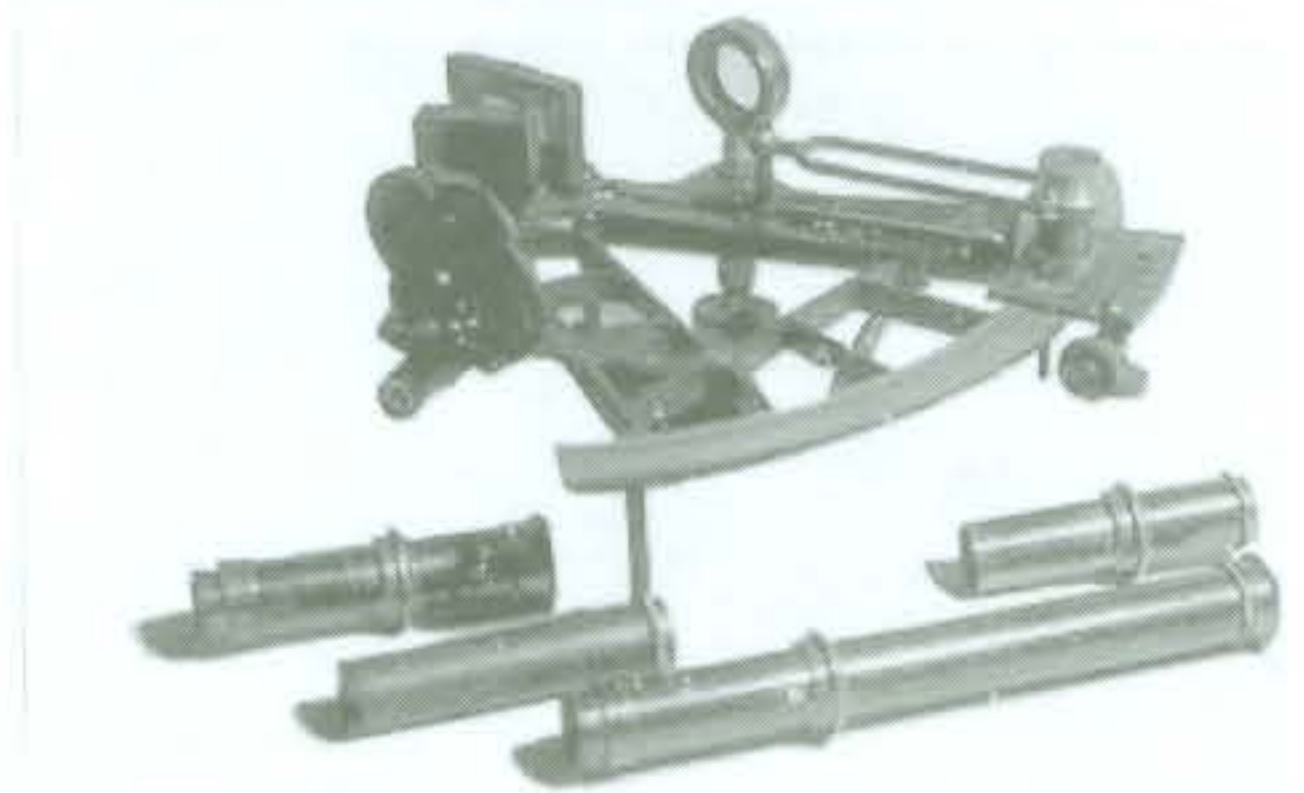
ท่านที่สนใจอาจตั้งคำถามว่าในเมื่อประเทศไทยเรามีความเจริญก้าวหน้าอย่างมากในปัจจุบัน และมีกำลังทางเศรษฐกิจอย่างสูงเราควรตั้งหอดูดาวพิเศษเช่นนี้เพื่อทำการวัดการหมุนของโลก แล้วแก้ปรับให้นาฬิกาปรมาณูของเราเองโดยไม่ต้อง

พึ่งพาอาศัยสัญญาณวิทยุเทียบเวลาจากต่างประเทศได้หรือไม่

คำตอบคือ "ไม่ได้" เพราะเมื่อโลกเรายังเจริญเราก็ก็นึกพันกับต่างประเทศมากยิ่งขึ้น ถ้าเราลงทุนสร้างหอดูดาวพิเศษนี้ ซึ่งเรียกว่า photoelectric zenith tube (PZT) เราก็น่าจะเป็นเพียงเครือข่ายเฝ้าสังเกตการณ์หุนรอบตัวของโลกแห่งหนึ่งเท่านั้น โดยเราจะต้องส่งข้อมูลการสังเกตไปให้สถาบันกลางของโลก ทำการวิเคราะห์ร่วมกันกับข้อมูลจากหอดูดาวที่ส่งไปจากประเทศต่างๆ ที่กระจายอยู่ทั่วโลก แล้วจึงพิจารณาว่าควรจะปรับแก้ค่าพิกามากน้อยเท่าไร ในวันเวลาใด รวมได้ออกมาเรียกว่า coordinated universal time (UTC) แล้วแจ้งให้ทราบกันทั่วโลกให้ปฏิบัติตาม

แต่ในสมัยพระองค์ท่าน โลกยังไม่มี ความเจริญก้าวหน้าถึงเพียงนี้ เมื่อซื้อนาฬิกาแล้วก็ต้องตั้งเวลาเองด้วยการเทียบเวลากับปรากฏการณ์ทางดาราศาสตร์ที่จะเกิดขึ้นในแต่ละวัน โดยพระองค์ต้องทรงวางระบบโดยกำหนดเส้นแวงหลักที่จะให้เวลามาตรฐานของประเทศใช้อ้างอิง แล้วสร้างระบบการสังเกตปรากฏการณ์ทางดาราศาสตร์รายวันเพื่อทำการสังเกต เมื่อเหตุการณ์นั้นเกิดขึ้นก็ให้ตั้งเวลาให้กับนาฬิกาตามเวลาที่ได้ทรงคำนวณพยากรณ์ล่วงหน้ามาสำหรับเส้นแวงมาตรฐานนั้น จึงได้ทรงสร้างหอนาฬิกาหลวงขึ้นมาเพื่อให้เจ้าหน้าที่ทำการสังเกตการณ์จากหอนี้ โดยโปรดให้มีตำแหน่งเป็นพันทิวาทิศย์คู่กับพันพิณิตจันตรา นับเป็นตำแหน่งงานทางวิทยาศาสตร์แผนใหม่ชุดแรกที่กำหนดขึ้นในกรุงสยาม ถือว่าเป็นตำแหน่งที่สำคัญยิ่งเพราะเป็นผู้มีหน้าที่รักษาเวลามาตรฐานของประเทศซึ่งเป็นพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ หากประเทศไทยต้องการจะมีความเจริญก้าวหน้าทัดเทียมกับนานาชาติอารยประเทศต่อไป ทั้งนี้ได้โปรดให้อยู่ในกำกับการณ์ของกรมขุนวรจักรธรานุภาพให้เป็นผู้ทรงดูแลรับผิดชอบด้านรักษาเวลาจักรนาฬิกาให้เดินเที่ยงตรงเป็นศักดิ์ศรีแก่บ้านเมือง

การก่อสร้างได้สำเร็จและหอนาฬิกาได้เริ่มใช้งานในปี พ.ศ. ๒๔๐๐ นั้นหมายความว่าประเทศไทยในรัชสมัยรัชกาลที่ ๔ ได้เข้าสู่พุทธศตวรรษที่ ๒๕ ในฐานะเป็นชาติที่มีความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์ ถึงขนาดสถาปนาระบบเวลามาตรฐาน (standard time) ขึ้นเองเพื่อให้เป็นพื้นฐานการพัฒนาทางเศรษฐกิจ สังคม วิชาการ อันจะอำนวยประโยชน์แก่อาณาประชาราษฎร์สมชิพราหมในการกำหนดกิจพิธีกรรม ตลอดจนพ่อค้าวาณิชในการติดต่อสื่อสาร และหน่วยราชการได้กำหนดบัตรหมายเป็นการมั่นคงและทรงศักดิ์ นอกจากนี้ยังเป็นหัวใจในการดำเนินงานทางวิทยาศาสตร์ต่างๆ ที่สำคัญคือ การเดินเรือ หรือการหาตำแหน่งทางเส้นรุ้งเส้นแวงของเรือหลวงไทย กลางทะเล เพราะหลักการของ celestial navigation นั้นจะต้องมีนาฬิกาเดินเรือ chronometer รักษาเวลามาตรฐานสำหรับหาความแตกต่างระหว่างเส้นแวงของตำแหน่งเรือกับเส้นแวงที่นาฬิกาเดินเรือใช้อ้างอิง โดยใช้กล้องวัดแคด หรือ sextant วัดมุมสูงของดวงอาทิตย์ในเวลาระหว่างเที่ยงวัน



ปรากฏว่าพระองค์ท่านทรงมีความชำนาญในการใช้กล้องวัดแคด sextant เพื่อหาตำแหน่งเส้นรุ้งเส้นแวงของเรือกลไฟพระที่นั่งกลางทะเลและยังได้ทรงใช้วัดหาตำแหน่งที่ตั้งพลับพลาหาดหว้ากอเพื่อการตรวจสอบก่อนเกิดคราสในวันจริงด้วยพระองค์เองต่อหน้าทหารเรืออังกฤษและฝรั่งเศสที่จอดเรือรบหน้าหาดหว้ากอ ภาพซ้ายมือนี้คือกล้อง sextant ในพระองค์ ซึ่งเจ้าหน้าที่ท้องฟ้าจำลองกรุงเทพ ด้วยความอนุเคราะห์ของสำนักพระราชวัง ได้ถ่ายมาจากพระตำหนักในวัดบวรนิเวศ อันแสดงให้เห็นว่าพระองค์ท่านได้ทรงศึกษาวิชาการขั้นสูงทางคณิตศาสตร์และดาราศาสตร์ ตั้ง แต่สมัยเมื่อยังทรงเป็นพระภิกษุจำพรรษาอยู่ในพระอารามนี้

ฉบับที่ ๓๘

พระราชหัตถเลขา ถึงกรมหมื่นนครจักรพรรดิราช

รทหมายมรณกรรมจักรให้ขอมพรชาวนาฬิกาและ
สมพรถวายพระพรถึงไมให้ถวญกักกัน โยถวพรสันเกอนน
ทั้งแต่วันอังคารเกอน ๓ แรม ๔ ค่ำไป ในวันอังคาร
วันพร วันพุธวันศุกร์ เกอน ๓ แรม ๔ ค่ำ ๕ ค่ำ ๖ ค่ำ
๓ วันย่ำรุ่ง ๕ นาฬิกา ถึง ๔๘ นาที แต่เที่ยงคืน ย่ำค่ำ
๖ นาฬิกาถึง ๑๒ นาที ทมโมงและกันคงตามนาฬิกาล
ณวันศุกร์ วันเสาร์ วันอาทิตย์ เกอน ๓ แรม ๗ ค่ำ
๘ ค่ำ ๙ ค่ำ ๓ วันนโท ๑๑ เมษ ๔ นาฬิกาถึง
๕๘ นาที แต่เที่ยงคืน แล้วย่ำรุ่งเมษ ๕ นาฬิกาถึง ๔๗ นาที
แต่เที่ยงคืน ที่โมงเช้าเมษ ๖ นาฬิกาถึง ๕๘ นาที
แต่เที่ยงคืน ที่ย่ำ ๕ โมง เมษ ๕ โมงถึงนาที ๑ ย่ำค่ำ
เมษ ๖ โมงถึง ๑๓ นาที แต่เที่ยง ๑ เมษ ๗ โมงถึงนาที
๑ แต่เที่ยงวันนอกนคงตามนาฬิกาล
วันจันทร์ วันอังคาร วันพร เกอน ๓ แรม ๑๐ ค่ำ
๑๑ ค่ำ ๑๒ ค่ำ ๓ วันนโท ๑๑ เมษ ๔ นาฬิกาถึง
๕๘ นาที แต่เที่ยงคืน แล้วย่ำรุ่งเมษ ๕ นาฬิกาถึง

พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้า ฯ

๔๖ นาที แต่เที่ยงคืน ที่โมงเช้าเมษ ๖ นาฬิกาถึง
๕๘ นาที แต่เที่ยงคืน ที่ ๕ โมงเย็น เมษ ๕ นาฬิกาถึง ๒ นาที
แต่เที่ยงวัน แล้วย่ำค่ำเมษ ๖ นาฬิกาถึง ๑๔ นาทีแต่เที่ยงวัน
ที่มทหนึ่งเมษ ๗ นาฬิกาถึง ๒ นาที แต่เที่ยงวัน
วันพฤหัสบดี วันศุกร์ เกอน ๓ แรม ๑๓ ค่ำ ๑๔ ค่ำ
และวันเสาร์ เกอน ๔ ขึ้น ๑ ค่ำ ๓ วันนโท ๑๑ เมษ
๕ นาฬิกาถึง ๕๗ นาที แต่เที่ยงคืน ย่ำรุ่งเมษ ๕ นาฬิกา
ถึง ๔๕ นาที แต่เที่ยงคืน ที่โมงเช้าเมษ ๖ นาฬิกาถึง
๕๗ นาที แต่เที่ยงคืน ที่ ๕ โมงเย็นเมษ ๕ นาฬิกาถึง
๓ นาที แต่เที่ยงวัน ย่ำค่ำเมษ ๖ นาฬิกาถึง ๑๕ นาที
แต่เที่ยงวันกัทมเมษ ๗ นาฬิกาถึง ๓ นาที
วันอาทิตย์ วันจันทร์ วันอังคาร เกอน ๔ ขึ้น ๒ ค่ำ
๓ ค่ำ ๔ ค่ำ ๓ วันนโท ๑๑ เมษ ๔ นาฬิกาถึง ๕๖ นาที
แต่เที่ยงคืน ย่ำรุ่งเมษ ๕ นาฬิกาถึง ๔๔ นาที
แต่เที่ยงคืน ที่โมงเช้าเมษ ๖ นาฬิกาถึง ๕๖ นาที แต่
เที่ยงคืน ที่ ๕ โมงเย็น ๕ นาฬิกาถึง ๔ นาที แต่เที่ยง
วัน ย่ำค่ำเมษ ๖ นาฬิกาถึง ๑๖ นาที แต่เที่ยงวัน ที่
กัทมหนึ่งเมษ ๗ นาฬิกาถึง ๔ นาที แต่เที่ยงวัน

ภาพพระราชหัตถเลขา^๒ ในพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว พระราชทานไปยังกรมขุนวรจักรธรานุภาพในสมัยเมื่อยังทรงกรมเป็นกรมหมื่น เป็นผลการทรงคำนวณพยากรณ์เวลาเกิดปรากฏการณ์ทางดาราศาสตร์ประจำวันเป็นรายวัน ซึ่งทรงเรียกว่า 'ย่ำรุ่ง' และ 'ย่ำค่ำ' เพื่อให้เจ้าหน้าที่ประจำหอนาฬิกาหลวงทำการสังเกตในเวลาก่อนรุ่งเช้า และก่อนพลบค่ำในแต่ละวัน เมื่อพบว่าได้เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวนี้เมื่อใด ก็ให้ตั้งเวลาประจำวันนั้นให้นาฬิกาตามที่ได้ทรงคำนวณพระราชทานมาให้ล่วงหน้านี้ และนี่คือหลักฐานที่สำคัญทางประวัติศาสตร์และวิทยาศาสตร์ของชาติที่แสดงให้เห็นว่าพระองค์ท่านได้ทรงตั้งระบบเวลามาตรฐานของประเทศไทย

สิ่งที่จะต้องทำการศึกษาวิจัย คือ

๑. 'ย่ำรุ่ง' และ 'ย่ำค่ำ' มีความหมายในทางดาราศาสตร์อย่างไร
๒. ทรงใช้เส้นแวงที่เท่าไรเป็นเส้นอ้างอิงในระบบเวลามาตรฐานของพระองค์

ตาราง ก แสดงสรุปผลการทรงคำนวณเวลา ย่ำรุ่ง

เวลา ย่ำรุ่ง ตามระบบเวลามาตรฐานของประเทศไทยที่ได้ทรงคำนวณสำหรับเดือนกุมภาพันธ์ ค.ศ. 1858		
วัน	วันที่	เวลา
อังคาร	2	05 : 48
พุธ	3	
พฤหัสบดี	4	
ศุกร์	5	05 : 47
เสาร์	6	
อาทิตย์	7	
จันทร์	8	05 : 46
อังคาร	9	
พุธ	10	
พฤหัสบดี	11	05 : 45
ศุกร์	12	
เสาร์	13	
อาทิตย์	14	05 : 44
จันทร์	15	
อังคาร	16	

การศึกษาวิจัย^๓ ได้กระทำโดยการสร้างระบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำการคำนวณจำลองเหตุการณ์ทางดาราศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง ช้องแล้วพบว่า 'ย่ำรุ่ง'ของพระองค์ท่านก็คือเวลาเริ่มต้นการเกิดแสงเงินแสงทองชนิดพลเรือนที่ขอบฟ้าบริเวณที่ดวงอาทิตย์จะขึ้น ซึ่งทางดาราศาสตร์เรียกว่า the beginning of the civil twilight โดยจะเกิดสิ่งที่เราเรียกกันว่า 'ฟ้าเริ่มจะสาง' ณ บริเวณนั้นซึ่งถือว่า ณ บัดนี้สภาวะกลางคืนได้หมดลงพร้อมกับเริ่มต้นของเวลากลางวัน และในทางกลับกันสำหรับ 'ย่ำค่ำ' หรือ the end of the civil twilight ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเกิดขึ้นเป็นประจำวันขณะที่ศูนย์กลางดวงอาทิตย์อยู่ใต้เส้นขอบฟ้าเป็นระยะทางเชิงมุม ๖ องศา ในตอนเช้าต่อจากนี้ จะค่อยๆมีแสงเงินแสงทองขึ้นทาบบขอบฟ้า ในตอนเย็นจะเป็นการสิ้นสุดแสงเงินแสงทอง ซึ่งพระองค์ท่านจะต้องทรงคำนวณพยากรณ์เวลาที่ดวงอาทิตย์มาอยู่ตำแหน่งนี้เป็นรายวัน

ในพระราชหัตถเลขา มิได้ระบุปี แต่ได้ทำการเทียบแล้ว ตรงกับเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. ๒๔๐๐ ซึ่งตรงกับปี ค.ศ. ๑๘๕๘ และสามารถสรุปเวลาเกิดย่ำรุ่งได้ตามตารางข้างบนนี้ เช่น ในวันอังคารที่ ๒ พุทธศักราชที่ ๔ กุมภาพันธ์ เมื่อเจ้าพนักงานทำการสังเกต ณ จุดที่ดวงอาทิตย์จะขึ้น เมื่อเห็นเส้นขอบฟ้าปรากฏขึ้นลงๆ เป็นครั้งแรก ก็ให้ตั้งเวลาให้นาฬิกาเป็น 05:48 น. ทันที ซึ่งคงทำโดยการตั้งเวลาให้นาฬิกาเรือนเล็กค้างไว้ก่อน เมื่อถึงเวลาก็กดปุ่มให้เริ่มเดิน แล้วจึงนำไปตั้งเวลาให้นาฬิกาเรือนใหญ่บนหอนาฬิกา และ เรือนอื่นๆ ในความรับผิดชอบต่อไป

การคำนวณเช่นนี้ ต้องแบ่งงานออกเป็น ๒ ขั้นตอน คือ

ก. ทำการคำนวณตำแหน่งดวงอาทิตย์รายวันตลอดทั้งปี โดยให้ศูนย์กลางของโลกเป็นศูนย์กลางของระบบพิกัดอ้างอิง

ข. กำหนดจุดผู้สังเกตบนผิวโลกด้วยค่าเส้นรุ้งเส้นแวง แล้วคำนวณหาเวลาในแต่ละวันละ ๒ เวลา เช้าและเย็น ที่ดวงอาทิตย์จะอยู่ในตำแหน่งได้เส้นขอบฟ้าของผู้สังเกตเป็นระยะทางเชิงมุม ๖ องศา

การคำนวณในข้อ ก. ใช้เวลาเป็นตัวแปรต้น เพียงแต่สั่งให้เครื่องคอมพิวเตอร์ทำการคำนวณสำหรับปีใดก็ได้ตัวเลขปี ค.ศ. นั้นลงไป ก็จะได้ตำแหน่งดวงอาทิตย์รายวันออกมาในฐานข้อมูลสำหรับเรียกออกมาใช้งานโดยโปรแกรมอื่นต่อไป ดังที่ได้แสดงเป็นตัวอย่างส่วนหนึ่งใน ตารางที่ 1

การคำนวณในข้อ ข. นั้น มีระบบการที่ซับซ้อนมาก เราไม่อาจจะใช้เวลาเป็นตัวแปรต้นได้ แต่เรากำลังจะหาเวลาที่มีเหตุการณ์อย่างหนึ่งเกิดขึ้น คือ การที่ดวงอาทิตย์จะต้องอยู่ใต้เส้นขอบฟ้า ๖ องศา ณ จุดสังเกตที่กำหนดให้ อันเกิดจากการหมุนรอบตัวเองของโลกรายวัน แต่ในขณะเดียวกันตำแหน่งของดวงอาทิตย์อันเกิดจากโลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ก็เปลี่ยนไปด้วยตลอดเวลา ทุกสิ่งทุกอย่างมีการเปลี่ยนแปลงไปทั้งสิ้น เราจะจับสิ่งใด 'แน่ชัด' มิได้

จึงเป็นการคำนวณที่ยากมาก ผู้เขียนได้ใช้ให้เครื่องทำการคำนวณการเกิดและยุติของแสงเงินแสงทองชนิดพลเรือนในยุคปัจจุบันเพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณของหอดูดาวกรีนวิชของอังกฤษเพื่อทำการทดสอบโปรแกรมสำหรับตำแหน่งผู้สังเกตที่เส้นรุ้งขนานที่ ๑๐ องศา (เหนือ) ก็ปรากฏว่าได้ผลตรงกันอย่างน่าพอใจ ดังแสดงเปรียบเทียบในตารางที่ 2 และตารางที่ 3 สำหรับปี ค.ศ. ๑๘๘๑

จากนั้นจึงให้เครื่องคำนวณสำหรับปี ค.ศ. ๑๘๕๘ สำหรับผู้สังเกต ณ ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ของหอนาฬิกาหลวง

เส้นแวง ๑๐๐ องศา ๒๕ ลิปดา ๕๐ พิลิปดา (ตะวันออก)

เส้นรุ้ง ๑๓ องศา ๔๔ ลิปดา ๒๕ พิลิปดา (เหนือ)

ระดับความสูงตาของผู้สังเกต ๑๐๐ ฟุต ซึ่งเป็นระยะความสูงโดยประมาณของหอนาฬิกา ที่ระดับผิวโลกนี้ ถ้าระยะสูงผิดไป ๒๐ ฟุต จะทำให้เวลาที่คำนวณผิดไป ๔ วินาที นับว่าน้อยมาก ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 4 ระบบเวลาที่ใช้ในการคำนวณนี้เป็นเวลาที่อ้างอิงกับเส้นแวงของหอนาฬิกา คือที่เส้นแวง ๑๐๐ องศา ๓๐ ลิปดา และเป็นเวลาในระบบ "เวลาปานกลาง" หรือ Bangkok mean time

เราจะพบว่าค่าเวลาที่เกิดจากการคำนวณ civil twilight ใน ตารางที่ 4 มีค่ามากกว่าค่าสรุปผลการทรงคำนวณที่แสดงในตาราง ก.ข้างบนนี้ประมาณ ๑๖ นาที ซึ่งเราสามารถหาคำอธิบายได้ว่าเกิดจากระบบเวลาที่ใช้ต่างกัน คือในปัจจุบันนี้เราใช้เวลาในระบบเวลาปานกลาง คือเวลาที่ได้จากการเฉลี่ยความเร็วในการเดินทางของดวงอาทิตย์ในรอบปีแล้วนำมาให้นาฬิกาถ่วงเวลาก็จะทำให้เดินได้เที่ยงตรงแน่นอนและเราสามารถหาซื้อนาฬิกาใช้ได้ทั่วไป การใช้ระบบเวลาปานกลางจึงสะดวก แต่ในสมัยก่อนนาฬิการาคาแพงอีกทั้งยังหาซื้อยากจึงนิยมใช้เวลาในระบบ "เวลาปรากฏ" คือใช้ ตำแหน่งดวงอาทิตย์เป็นเครื่องบอกเวลาที่เรียกกันว่านาฬิกาแดด

ดังนั้นจึงต้องทำการเปลี่ยนระบบ จาก Bangkok mean time มาเป็น Bangkok apparent time ด้วยการ ใช้ค่า "สมการเวลา" หรือ equation of time (E-o-T) มาปรับแก้

ใน ตารางที่ 1 ได้ทำการคำนวณ สมการ เวลา (E-o-T) = Mean - Apparent เป็นรายวันไว้ที่ คอลัมน์สุดท้าย หากเรานำเอาค่าสมการเวลานี้ไปลบ ค่า Bangkok mean time ใน ตารางที่ 4 ก็จะได้ผล ออกมา เป็น ตารางที่ 5

เมื่อเราเปรียบเทียบค่า Bangkok apparent time of the beginning of the civil twilight ที่แสดง ใน ตารางที่ 5 กับค่าย่ำรุ่ง ในตาราง ก. ข้างบน จะพบ ว่าค่าจากตารางที่ 5 มากกว่า ๒ นาที เสมอไปทุกวัน แสดงว่าความแตกต่างนี้เป็นความผิดเชิงระบบ หรือ ที่เรียกว่า systematic error ซึ่งถ้าเราสามารถวิเคราะห์ ได้ นอกจากจะแก้ความผิดนี้ได้แล้ว ยังทำให้เรา ค้นพบ ระบบที่แตกต่างกัน อันจะนำไปสู่ความรู้ใหม่ ที่ซ่อนตัวอยู่ภายในระบบของพระองค์ท่าน

การที่จะทรงสร้างระบบเวลามาตรฐาน ก็ควรจะเลือกเส้นแวงอ้างอิง เป็นเส้นที่มีค่าลงตัวเพื่อให้สะดวกแก่การใช้งาน ดังนั้นแทนที่จะใช้เส้น ๑๐๐ องศา ๓๐ ลิปดา ก็ควรจะใช้เส้น ๑๐๐ องศาตะวันออก ถ้วนซึ่งผ่านจังหวัดเพชรบุรี เวลาจึงต้องลดลง ๒ นาที เพราะเลื่อนไปทางตะวันตก ๓๐ ลิปดา พระองค์ท่าน ได้โปรดให้สร้างพระนครคีรีขึ้นบนเขาวัง จังหวัด เพชรบุรี เมื่อปี พ.ศ. ๒๔๐๒ มีหอชัชวาลเวียงชัยเป็น หอสังเกตการณ์ ตอนกลางคืนให้จุดไฟเป็นที่สังเกต ของชาวเรือ ทรงสร้างขึ้นเพื่อให้เป็นที่ระลึกในการ สถาปนาเส้นแวงหลักซึ่งผ่านบริเวณเขาวังนี้ และ ทั้งกรุงเทพและเมืองอื่นในประเทศไทยก็ต้องใช้ เวลาของพระนครคีรี เช่นเดียวกันกับการใช้เส้นแวง ๐ องศา ที่ผ่านเมืองกรีนวิชรักษามาตรฐานของ อังกฤษ และต่อมาก็ได้เป็น prime meridian เพื่อรักษา เวลามาตรฐานโลก

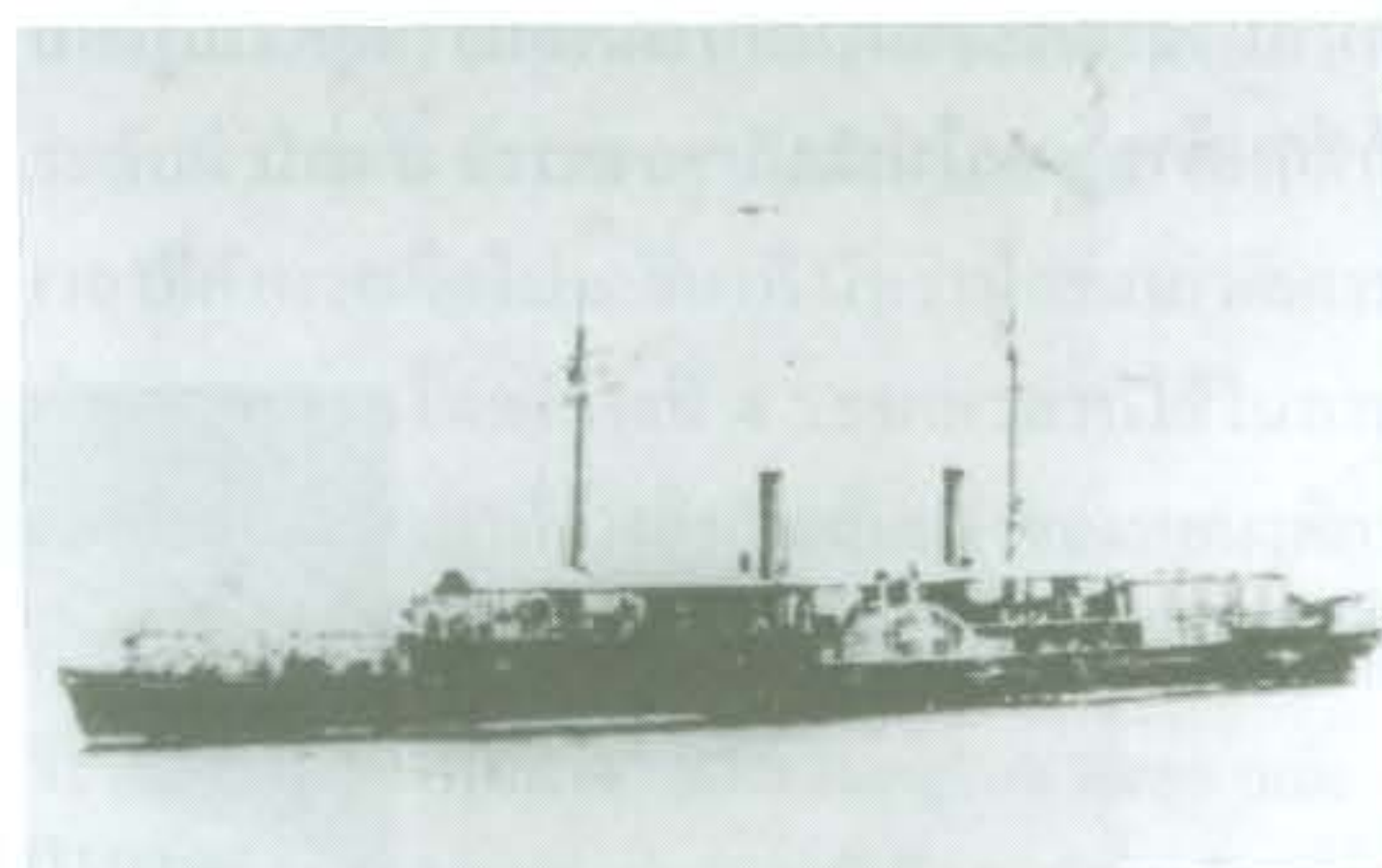


(ภาพถ่าย หอชัชวาลเวียงชัย ด้วยความอนุเคราะห์ของท้องฟ้าจำลองฯ)

ทรงค้ำหวงพยากรณ์การเกิดและเสด็จทอดพระเนตรสุริยุปราคาเม็ดเต็มดวง



ภาพถ่ายข้างบนเป็นภาพที่พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวทรงฉายร่วมกับเซอร์ แฮร์รี ออกเจ้าเมืองสิงคโปร์ พร้อมด้วย ทหารบกทหารเรือ อังกฤษที่ติดตามมา นอกจากนี้ยังมีนักดาราศาสตร์ ฝรั่งเศสจากปารีสพร้อมด้วยทหารเรือฝรั่งเศสที่มาจากฐานทัพในเวียดนาม และขุนนางไทย ทั้งที่แต่งแบบไทยให้หมอบตามธรรมเนียมไทย ที่แต่งแบบฝรั่งก็ให้ยืนตามฝรั่ง ณ พลับพลาที่ประทับ หาดหว้ากอ ประจวบคีรีขันธ์ เนื่องในวโรกาสเสด็จพระราชดำเนินทอดพระเนตรการเกิดสุริยุปราคาเม็ดเต็มดวง ซึ่งพระองค์ท่านได้ทรงค้ำหวงพยากรณ์ไว้ล่วงหน้าว่าจะเกิดขึ้น ณ วันที่ ๑๘ สิงหาคม ๒๔๑๑ และได้ทรงส่งคำเชิญไปยังแขกต่างประเทศให้มาร่วมสังเกตการณ์ด้วยกัน ณ หาดหว้ากอนี้ เพื่อเป็นสักขีพยานในความสำเร็จทางวิทยาศาสตร์แผนใหม่ของไทย โดยมีพระเกียรติยศเป็นเดิมพัน ปรากฏว่าการก็เป็นจริงดังที่ได้ทรงค้ำหวงไว้ทุกประการ ทั้งชนิดการเกิดและเวลาเกิด ทำให้เป็นที่ชื่นชมแก่แขกเมือง เจ้านาย ขุนนาง และราษฎรโดยทั่วกัน



(ด้วยความอนุเคราะห์ของท้องฟ้าจำลองฯ)

นอกจากนี้ ในงานนี้ยังได้มีการชุมนุมกำลังทางนาวิกของทั้งสามประเทศ ซึ่งต่างฝ่ายต่างก็นำเรือปืนน้อยใหญ่ มาจอดเรียงรายลอยลำอวดตรงอยู่หน้าหาดหว้ากอ และได้ยิงสลุตให้เกียรติยศแก่กัน ดังนั้นก็ยกออกไปในทะเลทำให้พระเดชานุภาพได้แผ่ไพศาลไปไกล ทางใต้ถึงปลายแหลมมลายูทางตะวันออกถึงแหลมญวน ให้เห็นว่าไทยยังเป็นใหญ่ในย่านอ่าวไทยนี้ ไม่ว่ามหาอำนาจตะวันตกจะคุกคามอย่างไร

จึงกล่าวได้ว่าสุริยุปราคาครั้งนั้นช่วยรักษาบ้านเมืองของไทยได้อีกด้วยเพราะพระองค์ทรงเป็นทั้งนักวิทยาศาสตร์ นักปราชญ์ และที่สำคัญยิ่งคือสุภาพบุรุษนักกีฬาที่กล้าสู้ด้วย sporting spirit จนเป็นที่ประทับใจและชนะใจทุกคนที่มาร่วมสังเกตการณ์สุริยุปราคาแห่งประวัติศาสตร์ครั้งนั้น เมื่อกลับบ้านเมืองเซอร์แฮรี ออด ก็ได้เขียนหนังสือรายงานการเดินทาง^๕ ซึ่งได้แสดงความยินดีในความสำเร็จทางวิทยาศาสตร์อันยิ่งใหญ่ของไทย ทั้งได้ชื่นชมพระบารมีพระราชวงศ์ไทย ทั้งฝ่ายหน้า ฝ่ายใน ด้วยความสำนึกในพระมหากรุณาธิคุณที่ได้พระราชทานแก่แขกเมืองทุกคนเป็นล้นพ้นอย่างหาที่สุดมิได้

การก่อสร้างพลับพลาที่ประทับ ณ หาดหัวากอ เพื่อการทอดพระเนตรสุริยุปราคา ตลอดจนการทรงคำนวณพยากรณ์ครั้งนี้ ได้กล่าวไว้โดยละเอียดในพระราชพงศาวดารกรุงรัตนโกสินทร์^๔ ซึ่งได้เขียนขึ้นในภายหลัง ความจริงแล้วพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวได้ทรงพระราชนิพนธ์เรื่องสุริยุปราคาในพระองค์นี้ไว้ถึง ๒ ฉบับ คือ ฉบับที่หนึ่ง^๖ ทรงเขียนก่อนออกเสด็จพระราชดำเนินไปทอดพระเนตร กล่าวถึงผลการคำนวณ และการเตรียมการต่างๆ เพื่อสังเกตการณ์ ฉบับที่สอง^๗ ทรงเขียนเมื่อเสด็จกลับจากการทอดพระเนตรแล้ว กล่าวถึงผลของการสังเกตการณ์สุริยุปราคาที่เราจะใช้เอกสารในพระองค์ทั้งสองนี้เป็นหลักฐานฝ่ายไทยนำไปศึกษาร่วมกับเอกสารต่างประเทศแล้วนำผลการคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาพิจารณาประกอบเพื่อแสดงให้เห็นถึงพระอัจฉริยภาพทางวิทยาศาสตร์ของพระองค์ท่าน

นักดาราศาสตร์ฝรั่งเศสจากกรุงปารีสได้ขอพระราชทานพระบรมราชานุญาตเดินทางเข้ามาเพื่อทำการสังเกตการณ์สุริยุปราคาครั้งนี้ด้วย จึงได้โปรดให้ตั้งค่ายที่หาดหัวากอ อยู่ห่างจากพลับพลาที่ประทับไปทางใต้เป็นระยะทาง ๑๘ เส้น เมื่อกลับฝรั่งเศส ก็ได้เขียนรายงานครั้งนั้นเป็นเอกสาร

ทางวิชาการ^๘ ต่อไปจะขอเรียกว่า เอกสารฝ่ายฝรั่งเศส ซึ่งมีประโยชน์ต่อการศึกษาของเราเป็นอย่างมาก

สมาคมวิทยาศาสตร์ในพระบรมราชูปถัมภ์ได้ส่งคณะสำรวจไปศึกษาหาดหัวากอ และได้เขียนรายงานการศึกษา^๙ ผลการศึกษาครั้งนั้นสรุปได้ว่าสิ่งก่อสร้างฐานอิฐสอปูนเป็นรูปเหลี่ยมเหมือนเตาหุงข้าวกระทะเหล็กใบบัวขนาดใหญ่ที่ยังปรากฏให้เห็นอยู่ทุกวันนี้ นั้น แท้ก็คือฐานตั้งเครื่องมือวิทยาศาสตร์ของนักดาราศาสตร์ฝรั่งเศส ซึ่งประกอบด้วยกล้อง Transit เพื่อกำหนดเส้นแวงของหัวากอใช้เป็นเส้นอ้างอิงในการตั้งระบบเวลาปานกลางหัวากอเพื่อใช้เป็นหลักในการสังเกตการเกิดสุริยุปราคาพร้อมด้วยนาฬิกาที่มีความเที่ยงตรงสูงเพื่อเดินรักษาเวลา สามารถส่งสัญญาณวินาทีออกมาให้ได้ยินภายในค่ายทั่วกันเมื่อถึงเวลาเกิดคราส และเครื่องวัดสนามแม่เหล็กโลก ซึ่งถือได้ว่าเป็นเครื่องมือที่ทันสมัยดังนั้นก็นับเป็นการดีที่มีนักดาราศาสตร์ชั้นหัวกะทิระดับมืออาชีพมาร่วมทำงานด้วย เพื่อที่เราจะได้นำผลการสังเกตการณ์ของทีมฝรั่งเศสนี้มาเปรียบเทียบกับทีมไทยภายใต้การนำขององค์พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว

ในเอกสารฝ่ายฝรั่งเศส ได้ัญเชิญพระราชหัตถ์เลขที่พระองค์ท่านได้พระราชทานให้มาพิมพ์ประกอบรายงานไว้ด้วย ซึ่งทรงเล่าว่าพระองค์ได้ทรงศึกษาวิชาดาราศาสตร์ไทยโบราณอย่างเป็นการถ่อมพระองค์ "I have studied this science firstly in Siamese and Paguan astronomy, which had been adopted and somewhat translated from the ancient book of Hindu, entitled Suruyasiddhant, Varohamihirah, Kaju-multan, etc..." แต่ได้ทรงแสดงศักยภาพว่า "...I have afterwards only tested certain European books of astronomy and astronomical navigation, geometry, and so I have understood better manner of calculation in use of logarithm, of secant, cosecant, sine, cosine, tangent, cotangent, logarithm

of number, etc..." ซึ่งเป็นหลักฐานอย่างดีที่แสดงว่า พระองค์ท่านทรงเป็นนักคำนวณชั้นสูง เพราะนอกจากจะทรงคำนวณ logarithm of number ได้แล้ว ยังทรงสามารถคำนวณ logarithm of trigonometry ได้ด้วย ท่านที่เคยเรียนนายเรือสมัยก่อน มีเครื่องคำนวณใช้คงจำได้ว่าการคำนวณตรีโกณมิติทางอ้อมโดยใช้ค่า log นั้น น่าขยาดเพียงใด แต่ก็จำเป็นต้องเรียนเพื่อไม่ให้หลงทางกลางทะเล ดังนั้นจึงสรุปตรงนี้ได้เลยว่า เรื่องการคำนวณทางดาราศาสตร์ และหลักวิชาดาราศาสตร์ถือเป็นของธรรมดาสำหรับพระองค์ท่าน อย่างน้อยที่สุดก็ได้ทรงผ่านงานการคำนวณ 'ย่ำรุ่ง' และ 'ย่ำค่ำ' มาแล้วเป็นเวลา ๑๐ ปีก่อนจะถึงยุทธการห้วยภักขีครั้งนั้น

การคำนวณหาอุปราคาคือทั้งสุริยุปราคา และจันทรุปราคา สามารถแบ่งลำดับได้เป็น ๓ ขั้นตอน

๕.๑ ทำการคำนวณหาตำแหน่งดวงอาทิตย์ และดวงจันทร์ รายวันทุกวันในปีประสงค์ เก็บไว้ใช้งาน

๕.๒ ทำการตรวจหาว่าจะเกิดอุปราคาได้เมื่อใดในปีประสงค์

๕.๓ เมื่อพบก็ทำการคำนวณหา รายละเอียดต่อไป เช่น ชนิด เวลา ลำดับขั้นตอนการเกิด ตำแหน่งที่จะเห็นได้

ในสมัยพระองค์ท่าน ที่หอดูดาวกรีนนิช จะจ้างนักคำนวณทำงานรับผิดชอบเป็นส่วนๆ คนเหล่านี้เป็นเด็กหนุ่มที่เพิ่งเรียนจบ มีหน้าที่เป็นผู้ช่วยนักดาราศาสตร์คำนวณตามสูตร ดำเนินการตามผังการคำนวณด้วยความรับผิดชอบทั้งความถูกต้อง การคำนวณและลำดับขั้นตอน เรียกตำแหน่งงานนี้ว่า computer จึงได้นำคำนี้มาใช้กับเครื่องคำนวณที่ทำงานได้ด้วยโปรแกรมที่ให้อำนาจการตัดสินใจ ดำเนินงานตามผังงานแทนมนุษย์ในสมัยปัจจุบัน

งานวิจัยทางฟิสิกส์ คณิตศาสตร์ และดาราศาสตร์ที่กระทำกันในแต่ละประเทศในสมัยพระองค์ท่านคือการใช้ทฤษฎีแรงดึงดูดระหว่างมวลสารของ

นิวตันมาทำการคำนวณหาตำแหน่งดวงอาทิตย์ ดวงจันทร์ และดาวเคราะห์ทั้งหลาย ทฤษฎีนี้กล่าวถึงแรงดึงดูดระหว่างสองวัตถุที่ทำให้วัตถุปริวารต้องเดินทางเป็นวงรีรอบวัตถุประธาน แต่ในความเป็นจริงนั้น มีเทพีฟากฟ้ามากมายหลายสิ่ง ต่างก็ส่งแรงดึงดูดซึ่งกันและกันในเวลาเดียวกัน จึงต้องแบ่งปัญหาออกเป็นสองส่วน คือให้กำหนดส่วนหลักก่อนแล้วตามด้วยส่วนย่อย กล่าวคือให้มีวัตถุที่เป็นประธานแล้วกำหนดวัตถุปริวารทีละดวง ปล่อยให้ทั้งสองทำงานกันด้วยแรงดึงดูดซึ่งกันและกันเป็นแรงหลักก่อน ถือเป็นส่วนหลัก จากนั้นให้กำหนดวัตถุที่จะส่งแรงย่อยเข้ามารบกวนเรียงหน้ากันทีละดวง รวมแรงหลักและแรงย่อยเข้าด้วยกันสำหรับดาวบริวารดวงแรก จากนั้นก็ผลัดเปลี่ยนกันเป็นดาวบริวารเรื่อยไปจนกว่าจะหมด ก็จะได้สถานภาพความเป็นอยู่ร่วมกันในเวลาหนึ่ง แล้วก็ขยับเวลาให้เลื่อนไปที่ละขั้นแล้วกลับไปทำการคำนวณ แรงหลักแรงย่อย แล้วเปลี่ยนคู่กันไป ทำเช่นนี้จนกว่าจะได้ครบกำหนดช่วงเวลาที่ต้องการ เรียกการคำนวณนี้ว่า **ปัญหามานาวัตถุ (N-body problem)**

ในการคำนวณหาตำแหน่งดวงอาทิตย์ รายวันนั้น ก็ให้โลกเป็นบริวารโคจรรอบดวงอาทิตย์ แล้วให้ดาวเคราะห์อื่นส่งแรงมารบกวนทีละดวง แล้วก็ผลัดให้ดาวดวงอื่นเป็นบริวารให้โลกและดาวที่เหลือส่งแรงไปรบกวน ทำอยู่เช่นนี้ไปทั้งปีประสงค์ ก็จะได้ตำแหน่งดาวเคราะห์ทั้งหมดที่ต้องการ ส่วนตำแหน่งของดวงอาทิตย์ก็คือตำแหน่งตรงกันข้ามกับโลกนั่นเอง ได้เป็นทางเดินปรากฏของดวงอาทิตย์ในรอบปี

การคำนวณหาตำแหน่งดวงจันทร์ก็คือกำหนดให้ดวงจันทร์โคจรรอบโลก แล้วให้ดวงอาทิตย์ส่งแรงมารบกวน เรียกการคำนวณนี้ว่า **ปัญหาสามวัตถุ (three-body problem)** แต่ความจริงแล้วก็ต้องคิดแรงรบกวนจากดาวเคราะห์ดวงอื่นด้วยเหมือนกัน เพียงแต่ไม่ต้องคิดถึงการที่ดวงจันทร์ต้องส่งแรงไปรบกวนย้อนกลับไปด้วย แต่เนื่องจาก

ดวงจันทร์อยู่ใกล้โลกมาก มวลส่วนที่โป่งออกตามเส้นศูนย์สูตรของโลกก็สามารถส่งแรงไปรบกวนดวงจันทร์ได้ด้วย ต้องนำส่วนนี้มาคิดรวมด้วยเช่นกันก็จะทำให้ได้เป็นทางเดินของดวงจันทร์รอบโลก

การแก้ปัญหาข้างบนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสูตรสำเร็จที่ใช้เวลาเป็นตัวแปรต้นเพียงตัวเดียวเพื่อให้ความสะดวกแก่การคำนวณ ซึ่งนักทฤษฎีจะกระทำโดยการพิสูจน์ให้ได้สูตรออกมาเป็นเทอมต่างๆที่ยืดยาวมาก หรืออีกวิธีหนึ่งคือการจำลองแบบโดยใช้เทคนิควิธีที่เรียกว่า numerical integration แล้วเอาผลที่ได้มาสร้างเป็นสูตรสำเร็จรูปที่ใช้เวลาเป็นตัวแปรต้นได้เช่นกัน ซึ่งก็ทำเป็นคู่ขนานกันมาทั้งสองสาย มีการแลกเปลี่ยนความรู้ซึ่งกันและกัน ก็จะได้สูตรสำเร็จออกมาใช้งานที่พร้อมคำนวณเพียงแค่กำหนดเวลาประสงค์ให้เท่านั้น เรียกสูตรนี้ว่า solar motion และ lunar motion ซึ่งมีการพัฒนาเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา จนกว่าจะถึงยุคของ Brown's tables of the sun and moon ซึ่งเริ่มใช้ในปี ค.ศ. ๑๙๐๐

พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวได้โปรดฯให้สั่งซื้อหนังสือตำราทางดาราศาสตร์ และคณิตศาสตร์ เป็นจำนวนมากจากต่างประเทศ ย่อมจะต้องทรงมีหนังสือว่าด้วยหลักทฤษฎีและสูตรการคำนวณ solar motion และ lunar motion ทำให้ทรงคำนวณเวลาอย่างรู้ และอย่างทำได้ถูกต้อง ย่อมจะไม่มีปัญหาใดในการที่จะทรงคำนวณพยากรณ์การเกิดสุริยุปราคาในพระองค์ภาพทางซ้ายมือนี้คือ ส่วนหนึ่งของหนังสือตำราทางดาราศาสตร์ในพระองค์



(ด้วยความอนุเคราะห์ของสำนักพระราชวัง)

ความจริงแล้ว การคำนวณตำแหน่งดวงอาทิตย์ ดวงจันทร์ และ ดาวเคราะห์ทั้งหลายที่ใช้เวลาเป็นตัวแปรต้นตามวิธีของไทยก็มีใช้กัน เราเรียกว่า คัมภีร์สุริยยาตร์ ซึ่งใช้ในทางโหราศาสตร์ แม้ในปัจจุบันนี้ก็ยังมีใช้กันอยู่ แต่เราไม่สามารถนำมาใช้ในการคำนวณทางดาราศาสตร์ได้ เพราะถึงแม้จะทำการคำนวณเป็น องศา ลิปดา แต่ค่า องศา ลิปดา นี้ไม่ได้มาโดยกระบวนการทางตรีโกณมิติ สิ่งนี้เป็นของเก่าที่มีไว้เพื่อให้สะดวกต่อการคำนวณให้ได้ตำแหน่งโดยประมาณ เพียงเพื่องานบางอย่าง คนสมัยก่อนท่านฉลาด สามารถทำให้คำนวณหาตำแหน่งดวงอาทิตย์ ดวงจันทร์ และดาวเคราะห์ได้ในขณะที่โลกยังไม่รู้จักแม้แต่กฎแรงดึงดูดระหว่างมวลสารของเหล่านี้นั้นเป็นของดีมีคุณค่า เป็นภูมิปัญญาของคนไทยที่เราต้องรักษาไว้

๑. ในพระราชนิพนธ์ฉบับที่หนึ่ง^๖ กล่าวว่า สุริยุปราคาครั้งนี้จะเห็นมืดเต็มดวงตั้งแต่ชุมพรถึงปราณบุรี ซึ่งสรุปผลการทรงคำนวณพยากรณ์ได้ดังนี้

ก. ที่หัวากอ ดวงจันทร์จะเข้าสัมผัสทางด้านตะวันตกเฉียงเหนือของดวงอาทิตย์แล้วเลื่อนลึกเข้ามาทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ มืดเต็มดวงที่เวลา ๕ โมง กับ ๘ บาท

ข. ที่กรุงเทพ จะไม่เต็มดวง ดวงจันทร์จะเข้าสัมผัสทางด้านทิศตะวันตกเฉียงเหนือของดวงอาทิตย์ จะจับมากที่สุดสัก ๕ ส่วน หรือ ๖ ส่วน เหลือส่วนหนึ่ง เมื่อเวลา ๕ โมง กับ ๘ บาท จะจับด้านใต้ของดวงอาทิตย์ เหลือไว้ด้านเหนือ

๒. ในพระราชนิพนธ์ ฉบับที่สอง^๗ ได้รายงานผลการสังเกตที่หัวากอว่า

หัวากอ ตำแหน่ง

เส้นแวง ๘๘ องศา ๔๐ ลิปดา ๑๐ พิลิปดา (ตะวันออก)

เส้นรุ้ง ๑๑ องศา ๔๑ ลิปดา ๔๐ พิลิปดา (เหนือ)

ในตอนเช้ามีเมฆบังมาก ทำให้ไม่ทราบว่าจะเริ่มจับเวลาเท่าไร แต่แล้วฟ้าก็เปิดก่อนจะถึงเวลามืด

หมดดวง ทำให้สามารถจับเวลาเริ่มมืดเต็มดวงได้ที่ ๑๑ นาฬิกา ๓๖ นาที ๒๒ วินาที ซึ่งเป็นคำตอบสำหรับ ข้อ ก. ข้างบน

หน่วยย่อยเวลาของไทย ๑ บาทเท่ากับ ๖ นาที เนื่องจากทรงใช้หน่วยย่อยที่สุดเป็นบาทย่อมถือว่าความผิดพลาดก็อยู่ในระดับหน่วยย่อยที่สุดที่ทรงใช้คือ ๖ นาที ดังนั้นในข้อ ก. จะได้ว่าเวลาเริ่มมืดเต็มดวงจากการทรงคำนวณพยากรณ์ เมื่อนำมาเขียนเป็น

ภาษาวิทยาศาสตร์ในปัจจุบันก็จะเขียนได้เป็น

เริ่มมืดเต็มดวง เวลา 11:42 น. + 6 นาที ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าทรงคำนวณถูกต้องตรงกับเวลาที่ได้จากสังเกตการณ์ คือ 11:36:22 น. ในระบบเวลาเดียวกัน ซึ่งเราจะแสดงต่อไปว่า คือ เวลาในระบบเวลาปรากฏ (apparent time) ที่ใช้เส้นแวง ๑๐๐ องศา (ตะวันออก) อ้างอิง

PATH OF THE MOON'S SHADOW AND PENUMBRA UPON THE SURFACE OF THE EARTH, DURING THE TOTAL ECLIPSE OF THE SUN, AUGUST 17, 1868.



ภาพข้างบนนี้ และตารางที่ 6 คือผลการคำนวณการเกิดสุริยุปราคาวันที่ ๑๘ สิงหาคม ค.ศ. ๑๘๖๘ ที่หอดูดาวกรีนวิช แห่งประเทศอังกฤษ พิมพ์ออกเผยแพร่ ซึ่งผู้เขียนได้ถ่ายมาจากหนังสือคู่มือนักเดินเรือ 1868 *Nautical Almanac*^{๑๑} โดยที่ได้เคยไป

อยู่และทำงานวิจัยทางดาราศาสตร์ที่นั่นเป็นเวลา ๓ ปี จึงสามารถเข้าไปค้นหนังสือเก่าล้ำค่าของหอดูดาวได้ เราจะเรียกภาพนี้ และตารางที่ 6 ว่า "เอกสารฝ่ายอังกฤษ"

ภาพนี้แสดง line of central eclipse จากตารางที่ 6 เป็นเส้นทางเดินของการเกิดสุริยุปราคาเต็มดวงที่ปรากฏบนผิวโลก เริ่มต้นจากตะวันออกกลางผ่านอินเดีย ผ่านภาคใต้ประเทศไทย ลงอ่าวไทย ไปสิ้นสุดที่ทางเหนือของออสเตรเลีย เวลาที่ใช้เป็นระบบเวลาปานกลางที่กรีนิช แต่วันที่ใช้ในระบบดาราศาสตร์ ซึ่งถือว่าเปลี่ยนเวลาเที่ยงวันที่กรีนิช ดังนั้น เมื่อเขาระบุว่าวันที่ ๑๗ เวลา ๑๗ น. ก็หมายความว่าตรงกับระบบพลเรือนว่าวันที่ ๑๘ เวลา ๐๕ น. ที่กรีนิช

ผู้เขียนได้สร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้ทำการคำนวณและพิมพ์ออกมาในลักษณะเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 7 เมื่อเปรียบเทียบกับ ตารางที่ 6 ก็จะเห็นว่าผลการคำนวณตรงกัน

ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเราต้องการทราบว่า คราสครั้งนี้ จุดศูนย์กลางของเหตุการณ์อยู่ที่ใดบนผิวโลก ก็จะได้ว่า

จาก ตารางที่ 6

Central eclipse at noon, August 17, 17h
13.1m in longitude 102° 38' E. of Greenwich and
latitude 10° 27' N

จาก ตารางที่ 7

Central eclipse at local apparent noon 05:13:04 U.T.
long -102.63 D lat +10.45 D

ซึ่งให้คำตอบตรงกันว่าศูนย์กลางของทั้งโลกในการเกิดคราสครั้งนี้ เกิดขึ้น ณ วันที่ ๑๘ สิงหาคม เวลาปานกลางที่กรีนิช ๕ นาฬิกา ๑๓ นาที ที่เส้นแวง ๑๐๒ องศา ๓๘ ลิปดา (ตะวันออก) เส้นรุ้ง ๑๐ องศา ๒๗ ลิปดา (เหนือ) ซึ่งอยู่กลางอ่าวไทย ดังนั้นบริเวณหาดหัวกอกคือจุดบนแผ่นดินที่ใกล้ศูนย์กลางมากที่สุด ซึ่งหมายความว่าได้เห็นนานที่สุด คือ ๖ นาทีตามที่รับสั่งซึ่งถูกต้องตามที่แสดงในตารางที่ 8

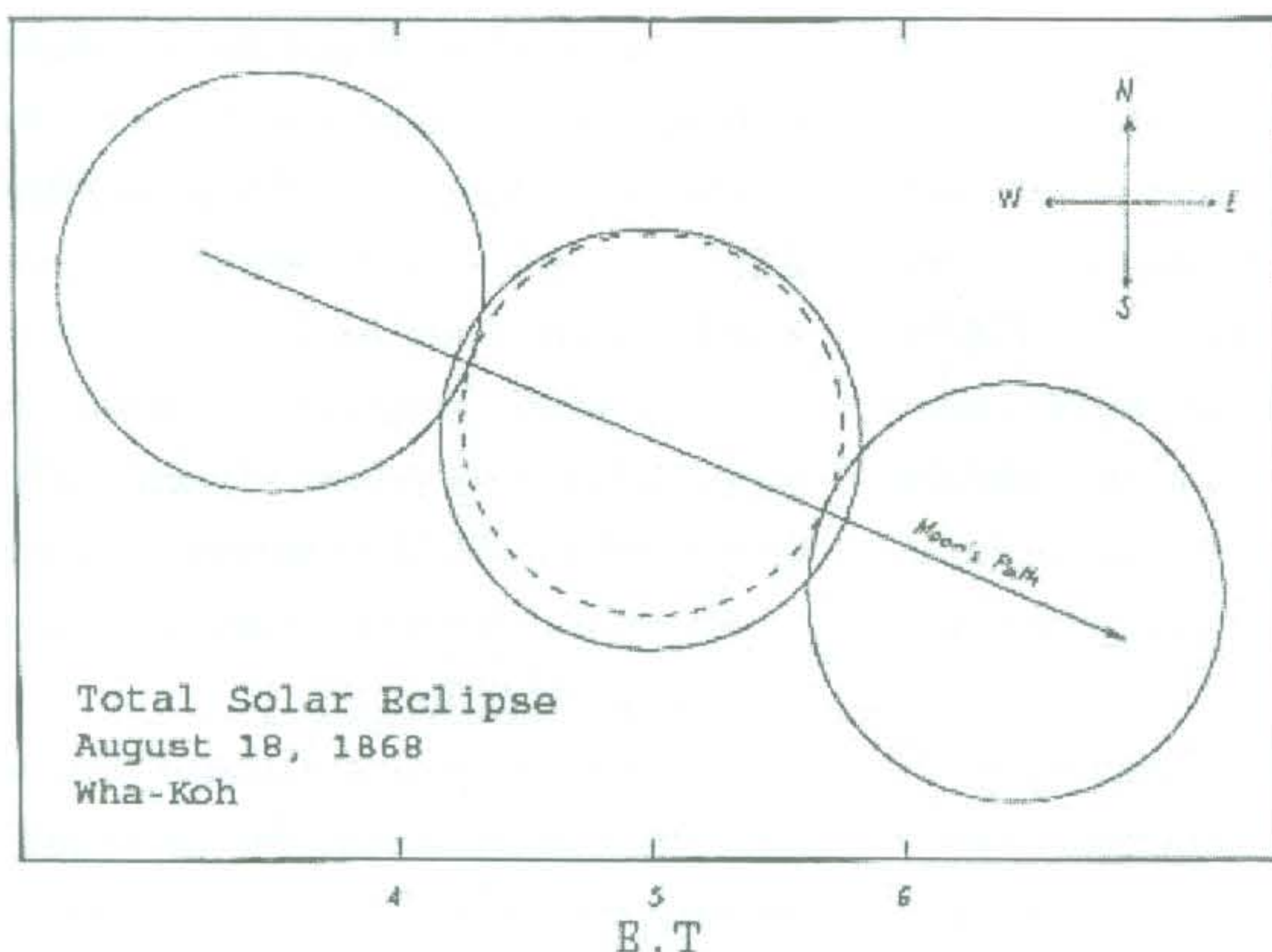
หอดูดาวกรีนิชจะพิมพ์หนังสือคู่มือนักเดินเรือรายปีเป็นการล่วงหน้า ถ้าหนังสือเล่มนี้เดินทางมาถึงเมืองไทยได้ในสมัยพระองค์ท่าน นี่ก็ข้อมูลที่ดีที่สุดที่พระองค์ท่านจะทรงได้รับจากต่างประเทศ เราจะพิจารณาประเด็นที่สำคัญ คือ

๑. ผลการคำนวณของพระองค์ท่านระบุว่า จะเห็นมีดเต็มดวงตั้งแต่ชุมพรถึงปราณบุรี แต่ในเอกสารฝ่ายอังกฤษ ไม่ได้ระบุขอบเขต หรือความกว้างของเส้นทางเงามืดแต่อย่างใด เพราะมีแต่ line of central eclipse ให้เท่านั้น

ตารางที่ 8 ผู้เขียนให้โปรแกรมคำนวณแสดง path of the central phase เป็นการนำเสนอให้เห็นขอบเขตของเงามืดที่ปรากฏบนผิวโลกนับแต่เริ่มจับจนคลายจาก ด้วยการคำนวณหาค่าเส้นรุ้งและเส้นแวง ๓ จุด ในเวลาเดียวกันเพื่อแสดง ขอบทางเหนือ (northern limit) แนวศูนย์กลาง (central line) และ ขอบทางใต้ (southern limit) ส่วน duration คือระยะเวลาที่เห็นมีดเต็มดวง และ A คือค่ามุมสูงจากพื้นดิน เมื่อทำการสังเกตที่จุดใน central line

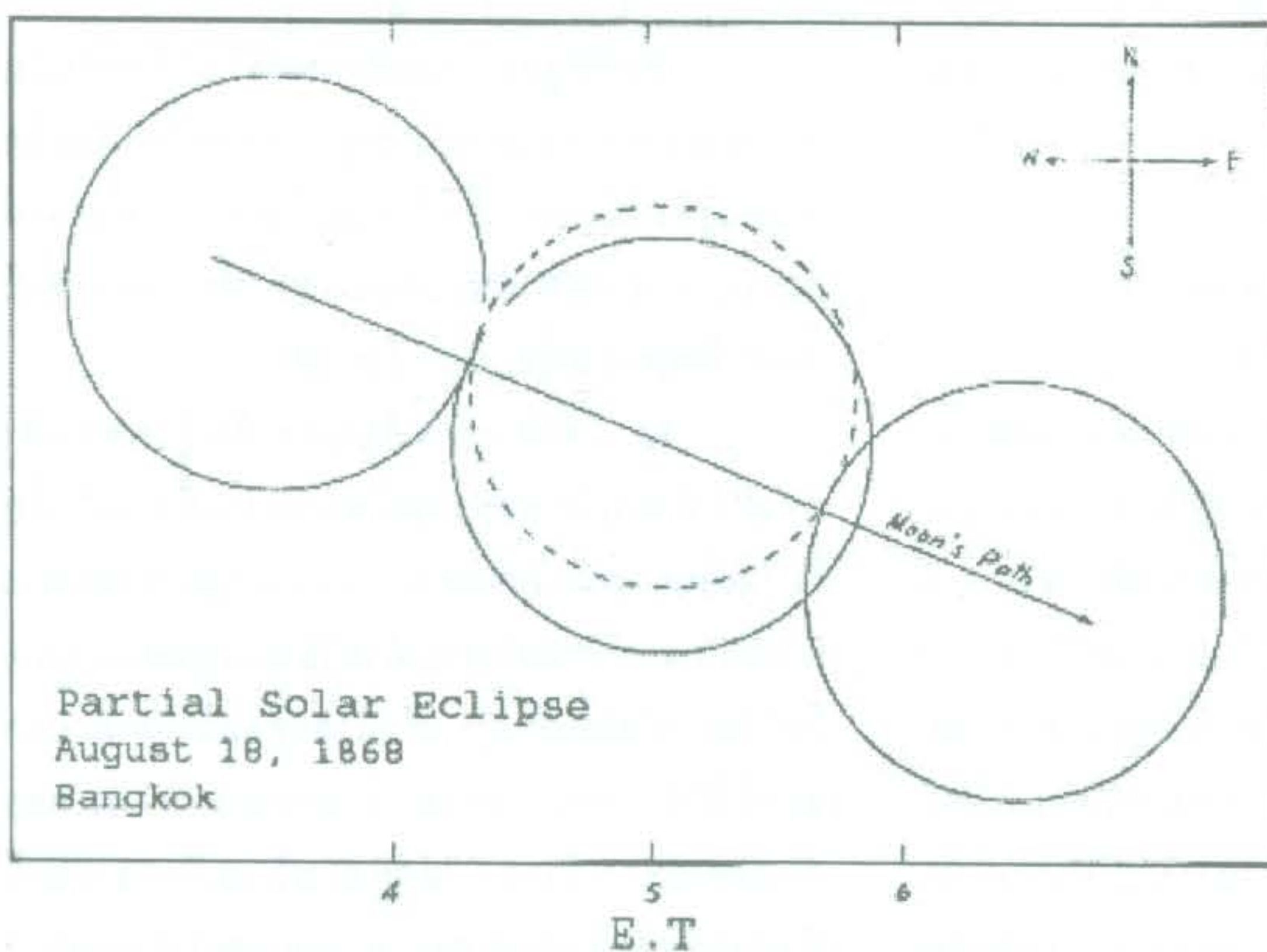
ซึ่งข้อมูลละเอียดเช่นนี้ยังไม่ได้ทำกันในสมัยพระองค์ท่าน แต่ทรงระบุว่าคราสครั้งนั้นจะมีดเต็มดวงตั้งแต่ชุมพร ถึงปราณบุรี แสดงว่าพระองค์ต้องทรงคำนวณด้วยพระองค์เองเท่านั้น เพราะไม่มีแหล่งข้อมูลเช่นนี้จากต่างประเทศ

๒. ตำแหน่งเส้นแวงเส้นรุ้งของหัวกอกตามที่ระบุในพระราชนิพนธ์ฉบับที่สอง นั้น ไม่ได้เป็นจุดหนึ่งใน line of central eclipse จากตารางที่ 6 ไม่ว่าจะทำการคำนวณด้วยวิธี interpolation อย่างไรก็ดีไม่อาจให้ค่าเส้นรุ้ง เส้นแวงของหัวกอก ออกมาจากที่นี่ได้ แสดงว่าทรงคำนวณหาออกมาเอง และย่อมแสดงว่า หัวกอก มิได้อยู่ ณ บริเวณกึ่งกลางพอดี ซึ่งพระองค์ท่านก็ทรงทราบ เพราะหัวกอกอยู่ใกล้ปราณบุรีมาก จึงไม่ใช่ครึ่งทางระหว่าง ชุมพรกับปราณบุรี อย่างแน่นอน



ภาพจาก สมโภชกรุง
รัตนโกสินทร์ ๒๐๐ ปี^{๑๑}

ภาพข้างบนคือการเกิดสุริยุปราคาในที่หว่ากอ วงกลมประแทนดวงอาทิตย์ วงกลมที่บสามวงแทนดวงจันทร์ ในสามจังหวะคือเริ่มสัมผัสครั้งแรก ณ ด้านตะวันตกเฉียงเหนือของดวงอาทิตย์แล้วถึงกึ่งกลางคราส จากนั้นจึงคลาออกทางด้านทิศตะวันออกเฉียงใต้



ภาพจาก สมโภชกรุง
รัตนโกสินทร์ ๒๐๐ ปี^{๑๑}

ภาพข้างบน คือการเกิดสุริยุปราคาในที่กรุงเทพ ตรงตามที่ทรงพยากรณ์ไว้ว่า ที่กรุงเทพจะไม่เต็มดวง ดวงจันทร์จะเข้าสัมผัสทางด้านทิศตะวันตกเฉียงเหนือของดวงอาทิตย์ จะจับมากที่สุดสัก ๕ ส่วน หรือ ๖ ส่วน เหลือส่วนหนึ่ง เมื่อเวลา ๕ โมง กับ ๘ บาท จะจับด้านใต้ของดวงอาทิตย์ เหลือไว้ด้านเหนือ

ทางฝ่ายนักดาราศาสตร์ฝรั่งเศสได้ทำการสังเกตว่าเริ่มเกิดมืดเต็มดวงที่เวลา ๑๑ นาฬิกา ๓๕ นาที ๒๓.๘ วินาที ในระบบเวลาปานกลางหว่ากอ (Wha-Koh mean time) การที่มีจุดทศนิยมที่วินาที แสดงว่าเป็นค่าเฉลี่ยจากการใช้ผู้สังเกตหลายคน ดังนั้นต้องถือว่าเป็นตัวเลขที่เชื่อถือได้ เราจะทำ การแปลงเวลานี้ให้อยู่ในระบบที่พระองค์ท่านทรงสถาปนาคือเวลาปรากฏที่เส้นแวง ๑๐๐ องศา (ตะวันออก) โดยดำเนินการดังนี้

๑. ทำให้เป็นเวลาปรากฏหว่ากอ (Wha-Koh apparent time) อย่างที่ได้ทำมาแล้วในตอนต้น โดยใช้ equation of time ซึ่งในวันนั้น มีค่า (mean - apparent) = +๓ นาที ๓๕ วินาที นำเอาค่านี้มาลบ จะได้เป็น ๑๑ นาฬิกา ๓๕ นาที ๔๔.๘ วินาที

๒. แปลงเวลาจากเส้นแวงหว่ากอเป็นของเส้นแวง ๑๐๐ องศา (ตะวันออก) ทำได้ดังนี้

นักดาราศาสตร์ชุดนี้ได้ทำการวัดเส้นแวงของหว่ากอเทียบกับหอดูดาวปารีสได้เป็น ๕๗ องศา ๒๗ ลิปดา ๓๕ พิลิปดา แต่หอดูดาวปารีสอยู่ที่เส้นแวง ๒ องศา ๑๐ ลิปดา ๑๒ พิลิปดา ตะวันออกของกรีนวิช จึงได้ว่าเส้นแวงของหว่ากอเมื่อเทียบกับกรีนวิช มีค่าเป็น ๕๕ องศา ๔๗ ลิปดา ๔๗ พิลิปดา (เทียบกับค่าที่ทรงวัดด้วยกล้อง sextant โดยวัดจากดวงอาทิตย์ตอนเที่ยงวัน ได้ ๕๕ องศา ๔๐ ลิปดา ๑๐ พิลิปดา ต้องถือว่าทรงวัดได้เยี่ยมมาก เพราะของฝรั่งเศสเขาวัดโดยใช้กล้อง transit ตั้งบนฐานอิฐ โดยวัดจากดวงดาวโดยตรง ไม่ต้องให้แสงผ่านเครื่องกรองแสงเหมือนการวัดจากดวงอาทิตย์)

ดังนั้นหว่ากออยู่ทางตะวันตกของเส้นแวง ๑๐๐ องศา (ตะวันออก) เท่ากับ ๑๒ ลิปดา ๑๓ พิลิปดา หรือคิดเป็นเวลาได้ ๔๘.๕ วินาที จึงต้องเอาเวลาด่างกันนี้มาบวกกับเวลาหว่ากอ ก็จะได้เป็นเวลาของเส้นแวง ๑๐๐ องศา เป็น ๑๑ นาฬิกา ๓๖ นาที ๓๓.๓ วินาที

ที่พลับพลาทรงวัดเวลามืดเต็มดวงได้เวลา ๑๑ นาฬิกา ๓๖ นาที ๒๒ วินาที นั่นคือทรงวัดเวลา

ผิดไปจากมืออาชีพ ๑๑.๓ วินาที ค่าผิดพลาดการวัด ๑๑.๓ วินาทีนี้ มีค่าน้อยกว่าเวลาที่ต้องใช้ในการเปลี่ยนระบบจากหว่ากอไปยังเส้นแวง ๑๐๐ องศา (ตะวันออก) ซึ่งมีค่า ๔๘.๕ วินาที เป็นจำนวนกว่า ๓ เท่า ตามหลักวิชาสถิติ ถือว่าการแปลงระบบเป็นความจำเป็นที่ต้องกระทำ ดังนั้นระบบเวลาที่ทรงใช้ได้กำหนดให้เส้นแวง ๑๐๐ องศา เป็นเส้นแวงเทียบเวลามาตรฐานไทย จึงสรุปได้ว่า

พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวได้ทรงสถาปนาระบบเวลามาตรฐานประเทศไทย โดยใช้เส้นแวง 100° E ซึ่งผ่านจังหวัดเพชรบุรีเป็นเส้นแวงรักษาเวลา แลได้ทรงใช้ระบบเวลานี้ในการทรงคำนวณสุริยุปราคา ๑๘ สิงหาคม พ.ศ. ๒๔๑๑

สุริยุปราคาสองแผ่นดิน



ภาพข้างบนนี้เป็นภาพเขียนโดยช่างเขียนฝรั่งเศส แสดงให้เห็นสมเด็จพระนารายณ์มหาราช กำลังทอดพระเนตรการเกิดสุริยุปราคามีคบาง ส่วนกับคณะพระบาทหลวงเยซูอิตฝรั่งเศส และขุนนางไทย เมื่อวันที่ ๓๐ เมษายน พ.ศ. ๒๒๓๑ (ค.ศ. ๑๖๘๘) ณ พระราชวัง เมืองลพบุรี

อาจารย์ภูธร ภูมะธน แห่งมหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ลพบุรี สมัยเมื่อรับราชการเป็นหัวหน้าพิพิธภัณฑสถาน พระนารายณ์ราชนิเวศน์ ลพบุรี ได้ไปพบภาพนี้ที่พิพิธภัณฑสถานแห่งกรุงปารีส

ประเทศฝรั่งเศส จึงได้ขออนุญาตถ่ายสำเนา มา
ผู้เขียนจึงขอขอบคุณในความอนุเคราะห์ให้มาใช้ใน
งานนี้

จากการศึกษาของผู้เขียนได้พบว่า
สุริยุปราคาที่สมเด็จพระนารายณ์ทอดพระเนตรใน
วันที่ ๓๐ เมษายน พ.ศ. ๒๒๓๑ นี้ เป็นสุริยุปราคา
เดียวกันกับที่พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว
ได้ทรงคำนวณพยากรณ์ล่วงหน้าว่าจะเกิดขึ้นในวันที่
๑๘ สิงหาคม พ.ศ. ๒๔๑๑ และได้เสด็จพระราช
ดำเนินไปทอดพระเนตร ที่ห้วยโก ประจวบคีรีขันธ์
ซึ่งผู้เขียนได้นำเสนอใน เอกสารทางวิชาการ^{๑๒,๑๓,๑๔}

รัชสมัยของพระมหากษัตริย์ราชเจ้า
ทั้งสองพระองค์ อยู่ห่างกันสองร้อยปี แต่ประเทศ
ไทยก็มีสภาพการณ์อย่างเดียวกันคือถูกมหาอำนาจ
ตะวันตกคุกคามจึงต้องดำเนินวิเทโศบายให้ประเทศ
รอดพ้นจากการถูกล่าเป็นอาณานิคมเหมือนกัน ด้วย
การสร้างดุลยภาพระหว่างอำนาจทั้งภายนอกและ
ภายในราชอาณาจักร โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือการสร้าง
สัมพันธไมตรีอันดีกับประเทศตะวันตก ในสมัย
สมเด็จพระนารายณ์ประเทศไทยมีความสัมพันธ์ที่
ดีกับฝรั่งเศสในรัชกาลของพระเจ้าหลุยส์ที่ ๑๔ ในสมัย
พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว ไทยก็มีความ
สัมพันธ์ที่ดีกับฝรั่งเศสในสมัยพระเจ้านั่งโปเลียนที่ ๓

พระเจ้าหลุยส์ที่ ๑๔ ได้ส่งคณะราชทูตมายัง
กรุงศรีอยุธยาครั้งสำคัญ ๒ ครั้ง คือครั้งแรกในปี พ.ศ.
๒๒๒๘ (ค.ศ. ๑๖๘๕) ได้โปรดให้เซอวาเลีย เดอ
โซมองต์ เป็นเอกอัครราชทูตพร้อมด้วยคณะ
พระบาทหลวงเยซูอิตมาเข้าเฝ้าถวายพระราชสาส์น
และเครื่องราชบรรณาการแก่สมเด็จพระนารายณ์
มหาราช ณ กรุงศรีอยุธยา แล้วได้โดยเสด็จไปลพบุรี

พระบาทหลวงที่มาด้วยเป็นพระนักวิชาการ
หลายสาขาคือรวมทั้งเป็นนักดาราศาสตร์ด้วย
มีบาทหลวงตารด์ เป็นหัวหน้าคณะ เมื่อกลับไป
ท่านได้เขียนจดหมายเหตุบันทึกการเดินทาง^{๑๕}
พิมพ์เผยแพร่ทั้งภาษาฝรั่งเศสและอังกฤษ ทำให้
พระเกียรติยศสมเด็จพระนารายณ์ปรากฏไปใน



ทวีปยุโรป ตามจดหมายเหตุนี้ปรากฏว่าเกิด
จันทรุปราคามีเต็มดวงในคืนวันที่ ๑๐ ตลอดถึงเช้า
วันที่ ๑๑ ธันวาคม พ.ศ. ๒๒๒๘ สมเด็จพระนารายณ์
จึงได้โปรดให้พระบาทหลวงตั้งกล้องถวายให้ทอด
พระเนตร ณ พระที่นั่งไกรสรสีหราช หรือพระที่นั่ง
เย็นทะเลชุบศรดังภาพข้างบนนี้ ซึ่งเป็นภาพประกอบ
ใน จดหมายเหตุของบาทหลวงตารด์ กล่าวว่า
พระองค์ได้เสด็จออกทอดพระเนตรในตอนกลางคืน
ได้ทรงมีพระราชดำรัสและปฏิสันถารโดยใกล้ชิดใน
เรื่องต่างๆทั้งทางดาราศาสตร์ ภูมิศาสตร์ ด้วยความ
สนพระทัยยิ่ง จากนั้นได้พระราชทานเสื้อคลุมแพร
แก่พระบาทหลวงทุกรูป และสำหรับบาทหลวง
สำคัญทั้งในประเทศไทยและฝรั่งเศสก็ได้พระราช
ทานมหากางเขนทองคำ ผู้เขียนได้ทำการศึกษา
ปรากฏการณ์จันทรุปราคาครั้งนั้นใน เอกสารทาง
วิชาการ^{๑๖}

ในปลายเดือนธันวาคมปีนั้น คณะทูตเซอ
วาเลีย เดอ โซมองต์ ก็กราบถวายบังคมลากลับออก
ไปพร้อมด้วยคณะทูตออกพระวิสุตสุนทร หรือโกษา
ปาน เพื่ออัญเชิญพระราชสาส์นและเครื่องราช
บรรณาการไปถวายแด่พระเจ้าหลุยส์ที่ ๑๔

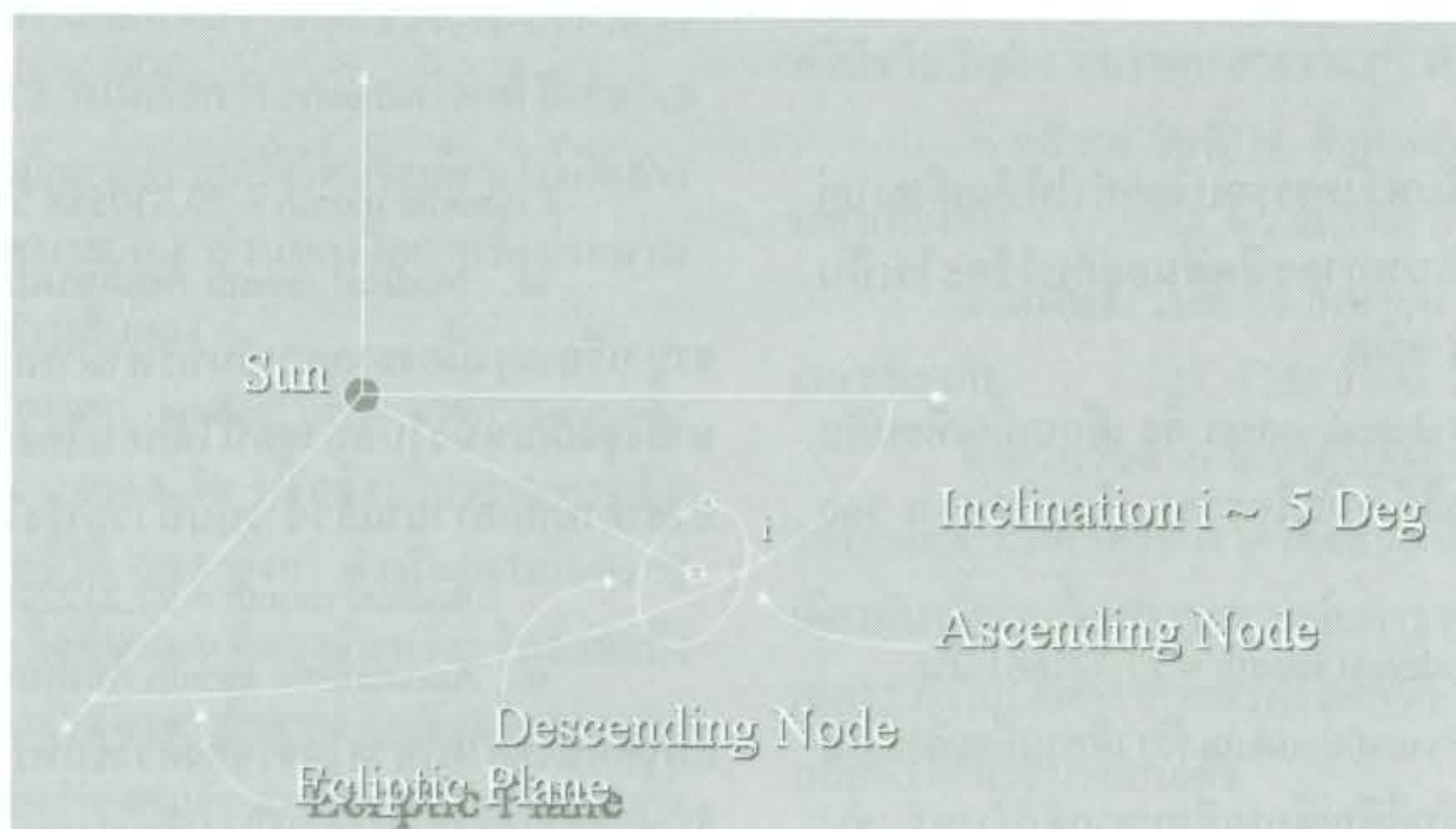
เมื่อได้เข้าเฝ้าถวายพระราชสาส์นและ
เครื่องราชบรรณาการแล้ว ท่านทูตโกษาปาน ก็ได้
ศึกษาดูงานในฝรั่งเศสเป็นเวลาพอสมควรแล้วก็ได้
กราบถวายบังคมลากลับ พระเจ้าหลุยส์จึงแต่งตั้งให้
เดอ ลา ลูแบร์เป็นราชทูตเดินทางร่วมกันมา

คณะทูตชุดใหม่นี้มีบาทหลวงตาซาร์คมาด้วยเพื่อนำบาทหลวงนักดาราศาสตร์พร้อมกล้องโทรทรรศน์ซึ่งสมเด็จพระนารายณ์โปรดให้เข้ามาประจำอยู่หอดูดาวที่ได้สร้างใหม่ในเมืองลพบุรี เดินทางถึงกรุงศรีอยุธยาปลายเดือนกันยายน พ.ศ. ๒๒๓๐ (ค.ศ. ๑๖๘๗) ก็ได้เข้าเฝ้าถวายพระราชสาส์นและเครื่องราชบรรณาการ

เดอลาตูแบร์^{๑๖} ได้เขียนหนังสือขนาดยาวเล่าเรื่องชีวิตความเป็นอยู่ของคนไทย บ้านเรือน เครื่องมือ เครื่องใช้ ต่างๆ นับว่าเป็นมรดกทางวรรณกรรมที่มีค่าสำหรับผู้สนใจสภาพบ้านเมืองในสมัยอยุธยาตอนปลาย พร้อมกันนั้นบาทหลวงตาซาร์คก็ได้ถือโอกาสเขียนจดหมายเหตุการณ์เดินทางเล่ม ๒ ของท่านด้วย แล้วทั้งหมดก็กราบถวายบังคมลากลับฝรั่งเศสตอนต้นเดือนมกราคม ค.ศ. ๑๖๘๘ และสมเด็จพระนารายณ์ก็โปรดให้บาทหลวงตาซาร์คเป็นราชทูตไทยอัญเชิญพระราชสาส์นและเครื่องราชบรรณาการถวายพระเจ้าหลุยส์ แล้วจากนั้นประเทศไทยก็หมดนักเขียน นักบันทึก ในยามที่มีความจำเป็น

เราจึงไม่ทราบว่าพระบาทหลวงนักดาราศาสตร์ที่มาประจำหอดูดาวแห่งเมืองลพบุรีนั้นได้ตั้งกล้องโทรทรรศน์ถ่ายทอดเงาการเกิดสุริยุปราคาไว้บางส่วนลงบนฉากถวายสมเด็จพระนารายณ์ได้ทอดพระเนตร ณ พระราชวังลพบุรีในวันที่ ๓๐ เมษายน พ.ศ. ๒๒๓๑ (ค.ศ. ๑๖๘๘) จนกระทั่งเมื่ออาจารย์ภูธร ภูมะธน ได้ไปพบภาพเขียนดังกล่าว แล้วได้นำมาเสนอในการสัมมนาทางดาราศาสตร์ที่ท้องฟ้าจำลองกรุงเทพ เมื่อวันที่ ๑๘ สิงหาคม ๒๕๒๘ โดยผู้เขียนได้ไปร่วมงานด้วย และได้นำผลการคำนวณการเกิดสุริยุปราคานี้ไปเสนอที่ประชุมโดยมิได้นัดหมายกันทำให้ได้พบสุริยุปราคาสองแผ่นดิน

การที่จะเข้าใจเรื่องพระมหากษัตริย์สองพระองค์อยู่ห่างกันสองร้อยปีทอดพระเนตรสุริยุปราคาเดียวกันได้ ต้องทำความเข้าใจเหตุแห่งการเกิดอุปราคาก่อน ซึ่งพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวได้ทรงกล่าวถึงในพระราชหัตถเลขาที่พระราชทานนักดาราศาสตร์ฝรั่งเศสที่หว่ากอทรวงเรียกว่า Kaju-multan หรือ คัมภีร์เกตุมูลฐาน นั่นคือเหตุมาจากเกตุ



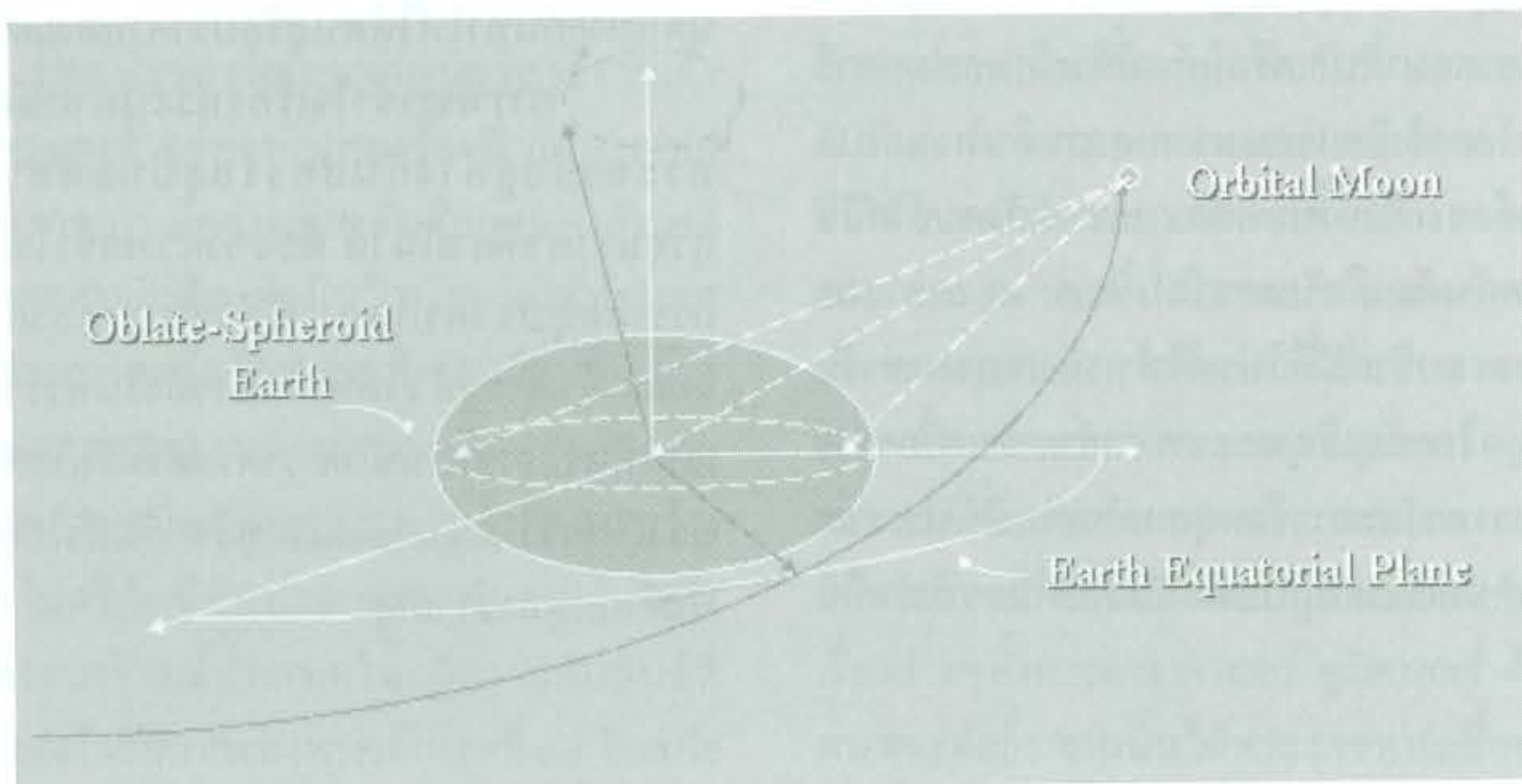
ภาพข้างบนแสดงโลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ในทิศทวนเข็มนาฬิกาบนระนาบ ecliptic plane มีดวงจันทร์โคจรรอบโลกไปด้วย ระนาบ

วงโคจรของดวงจันทร์เอียงเป็นมุมประมาณ ๕ องศา กับระนาบวงโคจรของโลก ทำให้เกิดจุดตัด ๒ จุด คือ จุดขาขึ้น หรือ ascending node คือ ราหู จุดตรงข้าม

เป็นจุดขาลง คือจุดเกิด การจะเกิดสุริยุปราคาในวัน แรม ๑๕ ค่ำ หรือ จันทรุปราคาในวันขึ้น ๑๕ ค่ำ ได้นั้น ดวงจันทร์ต้องอยู่ใกล้จุดหนึ่งจุดใดในสองจุดนี้ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อเส้นที่เชื่อมระหว่างสองจุดนี้อยู่ในแนวเดียวกันกับเส้นเชื่อมระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ คือเมื่อเกิดอุปราคาหรือเสียดอาทิตย์ นั่นเองเป็นมูลเหตุ

การที่ดวงจันทร์อยู่ใกล้โลกมากทำให้ได้รับแรงรบกวนจากมวลส่วนที่โป่งออกบริเวณเส้นศูนย์สูตรของโลก ด้านที่อยู่ใกล้จะส่งแรงมายัง

ดวงจันทร์ได้น้อยกว่าด้านใกล้ทำให้วงโคจร ดวงจันทร์ส่ายเหมือนลูกข่างส่ายตอนใกล้จะล้ม มีผลทำให้ระนาบวงโคจรด้านราหูกระดกขึ้น ด้านเกิด กระดกลง จุดทั้งสองวิ่งไล่กันในทิศตามเข็มนาฬิกา นั่นคือราหูและเกตุต้อง เดินถอยหลังมาดักหน้าจันทร์ ถ้าเริ่มเดินจากจุดตัดหนึ่งดวงจันทร์จะเดินทางมาถึง จุดนี้ได้ก่อนโคจรรอบโลกครบ ๑ รอบ



ดวงจันทร์โคจรรอบโลกทำให้เกิดเดือน แต่ความจริงมีเดือนหลายชนิดขึ้นอยู่กับใช้อะไรเป็น คำนวณ แบ่งได้ ๔ ชนิด

๑. Sidereal month คือ เดือนเมื่อเทียบกับ ดาวฤกษ์ หรือก็คือเมื่อโคจรรอบโลกได้ครบ 360 องศา

1 sidereal month = 27.321661 วัน

๒. Synodic month คือ เดือนเมื่อเทียบกับ ดวงอาทิตย์ หรือก็คือเดือนเทียบจากคติจันทร์ เช่น จากจันทร์เพ็ญถึงจันทร์เพ็ญ ดวงจันทร์จะต้องเดินทางเกินกว่า 360 องศาจึงจะสามารถมาอยู่ในคติเดิมได้ เพราะโลกได้โคจรรอบดวงอาทิตย์ไปด้วย ดวงจันทร์จึงต้องเดินไล่ตามถึงจะเข้าคติเดิม

1 synodic month = 29.530588 วัน

๓. Nodical month คือเดือนเมื่อเทียบกับ ราหู หรือเกตุ เนื่องจากดวงจันทร์สามารถจะเดินทางมายังจุดเดิมหนึ่งในสองจุดนี้ได้ก่อนโคจรรอบ 360 องศาตามที่กล่าวมาแล้วข้างบนนี้ เวลาจึงใช้น้อยลง

1 nodical month = 27.212220 วัน

๔. Anomalistic month คือเดือนเมื่อเทียบกับจุดหนึ่งจุดใดในวงโคจรของดวงจันทร์ ตามที่ดวงจันทร์ต้องโคจรรอบโลกเป็นวงรีนั้น แต่เนื่องจากได้รับแรงรบกวนจากแหล่งต่างๆ ที่สำคัญคือดวงอาทิตย์ ทำให้วงโคจรต้องหมุนล้าหน้า ดวงจันทร์จึงต้องเดินทางมากกว่า 360 องศาจึงจะถึงจุดเดิมได้

1 anomalistic month = 27.554551 วัน

เดือนที่เกี่ยวข้องกับการเกิดอุปราคาคือเดือนคติในข้อ ๒ เดือนเกตุในข้อ ๓ และเดือนอุจนิย์ในข้อ ๔ ถ้าเราหาเลขจำนวนเต็มใดๆที่ไม่เท่ากันมาคูณเวลาในเดือนทั้งสามแล้วทำให้ได้ผลลัพธ์เป็นจำนวนวันที่เท่ากันได้ก็จะทำให้ในทุกช่วงเวลานั้นดวงจันทร์จะกลับมามีคติเดิม และอยู่ห่างจากจุดเกตุหรือจุดราหูเท่าเดิม นั่นคือถ้าเคยเกิดคราสก็จะเกิดขึ้นอีก

Month	Number	Days
Synodic	223	6585.3211
Nodical	242	6585.3572
Anomalistic	239	6585.5377

โดยที่เดือนอุจนิย์มีอิทธิพลต่อการเกิดคราสไม่มากเท่าเดือนที่เหลือ เราก็จะได้ว่าถ้าเคยเกิดอุปราคาชนิดใดชนิดหนึ่งมาในอดีตก็จะเกิดอย่างเดียวกันอีกในทุกช่วง 6585.3 วันโดยที่เดือนอุจนิย์จะคูณลงในเรื่องระยะห่างระหว่างโลกกับดวงจันทร์ถ้าอยู่ใกล้กันพอก็จะทำให้เกิดสุริยุปราคามีคเต็มดวงหรือถ้าอยู่ไกลเกินไปก็จะทำให้เกิดเป็นชนิดวงแหวนเช่นเดียวกับที่เคยเกิดมาในทุกช่วงเวลาดังกล่าววัฏจักร 6585.3 วันนี้เรียกว่า saros แต่โดยที่มีเศษ 0.3 วัน ดังนั้นศูนย์กลางคราสครั้งใหม่จะเลื่อนไปเกิดทางตะวันตกประมาณ 0.3 ส่วนของโลก หรือประมาณ ๑๒๐ องศาทางเส้นแวง

เนื่องจาก nodical saros ยาวกว่า synodic saros เท่ากับ 0.0361 วัน หรือคิดเป็นระยะทางเดินของดวงจันทร์ได้ 0.48 องศา ดังนั้นการเกิดคราสครั้งใหม่จะเกิดขึ้นก่อนที่ดวงจันทร์จะโคจรมาถึงตำแหน่งเดิม 0.48 องศา ถ้าเราจะขอเรียก จุดเกตุและจุดราหูรวมกันว่าจุดศูนย์รวม ถ้าอุปราคาครั้งก่อนเกิดเมื่อดวงจันทร์เดินผ่านจุดศูนย์รวมไปแล้ว การเกิดครั้งต่อไป ก็จะถอยล่นเข้าใกล้จุดนี้มากขึ้นครั้งละ 0.48 องศาจนกระทั่งมาเกิดที่จุดศูนย์รวมและครั้งต่อมาก็จะถอยล่นหนีห่างออกมา

ทุกที่จนในที่สุดพ้นวิสัยที่จะเกิดได้ก็จะหมดอายุขัยของอุปราคานั้นก็จะมีชุดใหม่เข้าแทนที่ สุริยุปราคาชุดหนึ่งๆ จะกลับมาให้เห็นได้ ๗๒ ครั้ง ใช้เวลาประมาณ ๑๓๐๐ ปี ในปีหนึ่งมีสุริยุปราคาเกิดได้หลายครั้งแต่มาจากคนละชุด

สุริยุปราคาที่เริ่มที่จุดราหูก็จะเริ่มเกิดที่บริเวณขั้วโลกเหนือก่อนแล้วค่อยๆเลื่อนลงมาเกิดทางใต้จนกระทั่งมาเกิดที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรเมื่อดวงจันทร์มาอยู่ที่จุดศูนย์รวม จากนั้นก็เลื่อนไปสู่ขั้วโลกใต้และหมดอายุที่นั่น ในทางกลับกันถ้าสุริยุปราคาใดเริ่มขึ้นที่จุดเกตุก็จะเกิดขึ้นที่ขั้วโลกใต้แล้วมาตายที่ขั้วโลกเหนือ

ในทางดาราศาสตร์ เรามีวันที่ทางดาราศาสตร์ใช้งานโดยเฉพาะ กำหนดให้เปลี่ยนวันตอนเที่ยงวันที่กรีนิช วันที่นี้จะนับต่อเนื่องกันมาจากจุดตั้งต้นโดยไม่มีการทดเป็นเดือน เป็นปี เหมือนระบบปฏิทินทั่วไป เพื่อป้องกันความสับสน เพราะวัตถุประสงค์ต้องการให้เกิดความต่อเนื่องจากอดีต เรียกวันชนิดนี้ว่าวันที่จูเลียน Julian date หรือใช้ตัวย่อว่า J.D. โดยให้

Julian date 0.0 เกิดขึ้น ณ เวลาเที่ยงวันที่กรีนิชในวันที่ 1 มกราคม 4713 B.C. ดังนั้น จะได้ว่า

1. หัวก้อ วันที่ 18 สิงหาคม พ. ศ. 2411

เวลาเที่ยงคืน J.D. = 240 3562.5
2. ลพบุรี วันที่ 30 เมษายน พ.ศ. 2231

เวลาเที่ยงคืน J.D. = 233 7709.5

จำนวนวันต่างกันเท่ากับ 65853 วัน หรือ 10 รอบ saros นั่นคือสุริยุปราคาทั้งสองเป็นสุริยุปราคาเดียวกัน เมื่อสมเด็จพระนารายณ์มหาราชได้ทอดพระเนตรร่วมกับนักดาราศาสตร์ฝรั่งเศสที่ลพบุรีแล้วก็ได้กลับมาให้พระบาทสมเด็จพระ

พระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวได้ทอดพระเนตรกับนักดาราศาสตร์ฝรั่งเศสที่หาดหัวก้อ

ผู้เขียนได้ให้เครื่องคอมพิวเตอร์ทำการคำนวณลักษณะการเกิดสุริยุปราคาในวันที่ ๓๐ เมษายน พ.ศ. ๒๕๓๑ ดังแสดงในตารางที่ 9 เป็นสุริยุปราคามืดเต็มดวง มีศูนย์กลางการเกิดอยู่ที่เส้นแวง ๑๔๒.๓๕ องศาตะวันออก เส้นรุ้งขนานที่ ๖๑.๖๕ องศาเหนือ เนื่องจากไม่ผ่านประเทศไทย สมเด็จพระ

พระนารายณ์จึงทอดพระเนตรเห็นเป็นชนิดมืดบางส่วน โดยเห็นมืดได้มากที่สุด ๐.๗๔ ของเส้นผ่าศูนย์กลางดวงอาทิตย์เมื่อเวลา ๐๗ นาฬิกา ๓๔ นาที ๑๘ วินาที ตามเวลามาตรฐานประเทศไทยปัจจุบัน ดังแสดงใน ตารางที่ 10



สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี

ได้เสด็จพระราชดำเนินทรงทำพิธีเปิดงาน"๓๐๐ ปีพระนารายณ์ - ๑๒๐ ปีพระจอมเกล้า"

เมื่อ ๓๐ เมษายน ๒๕๓๑ ณ พระนารายณ์ราชนิเวศน์ ลพบุรี แล้วเสด็จออกพระที่นั่งไกรสรสีหราชทะเลชุบศร

ทอดพระเนตรการแสดงทิศทางที่สมเด็จพระนารายณ์ทอดพระเนตรสุริยุปราคา

เมื่อ วันที่ ๓๐ เมษายน ๒๕๓๑ เวลา ๗ นาฬิกา (ภาพโดยความอนุเคราะห์ของ อาจารย์ธีรพร สุระตระกูล)

ตารางที่ 11 เป็นการคำนวณทางเดินของเงามืดของสุริยุปราคา ๓๐ เมษายน ๒๕๓๑ แสดงให้เห็นขอบทางเหนือ (northern limit) แนวศูนย์กลาง (central line) และ ขอบทางใต้ (southern limit) จากนั้นจึงนำมาเขียนลงในแผนที่ ร่วมกับทางเดินของเงามืดในสมัยที่กลับเข้ามาในวันที่ ๑๘ สิงหาคม ๒๔๑๑ จาก ตารางที่ 8 ดังแสดงในรูปที่ 1

ในรูปที่ 1 เส้นคู่ในแนวดิ่งคือทางเดินของสุริยุปราคาสมัยสมเด็จพระนารายณ์ และเส้นคู่ในแนวราบเป็นของสมัยพระจอมเกล้าเนื่องจากคราสนี้เกิดที่จุลราหูในสมัยพระนารายณ์จึงยังอยู่ใกล้ขั้วโลกเหนือ แต่ในสมัยพระจอมเกล้าจะอยู่ลงมาใกล้เส้นศูนย์สูตร

ในสมัยพระนารายณ์ คราสจะเริ่มเกิดขึ้นที่
ลุ่มน้ำกฤษณะในอินเดียแล้วขึ้นไปทางเหนือผ่าน
เมืองกัลกัตตา เมืองคัลคา ผ่านทางเหนือของพม่าเข้าสู่
ประเทศจีนแล้วผ่านกรุงปักกิ่ง เข้ามองโกเลีย
ไซบีเรียผ่านทางเหนือของช่องแคบแบเร็นตส์ แล้ววก
กลับมาสิ้นสุดในแคนาดา

ในสมัยพระจอมเกล้า คราสเริ่มต้นที่แม่น้ำ
ไนล์สินน้ำเงินแล้วมุ่งหน้ามาทางตะวันออกลงสู่ทะเล
อาหรับเข้าอินเดียแล้วมาบรรจบกับทางเดินสมัยพระ
นารายณ์ที่ลุ่มน้ำกฤษณะ ตัดผ่านอ่าวเบงกอล ทะเล
อันดามัน แล้วเข้าสู่ประเทศไทยทางจังหวัดประจวบ
คีรีขันธ์ ลงสู่อ่าวไทย ผ่านทะเลจีนใต้ ไปสิ้นสุดที่
ทะเลคอรัลทางเหนือของออสเตรเลีย

นี่คือสุริยุปราคาที่ยิ่งใหญ่ที่ได้สร้าง
เกียรติภูมิให้ชาติไทยมาแล้วถึงสองครั้ง พระมหา
กษัตริย์สองพระองค์ซึ่งทรงครองราชย์ห่างกันถึง
สองร้อยปีได้ทอดพระเนตรเสมือนเชื่อมแผ่นดิน
ทั้งสองเข้าด้วยกันจึงเรียกสุริยุปราคาสองแผ่นดิน

บทสรุป

เราได้เห็นพระอัจฉริยภาพทางวิทยาศาสตร์
อันสูงส่งในพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว
แล้วว่าพระองค์ท่านได้ทรงดำเนินงานทางวิทยา
ศาสตร์อย่างเป็นลำดับขั้นตอน เริ่มด้วยทรงสถาปนา
ระบบเวลามาตรฐานก่อน โดยทรงกำหนดเส้นแวง
มาตรฐานที่ ๑๐๐ องศาตะวันออกที่ผ่านจังหวัด
เพชรบุรีให้เป็นเส้นแวงหลักสำหรับเวลามาตรฐาน
ประเทศไทยใช้อ้างอิงและโปรดให้กรุงเทพพระมหา
นครและเมืองน้อยใหญ่ในราชอาณาจักรได้ใช้เวลา
เดียวกันคือเวลาของพระนครคีรี จากนั้นจึงได้ทรงใช้
ระบบเวลานี้ในการดำเนินงานทางวิทยาศาสตร์ คือ
การหาตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ทั้งบนบกและในทะเล
และท้ายสุดคือการทรงคำนวณพยากรณ์การเกิดสุริยุ
ปราคาภายใต้ระบบเวลาที่ได้ทรงสถาปนานั้น ได้
เสด็จพระราชดำเนินทอดพระเนตร เมื่อวันที่

๑๘ สิงหาคม ๒๔๑๑ เพื่อการทดสอบทั้งการคำนวณ
สุริยุปราคาและระบบเวลา ได้ผลสำเร็จอย่างยิ่งใหญ่
เป็นการทรงวางศิลาพระฤกษ์พระราชทานให้เป็น
ฐานหลักทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของชาติ
การทรงงานสุริยุปราคานั้นต้องทรงตรากตรำ
พระวรกายทำให้ทรงพระประชวรเป็นไข้ป่า และได้
เสด็จสวรรคต โดยเหตุนี้ในวาระสมโภชกรุง
รัตนโกสินทร์ ๒๐๐ ปีในปีพุทธศักราช ๒๕๒๕
สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรม
ราชูปถัมภ์^{๑๔} จึงได้นำเสนอรัฐบาลให้ขอพระราชทาน
พระบรมราชานุญาตถวายพระราชสมัญญาแด่
พระองค์ท่านว่า 'พระบิดาแห่งวิทยาศาสตร์ไทย' เพื่อ
เทิดพระเกียรติและกำหนดให้วันที่ ๑๘ สิงหาคมของ
ทุกปีเป็น 'วันวิทยาศาสตร์แห่งชาติ' เพื่อให้จัดงาน
'สัปดาห์วิทยาศาสตร์แห่งชาติ' อันจะเป็นขวัญกำลังใจ
แก่นักวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นักวิชาการ
สาขาต่างๆ และ นักเรียน นิสิต นักศึกษา ตลอดจนผู้
สนใจทั่วไป ได้เห็นความสำคัญของการศึกษาวิจัย
ทางวิทยาศาสตร์เพื่อประโยชน์ต่อการประยุกต์ทาง
เทคโนโลยีอันจะนำไปสู่การพัฒนาประเทศชาติให้
เจริญเยี่ยงนานาอารยประเทศสืบไป

พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวทรง
มีพระปณิญาบารมีเป็นที่ยิ่งด้วยได้ทรงพระผนวช
นานถึง ๒๗ พรรษา ประจำอยู่ในพระอารามข้าง ออก
จาริกในนิคมชนบทบ้าง ได้ทรงพบปัญหาใน
วัดปฏิบัติ อันจะยังให้เกิดความเสื่อมถอยในพระพุทธ
ศาสนา จึงได้ทรงขมาสงฆ์ในวันสวรรคตซึ่งตรงกับ
วันมหาปวารณา ขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๑๑ อันเป็นวันเดียว
กันกับวันพระประสูติ ทั้งยังเป็นวันพฤษภาคมเช่นกัน
ด้วย นับเป็นลักษณะแห่งพระมหาบุรุษผู้ประสูติ
ตรัสรู้ และนิพพานในวันเพ็ญเดือน ๖ เดียวกัน ที่ได้
ทรงประกาศพระพุทธศาสนาไว้ในโลก พระองค์ก็ได้
ทรงสถาปนาธรรมยุติกนิกายขึ้นในขณะสงฆ์ไทย
และแม้กาลบัดนี้ครบ ๒๐๐ ปีแห่งวาระวัน
พระประสูติในปี พ.ศ. ๒๕๔๗ นี้ ได้มีการจัดงาน

สมโภชในพระนคร ก็ให้เกิดเหตุอัศจรรย์ วันมหา
ปาวณาในปีนี้ วันขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๑๑ ตรงกับวันที่
๒๘ ตุลาคม ก็เป็น วันพฤหัสบดี เช่นเดียวกันกับ
วันพระประสูติ และวันสวรรคตด้วย หรือแม้แต่เมื่อ
จะทรงคำนวณสุริยุปราคา ก็ปรากฏเป็นเหตุอัศจรรย์ที่
เป็นสุริยุปราคาเดียวกันกับท้องคัมเด็จพระนารายณ์
มหาราชแห่งกรุงศรีอยุธยาได้ทอดพระเนตรมาแล้ว
เหตุอัศจรรย์เหล่านี้เกินสติปัญญาแห่งข้าพระบาท
ทั้งปวงจะสรรหาคำอธิบายได้นอกจากจะขอกล่าว
ว่าเป็น

พระราชกฤษฎาภินิหารอันมีอาจบดบังได้

กิตติกรรมประกาศ

เป็นความปรารถนาของท่านผู้ใหญ่ทาง
วิชาการหลายท่านที่จะให้มีการศึกษาเรื่องการทรง
คำนวณสุริยุปราคาแห่งองค์พระบาทสมเด็จพระ
จอมเกล้าเจ้าอยู่หัวอย่างละเอียดถูกต้องตามหลัก
วิชาการและโดยสุจริต ทางสมาคมวิทยาศาสตร์แห่ง
ประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ก็ได้จัดให้มี
กิจกรรมทางวิชาการในโอกาสครบรอบวาระการ
เสด็จพระราชดำเนินทอดพระเนตรสุริยุปราคาหัว
กอนับแต่สมัยที่ศาสตราจารย์พลโท พระยาศลวิธาน
นิเทศเป็นนายกสมาคม โดยต่อเนื่องเรื่อยมา ทำให้มี
การรวมตัวเป็นคณะทำงานเกิดขึ้น มีการรวบรวม
เอกสารต่างๆที่เกี่ยวข้อง เช่น พระราชหัตถ์เลขา
ประกาศ จดหมายเหตุ และรายงานต่างๆ ทั้งของไทย
และต่างประเทศไว้สำหรับเป็นหลักฐานในการศึกษา
ค้นคว้าต่อไป

เนื่องในวาระสมโภชกรุงรัตนโกสินทร์
สองร้อยปีในปี พ.ศ. ๒๕๒๕ สมาคมวิทยาศาสตร์ฯ
ได้ให้เกียรติให้ผู้เขียนทำการศึกษาเรื่องนี้ ซึ่งผู้เขียน
ก็ได้ดำเนินงานด้วยความร่วมมืออย่างดียิ่งจากสมาคม
ดาราศาสตร์ไทย และท้องฟ้าจำลองกรุงเทพ ทำให้
สามารถพัฒนาการทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ก่อให้เกิด
ความเจริญทางวิชาการอย่างมาก

ผู้เขียนไม่อาจกล่าวนามท่านทั้งหลายที่ได้
วางรากฐานการทำงานนี้ไว้ให้เป็นอย่างดี และอีก
หลายท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือได้ครบ
ถ้วนทุกท่าน กระทำได้ก็เพียงใคร่ขอขอบคุณท่านมา
 ณ ที่นี้ งานนี้จะสำเร็จลงมิได้หากมิได้มีการสร้างสม
เอกสารต่างๆมาด้วยความวิริยะ อุตสาหะ ของท่าน
ผู้เสียสละทั้งหลาย ผู้เขียนมีความซาบซึ้งในกุศล
เจตนาของทุกท่านตลอดมา จึงใคร่ขออัญเชิญ
พระราชกฤษฎาภินิหารและเดชะบารมีแห่งองค์
พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว และ สมเด็จพระ
นารายณ์มหาราช ได้โปรดอภิบาลปกปักษ์รักษา
ทุกท่านให้มีแต่ความสุข ความเจริญ โดยทั่วกัน เทอญ

เอกสารอ้างอิง

๑. ประชุมพงสาวดาร เล่มที่ ๑๔ ภาคที่ ๒๕, องค์การคำครุสภา ๒๕๐๗ (หน้า ๒๕๕ - ๒๖๓)
๒. พระราชหัตถ์เลขาพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว เล่ม ๒, องค์การคำครุสภา ๒๕๐๗ (หน้า ๑๗๐)
๓. ขาวเหมือนวงศ์, การพิสูจน์การทรงคำนวณเพื่อรักษาเวลามาตรฐานประเทศไทยของพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว, วิทยาศาสตร์ (๓๗-๓, ๘ น. ๓๔๕-๓๖๗, ๒๕๒๗)
๔. เจ้าพระยาทิพากรวงศ์, พระราชพงสาวดารกรุงรัตนโกสินทร์ เล่มที่ ๒, รัชกาลที่ ๓ - ๔, หอสมุดแห่งชาติ, สำนักพิมพ์คลังวิทยา (พ.ศ. ๒๕๐๖)
๕. ประชุมจดหมายเหตุ เรื่อง สุริยุปราคาในรัชกาลที่ ๔, เซอร์ แฮรี ออด เจ้าเมืองสิงคโปร์ ไปเฝ้าสมเด็จพระเจ้ากรุงสยามในรัชกาลก่อนที่ตำบลหัววาน, โรงพิมพ์ดีธรรสาร, พ.ศ. ๒๕๑๐
๖. ประกาศฉบับที่ ๓๐๒, ประกาศสุริยุปราคาหมดดวง, ประกาศ ณ วันพฤหัสบดี เดือน ๕ แรม ๓ ค่ำ, ชุมนุมประกาศ รัชกาลที่ ๔ พ.ศ. ๒๔๐๘ - ๒๔๑๑, องค์การคำครุสภา ๒๕๐๔

๗. กระแสรับสั่งรัชกาลที่ ๔, สุริยุปราคาเมื่อปีมะโรง พ.ศ. ๒๔๑๑, ตันฉบับของกรมขุนวรจักรธรานุภาพ, ให้หอพระสมุดฯ เมื่อวันที่ ๑๗ เมษายน พ.ศ. ๒๔๖๑
๘. M. Stephan, *Rapport Sur L'Observation de L'Eclipse de Soleil du 18 Aout 1868*, Mission Scientifiques et Litteraires, Paris, Janvier 1869.
๙. ขาว เหมือนวงศ์, ระวี ภาวิไล, รายงานการสำรวจสถานที่เกิดสุริยุปราคาหว่ากอ, วิทยาศาสตร์ (๓๕-๓), น. ๕๐๕-๕๑๐, ๒๕๒๔)
๑๐. Nautical Almanac, 1868, Royal Observatory at Greenwich, England
๑๑. ขาว เหมือนวงศ์, การพิสูจน์การทรงค่านวมการเกิดสุริยุปราคาของพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว, วิทยาศาสตร์ ๒๐๐ ปีรัตนโกสินทร์, สมาคมวิทยาศาสตร์ในพระบรมราชูปถัมภ์, (น. ๑๓ - ๓๖, ๒๕๒๕)
๑๒. ขาว เหมือนวงศ์, ความสัมพันธ์ระหว่างสุริยุปราคาที่สมเด็จพระนารายณ์มหาราชทรงทอดพระเนตรที่ลพบุรีกับที่พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวทรงทอดพระเนตรที่หว่ากอ, วารสารศูนย์บริรักษ์เพื่อการศึกษาฉบับ ๓๐๐ ปีดาราศาสตร์ไทย (๑๑ - ๓, น. ๒๕ - ๔๕, ๒๕๓๐)
๑๓. ขาว เหมือนวงศ์, ดาราศาสตร์ไทยในรัชสมัยสมเด็จพระนารายณ์มหาราชและรัชสมัยพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว, วารสารศูนย์บริรักษ์เพื่อการศึกษาฉบับ ๓๐๐ ปีดาราศาสตร์ไทย (๑๒ - ๒, น. ๖๑ - ๘๕, ๒๕๓๑)
๑๔. ขาว เหมือนวงศ์, ดาราศาสตร์และการเมืองไทยสมัยสมเด็จพระนารายณ์มหาราชและสมัยพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว, ศิลปวัฒนธรรม, (๕ - ๑๐, น. ๒๖ - ๔๓, ๒๕๓๑)
๑๕. ตาซาร์ด, บาทหลวง, จดหมายเหตุการเดินทางสู่สยามของบาทหลวงตาซาร์ด, สันต์ ท. โกมลบุตร แปล, กรุงเทพฯ: กรมศิลปากร, พ.ศ. ๒๕๑๗
๑๖. ขาว เหมือนวงศ์, สมเด็จพระนารายณ์มหาราชกับจันทร์ปราคาเต็มดวงเหนือทะเลชุบศร, ท้องฟ้าจำลองกรุงเทพ - สมาคมดาราศาสตร์ไทย, (น. ๑๑ - ๔๒, ๒๕๒๘)
๑๗. เดอ ลา ลูแบร์, ราชอาณาจักรสยาม, สันต์ ท. โกมลบุตร แปล, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ก้าวหน้า, พ.ศ. ๒๕๒๐
๑๘. ขาว เหมือนวงศ์, พระอัจฉริยภาพทางวิทยาศาสตร์ของรัชกาลที่ ๔, วิทยาศาสตร์, (๓๖ - ๘, น. ๕๒๕ - ๕๒๗, ๒๕๒๕)



APPARENT POSITIONS OF THE SUN AT 0 E.T. YEAR 1858													
J.D.	M	D	RA			DEC			G.A.ST.			E-O-T (MEAN-APPT)	
2399000+			H	M	S	D	M	S	H	M	S	M	S
709.5	1	30	20	49	16.03	-17	47	29.74	8	35	45.29	+13	30.75
710.5	1	31	20	53	22.01	-17	31	1.47	8	39	41.84	+13	40.17
711.5	2	1	20	57	27.18	-17	14	14.60	8	43	38.39	+13	48.79
712.5	2	2	21	1	31.53	-16	57	9.48	8	47	34.94	+13	56.59
713.5	2	3	21	5	35.07	-16	39	46.50	8	51	31.49	+14	3.58
714.5	2	4	21	9	37.81	-16	22	6.05	8	55	28.04	+14	9.77
715.5	2	5	21	13	39.75	-16	4	8.52	8	59	24.59	+14	15.16
716.5	2	6	21	17	40.90	-15	45	54.32	9	3	21.15	+14	19.75
717.5	2	7	21	21	41.25	-15	27	23.86	9	7	17.71	+14	23.54
718.5	2	8	21	25	40.82	-15	8	37.55	9	11	14.27	+14	26.55
719.5	2	9	21	29	39.61	-14	49	35.83	9	15	10.83	+14	28.78
720.5	2	10	21	33	37.62	-14	30	19.10	9	19	7.39	+14	30.23
721.5	2	11	21	37	34.85	-14	10	47.80	9	23	3.95	+14	30.91
722.5	2	12	21	41	31.33	-13	51	2.36	9	27	0.51	+14	30.82
723.5	2	13	21	45	27.03	-13	31	3.23	9	30	57.06	+14	29.97
724.5	2	14	21	49	21.99	-13	10	50.83	9	34	53.62	+14	28.37
725.5	2	15	21	53	16.19	-12	50	25.60	9	38	50.17	+14	26.02
726.5	2	16	21	57	9.65	-12	29	47.97	9	42	46.72	+14	22.94
727.5	2	17	22	1	2.39	-12	8	58.39	9	46	43.27	+14	19.12
728.5	2	18	22	4	54.40	-11	47	57.29	9	50	39.82	+14	14.58
729.5	2	19	22	8	45.70	-11	26	45.11	9	54	36.37	+14	9.34
730.5	2	20	22	12	36.31	-11	5	22.27	9	58	32.92	+14	3.39
731.5	2	21	22	16	26.24	-10	43	49.20	10	2	29.48	+13	56.76
732.5	2	22	22	20	15.50	-10	22	6.35	10	6	26.04	+13	49.46
733.5	2	23	22	24	4.10	-10	0	14.14	10	10	22.61	+13	41.50
734.5	2	24	22	27	52.07	-9	38	12.96	10	14	19.17	+13	32.90
735.5	2	25	22	31	39.41	-9	16	3.22	10	18	15.73	+13	23.68
736.5	2	26	22	35	26.16	-8	53	45.30	10	22	12.29	+13	13.87
737.5	2	27	22	39	12.31	-8	31	19.57	10	26	8.84	+13	3.47
738.5	2	28	22	42	57.91	-8	8	46.41	10	30	5.39	+12	52.52
739.5	3	1	22	46	42.97	-7	46	6.15	10	34	1.94	+12	41.03
740.5	3	2	22	50	27.51	-7	23	19.17	10	37	58.49	+12	29.03
741.5	3	3	22	54	11.56	-7	0	25.80	10	41	55.03	+12	16.53
742.5	3	4	22	57	55.15	-6	37	26.43	10	45	51.58	+12	3.56
743.5	3	5	23	1	38.28	-6	14	21.44	10	49	48.14	+11	50.14
744.5	3	6	23	5	20.98	-5	51	11.19	10	53	44.69	+11	36.29
745.5	3	7	23	9	3.28	-5	27	56.05	10	57	41.25	+11	22.04
746.5	3	8	23	12	45.19	-5	4	36.40	11	1	37.81	+11	7.39
747.5	3	9	23	16	26.73	-4	41	12.66	11	5	34.36	+10	52.37
748.5	3	10	23	20	7.92	-4	17	45.20	11	9	30.92	+10	37.00

Civil Twilight									
AT UNIVERSAL TIME FOR GREENWICH MERIDIAN									
LATITUDE 10 D O M O S (NORTH)									
Y	M	D	J.D.	BEGINNING			END		
				H	M	S	H	M	S
1981	2	1	2444636.5	6	0	30.71	18	26	52.39
1981	2	2	2444637.5	6	0	27.60	18	27	10.70
1981	2	3	2444638.5	6	0	23.50	18	27	28.39
1981	2	4	2444639.5	6	0	18.40	18	27	45.46
1981	2	5	2444640.5	6	0	12.31	18	28	1.90
1981	2	6	2444641.5	6	0	5.22	18	28	17.71
1981	2	7	2444642.5	5	59	57.14	18	28	32.88
1981	2	8	2444643.5	5	59	48.09	18	28	47.42
1981	2	9	2444644.5	5	59	38.05	18	29	1.33
1981	2	10	2444645.5	5	59	27.05	18	29	14.60
1981	2	11	2444646.5	5	59	15.08	18	29	27.23
1981	2	12	2444647.5	5	59	2.16	18	29	39.25
1981	2	13	2444648.5	5	58	48.31	18	29	50.64
1981	2	14	2444649.5	5	58	33.53	18	30	1.44
1981	2	15	2444650.5	5	58	17.86	18	30	11.63
1981	2	16	2444651.5	5	58	1.29	18	30	21.24
1981	2	17	2444652.5	5	57	43.85	18	30	30.28
1981	2	18	2444653.5	5	57	25.57	18	30	38.77
1981	2	19	2444654.5	5	57	6.45	18	30	46.71
1981	2	20	2444655.5	5	56	46.53	18	30	54.14
1981	2	21	2444656.5	5	56	25.82	18	31	1.04
1981	2	22	2444657.5	5	56	4.34	18	31	7.46
1981	2	23	2444658.5	5	55	42.12	18	31	13.39
1981	2	24	2444659.5	5	55	19.17	18	31	18.87
1981	2	25	2444660.5	5	54	55.51	18	31	23.90
1981	2	26	2444661.5	5	54	31.17	18	31	28.49
1981	2	27	2444662.5	5	54	6.16	18	31	32.67
1981	2	28	2444663.5	5	53	40.51	18	31	36.45
1981	3	1	2444664.5	5	53	14.23	18	31	39.84
1981	3	2	2444665.5	5	52	47.35	18	31	42.85
1981	3	3	2444666.5	5	52	19.88	18	31	45.51
1981	3	4	2444667.5	5	51	51.85	18	31	47.82
1981	3	5	2444668.5	5	51	23.26	18	31	49.81
1981	3	6	2444669.5	5	50	54.15	18	31	51.47
1981	3	7	2444670.5	5	50	24.52	18	31	52.81

A20

CIVIL TWILIGHT, 1981

UNIVERSAL TIME FOR MERIDIAN OF GREENWICH

MORNING CIVIL TWILIGHT

Lat.	-55°	-50°	-45°	-40°	-35°	-30°	-20°	-10°	0°	+10°	+20°	+30°	+35°	+40°
	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m
Jan. -2	2 25	3 08	3 37	4 00	4 18	4 33	4 58	5 18	5 36	5 53	6 10	6 29	6 39	6 51
2	2 31	3 12	3 41	4 03	4 21	4 36	5 00	5 20	5 38	5 55	6 12	6 30	6 40	6 52
6	2 37	3 17	3 46	4 07	4 24	4 39	5 03	5 22	5 40	5 56	6 13	6 31	6 41	6 52
10	2 45	3 23	3 50	4 11	4 28	4 42	5 06	5 25	5 42	5 58	6 14	6 31	6 41	6 52
14	2 53	3 30	3 56	4 16	4 32	4 46	5 08	5 27	5 43	5 59	6 14	6 31	6 40	6 51
18	3 03	3 37	4 02	4 21	4 36	4 50	5 11	5 29	5 45	6 00	6 14	6 30	6 39	6 49
22	3 12	3 44	4 08	4 26	4 41	4 53	5 14	5 31	5 46	6 00	6 14	6 30	6 38	6 47
26	3 22	3 52	4 14	4 31	4 45	4 57	5 17	5 33	5 47	6 01	6 14	6 28	6 36	6 45
30	3 32	4 00	4 20	4 36	4 50	5 01	5 19	5 35	5 48	6 01	6 13	6 26	6 34	6 42
Feb. 3	3 42	4 07	4 27	4 42	4 54	5 05	5 22	5 36	5 49	6 00	6 12	6 24	6 31	6 38
7	3 52	4 15	4 33	4 47	4 58	5 08	5 24	5 38	5 49	6 00	6 11	6 22	6 28	6 34
11	4 02	4 23	4 39	4 52	5 03	5 12	5 27	5 39	5 50	5 59	6 09	6 19	6 24	6 30
15	4 12	4 31	4 46	4 57	5 07	5 15	5 29	5 40	5 50	5 58	6 07	6 16	6 20	6 25
19	4 21	4 39	4 52	5 02	5 11	5 19	5 31	5 41	5 49	5 57	6 05	6 12	6 16	6 20
23	4 31	4 46	4 58	5 07	5 15	5 22	5 33	5 42	5 49	5 56	6 02	6 08	6 12	6 15
27	4 40	4 53	5 04	5 12	5 19	5 25	5 35	5 42	5 49	5 54	5 59	6 04	6 07	6 09
Mar. 3	4 49	5 00	5 10	5 17	5 23	5 28	5 36	5 43	5 48	5 52	5 56	6 00	6 02	6 04
7	4 57	5 08	5 15	5 21	5 27	5 31	5 38	5 43	5 47	5 50	5 53	5 56	5 57	5 58
11	5 06	5 14	5 21	5 26	5 30	5 34	5 39	5 43	5 46	5 48	5 50	5 51	5 51	5 51
15	5 14	5 21	5 26	5 30	5 34	5 36	5 40	5 43	5 45	5 46	5 47	5 46	5 46	5 45
19	5 22	5 28	5 32	5 35	5 37	5 39	5 41	5 43	5 44	5 44	5 43	5 42	5 40	5 38
23	5 30	5 34	5 37	5 39	5 40	5 41	5 43	5 43	5 43	5 42	5 40	5 37	5 35	5 32
27	5 38	5 40	5 42	5 43	5 43	5 44	5 44	5 43	5 41	5 39	5 36	5 32	5 29	5 25
31	5 46	5 47	5 47	5 47	5 47	5 46	5 45	5 43	5 40	5 37	5 33	5 27	5 23	5 19
Apr. 4	5 54	5 53	5 52	5 51	5 50	5 48	5 46	5 43	5 39	5 35	5 29	5 22	5 17	5 12

EVENING CIVIL TWILIGHT

	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m
Jan. -2	21 39	20 56	20 27	20 04	19 46	19 31	19 07	18 46	18 28	18 11	17 54	17 36	17 25	17 14
2	21 37	20 55	20 27	20 05	19 47	19 32	19 08	18 48	18 30	18 14	17 57	17 38	17 28	17 17
6	21 33	20 54	20 26	20 04	19 47	19 33	19 09	18 49	18 32	18 16	17 59	17 41	17 31	17 20
10	21 29	20 51	20 24	20 04	19 47	19 33	19 09	18 50	18 34	18 18	18 02	17 44	17 35	17 24
14	21 23	20 47	20 22	20 02	19 46	19 32	19 10	18 51	18 35	18 20	18 04	17 47	17 38	17 28
18	21 17	20 43	20 19	20 00	19 44	19 31	19 10	18 52	18 36	18 21	18 07	17 51	17 42	17 32
22	21 10	20 38	20 15	19 57	19 42	19 30	19 09	18 52	18 37	18 23	18 09	17 54	17 46	17 36
26	21 02	20 32	20 11	19 54	19 40	19 28	19 08	18 52	18 38	18 25	18 11	17 57	17 49	17 41
30	20 53	20 26	20 06	19 50	19 37	19 25	19 07	18 52	18 39	18 26	18 14	18 01	17 53	17 45
Feb. 3	20 44	20 19	20 00	19 45	19 33	19 23	19 05	18 51	18 39	18 27	18 16	18 04	17 57	17 50
7	20 35	20 12	19 54	19 41	19 29	19 20	19 04	18 51	18 39	18 28	18 18	18 07	18 01	17 54
11	20 25	20 04	19 48	19 36	19 25	19 16	19 01	18 49	18 39	18 29	18 20	18 10	18 05	17 59
15	20 15	19 56	19 42	19 30	19 21	19 12	18 59	18 48	18 39	18 30	18 22	18 13	18 08	18 04
19	20 05	19 48	19 35	19 25	19 16	19 09	18 56	18 47	18 38	18 31	18 23	18 16	18 12	18 08
23	19 55	19 40	19 28	19 19	19 11	19 04	18 54	18 45	18 38	18 31	18 25	18 19	18 16	18 12
27	19 44	19 31	19 21	19 13	19 06	19 00	18 51	18 43	18 37	18 32	18 27	18 22	18 19	18 17
Mar. 3	19 34	19 22	19 13	19 06	19 00	18 55	18 47	18 41	18 36	18 32	18 28	18 24	18 23	18 21
7	19 23	19 13	19 06	19 00	18 55	18 51	18 44	18 39	18 35	18 32	18 29	18 27	18 26	18 25
11	19 13	19 05	18 58	18 53	18 49	18 46	18 41	18 37	18 34	18 32	18 30	18 30	18 29	18 29
15	19 02	18 56	18 51	18 47	18 44	18 41	18 37	18 35	18 33	18 32	18 32	18 32	18 33	18 34
19	18 52	18 47	18 43	18 40	18 38	18 36	18 34	18 32	18 32	18 32	18 33	18 35	18 36	18 38
23	18 42	18 38	18 36	18 34	18 32	18 31	18 30	18 30	18 31	18 32	18 34	18 37	18 39	18 42
27	18 31	18 29	18 28	18 27	18 27	18 27	18 27	18 28	18 29	18 32	18 35	18 40	18 43	18 46
31	18 21	18 21	18 21	18 21	18 21	18 22	18 23	18 25	18 28	18 32	18 36	18 42	18 46	18 50
Apr. 4	18 11	18 12	18 13	18 15	18 16	18 17	18 20	18 23	18 27	18 32	18 37	18 45	18 49	18 55

CIVIL TWILIGHT
BANGKOK MEAN TIME

LONGITUDE 100 D 29 M 50 S (EAST) LATITUDE 13 D 44 M 29 S (NORTH)
HEIGHT OF OBSERVING STATION 100 FEET

Y	M	D	J.D.	BEGINNING			END		
				H	M	S	H	M	S
1858	2	1	2399711.5	6	4	34.70	18	23	15.80
1858	2	2	2399712.5	6	4	26.78	18	23	39.09
1858	2	3	2399713.5	6	4	17.79	18	24	1.84
1858	2	4	2399714.5	6	4	7.73	18	24	24.04
1858	2	5	2399715.5	6	3	56.61	18	24	45.69
1858	2	6	2399716.5	6	3	44.45	18	25	6.80
1858	2	7	2399717.5	6	3	31.25	18	25	27.36
1858	2	8	2399718.5	6	3	17.03	18	25	47.37
1858	2	9	2399719.5	6	3	1.78	18	26	6.82
1858	2	10	2399720.5	6	2	45.54	18	26	25.73
1858	2	11	2399721.5	6	2	28.30	18	26	44.09
1858	2	12	2399722.5	6	2	10.08	18	27	1.90
1858	2	13	2399723.5	6	1	50.88	18	27	19.17
1858	2	14	2399724.5	6	1	30.73	18	27	35.88
1858	2	15	2399725.5	6	1	9.63	18	27	52.06
1858	2	16	2399726.5	6	0	47.60	18	28	7.69
1858	2	17	2399727.5	6	0	24.65	18	28	22.78
1858	2	18	2399728.5	6	0	0.80	18	28	37.34
1858	2	19	2399729.5	5	59	36.05	18	28	51.38
1858	2	20	2399730.5	5	59	10.43	18	29	4.89
1858	2	21	2399731.5	5	58	43.95	18	29	17.90
1858	2	22	2399732.5	5	58	16.63	18	29	30.40
1858	2	23	2399733.5	5	57	48.50	18	29	42.42
1858	2	24	2399734.5	5	57	19.57	18	29	53.96
1858	2	25	2399735.5	5	56	49.87	18	30	5.05
1858	2	26	2399736.5	5	56	19.42	18	30	15.69
1858	2	27	2399737.5	5	55	48.25	18	30	25.91
1858	2	28	2399738.5	5	55	16.37	18	30	35.72
1858	3	1	2399739.5	5	54	43.82	18	30	45.15
1858	3	2	2399740.5	5	54	10.62	18	30	54.20
1858	3	3	2399741.5	5	53	36.80	18	31	2.91
1858	3	4	2399742.5	5	53	2.37	18	31	11.28
1858	3	5	2399743.5	5	52	27.36	18	31	19.33
1858	3	6	2399744.5	5	51	51.81	18	31	27.09
1858	3	7	2399745.5	5	51	15.72	18	31	34.56

Begining of Civil Twilight
Bangkok Apparent Time
February 1858

Date	Time		
	H	M	S
2	5	50	30
3	5	50	14
4	5	49	58
5	5	49	42
6	5	49	25
7	5	49	8
8	5	48	51
9	5	48	33
10	5	48	15
11	5	47	57
12	5	47	39
13	5	47	21
14	5	47	2
15	5	46	44
16	5	46	25

ตารางที่ 5

TOTAL ECLIPSE OF THE SUN
CONJUNCTION IN RIGHT ASCENSION, AUGUST 18, 1868 AT 05:13:04 U.T.

R.A. OF SUN	H	M	S	HOURLY MOTION	9.31 TIME-S
R.A. OF MOON	9	51	0.35	HOURLY MOTION	151.58 TIME-S
DEC. OF SUN	D	M	S	HOURLY MOTION	-48.62 ARC-S
DEC. OF MOON	+13	2	5.11	HOURLY MOTION	-567.68 ARC-S
E.H.P. OF SUN	8.69 ARC-S			TRUE SEMIDIAMETER OF SUN	948.44 ARC-S
E.H.P. OF MOON	3680.31 ARC-S			TRUE SEMIDIAMETER OF MOON	1002.79 ARC-S

CIRCUMSTANCES OF THE ECLIPSE

			LONG D	LAT D
ECLIPSE BEGINS	02:34:36	U.T.	- 47.43	+12.03
CENTRAL ECLIPSE BEGINS	03:29:15	U.T.	- 35.96	+11.20
CENTRAL ECLIPSE AT LOCAL APPARENT NOON	05:13:04	U.T.	-102.63	+10.45
CENTRAL ECLIPSE ENDS	06:54:34	U.T.	-163.39	-16.26
ECLIPSE ENDS	07:49:15	U.T.	-149.95	-15.35

ตารางที่ 7

11.—A Total Eclipse of the SUN, August 17, 1868, invisible at Greenwich.

ELEMENTS			
Greenwich Mean Time of ☿ in R.A. August 17,	h	m	s
☿ and ♀'s Right Ascension - - - -	9	51	0.25
☿'s Declination - - - - -	N.	12	59 16.6
☿'s Declination - - - - -	N.	13	2 6.0
☿'s Hourly Motion in R.A. - - - -		37	53.7
☿'s Hourly Motion in R.A. - - - -		2	19.7
☿'s Hourly Motion in Declination - -	S.	9	27.7
☿'s Hourly Motion in Declination - -	S.		48.6
☿'s Equatorial Horizontal Parallax -		61	19.9
☿'s Equatorial Horizontal Parallax -			8.5
☿'s True Semidiameter - - - - -		16	44.4
☿'s True Semidiameter - - - - -		15	50.7

Begins on the Earth generally, August 17, 14^h 34^m. 7, Mean Time at Greenwich,
in Longitude 49° 25' E. of Greenwich, and Latitude 12° 6' N.
Central Eclipse begins generally, August 17, 15^h 29^m. 5,
in Longitude 35° 55' E. of Greenwich, and Latitude 11° 13' N.
Central Eclipse at Noon, August 17, 17^h 13^m. 1,
in Longitude 102° 38' E. of Greenwich, and Latitude 10° 27' N.
Central Eclipse ends generally, August 17, 18^h 54^m. 4,
in Longitude 163° 27' E. of Greenwich, and Latitude 16° 15' S.
Ends on the Earth generally, August 17, 19^h 49^m. 2,
in Longitude 149° 59' E. of Greenwich, and Latitude 15° 23' S.

The central and limiting lines of this Eclipse, in the diagram in page 435,
have been laid down from the following calculated positions :

Line of Central Eclipse.					
Longitude.	Latitude.	Longitude.	Latitude.	Longitude.	Latitude.
° ' E.	° ' N.	° ' E.	° ' N.	° ' E.	° ' S.
35 55 E.	11 13 N.	83 8 E.	16 1 N.	126 6 E.	2 15 S.
47 55	13 47	90 16	14 44	132 37	5 33
53 29	14 46	97 59	12 23	139 25	8 35
60 47	15 47	106 29	8 36	146 12	11 12
68 22	16 26	113 34	4 46	151 31	12 59
75 51 E.	16 33 N.	119 48 E.	1 13 N.	163 27 E.	16 15 S.

PATH OF THE CENTRAL PHASE
TOTAL ECLIPSE OF THE SUN, AUGUST 18, 1868

U.T.	NORTHERN LIMIT				CENTRAL LINE				SOUTHERN LIMIT				DURATION		A
	LAT		LONG		LAT		LONG		LAT		LONG		M	S	
	D	M	D	M	D	M	D	M	D	M	D	M			D
3:31	+14	14.1	-45	38.2	+13	24.0	-46	4.9	+12	32.6	-46	25.3	3	27.5	11
3:32	+14	44.9	-48	12.1	+13	53.0	-48	34.1	+13	0.0	-48	51.0	3	35.0	13
3:33	+15	6.6	-50	16.9	+14	15.4	-50	36.0	+13	21.4	-50	50.7	3	41.4	15
3:34	+15	27.9	-52	4.2	+14	33.7	-52	21.2	+13	38.8	-52	34.2	3	47.2	17
3:35	+15	44.2	-53	39.5	+14	49.2	-53	54.8	+13	53.6	-54	6.4	3	52.5	19
3:36	+15	58.2	-55	5.9	+15	2.5	-55	19.7	+14	6.4	-55	30.2	3	57.4	21
3:37	+16	10.5	-56	25.4	+15	14.2	-56	38.0	+14	17.5	-56	47.4	4	2.1	22
3:38	+16	21.3	-57	39.3	+15	24.4	-57	50.7	+14	27.2	-57	59.2	4	6.5	24
3:39	+16	30.8	-58	48.5	+15	33.5	-58	58.9	+14	35.9	-59	6.6	4	10.8	25
3:40	+16	39.4	-59	53.8	+15	41.6	-60	3.3	+14	43.5	-60	10.1	4	14.8	26
3:45	+17	10.5	-64	37.0	+16	10.9	-64	42.6	+15	11.1	-64	46.0	4	33.5	32
3:50	+17	27.9	-68	31.8	+16	26.9	-68	34.1	+15	25.9	-68	34.4	4	50.0	37
3:55	+17	36.0	-71	55.2	+16	34.1	-71	54.6	+15	32.1	-71	52.3	5	5.0	41
4:00	+17	37.1	-74	56.4	+16	34.5	-74	53.1	+15	31.8	-74	48.4	5	18.6	45
4:05	+17	32.7	-77	40.8	+16	29.5	-77	35.0	+15	26.3	-77	27.9	5	31.2	49
4:10	+17	23.7	-80	11.9	+16	20.1	-80	3.8	+15	16.5	-79	54.6	5	42.8	53
4:15	+17	10.3	-82	32.3	+16	6.8	-82	22.0	+15	3.0	-82	10.7	5	53.3	56
4:20	+16	54.3	-84	43.9	+15	50.3	-84	31.5	+14	46.3	-84	16.3	6	2.9	60
4:25	+16	34.3	-86	48.1	+15	30.7	-86	33.7	+14	26.7	-86	18.6	6	11.6	63
4:30	+16	12.5	-88	45.9	+15	8.5	-88	29.6	+14	4.5	-88	12.8	6	19.3	66
4:35	+15	47.6	-90	38.5	+14	43.7	-90	20.4	+13	39.8	-90	1.9	6	26.1	69
4:40	+15	20.4	-92	26.4	+14	16.7	-92	6.6	+13	13.0	-91	46.6	6	31.9	72
4:45	+14	50.9	-94	10.4	+13	47.4	-93	49.1	+12	44.0	-93	27.6	6	36.8	75
4:50	+14	19.2	-95	51.0	+13	16.1	-95	28.3	+12	13.0	-95	5.4	6	40.7	77
4:55	+13	45.6	-97	28.9	+12	42.9	-97	4.7	+11	40.1	-96	40.5	6	43.7	80
5:00	+13	10.0	-99	4.4	+12	7.7	-98	33.9	+11	5.3	-98	13.6	6	45.7	83
5:05	+12	32.5	-100	33.0	+11	30.6	-100	11.4	+10	28.8	-99	44.9	6	46.8	85
5:10	+11	53.1	-102	10.1	+10	51.8	-101	42.4	+9	50.4	-101	14.9	6	47.0	87
5:15	+11	11.9	-103	41.2	+10	11.1	-103	12.5	+9	10.2	-102	44.0	6	46.2	87
5:20	+10	28.9	-105	11.7	+9	28.7	-104	42.0	+8	28.2	-104	12.6	6	44.6	85
5:25	+9	44.1	-106	41.9	+8	44.4	-106	11.3	+7	44.5	-105	41.2	6	42.0	82
5:30	+8	57.4	-108	12.3	+7	58.3	-107	41.0	+6	58.9	-107	10.1	6	38.6	80
5:35	+8	6.9	-109	43.3	+7	10.3	-109	11.3	+6	11.5	-108	39.8	6	34.4	77
5:40	+7	13.4	-111	15.5	+6	20.4	-110	42.9	+5	22.2	-110	10.8	6	29.3	74
5:45	+6	25.9	-112	49.4	+5	28.5	-112	16.2	+4	30.8	-111	43.7	6	23.4	71
5:50	+5	31.3	-114	25.5	+4	34.5	-113	51.9	+3	37.3	-113	18.9	6	16.7	68
5:55	+4	34.4	-116	4.6	+3	33.2	-115	30.6	+2	41.6	-114	57.3	6	9.3	65
6:00	+3	35.1	-117	47.5	+2	39.5	-117	13.2	+1	43.5	-116	39.6	6	1.0	62
6:05	+2	33.1	-119	35.2	+1	36.1	-119	0.6	+0	42.7	-118	26.9	5	52.1	59
6:10	+1	23.2	-121	28.8	+0	33.9	-120	54.1	-0	21.0	-120	20.2	5	42.3	55
6:15	0	20.1	-123	30.0	-0	33.7	-122	55.1	-1	27.9	-122	21.2	5	31.8	52
6:20	-0	51.9	-125	40.7	-1	45.0	-125	5.7	-2	38.7	-124	31.8	5	20.4	48
6:25	-2	8.4	-128	3.6	-2	0.9	-127	28.7	-3	53.9	-126	54.9	5	8.2	45
6:30	-3	30.5	-130	42.6	-4	22.2	-130	7.9	-5	14.5	-129	34.3	4	55.0	40
6:35	-4	59.6	-133	44.4	-5	50.5	-133	9.6	-6	42.1	-132	36.2	4	40.6	36
6:40	-6	38.4	-137	16.9	-7	26.4	-136	44.0	-8	19.1	-136	10.9	4	24.6	31
6:45	-8	32.1	-141	47.0	-9	20.9	-141	11.9	-10	10.5	-140	39.0	4	6.4	25
6:50	-10	54.7	-148	5.4	-11	41.5	-147	28.7	-12	29.4	-146	55.2	3	43.8	17
6:51	-11	30.2	-149	46.8	-12	16.3	-149	11.2	-13	3.8	-148	37.2	3	38.3	15
6:52	-12	10.3	-151	51.1	-12	55.6	-151	11.8	-13	42.3	-150	36.9	3	32.0	13
6:53	-12	58.3	-154	25.7	-13	42.1	-153	43.0	-14	27.8	-153	6.0	3	24.6	10

TOTAL ECLIPSE OF THE SUN
CONJUNCTION IN RIGHT ASCENSION, APRIL 30, 1988 AT 02:27:24 U.T.

	H	M	S		
R.A. OF SUN	2	32	26.01	HOURLY MOTION	9.52 TIME-S
R.A. OF MOON	2	32	26.01	HOURLY MOTION	141.51 TIME-S

	D	M	S		
DEC. OF SUN	+15	0	31.83	HOURLY MOTION	45.55 ARC-S
DEC. OF MOON	+15	44	13.45	HOURLY MOTION	989.92 ARC-S

E.H.P. OF SUN	8.72 ARC-S	TRUE SEMIDIAMETER OF SUN	951.08 ARC-S
E.H.P. OF MOON	3631.21 ARC-S	TRUE SEMIDIAMETER OF MOON	989.41 ARC-S

CIRCUMSTANCES OF THE ECLIPSE

			LONG D	LAT D
ECLIPSE BEGINS	23:32:18	U.T.	- 95.73	+ 1.54
CENTRAL ECLIPSE BEGINS	00:38:39	U.T.	- 74.85	+17.01
CENTRAL ECLIPSE AT LOCAL APPARENT NOON	02:27:24	U.T.	-142.35	+61.69
CENTRAL ECLIPSE ENDS	03:14:40	U.T.	+109.75	+61.58
ECLIPSE ENDS	04:21:12	U.T.	+139.17	+47.32

ตารางที่ 9

TOTAL ECLIPSE OF THE SUN, APRIL 30, 1988

AT LOPBURI :

	D	M	S
LONGITUDE	-100	37	36
LATITUDE	+ 14	51	0

LOCAL CIRCUMSTANCES

FIRST PENUMBRAL CONTACT	23:39:11	U.T.	P.A.	253.761 D	ALT	9.61 D
MAXIMUM PHASE	00:34:18	U.T.	MAGNITUDE	0.74	ALT	22.66 D
LAST PENUMBRAL CONTACT	01:34:56	U.T.	P.A.	38.334 D	ALT	37.14 D

ตารางที่ 10

PATH OF THE CENTRAL PHASE
TOTAL ECLIPSE OF THE SUN, APRIL 30, 1688

U.T.	NORTHERN LIMIT				CENTRAL LINE				SOUTHERN LIMIT				DURATION		A
	LAT		LONG		LAT		LONG		LAT		LONG		M	S	
	D	M	D	M	D	M	D	M	D	M	D	M			D
0:40	+18	43.1	- 77	24.2	+19	28.7	- 82	28.7	+19	42.9	- 85	43.8	2	16.0	8
0:41	+20	7.2	- 81	23.8	+20	24.1	- 84	46.7	+20	29.2	- 87	30.2	2	20.7	10
0:42	+21	4.3	- 83	45.4	+21	11.2	- 86	34.1	+21	10.9	- 88	59.9	2	24.5	12
0:43	+21	52.3	- 85	34.5	+21	53.5	- 88	4.3	+21	49.6	- 90	18.4	2	27.9	14
0:44	+22	35.3	- 87	5.6	+22	32.6	- 89	23.1	+22	25.9	- 91	28.7	2	30.9	16
0:45	+23	15.0	- 88	24.9	+23	9.4	- 90	33.6	+23	0.5	- 92	32.7	2	33.6	17
0:50	+26	6.0	- 93	25.8	+25	52.0	- 95	11.5	+25	36.4	- 96	52.5	2	45.1	23
0:55	+28	33.3	- 97	5.7	+28	14.8	- 98	41.3	+27	55.1	-100	13.6	2	54.2	27
1:00	+30	48.2	-100	4.8	+30	26.6	-101	34.7	+30	3.9	-103	2.0	3	2.0	31
1:05	+32	55.3	-102	39.3	+32	31.1	-104	5.6	+32	6.1	-105	29.5	3	8.7	34
1:10	+34	57.0	-104	57.5	+34	30.6	-106	21.3	+34	3.4	-107	43.1	3	14.6	37
1:15	+36	54.8	-107	4.6	+36	26.3	-108	26.8	+35	57.2	-109	46.9	3	19.7	39
1:20	+38	49.5	-109	4.4	+38	19.0	-110	25.3	+37	48.1	-111	44.2	3	24.2	41
1:25	+40	41.8	-110	59.3	+40	9.6	-112	19.3	+39	36.8	-113	37.2	3	28.1	43
1:30	+42	32.4	-112	51.5	+41	58.3	-114	10.8	+41	23.7	-115	27.9	3	31.4	45
1:35	+44	21.5	-114	42.9	+43	45.5	-116	1.5	+43	9.2	-117	18.0	3	34.2	46
1:40	+46	9.5	-116	35.2	+43	31.6	-117	53.2	+44	53.4	-119	9.1	3	36.4	47
1:45	+47	56.7	-119	30.0	+47	16.8	-119	47.4	+46	36.7	-121	2.5	3	38.1	48
1:50	+49	43.1	-120	29.0	+49	1.2	-121	45.6	+48	19.2	-122	59.9	3	39.3	48
1:55	+51	29.0	-122	33.9	+50	45.0	-123	49.7	+50	1.0	-125	2.9	3	39.9	48
2:00	+53	14.4	-124	47.0	+52	28.3	-126	1.4	+51	42.1	-127	13.2	3	40.0	48
2:05	+54	59.4	-127	10.3	+54	10.9	-128	23.0	+53	22.6	-129	32.9	3	39.5	48
2:10	+56	43.9	-129	46.8	+55	53.1	-130	57.0	+55	2.4	-132	4.4	3	38.5	48
2:15	+58	27.8	-132	39.8	+57	34.5	-133	46.6	+56	41.4	-134	50.5	3	36.9	47
2:20	+60	10.9	-135	53.4	+59	14.9	-136	55.4	+58	19.4	-137	54.7	3	34.7	46
2:25	+61	52.7	-139	33.0	+60	54.1	-140	28.2	+59	56.1	-141	21.1	3	31.9	44
2:30	+63	32.6	-143	45.2	+62	31.3	-144	31.1	+61	30.7	-145	15.1	3	28.4	43
2:35	+65	9.4	-148	38.8	+64	5.5	-149	11.4	+63	2.5	-149	43.3	3	24.3	41
2:40	+66	41.4	-154	24.8	+65	35.2	-154	39.0	+64	30.1	-154	54.2	3	19.5	39
2:45	+68	6.0	-161	17.7	+66	58.2	-161	6.0	+65	51.5	-160	58.4	3	13.9	36
2:50	+69	16.8	-169	34.9	+68	10.7	-168	47.7	+67	3.5	-168	9.1	3	7.5	33
2:55	+70	13.2	-179	37.0	+69	7.1	-178	2.3	+68	1.4	-176	42.5	3	0.1	30
3:00	+70	38.3	+169	13.6	+69	38.5	+170	49.3	+68	37.6	+173	2.0	2	51.5	26
3:05	+70	15.6	+153	30.6	+69	29.4	+157	20.7	+68	39.4	+160	39.3	2	41.1	21
3:10	+68	21.7	+135	1.4	+68	7.3	+140	33.4	+67	41.3	+145	19.7	2	27.7	15
3:11	+67	36.9	+130	26.0	+67	35.1	+136	31.7	+67	17.6	+141	43.1	2	24.4	13
3:12	+66	36.0	+125	8.2	+66	53.3	+132	5.1	+66	47.3	+137	49.0	2	20.5	11
3:13	+65	0.2	+118	11.4	+65	56.6	+126	57.3	+66	8.1	+133	30.1	2	16.0	9
3:14	+65	5.2	+117	19.1	+64	23.9	+120	18.6	+65	14.8	+126	30.9	2	9.9	6

ตารางที่ 11



รูปที่ 1

สุริยุปราคาสองแผ่นดิน

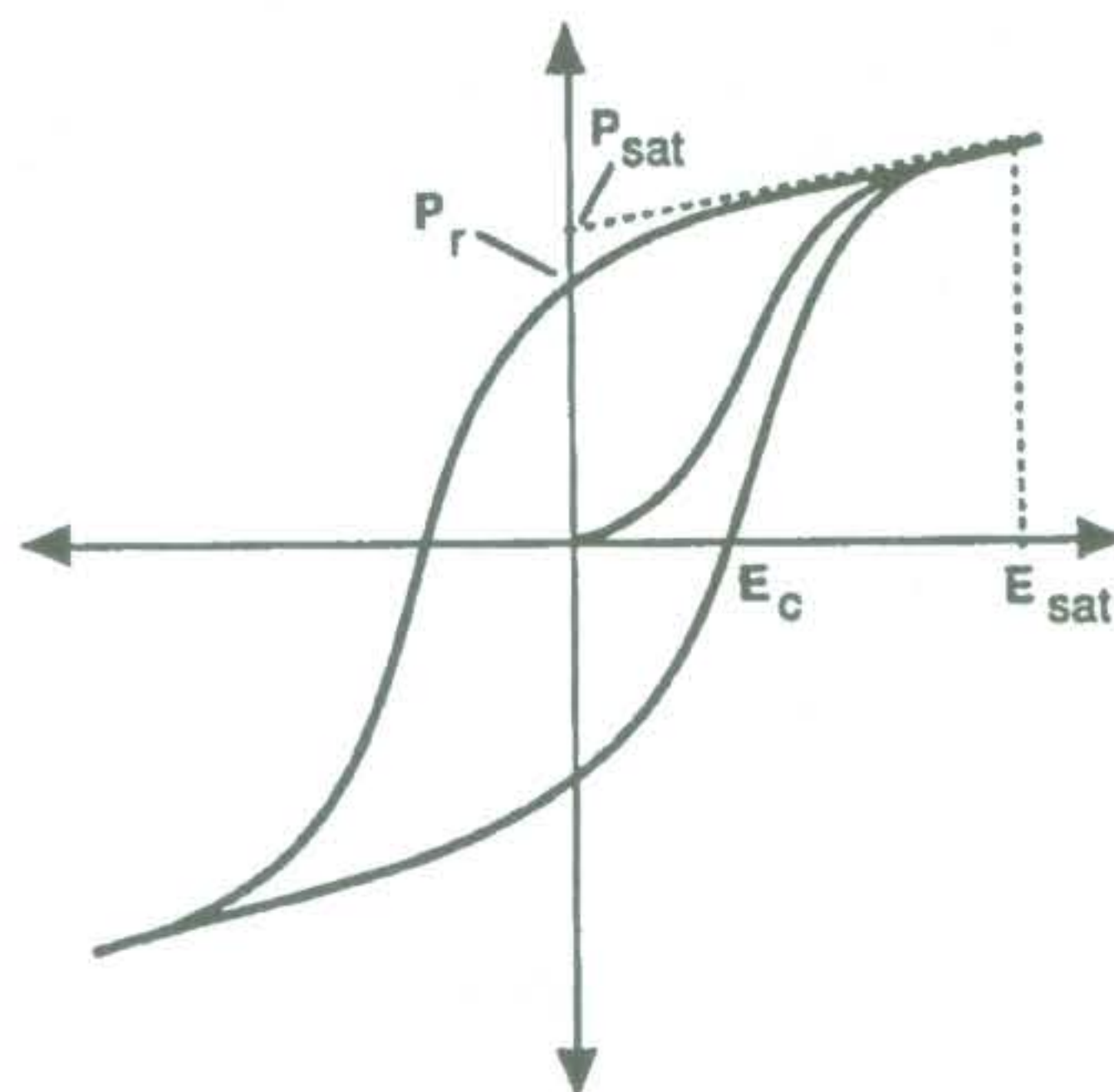
เส้นแนวตั้งเป็นทางเดินเงามืดของสุริยุปราคา วันที่ ๓๐ เมษายน ๒๕๓๑ สมเด็จพระนารายณ์ได้ทอดพระเนตร
 เส้นแนวนอนเป็นของ วันที่ ๑๘ สิงหาคม ๒๕๑๑ พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวได้ทอดพระเนตร
 ทั้งสองเป็นสุริยุปราคาเดียวกัน มาให้เห็นห่างกัน ๑๐ รอบ สวรรค์

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกและเทคโนโลยี

จินดา เข้มประสิทธิ์¹

ในปัจจุบันนี้เราไม่สามารถปฏิเสธได้เลยว่า เทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ และการติดต่อสื่อสารผ่านดาวเทียม เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์เรานั้น จึงได้มีหลายหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนใน นานาประเทศหันมาให้ความสนใจในการวิจัยและ พัฒนาเทคโนโลยีเหล่านี้ ในบทความนี้ขอเสนอ ให้ท่านผู้อ่านได้รู้จักกับวัสดุหรือสารกลุ่มหนึ่งที่มี บทบาทสำคัญมากต่อเทคโนโลยีดังกล่าว นั่นคือ "วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก" ซึ่งก็คือวัสดุที่มีสมบัติทาง ไฟฟ้าอย่างหนึ่งที่เรียกว่า "สภาพเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectricity)" วัสดุที่มีสมบัตินี้เป็นวัสดุ ในกลุ่มไดอิเล็กทริก (dielectric) ซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้า

(insulator) และมีโมเมนต์คู่ขั้ว (dipole moment) เมื่อใส่สนามไฟฟ้า (electric field, E) เข้าไปในวัสดุนี้ จะทำให้เกิดโพลาไรเซชัน (polarization, P) และ เนื่องจากสารเหล่านี้มีลักษณะเป็นของแข็งแบบ ผลึกรวม (polycrystalline solid) จึงทำให้การจัดเรียงตัว ของโพลาไรเซชันเป็นแบบกระจาย (random orientation) สำหรับสารเฟอร์โรอิเล็กทริก โพลาไร เซชันสามารถเปลี่ยนแปลงได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง สนามไฟฟ้า และโพลาไรเซชันสามารถกลับทิศได้ (reversible polarization) ตามทิศของสนามไฟฟ้า เมื่อมีการกลับทิศของสนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถแสดง ในรูปของฮิสเทอรีซิสลูป (hysteresis loop) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ฮิสเทอรีซิสลูปซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโพลาไรเซชันกับสนามไฟฟ้า
(Polla and Francis, 1998)

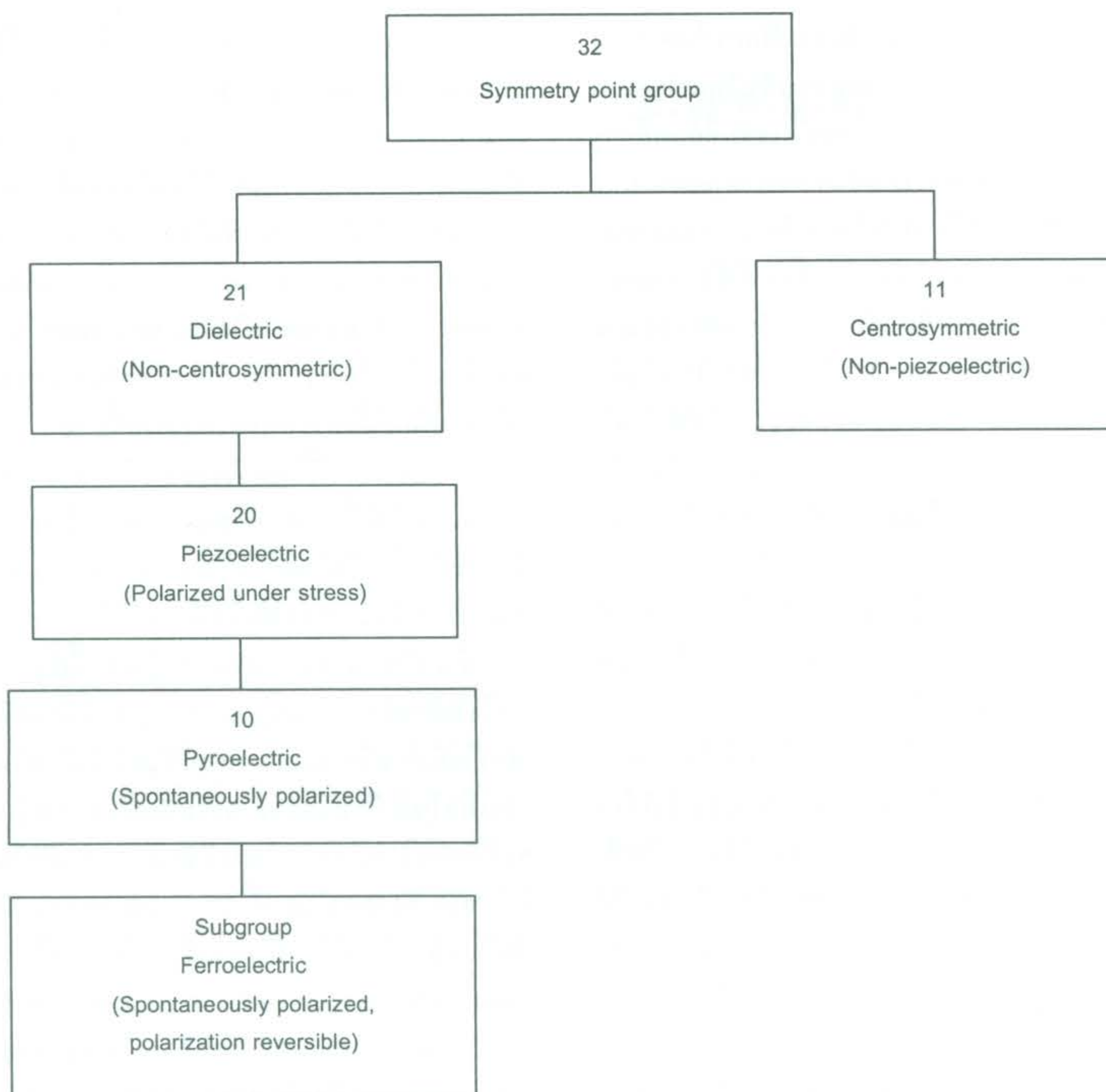
¹ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่าแม้มีการกำจัดสนามไฟฟ้าออกไป ($E = 0$) แต่ความเป็นโพลาไรเซชันยังคงเหลืออยู่ ซึ่งจะเรียกโพลาไรเซชันที่ยังเหลืออยู่นี้ว่าเรmanent โพลาไรเซชัน (remanent polarization, P_r) ส่วนค่า E_c หรือสนามโคเออร์ซีฟ (coercive field) คือขนาดของสนามไฟฟ้าน้อยที่สุดที่ใช้ในการกลับทิศของโพลาไรเซชัน เมื่อมีการกลับทิศของสนามไฟฟ้า สำหรับ P_{sat} และ E_{sat} คือ ค่าโพลาไรเซชันอิ่มตัว (saturated polarization) และสนามไฟฟ้าอิ่มตัว (saturated electric field) ตามลำดับ ซึ่งโพลาไรเซชันอิ่มตัวก็คือ ปริมาณโพลาไรเซชันมากที่สุดที่มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าอิ่มตัว คือ ปริมาณสนามไฟฟ้าน้อยที่สุด ที่ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโพลาไรเซชันไปในทิศทางเดียวกันให้มากที่สุด

สารเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ดีต้องแสดงฮิสเทอรีซิสลูปที่มีลักษณะผอมบางและสูง ซึ่งให้ค่า P_r ที่สูง และค่า E_c ที่ต่ำ นั่นแสดงว่าใช้สนามไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย ก็สามารถกลับทิศของโพลาไรเซชันได้ และเมื่อให้สนามไฟฟ้าเข้าไปก็แสดงความเป็นโพลาไรเซชันสูง นอกจากนี้ยังต้องมีสมบัติไดอิเล็กทริกที่ดี เช่น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant, ϵ_r) สูง และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss, $\tan \delta$) ต่ำ ถ้ามองในแง่ของการนำไปใช้เป็นส่วนประกอบ หนึ่งในส่วนของหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ หรือในไมโครชิพของบัตรเครดิต นั่นก็จะหมายถึงความสามารถในการเก็บข้อมูลได้สูง

และมีประสิทธิภาพ ในปัจจุบันความต้องการใช้อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กและบาง แต่มีประสิทธิภาพสูง กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ และบัตรเครดิต เป็นต้น ดังนั้นจึงได้มีหลายหน่วยงานมุ่งเน้นการศึกษาวิจัย และพัฒนากระบวนการเตรียมสารเฟอร์โรอิเล็กทริกเพื่อให้ได้วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ดี ซึ่งนำไปเป็นส่วนประกอบเพื่อผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้นไป

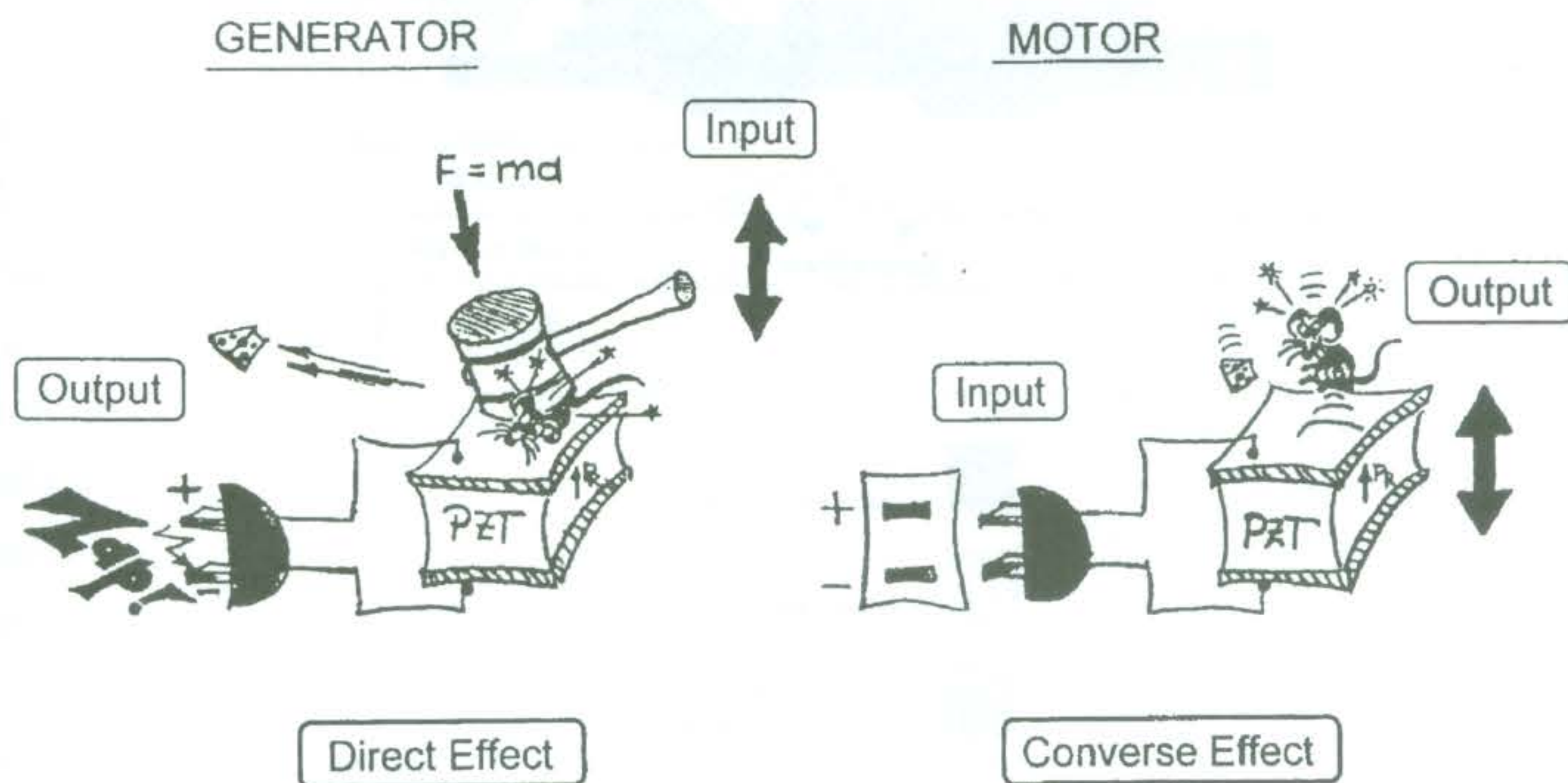
นอกจากนี้โพลาไรเซชันนี้ยังสามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความร้อน ซึ่งเรียกสมบัตินี้ว่า ไพโรอิเล็กทริก (pyroelectric) และสามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเค้นหรือแรงกดดัน (stress) สมบัติเช่นนี้เรียกว่า เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) สารทุกตัวที่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก จะแสดงสมบัติไพโรอิเล็กทริก และเพียโซอิเล็กทริกด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก ไพโรอิเล็กทริก และเพียโซอิเล็กทริก ดังแสดงในรูปที่ 2 สารที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกได้ ต้องมีโครงสร้างผลึกแบบที่ไม่มีศูนย์กลางสมมาตร (non-center of symmetry) ซึ่งจะมีอยู่ 20 กลุ่มสมมาตร เพราะให้ค่าโพลาไรเซชันสุทธิ (net polarization) ที่ไม่เป็นศูนย์ นั่นคือจะแสดงความเป็นโพลาไรเซชันเกิดขึ้น ใน 20 กลุ่มนี้จะมีอยู่เพียง 10 กลุ่มสมมาตร ที่แสดงสมบัติไพโรอิเล็กทริก และมีเพียงส่วนน้อยใน 10 กลุ่มนี้เท่านั้นที่แสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างเฟอร์โรอิเล็กทริก ไพโรอิเล็กทริก และเพียโซอิเล็กทริก

Jacques และ Pierre Curie พบสมบัติเพียโซอิเล็กทริก ในปี ค.ศ.1880 ในควอตซ์ ซิงค์เบนด และทัวร์มาลีน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงกดดันให้กับสารเพียโซอิเล็กทริก จะมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเกิดขึ้น ผลของเพียโซอิเล็กทริกแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ (1) ผลทางตรง: สารเฟอร์โรอิเล็กทริกจะให้เป็นโพลาไรเซชันหรือพลังงานไฟฟ้าออกมา เมื่อได้รับแรงกดดันเข้าไป ตัวอย่างเช่น

เจนเนอเรเตอร์ และ อุปกรณ์จุดเตาแก๊สแบบมือถือ (gas ignitor) เป็นต้น (2) ผลย้อนกลับ: สารเฟอร์โรอิเล็กทริกจะเกิดการเคลื่อนที่ สั่น หรือหมุนเมื่อได้รับพลังงานไฟฟ้าเข้าไป ตัวอย่างเช่น มอเตอร์ และ อัลตราโซนิกบัท (ultrasonic bath) เป็นต้น ผลของเพียโซอิเล็กทริกทั้งสองแบบสามารถแสดงให้ดูในรูปที่เข้าใจได้ง่ายดังรูปที่ 3 (Haertling, 1999)

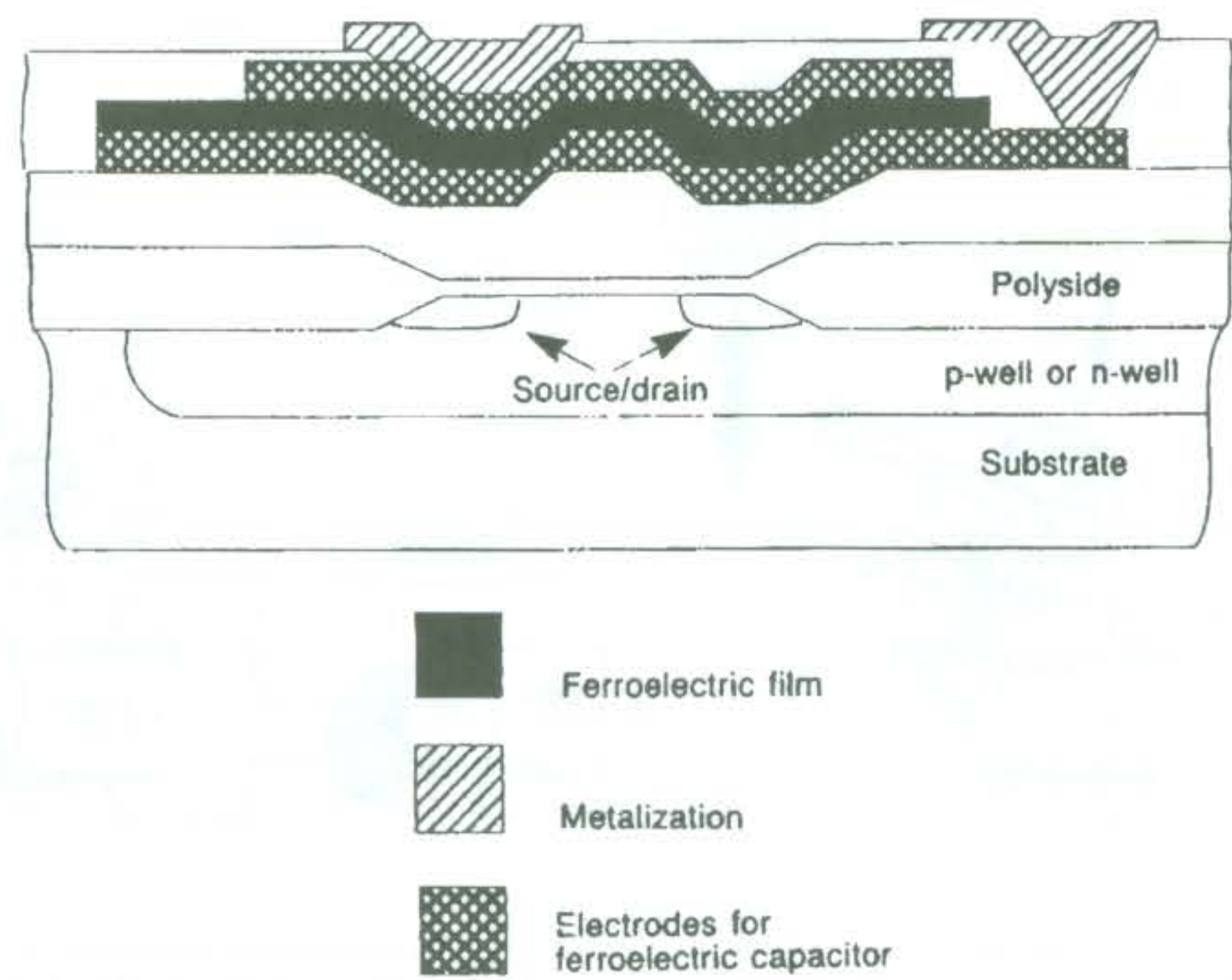


รูปที่ 3 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก

สารเฟอร์โรอิเล็กทริก และเทคโนโลยี

มีการค้นพบสารเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1921 สารตัวนั้นคือเกลือร็อกเชลล์ (Rochelle salt) หรือ โซเดียมโพแทสเซียมทาทเรตเตตระไฮเดรต ต่อมาในปี ค.ศ. 1940 ก็ได้พบสารตัวนี้เองได้เป็นการจุดประกายในการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับสารเฟอร์โรอิเล็กทริกและการนำไปประยุกต์ใช้ในเวลาต่อมา เช่น มีการค้นพบ เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PbZrTiO_3 , PZT) ในกลางปี ค.ศ. 1950 และได้นำมาประยุกต์ใช้งานอย่างมากมาย จวบจนถึงปัจจุบัน เช่น นำไปทำเป็นตัวเก็บประจุ ซึ่งเป็นส่วนประกอบในแผงวงจรหลักของคอมพิวเตอร์เพื่อทำหน้าที่ในส่วนหน่วยความจำหรือเป็นชิ้นส่วนของหน่วยความจำในไมโครชิพและบัตรเครดิต ซึ่งเรียกว่า non-volatile random access memory (NVRAM) และ dynamic random

access memory (DRAM) ดังแสดงในรูปที่ 4 (Yi and Sayer, 1991) สารนี้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากจากวงการอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีสมบัติที่ดีเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน จึงได้มีนักวิจัยหลายกลุ่มได้พยายามคิดค้นและปรับปรุงกระบวนการสังเคราะห์สารนี้ให้มีคุณภาพดียิ่งๆขึ้นไป ไม่ว่าจะเป็นวิธีการสังเคราะห์ สารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์และการใส่ตัวเติม (doping) บางชนิดลงไปเพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการ เช่น การสังเคราะห์ เลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททาเนต (PbLaZrTiO_3 , PLZT) ในปลายปี ค.ศ. 1960 และได้มีการนำไปประยุกต์ใช้เป็น ส่วนประกอบในเครื่องมือ transparent electrooptic จากนั้นก็ได้มีการพัฒนาเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน ทำให้สามารถสังเคราะห์สารเฟอร์โรอิเล็กทริกได้อีกหลายชนิด และนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางในวงการอิเล็กทรอนิกส์ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1 (Sheppard, 1992)



รูปที่ 4 ตัวเก็บประจุเฟอร์โรอิเล็กทริกซึ่งเป็นส่วนประกอบใน NVRAM

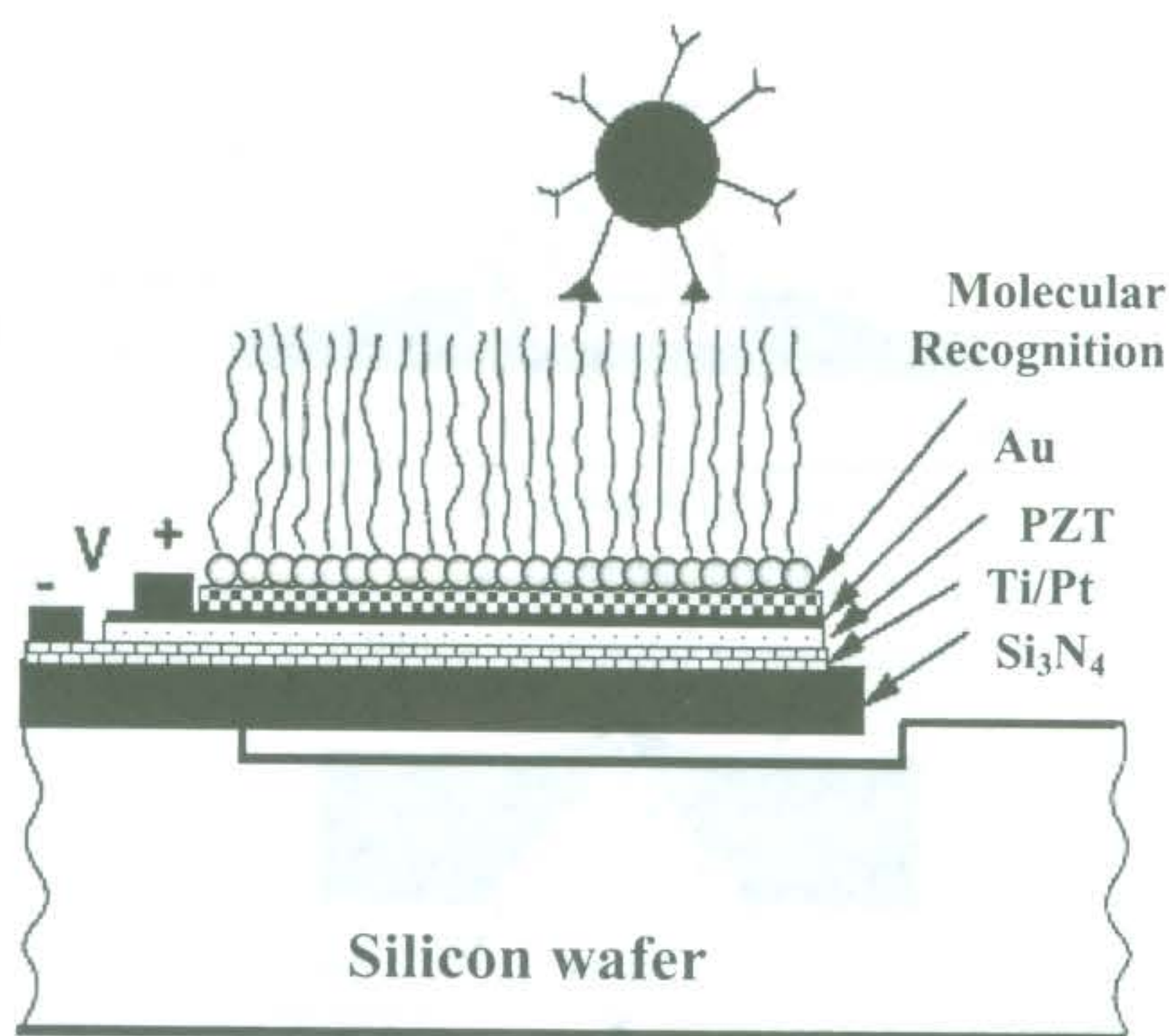
ตารางที่ 1 สารเฟอร์โรอิเล็กทริกและเทคโนโลยี

สารเฟอร์โรอิเล็กทริก	สมบัติทางไฟฟ้า	เทคโนโลยี
Perovskite (titanates) BaTiO ₃ (BT) (Ba,Sr)TiO ₃ (BST) SrTiO ₃ PbTiO ₃ (PT) Pb(Zr,Ti)O ₃ (PZT) (Pb,La)(Zr,Ti)TiO ₃ (PLZT)	Dielectric Dielectric Pyroelectric Pyroelectric Piezoelectric Dielectric Pyroelectric Piezoelectric Electrooptic Pyroelectric Electrooptic	Capacitors, sensor, phase shifter Capacitors, sensor, phase shifter Pyrodetector Pyrodetector Acoustic transducer Nonvolatile memory Pyrodetector Surface acoustic wave substrate (SAW) Waveguide device Pyrodetector Waveguide device, optical memory, display
(Niobates) Pb(Mg _{1/3} ,Nb _{2/3})O ₃ (PMN) PMN/PT LiNbO ₃ (LN) LiTaO ₃ (LT) KNbO ₃ (KN) K(Ta,Nb)O ₃ (KTN)	Dielectric Electrooptic Piezoelectric Electrooptic Electrooptic Pyroelectric Electrooptic	Capacitor, memory Waveguide device Pyrodetector Waveguide device, optical modulator, SAW Waveguide device, frequency doubler, holographic storage Pyrodetector Waveguide device
Tungsten-bronze (Sr,Ba)Nb ₂ O ₆ (SBN) (Pb,Ba)Nb ₂ O ₆ (PBN) (K,Sr)Nb ₂ O ₆ (KSN) (Pb,K)Nb ₂ O ₆ (PKN) Ba ₂ NaNb ₅ O ₁₅ (BNN)	Dielectric Pyroelectric Electrooptic	Memory Pyrodetector Waveguide device

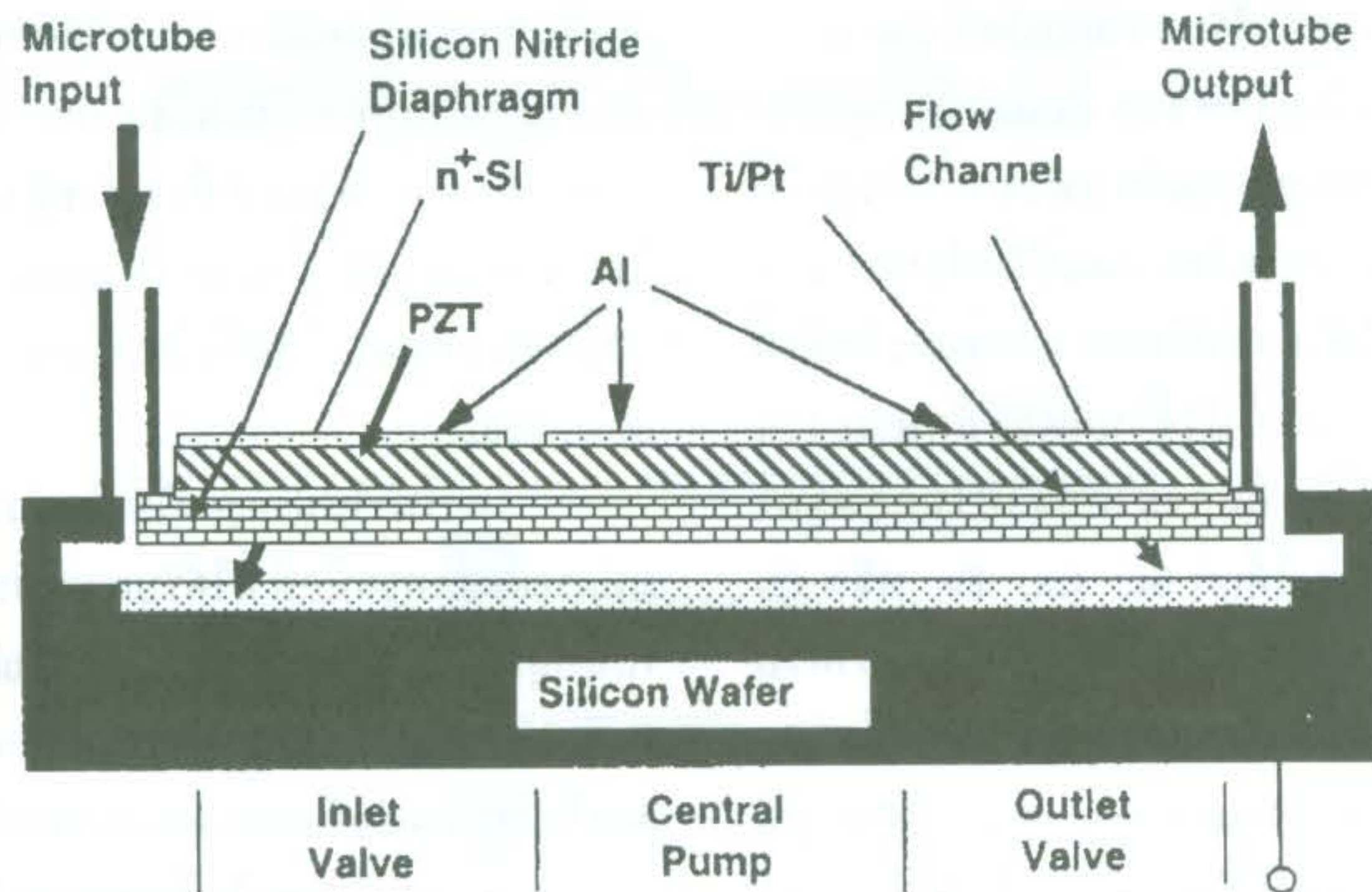
กลุ่มแรกที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก คือ กลุ่มของแบเรียมไททาเนต ต่อมาก็เป็นกลุ่มของ เลดไททาเนต ซึ่งทั้งสองกลุ่มมีการพัฒนาทั้งโครงสร้าง ผลึก การใส่ตัวเติมหรือโคป และปรับปรุงกระบวนการเตรียม เพื่อให้ได้สมบัติทางกายภาพและไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในแต่ละลักษณะงาน ตัวอย่างของตัวเติมที่มักจะใส่ลงไปในกลุ่มของแบเรียมไททาเนต ได้แก่ Sr, Ca, Fe หรือ Co (Radhapiyari et al., 2003; Lee et al., 2004) สำหรับตัวเติมที่มักใส่ลงในกลุ่มของเลดไททาเนต ได้แก่ Zr, Nb, La หรือ Mg (Shannigrahi et al., 2004) แต่เนื่องจากในกลุ่มหลังมีปัญหาความเป็นพิษที่รุนแรงของตะกั่ว ซึ่งจะต้องเพิ่มความระมัดระวังเป็นพิเศษในการเตรียมสารในกลุ่มนี้ ดังนั้นจึงมีกลุ่มนักวิจัยบางกลุ่มได้หันมาสนใจและศึกษาสารที่ความเป็นพิษไม่รุนแรงเท่าตะกั่ว เช่นแบเรียมไททาเนตที่ใส่ตัวเติม

และในปัจจุบันมีนักวิจัยบางกลุ่มได้ศึกษาสารตัวใหม่ ที่นอกจากไม่เป็นพิษรุนแรงเท่าตะกั่วแล้ว ยังมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงมากถึง 105 เช่น กลุ่มคอปเปอร์ไททาเนต (copper titanate) (Ramirez et al., 2000) และ กลุ่มนิกเกิลออกไซด์ซึ่งโคปด้วย Li และ Ti (Wu et al., 2002)

การนำไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับความสนใจเป็นพิเศษ เป็นกลุ่มของตัวเก็บประจุในอุปกรณ์หน่วยความจำดั่งที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น และนอกจากนี้ก็ยังมีกลุ่มของไมโครเซนเซอร์(microsensor)เช่น เคมีคัลเซนเซอร์ (chemical sensor) และไบโอเซนเซอร์ (biosensor) ดังแสดงในรูปที่ 5 เป็นต้น ไมโครแอคทูเอเตอร์ (microactuator) เช่น precision positioner และ micropump (รูปที่ 6) เป็นต้น (Polla and Francis, 1998)



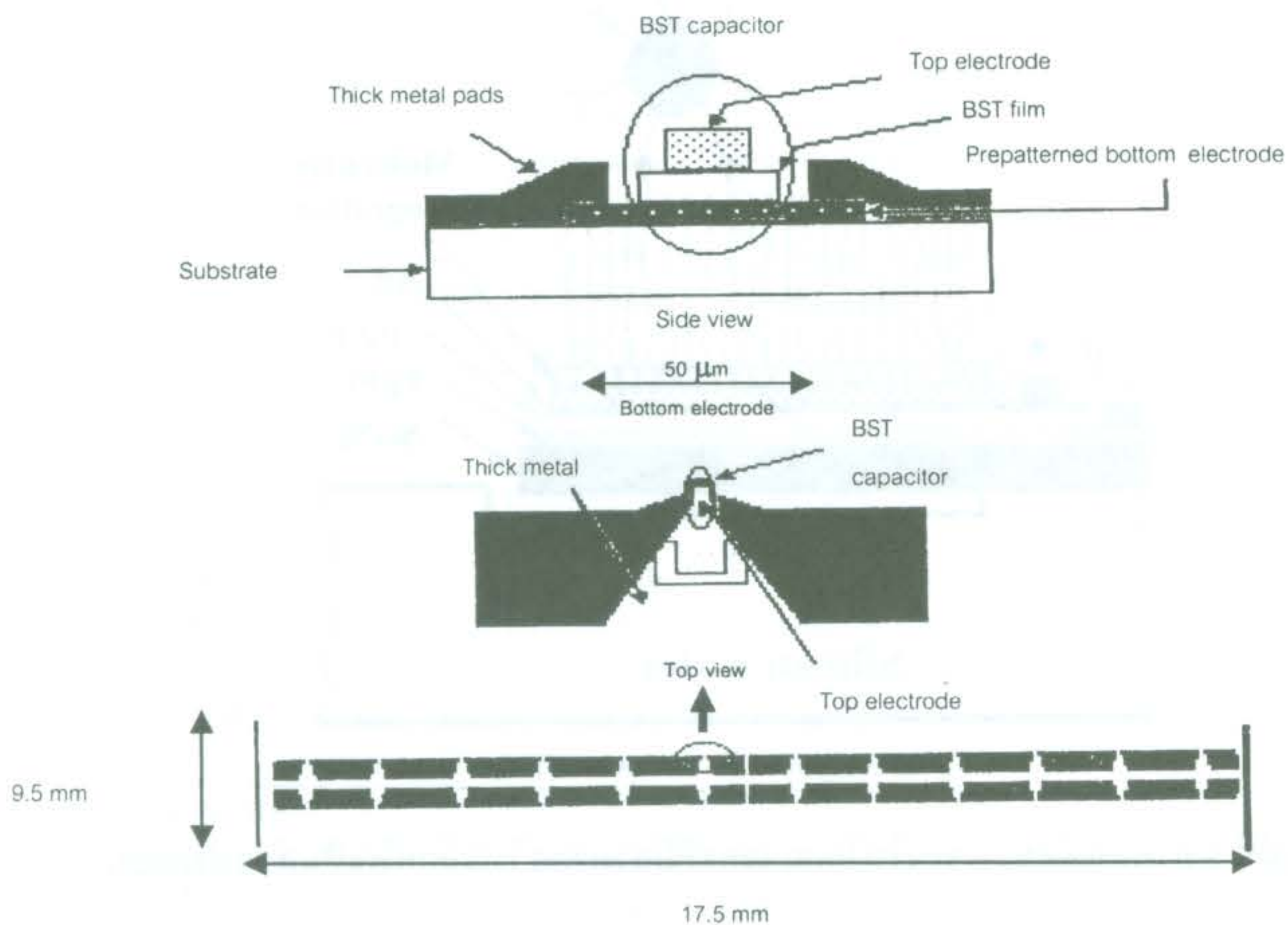
รูปที่ 5 ภาพถ่ายตัดขวางของไบโอเซนเซอร์ที่มีสารเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นส่วนประกอบ



รูปที่ 6 ภาพถ่ายตัดขวางของไมโครปั๊มที่มีสารเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นส่วนประกอบ

ในปัจจุบันกลุ่มที่ได้รับความสนใจและมีการศึกษากันมากอีกกลุ่มหนึ่งคือ กลุ่มของอุปกรณ์ที่ใช้คลื่นไมโครเวฟ เช่น เฟสชิฟเตอร์ (phase shifter)

ออสซิลเลเตอร์ (oscillator) และ แอนเทนนา (antenna) ในอุปกรณ์ติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย หรือการติดต่อสื่อสารผ่านดาวเทียม ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ภาพถ่ายตัดขวางของเฟสชิฟเตอร์ที่มีสารเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นส่วนประกอบ (Acikel, 2002)

จะเห็นได้ว่าในปัจจุบันวัสดุในกลุ่มของเฟอร์ไรด์อิเล็กทรอนิกส์ค่อนข้างมีความสำคัญ และน่าสนใจมากดังได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ดังนั้นการวิจัยและพัฒนาสารกลุ่มนี้เพื่อให้ได้วัสดุที่ดีเหมาะต่อการนำไปใช้งานในแต่ละลักษณะย่อมมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งกระบวนการเตรียมสารเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญมากที่จะต้องทำการศึกษาวิจัย และพัฒนาต่อไป

การเตรียมสารเฟอร์ไรด์อิเล็กทรอนิกส์

การเตรียมสารเฟอร์ไรด์อิเล็กทรอนิกส์มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี อาจอยู่ในรูปของผงละเอียดหรือแผ่นฟิล์มบางก็ได้ขึ้นกับลักษณะการประยุกต์ใช้งาน

(1) การเตรียมแบบผงละเอียด

เป็นการเตรียมให้อยู่ในรูปของผงละเอียดในระดับนาโนเมตร จากนั้นนำมาอัดขึ้นรูปตามลักษณะงานที่ต้องการนำไปใช้ ซึ่งมีอยู่หลายวิธีเช่นการบดผสมแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงของสารประกอบออกไซด์ ซึ่งเรียกว่าวิธีของปฏิกิริยาระหว่าง

ของแข็งกับของแข็ง (solid-solid reaction) และวิธีการตกตะกอนร่วม ซึ่งจะต้องเติมสารที่ช่วยในการตกตะกอนลงไปในสารตั้งต้นด้วย เพื่อช่วยในการตกตะกอน ทั้งสองวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย อุปกรณ์ที่ใช้ราคาไม่แพง แต่ยังมีข้อเสียคือ สารที่เตรียมได้ไม่ค่อยเป็นเนื้อเดียวกันนัก อนุภาคมีขนาดใหญ่ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสูง ต่อมาจะเป็นวิธีไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal) และสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis) ซึ่งเป็นวิธีที่ค่อนข้างได้รับความนิยมมากในขณะนี้ เนื่องจากสารที่เตรียมได้ค่อนข้างมีสมบัติที่ดี คืออนุภาคขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร มีความบริสุทธิ์และเป็นเนื้อเดียวกันสูง ส่งผลให้มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี นอกจากนี้อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาก็ต่ำเมื่อเทียบกับสองวิธีแรก แต่ใช้เครื่องมือที่มีราคาค่อนข้างแพง

(2) การเตรียมแบบฟิล์มบาง

เป็นการเตรียมที่ต้องมีการเคลือบสารเฟอร์ไรด์อิเล็กทรอนิกส์บนแผ่นรองรับที่เรียกว่าซับสเตรท (substrate หรือ supporting material) ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีซึ่งเป็นที่นิยมนำมาดัดแปลงที่ 2

ตารางที่ 2 วิธีการเตรียมสารเฟอร์ไรด์อิเล็กทรอนิกส์แบบฟิล์มบาง (Haertling, 1999)

Physical vapor deposition
Sputtering (radio frequency magnetron, direct circuit, ion beam)
Evaporation (e-beam, resistance, molecular beam epitaxy)
Laser ablation
Chemical vapor deposition (CVD)
MOCVD (metal-organic CVD)
PECVD (plasma-enhanced CVD)
LPCVD (low-pressure CVD)
Chemical solution deposition
Sol-gel
MOD (metalloorganic decomposition)
Melt solution deposition
LPE (liquid-phase epitaxy)

การจะเลือกใช้วิธีใดในการเตรียมขึ้นกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน ซึ่งสามารถเตรียมเป็นฟิล์มบางๆได้ถึง 0.1 ไมโครเมตร และหนาได้ถึง 60 ไมโครเมตร ข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเตรียมแบบผงละเอียดคือ สามารถเข้ากันได้กับ IC แบบกึ่งตัวนำ ได้ดีกว่าสามารถนำไปประกอบเข้ากับชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้เลย โดยทั่วไปการเตรียมแบบฟิล์มบางสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ (1) วิธีทางกายภาพ (2) วิธีทางเคมี ซึ่งแบ่งย่อยออกเป็น chemical vapor deposition และ chemical solution deposition วิธีแรกต้องทำภายใต้สุญญากาศ เพื่อให้ได้ปริมาณของอะตอมหรือไอออนที่มากพอที่จะเคลือบบนแผ่นรองรับ ข้อดีของวิธีนี้คือ เป็นกระบวนการที่แห้งสะอาดปราศจากสิ่งเจือปน สามารถเข้ากันได้กับ IC แบบกึ่งตัวนำ มีการเติบโตของผลึกสารแบบอีพิแทกเซียล (epitaxial growth) แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อเสียคือ อัตราการก่อตัว (deposition rate) ของผลึกช้า ควบคุมองค์ประกอบทางเคมีได้ยากในกรณีการเตรียมสารที่มีองค์ประกอบทางเคมีหลายตัว มีการใช้อุณหภูมิสูงในกระบวนการ และเครื่องมือมีราคาแพง

สำหรับวิธีทางเคมี อัตราการก่อตัวของผลึกจะเร็วกว่า ควบคุมองค์ประกอบทางเคมีได้ง่ายกว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้แทบจะไม่มีรูพรุน และใช้เครื่องมือที่ราคาไม่แพงมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีทางกายภาพ โดยเฉพาะวิธีโซล-เจล ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้มากในปัจจุบันนี้ เนื่องจากมีข้อดีคือ สารเฟอร์โรอิเล็กทริกที่เตรียมได้ จะมีความบริสุทธิ์และเป็นเนื้อเดียวกันสูง อนุภาคมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาอ่อนข้างต่ำ และเครื่องมือไม่ซับซ้อนและราคาไม่แพง วิธีโซล-เจลเริ่มจากการเตรียมสารละลายโซล-เจล ต่อจากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางโดยการเคลือบแบบการหมุนเหวี่ยง (spin coating) พ่น (spray coating) หรือ จุ่ม (dip coating) แล้วแต่จะเลือกใช้ แต่วิธีการเคลือบแบบการหมุนเหวี่ยงสามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้ง่ายกว่าสองวิธีหลัง

สรุป

สารเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นสารที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากตั้งแต่ในอดีตจวบจนถึงปัจจุบัน และได้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานในเทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ บัตรเครดิต การติดต่อสื่อสารแบบระบบไร้สาย และการติดต่อสื่อสารผ่านดาวเทียม ในปัจจุบันได้พยายามที่จะผลิตอุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้ให้มีขนาดกะทัดรัด สะดวกและง่ายต่อการใช้งาน แต่มีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นการศึกษาวิจัยถึงกระบวนการเตรียมสารในกลุ่มนี้จึงยังมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นไป

บรรณานุกรม

- Acikel, B. (2002). High Performance Barium Strontium Titanate Varactor Technology for Low Cost Circuit Applications. Ph.D. Thesis. University of California.
- Haertling, G. H. (1999). Ferroelectric ceramics: history and technology. J. Am. Ceram. Soc. 82(4): 797-818.
- Lee, S-G., Kim, C-I. and Kim, B-C. (2004). Dielectric properties of screen-printed (Ba,Sr,Ca)TiO₃ thick films modified with Al₂O₃ for microwave device applications. J. Eur. Cer. Soc. 24:157-162.
- Polla, D. L. and Francis, L. F. (1998). Processing and characterization of piezoelectric materials and integration into microelectromechanical systems. Annu. Rev. Mater. Sci. 28:563-597.
- Radhapiyari, L., Thakur, O.P. and Prakash, C. (2003). Structural and dielectric properties of the system Ba_{1-x}Sr_xFe_{0.01}Ti_{0.99}O₃. Mat. Lett. 57:1824-1829.

- Ramirez, A. P., Subramanian, M. A., Gardel, M., Blumberg, G., Li, D., Vogt, T. and Shapiro, S. M. (2000). Giant dielectric constant response in a copper-titanate. *Solid State Comm.* 115:217-220.
- Shannigrahi, S.R., Tay, F.E.H., Yao, K. and Choudhary, R.N.P. (2004). Effect of rare earth ion substitutions on the microstructural and electrical properties of sol-gel grown PZT ceramics. *J. Eur. Cer. Soc.* 24:163-170.
- Sheppard, L. M. (1992). Advance in processing of ferroelectric thin films. *Cer. Bull.* 71(1): 85-95.
- Wu, J., Nan, C-W., Lin, Y. and Deng, Y. (2002). Giant dielectric permittivity observed in Li and Ti doped NiO. *Phy. Rev. Lett.* 89(21):217601-4.
- Yi, G. and Sayer, M. (1991). Sol-gel processing of complex oxide films. *Cer. Bull.* 70(7):1173-1179.



เซลล์ต้นตอจากตัวอ่อน: แนวทางใหม่ในการรักษาโรค

ชูชาติ กมลเลิศ¹

บทนำ

โรคพาร์กินสัน (Parkinson's disease) เป็นตัวอย่างที่สำคัญของโรคในระบบประสาทส่วนกลางที่เกิดจากการเสื่อมของเซลล์ประสาทชนิดโดปามีนอจิก นิวรอนส์ (dopaminergic neurons) ในสมองส่วนพาร์ส คอมแพคตา (pars compacta) ที่บริเวณสับสแตนเชีย โนกรา (substantia nigra) ของสมองส่วนกลาง (midbrain) ทำให้สมองไม่สามารถสร้างสารสื่อประสาท (neurotransmitter) ที่เรียกว่า สารโดปามีน (dopamine) ได้ ผู้ป่วยโรคนี้มีอาการผิดปกติที่สำคัญ ได้แก่ อาการสั่น (tremor) เกร็ง (rigidity) เคลื่อนไหวช้า (bradykinesia) และเสียการทรงตัว (postural instability) เนื่องจากสมองไม่สามารถสั่งการไปยังอวัยวะเป้าหมายให้ทำงานได้อย่างปกติ ในปัจจุบันโรคนี้ยังไม่มีวิธีการรักษาให้หายได้ การรักษาโดยใช้ยาเป็นเพียงการบรรเทาอาการเท่านั้นและยังก่อให้เกิดอาการข้างเคียงที่ไม่พึงประสงค์ตามมา ดังนั้นภายหลังจากที่มีการศึกษาค้นคว้าเพื่อที่จะนำเซลล์ต้นตอ (stem cells) มาใช้ในการรักษาโรคต่างๆ เช่น เบาหวาน มะเร็งเม็ดเลือดขาว ฯลฯ โดยใช้การรักษาด้วยวิธีการเปลี่ยนถ่ายเซลล์ (cell transplantation) หรือเซลล์บำบัด (cell therapy)

จึงมีนักวิทยาศาสตร์จำนวนมากได้ให้ความสนใจในการศึกษาเพื่อที่จะนำเอาเซลล์ต้นตอมาใช้ในการรักษาโรคในระบบประสาทด้วยวิธีการเปลี่ยนถ่ายเซลล์ด้วยเช่นกัน ซึ่งอาจจะเรียกว่า นิวโรทรานสแพลนเตชัน (neurotransplantation) เพราะเป็นการเปลี่ยนถ่ายเซลล์ประสาทที่ปกติเข้าไปทดแทนเซลล์ประสาทที่ไม่สามารถทำงานตามปกติได้ จากการรายงานถึงผลการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาทำให้มีความเป็นไปได้ที่การรักษาโดยเซลล์ต้นตอน่าจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการรักษาโรคในระบบประสาท เช่น โรคอัลไซเมอร์ โรคอัมพาตที่เกิดจากพยาธิสภาพของไขสันหลัง เป็นต้น การเปลี่ยนสภาพของเซลล์ต้นตอไปเป็นเซลล์ประสาทนอกจากจะเป็นการสร้างแหล่งที่สำคัญของเซลล์ประสาทที่จะนำไปใช้ในการรักษาโรคโดยการเปลี่ยนถ่ายเซลล์แล้วยังมีประโยชน์ต่อการทดสอบผลกระทบของยาชนิดต่างๆต่อระบบประสาท และการศึกษาถึงการเจริญของเนื้อเยื่อในระบบประสาทซึ่งจะทำให้ทราบถึงกระบวนการเจริญของอวัยวะในระบบนี้ ตลอดจนทำให้ทราบถึงความผิดปกติต่างๆที่เกิดขึ้นอันจะนำไปสู่แนวทางในการป้องกันและแก้ไขต่อไป

¹ ภาควิชากายวิภาคศาสตร์ คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

เซลล์ต้นตอ

เซลล์ต้นตอเป็นเซลล์ที่มีคุณสมบัติพิเศษที่สำคัญอยู่ 2 ประการด้วยกันคือ 1) เป็นเซลล์ที่ยังไม่มีการเปลี่ยนสภาพ (undifferentiated cells) ดังนั้นจึงยังมีความสามารถที่จะเปลี่ยนสภาพ (differentiation) ไปเป็นเซลล์จำเพาะ (specialized cells) ชนิดอื่นๆได้ต่อไป เช่น เซลล์กล้ามเนื้อ เซลล์ประสาท เซลล์เม็ดเลือด ฯลฯ 2) เซลล์ต้นตอสามารถที่จะแบ่งตัวเพิ่มจำนวนในอาหารเลี้ยงเชื้อได้อย่างไม่สิ้นสุด เพราะภายหลังการแบ่งตัวแต่ละครั้งจะมีเซลล์ลูก (daughter cells) อย่างน้อย 1 เซลล์ที่ยังมีคุณสมบัติเป็นเซลล์ต้นตออยู่ การที่เซลล์ต้นตอจะเปลี่ยนสภาพไปเป็นเซลล์จำเพาะชนิดหรือยังคงคุณสมบัติการเป็นเซลล์ต้นตอต่อไปนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยภายในเซลล์ เช่น ยีน และปัจจัยจากภายนอกเซลล์ เช่น สารควบคุมการเจริญเติบโต (growth factors) (Watt and Hogan, 2000) ลักษณะทางมิวติเพนของเซลล์ต้นตอที่นำมาเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการเป็นเซลล์มีนิวเคลียสขนาดใหญ่ และเมื่อศึกษาถึงระดับของโครโมโซมพบว่าเซลล์ต้นตอมี ทีโลเมียร์ (telomere) ที่ยาว ทีโลเมียร์เป็นตอนปลายของโครโมโซมแต่ละเส้นและเกี่ยวข้องกับการดำรงชีพของเซลล์โดยพบว่าเซลล์ของสัตว์ที่มีอายุมากๆ จะมีทีโลเมียร์สั้นกว่าเซลล์ตัวอ่อนการที่มีทีโลเมียร์ยาวแสดงให้เห็นว่าเซลล์ต้นตอนี้จะมีกิจกรรมของเอนไซม์ทีโลเมอเรส (telomerase) สูงเนื่องจากเอนไซม์ทีโลเมอเรสทำหน้าที่เพิ่มความยาวของทีโลเมียร์ ดังนั้นการที่เซลล์ต้นตอมีกิจกรรมของทีโลเมอเรสสูงแสดงว่าเซลล์เหล่านี้ยังคงมีความสามารถที่จะดำรงชีพและสามารถแบ่งตัวเพิ่มจำนวนต่อไปได้อีก (Thomson et al., 1998) จำแนกเซลล์ต้นตอตามแหล่งที่ได้มาออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ 1) เซลล์ต้นตอจากตัวอ่อน (embryonic stem cells, ESC) ซึ่งเป็นเซลล์ต้นตอที่แยกมาจากเซลล์ใน อินเนอร์เซลล์แมสส์ (inner cell mass, ICM) ของตัวอ่อนระยะบลาสโตซิสต์ (blastocyst)

(Thomson et al., 1998) หรืออาจจะแยกได้จากบริเวณ โกโนดัล ริคจ์ (gonadal ridge) ของตัวอ่อน (Shamblott et al., 1998) และ 2) เซลล์ต้นตอจากร่างกายที่เจริญเติบโตแล้ว (adult stem cells, ASC) หรือเซลล์ต้นตอจากเนื้อเยื่อ (tissue stem cells, TSC) ซึ่งเป็นเซลล์ต้นตอที่พบในเนื้อเยื่อต่างๆของร่างกายคนหรือสัตว์ที่เจริญเติบโตเต็มที่แล้ว โดยสามารถพบได้ในระบบต่างๆของร่างกาย เช่น เซลล์ต้นตอของเม็ดเลือด (hematopoietic stem cells) ในไขกระดูก เซลล์ต้นตอในระบบย่อยอาหาร (gustatory stem cells) เซลล์ต้นตอในผิวหนัง (epidermal stem cells) เซลล์ต้นตอในเนื้อเยื่อไขมัน (adipose stem cells) เซลล์ต้นตอในรากฟัน (dental stem cells) รวมถึงเซลล์ต้นตอในระบบประสาท (neural หรือ neuronal stem cells) ด้วย

ในกรณีของเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อน เป็นเซลล์ที่แยกจากกลุ่มเซลล์ที่เรียกว่า อินเนอร์เซลล์แมสของตัวอ่อนระยะบลาสโตซิสต์ โดยภายหลังการปฏิสนธิระหว่างเชื้ออสุจิกับไข่จะได้ ไซโกต (zygote) ซึ่งไซโกตจะมีการแบ่งตัวเพิ่มจำนวนเซลล์มากขึ้นเรื่อยๆโดยแต่ละเซลล์เรียกว่า เซลล์บลาสโตเมียร์ (blastomere) ในตัวอ่อนของคนพบว่าในวันที่ 3 ของการเจริญไซโกตจะมีลักษณะเป็นลูกกลมตันประกอบด้วยเซลล์บลาสโตเมียร์ ประมาณ 12-16 เซลล์ เรียกตัวอ่อนระยะนี้ว่าระยะมอรูลา (morula) และในวันที่ 4 หลังจากการปฏิสนธิตัวอ่อนที่มีเซลล์บลาสโตเมียร์ประมาณ 36 เซลล์จะมีการจัดเรียงตัวของเซลล์ใหม่โดยเกิดช่องว่างขึ้นในตัวอ่อน เรียกบลาสโตซีล (blastocoel) หรือบลาสโตติกคาวิตี (blastotic cavity) เซลล์ของตัวอ่อนในระยะนี้จะมีการแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่เป็นผนังของก้อนกลมเรียกว่า เซลล์โทรโฟบลาสต์ (trophoblast) และอีกกลุ่มหนึ่งมีลักษณะเป็นก้อนของกลุ่มเซลล์ที่เรียกว่า อินเนอร์เซลล์แมส ตัวอ่อนในระยะนี้เรียกว่า ระยะบลาสโตซิสต์ (blastocyst) และเป็นระยะที่

นักวิทยาศาสตร์ทำการแยกเอาเซลล์จาก อินเนอร์ เซลล์เมสส์ มาเพาะเลี้ยงเป็นเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อน นั้นเอง

การศึกษาการเปลี่ยนสภาพของ เซลล์ต้นตอจากตัวอ่อน

นักวิทยาศาสตร์สามารถแยกเอาเซลล์ต้นตอจาก ตัวอ่อนของหนูถีบจักรมาเพาะเลี้ยงบนจานเลี้ยงเชื้อ ได้เป็นครั้งแรกเมื่อประมาณ 25 ปีที่แล้ว (Evans and Kaufman, 1981; Martin et al., 1981) หลังจากนั้น ก็สามารถนำเอาเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนของสัตว์ชนิด ต่างๆ มาเพาะเลี้ยงจนประสบความสำเร็จซึ่งได้แก่ หนู แฮมสเตอร์ (Doetschman et al., 1988) แกะและหมู (Notarianni et al., 1991) กระต่าย (Giles et al., 1993; Graves and Moreadith, 1993) หนูแรท (Iannaccone et al., 1994) และวัว (Sim and First, 1994) ส่วนการ ทดลองเพาะเลี้ยงเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนในห้อง ปฏิบัติการที่ได้จากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่มีวิวัฒนาการสูงขึ้น โดยเฉพาะในสัตว์พวกไพรเมท (primate) มีรายงานว่าได้ทำใน ลิงวอก (rhesus monkey) (Thomson et al., 1995) และลิงโลกใหม่ ที่เรียกว่า common marmoset (*Callithrix jacchus*) (Thomson et al., 1996) และประสบความสำเร็จเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ในตัวอ่อนของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมชั้นสูงนั้น ส่วนของโทรโปบลาสต์จะเสื่อมสลายไปช้ามาก ดังนั้นเพื่อที่จะไม่ให้เซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนหยุดการ เจริญไปเสียก่อนจึงต้องมีการตัดแยกโทรโปบลาสต์ ออกไปจากบลาสโตซิสต์ก่อนที่จะนำมาเพาะเลี้ยง (Pedersen, 1999) ส่วนการแยกเอาเซลล์ต้นตอจาก ตัวอ่อนของคนมาเพาะเลี้ยงประสบความสำเร็จเมื่อ ประมาณ 6 ปีที่ผ่านมา (Shamblott, et al., 1998; Thomson et al., 1998) มีนักวิทยาศาสตร์จำนวนมาก ที่ได้พยายามศึกษาถึงกระบวนการเปลี่ยนสภาพของ เซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนไปเป็นเซลล์จำเพาะชนิดที่อยู่

ตามโครงสร้างบริเวณต่างๆของร่างกาย การเปลี่ยน สภาพเซลล์ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากของการ เจริญเติบโต เพราะในช่วงนี้กระบวนการต่างๆ จะดำเนินไปอย่างรวดเร็วและหากมีปัจจัยอย่างอื่นที่มีคุณสมบัติเป็นเทอราโตเจน(teratogen) มากระทบ เช่น สารเคมีที่เป็นพิษต่อเซลล์ เชื้อไวรัสบางชนิด ฯลฯ อาจทำให้เกิดความผิดปกติของร่างกายตามมา ได้ (Moore and Persaud, 1993) ดังนั้นหากสามารถ ศึกษาจนเข้าใจถึงกระบวนการดังกล่าวได้อย่างครบ ถ้วนก็จะเป็นประโยชน์ต่อการแพทย์เป็นอย่างมาก เพราะอาจนำไปสู่การป้องกันโรคหรือความผิด ปกติหลายชนิดที่เป็นมาแต่กำเนิด ตลอดจนเป็น แนวทางในการรักษาโรคอีกจำนวนมากที่ในปัจจุบัน ยังไม่สามารถรักษาให้หายได้ โดยปัจจัยสำคัญที่ เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนสภาพเซลล์ที่นักวิทยาศาสตร์ ให้ความสนใจคือ ยีนและสารควบคุมการเจริญเติบโต ซึ่งในส่วนของสารควบคุมการเจริญเติบโตนั้น นักวิทยาศาสตร์ได้พบว่ามียีนบทบาทในการควบคุมการ เปลี่ยนสภาพเซลล์ต้นตอของคนไปเป็นเซลล์ใน เนื้อเยื่อทั้งสามชั้นของร่างกาย โดย Schuldiner et al. (2000) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของสารควบคุม การเจริญเติบโต จำนวน 8 ชนิดต่อการเปลี่ยนสภาพ ของเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนของคน และพบว่า แอคติวิน เอ (activin-A) และทรานสฟอร์มมิง โกรท แฟกเตอร์ (transforming growth factors- β 1, TGF- β 1) ทำหน้าที่กระตุ้นการเจริญของเซลล์ต้นตอไป เป็นเนื้อเยื่อชั้นกลางเพียงอย่างเดียว ในขณะที่ กรด เรติโนอิก (retinoic acid), เอพิเดอมอล โกรท แฟกเตอร์ (epidermal growth factor, EGF), โบน มอร์โฟจีนิก โปรตีน-4 (bone morphogenic protein-4, BMP-4) และ เบสิก ไฟโบรบลาสต์ โกรท แฟกเตอร์ (basic fibroblast growth factor, bFGF) ทำหน้าที่กระตุ้นการ เจริญของเซลล์ต้นตอไปเป็นเนื้อเยื่อชั้นกลางและ เนื้อเยื่อชั้นนอก ส่วน บีตา เนิร์ฟ โกรท แฟกเตอร์ (beta-nerve growth factor, β -NGF) และเฮปาทocyte

โกรท แฟกเตอร์ (hepatocyte growth factor ,HGF) จะกระตุ้นให้เปลี่ยนสภาพไปเป็นเซลล์ในเนื้อเยื่อทั้งสามชั้น และปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์สามารถควบคุมให้เซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนเปลี่ยนสภาพไปเป็นเซลล์ต่างๆ ได้หลายชนิด ได้แก่ เซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ (Klug et al., 1996; Kehat et al., 2001) บีตาเซลล์ (β -cells) ที่ทำหน้าที่สร้างฮอร์โมนอินซูลินในตับอ่อน (Soria et al., 2000) เป็นต้น

การศึกษาการเปลี่ยนสภาพเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนของสัตว์ไปเป็นเซลล์ประสาท

นอกจากความสำเร็จในการควบคุมการเปลี่ยนสภาพของเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนไปเป็นเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ เซลล์เม็ดเลือด และบีตาเซลล์ในตับอ่อนแล้ว นักวิทยาศาสตร์ยังได้ทำการศึกษถึงการเปลี่ยนสภาพของเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนของสัตว์ชนิดต่างๆ ไปเป็นเซลล์ประสาทด้วย โดย Bain et al. (1996) ได้ทำการควบคุมให้เซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนของหนูถีบจักรเปลี่ยนสภาพไปเป็นเซลล์ประสาทด้วยการใช้กรดเรติโนอิก (retinoic acid) ซึ่งเป็นสารอนุพันธ์ของวิตามินเอเป็นสารควบคุมการเจริญเติบโต และเซลล์ประสาทที่ได้ก็มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับเซลล์ประสาทโดยทั่วไป คือ เกิดกระแสประสาทที่เรียกว่า แอคชัน โปเทนเชียล (action potential) มีเตโตรโดทอกซิน-เซ่นซิทีฟ โซเดียม แชนเนล (tetrodo toxin-sensitive sodium channels) รวมทั้ง โวลเทจ-เกต โพแทสเซียม แชนเนล (voltage-gate potassium channels) และแคลเซียม แชนเนล (calcium channels) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของเยื่อหุ้มเซลล์ประสาท ด้วย จากผลที่เกิดขึ้นแสดงว่ากรดเรติโนอิกสามารถกระตุ้นยีนที่ควบคุมให้เซลล์ต้นตอเปลี่ยนสภาพไปเป็นเซลล์ประสาทได้และในขณะเดียวกันยังสามารถยับยั้งไม่ให้เซลล์ต้นตอเหล่านี้มีการเปลี่ยนสภาพไป

เป็นเซลล์ชนิดอื่นๆ และในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน Deacon et al.(1998) ได้ศึกษาการเปลี่ยนสภาพของเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนของหนูถีบจักร โดยการเปลี่ยนถ่ายเซลล์ต้นตอที่แยกได้จากตัวอ่อนระยะบลาสโตซิสต์ของหนูถีบจักร โดยใช้กรดเรติโนอิกเป็นสารกระตุ้นการเจริญโดยเปลี่ยนถ่ายเข้าไปยังสัตว์ทดลอง 3 กลุ่ม คือ สมอของหนูที่เจริญเติบโตเต็มที่แล้ว หนูแรทที่มีวิธีการที่สมอและที่เปลือกหุ้มไต (renal capsule) ของหนูถีบจักร ผลการทดลองปรากฏว่าเซลล์เหล่านั้นมีการเปลี่ยนสภาพไปเป็นเซลล์ที่มีรูปร่างคล้ายเซลล์ประสาท และแสดงคุณสมบัติต่างๆ ที่พบได้ในเซลล์ในระบบประสาท เช่น มีปฏิกิริยาทางภูมิคุ้มกันต่อนิวโรฟิลาเมนต์ (immunoreactivity for neurofilament) มีเอนไซม์อีโนเลสที่จำเพาะของเซลล์ประสาท (neuron-specific enolase) มีเอนไซม์ไทโรซิน ไฮดรอกซีเลส (tyrosine hydroxylase, TH) มี 5-ไฮดรอกซีทริปตามีน (5-hydroxytryptamine, 5-HT) และมีปฏิกิริยาทางภูมิคุ้มกันต่อโปรตีนในเซลล์คำจุนระบบประสาท (cell immunoreactive for glial fibrillary acidic protein) การพบสารเหล่านี้ในเซลล์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าเซลล์ต้นตอมีการเปลี่ยนสภาพไปเป็นเซลล์ประสาทชนิด dopaminergic และ serotonergic neurons ได้ และเมื่อเปลี่ยนถ่ายไปยังสมอปรากฏว่าสามารถเปลี่ยนสภาพไปเป็นเซลล์ประสาทได้เช่นกัน Brustle et al. (1999) ได้ทดลองทำการควบคุมการเปลี่ยนสภาพของเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนให้เป็น glial precursor cells ที่สามารถเจริญไปเป็นเซลล์โอลิโกเดนโดรไซต์และเซลล์แอสโตรไซต์ หลังจากนั้นได้เปลี่ยนถ่ายเซลล์เหล่านั้นเข้าไปยังบริเวณไขสันหลังของหนูที่มีความผิดปกติอันเนื่องมาจากเซลล์โอลิโกเดนโดรเกลียไม่สามารถสร้างเยื่อไมอีลินได้ ซึ่งเป็นตัวอย่างที่คล้ายกับโรคที่เกิดขึ้นในคนที่เรียก Pelizaeus-Merzbacher disease ผลการทดลองปรากฏว่าเซลล์ที่เปลี่ยนถ่ายเข้าไปสามารถเชื่อมต่อกันได้กับเซลล์ในเนื้อเยื่อประสาทของหนู

ตัวรับและมีการสร้างเยื่อไมอีลินขึ้นในปลายประสาทสั่งการของเซลล์ประสาทในสมองและไขสันหลัง นอกจากนั้น Lui et al. (2000) ได้ศึกษาการเปลี่ยนสภาพของเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนของหนูถีบจักรไปเป็นเซลล์โอลิโกเดนโดรไซต์ (oligodendrocyte) ซึ่งเป็นเซลล์ค้ำจุน (supporting cells) ในระบบประสาทส่วนกลางโดยใช้กรดเรตินอิกเป็นสารกระตุ้นการเจริญเช่นเดียวกัน ผลการทดลองปรากฏว่าเซลล์โอลิโกเดนโดรไซต์สามารถสร้างเยื่อไมอีลินได้ขณะที่อยู่ในจานเพาะเลี้ยงเชื้อและเมื่อทำการเปลี่ยนถ่ายเซลล์เหล่านี้เข้าไปในไขสันหลังของหนูถีบจักรที่ปลายประสาทถูกทำลายเยื่อไมอีลินออกไปแล้ว ผลการทดลองปรากฏว่าเซลล์โอลิโกเดนโดรไซต์ที่เปลี่ยนถ่ายเข้าไปใหม่สามารถแบ่งตัวเพิ่มจำนวนและสร้างเยื่อไมอีลินให้กับเซลล์ประสาทในไขสันหลังได้ Bjorklund et al. (2002) ได้ทำการทดลองเปลี่ยนถ่ายเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนที่มีการเปลี่ยนสภาพไปบ้างแล้วจาก เอ็มบริอยบอดีส์ (embryoid bodies) เข้าไปยังสมองของหนูที่มีความผิดปกติคล้ายโรคพาร์กินสันในคน ผลการทดลองปรากฏว่าจากหนูแรททั้งหมด 25 ตัวที่ได้รับการเปลี่ยนถ่ายเซลล์มี 56% ที่พบว่าการเจริญของเซลล์ประสาทชนิด dopaminergic neurons ในขณะที่ยังมีชีวิตจากผลของเทอร่าโตมา ส่วนอีก 24% พบว่าเซลล์ที่เปลี่ยนถ่ายเข้าไปไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ นอกจากการทดลองในหนูแล้ว Mizuseki et al. (2003) ประสบความสำเร็จในการศึกษาการเปลี่ยนสภาพของเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนของไพรเมตไปเป็นนิวรัล ครีสต์ เซลล์ (neural crest cells) และฟลอร์เพลท เซลล์ (floor plate cells) เช่น เซลล์ประสาทสั่งการ (motor neurons) ของนิวรัลทิวบ์ และในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน Calhoun et al. (2003) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนสภาพของเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนของลิงวอก ไปเป็นเซลล์ในระยะเริ่มต้นของเซลล์ประสาท ที่เรียกว่า นิวรัล โปรเจนิเตอร์

เซลล์ และเซลล์ประสาท โดยการเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ MEDII ผลปรากฏว่า เซลล์ประสาทที่ได้มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับเซลล์ประสาททั่วไป โดยพบว่ามี โปรตีนมูซาชิ (Mushashi) และโปรตีนเนสติน ซึ่งเป็นโปรตีนที่พบในเซลล์ประสาท รวมทั้งมีคุณสมบัติสรีรวิทยาทางไฟฟ้า (electrophysiology) ของเซลล์ประสาทด้วย

การศึกษาการเปลี่ยนสภาพของเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนของคนไปเป็นเซลล์ประสาท

นอกจากความพยายามในการศึกษาและควบคุมการเปลี่ยนสภาพของเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนไปเป็นเซลล์ประสาทในสัตว์ทดลองแล้ว นักวิทยาศาสตร์ ยังได้ทำการศึกษาเพื่อควบคุมการเปลี่ยนสภาพของเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนของคนไปเป็นเซลล์ประสาทด้วย โดย Zhang et al. (2001) ได้ศึกษาการเปลี่ยนสภาพของเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนของคนโดยใช้ไฟโบรบลาสต์ โกรท แฟกเตอร์ (fibroblast growth factor-2, FGF-2) เป็นสารควบคุมการเจริญเติบโต ในช่วงแรกเซลล์ต้นตอมีการเจริญไปเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกับท่อ ที่เรียกว่า นิวรัลทิวบ์ (neural tube) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เกิดขึ้นในระยะแรกของการเจริญของระบบประสาทและท่อนี้จะเจริญไปเป็นสมองและไขสันหลังต่อไป และเมื่อแยกนำเอาเซลล์จากโครงสร้างดังกล่าวนี้ไปทำการเพาะเลี้ยงต่อโดยการงด FGF-2 ซึ่งทำให้เซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนของคนมีการเปลี่ยนสภาพไปเป็นเซลล์ประสาท เซลล์ค้ำจุนประสาทชนิดแอสโตรไซต์ และ เซลล์โอลิโกเดนโดรไซต์ นอกจากนั้นแล้วยังได้ทำการเปลี่ยนถ่ายเซลล์ต้นตอไปยังสมองของหนูถีบจักร ปรากฏว่าเซลล์ต้นตอเหล่านี้สามารถเปลี่ยนสภาพไปเป็นเซลล์ประสาท และ เซลล์แอสโตรไซต์ได้เช่นเดียวกัน Reubinoff et al. (2001)

ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนสภาพของนิวรัล โปรเจนิเตอร์ เซลล์ (neural progenitor cells) ที่ได้จากเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนของคนไปเป็นเซลล์ในระบบประสาท ได้แก่ เซลล์ประสาท เซลล์แอสโตรไซต์ และเซลล์โอลิโกเดนโดรไซต์ และเมื่อทดลองนำเอานิวรัล โปรเจนิเตอร์ เซลล์ ของคนเปลี่ยนถ่ายเข้าไปในโพรงสมองของลูกหนูถีบจักรที่เกิดใหม่ ผลปรากฏว่าเซลล์ที่เปลี่ยนถ่ายเข้าไปสามารถเชื่อมต่อกับกับสมองของหนูเป็นอย่างดี และสามารถเปลี่ยนสภาพไปเป็นเซลล์ในระบบประสาททั้งสามชนิดเหมือนที่เกิดขึ้นในหลอดทดลอง Carpenter et al. (2001) ได้ทำการเพาะเลี้ยงเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนของคนเป็นระยะเวลา 6 เดือน ซึ่งในระยะต่อมาได้มีการเปลี่ยนสภาพไปเป็นเซลล์ซึ่งเมื่อทำการตรวจสอบพบว่าให้ผลบวกต่อโปรตีนเนสติน(nestin) พอลิแซ็กคาไรด์ เดค นิวรัล เซลล์ แอดฮีชัน โมเลกุล (polysialylated neural cell adhesion molecule, PS-NCAM) และ A2B5 ที่พบในเซลล์ประสาท และเมื่อปล่อยให้เจริญเติบโตเต็มที่เซลล์เหล่านี้ได้แสดงลักษณะของแอนติเจนที่จำเพาะของเซลล์ประสาท เช่น MAP-2 ซิแนปโตไฟซิน (synaptophysin) และสารสื่อประสาทชนิดอื่นๆ เมื่อวิเคราะห์สรีรวิทยาทางไฟฟ้าพบว่าเซลล์เมมเบรนประกอบด้วยโวลเทจ ดีเพนเดนท แชนเนล (voltage-dependent channels) และสามารถเกิดแอกซอน โฟเทนเซียลด้วย Schulz et al.(2003) ได้ศึกษาการเปลี่ยนสภาพของเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนของคน โดยเฉพาะเลี้ยงเซลล์ต้นตอเหล่านี้ในสภาพที่รวมกลุ่มกัน เรียกว่า เอ็มบริอยบอดี(embryoid body) ในอาหารเลี้ยงเชื้อ MedII ซึ่งภายหลังการเพาะเลี้ยงประมาณ 7-10 วัน จะพบว่านิวรัล โปรเจนิเตอร์ เซลล์ มีการจัดเรียงกันอยู่เป็นกลุ่มที่เรียกว่า รอสเส็ต ฟอร์มेशन (rossetes formation) ซึ่งช่องว่างตรงกลางถูกล้อมรอบด้วยกลุ่มเซลล์

หนา 4-8 ชั้นของเซลล์ และเมื่อย้อมสีด้วยวิธีอิมมูโนสแตนนิง พบว่าในเซลล์เหล่านี้มีโปรตีนเนสติน นอกจากนั้นยังพบว่ามี MAP-2, neurofilament H และเอนไซม์ ไทโรซีน ไฮดรอกซิเลส ซึ่งคล้ายกับที่พบในเซลล์ประสาทที่ทำหน้าที่สารโคปามีนในสมองบริเวณสับสแทนเทีย ในกรา

สรุป

เป้าหมายในการที่จะนำเอาเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนมาใช้เป็นแหล่งในการสร้างเซลล์ประสาทเพื่อนำไปใช้ในการรักษาโรคในระบบประสาทที่สำคัญๆ เช่น โรคสเคลอโรซิส (sclerosis) โรคพาร์กินสัน โรคอัลไซเมอร์ ฯลฯ ด้วยวิธีการเปลี่ยนถ่ายเซลล์ประสาทมีความเป็นไปได้มากขึ้นภายหลังจากที่นักวิทยาศาสตร์หลายกลุ่มสามารถควบคุมการเปลี่ยนสภาพของเซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนทั้งในสัตว์และในมนุษย์ไปเป็นเซลล์ประสาทและเซลล์ก้ำจุนในระบบประสาทได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาเกี่ยวกับเซลล์ประสาทที่ทำหน้าที่สร้างสารสื่อประสาทโคปามีนที่มีความเกี่ยวข้องกับการเกิดโรคพาร์กินสัน อย่างไรก็ตามอุปสรรคที่สำคัญยิ่งของการนำเอาเทคนิคดังกล่าวนี้มาใช้ในทางการแพทย์คือในปัจจุบันยังไม่มีนักวิทยาศาสตร์ทีมใดสามารถควบคุมให้เซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนเปลี่ยนสภาพเป็นเซลล์จำเพาะชนิดใดชนิดหนึ่งได้ทั้งหมด ซึ่งรวมถึงการเปลี่ยนสภาพไปเป็นเซลล์ประสาทด้วย ดังนั้นหากนำไปเปลี่ยนถ่ายเข้าไปยังสมองหรือไขสันหลังของผู้ป่วยอาจทำให้เกิดเนื้องอกชนิดเทอราโตมาซึ่งคล้ายกับที่เกิดขึ้นในหนูทดลอง และสามารถทำให้ผู้ป่วยเสียชีวิตได้ในที่สุด ดังนั้นการศึกษาเพื่อที่จะหาวิธีการควบคุมให้เซลล์ต้นตอจากตัวอ่อนเปลี่ยนสภาพไปเป็นเซลล์ประสาทได้ทั้งหมดจึงเป็นเป้าหมายที่สำคัญที่สุดที่จะต้องมีการศึกษาค้นคว้ากันต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- Bain, G., Kitchens, D., Yao, M., Huettner, J.E. and Gottlieb, D.I. (1995). Embryonic stem cells express neuronal properties in vitro. *Developmental Biology*. 168(2):342-357.
- Bjorklund, L.M., Sanchez-Pernaute, R., Chung, S., Anderson, T., Chen, I.Y.C., McNaught, K.S.P., Brownell, A., Jenkins, B.G., Wahlestedt, C., Kim, K. and Isacson, O. (2002). Embryonic stem cells develop into functional dopaminergic neurons after transplantation in a Parkinson rat model. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 99(4):2344-2349.
- Brustle, O., Jones, K.N., Learish, R.D., Karram, K., Choudhary, K., Wiestler, O.D. (1999). Embryonic stem cell-derived glial precursors: a source of myelinating transplants. *Science*. 285:754-756.
- Calhoun, J.D., Lambert, N.A., Mitalipova, M.M., Noggle, S.A., Lyons, I., Condie, B.G. and Stice, S.L. (2003). Differentiation of embryonic stem cells to neural progenitors and neurons. *Biomedical and Biophysical Research Communications*. 306(1):191-197.
- Carpenter, M.K., Inokuma, M.S., Denham, J., Mujtaba, T., Chiu, C. and Rao, M.S. (2001). Enrichment of neurons and precursors from human embryonic stem cells. *Experimental Neurology*. 17(22):383-397.
- Deacon, T., Dinsmore, J., Costantini, L.C., Ratliff, J. and Isacson, O. (1998). Blastula-stage stem cells can differentiate into dopaminergic and serotonergic neurons after transplantation. *Experimental Neurology*. 149(1):28-41.
- Doetschman, T., Williams, P. and Maeda, N. (1988). Establishment of hamster blastocyst-derived embryonic stem (ES) cells. *Developmental Biology*. 127:224.
- Evans, M.J. and Kaufman, M.H. (1981). Establishment in culture of pluripotential cells from mouse embryos. *Nature*. 292:154-156.
- Giles, J.R., Yang, X., Mark, W. and Foote, R.H. (1993). Pluripotency of cultured rabbit inner cell mass cells detected by isozyme analysis and eye pigmentation of fetuses following injection into blastocysts or morulae. *Molecular Reproductive Development*. 36:130-138.
- Graves, K.H. and Moreadith, R.W. (1993). Derivation and characterization of putative pluripotential embryonic stem cells from preimplantation rabbit embryos. *Molecular Reproductive Development*. 36:424-433.
- Iannaccone, P.M., Taborn, G.U., Garton, R.L., Caplice, M.D. and Brenin, D.R. (1994). Pluripotent embryonic stem cells from the rat are capable of producing chimeras. *Developmental Biology*. 163:288-292.
- Kehat, I., Kenyagin-Karsenti, D., Snir, M., Segev, H., Amit, M. and Gepstein, A. (2001). Human embryonic stem cells can differentiate into myocytes with structural and functional properties of cardiomyocytes. *Journal of Clinical Investigation*. 108:407-414.
- Klug, M.G., Soonpaa, M.H., Koh, G.Y. and Field, L.J. (1996). Genetically selected cardiomyocytes from differentiating embryonic stem cells from stable intercardiac grafts. *Journal of Clinical Investigation*. 98:216-224.

- Lui, S., Qu, Y., Stewart, T.J., Howard, M.J., Chakraborty, S., Holekamp, T.F. and McDonald, W. (2000). Embryonic stem cells differentiate into oligodendrocytes and myelinate in culture and after spinal cord transplantation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 97:6126-6131.
- Martin, G.R. (1981). Isolation of a pluripotent cell line from early mouse embryos cultured in medium conditioned by teratocarcinoma stem cells. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 78:7634-7638.
- Mizuseki, K., Sakamoto, T., Watanabe, K., Muguruma, K., Ikeya, M., Nishiyama, A., Arakawa, A., Suemori, H., Nakatsuji, N., Kawasaki, H., Murakami, F. and Sasai, Y. (2003). Generation of neural crest-derived peripheral neurons and floor plate cells from mouse and primate embryonic stem cells. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 100(10):5828-5833.
- Moore, K. L. and Persaud, T.V.N. (1993). *The Developing Human Clinically Oriented Embryology*. 5th ed. Philadelphia: W.B. Saunders Company.
- Notarianni, E., Galli, C., Laurie, S., Moore, R. M. and Evan, M. J. (1991). Derivation of pluripotent, embryonic cell lines from the pig and sheep. *J. Reprod. Fertil.* 43:255-260.
- Pedersen, R. A. (1999). Embryonic stem cell for medicine. *Scientific American*. 280:44-49
- Reubinoff, B.E., Itsykson, P., Turetsky, T., Pera, M.F., Reinhartz, E., Itzik, A. and Ben-Hur, T. (2001). Neural progenitors from human embryonic stem cells. *Nature Biotechnology*. 19:1134.
- Schuldiner, M., Yanuka, O., Itskovitz-Eldor, J., Melton, D.A. and Benvenisty, N. (2000). Effects of eight growth factors on the differentiation of cells derived from human embryonic stem cells. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 97:11307-11312.
- Schulz, T.C., Palmarini, G.M., Noggle, S.A., Weiler, D.A., Mitalipova, M.M. and Condie, B.G. (2003). Directed neuronal differentiation of human embryonic stem cells. *BioMed Central Neuroscience*. 4(1):27.
- Shamblott, M.J., Axelman, J., Wang, S., Bugg, E.M., Littlefield, J.W., Donovan, P.J., Blumental, P.D., Huggins, G.R. and Gearhart, J.D. (1998). Derivation of pluripotent stem cells from cultured human primordial germ cells. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 95:13726-13731.
- Sims, M. and First, N. L. (1994). Production of calves by transfer of nuclei from cultured inner cell mass cells. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 91:6143-6147.
- Soria, B., Roche, E., Berna, G., Leon-Quinto, T., Reig, J.A. and Martin, F. (2000). Insulin-secreting cells derived from embryonic stem cells normalize glycemia in streptozotocin-induced diabetic mice. *Diabetes*. 49:157-162.
- Thomson, J.A., Itskovitz-Eldor, J., Shapiro, S.S., Waknitz, M.A., Swiergiel, J.J., Marshall, V.S. and Jone, J.M. (1998). Embryonic stem cell lines derived from human blastocysts. *Science*. 282:1145-1147.
- Thomson, J. A., Kalishman, J., Golos, T. G., Durning, M., Harris, C. P. and Hearn, J. P.

- (1996). Pluripotent cell lines derived from Common Marmoset (*Callithrix jacchus*) blastocysts. *Biology of Reproduction*. 55:254-259.
- Thomson, J. A., Kalishman, J., Golos, T. G., Durning, M., Harris, C. P., Becker, A. R. and Hearn, J. P. (1995). Isolation of a primate embryonic stem cell line. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 92:7844-7848.
- Watt, M.F. and Hogan, B.L.M. (2000). Out of Eden: stem cells and their niches. *Science*. 287:1427-1430.
- Zhang, S.C., Werning, M., Duncan, I.D., Brustle, O. and Thomson, J.A. (2001). *In vitro* differentiation of transplantable neural precursors from human embryonic stem cells. *Nature Biotechnology*. 19(12):1117-1118.



การสั่นพ้องแม่เหล็กนิวเคลียส

วิวัฒน์ ยงค์¹

บทนำ

การสั่นพ้องแม่เหล็กนิวเคลียส (nuclear magnetic resonance, NMR) เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ได้มีการพัฒนามาหลายปี จนกระทั่งสามารถนำไปใช้ในการสร้างภาพของส่วนประกอบภายในร่างกายของสิ่งมีชีวิต เช่นมนุษย์ อีกทั้งยังนำไปใช้ในการวินิจฉัยโรคอีกด้วย ในปัจจุบันนี้โรงพยาบาลในบ้านเราได้นำเข้าเทคโนโลยีทางด้านนี้มาช่วยในการวินิจฉัยโรคมามากขึ้น แต่พื้นฐานความรู้และความเข้าใจในหลักการทำงานของเทคนิคการสั่นพ้องแม่เหล็กนิวเคลียสยังมีน้อยเนื้อหาของบทความนี้ จะเป็นการอธิบายถึงความรู้พื้นฐานของเทคนิคการสั่นพ้องแม่เหล็กนิวเคลียส

ทฤษฎีพื้นฐาน

การสั่นพ้องแม่เหล็กนิวเคลียส เป็นการศึกษาเกี่ยวกับนิวเคลียสของอะตอมที่เราสนใจ เมื่ออะตอมอยู่ในสนามแม่เหล็ก โดยธรรมชาติอนุภาคหรือประจุจะมีคุณสมบัติพื้นฐานอย่างหนึ่ง เรียกว่าสปิน (spin, I) สปินของอนุภาคจะเป็นจำนวนเท่าของ 1/2 และอาจมีเครื่องหมายเป็น บวก (+) หรือ ลบ (-) โปรตอน อิเล็กตรอน และนิวตรอนต่างก็มีสปินซึ่งมีค่าเท่ากับ 1/2 ในอะตอมของดิวทีเรียม (^2H) มีอิเล็กตรอนอิสระ 1 ตัว มีโปรตอนอิสระ 1 ตัว และมีนิวตรอนอิสระอีก 1 ตัว เพราะฉะนั้นจะมีสปินรวมทั้งหมดเท่ากับ 1/2 และมีสปินรวมในนิวเคลียสเท่ากับ 1 ถ้าสปิน I ในนิวเคลียสรวมกันเท่ากับ 0 ก็จะไม่เกิดอันตรกิริยาใดๆ กับสนามแม่เหล็ก ค่าสปินในนิวเคลียสของอะตอมต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าสปินทั้งหมดในนิวเคลียสของอะตอมต่างๆ

นิวเคลียส	โปรตอนอิสระ	นิวตรอนอิสระ	สปินทั้งหมด
^1H	1	0	1/2
^2H	1	1	1
^{31}P	0	1	1/2
^{23}Na	2	1	3/2
^{14}N	1	1	1
^{13}C	0	1	1/2
^{19}F	0	1	1/2

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

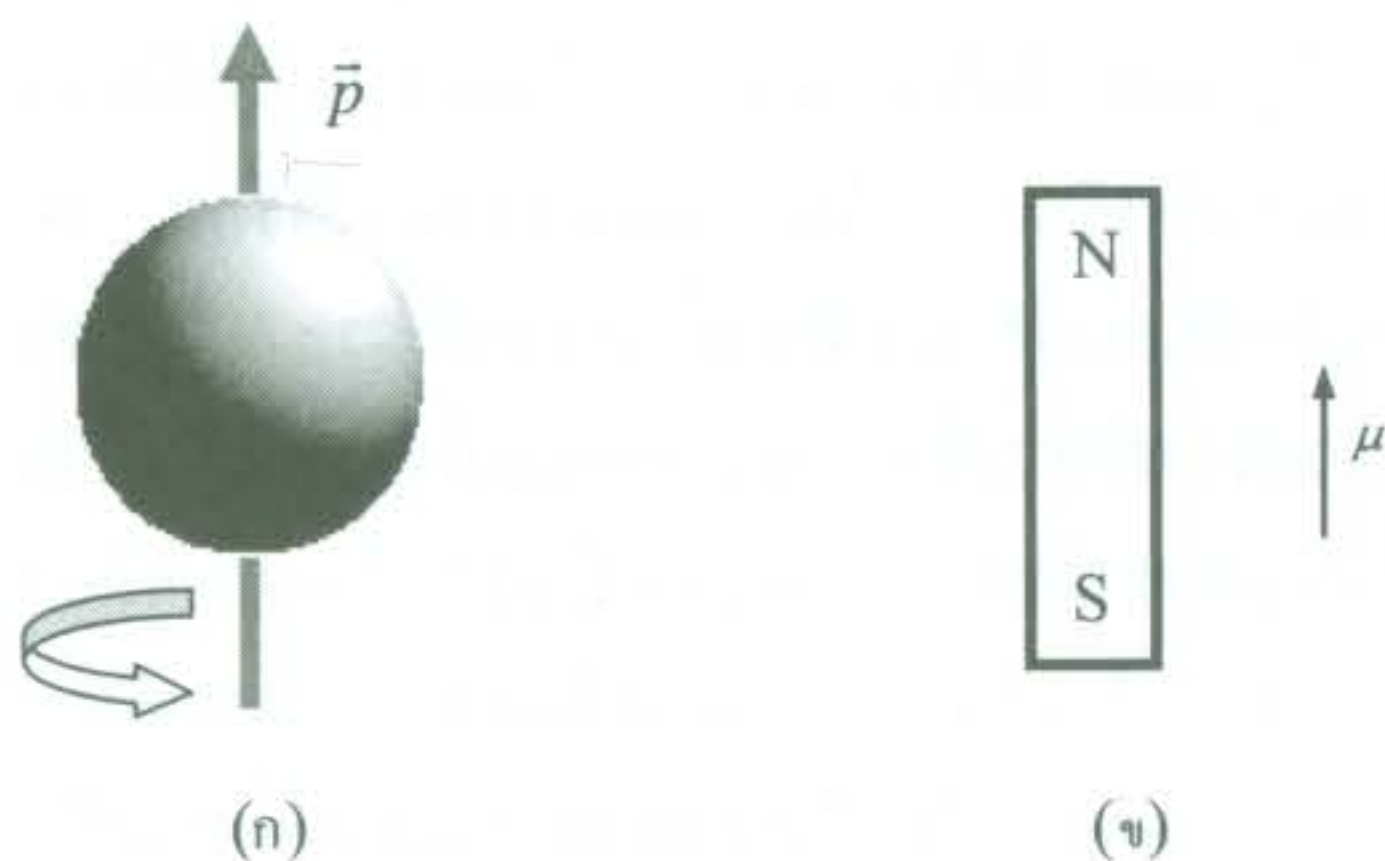
การที่นิวเคลียสมีสปินหมายความว่านิวเคลียสหมุนด้วยโมเมนต์เชิงมุม $\vec{p}$ ซึ่งเกี่ยวข้องกับสปิน $\vec{I}$ ดังนี้

$$\vec{p} = \hbar \vec{I} \quad (1)$$

เมื่อ $\hbar$ คือ $h/2\pi$ และ h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ เพราะนิวเคลียสมีประจุไฟฟ้าและหมุนด้วยโมเมนต์เชิงมุมค่าหนึ่ง จึงทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic dipole moment, $\vec{\mu}$) หรือ

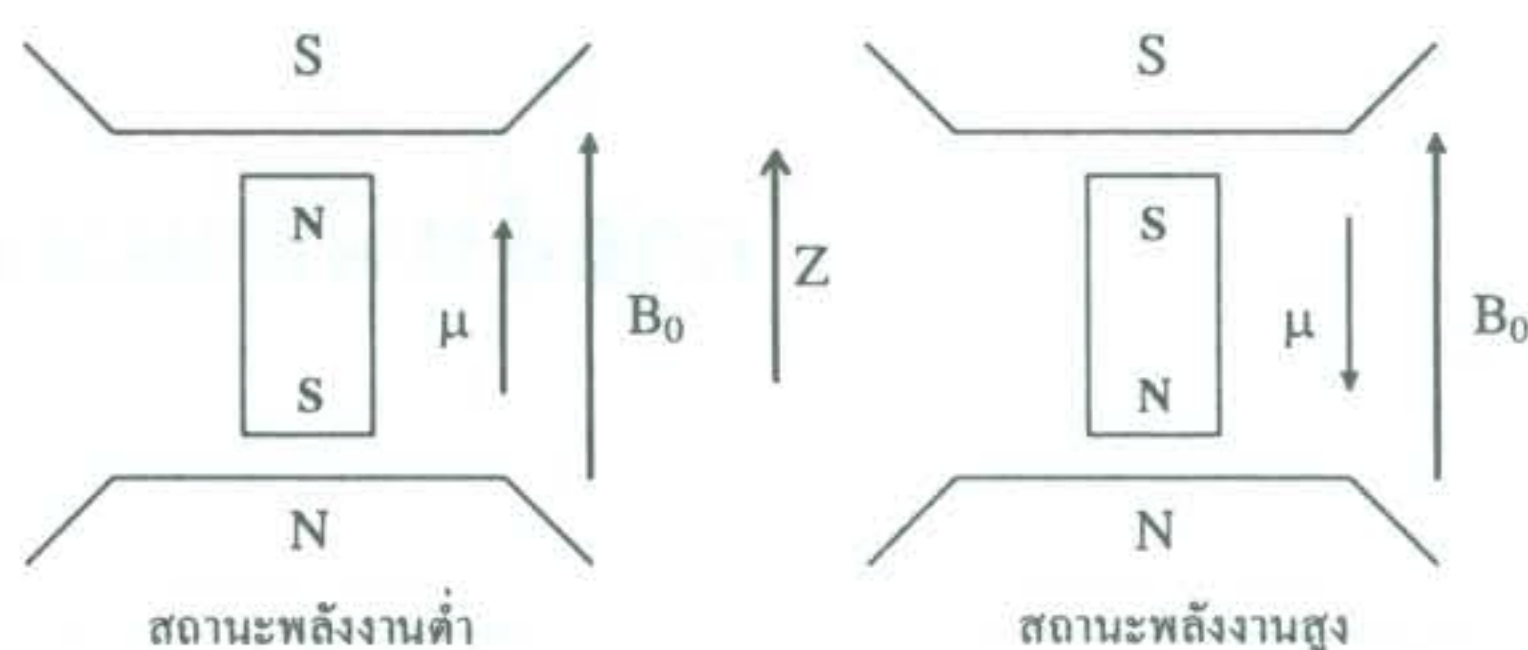
$$\vec{\mu} = \gamma \vec{p} \quad (2)$$

เมื่อ γ คือ gyromagnetic ratio ซึ่งเป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของนิวเคลียส



รูปที่ 1 (ก) ทรงกลมของโปรตอนที่กำลังหมุนรอบตัวเอง
(ข) สนามแม่เหล็กจากการหมุนรอบตัวเองเปรียบเสมือนกับมีแท่งแม่เหล็กที่มีโมเมนต์แม่เหล็ก

เมื่อเกิดไดโพลโมเมนต์แม่เหล็ก ก็เหมือนกับการที่มีแท่งแม่เหล็กขนาดเล็ก ซึ่งมีขั้วเหนือและขั้วใต้ และเมื่อวางในสนามแม่เหล็กจะเกิดอันตรกิริยากับสนามแม่เหล็ก โดยหมุนสายรอบแกนของสนามแม่เหล็ก $\vec{B}_0$ ที่ชี้ในแนวแกน z และองค์ประกอบในแนวแกน z ของ $\vec{\mu}$ จะอยู่ในแนวนานหรือตรงข้ามกับ $\vec{B}_0$ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การวางตัวของโมเมนต์แม่เหล็ก

พลังงานของอันตรกิริยาระหว่าง $\vec{\mu}$ กับ $\vec{B}$ เป็น $-\vec{\mu} \cdot \vec{B}$ ระดับพลังงานจากอันตรกิริยานี้เท่ากับ

$$\begin{aligned} E &= -\vec{\mu} \cdot \vec{B} \\ &= -\gamma \hbar \vec{I} \cdot \vec{B} \\ &= -\gamma \hbar I_z B_0 \end{aligned} \quad (3)$$

ในกรณีที่ $I = \frac{1}{2}$ จะได้ $I_z = \pm \frac{1}{2}$ ดังนั้นระดับพลังงานจะแบ่งออกเป็นสองระดับคือ

$$E_{+\frac{1}{2}} = -\frac{1}{2} \gamma \hbar B_0 \quad (4)$$

และ
$$E_{-\frac{1}{2}} = +\frac{1}{2} \gamma \hbar B_0 \quad (5)$$

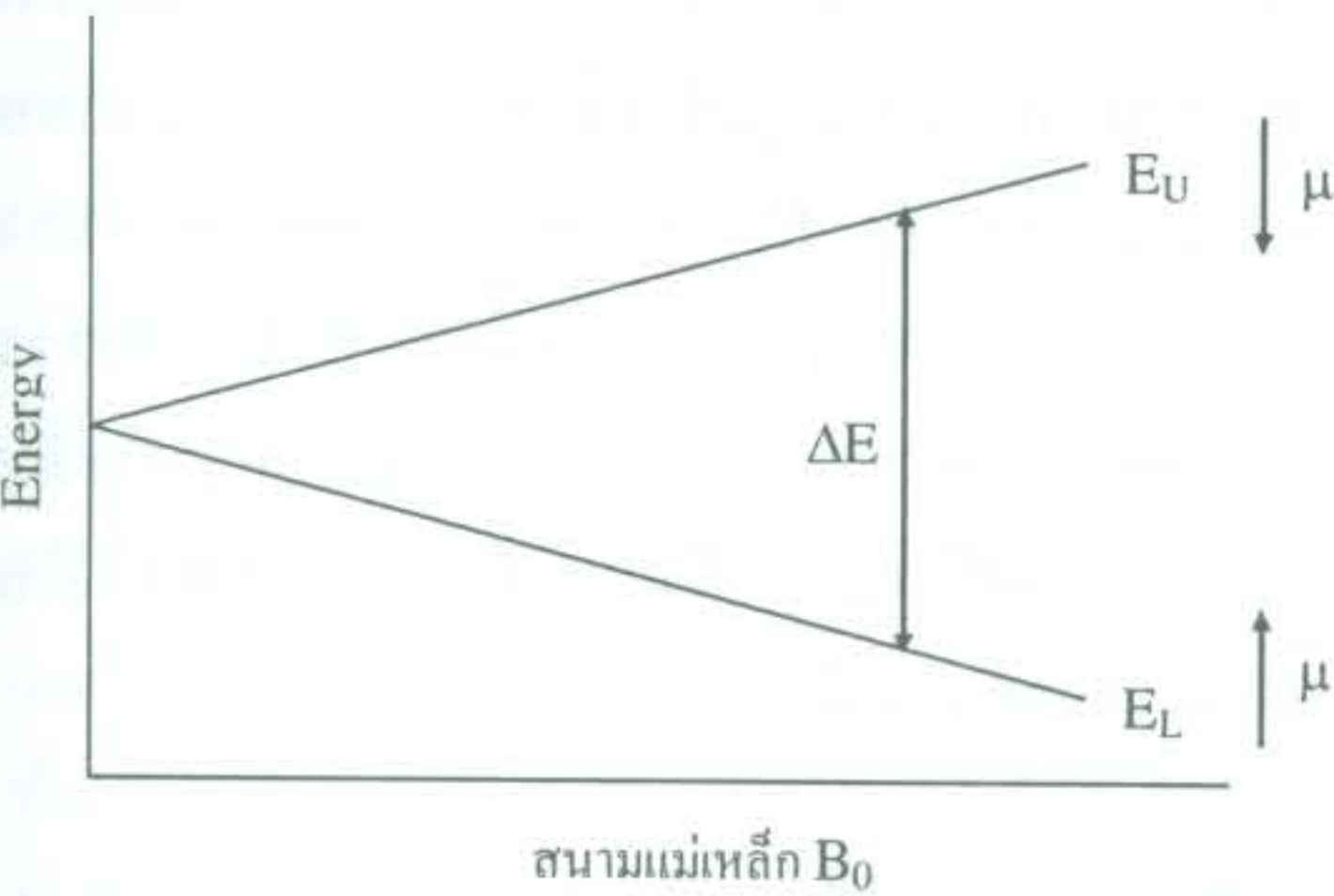
ดังนั้น $E_{-\frac{1}{2}} > E_{+\frac{1}{2}}$ ซึ่ง $E_{-\frac{1}{2}}$ คือสถานะพลังงานสูงและ $E_{+\frac{1}{2}}$ คือสถานะพลังงานต่ำ การวางตัวของแท่งแม่เหล็กโปรตอนจะสอดคล้องกับสถานะพลังงานทั้งสองสถานะ และความแตกต่างของพลังงาน (ΔE) ระหว่างสองสถานะเขียนได้เป็น

$$\Delta E = \gamma \hbar B_0 \quad (6)$$

การเปลี่ยนระดับพลังงานระหว่างสองสถานะนี้สามารถทำได้ด้วยการให้พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า (radiation) ที่ความถี่เชิงมุมที่ถูกต้องเข้าไป (Larmor frequency, ω_L) ดังนี้

$$\omega_L = \frac{\Delta E}{\hbar} = \gamma B_0 \quad (7)$$

ซึ่งเรียกว่า การสั่นพ้อง (resonance) สำหรับโปรตอนค่า $\gamma = 26.75 \times 10^7 \text{ rad s}^{-1} \text{ T}^{-1}$ ($\gamma/2\pi = 42.58 \text{ MHz/T}$) จะมีเพียงความถี่ที่ถูกต้องเท่านั้นที่จะทำให้นิวเคลียสเปลี่ยนจากสถานะหนึ่งไปสู่อีกสถานะหนึ่ง ดังรูปที่ 3 สมการที่ 7 หมายความว่า ความถี่ของการสั่นพ้องแปรผันตรงกับสนามแม่เหล็กหลักที่เราใช้ (B_0)



รูปที่ 3 แผนภาพแสดงระดับชั้นพลังงาน สำหรับ $|I| = \frac{1}{2}$

สำหรับนิวเคลียสของอะตอมชนิดต่างๆจะมีค่าความถี่ในการสั่นพ้องต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าความถี่ที่ใช้ในการสั่นพ้องนิวเคลียสของอะตอมต่างๆ

นิวเคลียส	สปินทั้งหมด	ความถี่(MHz/T)
¹ H	1/2	42.58
² H	1	6.54
³¹ P	1/2	17.25
²³ Na	3/2	11.27
¹⁴ N	1	3.08
¹³ C	1/2	10.71
¹⁹ F	1/2	40.08

โอกาสในการถูกกระตุ้นและการเปลี่ยนจากสถานะพลังงานต่ำขึ้นไปสู่สถานะพลังงานสูง (absorption) มีมากเท่าๆกับการเปลี่ยนจากสถานะ

พลังงานสูงลงมาสถานะพลังงานต่ำ (emission) ดังนั้น พลังงานในการดูดกลืนสุทธิก็ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของจำนวนประชากรของทั้งสองสถานะพลังงาน ถึงแม้ว่าระดับพลังงานต่ำจะมีจำนวนประชากรของโมเมนต์แม่เหล็กมากกว่าแต่การเปลี่ยนสถานะเนื่องจากความร้อนก็ทำให้ ที่ระดับพลังงานต่ำมีจำนวนประชากรมากกว่าที่ระดับพลังงานสูงเพียงเล็กน้อย จำนวนประชากรที่สภาวะสมดุลหาได้จากการกระจายของโบลท์มานน์ (Boltzman distribution)

ถ้า N_L คือจำนวนประชากรที่ระดับพลังงานต่ำ และ N_U คือจำนวนประชากรที่ระดับพลังงานสูง [Singh 2001] จะได้ว่า

$$\frac{N_L}{N_U} = \exp\left(\frac{\hbar\omega_L}{kT}\right)$$
(8)

เมื่อ k คือค่าคงที่ของโบลท์มานน์ และ T คืออุณหภูมิ (เคลวิน) ที่อุณหภูมิห้อง (300° K) และสนามแม่เหล็กขนาด 1.0 เทสลา ซึ่งความถี่สั่นพ้องของไฮโดรเจนเท่ากับ 42.58 เมกกะเฮิร์ต จะได้ว่า $\frac{\hbar\omega_L}{kT} = 6.8 \times 10^{-6}$ ซึ่งน้อยกว่า 1 มาก ดังนั้น สมการที่ 8 สามารถประมาณได้เป็น

$$\frac{N_L}{N_U} \approx 1 + \frac{\hbar\omega_L}{kT}$$
(9)

อัตราส่วนของสปินสุทธิที่เกิดขึ้นเมื่อวางตัวอยู่ในสนามแม่เหล็ก จะเท่ากับ

$$\frac{(N_L - N_U)}{N_U} \approx \frac{\hbar\omega_L}{kT} = \frac{\hbar\gamma B_0}{kT}$$
(10)

ซึ่งก็คือจำนวนสปินที่เราสามารถสังเกตได้จากการทดลองทาง NMR สำหรับโปรตอนที่อุณหภูมิห้อง (300°K) ที่อยู่ในสนาม $B_0 = 1.0 \text{ T}$ ค่าอัตราส่วนเท่ากับ 6.8×10^{-6} เป็นค่าที่น้อยมาก แสดงว่าเทคนิค NMR

มีความไวต่ำมาก ในการเพิ่มความไวให้สามารถตรวจได้ง่ายจะต้องลดอุณหภูมิ T (ในทางปฏิบัติทำไม่ได้ ไม่สามารถนำไปใช้กับผู้ป่วย) หรือว่าเพิ่มขนาดของสนามแม่เหล็ก B_0

ในร่างกายของสิ่งมีชีวิต มีอะตอมของธาตุหลายชนิดประกอบกัน ตารางที่ 3 แสดงอัตราส่วนของธาตุต่างๆที่เป็นส่วนประกอบอยู่ในร่างกาย ซึ่งบอกให้ทราบจำนวนหรือความไวในการตรวจหาธาตุนั้นด้วยเทคนิค NMR

ตารางที่ 3 อัตราส่วนของธาตุต่างๆที่เป็นส่วนประกอบของสิ่งมีชีวิต

ธาตุ	ปริมาณในสิ่งมีชีวิต* (%)
ไฮโดรเจน (H)	63
โซเดียม (Na)	0.041
ฟอสฟอรัส (P)	0.24
คาร์บอน (C)	9.4
ออกซิเจน (O)	26
แคลเซียม (Ca)	0.22
ไนโตรเจน (N)	1.5

*ที่มา: Foster (1984)

แมกเนไทเซชัน (Magnetization)

ในทางปฏิบัติ เราศึกษาแค่นิวเคลียสหนึ่งตัวหรือโมเมนต์แม่เหล็กเพียงหนึ่งอันไม่ได้ ที่เราศึกษาคือ ผลรวมของอนุภาคทั้งหมดในสารตัวอย่างที่เราสนใจ สิ่งที่เราศึกษาก็คือ บัลค์แมกเนไทเซชัน (bulk magnetisation) ซึ่งมีนิยามเป็นจำนวนโมเมนต์แม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร จาก

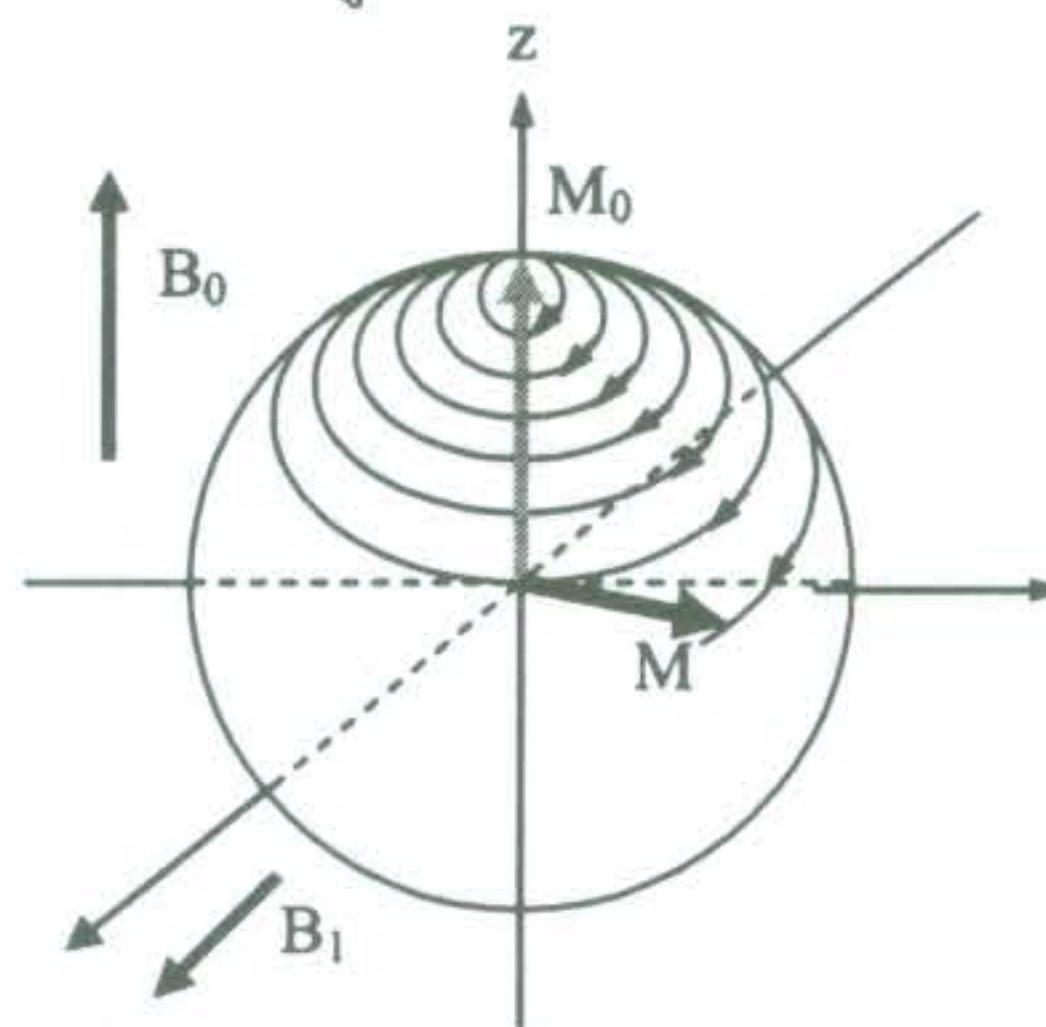
$$\vec{M} = N \langle \vec{\mu} \rangle \quad (11)$$

เมื่อ N คือจำนวนโมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และ $\langle \vec{\mu} \rangle$ เป็นค่าเฉลี่ยของโมเมนต์แม่เหล็ก นิวเคลียสทุกตัวที่สถานะสมดุลด้วยความถี่ ω_L รอบแกนของ $\vec{B}_0$ ซึ่งโมเมนต์แม่เหล็กแต่ละตัวจะพยายามล้อมรอบแกนของ $\vec{B}_0$ การรวมแบบเวกเตอร์ของโมเมนต์แม่เหล็กสำหรับสปีนจำนวนมากทำให้องค์ประกอบในแนวตั้งฉากกับสนาม ของโมเมนต์แม่เหล็กรวมกันเป็นศูนย์ $\vec{M}$ จึงไม่มีส่วนประกอบในแนวตั้งฉากกับ $\vec{B}_0$ ที่สถานะสมดุล ขนาดของแมกเนไทเซชัน $\vec{M}$ ที่สถานะสมดุลแปรผันโดยตรงกับผลต่างของจำนวนโมเมนต์แม่เหล็กระหว่างระดับพลังงานในหนึ่งหน่วยปริมาตรซึ่งได้ทำนายเอาไว้ในแบบจำลองควอนตัม

คลื่นความถี่วิทยุ

สัญญาณที่ตรวจจับได้จากการทดลอง NMR แปรผันโดยตรงกับค่าแมกเนไทเซชัน และในการที่จะตรวจจับสัญญาณได้ ต้องทำการกระตุ้นระบบให้ออกจากสถานะสมดุล โดยการให้สนามแม่เหล็กที่สอง ($\vec{B}_1$) เข้าไปในรูปของคลื่นวิทยุ (radio frequency, RF) ตั้งฉากกับ $\vec{B}_0$ และหมุนรอบ $\vec{B}_0$ ด้วยความถี่เชิงมุม ω_L ซึ่งเท่ากับความถี่ลามอร์ในสมการที่ 7

ถ้ามองในกรอบอ้างอิงที่อยู่นิ่ง สนามจาก $\vec{B}_1$ ทำให้ $\vec{M}$ เบี่ยงออกจาก $\vec{B}_0$ จึงออกมาเป็นรูปแบบเกลียว ดังรูปที่ 4

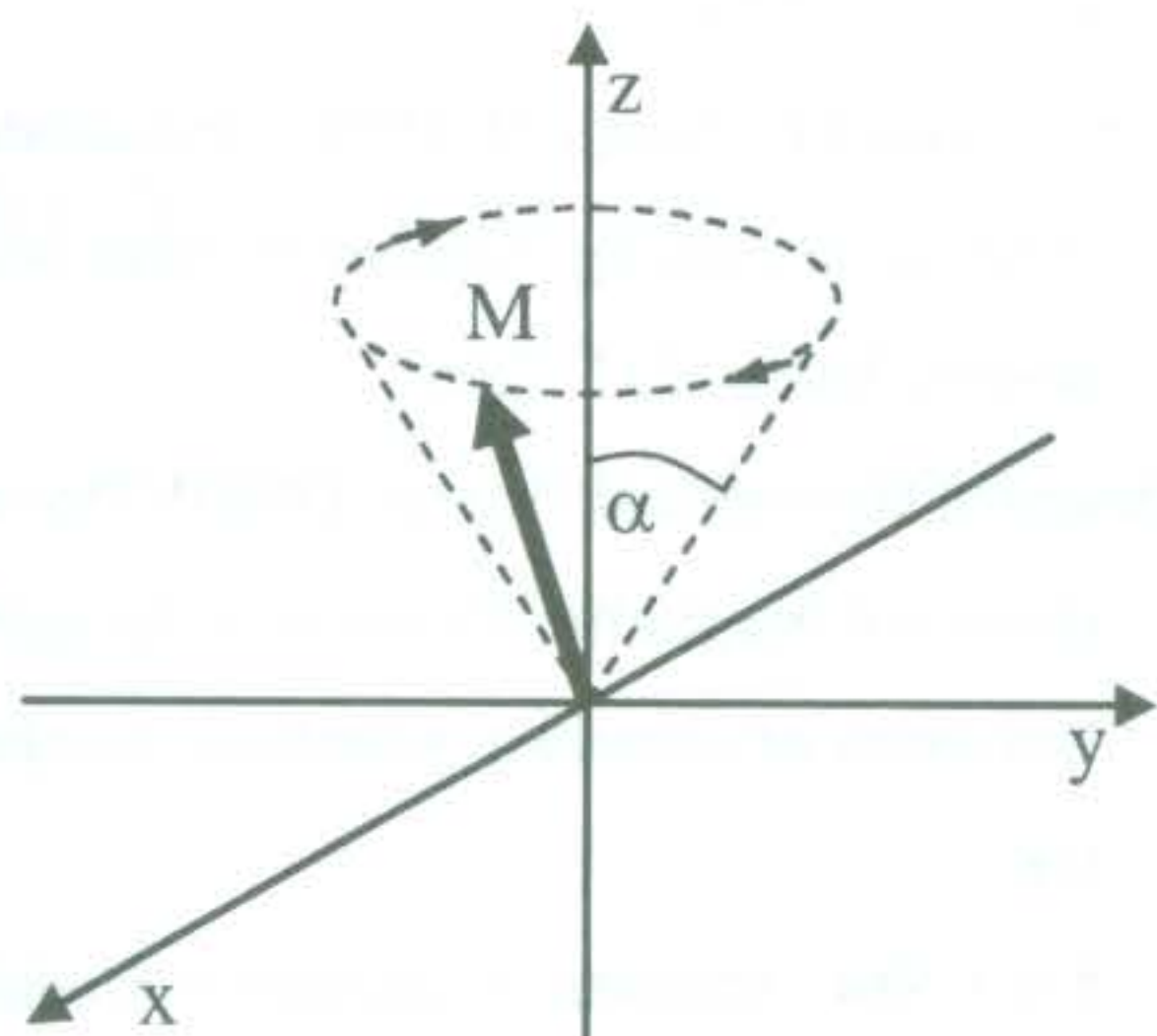


รูปที่ 4 เส้นการเดินทางของ $\vec{M}$ ในกรอบอ้างอิงที่อยู่นิ่ง

เมื่อหยุดการให้สนาม $\vec{B}_1$ แล้ว $\vec{M}$ ยังคงส่ายรอบ $\vec{B}_0$ ต่อ จึงมองเห็นเป็นรูปกรวยทำมุม α กับ $\vec{B}_0$ เรียกมุมนี้ว่า flip angle ดังในรูปที่ 5 และค่ามุมที่ได้จะขึ้นอยู่กับขนาดของสนาม $\vec{B}_1$ และระยะเวลาในการให้สนาม ซึ่งอาจเขียนได้ว่า

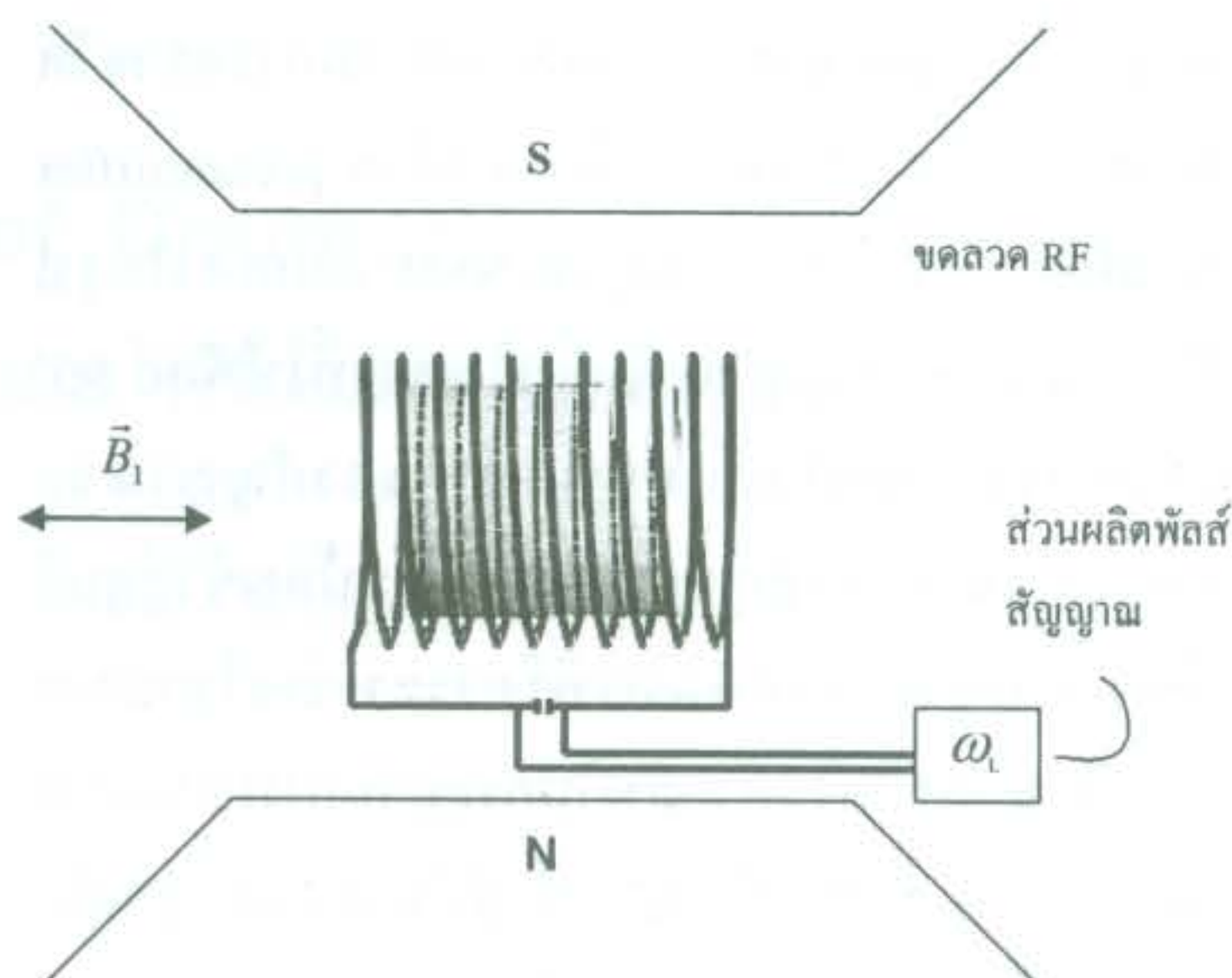
$$\alpha = \gamma B_1 t_p \quad (12)$$

เมื่อ t_p คือ $\vec{B}_1$ ระยะเวลาของพัลส์ ถ้าให้สนามที่ระยะเวลาหนึ่ง จะทำให้ $\vec{M}$ เบนมาจนทำมุมเท่ากับ 90° เราเรียกว่า พัลส์ 90° (90 degree pulse) $\vec{M}$ นอกจากนี้ยังสามารถเบน $\vec{M}$ ออกไปอีกจนทำมุมมีทิศทางตรงข้ามกับ $\vec{B}_0$ และเรียกพัลส์นี้ว่า พัลส์ 180° (180 degree pulse) หรือ พัลส์กลับทาง (inverse pulse) พัลส์ที่ส่งออกไปมีความถี่เท่ากับ $\omega_L/2\pi$ มีค่าอยู่ระหว่าง 1 MHz และ 500 MHz ขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ ซึ่งอยู่ในช่วงของคลื่นวิทยุ จึงเรียก $\vec{B}_1$ อีกชื่อหนึ่งว่า พัลส์ความถี่วิทยุ (radio frequency pulse)

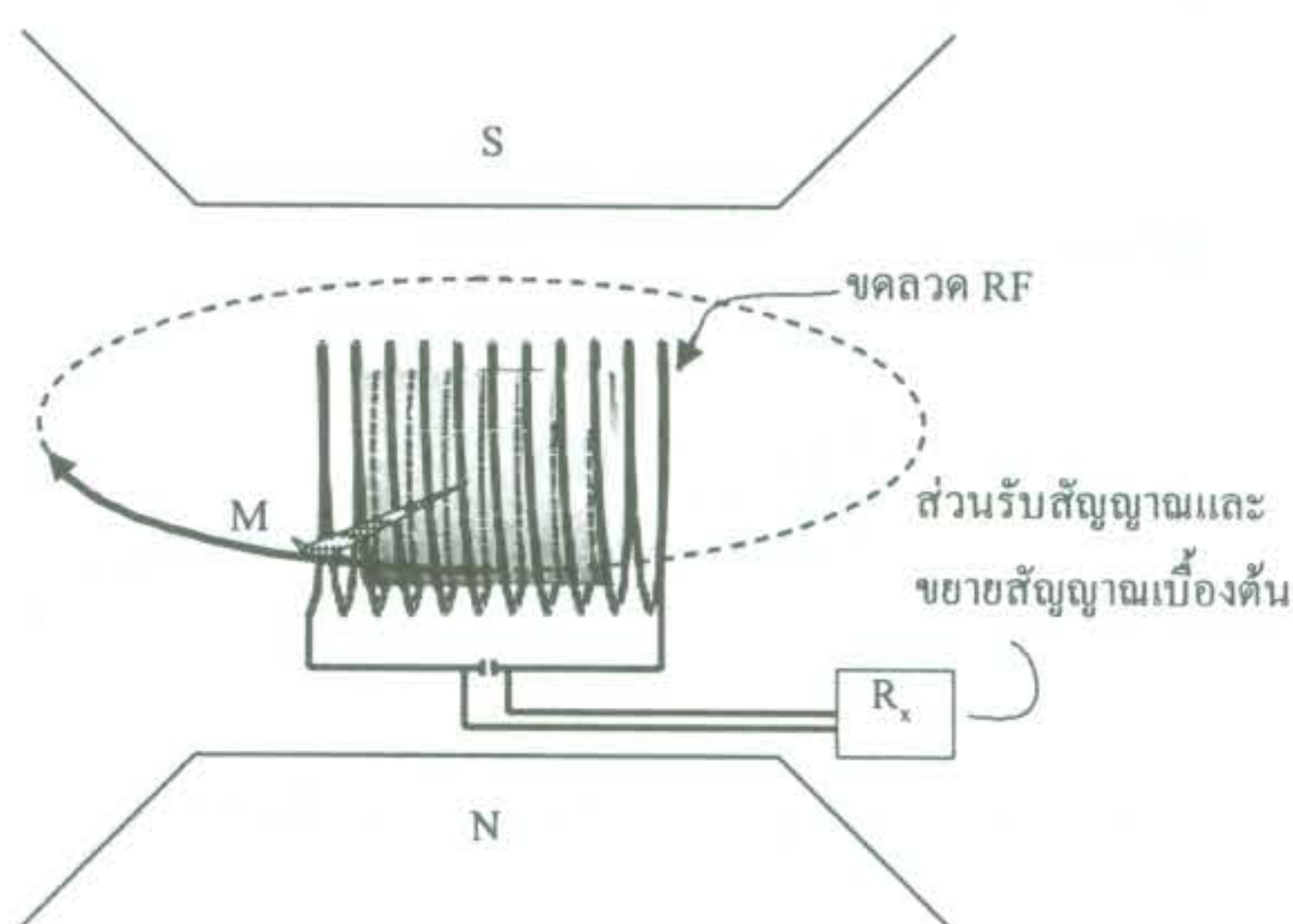


รูปที่ 5 $\vec{M}$ ส่ายรอบแกน $\vec{B}_0$ ทำมุม α มองเห็นเป็นรูปโคน

พัลส์ความถี่วิทยุ ($\vec{B}_1$) ที่ให้เข้าไปเพื่อไปกระตุ้นนิวเคลียสของอนุภาค ทำได้โดยการให้กระแสไฟฟ้าที่มีความถี่ ω_L เข้าไปในขดลวด และแกนของขดลวดวางตั้งฉากกับทิศทางของ $\vec{B}_0$ ขดลวดที่ใช้ต้องมีการออกแบบให้เกิดการสั้นฟ้องที่ความถี่ลามอร์ของนิวเคลียสที่ศึกษาด้วย โดยการนำตัวเก็บประจุมาต่อขนาน ส่งผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในขดลวดในทิศตั้งฉากกับ $\vec{B}_0$



รูปที่ 6 การเกิดสนามแม่เหล็ก ในขดลวดที่ต่ออยู่กับเครื่องให้สัญญาณความถี่วิทยุ

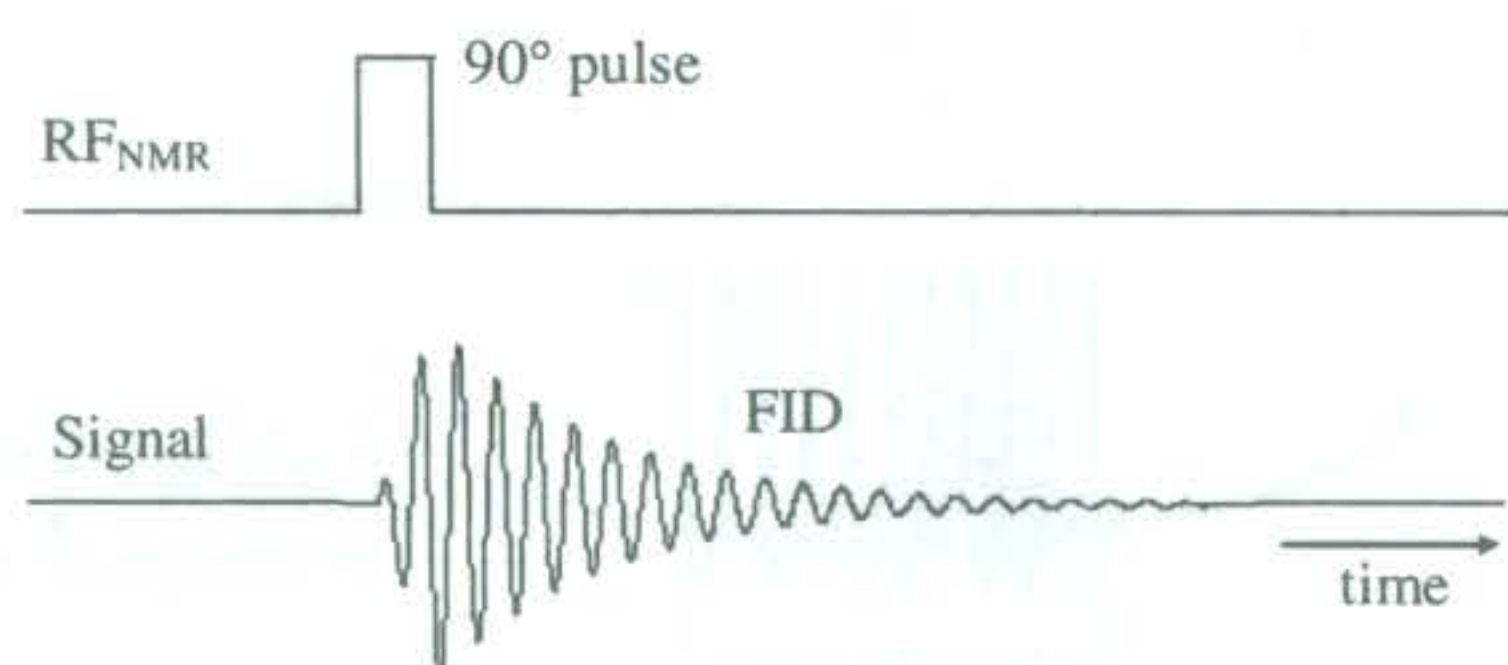


รูปที่ 7 การส่ายของโมเมนต์แม่เหล็ก $\vec{M}$ ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่ขดลวด และเกิดกระแสไฟฟ้าส่งไปยังเครื่องรับสัญญาณ NMR

สัญญาณที่ตรวจวัด

หลังจากที่ส่งสัญญาณพัลส์ 90° ไปยังขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก $\vec{B}_1$ แล้วหยุดส่งสัญญาณ แมกเนไตเซชันจะหมุนรอบสนามแม่เหล็กหลัก $\vec{B}_0$ สนามแม่เหล็กจากองค์ประกอบของแมกเนไตเซชันในแนวตั้งฉากกับ จะเหนี่ยวนำให้เกิดสัญญาณกระแสสลับขึ้นในขดลวดวิทยุ (ตามกฎของฟาราเดย์ [Grant & Phillips (2000)]) สัญญาณที่เกิดขึ้นนี้มีความถี่เท่ากับความถี่ลามอร์ของนิวเคลียสที่

ศึกษาเป็นสัญญาณที่มีขนาดเล็กมาก ในการตรวจวัดต้องทำการขยายสัญญาณเบื้องต้นด้วย preamplifier ก่อนที่จะเข้าเครื่องรับสัญญาณ NMR ดังแสดงในรูปที่ 7 ขนาดของสัญญาณเพิ่มขึ้นในช่วงที่ให้พัลส์ 90° แล้วหลังจากปิดพัลส์แทนที่ขนาดของสัญญาณจะคงที่ แต่ขนาดของสัญญาณลดลงทีละน้อยเข้าสู่ศูนย์เป็นผลเนื่องมาจากอันตรกิริยาระหว่างโมเมนต์แม่เหล็กของสปินในตัวอย่างในกระบวนการผ่อนคลาย (relaxation) ซึ่งทำให้ $\vec{M}$ เข้าสู่ตำแหน่งสมดุลเดิม ($\vec{M}_0$) ที่มีทิศขนานกับ $\vec{B}_0$ สัญญาณที่ค่อยๆ ลดลงหลังจากที่หยุดการกระตุ้นด้วย $\vec{B}_1$ นี้เรียกว่า free induction signal (FIS) หรือ free induction decay (FID) ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 สัญญาณ FID หลังจากการให้พัลส์ 90°

สัญญาณ FID ที่ตรวจวัดได้นี้จะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณต่างๆ ต่อไป เช่น การทำสเปกโทรสโกปี (magnetic resonance spectroscopy, MRS) ในทางเคมีสามารถนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารประกอบทางเคมีหรือการสร้างภาพการสั่นพ้องแม่เหล็กนิวเคลียส (magnetic resonance imaging, MRI) ที่ปัจจุบันนิยมใช้การตรวจวินิจฉัยโรคในทางการแพทย์

สรุป

การสั่นพ้องแม่เหล็กนิวเคลียสเป็นเทคนิคที่มีประโยชน์มาก มีพื้นฐานที่สำคัญมาจากการวางสิ่งที่ต้องการวัดหรือทดสอบไว้ในสนามแม่เหล็กและกระตุ้นด้วยความถี่วิทยุ แล้ววัดสัญญาณจากนิวเคลียสที่ถูกกระตุ้นปล่อยออกมา เพื่อทำการวิเคราะห์ผลในรูปแบบต่างๆ และได้มีการพัฒนามาใช้ในหลายๆ สาขา เช่นทางด้านเคมี ด้านการแพทย์ ซึ่งในปัจจุบันนี้เครื่องถ่ายภาพ MRI ใช้กันอย่างแพร่หลายตามโรงพยาบาลใหญ่ๆ และมีส่วนช่วยให้แพทย์วินิจฉัยโรคต่างๆ ได้ง่ายมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- วิจิตร เส็งหะพันธุ์, จันทรเพ็ญ ส.โทมัส, เอียน โทมัส. (2536). การออกแบบและสร้างระบบ NMR IMAGING ขนาดเล็ก. วารสารวิทยาศาสตร์สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย. 47(5):306-324.
- Cho Z.H., Jones J.P., Singh M. (1993). Foundation of Medical Imaging. Singapore: John Wiley & Sons, Inc. p. 237 - 246.
- Department of Bio-medical Physics. (2000). Physical Basis of Magnetic Resonance Imaging. University of Aberdeen, Aberdeen, Scotland, UK.
- Foster M.A. (1984). Magnetic Resonance in Medicine and Biology. New York: Pergamon Press.
- Grant I.S., Phillips, W.R. (2000). Electromagnetism. New York: John Wiley & Sons, Inc. p.218-221.
- Singh J. (2001). Semiconductor Devices: Basic Principles. New York: John Wiley & Sons, Inc. p.31-32.
- Young I.R. (2000). Methods in Biomedical Magnetic Resonance Imaging and Spectroscopy. London: John Wiley & Sons, Inc.



Biological Activities of Coumarins from *Lepisanthes rubiginosa* (Roxb.) Leenh.

Chavi Yenjai¹, Supawadee Daodee², Varima Wongpanich³ and Prasat Kittakoop⁴

Abstract

The roots of *Lepisanthes rubiginosa* (Roxb.) Leenh. are used as an antituberculous, antipyretic and sedative in Thai traditional medicine. The antituberculous activity of 7-hydroxy-6-methoxycoumarin (**I**) and 6,7-dimethoxy-8-hydroxycoumarin (**II**) isolated from the roots of this plant was evaluated against *Mycobacterium tuberculosis* and exhibited antimycobacterial activity with the minimum inhibitory concentration (MIC) of 200 µg/mL. These coumarins showed neither antiplasmodial nor antifungal activity. In addition, they exhibited non-cytotoxic against cancer cell lines, KB, BC and NCI-H187. The structures of these compounds were elucidated by the analyses of their spectral data, mainly by 1D and 2D NMR spectroscopy.

Introduction

Lepisanthes rubiginosa (Sapindaceae) is a 5-10 meter high tree which grows throughout Thailand. The roots of this plant have been used as traditional medicine for the treatment of tuberculosis, fever and sedation. Crude dichloromethane extract showed antimalarial activity against *Plasmodium falciparum* with EC₅₀ value of 4.7 µg/mL. According to literature search, dichloromethane extract of roots

of this plant has not been previously investigated. However, the isolation of methanolic fraction of the bark has been reported as rubiginoside and triterpenoid saponin (Adesanya et al., 1999).

Materials and Methods

Plant material

Roots of *L. rubiginosa* were collected from the campus of Khon Kaen University, Khon Kaen,

¹ Department of Chemistry, Faculty of Science, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002

² Department of Pharmaceutical Chemistry, Faculty of Pharmaceutical Sciences, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002

³ Department of Pharmaceutical Botany and Pharmacognosy, Faculty of Pharmaceutical Sciences, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002

⁴ National Center for Genetic Engineering and Biotechnology, NSTDA, 113 Paholyothin Road, Klong 1, Klong Luang, Pathumthani, 20120

Thailand. Plant specimen was identified by Dr. Varima Wongpanich, Department of Pharmacognosy and Botany, Faculty of Pharmaceutical Sciences, Khon Kaen University. A voucher specimen (CY 4301) is deposited in the herbarium of Department of Biology, Faculty of Science, Khon Kaen University.

Extraction and isolation

Air-dried roots of *L. rubiginosa* (5 kg) were ground and extracted successively with hexane (5 L x 2), CH_2Cl_2 (5 L x 2) and MeOH (5 L x 2) at room temperature. The filtered samples were combined, and the solvents were evaporated in vacuo to yield crude hexane (3 g) CH_2Cl_2 (10 g) and MeOH extracts (300 g). The CH_2Cl_2 extract was initially subjected to silica gel (200 g) column chromatography and eluted with increasing concentration of EtOAc in hexane followed by MeOH in EtOAc. Each fraction (100 mL) was monitored by TLC; fractions with similar TLC patterns were combined to yield 23 fractions (F_1 - F_{23}). Purification of fraction F_{12} was carried out on silica gel (100 g) eluting with the gradient system of hexane/EtOAc to give a white solid, stigmasterol (**III**) (Pouchert and Behnke, 1993a). Fraction F_{16} was rechromatographed on a silica gel column eluted with hexane and a gradient of EtOAc to yield 50 mg (0.001%) of 7-hydroxy-6-methoxycoumarin (**I**) (Pouchert and Behnke, 1993b). Fraction F_{17} was rechromatographed on a silica gel column eluted with hexane and a gradient of EtOAc to yield 33 mg (0.0007%) of 6,7-dimethoxy-8-hydroxycoumarin (**II**).

Bioassay

Antimycobacterial assay

The antimycobacterial activity was assessed against *Mycobacterium tuberculosis* H37Ra using the Microplate Alamar Blue Assay (MABA) (Collins and Franzblau, 1997). In our system, the standard drugs, isoniazid and kanamycin sulfate, were the reference compounds for the antimycobacterial assay.

Antiplasmodial assay

The parasite *Plasmodium falciparum* (K1, multidrug resistant strain) was cultured continuously according to the method of Trager and Jensen (1976). Quantitative assessment of *in vitro* antimalarial activity was determined by means of the microculture radioisotope technique based upon the method described by Desjardins et al. (1979). Effective concentration (EC_{50}) represents the concentration which causes 50% reduction in parasite growth as indicated by the *in vitro* uptake of [^3H] hypoxanthine by *P. falciparum*.

Antifungal assay

The isolated compounds were tested for their antifungal activity against a clinical isolate of *Candida albicans* using a method modified from the soluble formazan assay (Scudiero et al., 1988). The number of living cells was determined by measuring the absorbance of XTT formazan at 450 nm.

Cytotoxicity assay

The cytotoxicity against human epidermoid carcinoma (KB), human breast cancer (BC) and human small cell lung cancer (NCI-H187) cell lines were performed employing the colorimetric method (Skehan et al., 1990). Ellipticin was the reference compound for the cytotoxicity assay.

Instrument

Infrared spectra (IR) were measured as KBr disc on a Shimadzu 4100 FT-IR spectrometer and are reported in wave number (cm^{-1}). ^1H and ^{13}C NMR, COSY and HMBC were recorded in CDCl_3 and d_6 -DMSO solutions with ^1H (400 MHz), ^{13}C (100 MHz) on Bruker Drx 400 instrument. Chemical shifts (δ) are expressed in ppm and coupling constants (J) in hertz (Hz). Mass spectra were obtained on Fisons GC 8060 MS CB II spectrometer. Column

chromatography was performed with Merck silica gel 60 (70-230 mesh). All other commercially available reagents were used after distillation.

Results and Discussion

Our study has indicated that *L. rubiginosa* contains 7-hydroxy-6-methoxycoumarin (**I**), 6,7-dimethoxy-8-hydroxycoumarin (**II**) and stigmasterol (**III**).

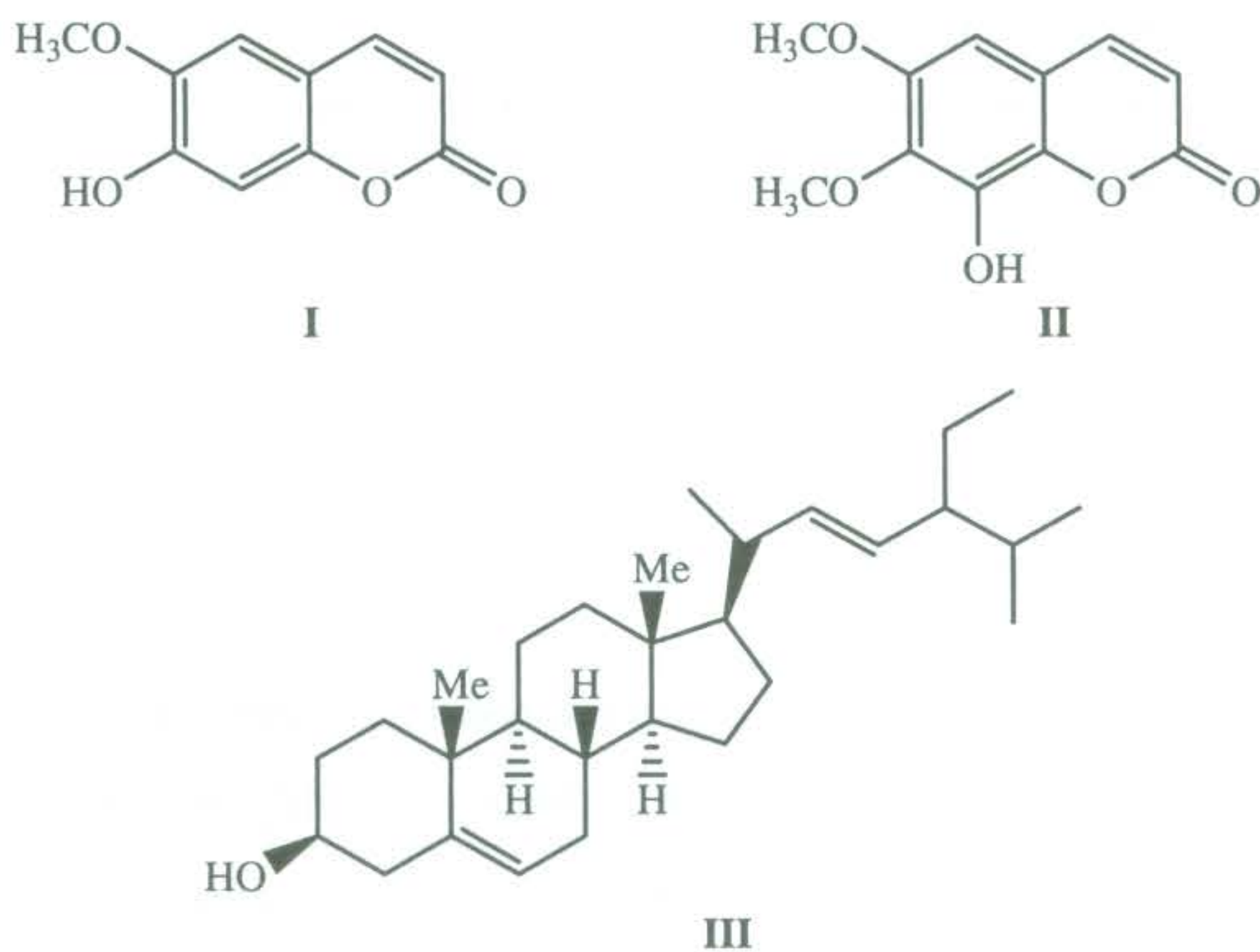


Figure 1 Structures of 7-hydroxy-6-methoxycoumarin (**I**), 6,7-dimethoxy-8-hydroxycoumarin (**II**) and stigmasterol (**III**)

7-Hydroxy-6-methoxycoumarin (**I**) was recrystallized from ethyl acetate-hexane as yellow needles, mp. 202-204°C. The molecular formula of **I** was established as $\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4$ by GC-MS mass spectrum, m/z 192. The IR spectrum showed absorption bands at 3340, 1705, 1610, 1560, 1290 and 1140 cm^{-1} . The ^1H NMR spectrum of **I** showed two

doublets at δ 6.01 and 7.46 ($J = 9.4$ Hz) which were assigned to the α , β -unsaturated ester, H-3 and H-4, respectively. The methoxy group showed a signal at δ 3.74 while a hydroxy group appeared at δ 9.28. The C-5 and C-8 aromatic protons showed the singlet signals at δ 6.65 and 6.66, respectively. The ^{13}C NMR spectrum showed signals at δ 111.7

and 143.3 which were assigned to the carbons of α,β -unsaturated ester. The aromatic carbons showed signals at δ 102.97, 107.98, 110.4, 144.9, 149.6 and 150.7. The signal at δ 161.2 was assigned to carbonyl carbon. The H-H COSY, HMQC and HMBC spectrum provided strong support for the proposed structure.

6,7-Dimethoxy-8-hydroxycoumarin (**II**) was recrystallized from dichloromethane-hexane as yellow needles, mp. 138-140°C. The molecular formula of **II** was established as $C_{11}H_{10}O_5$ by GC-MS mass spectrum, m/z 222. The IR spectrum showed absorption bands at 3344, 1721, 1689, 1574, 1302 and 1123 cm^{-1} . The 1H NMR spectrum of this compound showed two doublets at δ 6.29 and 7.60

($J = 9.6$ Hz) which were assigned to the α,β -unsaturated ester, H-3 and H-4, respectively. Two methoxy groups showed signals at δ 3.96 and 4.10. The spectrum also showed a signal of aromatic proton at δ 6.67 and a hydroxy proton at δ 6.17. The ^{13}C NMR showed signals at δ 113.5 and 143.8 which were assigned to the carbons of α,β -unsaturated ester. The signal at δ 160.6 was assigned to carbonyl carbon. The aromatic carbons showed signals at δ 103.2, 111.2, 134.4, 142.4, 144.0 and 149.7

The 1H and ^{13}C NMR of stigmasterol (**III**) were confirmed by comparison with the reference spectral data (Pouchert, 1993). The mixed melting point of this compound was confirmed with the standard stigmasterol.

Biological activity

Table 1 Biological activities of stigmasterol and coumarins*

Compound	Antituberculosis	Antiplasmodial	Antifungal	Cytotoxicity ^a
	MIC ($\mu g/ml$)	IC ₅₀ ($\mu g/ml$)	IC ₅₀ ($\mu g/ml$)	IC ₅₀ ($\mu g/ml$)
Stigmasterol	Inactive ^b	Inactive ^c	Inactive ^d	Inactive ^e
Coumarin I	200	Inactive ^c	Inactive ^d	Inactive ^e
Coumarin II	200	Inactive ^c	Inactive ^d	Inactive ^e
Isoniazid	0.04-0.09	-	-	-
Kanamycin sulfate	2.0-5.0	-	-	-
Ellipticin	-	-	-	0.1-0.3
Chloroquine	-	0.1-0.2	-	-
Amphotericin B	-	-	0.01-0.02	-

* Data shown are values from replicate experiments.

a cytotoxicity to KB, BC and NCI-H187 cell lines

b inactive at > 200 $\mu g/ml$

c inactive at > 10 $\mu g/ml$

d inactive at > 50 $\mu g/ml$

e inactive at > 50 $\mu g/ml$

Conclusion

Our study indicated that dichloromethane extract of the roots of *L. rubiginosa* contained 7-hydroxy-6-methoxycoumarin (**I**) 6,7-dimethoxy-8-hydroxycoumarin (**II**) and stigmasterol (**III**). These coumarins exhibited weak activity against the *Mycobacterium tuberculosis* H37Ra with the MIC of 200 µg/mL. The coumanins **I** and **II** showed no cytotoxicity toward KB, BC and NCI-H187 cell lines. Unfortunately these compounds showed no antiplasmodial and antifungal activities. However, this study was the first report of the chemical constituents and bioactivities from the dichloromethane extract of the roots of *L. rubiginosa*. Further studies on chemical constituents and biological activities will be carried out.

Acknowledgements

We thank Khon Kaen University for financial support to Chavi Yenjai. The Bioassay Research Facility of BIOTEC is acknowledged for bioactivity tests.

References

- Adesanya, S.A., Martin, M.T., Hill, B., Dumontet, V., Van, T.M., Sevenet, T., Pais, M. (1999). Rubiginoside, a farnesyl glycoside from *Lepisanthes rubiginosa*. *Phytochemistry*. 51(8):1039-1041.
- Collins, L.A., Franzblau, S.G. (1997). Microplate alamar blue assay versus BACTEC 460 system for high-throughput screening of compound against *Mycobacteriu tuberculosis* and *Mycobacterium avium*. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*. 4:1004-1009.
- Desjardins, R.E., Canfield, C.J., Haynes, J.D., Chulay, J.D. (1979). Quantitative assessment of antimalarial activity in vitro by a semiautomated microdilution technique. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*. 16:710-718.
- Pouchert, C.J. and Behnke, J. (1993a). The Aldrich Library of ¹³C NMR and ¹H FT-NMR Spectra. edition 1. 2:1314B.
- Pouchert, C.J. and Behnke, J. (1993b). The Aldrich Library of ¹³C NMR and ¹H FT-NMR Spectra. edition 1. 3:569B.
- Scudiero, D.A., Shoemaker, R.H., Paull, K.D., Monka, A., Tierney, S., Nofziger, T.H., Currens, M.J., Seniff, D., Boyd, M.R. (1988). Evaluation of a soluble tetrazolium/formazan assay for cell growth and drug sensitivity in culture using human and other tumor cell lines. *Cancer Research*. 48(17):4827-4833.
- Skehan, P., Storeng, R., Scudiero, D., Monks, A., McMahon, J., Vistica, D., Warren, J.T., Bokesch, H., Kenney, S., Body, M.R. (1990). New colorimetric cytotoxicity assay for anticancer-drug screening. *Journal of National Cancer Institute*. 82:1107-1112.
- Trager, W., Jensen, J.B. (1976). Human malaria parasites in continuous culture. *Science*. 193:673-675.



ความสัมพันธ์ระหว่างสีของเนื้อเหง้ากระชายดำ กับฤทธิ์ต้านการเกิดอนุมูลอิสระ

เสริมสกุล พจนการุณ¹ และ ไชยยัง รุจจนเวท²

บทคัดย่อ

ใช้เหง้ากระชายดำที่มีความเข้มของสีเนื้อแตกต่างกัน 4 ระดับซึ่งได้จากการแบ่งกลุ่มตามค่าสีในระบบ $a^*L^*b^*$ ด้วยวิธี unweighted pair group method cluster analysis (UPGMA) จากแหล่งปลูกการค้าในจังหวัดเลย (สายพันธุ์ 'บ่อเหมืองน้อย-2') พืชกุล โลก (สายพันธุ์ 'รุ่มเกล้า' และ 'น้ำจวง') และเพชรบูรณ์ (สายพันธุ์ 'เข็กน้อย-2') เปรียบเทียบฤทธิ์ต้านการเกิดอนุมูลอิสระในรูปเปอร์เซ็นต์ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาเพอร์ออกซิเดชันของกรดไขมันจากสมองหนูขาวใหญ่โดยวิธี thiobarbituric acid (TBA) ระหว่างสารสกัดเอทานอลของเหง้ากระชายดำ 4 สายพันธุ์กับวิตามินอีและพืชสกุลอื่นในวงศ์ Zingiberaceae พบว่า สารสกัดกระชายดำทุกสายพันธุ์ ที่ทุกความเข้มข้นของสารสกัด (0.98, 1.95, 3.91 และ 7.81 มก./มล.) ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาเพอร์ออกซิเดชันของกรดไขมันจากสมองหนู โดยสารสกัดกระชายดำสายพันธุ์ 'รุ่มเกล้า' (ซึ่งเนื้อเหง้ามีสีเข้มที่สุด) มีเปอร์เซ็นต์ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาเพอร์ออกซิเดชันของกรดไขมันสูงกว่าสารสกัดกระชายดำสายพันธุ์อื่นอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม สารสกัดกระชายดำทุกสายพันธุ์มีเปอร์เซ็นต์ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาเพอร์ออกซิเดชันต่ำกว่าวิตามินอีและสารสกัดจากเหง้าของพืชสกุลอื่นในวงศ์ Zingiberaceae ที่ศึกษาอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยที่สารสกัดขิงและขมิ้นชันมีเปอร์เซ็นต์ยับยั้งสูงสุด (88.85 และ 85.06%) สารสกัดเอทานอลกระชายดำทุกสายพันธุ์สามารถแสดงฤทธิ์ต้านการเกิดอนุมูลอิสระได้ โดยที่กลุ่ม ซึ่งเหง้ามีสีของเนื้อเข้ม มีแนวโน้มแสดงฤทธิ์สูงกว่ากลุ่มที่เหง้ามีสีของเนื้อจาง

Abstract

Rhizomes of *Kaemferia parviflora* with four different intensity of internal color as grouped by the $a^*L^*b^*$ system according to the unweighted pair group method cluster analysis (UPGMA) were collected from production areas in Loei (cv. Bohmuangnoi #2), Phitsanulok (cvs. Romklao and Namjuang) and Phetchabun (cv. Khegnoi #2) provinces. The ethanolic extracts of four cultivars of *K. parviflora*, vitamin E and other Zingiberaceous plants were evaluated for their anti-oxidant activity in the form of percent inhibition of lipid peroxidation as determined by the thiobarbituric acid (TBA) method. It was found that all *K. parviflora*

¹ ศูนย์บริการวิชาการด้านพืชและปัจจัยการผลิตเลข 2 อ.ภูเรือ จ.เลย 42160

² ห้องปฏิบัติการผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ สถาบันวิจัยจุฬาภรณ์ ศูนย์วิจัย ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

extracts at all concentrations used (0.98, 1.95, 3.91 and 7.81 mg/ml) inhibited lipid peroxidation in polyunsaturated fatty acids obtained from Sprague-Dawley rats' brain. The extract of cv. Romklao, which had the darkest internal color, was highest in percent inhibition of lipid peroxidation. However, the values for the extracts of *K. parviflora* were significantly lower ($p < 0.05$) than those for vitamin E and other Zingiberaceous plants. The extracts of *Zingiber officinale* and *Curcuma longa* had the highest percentages of lipid peroxidation (88.85 and 85.06%). All cultivars of *K. parviflora* exhibited an anti-oxidant activity. Those with darker internal color tended to have a higher anti-oxidant activity than those with lighter internal color.

คำนำ

กระชายดำ เป็นพืชล้มลุกอยู่ในวงศ์ *Zingiberaceae* มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Kaempferia parviflora* Wall ex Baker ซึ่งต่างจาก "กระชาย" ที่มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Boesenbergia pandurata* (Roxb.) Schltr. [พ้องกับ *B. rotunda* (L.) Mansf.] และกระชายขาวที่มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า '*Globba laeta* K. Larsen' (เต็ม สมิตินันท์, 2544) กระชายดำ มีสรรพคุณรักษาโรคกามตายด้านหรือบำรุงกำหนด ช่วยเพิ่มสมรรถภาพทางเพศ และช่วยบำรุงกำลัง (อภิชาติ ชิดบุรี, 2543) กระชายดำเป็นพืชสมุนไพรที่เริ่มปลูกในจังหวัดเลยและได้รับความนิยมจากผู้บริโภคมากขึ้นเป็นลำดับจนมีการขยายพื้นที่ปลูก กระชายดำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในทุกภาคของประเทศและเริ่มเข้ามาทดแทนการปลูกขิงอันเนื่องมาจากกระชายดำมีราคาที่สูงมากถึง 500-550 บาท ต่อ กิโลกรัม (โสภี ทุมลา, 2545) ปัจจุบันผู้บริโภค เกษตรกร ผู้ปลูก และผู้ประกอบการจำหน่ายผลิตภัณฑ์กระชายดำได้ใช้สีของเนื้อเหง้ากระชายดำเป็นเกณฑ์ในการคัดเกรดและกำหนดราคา (เสริมสกุล พจนการุณ และเชวง แก้วรักษ์, 2546ก, ข; Pojanagaroon and Kaewrak, 2003) โดยมีความเชื่อว่ายิ่งเนื้อของเหง้ากระชายดำมีสีเข้มมากเท่าใด ก็ยิ่งมีคุณสมบัติข้างต้นดีขึ้นเท่านั้นและให้ราคาเหง้ากระชายดำแพงกว่าสีจางเป็นเท่าตัว จึงเป็นประเด็นหลักในการวิจัยเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสีของเนื้อเหง้ากระชายดำและปริมาณของทุติยสาร

สังเคราะห์ที่มีฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาสำหรับใช้ประกอบการคัดเลือกพันธุ์กระชายดำที่เหมาะสมและมีสารออกฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาสูงซึ่งได้รับความนิยมสูงสุดจากผู้ประกอบการและผู้บริโภค อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีรายงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ที่ยืนยันฤทธิ์ต่างๆของกระชายดำ ประกอบกับมีรายงานว่าพืชในวงศ์ *Zingiberaceae* หลายชนิด เช่น ขิง (*Zingiber officinale*) ขมิ้นชัน (*Curcuma longa*) และกระชาย (*Boesenbergia pandurata*) มีฤทธิ์ด้านการเกิดอนุมูลอิสระ (นวลศรี รักอริยะธรรมและอัญญาเจนวิธิสุข, 2545) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเน้นศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสีของเนื้อเหง้ากระชายดำกับฤทธิ์ด้านการเกิดอนุมูลอิสระในเชิงเปรียบเทียบกับพืชสกุลอื่นในวงศ์ *Zingiberaceae* อื่นๆ และวิตามินอี

วิธีการทดลอง

การรวบรวมเหง้ากระชายดำ

รวบรวมเหง้ากระชายดำที่มีสีเนื้อแตกต่างกัน 4 ระดับ คือ ม่วงเข้ม ม่วง ม่วงอ่อน และม่วงอ่อนมาก โดยใช้ค่าสีในระบบ $a^*L^*b^*$ สำหรับการแบ่งกลุ่ม (Pojanagaroon and Kaewrak, 2003) คัดเลือกเหง้ากระชายดำจากแหล่งปลูกในจังหวัดพิษณุโลก และเพชรบูรณ์ โดยใช้ชื่อของแหล่งที่รวบรวมเป็นชื่อสายพันธุ์กระชายดำ (ตารางที่ 1) คัดเลือกกระชายดำสำหรับทดสอบฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาจากเหง้าที่มีสีเนื้อแตกต่างกัน 4 ระดับที่อยู่ในกลุ่มย่อยแตกต่างกันจากการแบ่งกลุ่มที่คล้ายคลึงกันโดยใช้

ค่าสีในระบบ $a^*L^*b^*$ ด้วยวิธี unweighted pair group method cluster analysis (UPGMA) ได้แก่ สายพันธุ์ 'ร่มเกล้า' (เนื้อสีม่วงเข้ม), สายพันธุ์ 'น้ำจวง' (สีม่วง), สายพันธุ์ 'บ่อเหมืองน้อย-2' (สีม่วงอ่อน) และ สายพันธุ์ 'เจ๊กน้อย-2' (สีม่วงอ่อนมาก) รายละเอียดสีของเนื้อเหง้ากระชายดำทั้ง 4 สายพันธุ์ ดังแสดงในตารางที่ 2 รวบรวมเหง้าในขณะที่ยังคงเก็บเกี่ยวกระชายดำ เก็บรักษาโดยการฝังไว้กับพื้นในร่มที่มี

อากาศถ่ายเทได้สะดวก ปลุกเหง้ากระชายดำในถุงพลาสติกเพื่อตรวจสอบลักษณะทางพฤกษศาสตร์ โดย "นายจรัส มากน้อย" หอพรรณไม้ องค์การสวนพฤกษศาสตร์สมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์และยืนยันว่ามีชื่อวิทยาศาสตร์ '*Kaempferia parviflora*' (หมายเลขตัวอย่าง QSBG C. Maknoi No. 467, 468, 470 และ 477)

ตารางที่ 1 ชื่อพันธุ์ รหัสและแหล่งปลูกของเหง้ากระชายดำ

พันธุ์	รหัส*	แหล่งปลูก
ร่มเกล้า	QSBG C.Maknoi 468	หมู่ 4 บ้านร่มเกล้า ตำบลบ่อภาค อำเภอนาดี ต.ระการ จังหวัดพิจิตร
น้ำจวง	QSBG C.Maknoi 467	หมู่ 15 บ้านน้ำจวง ตำบลบ่อภาค อำเภอนาดี ต.ระการ จังหวัดพิจิตร
บ่อเหมืองน้อย -2	QSBG C.Maknoi 477	หมู่ 5 บ้านบ่อเหมืองน้อย ตำบลแสงภา อำเภอนาแห้ว จังหวัดเลย
เจ๊กน้อย -2	QSBG C.Maknoi 470	หมู่ 8 บ้านชัยชนะ ตำบลเจ๊กน้อย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์

*รหัสตัวอย่างพืชที่ได้รับการเก็บรักษา ณ หอพรรณไม้ องค์การสวนพฤกษศาสตร์สมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์ อำเภอมะริม จังหวัดเชียงใหม่

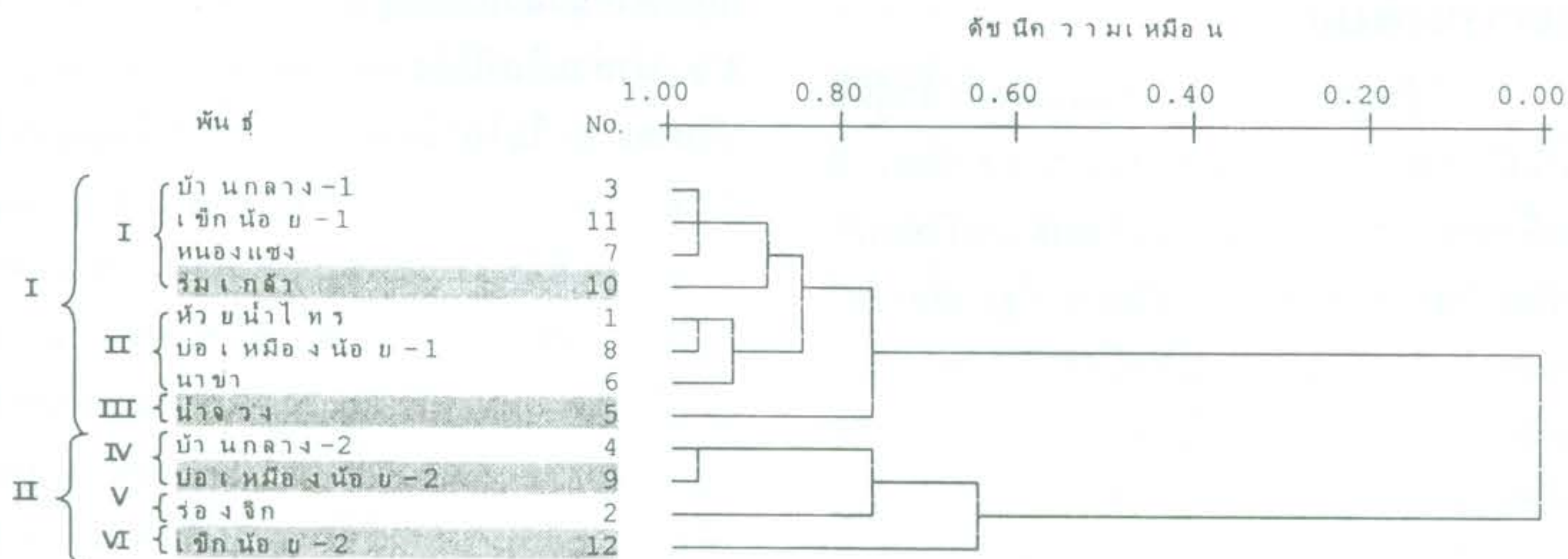
ตารางที่ 2 สีของเนื้อเหง้ากระชายดำ 4 สายพันธุ์ที่ใช้ทดสอบฤทธิ์ด้านการเกิดแผลในกระเพาะอาหาร

พันธุ์	สีของเนื้อเหง้ากระชายดำ (ระบบ $a^*L^*b^*$)		
	L^*	a^*	b^*
ร่มเกล้า	32.29 d	9.17 a	-3.57 d
น้ำจวง	37.12 c	8.48 b	-0.14 c
บ่อเหมืองน้อย -2	44.72 b	4.99 c	7.22 b
เจ๊กน้อย -2	47.27 a	3.86 d	9.46 a
Mean	40.39	6.57	3.29
SD	6.47	2.51	5.76

ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยวิธี DMRT

* การวัดสีในระบบ $a^*L^*b^*$ เป็นการแสดงตำแหน่งของสีในพิกัด 3 มิติระหว่าง 3 แกน คือ a^* , L^* และ b^* โดยที่ a^* และ b^* แสดงถึงแกนในระนาบ (ทิศทาง) ของสี (chromaticity coordinates) : + a^*

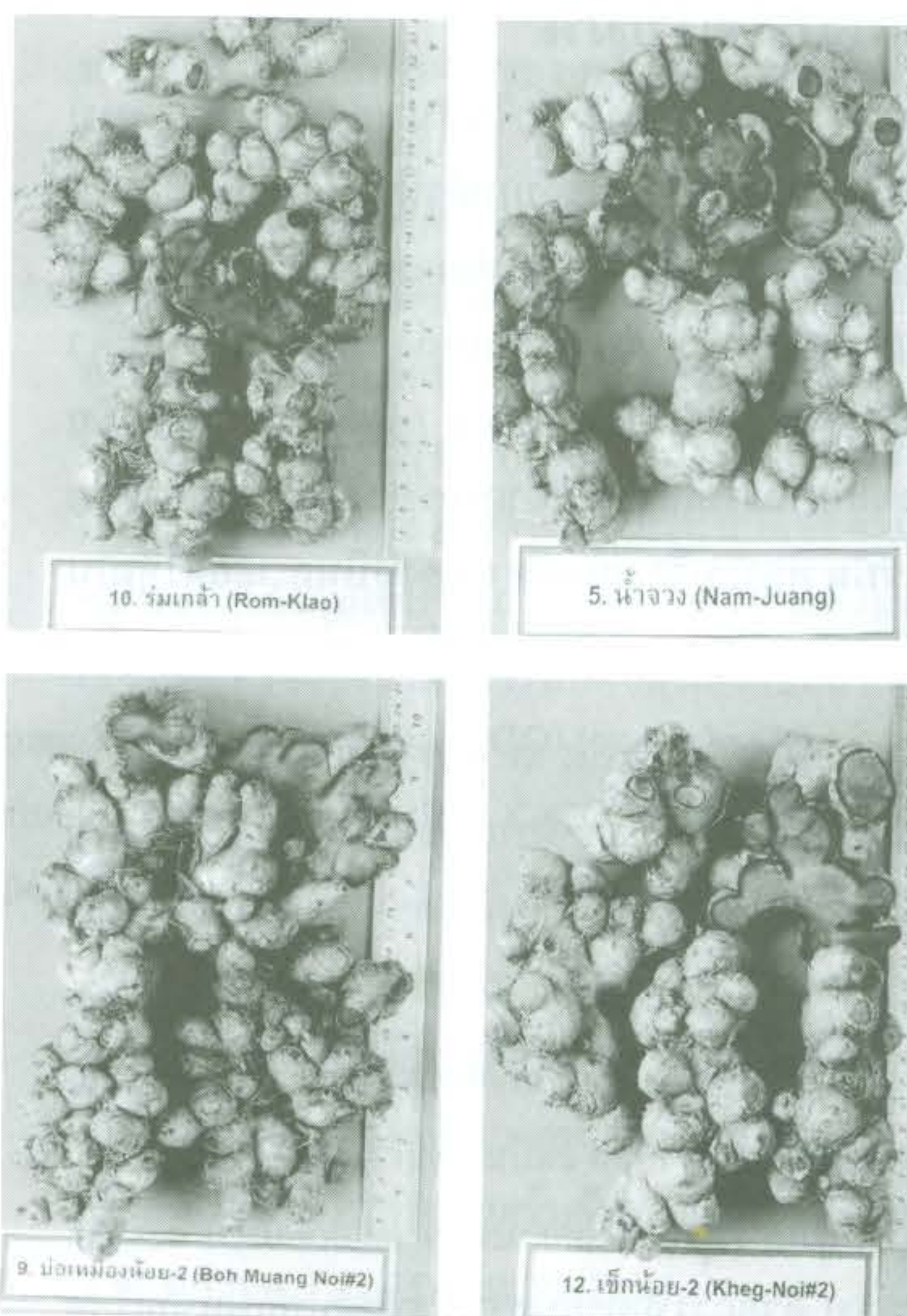
แสดงทิศทางสีแดง - a^* แสดงทิศทางสีเขียว + b^* แสดงทิศทางสีเหลือง และ - b^* แสดงทิศทางสีน้ำเงิน ขณะที่ L^* แสดงถึงความสว่าง : + L^* แสดงถึงความสว่างและสีขาว, - L^* แสดงถึงความมืดและสีดำ



รูปที่ 1 Dendrogram การแบ่งกลุ่มสีของเนื้อเหง้ากระชายดำ 12 สายพันธุ์ที่สร้างจากค่าสี a^* , L^* และ b^* ในระบบสี $a^*L^*b^*$ ด้วยวิธี unweighted pair group method cluster analysis (UPGMA) (Pojanagaroon and Kaewrak, 2003) โดยแบ่งกระชายดำได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ (6 กลุ่มย่อย) ได้แก่ กลุ่มใหญ่ที่หนึ่ง ประกอบด้วยกลุ่มย่อยที่ I, II และ III (กลุ่มที่มีเนื้อสีเข้ม) กลุ่มใหญ่ที่สอง ประกอบด้วยกลุ่มที่ IV, V และ VI (กลุ่มที่มีเนื้อสีจาง)

การสกัดเหง้ากระชายดำ

นำเหง้ากระชายดำซึ่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 45-50 วัน มาล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วสับเป็นชิ้นขนาดเล็ก โดยไม่ปอกเปลือก ผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง และบดให้ละเอียด หมัก (macerate) ผงเหง้ากระชายดำในเอทานอล 95% ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานาน 2 วันแล้วกรอง นำกากมาหมักซ้ำอีก 2 ครั้งในเอทานอล 95% เพิ่มความเข้มข้นส่วนที่กรองได้ในสภาพสุญญากาศที่อุณหภูมิ 55°C. และทำให้แห้งในสภาพเยือกแข็งโดยการระเหยเพื่อให้ได้สารสกัดแอลกอฮอล์ที่แห้ง [สารสกัดที่ได้คิดเป็น 5.7% (โดยน้ำหนัก) ของเหง้ากระชายดำที่ใช้เริ่มต้น] ละลายสารสกัดแห้งโดยใช้ Tween 5% ก่อนนำไปทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ



รูปที่ 2 เหง้าและสีของเนื้อเหง้ากระชายดำ

สัตว์ทดลอง

ใช้หนูขาว (Sprague-Dawley rat) ตัวผู้ที่มีน้ำหนัก 250-300 กรัม (อายุประมาณ 4-6 เดือน) ที่สั่งซื้อมาจากศูนย์สัตว์ทดลองแห่งชาติ มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตศาลายา จังหวัดนครปฐม เลี้ยงสัตว์ทดลองในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ ($22 \pm 3^{\circ}\text{C}$) และมีวัฏจักรแสงสว่างและมีมืดอย่างละ 12 ชั่วโมง โดยให้สัตว์ทดลองปรับตัวในสภาพดังกล่าวอย่างน้อย 7 วัน ให้อาหารสัตว์ทดลองของบริษัท S.W.T. Co., Ltd. จังหวัดสมุทรปราการ สัตว์ทดลองทุกตัวได้รับการดูแลด้วยความเมตตาตามจรรยาบรรณการวิจัยในสัตว์ทดลองของสภาวิจัยแห่งชาติ ปี พ.ศ 2542

การทดสอบฤทธิ์ต้านการเกิดปฏิกิริยาเพอร์ออกซิเดชันของกรดไขมัน

ฆ่าหนูขาว ดึงไขสันหลัง แยกสมองหนูทั้งหมด (ยกเว้น ซีรีเบลลัม) แล้วปั่นให้เป็นเนื้อเดียวกัน ปริมาณ 100 มก./มล. ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (0.1 M, pH 7.4) ที่แข็งเพื่อใช้เป็นแหล่งกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (polyunsaturated fatty acids) สำหรับทดสอบการเกิดปฏิกิริยาเพอร์ออกซิเดชันของกรดไขมัน หมุนเหวี่ยงเนื้อเยื่อสมองที่ปั่นละเอียดให้เป็น

เนื้อเดียวกันแล้วที่ $800\times g$ เป็นเวลา 10 นาที อุณหภูมิ 4°C . นำส่วนใสที่ได้จากการเหวี่ยง (supernatant) ปริมาตร 25 ไมโครลิตรมาแช่ในน้ำอุ่นที่มีอุณหภูมิ 37°C . ร่วมกับการเติมและไม่เติมสารทดสอบ (test samples) ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน ปริมาตร 25 ไมโครลิตร เป็นเวลา 40 นาที หลังจากนั้นเติมกรดอะซีติก 20% (v/v) ปริมาตร 30 ไมโครลิตรเพื่อหยุดปฏิกิริยา สำหรับตัวอย่างที่เวลา 0 (zero time sample) ได้จากการเติมกรดอะซีติก ลงไปในสารละลายก่อนเติมเนื้อเยื่อสมองที่ปั่นละเอียดแล้ว

เติม 0.5%TBA ในกรดอะซีติก 20% (v/v) ที่มี pH 3.5 ปริมาตร 600 ไมโครลิตร ลงในแต่ละตัวอย่าง นำหลอดไปแช่ที่ 85°C . เป็นเวลา 60 นาที ทิ้งให้เย็นแล้วเติม sodium dodecyl sulfate (SDS) ปริมาตร 50 ไมโครลิตร และเหวี่ยงที่ 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance หรือ optical density, OD) ของส่วนใสที่ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับสารละลาย blank ที่เตรียมด้วยวิธีการเช่นเดียวกันแต่ไม่เติมเนื้อเยื่อที่ปั่นละเอียด ทำการคำนวณโดยหักค่าที่เวลา 0 จากค่าที่ได้จากการทดลองตามสูตรการคำนวณค่า optical density ของตัวควบคุม (control) และตัวทดสอบ (test) และร้อยละการยับยั้งการเกิด lipid peroxidation (% Inhibition)

$$\begin{aligned}\text{OD of control (ODC)} &= \text{OD of control(measured)} - \text{OD of zero time control} \\ \text{OD of test (ODT)} &= \text{OD of test(measured)} - \text{OD of zero time test} \\ \% \text{ Inhibition} &= 100 \times [\text{ODC}-\text{ODT}]/\text{ODC}\end{aligned}$$

เปรียบเทียบฤทธิ์ต้านการเกิดปฏิกิริยาเพอร์ออกซิเดชันของกรดไขมัน โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) ด้วยการทดสอบสองปัจจัยแบบแฟกทอเรียล ปัจจัยที่หนึ่ง คือ ชนิดของสารสกัดที่ใช้ 9 ชนิด ได้แก่

สารสกัดเอทานอลที่ได้จากเหง้ากระชายดำ 4 สายพันธุ์ ที่มีสีของเนื้อเหง้าแตกต่างกัน 4 ระดับ (KPE#1-#4) เปรียบเทียบกับสารสกัดเอทานอลที่ได้จากเหง้าจิง ข่า ขมิ้นชัน กระชาย และวิตามินอี ปัจจัยที่สอง คือ ความเข้มข้นที่ใช้ 4 ระดับ ได้แก่ 0.98, 1.95, 3.91

และ 7.81 มก./มล. รวมเป็น 36 กรรมวิธี แต่ละกรรมวิธีใช้สมองหนูขาวใหญ่ 9 ตัว ($n=9$) วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS for Windows version 8.0

ผลและวิจารณ์

ในระบบชีววิทยาของสิ่งมีชีวิตนั้น การเกิดปฏิกิริยาเพอร์ออกซิเดชันของกรดไขมันหรือการเกิดปฏิกิริยา oxidative degradation ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนในเยื่อหุ้มเซลล์จะผลิตสารประกอบที่ได้จากการแตกสลายจำนวนมากเช่น malondialdehyde (MDA) ซึ่งพบว่าเป็นสาเหตุสำคัญในการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์และทำให้เซลล์เสียหาย (Yoshikawa et al., 1997) จากการศึกษา (ตารางที่ 3) พบว่าสารสกัดเอทานอลของเหง้ากระชายดำได้แสดงฤทธิ์ด้านการเกิดอนุมูลอิสระหรือฤทธิ์ด้านการเกิดปฏิกิริยาเพอร์ออกซิเดชันของกรดไขมันจากสมองหนูขาวใหญ่ โดยคณะผู้วิจัยได้รายงานในรูปของเปอร์เซ็นต์ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาเพอร์ออกซิเดชันของกรดไขมัน กล่าวคือ สารสกัดเอทานอลของเหง้ากระชายดำที่ศึกษาทั้ง 4 สายพันธุ์(ที่มีความเข้มข้นของเนื้อเหง้าแตกต่างกัน 4 ระดับ) ในทุกความเข้มข้นของสารสกัดที่ใช้ (0.98 , 1.95 , 3.91 และ 7.81 มก./มล.) มีเปอร์เซ็นต์ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาเพอร์ออกซิเดชันของกรดไขมัน (มีค่าระหว่าง 19.33 ถึง 53.63%) มากกว่ากลุ่มควบคุม (ที่มีค่าเท่ากับ 0%) อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในเชิงเปรียบเทียบชนิดของสารสกัดระหว่างสารสกัดเอทานอลของเหง้ากระชายดำ 4 สายพันธุ์กับสารสกัดเอทานอลจากเหง้าของพืชสกุลอื่นในวงศ์ *Zingiberaceae* ซึ่งได้แก่ ขมิ้นชัน ข่า จิง กระชาย และวิตามินอีโดยเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม พบว่าสารสกัดเอทานอลของเหง้าจิงและขมิ้นชันมีเปอร์เซ็นต์ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาเพอร์ออกซิเดชันสูง

ที่สุด (88.85 และ 85.06% ตามลำดับ) รองลงมาคือสารสกัดของเหง้ากระชาย (58.06%) สารสกัดของเหง้าข่าและวิตามินอี (50.97 และ 49.12 % ตามลำดับ) สารสกัดของเหง้ากระชายดำสายพันธุ์ 'รุ่มเกล้า' (38.70%) และสารสกัดของเหง้ากระชายดำสายพันธุ์ 'น้ำจวง' 'บ่อเหมืองน้อย-2' และ 'เข็กน้อย-2' (25.52, 24.18 และ 23.06% ตามลำดับ) โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ขณะที่กลุ่มควบคุมมีค่าต่ำสุด (0%) เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของสารสกัดที่ใช้ พบว่าความเข้มข้นของสารสกัดที่ 7.81 มก./มล. มีเปอร์เซ็นต์ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาเพอร์ออกซิเดชันสูงที่สุด (54.98%) รองลงมาคือ ที่ความเข้มข้นของสารสกัด 3.91 และ 1.95 มก./มล. (45.05 และ 41.05%) และที่ความเข้มข้นของสารสกัด 0.98 มก./มล. (35.66%) โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) สำหรับปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของสารสกัดและความเข้มข้นของสารสกัดที่ใช้ พบว่าสารสกัดเอทานอลของเหง้าจิงที่ความเข้มข้นของสารสกัด 7.81 มก./มล. มีเปอร์เซ็นต์ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาเพอร์ออกซิเดชันสูงที่สุด (96.38%) ซึ่งไม่แตกต่างกับสารสกัดของเหง้าขมิ้นชันที่ความเข้มข้นสารสกัด 7.81 มก./มล. (95.63%) สารสกัดของเหง้าจิงที่ความเข้มข้นสารสกัด 3.91, 1.95 และ 0.98 มก./มล. (8.13, 86.63 และ 84.78%) และสารสกัดของเหง้าขมิ้นชันที่ความเข้มข้นสารสกัด 3.91 มก./มล. (84.25%) รองลงมาคือสารสกัดของเหง้าขมิ้นชันที่ความเข้มข้นสารสกัด 0.98 มก./มล. (81.11%) ขณะที่กลุ่มควบคุมมีค่าเปอร์เซ็นต์ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาเพอร์ออกซิเดชันต่ำที่สุดทุกความเข้มข้น (0%) รองลงมาคือสารสกัดของเหง้ากระชายดำสายพันธุ์ 'เข็กน้อย -2' ที่ความเข้มข้นสารสกัด 0.98 มก./มล. (19.78 %) สารสกัดของเหง้ากระชายดำสายพันธุ์ 'บ่อเหมืองน้อย -2' ที่ความเข้มข้นสารสกัด 1.95 และ 3.91 มก./มล. (21.25 และ 21.25%)

ตารางที่ 3 เปรอร์เซ็นต์การยับยั้งปฏิกิริยาเพอร์ออกซิเดชันของกรดไขมันจากสมอหนูขาวใหญ่ เปรียบเทียบกันระหว่างสารสกัดเอทานอลของเหง้ากระชายดำ 4 สายพันธุ์(ที่มีสีของเนื้อเหง้าแตกต่างกัน 4 ระดับ) ขมิ้นชัน ข่า จิง กระชาย และวิตามินอี ที่มีความเข้มข้นของสารสกัดแตกต่างกัน 4 ระดับ

ชนิดสารสกัดเอทานอล	เปอร์เซ็นต์การยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาเพอร์ออกซิเดชันของกรดไขมัน				ค่าเฉลี่ย
	ความเข้มข้นของสารสกัดเอทานอลที่ใช้ (มก./มล.)				
	0.98	1.95	3.91	7.81	
กระชายดำสายพันธุ์‘ร่มเกล้า’	28.33 klm	32.00 jklm	42.13 ghijk	53.63 fg	38.70 d
กระชายดำสายพันธุ์‘น้ำจวง’	19.78 m	25.50 lm	23.13 lm	34.38 ijklm	25.52 e
กระชายดำสายพันธุ์‘บ่อเหมืองน้อย-2’	23.11 lm	21.25 m	21.25 m	31.25 jklm	24.18 e
กระชายดำสายพันธุ์‘เข็กน้อย-2’	19.33 m	28.25 klm	22.13 lm	28.00 lm	23.06 e
ขมิ้นชัน	81.11 bcde	79.75 cde	84.25 abcd	95.63 ab	85.06 a
ข่า	31.22 jklm	47.75 ghi	51.88 gh	75.50 cde	50.97 c
จิง	84.78 abcd	86.63 abc	88.13 abc	96.38 a	88.85 a
กระชาย	37.44 hijkl	48.38 ghi	69.63 de	79.38 cde	58.06 b
วิตามินอี	31.44 jklm	46.13 ghij	53.63 fg	67.50 ef	49.12 c
ตัวควบคุม	0.00 n	0.00 n	0.00 n	0.00 n	0.00 f
ค่าเฉลี่ย	35.66 c	41.05 b	45.05 b	54.98 a	

* ค่าเฉลี่ยแต่ละปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีอักษรต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

+ ค่าเฉลี่ยของปัจจัย 'ชนิดของสารสกัดเอทานอล' เปรียบเทียบในแนวดิ่งและค่าเฉลี่ยของปัจจัย 'ความเข้มข้น' ของสารสกัดเอทานอลที่ใช้ เปรียบเทียบในแนวนอน ซึ่งค่าเฉลี่ยในแนวดิ่งหรือแนวนอนมีอักษรต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยวิธี DMRT

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของสารสกัดในส่วนที่เป็นการเปรียบเทียบกระชายดำทั้ง 4 สายพันธุ์ กับความเข้มข้นของสารสกัดที่ใช้ พบว่าสารสกัดเอทานอลของเหง้ากระชายดำสายพันธุ์'ร่มเกล้า' ที่ความเข้มข้นสารสกัด 7.81 มก./มล. มีเปอร์เซ็นต์ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาเพอร์ออกซิเดชันสูงที่สุด (53.63 %) โดยไม่แตกต่างกับที่ความเข้มข้น 3.91 มก./มล. (42.13 %) แต่มีความแตกต่างกับสารสกัดเอทานอลของเหง้ากระชายดำสายพันธุ์'น้ำจวง' 'บ่อเหมืองน้อย-2' 'เข็กน้อย-2' ที่ทุกความเข้มข้น และสารสกัดเอทานอลของเหง้ากระชายดำ

สายพันธุ์'ร่มเกล้า' ที่ความเข้มข้น 0.98 และ 1.95 มก./มล. อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังนั้น สามารถกล่าวได้ว่าสารสกัดเอทานอลของเหง้ากระชายดำทุกสายพันธุ์สามารถแสดงฤทธิ์ด้านการเกิดอนุมูลอิสระหรือฤทธิ์ด้านการเกิดปฏิกิริยาเพอร์ออกซิเดชันของกรดไขมัน โดยพบว่าสารสกัดกระชายดำสายพันธุ์'ร่มเกล้า' มีความสามารถแสดงฤทธิ์ด้านการเกิดอนุมูลอิสระได้สูงกว่ากระชายดำสายพันธุ์อื่นอย่างมีนัยสำคัญ($p < 0.05$)แต่ต่ำกว่าวิตามินอีและสารสกัดจากเหง้าของพืชสกุลอื่นในวงศ์ Zingiberaceae (จิง ข่า ขมิ้นชัน กระชาย) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

สรุป

สารสกัดกระชายดำทุกสายพันธุ์ที่ทุกความเข้มข้นของสารสกัดสามารถแสดงฤทธิ์ด้านการเกิดอนุมูลอิสระได้ โดยสารสกัดเหง้ากระชายดำกลุ่มที่มีเนื้อสีเข้มมีแนวโน้มแสดงฤทธิ์สูงกว่ากลุ่มที่มีเนื้อสีจาง แต่ต่ำกว่าวิตามินอีและสารสกัดจากเหง้าของพืชสกุลอื่นในวงศ์ Zingiberaceae ที่ใช้เปรียบเทียบ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ กองทุนสนับสนุนการวิจัยด้านการเกษตร กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย "รวบรวมศึกษาและคัดเลือกพันธุ์กระชายดำ" งานวิจัยนี้สำเร็จล่วงได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- นวลศรี รักษาริยะธรรม และอัญชนา เจนวิถีสุข. (2545). แอนติออกซิแดนท์: สารต้านมะเร็งในผัก-สมุนไพรไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1. เชียงใหม่: นพบุรีการพิมพ์จำกัด.
- เต็ม สมิตินันท์. (2544). ชื่อพรรณไม้แห่งประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: บริษัท ประชาชนจำกัด.
- โสภี ทุมลา. (2545). ไวน์สมุนไพร...อาชีพเสริมทำเงิน พ่อพิมพ์-แม่พิมพ์เมืองสองแคว. เทคโนโลยีชาวบ้าน. 14(293):40-41.

เสริมสกุล พจนการุณ และเชวง แก้วรักษ์. (2546ก). ทศนคติ พฤติกรรมการบริโภค และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์สมุนไพรกระชายดำของผู้บริโภค: กรณีศึกษา อำเภอภูเรือ จังหวัดเลย. ใน: การสัมมนาวิชาการเกษตรประจำปี 2546 มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 27-28 มกราคม 2546. ขอนแก่น. หน้า 653-669.

เสริมสกุล พจนการุณ และเชวง แก้วรักษ์. (2546ข). การผลิตและจำหน่ายกระชายดำของเกษตรกรจังหวัดเลย พืชปลูกโลก และเพชรบูรณ์. การประชุมวิชาการพืชสวนแห่งชาติครั้งที่ 3 ระหว่างวันที่ 23-25 เมษายน 2546 ณ โรงแรมมิราเคิล แกรนด์ คอนเวนชั่น กรุงเทพฯ. หน้า 160.

อภิชาติ ชิดบุรี. (2543). ผลิตดินพันธุ์กระชายดำ (โสมไทย) ด้วยการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ. เกษตร. 24(7):140-143.

Pojanagaroon, S. and Kaewrak, C. (2003). Varietal selection of collected krachai-dam (*Kaempferia parviflora* Wall.) rhizomes by using the preference of krachai-dam products' distributors and sellers. In: Proceedings of the International Conference on Biodiversity and Bioactive Compounds. July 17-19, 2003. Peach, Pattaya. p. 401-407.

Yoshikawa, T., Naito, Y. and Kondo, M. (1997). Food and diseases. In: Hiramatsu, M., Yoshikawa, T. and Inoue, M. (eds.). Free Radicals and Diseases. New York: Plenum Press. p.11-19.



ผลของ Indole Acetic Acid และ Benzyl Adenine ต่อการเจริญเติบโตของปลายยอดว่านน้ำ (*Acorus calamus* Linn.) ในสภาพปลอดเชื้อ

ศรีสุลักษณ์ ธีรานุกพัฒนา¹, กอบเกียรติ แสงนิล¹ และอารยา จาติเสถียร¹

บทคัดย่อ

ว่านน้ำเป็นพืชที่มีสารเบต้า-อะซาโรน (beta-asarone) มีคุณสมบัติเป็นสารฆ่าแมลง รา และแบคทีเรีย การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของ indole acetic acid (IAA) และ benzyl adenine (BA) ต่อการเจริญเติบโตของปลายยอดของว่านน้ำเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการขยายพันธุ์และการวิเคราะห์สารเบต้า-อะซาโรนจากใบของว่านน้ำซึ่งได้จากการเพาะเลี้ยงในสภาพปลอดเชื้อ และใบจากธรรมชาติ โดยนำปลายยอดที่มีความยาว 1.0-1.5 ซม. ซึ่งได้จากเหง้าของว่านน้ำ เพาะเลี้ยงบนอาหาร MS (Murashige and Skoog, 1962) ที่เติม IAA ความเข้มข้น 0, 0.25, 0.5, 1 และ 2 มก./ล. ร่วมกับ BA ความเข้มข้น 0, 2, 3 และ 4 มก./ล. พบว่าอาหาร MS ที่มี BA ความเข้มข้น 4 มก./ล. สามารถชักนำปลายยอดให้เกิดยอดใหม่ 100% มีจำนวนยอดเฉลี่ยสูงสุด 2 ยอด/ชิ้นเนื้อเชื้อ ในเวลา 4 สัปดาห์ การวิเคราะห์สารทุติยภูมิโดยเทคนิคโครมาโทกราฟีผิบบาง (thin-layer chromatography, TLC) พบว่าสารสกัดจากใบว่านน้ำซึ่งได้จากการเพาะเลี้ยงในสภาพปลอดเชื้อ และใบจากธรรมชาติให้แถบสารที่เหมือนกับเบต้า-อะซาโรน

Abstract

Acorus calamus Linn. contains beta-asarone that has antibacterial, fungicidal, and insecticidal properties. The aims of this research were to determine the effects of indole acetic acid (IAA) and benzyl Adenine (BA) on shoot tip development of *A. calamus* for micropropagation and to analyze beta-asarone from in vitro and natural leaves of *A. calamus*. Shoot tips, 1.0-1.5 cm in length, from rhizomes of *A. calamus* were cultured on the MS (Murashige and Skoog, 1962) media supplemented with IAA at 0, 0.25, 1 and 2 mg/l in combination with BA at 0, 2, 3 and 4 mg/l. It was found that the MS medium supplemented with 4 mg/l BA could induce the shoot tips to produce 100% of new shoots with the highest number of 2 shoots/explant in 4 weeks of micropropagation. The chemical analysis of secondary metabolites using thin-layer chromatography (TLC) showed that the extracts from *in vitro* and natural leaves provided a band similar to that of beta-asarone.

¹ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

บทนำ

ว่านน้ำ (*Acorus calamus* Linn.) เป็นไม้ล้มลุก สูงประมาณ 1-2 เมตร จัดอยู่ในวงศ์ Araceae มีถิ่นกำเนิดทางใต้ของทวีปเอเชีย มักขึ้นอยู่บริเวณริมน้ำ เหง้ามีสารพวกเซสควิเทอเพนอยด์ (sesquiterpenoids) ซึ่งได้แก่ อะโคโรน (acorone), อะซาโรน (asarone) และ อะซาอัลดีไฮด์ (asaraldehyde) (Glasby, 1991) มีฤทธิ์ในการต้านโปรโตซัว ยีสต์ แบคทีเรีย และรา พวก *Fusarium* spp. ที่ก่อให้เกิดโรคต่างๆ ในพืชเศรษฐกิจ และมีฤทธิ์ในการขับไล่ยับยั้งการเจริญเติบโต ทำลายไข่ ฆ่าตัวอ่อน รบกวนการกินอาหารของแมลง (นันทวัน บุญยะประสงค์, 2543) ทำให้แมลงวันตัวผู้เป็นหมัน (Mathur and Saxena, 1975) เป็นพืชต่อแมลงศัตรูพืช เช่น *Sitophilus granaries* และ *S. oryzae* (Paneru et al., 1997) นอกจากนี้สามารถยับยั้งการเจริญของรา *Alternaria*, *Botrytis*, *Fusarium* และ *Septoria* (Mungkornasawakul et al., 2001) ดังนั้นจึงได้มีการนำเหง้าว่านน้ำมาสกัดสารเพื่อใช้ในการกำจัดแมลงศัตรูพืช แต่การสกัดสารจากเหง้าแต่ละครั้งต้องใช้เหง้าจำนวนมาก และถ้าหากความต้องการว่านน้ำในอนาคตมากขึ้น อาจทำให้ว่านน้ำในธรรมชาติไม่เพียงพอต่อความต้องการหรืออาจหมดไปได้แม้ว่าว่านน้ำสามารถขยายพันธุ์โดยเมล็ด แต่มีโอกาสเกิดขึ้นน้อยมากและใช้เวลานาน ส่วนการขยายพันธุ์โดยเหง้านั้นสามารถขยายพันธุ์ได้รวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตามเหง้าจะมีการพักตัวในฤดูแล้ง ดังนั้นการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชจึงเป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจเพื่อการขยายพันธุ์ว่านน้ำให้ได้จำนวนมาก ในระยะเวลาอันรวดเร็ว และใช้ในการเก็บรักษาพันธุ์พืชเพื่อการอนุรักษ์แหล่งพันธุกรรม นอกจากนี้เทคนิคการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชยังมีบทบาทสำคัญในการผลิตสารทุติยภูมิ (secondary metabolites) ซึ่งประสบความสำเร็จมาแล้วในเชิงพาณิชย์ในพืชบางชนิด เช่น การผลิตสารชิโคนิน (shikonin) จากการเพาะเลี้ยง *Lithospermum erythrorhizon* หรือการผลิตสาร

ทุติยภูมิเพื่อนำมาใช้เป็นสารกำจัดแมลงศัตรูพืช เช่น ผลิตสารไพรีทริน (pyrethrin) จากการเพาะเลี้ยงใบ *Chrysanthemum cinerariaefolium* (Zieg et al., 1983) และสารอะซาดิแรคติน (azadirachtin) จากการเพาะเลี้ยงใบของต้นสะเดา (*Azadirachta indica*) (Wewetzer, 1998)

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของ indole acetic acid (IAA) และ benzyl adenine (BA) ต่อการเจริญเติบโตของปลายยอดของว่านน้ำเพื่อการขยายพันธุ์ และเปรียบเทียบสารสกัดจากใบในธรรมชาติและใบของว่านน้ำที่ได้จากการเพาะเลี้ยงในสภาพปลอดเชื้อ โดยเฉพาะสารเบต้า-อะซาโรน ซึ่งมีฤทธิ์เป็นสารฆ่าแมลงได้ดังกล่าว

วิธีการทดลอง

การเพาะเลี้ยงปลายยอดจากตาเหง้า

นำเหง้าที่มีการแทงยอดยาวประมาณ 1.0-1.5 ซม. ลอกกาบใบออกแล้วล้างด้วยน้ำไหลเพื่อขจัดสิ่งสกปรกออก แช่ในสารละลายสเตรปโตมัยซิน (streptomycin) 0.2% เขย่านาน 5 นาที ขึ้นตอนต่อไปนี้ทำในตู้ปลอดเชื้อ โดยแช่เหง้าด้วยเมอร์คิวริกคลอไรด์ ($HgCl_2$) ความเข้มข้น 0.01% นาน 4 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่น นึ่งฆ่าเชื้อแล้ว 3 ครั้ง จากนั้นแช่ในกรดซิตริก (citric acid) ความเข้มข้น 0.01% นาน 5 นาที ตัดแต่งชิ้นส่วนเหง้าที่มีปลายยอดติดอยู่ให้มีฐานเหง้าขนาด 0.5x0.5 ซม. แล้วนำไปเลี้ยงบนอาหารสูตร MS (Murashige and Skooge, 1962) ซึ่งเติมสารควบคุมการเจริญเติบโต IAA ความเข้มข้น 0, 0.25, 0.5, 1 และ 2 มก./ล. ร่วมกับ BA ความเข้มข้น 0, 2, 3 และ 4 มก./ล. รวมทั้งหมด 20 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 10 ซ้ำ เลี้ยงภายใต้ความเข้มแสง 2,000 ลักซ์เป็นเวลา 16 ชั่วโมงต่อวัน อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส หลังจากเลี้ยงเป็นเวลา 4 สัปดาห์ บันทึกเปอร์เซ็นต์การเกิดยอดใหม่และราก จำนวนยอดใหม่และรากต่อชิ้นเนื้อเยื่อ รวมทั้งความยาวเฉลี่ยยอดใหม่

และราก วิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ SPSS วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย LSD (least significant difference) จากนั้นย้ายยอดทั้งหมดที่มีอายุ 4 สัปดาห์ไปเลี้ยงบนอาหารที่เหมาะสมต่อการชักนำให้เกิดยอดใหม่จำนวนมากสุดเพื่อเพิ่มจำนวนยอด จนกระทั่งมีอายุ 8 สัปดาห์ จึงนำไปที่ได้ไปสกัดและแยกสาร โดยเทคนิค thin-layer chromatography (TLC) ในการทดลองต่อไป

การวิเคราะห์สารทุติยภูมิ

นำใบว่านน้ำจากธรรมชาติ และใบว่านน้ำซึ่งได้จากการเพาะเลี้ยงปลายยอดจากเหง้าบนอาหาร MS ที่มี BA 4 มก./ล. ซึ่งให้จำนวนยอดมากที่สุดมาอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสจนแห้ง บดใบให้ละเอียด นำใบที่บดละเอียดหนัก 0.5 กรัม มาสกัดด้วยไคลคลอโรมีเทน 10 มล. เขย่าในอ่างน้ำแบบสั่น (ultrasonic bath) เป็นเวลา 15 นาที กรองด้วยกระดาษกรอง (Whatman No.1) นำสารละลายที่กรองได้ไปเขย่าในอ่างน้ำแบบสั่นอีกครั้งประมาณ 10 นาที เพื่อระเหยไคลคลอโรมีเทนออกจากสารละลายที่สกัดได้ นำสารละลายที่สกัดได้ไปแยกโดยวิธีโครมาโตกราฟีฝิวบาง (TLC) โดยใช้ซิลิกาเจลเป็น stationary phase และมีตัวทำละลายเคลื่อนที่ (mobile phase) คือ โทลูอีน : เอทิลอะซิเตท อัตราส่วน 93:7 โดยปริมาตร

บันทึกการเกิดแถบสารภายหลังการรมด้วยไอโอดีน

ผลการทดลอง

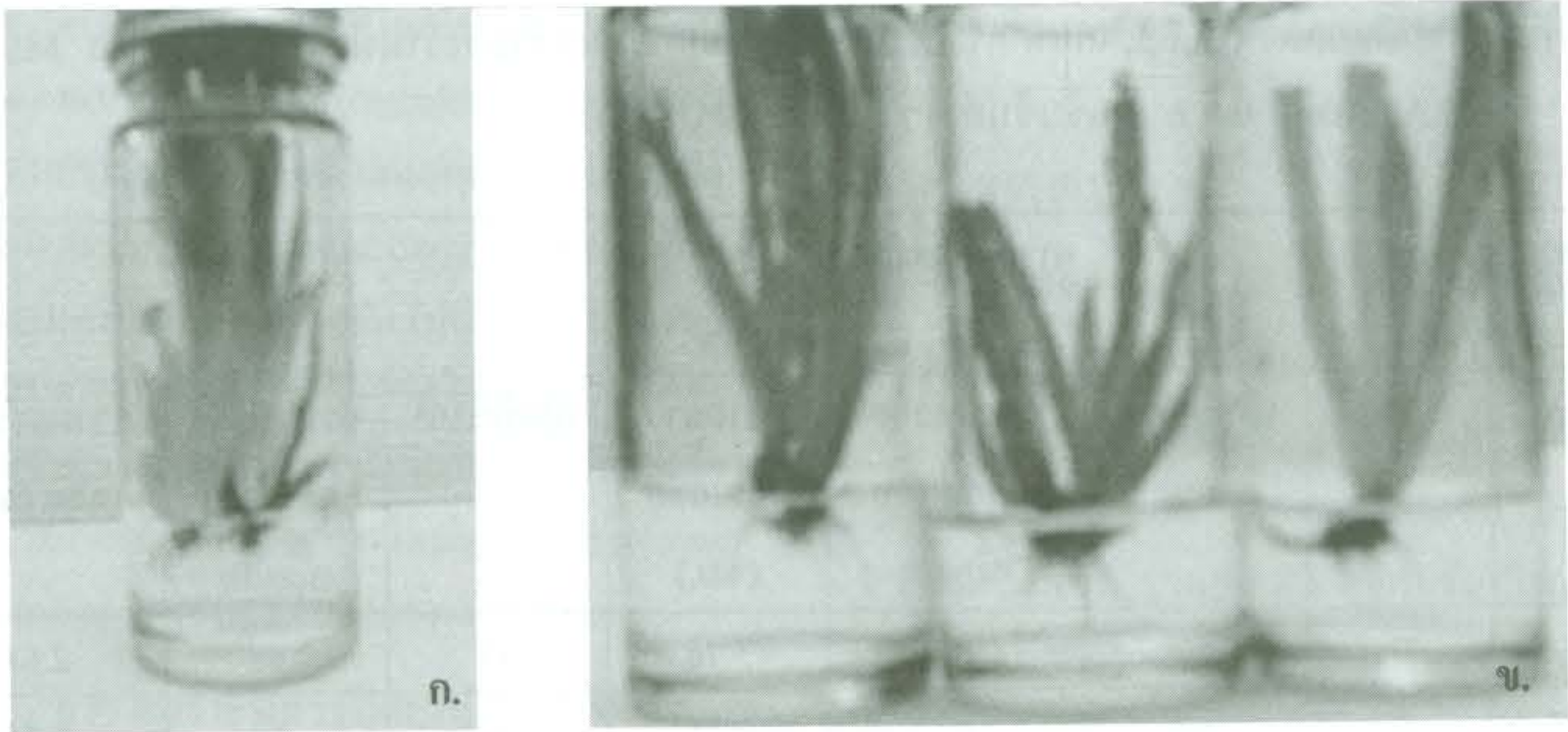
ผลของ IAA และ BA ต่อการเจริญเติบโตของปลายยอดจากเหง้า

จากการเพาะเลี้ยงปลายยอดจากเหง้าบนอาหารสูตร MS ที่มี IAA ความเข้มข้น 0, 0.25, 0.5, 1 และ 2 มก./ล. ร่วมกับ BA ความเข้มข้น 0, 2, 3 และ 4 มก./ล. รวมทั้งหมด 20 ชุดการทดลอง พบว่าทุกชุดการทดลองมีการเกิดยอดใหม่ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 3 และเมื่อเลี้ยงต่อไปจนถึงสัปดาห์ที่ 4 มีเปอร์เซ็นต์การเกิดยอดใหม่ในแต่ละชุดความเข้มข้นแตกต่างกันคือ 50-100% (ตารางที่ 1) โดยชุดความเข้มข้นที่มี BA 4 มก./ล. ให้เปอร์เซ็นต์การเกิดยอด 100% มีจำนวนยอดเฉลี่ยสูงสุด 2 ยอด/ชิ้นเนื้อเยื่อ (รูปที่ 1) แต่ไม่พบการเกิดราก ในขณะที่ชุดความเข้มข้นที่มี IAA อย่างเดียว 0, 0.25, 0.5, 1 และ 2 มก./ล. ชักนำให้เกิดทั้งยอดและรากได้แต่มีจำนวนยอดเฉลี่ยต่ำ ส่วนรากนั้นพบว่าชุดที่มี IAA ความเข้มข้น 2 มก./ล. ให้เปอร์เซ็นต์การเกิดรากสูงสุด 75% มีจำนวนรากเฉลี่ย 2 ราก/ชิ้นเนื้อเยื่อ ดังนั้นอาหาร MS ที่เติม BA 4 มก./ล. จึงเหมาะสมต่อการขยายพันธุ์เพื่อชักนำให้เกิดยอดจำนวนมาก

ตารางที่ 1 การเกิดยอดใหม่และรากจากการเพาะเลี้ยงปลายยอดจากเหง้าของว่านน้ำ บนอาหารสูตร MS ที่เติม IAA ร่วมกับ BA ความเข้มข้นต่างๆ เป็นเวลา 4 สัปดาห์

ความเข้มข้น (มก./ล.)		การเกิดยอดใหม่			การเกิดราก		
IAA	BA	เปอร์เซ็นต์	จำนวนยอด เฉลี่ยต่อชิ้น เนื้อเยื่อ	ความยาว ยอดเฉลี่ย (ซม.)	เปอร์เซ็นต์	จำนวนราก เฉลี่ยต่อชิ้น เนื้อเยื่อ	ความยาวราก เฉลี่ย (ซม.)
0	0	56	0.83 ^{ab}	3.76	33	0.67 ^b	2.63
0.25	0	50	1 ^{ab}	7.15	50	3 ^b	2.75
0.5	0	67	0.67 ^a	3.65	33	0.33 ^{ab}	1.5
1	0	67	0.67 ^a	6.3	67	0.67 ^b	0.4
2	0	100	1 ^{ab}	6.75	75	2 ^c	1.3
0	2	100	1 ^{ab}	4.83	0	0 ^a	0
0.25	2	100	1 ^{ab}	7.38	0	0 ^a	0
0.5	2	100	1 ^{ab}	6.85	0	0 ^a	0
1	2	100	1.43 ^{bc}	5.69	0	0 ^a	0
2	2	100	1 ^{ab}	6.47	0	0 ^a	0
0	3	100	1 ^{ab}	2.66	0	0 ^a	0
0.25	3	100	1.17 ^{bc}	6.01	0	0 ^a	0
0.5	3	100	1.14 ^{bc}	4.43	0	0 ^a	0
1	3	71	1 ^{ab}	4.41	0	0 ^a	0
2	3	100	1.2 ^{bc}	5.72	0	0 ^a	0
0	4	100	2.0 ^c	4.19	0	0 ^a	0
0.25	4	100	1.29 ^{bc}	4.76	0	0 ^a	0
0.5	4	100	1.33 ^{bc}	4.43	0	0 ^a	0
1	4	86	1.14 ^{ab}	3.54	0	0 ^a	0
2	4	100	1.43 ^{bc}	4.49	0	0 ^a	0

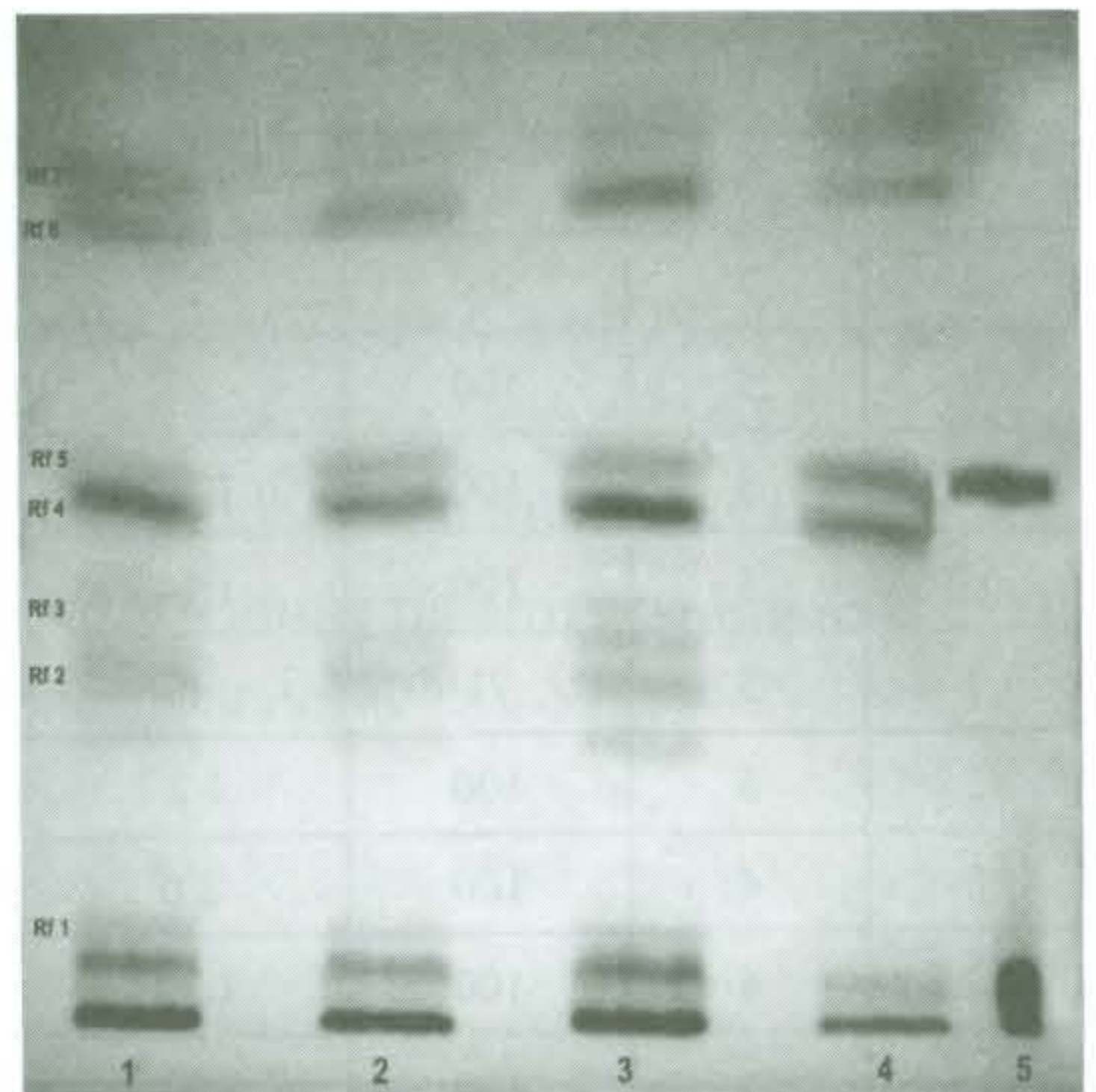
ตัวอักษรที่เหมือนกันในแถวดังหมายถึงไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อทดสอบด้วย LSD ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



รูปที่ 1 ต้นวุ้นน้ำที่ได้จากการเลี้ยงปลายยอดจากเหง้าบนอาหาร MS ในสภาพปลอดเชื้อ
 ก. การเกิดยอดจำนวนมาก บนอาหาร MS ที่มี BA 4 มก./ล. อายุ 4 สัปดาห์
 ข. การเกิดยอดและราก บนอาหาร MS ที่มี IAA 2 มก./ล. อายุ 4 สัปดาห์

การวิเคราะห์สารทุติยภูมิ

จากการเปรียบเทียบสารสกัดจากใบในธรรมชาติ และจากใบที่ได้จากการเพาะเลี้ยงปลายยอดจากเหง้าบนอาหารสูตร MS ที่มี BA 4 มก./ล. ที่แยกโดยเทคนิค TLC กับสารมาตรฐานเบต้า-อะซาโรน ซึ่งเป็นสารที่มีคุณสมบัติกำจัดแมลงศัตรูพืช พบว่าสารสกัดจากใบวุ้นน้ำที่ได้จากการเพาะเลี้ยงให้จำนวนแถบสารทั้งหมด 7 แถบ (รูปที่ 2) โดยมีค่า Rf ของแต่ละแถบ ดังนี้ $Rf\ 1 = 0.075$, $Rf\ 2 = 0.313$, $Rf\ 3 = 0.438$, $Rf\ 4 = 0.500$, $Rf\ 5 = 0.594$, $Rf\ 6 = 0.844$, และ $Rf\ 7 = 0.906$ ในขณะที่ใบจากธรรมชาติให้แถบสารทั้งหมดเพียง 4 แถบ คือ Rf 4, Rf 5, Rf 6 และ Rf 7 ซึ่งเหมือนกับใบที่ได้จากการเพาะเลี้ยง โดยสารสกัดจากใบทั้ง 2 แหล่งมีสารเบต้า-อะซาโรน (Rf 5) อยู่ด้วย



รูปที่ 2 โครมาโทแกรมของสารสกัดจากใบวุ้นน้ำโดยเทคนิค TLC
 หมายเลข 1,2,3 คือ สารสกัดจากใบที่เพาะเลี้ยงในสภาพปลอดเชื้อ
 หมายเลข 4 คือ สารสกัดจากใบในธรรมชาติ
 หมายเลข 5 คือ สารมาตรฐานเบต้า-อะซาโรน

สรุปและวิจารณ์

ในการศึกษาผลของ IAA และ BA ต่อการเจริญเติบโตของปลายยอดที่มีความยาว 1.0-1.5 ซม. จากเหง้าของว่านน้ำ โดยการเลี้ยงบนอาหาร MS ที่มี IAA (0, 0.25, 0.5, 1 และ 2 มก./ล.) ร่วมกับ BA (0, 2, 3 และ 4 มก./ล.) พบว่า BA 4 มก./ล. สามารถชักนำให้เกิดยอดใหม่เฉลี่ย 2 ยอด/ชิ้นเนื้อเยื่อ ภายใน 4 สัปดาห์ ซึ่งรวดเร็วกว่างานวิจัยของศรีสุลักษณ์ธีรานุพัฒนาและคณะ (2544) ที่ทำการเพาะเลี้ยงเหง้าที่มีขนาด 0.5 มม. บนอาหาร MS ที่มี NAA ร่วมกับ BA ความเข้มข้นอย่างละ 0, 0.5, 1 และ 2 มก./ล. ซึ่งต้องใช้เวลา 8 สัปดาห์ จึงจะเกิดยอดใหม่ได้และยอดใหม่ที่ได้เป็นยอดเดี่ยว รวมทั้งยังพบปัญหาการปนเปื้อนจากการฟอกฆ่าเชื้อตาในระยะนี้ค่อนข้างสูง ส่วนในชุดควบคุมซึ่งไม่มีทั้ง IAA และ BA สามารถชักนำปลายยอดให้เกิดทั้งยอดใหม่และรากได้ นั้นแสดงว่าภายในเนื้อเยื่อปลายยอดว่านน้ำมีสารควบคุมการเจริญเติบโตกลุ่มไซโทไคนินและออกซินอยู่ในสัดส่วนที่สมดุล อย่างไรก็ตามชุดการทดลองที่เติม IAA ชนิดเดียว 0.25, 0.5 และ 1 มก./ล. ก็พบการเกิดยอดใหม่และรากเช่นเดียวกัน แสดงว่าการเติม IAA ซึ่งเป็นสารกลุ่มออกซินในความเข้มข้นดังกล่าวไม่ได้รับกวนสภาพสมดุลแต่เมื่อมีการเติม BA ความเข้มข้น 2, 3 และ 4 มก./ล. ร่วมกับ IAA ความเข้มข้น 0, 0.25, 0.5 และ 2 มก./ล. พบว่าความเข้มข้นดังกล่าวชักนำปลายยอดให้เกิดยอดใหม่ได้ แต่ไม่พบการเกิดราก แสดงว่าความเข้มข้นของ IAA และ BA ที่เติมเข้าป่านั้น ทำให้สัดส่วนของไซโทไคนินมากกว่าออกซิน จึงส่งเสริมการเกิดยอด และยังพบว่า BA อย่างเดียว 4 มก./ล. ชักนำปลายยอดว่านน้ำให้เกิดยอดมากที่สุดเฉลี่ย 2 ยอดต่อชิ้นเนื้อเยื่อในเวลา 4 สัปดาห์ สอดคล้องกับงานวิจัยของศรีสุลักษณ์ธีรานุพัฒนาและคณะ (2544) ซึ่งพบว่า BA ส่งเสริมการเกิดยอดโดย BA 4 มก./ล. สามารถชักนำตาจากเหง้าของว่านน้ำให้เกิดยอดจำนวนมาก หรือ BA

20 μ M มีผลชักนำปลายยอดจากเหง้าของต้นใบพาย (*Cryptocoryne wendtii*) ให้เกิดยอดจำนวนมาก (Kane et al., 1999)

อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของไซโทไคนินที่สูงเกินไปนี้อาจมีผลยับยั้งการเกิดรากได้ ดังที่พบในการทดลองครั้งนี้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช โดยในกล้วยพบว่า BA 22 μ M ไม่ได้ยับยั้งการเกิดราก (Kanchanapoom et al., 2001) ในทำนองเดียวกัน ถ้าหากมีการเติม IAA มากเกินไป อาจมีผลยับยั้งการเกิดยอดได้ เช่น การเติม IAA 2 มก./ล. สามารถยับยั้งการเกิดยอดใหม่จากใบเลี้ยงแตงโม (*Cucumis metuliferus*) (Tabei et al., online) แต่ในการทดลองครั้งนี้พบว่า การเติม IAA 2 มก./ล. ให้กับปลายยอดจากเหง้าของว่านน้ำ ยังคงเกิดยอดได้ นั้นแสดงว่าพืชต่างชนิดกันหรือต่างชิ้นส่วนกัน อาจตอบสนองต่อผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตต่างกันรวมทั้งพบว่ามีปริมาณสารควบคุมการเจริญเติบโตภายในเนื้อเยื่อแตกต่างกันด้วย

สารเบต้า-อะซาโรน นอกจากจะพบในเหง้าของว่านน้ำแล้ว ยังพบในส่วนของใบด้วย จากการวิเคราะห์สารสกัดโดยเทคนิค TLC พบว่า ใบว่านน้ำที่ได้จากต้นอ่อนจากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ ยังคงสร้างสารเบต้า-อะซาโรนเช่นเดียวกับใบจากธรรมชาติ สอดคล้องกับงานวิจัยใน *Hypericum perforatum* ที่พบว่าสารที่สกัดจากยอดและต้นอ่อนที่ได้จากการเพาะเลี้ยงในสภาพปลอดเชื้อให้ปริมาณสารไฮเพอริซิน (hypericin) ใกล้เคียงกับต้นที่ปลูกในธรรมชาติ (Santarem and Astarita, 2003) นอกจากนี้ยังพบว่าใบว่านน้ำที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อในครั้งนี้ให้จำนวนแถบสารมากกว่าใบจากธรรมชาติ ส่วนกิตติศักดิ์ โชติกเดชามรงค์ (2546) พบว่าสารที่สกัดได้จากต้นหนอนตายหยากในธรรมชาติให้จำนวนแถบสารมากกว่าต้นหนอนตายหยากที่ได้จากการเพาะเลี้ยงในสภาพปลอดเชื้อ

ผลการวิจัยครั้งนี้สรุปได้ว่าการเลี้ยงปลายยอดในสภาพดังกล่าวข้างต้นสามารถขยายพันธุ์ต้นว่านน้ำในสภาพปลอดเชื้อได้ และเป็นการนำเสนอข้อมูลขั้นพื้นฐานถึงความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อไปประยุกต์ในการผลิตสารเบต้า-อะชาโรนจากว่านน้ำ อย่างไรก็ตาม ปริมาณการสร้างสารทุติยภูมิโดยเทคนิคการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อขึ้นอยู่กับสภาพที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง ได้แก่ สารควบคุมการเจริญเติบโตที่เติมเข้าไปในระหว่างการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่ออาจมีผลต่อการสร้างสารอัลคาลอยด์เพิ่มขึ้น เช่น ใน *Hyoscyamus muticus* เมื่อเติมออกซิน (Vanhala et al., 1998) หรือเติมไซโทไคนินใน *Catharanthus roseus* (Decendit et al., 1992) ในขณะที่ Arvy et al. (1994) พบว่าการสร้างสารอัลคาลอยด์เพิ่มขึ้น ถึงแม้ไม่มีการเติมออกซิน (2,4-D) นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของสูตรอาหารและแสง โดยพบว่าปริมาณการสร้างสารไอโซฟลาโวน (isoflavone) ของ *Genista* เพิ่มขึ้นเมื่อเลี้ยงในอาหารสูตร SH (Schenk and Hilderbrandt) ในสภาพมีแสงตลอดเวลา (Luczkiewicz and Glod, 2003) รวมทั้ง ชนิดของเนื้อเยื่อพืช เช่น การเพาะเลี้ยงรากจะเพิ่มการสร้างสารโทรเพนอัลคาลอยด์ (tropane alkaloid) มากกว่าการเพาะเลี้ยงแคลลัสใน *Hyoscyamus muticus* (Biondi et al., 2002) และการเติมสารเมทิลจัสโมเนต (methyl jasmonate) หรือ กรดซาลิซิลิก (salicylic acid) ที่ทำให้ *Scopolia parviflora* ผลิตสารโทรเพนอัลคาลอยด์เพิ่มมากขึ้น (Kang et al., 2004) ดังนั้นในงานวิจัยครั้งต่อไปควรจะศึกษาถึงสภาพของการเพาะเลี้ยงที่เหมาะสมต่อการผลิตสารเบต้า-อะชาโรนเพื่อให้ได้ปริมาณมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- กิตติศักดิ์ โชติกเดชาณรงค์. (2546). การขยายพันธุ์ต้นหนอนตายหยาก (*Stemona* sp.) ในสภาพปลอดเชื้อ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่.
- นันทวัน บุญยะประสงค์. (2543). สมุนไพรไม้พื้นบ้าน (4). คณะเภสัชศาสตร์. มหาวิทยาลัยมหิดล. กรุงเทพฯ.
- ศรีสุลักษณ์ ธีรานุกพัฒนา, ทศนีย์พร สุขโชติ และ อารยา จาติเสถียร (2544). การขยายพันธุ์ว่านน้ำ (*Acorus calamus* Linn.) ในสภาพปลอดเชื้อ. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27 หาดใหญ่ สงขลา. หน้า 633.
- Arvy, M.P. Imbault, N., Naudascher, F., Thiersault, M. and Doirean, P. (1994). 2,4-D and alkaloid accumulation in periwinkle cell suspensions. *Biochemie-Paris*. 76:410-416.
- Biondi, S., Scaramagli, S., Oksman-Caldentey, K. and Poli, F. (2002). Secondary metabolism in root and callus cultures of *Hyoscyamus muticus* L.: the relationship between morphological organisation and response to methyl jasmonate. *Plant Science*. 163(3): 563-569.
- Decendit, A., Liu, D., Ouelhazi, L. Doirean, P. Merillon, J.M. and Ridean, M. (1992). Cytokinin-enhanced accumulation of indole alkaloids in *Catharanthus roseus* cell cultures: the factors affecting the cytokinin response. *Plant Cell Rep*. 11:400-403.
- Glasby, J.S. (1991). *Dictionary of Plant Containing Secondary Metabolites*. London: Taylor & Francis, Inc.
- Kanchanapoom, K., Chanadang, N. and Thongma, S. (2001). Tissue culture of the banana (*Musa* spp.) from inflorescence and shoot tip. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 23(1):1-6.

- Kane, M. E., Davis, G. L., McConnell, D.B. and Gargiulo, J. A. (1999). *In vitro* propagation of *Cryptocoryne wendtii*. Aquatic Botany. 63:197-202.
- Kang, S.M., Jung, H.Y., Kang, Y.M., Yun, D.J., Bahk, J.D., Yang, J.K. and Choi, M.S. (2004). Effects of methyl jasmonate and salicylic acid on production of tropane alkaloids and expression of PMT and H6H in adventitious root cultures of *Scopolia parviflora*. Plant Science. 166(3):745-751.
- Luczkiewicz, M. and Glod, D. (2003). Callus cultures of *Genista* plants-*in vitro* material producing high amounts of isoflavones of phytoestrogenic activity. Plant Science. 165(5):1101-1108.
- Mathur, A.C. and Saxena, B.P. (1975). Intorduction of sterility in male houseflies by vapours of *Acorus calamus* L. oil. Die Naturwissenschaften. 12:576.
- Mungkornasawakul, P., Supyen, D., Dheeranu - pattana, S., Jatisatienr, C. and Jatisatienr, A. (2001). Inhibitory effect of *Acorus calamus* L. extract on some plant pathogenic molds. Proceedings of the World Congress on Medicinal and Aromatic Plants. Budapest, Hungary PIII/31.
- Murashige, T. and Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. Physiol. Plant. 15:473-497.
- Paneru, R.B., Le-Patourel, G.N. J. and Keuncedy. S.H. (1997). Toxicity of *Acorus calamus* rhizome powder from eastern Nepal to *Sitophilus granaries* L. and *Sitophilus oryzae* L. Crop Protection. 16:759-763.
- Santarem, E.R. and Astarita, L.V. (2003). Multiple shoot formation in *Hypericum perforatum* L. and hypericin production. Braz. J. Plant Physiol. 15(1):43-47.
- Tabei, Y., Yamada, T., Morishita, T. and Osaki, T. (no date). Plant regeneration via shoot organogenesis from cotyledons in two wild *Cucumis* species, *C. figarei* and *C. metuliferus*. [online]. Available: <http://ss.jircas.affrc.go.jp/engpage/jarq/32-4/tabei.htm>. (20 May 2004).
- Vanhala, L., Eava, M., Lapinjoki, S., Hiltunen, R. and Oksman, C.K.M. (1998). Effect of growth regulators on transformed root cultures of *Hyoscyamus muticus*. Journal Plant Physiol. 15:457-481.
- Wewetzer, A. (1998). Callus culture of *Azardirachta indica* and their potential for the production of azardirachtin. Phytoparasitica. 26(1):47-52.
- Zieg, R.G., Zito, S. W. and Staba, E.J. (1983). Selection of high pyrethrin producing tissue culture. Planta Medica. 48(2):88-91.



วิธีสมาชิกจำกัดกาเลอรคิน สำหรับปัญหามลพิษทางอากาศสถานะอยู่ตัว

สุวรรณา มูลสาร¹, สุพจน์ ไวทยางกูร²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ศึกษาเกี่ยวกับการหาค่าประมาณความเข้มข้นมลพิษทางอากาศสถานะอยู่ตัว โดยใช้วิธีสมาชิกจำกัดกาเลอรคินสำหรับการแก้ปัญหามลพิษทางอากาศในปริภูมิ 2 มิติ เมื่อความเข้มข้นของมลพิษที่ถูกปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดที่มีความสูง h ในทิศทางใต้ลม สมมติให้ที่ระดับความสูงของระดับชั้นบรรยากาศที่อุณหภูมิบรรยากาศเพิ่มขึ้นตามความสูงมีฟลักซ์ เป็นศูนย์ และที่ระดับพื้นดินมีฟลักซ์แปรผันตรงกับความเข้มข้นมลพิษ พัฒนาใช้โปรแกรม Matlab ในการคำนวณ พบว่าความเร็วลมและความสูงของแหล่งกำเนิดมีผลต่อการกระจายความเข้มข้นมลพิษ แสดงผลเฉลยตัวอย่างของปัญหาโดยกราฟ

ABSTRACT

This research is to study an approximate solution of a stationary problem of an air pollution. We use Galerkin finite element method to solve problem in two dimensional space in order to find an air pollution at height h above the ground. The flux of pollution is assumed to be zero at the inversion layer and assumed to be varies with the concentration. We implement the numerical method using Matlab. The velocity of wind and height of source are likely impact on the concentration dispersion of pollutants. An example problem is illustrated.

บทนำ

ในการพัฒนารูปแบบคณิตศาสตร์สำหรับพลศาสตร์มลพิษทางอากาศเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายและการแพร่กระจายมลพิษทางอากาศ ซึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในสมการ

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \frac{\partial \phi}{\partial x} + v \frac{\partial \phi}{\partial y} + (w - w_g) \frac{\partial \phi}{\partial z} - \mu \Delta \phi - \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + \sigma \phi = f \quad (1)$$

¹ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

² อาจารย์ประจำภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

เมื่อ φ เป็นความเข้มข้นของมลพิษทางอากาศ ที่จุด (x,y,z) ณ เวลา t ใด ๆ u,v,w เป็นส่วนประกอบของความเร็วลม $\mathbf{u} = (u,v,w)$ ตามลำดับ f เป็นกำลังส่งมลพิษจากแหล่งกำเนิด $w_g > 0$ เป็นค่าคงตัวของความเร็วมลพิษที่ตกลงสู่พื้นดินโดยแรงดึงดูดของโลก $\sigma > 0$ เป็นค่าคงตัวของอัตราการเปลี่ยนแปลงมลพิษทางอากาศ μ, ν เป็นสัมประสิทธิ์ของการแพร่ตามแนวระนาบและแนวตั้งตามลำดับ และ $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$

งานวิจัยนี้ จะศึกษาผลเฉลยเชิงตัวเลขของปัญหามลพิษทางอากาศในสมการ (1) ภายใต้สมมติฐานดังต่อไปนี้ คือ

1. แหล่งกำเนิดมลพิษมีความเข้มข้นอยู่ที่จุด $(0,0,h)$ และมีกำลังส่ง Q คงตัว นั่นคือ $f = Q\delta(x)\delta(y)\delta(z-h)$ เมื่อ $\delta(x)$ เป็นฟังก์ชันเดลตา
2. กระบวนการแพร่กระจายมลพิษอยู่ในภาวะอยู่ตัว นั่นคือ $\frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0$
3. ทิศทางของลมเกิดขึ้นในทิศทางบวกกับแกน X กล่าวคือ $u = u(z) > 0$ เมื่อ $v = w = 0$
4. ในแนวแกนนอน การพามีความเด่นชัดมากกว่าการแพร่ นั่นคือ

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} \gg \mu \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}$$

5. ที่ระดับพื้นดิน $z = 0$ มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นมลพิษ (ฟลักซ์) เป็น $\alpha \varphi$ นั่นคือ $\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \alpha \varphi$ และระดับความสูง $H (z = H)$ ซึ่งเป็นความสูงของระดับชั้นบรรยากาศที่อุณหภูมิบรรยากาศเพิ่มขึ้นตามความสูงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นมลพิษเป็นศูนย์ นั่นคือ $\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$
6. สัมประสิทธิ์การแพร่ $\mu = k_0 u$ เมื่อ k_0 เป็นค่าคงตัวมากกว่าศูนย์ และ $\nu = \nu(z)$

ภายใต้สมมติฐานข้างต้น สมการ (1) จะอยู่ในรูป

$$u(z) \frac{\partial \varphi}{\partial x} - w_g \frac{\partial \varphi}{\partial z} - \mu \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu(z) \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \sigma \varphi = 0 \quad (2)$$

สำหรับทุก $0 < x, 0 < y, 0 < z < H$

เงื่อนไขขอบบนแกน Z คือ

$$\varphi(0, y, z) = \frac{Q\delta(y)\delta(z-h)}{u(h)} \quad \text{สำหรับทุก } 0 < y, 0 < z < H \quad (3)$$

เมื่อ h คือความสูงของแหล่งกำเนิด และ Q เป็นอัตราการกระจายมลพิษของแหล่งกำเนิด เงื่อนไขขอบบนพื้นดินและระดับชั้นบรรยากาศที่อุณหภูมิบรรยากาศเพิ่มขึ้นตามความสูง คือ

$$\frac{\partial \varphi(x, y, 0)}{\partial z} = \alpha \varphi(x, y, 0) \quad \text{สำหรับทุก } 0 < x, 0 < y \quad (4)$$

และ

$$\frac{\partial \varphi(x, y, H)}{\partial z} = 0 \quad \text{สำหรับทุก } 0 < x, 0 < y \quad (5)$$

ตามลำดับ

เมื่อกำหนดให้ $u = u(z)$, $v = v(z)$ และ $\mu = k_0 u$ โดยที่ k_0 เป็นค่าคงตัวมากกว่าศูนย์ แล้วผลเฉลยของปัญหาในสมการ (2)-(5) สามารถแสดงให้อยู่ในรูป

$$\varphi(x, y, z) = \bar{\varphi}(x, z) \cdot P(x, y) \quad (6)$$

เมื่อ

$$P(x, y) = \frac{1}{2\sqrt{\pi k_0 x}} e^{-y^2/(4k_0 x)} \quad (7)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} P(0, y) &= \delta(y) & \text{เมื่อ } x = 0 \\ P(x, y) &= 0 & \text{เมื่อ } y \rightarrow +\infty \end{aligned}$$

และ $\bar{\varphi}(x, z)$ เป็นผลเฉลยของปัญหา

$$u(z) \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial x} - w_g \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(v(z) \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial z} \right) + \sigma \bar{\varphi} = 0 \quad \text{สำหรับทุก } 0 < x, 0 < z < H \quad (8)$$

เงื่อนไขขอบบนแกน Z คือ

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

เงื่อนไขขอบบนระดับพื้นดินและระดับชั้นบรรยากาศที่อุณหภูมิบรรยากาศเพิ่มขึ้นตามความสูง คือ

$$\frac{\partial \bar{\varphi}(x, 0)}{\partial z} = \alpha \bar{\varphi}(x, 0) \quad \text{สำหรับทุก } 0 < x \quad (10)$$

และ

$$\frac{\partial \bar{\varphi}(x, H)}{\partial z} = 0 \quad \text{สำหรับทุก } 0 < x \quad (11)$$

ตามลำดับ

ในการแก้ปัญหาลักษณะแรกจะทำการเปลี่ยนตัวแปรของปัญหาในสมการ (2) - (5) ให้อยู่ในรูปแบบไร้มิติ

โดยการหารตัวแปร $x, y, z, h, \varphi, u, \mu, v, w_g$ และ σ ด้วยนิพจน์ $\frac{H^2 u(H)}{v(H)}, H, H, H, \frac{Q}{u(H)H}, u(H),$

$v(H), v(H), \frac{v(H)}{H}$ และ $\frac{v(H)}{H^2}$ ตามลำดับ เพื่อความสะดวกจะขอใช้ตัวแปรเดิมในรูปแบบไร้มิติสำหรับปัญหาในปริภูมิ 3 มิติ จะได้ระบบสมการเป็น

$$u(z)\frac{\partial\varphi}{\partial x}-w_g\frac{\partial\varphi}{\partial z}-\mu\frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2}-\frac{\partial}{\partial z}\left(v(z)\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)+\sigma\varphi=0 \quad (12)$$

สำหรับทุก $0 < x, 0 < y, 0 < z < 1$

เงื่อนไขขอบบนแกน Z คือ

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

เงื่อนไขขอบบนพื้นดินและระดับชั้นบรรยากาศที่อุณหภูมิบรรยากาศเพิ่มขึ้นตามความสูง คือ

$$\frac{\partial\varphi(x, y, 0)}{\partial z} = \alpha\varphi(x, y, 0) \quad \text{สำหรับทุก } 0 < x, 0 < y \quad (14)$$

และ

$$\frac{\partial\varphi(x, y, 1)}{\partial z} = 0 \quad \text{สำหรับทุก } 0 < x, 0 < y \quad (15)$$

ตามลำดับ

การประมาณค่าการกระจายของจุดต่อแนวตั้ง

การกระจายของจุดต่อแนวตั้งหนาแน่นตรงกลางแหล่งกำเนิดสามารถแสดง ด้วยสมการต่อไปนี (Runca and Sardei, 1975)

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

เมื่อ

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

โดยที่ Δz_s เป็นความกว้างของช่วงตอนแรกทางบนและล่างจากแหล่งกำเนิด A_1 และ A_2 เป็นพารามิเตอร์ของการกระจาย n เป็นจำนวนจุดต่อในแนวตั้ง Δz_s และ n เป็นพารามิเตอร์อิสระเมื่อกำหนดค่า Δz_s และ n ให้แล้วค่าของ A_1 และ A_2 จะเป็นค่าที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ในสมการ (16) และ (17) การเลือก Δz_s จะเลือก

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

ความกว้างของช่วงในแนวดิ่ง Δz_i มีค่าเปลี่ยนแปลงโดยการกำหนดค่าของ Δz_s และ n ค่า Δz_i และ z_k รวมทั้ง A_1 และ A_2 เป็นการคำนวณโดยระเบียบวิธีทำซ้ำจากความสัมพันธ์ในสมการ (16) และ (17) ความเข้มข้นของมลพิษ ณ แหล่งกำเนิด เป็นการคำนวณค่าประมาณเชิงตัวเลขโดยฟังก์ชันเซลล์ตา ดังสมการ

$$\bar{\varphi}(0, z) = \begin{cases} 0 & , 0 \leq z < h - \frac{\Delta z_s}{2} \\ \frac{1}{u_s \Delta z_s} & , h - \frac{\Delta z_s}{2} \leq z \leq h + \frac{\Delta z_s}{2} \\ 0 & , h + \frac{\Delta z_s}{2} < z \leq 1 \end{cases} \quad (18)$$

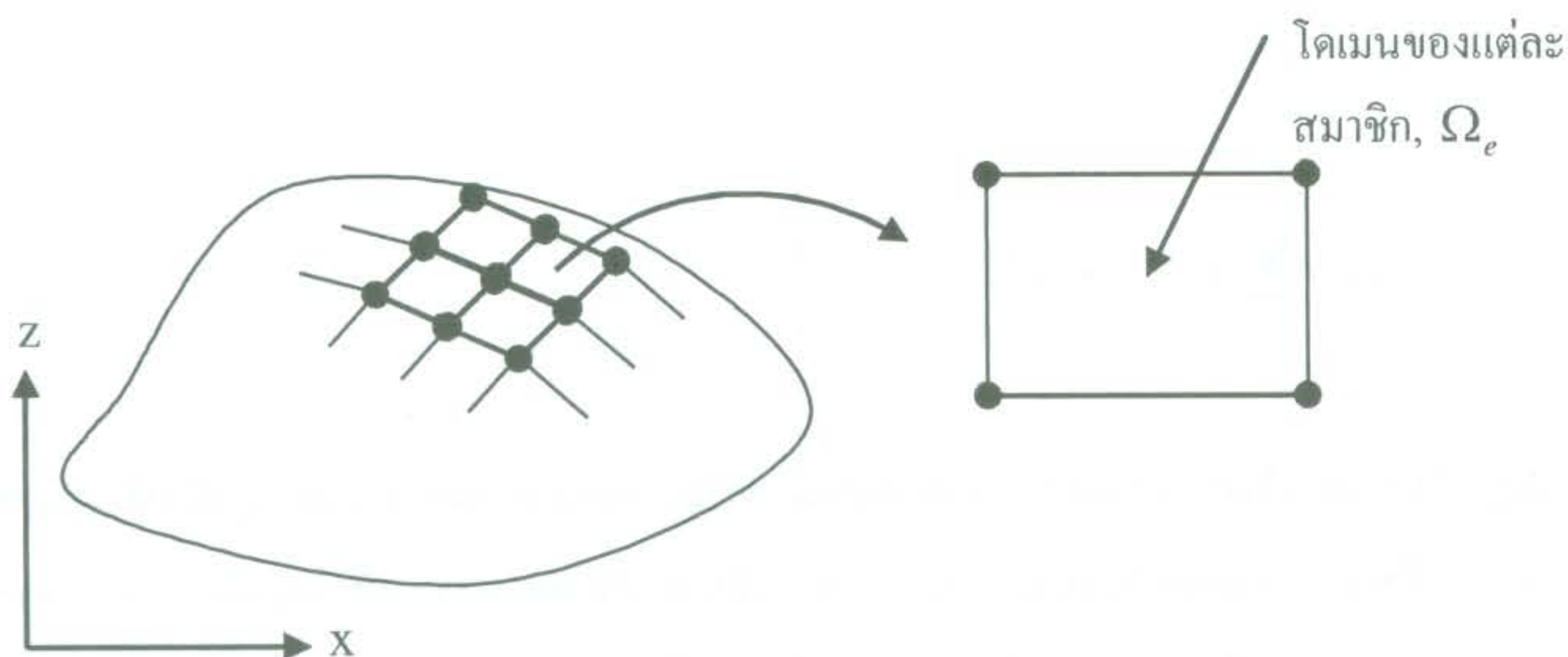
เมื่อ $u_s = u_k$ ณ แหล่งกำเนิด

ผลเฉลยค่าประมาณเชิงตัวเลข

ให้ $\Omega = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid 0 < x, 0 < y, 0 < z < 1\}$ เป็นโดเมนของปัญหาในปริภูมิ 3 มิติจะแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นสองส่วน คือ $\Omega_1 = \{(x, z) \in \mathbb{R}^2 \mid 0 < x, 0 < z < 1\}$ และ $\Omega_2 = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid 0 < x, 0 < y\}$ เพื่อให้สอดคล้องกับปัญหาในสมการ (12) ซึ่งแต่ละโดเมนเป็นขอบเขตของปัญหาในปริภูมิ 2 มิติ การหาผลเฉลยค่าประมาณเชิงตัวเลขของปัญหามี 3 ขั้นตอน

ขั้นตอน 1

ให้ $\Omega_1 = \{(x, z) \in \mathbb{R}^2 \mid 0 < x, 0 < z < 1\}$ เป็นโดเมนของปัญหา จะแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นแต่ละสมาชิกสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังภาพ



ภาพที่ 1 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นแต่ละสมาชิก

ให้

$$L(\bar{\varphi}) \equiv u(z) \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial x} - w_s \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial z} - \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial z} v(z) \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial z} + \sigma \bar{\varphi} = 0 \quad (19)$$

เมื่อ L คือตัวดำเนินการเชิงอนุพันธ์ (differential operator) และ $\bar{\varphi}$ คือผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหา สมมติให้ $\hat{\varphi}$ เป็นผลเฉลยค่าประมาณของ $\bar{\varphi}$ ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในสมาชิกและตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อ ในรูปแบบ

$$\bar{\varphi}(x, z) \approx \hat{\varphi}(x, z) = \sum_{j=1}^n \varphi_j(x) \phi_j(z) \quad (20)$$

เมื่อ $j = 1, 2, \dots, n$ คือจำนวนจุดต่อของสมาชิก φ_j คือฟังก์ชันการประมาณภายในสมาชิก ขึ้นกับตัวแปร x ณ จุดต่อที่ j และ ϕ_j คือฟังก์ชันพื้นฐานของสมาชิกขึ้นกับตัวแปร z ณ จุดต่อที่ j ดังนั้นเมื่อแทนค่า $\bar{\varphi}$ ด้วย $\hat{\varphi}$ ลงในสมการเชิงอนุพันธ์ จะพบว่า

$$L(\hat{\varphi}) = R \quad (21)$$

เมื่อ R คือ เศษตกค้าง(residual) กล่าวคือ ค่า R ที่ได้จะเป็นค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการใช้ผลเฉลยค่าประมาณ $\hat{\varphi}$ ซึ่งไม่ใช่ผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหานี้ จะได้

$$R = L(\hat{\varphi}) = L\left(\sum_{j=1}^n \varphi_j(x) \phi_j(z)\right) \quad (22)$$

จากวิธีกาเลอรืคิน(Galerkin) จะได้ว่า

$$\int_0^1 R \omega_i(z) dz = 0 \quad (23)$$

เมื่อ $i = 1, 2, \dots, n$ และ $\omega_i(z)$ เป็นฟังก์ชันน้ำหนักของการประมาณภายในสมาชิก แทนค่า R ด้วย $L(\hat{\varphi})$ ลงในสมการ (23) จะได้

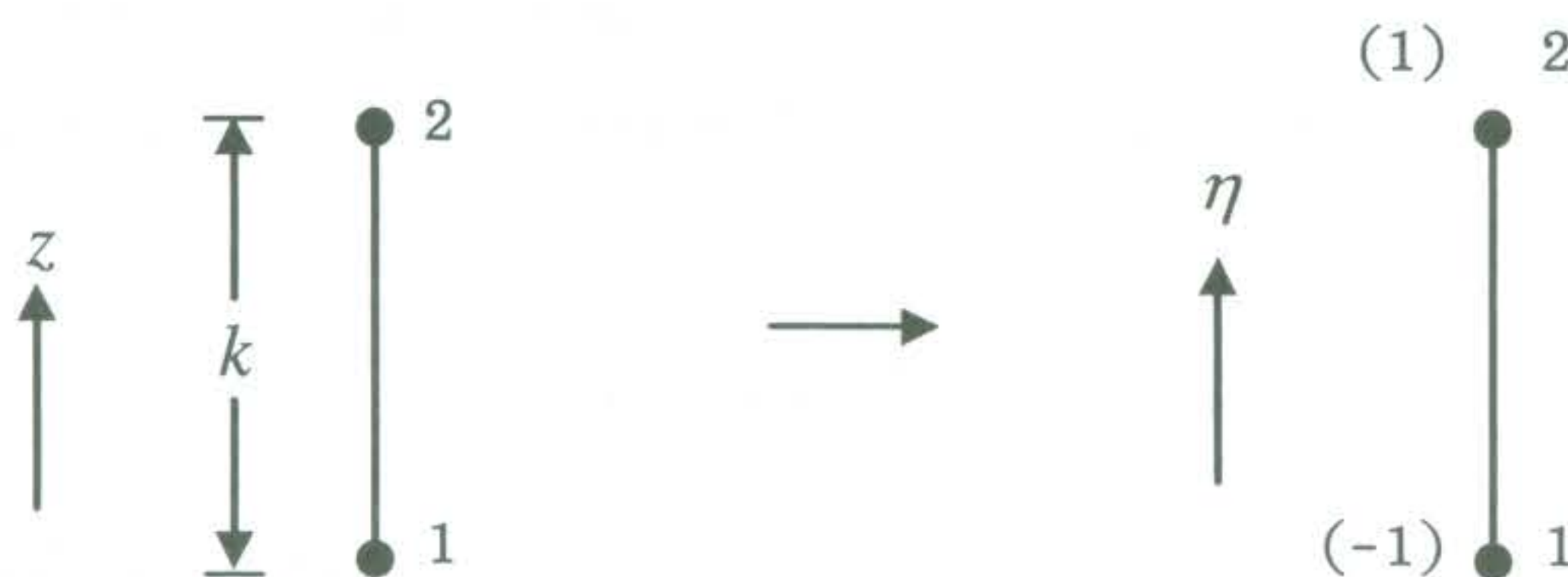
$$\int_0^1 \left(u(z) \frac{\partial \hat{\varphi}}{\partial x} - w_s \frac{\partial \hat{\varphi}}{\partial z} - \frac{\partial \hat{\varphi}}{\partial z} v(z) \frac{\partial \hat{\varphi}}{\partial z} + \sigma \hat{\varphi} \right) \omega_i(z) dz = 0 \quad (24)$$

เมื่อ $i = 1, 2, \dots, n$

จากการอินทิเกรต โดยการอินทิเกรตทีละส่วนและเงื่อนไขขอบ จะได้

$$\begin{aligned} & \int_0^1 u(z) \frac{\partial \hat{\varphi}}{\partial x} \omega_i(z) dz - w_s \int_0^1 \frac{\partial \hat{\varphi}}{\partial z} \omega_i(z) dz + \int_0^1 v(z) \frac{\partial \hat{\varphi}}{\partial z} \frac{\partial \omega_i(z)}{\partial z} dz \\ & + \int_0^1 \sigma \hat{\varphi} \omega_i(z) dz + \alpha v(z) \hat{\varphi}(x, z) \omega_i(z) \Big|_{z=0} = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

พิจารณาแต่ละสมาชิกในแนวแกน z ที่มีความยาว k และประกอบด้วย 2 จุดต่อในทุกสมาชิกเนื่องจากผลลัพธ์ใช้ได้สำหรับทุกช่วงปิดในแนวแกน z ดังนั้นการอินทิเกรตในสมการข้างต้น สามารถเปลี่ยนระบบพิกัดใหม่โดยเปลี่ยนจากระบบพิกัด z เป็นระบบพิกัดธรรมชาติ η ในแต่ละสมาชิกได้ ดังภาพ



ภาพที่ 2 แสดงการแปลงสมาชิกจากระบบพิกัด z ไปยังสมาชิกในระบบพิกัดธรรมชาติ η

ด้วยความสัมพันธ์

$$\frac{z}{k} = \frac{\eta + 1}{2} \quad \text{เมื่อ } -1 < \eta < 1$$

กำหนดให้ฟังก์ชันพื้นฐานของสมาชิกในระบบพิกัด อยู่ในรูปแบบต่อไปนี้

$$\phi_j(z) = 1 - \frac{z}{k} \quad \text{เมื่อ } 0 < z < k \quad (26)$$

$$\phi_{j+1}(z) = \frac{z}{k} \quad \text{เมื่อ } 0 < z < k \quad (27)$$

เนื่องจากปัญหานี้จะศึกษาระบบพิกัด z ในระบบพิกัดธรรมชาติ η ดังนั้นฟังก์ชันพื้นฐานใหม่ของสมาชิกจะอยู่ในรูปแบบ

$$\phi_j(\eta) = \frac{1}{2}(1 - \eta) \quad \text{เมื่อ } -1 < \eta < 1 \quad (28)$$

$$\phi_{j+1}(\eta) = \frac{1}{2}(1 + \eta) \quad \text{เมื่อ } -1 < \eta < 1 \quad (29)$$

จะเลือกฟังก์ชันน้ำหนัก $\omega_i \neq \phi_j$ ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่าเพโทรฟ-กาเลอร์กิน (Petrov-Galerkin) โดยจะเลือกฟังก์ชันน้ำหนักอยู่ในรูปแบบ (Bradford and Katopodes., 2000)

$$\omega_i(\eta) = \phi_j(\eta) + \frac{\Delta x}{\sqrt{15}} \frac{d\phi_j(\eta)}{d\eta} \quad \text{เมื่อ } -1 < \eta < 1 \quad (30)$$

$$\omega_{i+1}(\eta) = \phi_{j+1}(\eta) + \frac{\Delta x}{\sqrt{15}} \frac{d\phi_{j+1}(\eta)}{d\eta} \quad \text{เมื่อ } -1 < \eta < 1 \quad (31)$$

ดังนั้น จะได้รูปแบบของการอินทิเกรตในสมการ (25) ในระบบพิกัด สำหรับแต่ละสมาชิกเป็น

$$\int_{-1}^1 \left[u(\eta) \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial x} \omega_i(\eta) - w_s \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial z} \omega_i(\eta) - v(\eta) \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial z} \frac{\partial \omega_i(\eta)}{\partial z} + \sigma \hat{\phi} \omega_i(\eta) \right] \frac{k}{2} d\eta + \alpha v(\eta) \hat{\phi}(x, \eta) \omega_i(\eta) \Big|_{\eta=-1} = 0 \quad (32)$$

เมื่อ

$$\frac{\partial \hat{\phi}}{\partial z} = \sum_{j=1}^n \phi_j(x) \frac{d\phi_j(\eta)}{d\eta} \frac{d\eta}{dz} = \frac{2}{k} \sum_{j=1}^n \phi_j(x) \frac{d\phi_j(\eta)}{d\eta} \quad (33)$$

จากสมการ (32) มีค่าความเข้มข้นมลพิษที่ไม่รู้ค่าจำนวน n ค่าที่จุดต่อ ดังนั้นจึงต้องการทำให้อยู่ในรูป n สมการ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์
จะได้

$$[A] \left\{ \frac{d\phi}{dx} \right\} + [B] \{\phi\} = 0 \quad (34)$$

เมื่อ

$$A_{ij} = \int_{-1}^1 u(\eta) \phi_j(\eta) \omega_i(\eta) \frac{k}{2} d\eta$$

และ

$$B_{ij} = -w_s \int_{-1}^1 \frac{d\phi_j(\eta)}{d\eta} \omega_i(\eta) d\eta + \int_{-1}^1 v(\eta) \frac{d\phi_j(\eta)}{d\eta} \frac{d\omega_i(\eta)}{d\eta} \frac{2}{k} d\eta + \sigma \int_{-1}^1 \phi_j(\eta) \omega_i(\eta) \frac{k}{2} d\eta + \alpha v(\eta) \phi_j(\eta) \omega_i(\eta) \Big|_{\eta=-1}$$

ซึ่งระเบียบวิธีนี้จะเป็นการหาสมการเมทริกซ์โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องแบบย้อนหลังสำหรับระบบสมการเชิงเส้น ในแนวแกน ซึ่งจะก่อให้เกิดสมการที่ขึ้นอยู่กับเมทริกซ์ และ และหาผลเฉลยจากตัวไม่ทราบค่า ระดับ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการเมทริกซ์ได้ดังนี้คือ

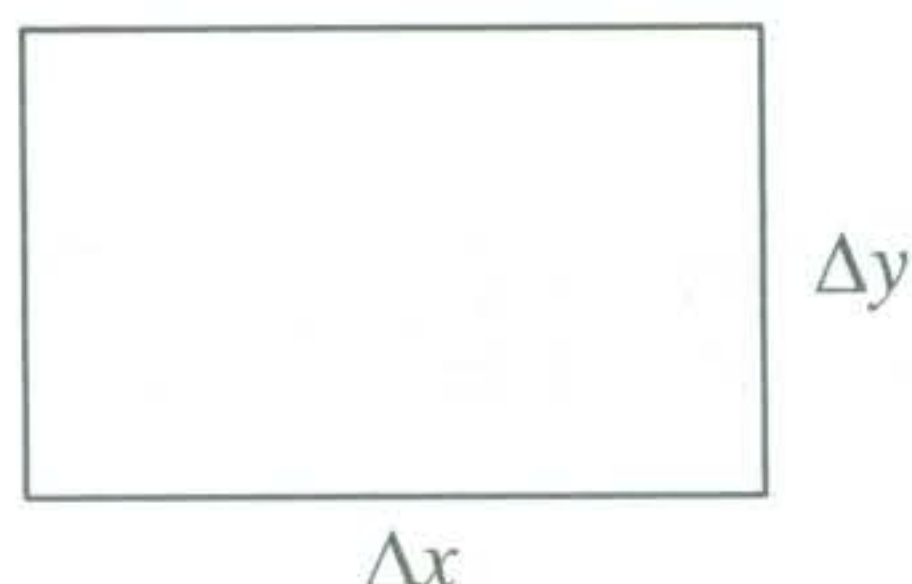
$$[A]_m \left\{ \frac{\phi_{m+1} - \phi_m}{\Delta x} \right\} + [B]_m \{\phi_{m+1}\} = 0 \quad (35)$$

หรือ

$$([A]_m + \Delta x [B]_m) \{\phi_{m+1}\} = [A]_m \{\phi_m\} \quad (36)$$

ขั้นตอน 2

ให้ $\Omega_2 = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid 0 < x, 0 < y\}$ เป็นโดเมนของปัญหา ในทำนองเดียวกันจะแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นแต่ละสมาชิกสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังภาพ



ภาพที่ 3 การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นแต่ละสมาชิกสี่เหลี่ยมผืนผ้า

กำหนดให้ k_0 เป็นค่าคงที่มากกว่าศูนย์ และ x, y เป็นพิกัดใดๆ ที่มากกว่าศูนย์และขนาดของ $\Delta x, \Delta y$ มากกว่าศูนย์ โดยที่

$$x_{i+1} = x_i + \Delta x \quad (37)$$

$$y_{j+1} = y_j + \Delta y \quad (38)$$

ดังนั้นสามารถหาค่าเมทริกซ์ $[P]$ ได้จากผังลำดับขั้นตอนดังนี้

$$P_{ij} = \frac{1}{2\sqrt{\pi k_0 x_i}} \cdot e^{-\frac{y_j^2}{4x_i}} \quad (39)$$

ขั้นตอน 3

ให้ $\Omega = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid 0 < x, 0 < y, 0 < z < 1\}$ เป็นโดเมนของปัญหาในปริภูมิ 3 มิติ เนื่องจากผลเฉลยค่าประมาณเชิงตัวเลขของปัญหาในสมการ (12)-(15) สามารถแสดงให้อยู่ในรูป

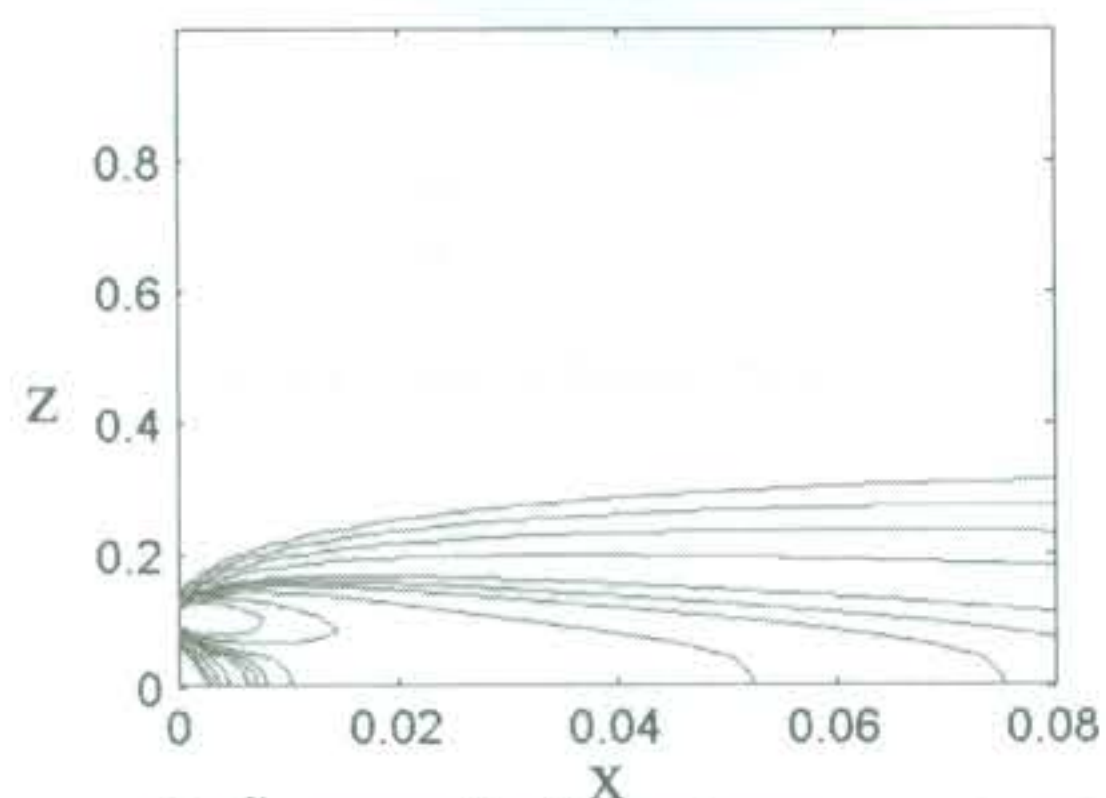
$$\varphi(x, y, z) = \bar{\varphi}(x, z) \cdot P(x, y)$$

เมื่อกำหนดให้ $u = u(z), v = v(z)$ และ $\mu = k_0 u$ โดยที่ k_0 เป็นค่าคงตัวมากกว่าศูนย์

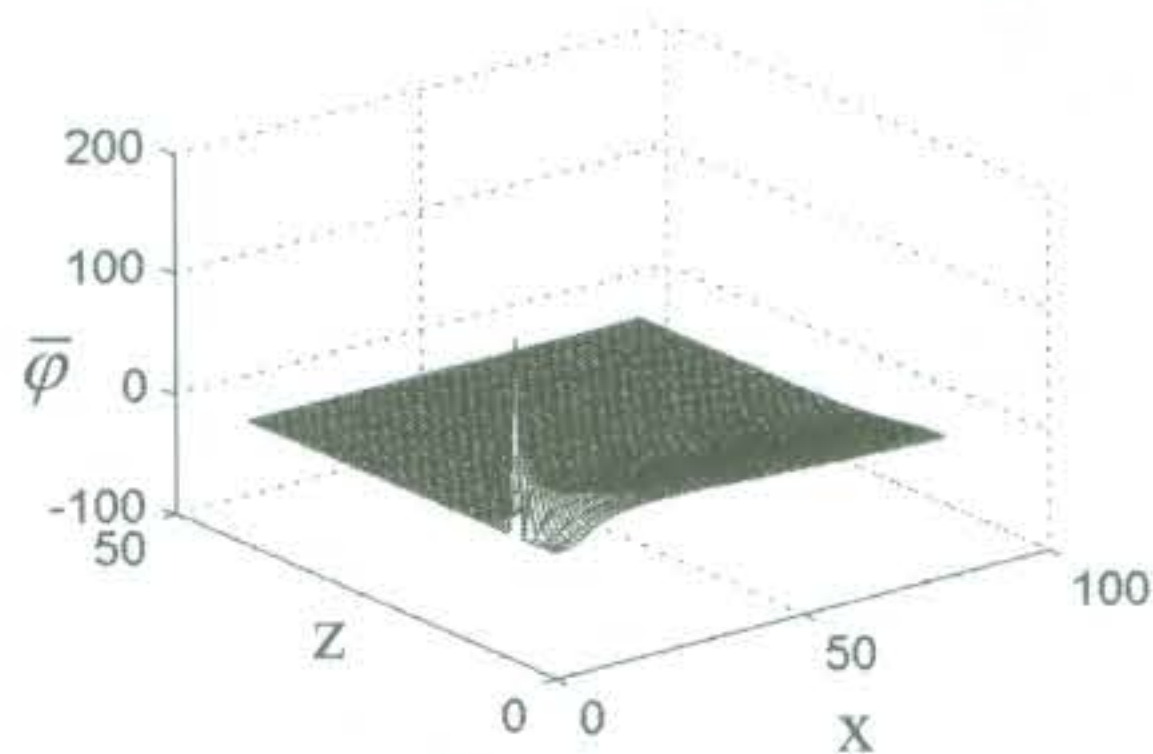
ดังนั้น ผลเฉลยของปัญหาในปริภูมิ 3 มิติ จะอยู่ในรูปผลคูณของผลเฉลยในขั้นตอน 1 และขั้นตอน 2 ท้ายสุด จะได้ $\varphi(x, y, z)$ เป็นผลเฉลยค่าประมาณเชิงตัวเลขของปัญหามลพิษทางอากาศสถานะอยู่ตัว ในปริภูมิ 3 มิติ ตามต้องการ

ผลการทดลองเชิงตัวเลข

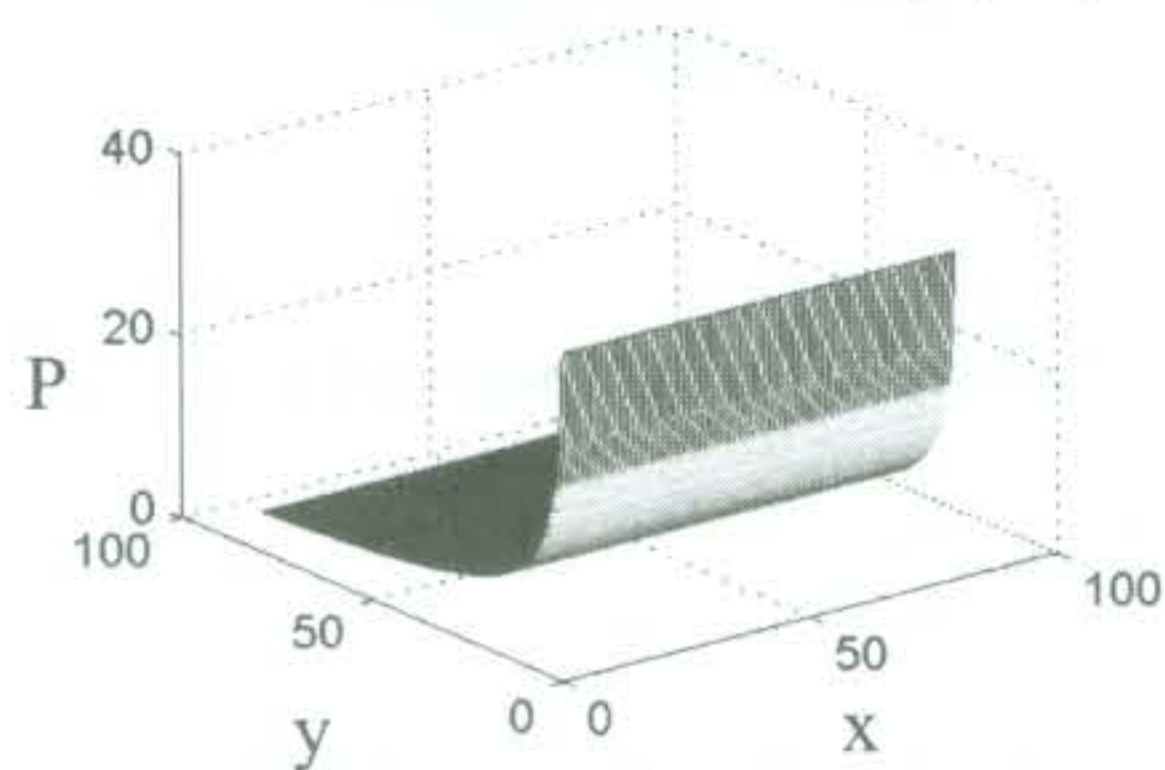
ในการคำนวณจะเขียนโปรแกรมคำนวณและเขียนกราฟโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Matlab รุ่น 12 โดยกำหนดให้ $n = 41$, $u(z) = z^r$, $v(z) = z$, $\Delta z_s = 0.018$, $x = 80\Delta x$, $\Delta x = 10^{-3}$, $\Delta y = 10^{-3}$



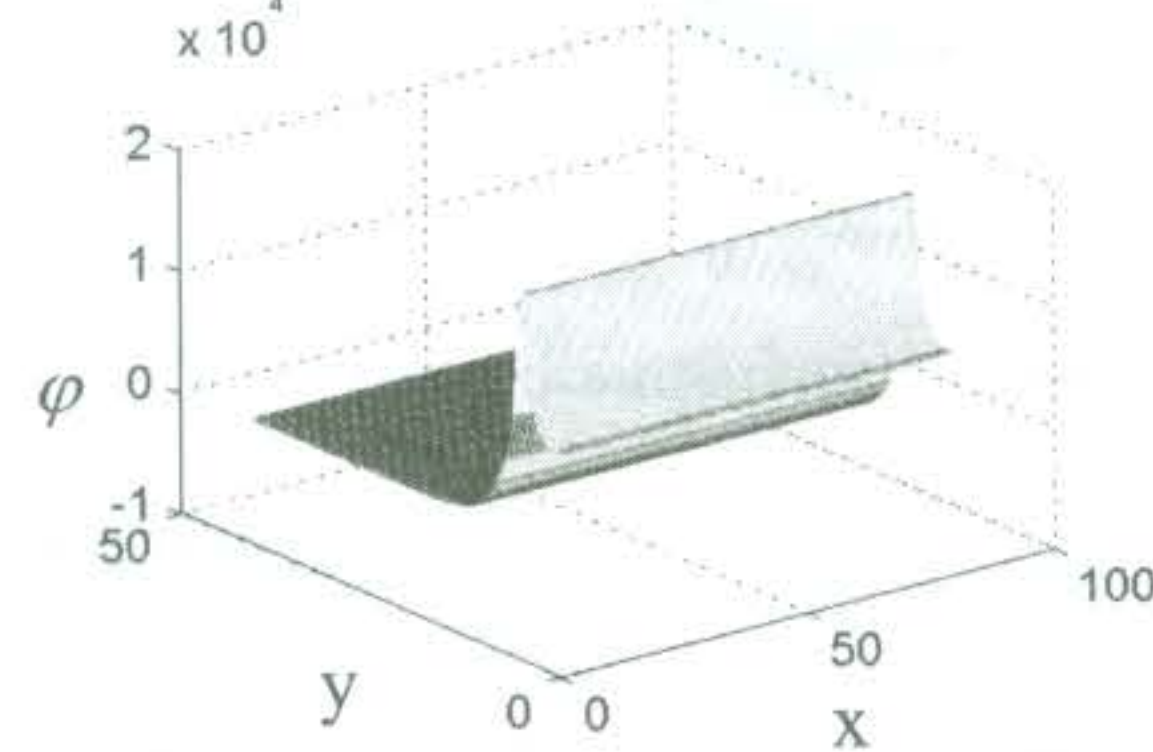
เส้นชั้นความเข้มข้นมลพิษของ $\bar{\varphi}(x, z)$



พื้นผิวความเข้มข้นมลพิษของ $\bar{\varphi}(x, z)$
 $\times 10^4$

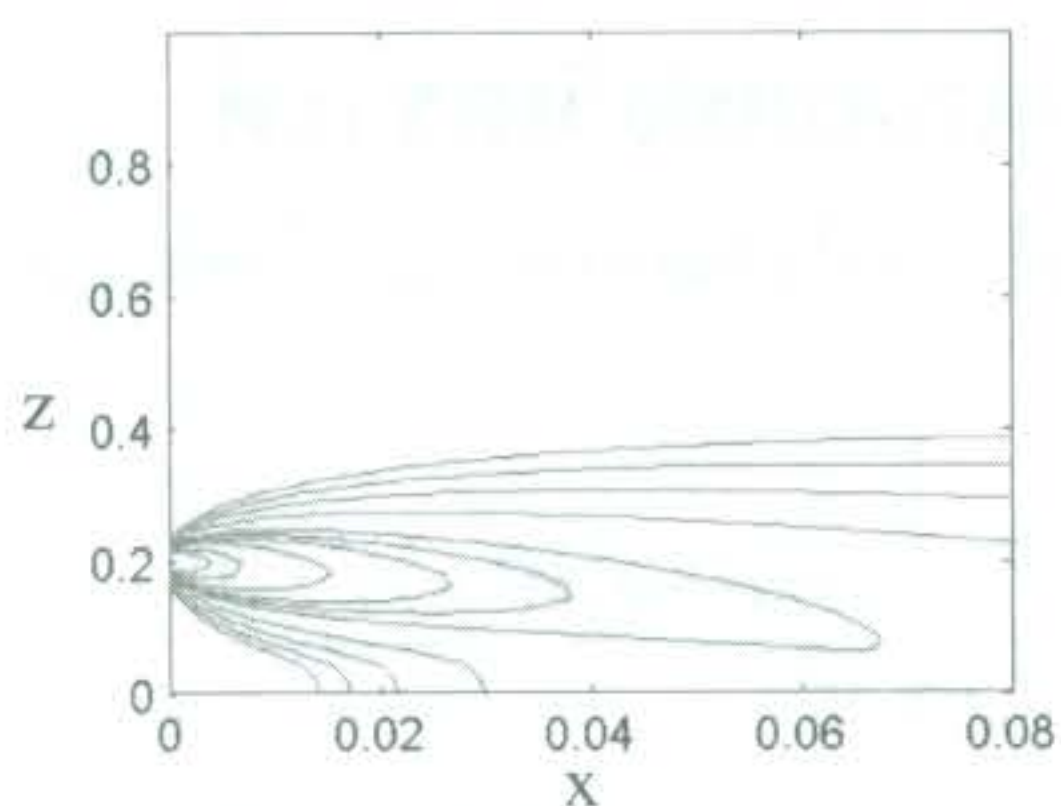


พื้นผิวความเข้มข้นมลพิษของ $P(x, y)$

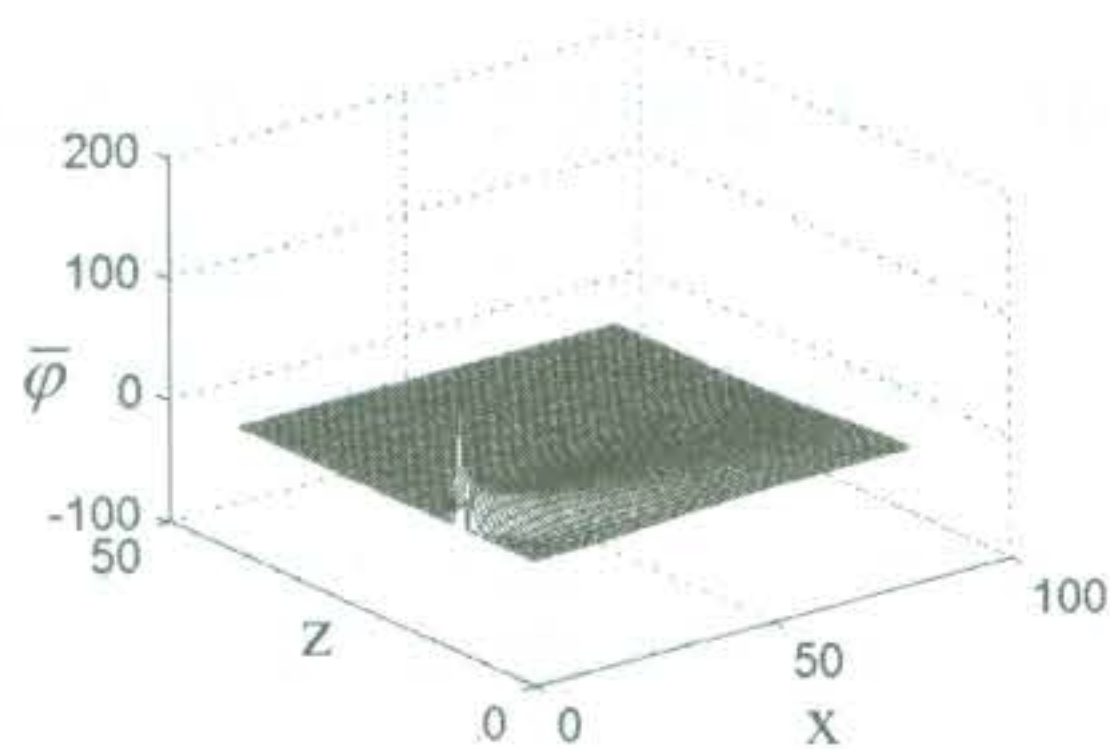


พื้นผิวความเข้มข้นมลพิษของ $\varphi(x, y, z)$

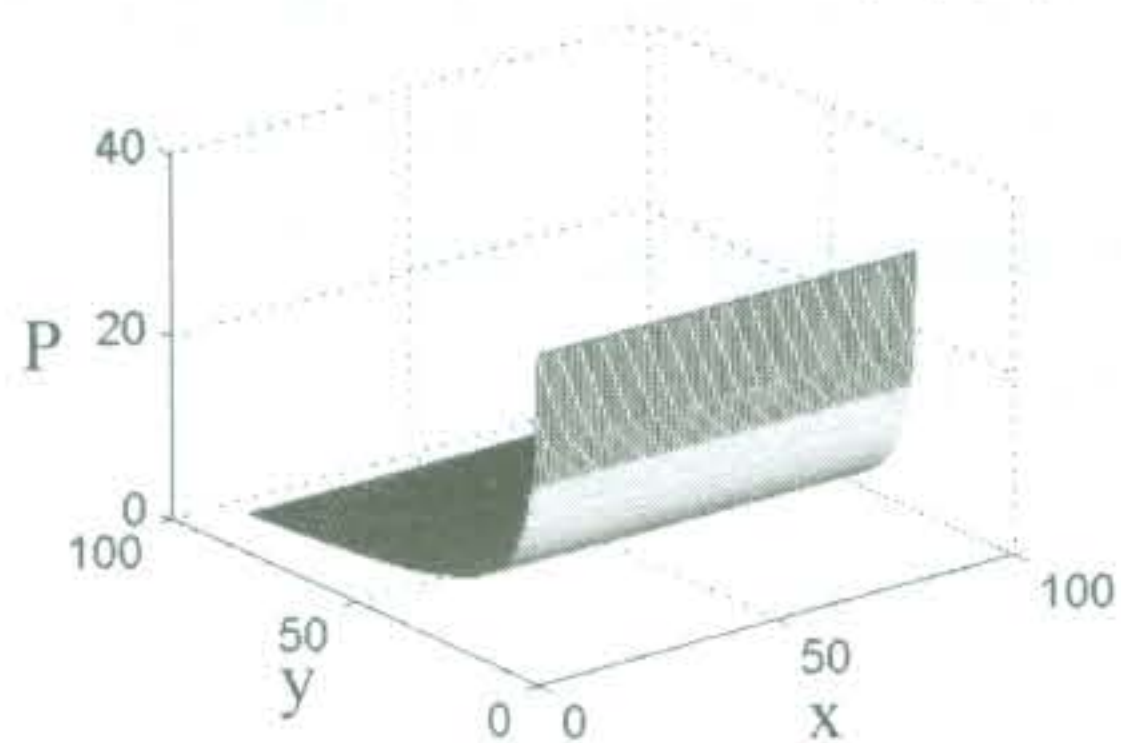
ภาพที่ 4(ก) เมื่อ $h = 0.1$



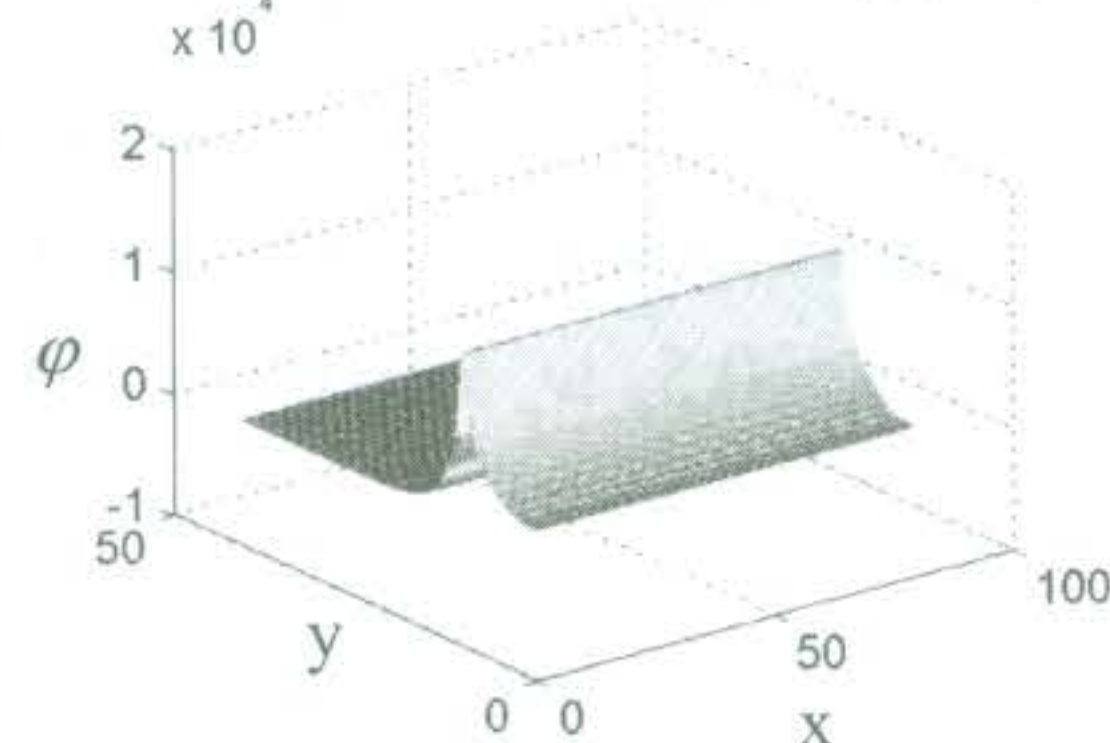
เส้นชั้นความเข้มข้นมลพิษของ $\bar{\varphi}(x, z)$



พื้นผิวความเข้มข้นมลพิษของ $\bar{\varphi}(x, z)$
 $\times 10^4$

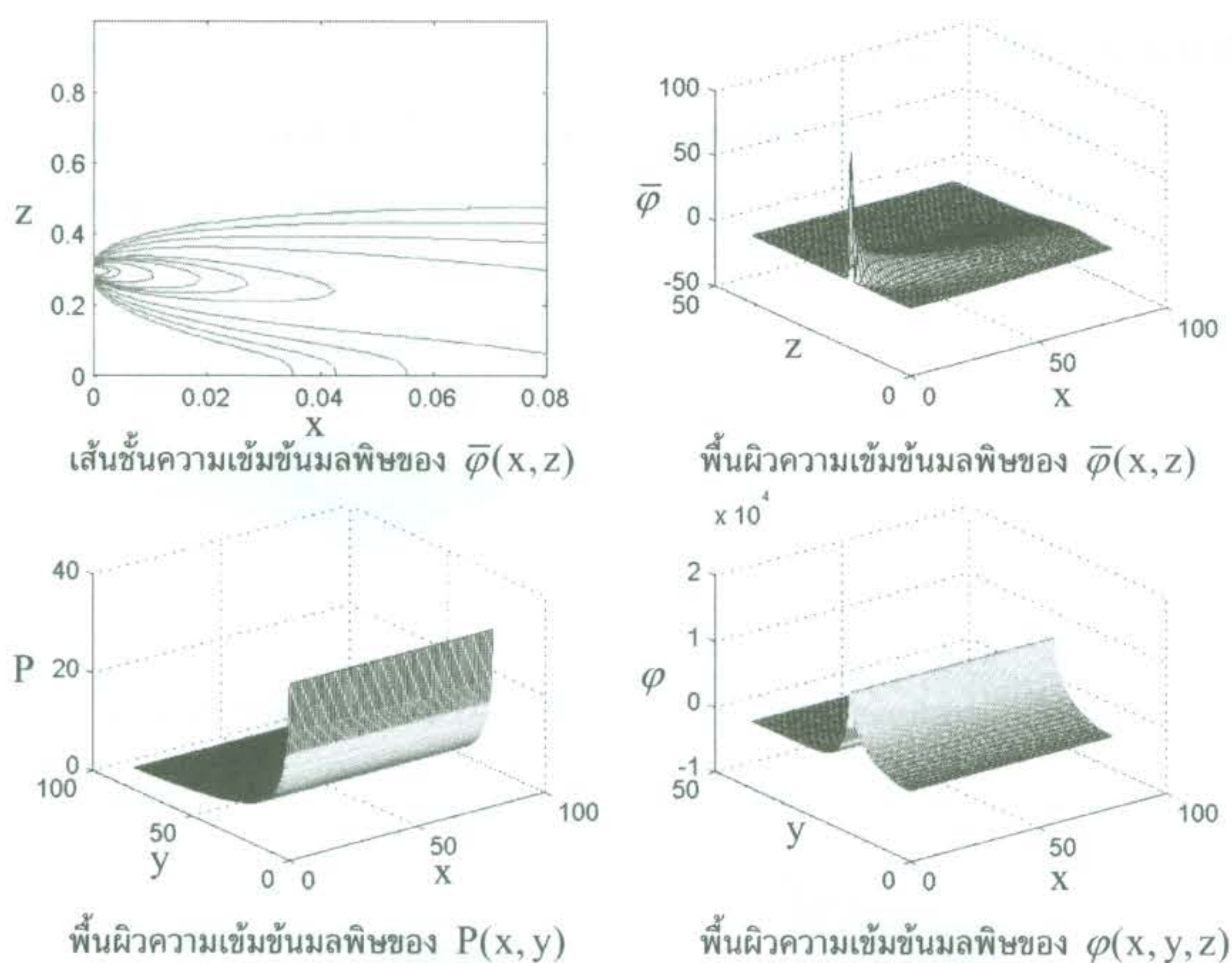


พื้นผิวความเข้มข้นมลพิษของ $P(x, y)$



พื้นผิวความเข้มข้นมลพิษของ $\varphi(x, y, z)$

ภาพที่ 4(ข) เมื่อ $h = 0.2$



ภาพที่ 4(ค) เมื่อ $h = 0.3$

ภาพที่ (4) แสดงการกระจายความเข้มข้นมลพิษทางอากาศ ณ ความสูงระยะต่างๆ
ผลการคำนวณเมื่อ $\alpha = 0.3, \gamma = 0.5, w_g = 0.125, \sigma = 0$

เปรียบเทียบผลเฉลยเชิงตัวเลขกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

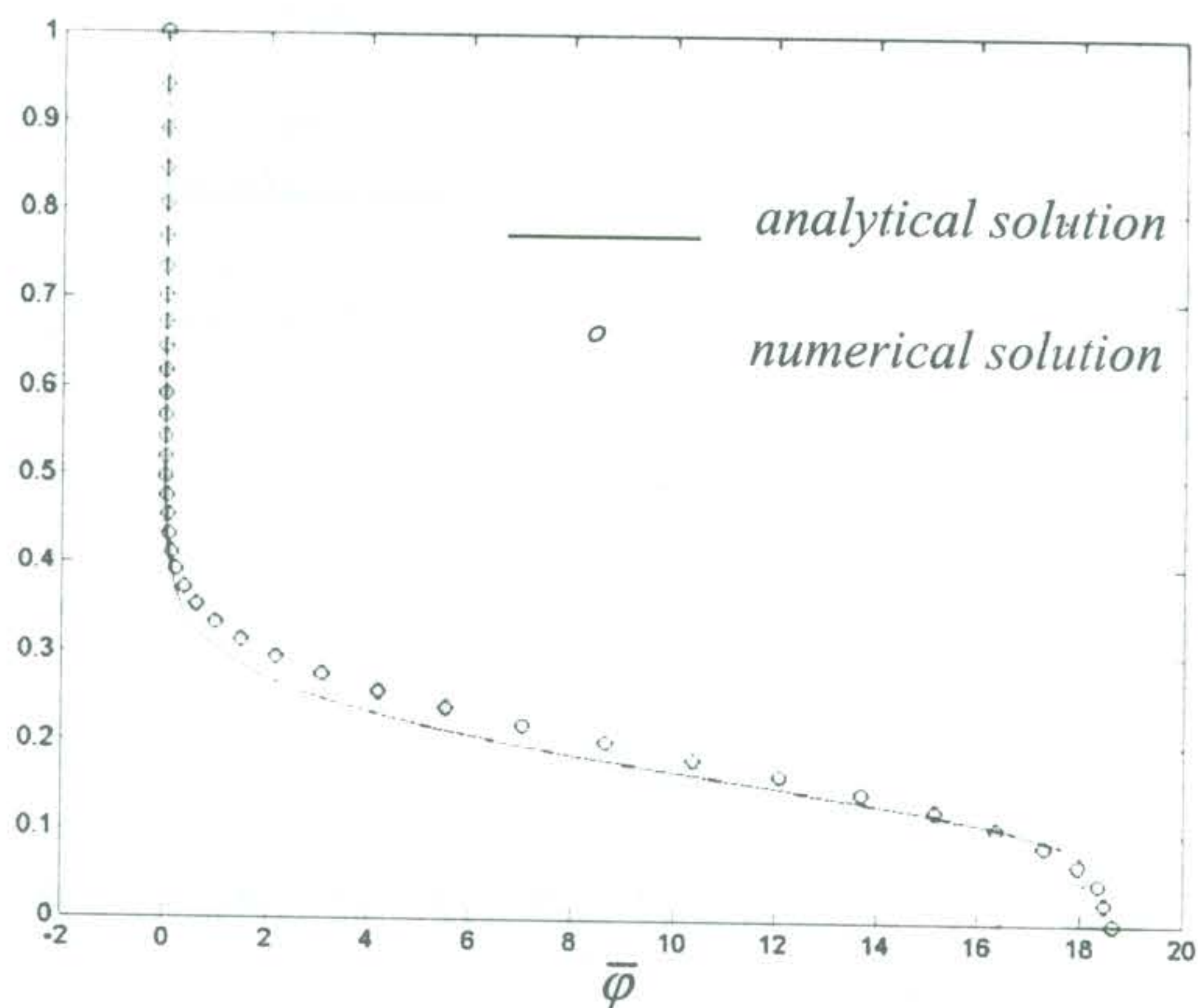
ในส่วนนี้จะเปรียบเทียบผลเฉลยเชิงตัวเลขจากการคำนวณในสมการ (8) - (11) กับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ด้วยผลเฉลยแม่นยำที่ทราบค่าของ (Rounds, 1955)

$$\bar{\varphi}(x, z) = (1 + \gamma) \sum_{j=0}^{\infty} \frac{J_0(\sigma_j z^{(1+\gamma)/2}) \cdot J_0(\sigma_j h^{(1+\gamma)/2}) \exp[-\sigma_j^2 x(1+\gamma)^2 / 4]}{[J_0(\sigma_j)]^2}$$

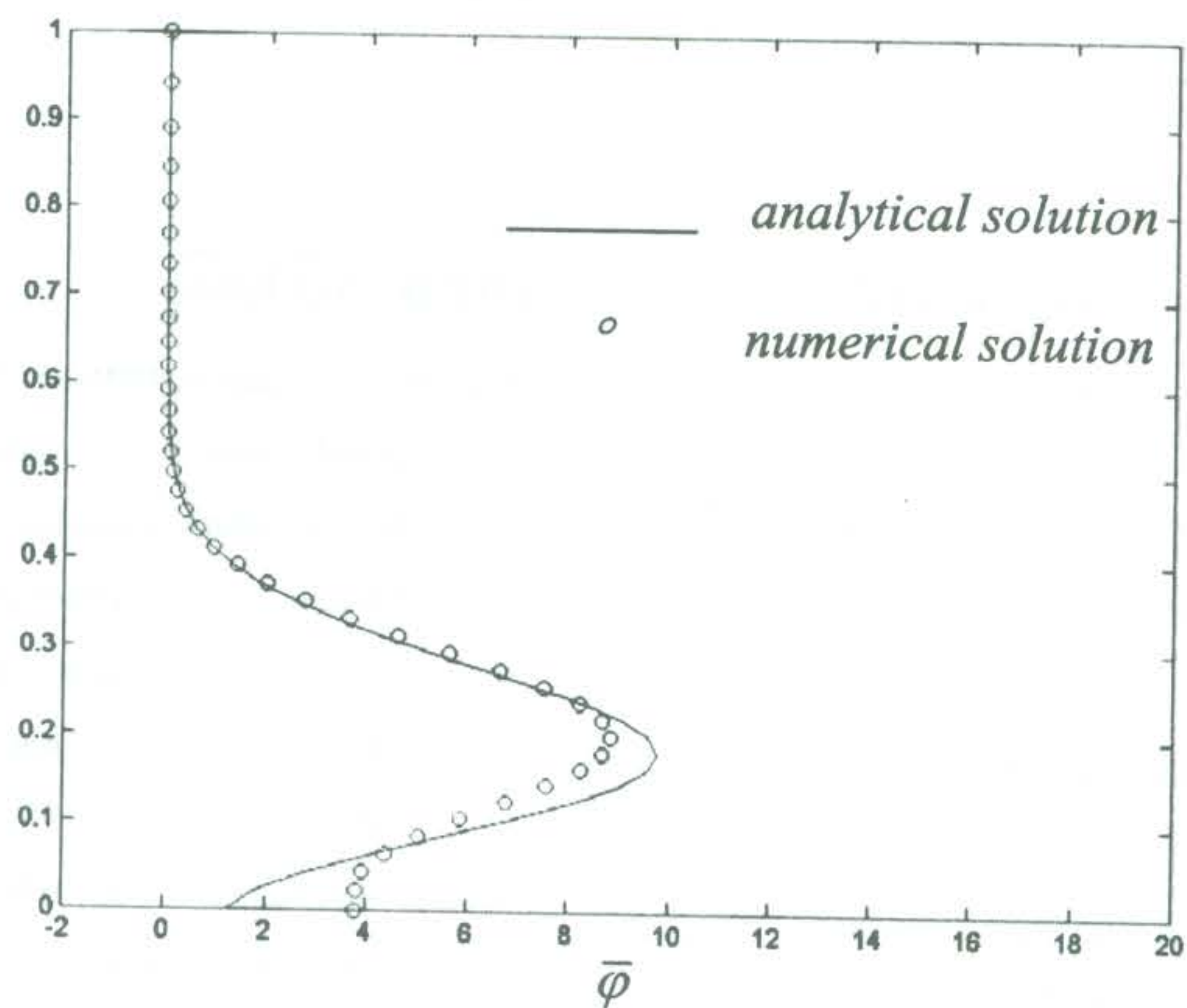
เมื่อ J_0 เป็นฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่ 1 อันดับที่ 0 σ_j เป็นจำนวนราก j รากของ J_1 ซึ่งเป็นฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่ 1 อันดับที่ 1 เมื่อ $\sigma_0 = 0$ และ $J_0(0) = 1$ ในการคำนวณนี้จะใช้ผลบวก 51 พจน์ของอนุกรมในการหาผลเฉลย

การคำนวณผลเฉลยเชิงวิเคราะห์สำหรับเงื่อนไขในสถานะอยู่ตัวจะกำหนดให้

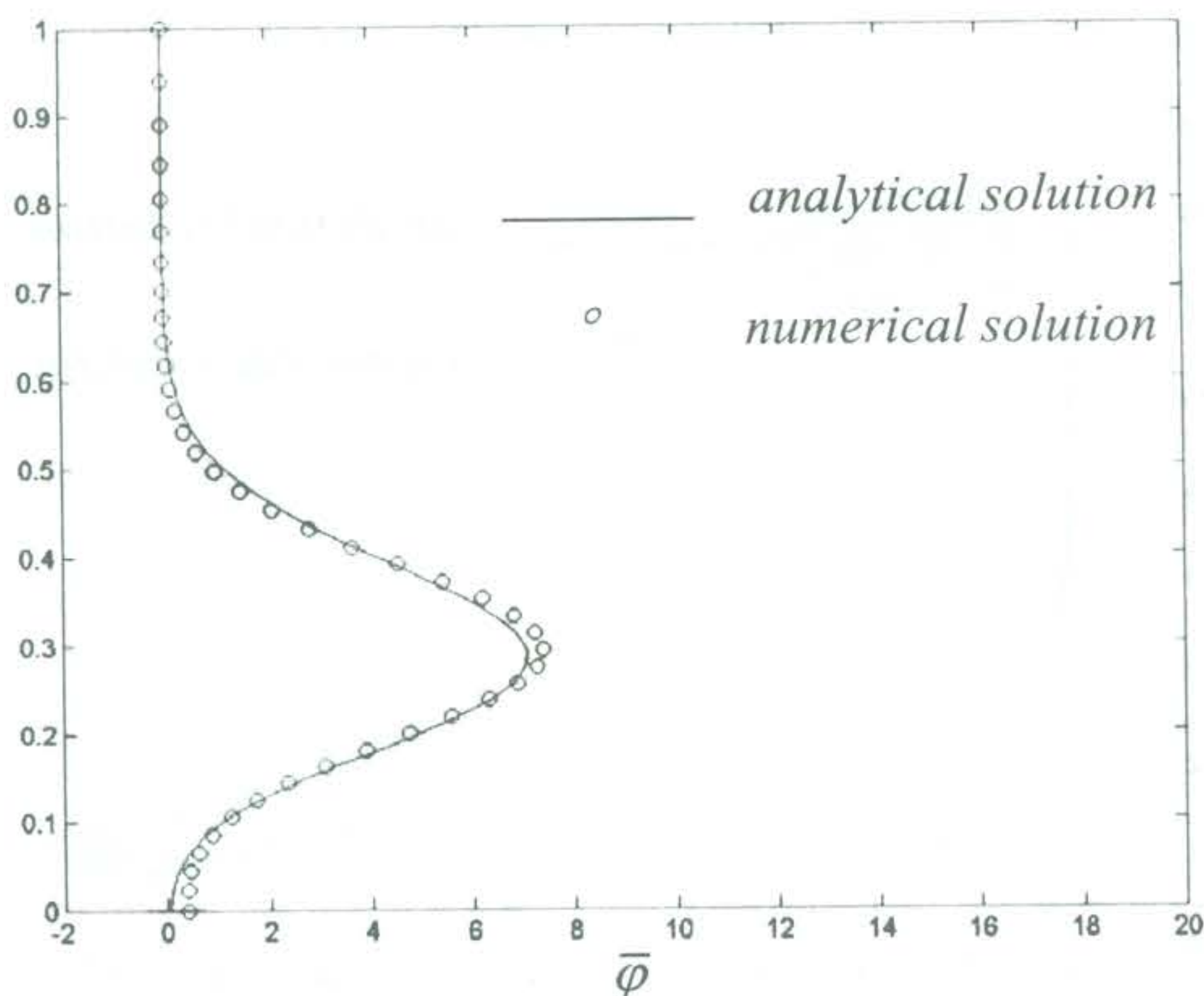
$$v(z) = z, \alpha = 0.3, \gamma = 0.5, w_g = 0.0, \sigma = 0.0, \Delta x = 10^{-3}$$



ภาพที่ 5(ก) เมื่อ $x = 0.01, h = 0.1$



ภาพที่ 5(ข) เมื่อ $x = 0.01, h = 0.2$



ภาพที่ 5(ค) เมื่อ $x = 0.01, h = 0.3$

ภาพที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบผลเฉลยเชิงตัวเลขและผลเฉลยเชิงวิเคราะห์
ณ ความสูงระยะต่าง ๆ ที่จุด $x = 0.01$ ผลการคำนวณเมื่อ
 $\alpha = 0.3, \gamma = 0.5, w_g = 0, \sigma = 0$

สรุปผลและงานอนาคต

งานวิจัยนี้พัฒนา พบว่า ความเร็วลมและความสูงของแหล่งกำเนิด มีผลต่อการกระจายความเข้มข้นมลพิษ แนวทางการวิจัยต่อไปคือการศึกษาความเข้มข้นมลพิษที่ขึ้นกับเวลา

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่อำนวยความสะดวกในการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- Bradford, S.F. and Katopodes, N.D.(2000). The anti-dissipative, non-monotone behavior of Petrov-Galerkin upwinding. *Int. J. Numer. Math. Fluids*. 33:583-608.
- Rounds, W. (1955). Solutions of the two-dimensional diffusion equation. *Trans. Am. Geophys. Union* 36:395-405.
- Runca, E. and Sardei, F. (1975). Numerical treatment of time dependent advection and diffusion of air pollutants. *Atm. Env.* 9:69-80.



ข้อแนะนำในการเขียนบทความลงวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

ประเภทของเรื่องที่จะตีพิมพ์

1. รายงานผลการวิจัยและค้นคว้าหรือการสำรวจที่ยังไม่เคยตีพิมพ์ในวารสารหรือหนังสืออื่นมาก่อน
2. บทความปริทัศน์ ได้แก่งานเขียนที่รวบรวมหรือเรียบเรียงจากเอกสารหรือหนังสือต่าง ๆ เพื่อเผยแพร่และฟื้นฟูงานด้านวิชาการระดับต่าง ๆ
3. บทความแสดงข้อคิดเห็นหรือข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในด้านวิชาการ เรื่องแปลข่าววิชาการ ย่อความจากงานวิจัยหรือหนังสือใหม่ที่น่าสนใจ

รูปแบบของการเขียนและเตรียมต้นฉบับ

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

ส่งต้นฉบับมาที่

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

อภินันทนาการสำหรับผู้เขียน

เรื่องที่ได้รับการตีพิมพ์ ผู้เขียนจะได้รับวารสารฉบับนั้น 2 เล่ม และสำเนาพิมพ์อีก 15 ชุด

การเขียนเอกสารอ้างอิงในวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

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

บรรณานุกรม (Bibliography) หมายถึง เอกสารที่ใช้อ้างอิงในลักษณะที่สรุปเป็นหลักการหรือทฤษฎี โดยมีได้อ้างอิงหรือแปลมาโดยตรง

การเขียนเอกสารอ้างอิง หรือบรรณานุกรม มีแนวทางการเขียนดังนี้

1. หนังสือ

ก. ภาษาไทย

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

ข. ภาษาอังกฤษ

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

2. เอกสารราชการ

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

3. วารสาร

ก. ภาษาไทย

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

ข. ภาษาอังกฤษ

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

หมายเหตุ

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

ใบส่งลงโฆษณา ในวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

เขียนที่.....
วันที่.....

เรียน บรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

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

.....โทรศัพท์.....โทรสาร.....

มีความประสงค์จะลงโฆษณาในวารสารวิทยาศาสตร์ มข. ดังรายการต่อไปนี้

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

โดยข้าพเจ้าขอให้ลงโฆษณา จำนวน.....ฉบับ นับตั้งแต่ฉบับแรก ที่จะพิมพ์
ในครั้งต่อไปหลังจากที่ท่านได้รับหนังสือนี้แล้ว

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

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

ลงนาม.....

ตำแหน่ง.....

อัตราค่าโฆษณาในวารสารวิทยาศาสตร์ มข.

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

หมายเหตุ ถ้าทางวารสารฯ ไม่สามารถลงตีพิมพ์บนปกหลังได้ วารสารฯจะตีพิมพ์ลงในฉบับแทน
ในวงเงินเท่ากัน



วารสาร

วิทยาศาสตร์ มข.

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

วัตถุประสงค์

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

กำหนดออก ปีละ 4 ฉบับ

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

ใบสมัครเป็นสมาชิก

"วารสารวิทยาศาสตร์ มข."

- ☐ สมาชิกใหม่
☐ ต่ออายุ

ชื่อ-สกุล.....

ที่อยู่.....

รหัสไปรษณีย์.....หมายเลขสมาชิก.....

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

พร้อมนี้ได้ส่งเงินจำนวน.....บาท มาทาง

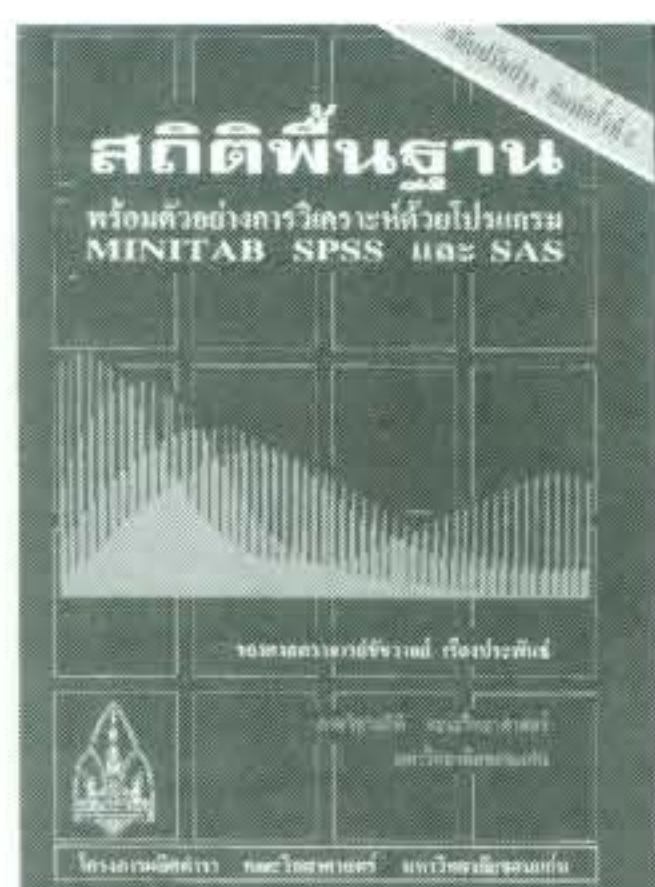
อัตราค่าบำรุง

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

ลายเซ็นผู้สมัคร.....

- หมายเหตุ 1. ส่งเงินทางธนาคัตติหรือเช็คไปรษณีย์ ในนามของนางบุญคุ้ม เหลือล้น คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สั่งจ่าย ป.ท. มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002
2. กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงที่อยู่ กรุณาแจ้งให้ทราบล่วงหน้า ไม่น้อยกว่า 1 เดือน ก่อนเดือนสุดท้ายของกำหนดวารสารออก เพื่อความสะดวกในการส่งวารสารให้แก่ท่าน

หนังสือในโครงการผลิตตำรา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



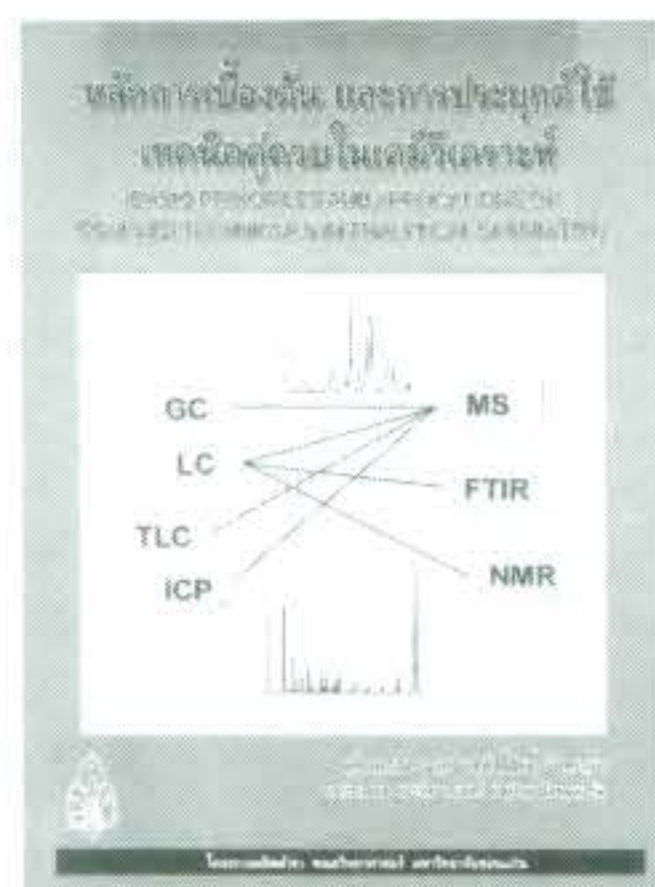
สถิติพื้นฐาน พร้อม
ตัวอย่างการวิเคราะห์
ด้วยโปรแกรม MINITAB
SPSS และ SAS

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



การวิเคราะห์ฟังก์ชันขั้นต้น
ขั้นแนะนำ

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



หลักการเบื้องต้นและ
การประยุกต์ใช้เทคนิค
คู่ควบคู่ในเคมีวิเคราะห์

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



แมงป่องข้าง

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

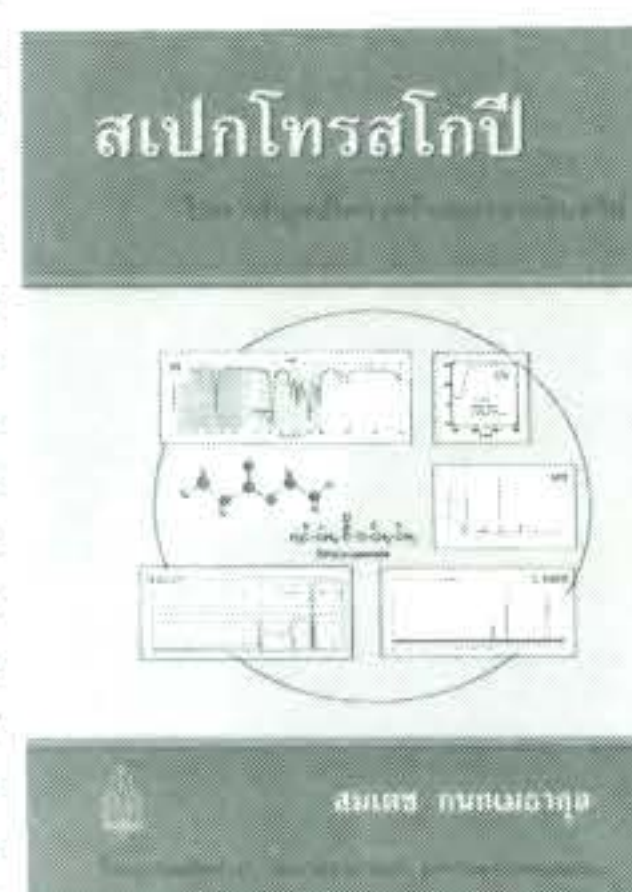
การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม
SPSS for Windows



การวิเคราะห์ข้อมูลด้วย
โปรแกรม
SPSS for Windows



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



สเปกโทรสโกปีในการพิสูจน์
โครงสร้างของสารอินทรีย์

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

