วารสารราชบัณฑิตยสถาน

วารสารราย ๓ เดือน

ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์พิเศษ ดร.สันทัด โรจนสุนทร	*นายกราชบัณฑิตยสถาน*
ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต	*ประธานสำนักวิทยาศาสตร์*

ประธานคณะบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.มงคล เดชนครินทร์	*ราชบัณฑิต*

รองประธานคณะบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ	*ภาคีสมาชิก*

คณะบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ นพ.กฤษณ์ จาฏามระ	*ราชบัณฑิต*
ศาสตราจารย์ ดร.ชยันต์ พิเชียรสุนทร	*ราชบัณฑิต*
นายนิพนธ์ ทรายเพชร	*ราชบัณฑิต*
ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.วิสุทธิ์ ใบไม้	*ราชบัณฑิต*
ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. นพ.สมชัย บวรกิตติ	*ราชบัณฑิต*
ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ	*ราชบัณฑิต*
ศาสตราจารย์ ดร.สุดา เกียรติกำจรวงศ์	*ราชบัณฑิต*
ศาสตราจารย์ ดร.สุทัศน์ ยกส้าน	*ราชบัณฑิต*
ศาสตราจารย์ นพ.ยง ภู่วรวรรณ	*ภาคีสมาชิก*
ศาสตราจารย์ ดร. พญ.ศศิธร ผู้กฤตยาคามี	*ภาคีสมาชิก*
ศาสตราจารย์ ดร.สายชล เกตุษา	*ภาคีสมาชิก*
ศาสตราจารย์ ดร.สิริวัฒน์ วงษ์ศิริ	*ภาคีสมาชิก*
นางสาวกนกวลี ชูชัยยะ	*เลขาธิการราชบัณฑิตยสถาน*
นายพงษ์ศักดิ์ ศิริวงษ์	*รองเลขาธิการราชบัณฑิตยสถาน*

กองบรรณาธิการ

นางสาวสุปัญญา ชมจินดา	*ผู้อำนวยการกองวิทยาศาสตร์*
นางสาวสมทรง ศกุนตนาค	*นักวรรณศิลป์ชำนาญการ*
นางสาวอารี พลดี	*นักวรรณศิลป์ชำนาญการ*
นางสาวรัตติกาล ศรีอำไพ	*นักวรรณศิลป์ชำนาญการ*
นายญาณัฏฐ์ ไทรงาม	*นักวรรณศิลป์ชำนาญการ*
นางณัฐมาตย์ มูสิกะเจริญ	*นักวรรณศิลป์ชำนาญการ*
นางสาวอัญชนา ไพจิตรหทัย	*นักวรรณศิลป์ปฏิบัติการ*

ผู้จัดการ

นางนัยนา วราอัศวปติ	*เลขานุการกรม*

The Journal of the Royal Institute of Thailand

Quarterly Journal

ADVISORY BOARD

Santhad Rojanasoonthon	*President of the Royal Institute*
Piamsak Menasveta	*President of the Academy of Science*

EDITOR-IN-CHIEF

Mongkol Dejnakarintra	*FRI*

DEPUTY EDITOR

Somchai Wongwises	*AFRI*

EDITORIAL BOARD

Krit Chatamara	*FRI*
Chayan Picheansoonthon	*FRI*
Nibondh Saibejra	*FRI*
Visuth Baimai	*FRI*
Somchai Bovornkitti	*FRI*
Somsak Damronglerd	*FRI*
Suda Kiatkamjornwong	*FRI*
Suthat Yoksan	*FRI*
Yong Poovorawan	*AFRI*
Sasithon Phukrittayakhamee	*AFRI*
Saichol Ketsa	*AFRI*
Siriwat Wongsiri	*AFRI*
Kanokwalee Chuchaiya	*Secretary-General*
Pongsak Siriwong	*Deputy Secretary-General*

DEPARTMENTAL STAFF

Supunya Chomchinda	*Director of Science Division*
Somsong Sakuntanak	*Literateur, Professional Level*
Aree Poldee	*Literateur, Professional Level*
Rattikal Sriamphai	*Literateur, Professional Level*
Yanut Sai-ngam	*Literateur, Professional Level*
Nutthamard Musikacharoen	*Literateur, Professional Level*
Anhchana Phaijit-hathai	*Literateur, Practitioner Level*

MANAGER

Naiyana Vara-Asvapati	*Secretary of the Royal Institute*

วารสารราชบัณฑิตยสถาน

The Journal of the Royal Institute of Thailand

ปีที่ ๓๙ ฉบับที่ ๒ เมษายน-มิถุนายน ๒๕๕๗ | Volume 39 Number 2 April-June 2014

สำนักวิทยาศาสตร์ | The Academy of Science

ประธานคณะบรรณาธิการแถลง

หลังคาเปลือกบางและโครงสร้าง ๓ มิติ ชนิดอื่น ๆ ๑

อรุณ ชัยเสรี

ปฏิทินจันทรคติ : ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากความคลาดเคลื่อนในปฏิทินจันทรคติของไทย และแนวทางในการพัฒนาข้อมูลทางจันทรคติด้วยวิธีการทางดาราศาสตร์ ๒๗

นิพนธ์ ทรายเพชร

จตุรงค์ สุคนธชาติ

การเคลือบผิวผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว ๔๙

สายชล เกตุษา

เทคโนโลยีคอนกรีตพรุน ๕๙

ปริญญา จินดาประเสริฐ

ยุวดี แซ่ตั้ง

ส้วมยุคใหม่และประเด็นด้านเทคโนโลยี สุขภาพ และสิ่งแวดล้อม ๘๕

จงรักษ์ ผลประเสริฐ

อาทิตยา ภานุวัฒน์วนิชย์

ณวัชร สุรินทร์กุล

ธรรมรัตน์ คุตตะเทพ

วันเดือนปีที่สุนทรภู่แต่งงานคำกลอนห้าเรื่อง ระหว่าง พ.ศ. ๒๓๘๔-๒๓๘๕ ๙๗

ทศพร วงศ์รัตน์

วิวัฒนาการ อนุกรมวิธาน และการกระจายตัวของผึ้งในประเทศไทย **๑๒๓**

สิริวัฒน์ วงษ์ศิริ

สิทธิพงษ์ วงศ์วิลาศ

การเก็บรักษาผักและผลไม้สดโดยการดัดแปลงสภาพบรรยากาศ **๑๔๑**

สายชล เกตุษา

การประเมินต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในประเทศไทย **๑๕๓**

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์

สุขวัฒก์ ธันธรา

วารุณี เตีย

ประธานคณะบรรณาธิการแถลง

วารสารราชบัณฑิตยสถาน ปีที่ ๓๙ ฉบับที่ ๒ เมษายน-มิถุนายน ๒๕๕๗ นี้ สำนักวิทยาศาสตร์เป็นผู้จัดทำ มีบทความรวม ๙ เรื่อง เป็นผลงานของราชบัณฑิตและภาคีสมาชิก ซึ่งส่วนใหญ่ได้บรรยายในสำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน รวมทั้งกรรมการวิชาการของราชบัณฑิตยสถานและผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

บทความเรื่อง ***หลังคาเปลือกบางและโครงสร้าง ๓ มิติ ชนิดอื่น ๆ*** เป็นผลงานของ ศ.อรุณ ชัยเสรี ราชบัณฑิต, ***ปฏิทินจันทรคติ : ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากความคลาดเคลื่อนในปฏิทินจันทรคติของไทย และแนวทางในการพัฒนาข้อมูลทางจันทรคติด้วยวิธีการทางดาราศาสตร์*** ของ นายนิพนธ์ ทรายเพชร ราชบัณฑิต และ ดร.จตุรงค์ สุคนธชาติ กรรมการวิชาการ, ***การเคลือบผิวผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว*** ของ ศ. ดร.สายชล เกตุษา ภาคีสมาชิก, ***เทคโนโลยีคอนกรีตพรุน*** ของ ศ. ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ ภาคีสมาชิก และ ดร.ยุวดี แซ่ตั้ง ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก, ***ส้วมยุคใหม่และประเด็นด้านเทคโนโลยี สุขภาพ และสิ่งแวดล้อม*** ของ ศ. ดร.จงรักษ์ ผลประเสริฐ ภาคีสมาชิก และคณะ, ***วันเดือนปีที่สุนทรภู่แต่งงานคำกลอนห้าเรื่อง ระหว่าง พ.ศ. ๒๓๘๔-๒๓๘๕*** ของ ศ. ดร.ทศพร วงศ์รัตน์ ราชบัณฑิต, ***วิวัฒนาการ อนุกรมวิธาน และการกระจายตัวของผึ้งในประเทศไทย*** ของ ศ. ดร.สิริวัฒน์ วงษ์ศิริ ภาคีสมาชิก และ ดร.สิทธิพงษ์ วงศ์วิลาศ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก, ***การเก็บรักษาผักและผลไม้สดโดยการดัดแปลงสภาพบรรยากาศ*** ของ ศ. ดร.สายชล เกตุษา ภาคีสมาชิก และเรื่อง ***การประเมินต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในประเทศไทย*** ของ ศ. ดร.สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ ราชบัณฑิต และคณะ

คณะบรรณาธิการและผู้จัดทำวารสารฉบับนี้ขอขอบคุณราชบัณฑิตและภาคีสมาชิกในสำนักวิทยาศาสตร์ รวมทั้งกรรมการวิชาการและผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ได้นำบทความมาลงพิมพ์เพื่อเผยแพร่ความรู้ด้านวิชาการ และช่วยประเมินบทความบางบทให้ถูกต้องสมบูรณ์ขึ้น

ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.มงคล เดชนครินทร์ ราชบัณฑิต
ประธานคณะบรรณาธิการ

วารสารราชบัณฑิตยสถาน
ปีที่ ๓๙ ฉบับที่ ๒ เม.ย.-มิ.ย. ๒๕๕๗

หลังคาเปลือกบางและโครงสร้าง ๓ มิติ ชนิดอื่น ๆ*

อรุณ ชัยเสรี
ราชบัณฑิต สำนักวิทยาศาสตร์
ราชบัณฑิตยสถาน

บทคัดย่อ

อาคารที่มีหลังคาช่วงกว้างมาก ๆ โดยไม่มีเสาตั้งขวางภายใน ปรกติมักใช้โครงสร้างพิเศษชนิด ๓ มิติ ที่ไม่ใช่ระบบพื้น-คาน-เสาธรรมดา เปลือกบางเป็นโครงสร้าง ๓ มิติชนิดหนึ่งซึ่งรูปร่างแตกต่างกันไป การเลือกใช้รูปแบบใดขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งาน ความสูงที่มี ลักษณะภูมิประเทศ ลมฟ้าอากาศและสิ่งแวดล้อมรอบบริเวณที่จะสร้าง หลังคาเปลือกบางปรกติหมายถึงหลังคาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีมิติหนึ่งน้อยกว่าอีก ๒ มิติมาก ๆ เช่น ช่วง ๓๐ x ๓๐ เมตร มีความหนาของคอนกรีตเพียง ๐.๑๐ เมตร เพราะในการคำนวณออกแบบ ส่วนใหญ่จะใช้ทฤษฎีเมมเบรน **(membrane theory)** ซึ่งมีแต่แรงดึงในเมมเบรน ส่วนแรงอัดจะรองรับด้วยคานขอบซึ่งทำหน้าที่ถ่ายแรงลงสู่ฐานราก ถ้าใช้ความหนามากจะเกิดแรงดัดขึ้นในเปลือกบาง ซึ่งไม่เป็นไปตามทฤษฎีเมมเบรนดังกล่าว ข้อเสียเปรียบของหลังคาเปลือกบางคอนกรีตคือ การสร้างแบบสำหรับหล่อคอนกรีตที่ต้องมีค้ำยันสูง สร้างยาก ยกเว้นเปลือกบางชนิดไฮเพอร์โบลิกพาราโบลอยด์ **(hyperbolic paraboloid)**

โครงสร้างชนิดโครง ๓ มิติ **(space frame** หรือ **space truss)** มักใช้โครงที่ทำด้วยท่อเหล็กหรือเหล็กรูปพรรณ สามารถประกอบบนพื้นชั้นล่างจนเสร็จเรียบร้อย แล้วใช้อุปกรณ์ยกโครงสร้างที่สร้างเสร็จแล้วนั้นขึ้นวางบนที่รองรับที่ทำเตรียมไว้แล้ว จะได้งานที่เรียบร้อย สร้างได้เร็ว นอกจากหลังคาเปลือกบาง และโครง ๓ มิติแล้ว ยังมีหลังคา ๓ มิติอีกหลายชนิด เช่น โครงสร้างชนิดอัดลม หลังคาแขวน แผ่นพื้นกระทง หลักการเลือกชนิดของโครงสร้างนั้น ปรกติจะพิจารณาความมั่นคง ความแข็งแรง ความคงทน และความปลอดภัยเป็นอันดับแรก ตามด้วยความสวยงาม ความเป็นเอกลักษณ์ การใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ และข้อสำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือ ค่าก่อสร้างต้องไม่เกินงบประมาณที่ตั้งไว้ ซึ่งหมายถึงงบประมาณเพื่อการบำรุงรักษาหลังใช้งานแล้วด้วย

คำสำคัญ : เปลือกบาง, ทฤษฎีเมมเบรน, ไฮเพอร์โบลิกพาราโบลอยด์, โครงสร้าง ๓ มิติ, โครง ๓ มิติ, **S.A.F.E.**

---

*รวบรวมและปรับปรุงจากการบรรยายในการประชุมสำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน เรื่อง “หลังคาเปลือกบาง” เมื่อวันที่ ๒๐ พฤศจิกายน พ.ศ. ๒๕๕๖ และเรื่อง “หลังคา ๓ มิติ นอกเหนือจากหลังคาเปลือกบาง” เมื่อวันที่ ๒๕ ธันวาคม พ.ศ. ๒๕๕๖

บทนำ

โครงสร้างหลังคามีทั้ง ๒ มิติ และ ๓ มิติ โครงสร้างหลังคา ๒ มิติมักใช้กับโครงหลังคาธรรมดาทั่วไป ในการคำนวณจะคิดในระนาบเดียว คือ กว้าง x ยาว ส่วนหลังคา ๓ มิติจะคิดความลึกด้วย ปรกติหลังคา ๓ มิติใช้คลุมพื้นที่ขนาดใหญ่ โดยมีเสาซึ่งเป็นที่รองรับเรียงรายอยู่โดยรอบ ไม่มีเสาเกะกะตรงกลาง ทำให้การใช้งานสะดวก ไม่เป็นอุปสรรคแก่การมองเห็น เช่น สนามกีฬา โถงแสดงสินค้า โรงมหรสพ โครงสร้าง ๓ มิติจะต้องรับแรงพร้อมกันทุกด้าน ในกรณีของโครงสร้างที่มีแปลนรูป ๔ เหลี่ยม ที่รองรับจะต้องรับแรงพร้อมกันทั้ง ๔ ด้าน หรือถ้าเป็นรูปโดม ในการวิเคราะห์และออกแบบปรกติจะกำหนดให้โครงสร้างหลังคาทั้งหมดถ่ายน้ำหนักลงบนคานขอบที่รองรับโดยรอบพร้อม ๆ กัน และเท่า ๆ กัน

โครงสร้างหลังคา ๓ มิตินั้น อาจทำด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก เหล็กรูปพรรณ ท่อเหล็กกล้า สำหรับวัสดุที่ใช้มุง ถ้าไม่ใช่หลังคาคอนกรีตก็มักใช้แผ่นวัสดุเบา เช่น แผ่นโลหะ กระจก หรือวัสดุมุงอื่น ๆ ถ้าโครงสร้างเป็นชนิดแขวนหรือพองลม ก็สามารถใช้วัสดุเบาสังเคราะห์คล้ายผ้าใบ แต่มีความเหนียวและความทนทานสูง

โครงสร้างหลังคา ๓ มิติ แบ่งเป็นชนิดใหญ่ ๆ ได้ ๖ ชนิด คือ

๑. เปลือกบาง (thin shell)

๒. โครง ๓ มิติ (space frame) หรือโครงข้อหมุน ๓ มิติ (space truss)

๓. แผ่นพื้นกระทง (waffle slab)

๔. โครงสร้างแขวน (hanging structure)

๕. โครงสร้างอัดอากาศ (pneumatic structure)

๖. โครงสร้างพิเศษอื่น ๆ

การออกแบบหลังคาขนาดใหญ่โดยไม่มีเสาเกะกะภายใน และภายนอกก็ไม่มีมากเกินไป สามารถเลือกใช้โครงสร้าง ๓ มิติ ชนิดต่างๆ ดังกล่าวได้ตามความเหมาะสมและความต้องการ ตลอดจนข้อจำกัดของแต่ละโครงการที่แตกต่างกันไป

๑. หลังคาเปลือกบาง

หลังคาชนิดนี้ปรกติหมายถึงหลังคาคอนกรีตที่มีความหนาน้อยกว่าอีก ๒ มิติมาก ๆ คือความกว้างและความยาว เช่น ช่วงกว้างของหลังคาขนาด ๓๕ x ๓๕ เมตร แต่มีความหนาเพียง ๐.๑๐ เมตร สมัยหนึ่งมีผู้นิยมใช้หลังคาแบบนี้กันมาก โดยเฉพาะยุคที่คอนกรีตยังมีราคาไม่แพง ตลอดจนค่าแรงและการทำไม้แบบยังมีราคาถูก อีกทั้งราคาที่ดินก็ยังไม่สูงเหมือนในปัจจุบัน ทำให้สามารถสร้างอาคารออกทางกว้างได้ ในขณะที่เหล็กรูปพรรณหรือเหล็กท่อกลมยังมีราคาแพงมาก ประกอบกับในการออกแบบหลังคาเปลือกบาง มีรูปร่างต่าง ๆ ให้เลือกใช้ได้มากมายตามต้องการ

หลังคาเปลือกบางอาจจำแนกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ ๓ ประเภท คือ หลังคาโค้งทางเดียว หลังคาโค้ง ๒ ทาง และหลังคาพับ (ไม่มีส่วนใดที่โค้งเลย)

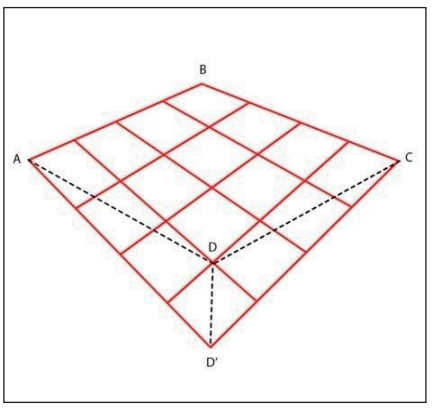
๑.๑ เปลือกบางชนิดโค้งทางเดียว ส่วนใหญ่จะมีลักษณะโค้งเป็นส่วนของวงกลมด้านหนึ่ง อีกด้านหนึ่งเป็นแนวตรง ลักษณะเหมือนกระบอกผ่าซีก มักตั้งชื่อตามรูปร่างและการใช้งาน เช่น vault, cylindrical shell, barrel shell

รูปที่ ๑ หลังคาสโมสรรัฐสภา

หลังคาสโมสรรัฐสภา ในรูปที่ ๑ เป็นตัวอย่างหลังคาเปลือกบางชนิดโค้งทางเดียว ช่วงกว้าง ๒๘ เมตร ภายนอก มีเสาเอียง ๖ ต้น ภายในโล่งตลอด เสาคู่หัวและท้ายมีคานลึกประมาณ ๑ เมตรเศษยึดหัวเสา แรงในเสา ๔ ต้นนั้นจึงเป็นแรงตามแกน ส่วนเสาคู่กลางไม่มีคานยึดปลายเสา ทำให้เกิดโมเมนต์ในเสาอย่างมหาศาล และต้องป้องกันแรงถอนในฐานคู่กลางด้วย อาคารนี้ใช้คานยึดโคนเสาทั้งหมดทุกต้น

หลังคาแบบนี้ ดูเผิน ๆ เหมือนกับว่าก่อสร้างง่าย ประหยัด เพราะไม้แบบแม้จะเป็นแผ่นเรียบตรง ๆ ส่วนไม้เคร่าที่รองใต้ไม้แบบต้องโค้งเป็นรูปครึ่งวงกลมหรือส่วนของวงกลม แต่จริง ๆ แล้วเป็นโครงสร้างที่รับแรงดัดแบบเดียวกับพื้นและคานทั่วไป ดังได้กล่าวแล้วว่าหลังคาเปลือกบางที่ดีควรจะมีแต่แรงอัดและ/หรือแรงดึง ไม่ควรมีแรงดัด เพราะจะทำให้สิ้นเปลืองวัสดุโดยเฉพาะเหล็กเสริมมากเกินไป

๑.๒ เปลือกบางชนิดโค้ง ๒ ทาง คือ ส่วนเล็ก ๆ (element) ทุกส่วนจะมีความโค้ง ๒ ทิศทาง คือ หลังคาชนิดนี้มีรูปร่างได้หลายแบบ ยิ่งถ้านำมาผสมผสานกัน จะเรียกได้ว่าไม่มีสิ้นสุด ไฮเพอร์โบลิกพาราโบลอยด์ (hyperbolic paraboloid) (เรียกย่อ ๆ ว่า hypa) เป็นเปลือกบางชนิดนี้แบบหนึ่งที่นิยมใช้กันมาก

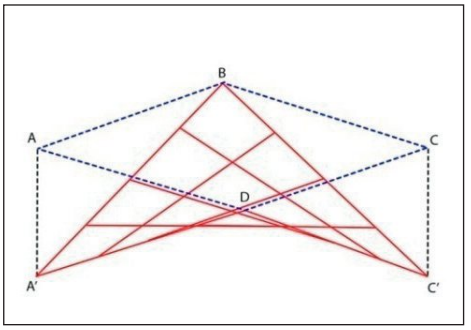


รูปที่ ๒

วิธีสร้างรูป hyperbolic paraboloid

รูปที่ ๒ แสดงการเขียนรูปไฮเพอร์โบลิกพาราโบลอยด์ ๑ กลีบ ซึ่งถือว่าเป็นพื้นฐาน จากนั้นก็ขยายต่อเป็น ๒, ๓, ๔ กลีบไปเรื่อย ๆ จะต่อกันอย่างไร ทิศทางใดก็ได้ วิธีการก็คือ เขียนรูป ๔ เหลี่ยม A, B, C, D สมมติว่าเป็น ๔ เหลี่ยมจัตุรัส กดจุด D ให้ลงมาอยู่ที่ D′ เป็นระยะเท่าไรก็ได้ตามความเหมาะสม แบ่งทั้ง ๔ ด้านคือ AB, BC, CD′ และ D′A ให้มีจำนวนช่องเท่า ๆ กัน (ในรูปแบ่งเป็น ๔ ช่อง) ทำให้ระยะของช่องบนเส้น AD′ และ D′C ยาวกว่าด้าน BC และ AB ตามลำดับ โยงเส้นตรงจากจุดแบ่งช่องไปยังด้านตรงข้าม

ระนาบ ABCD′ จะเป็นระนาบบิดเบี้ยว (warp plane) คือเป็นรูปไฮเพอร์โบลิกพาราโบลอยด์ โดยอัตโนมัติ สังเกตได้ว่า รูป “hypa” นี้ประกอบด้วยเส้นตรงทั้งสิ้น ซึ่งถือเป็นข้อได้เปรียบของเปลือกบางแบบนี้



รูปที่ ๓

ตัวอย่างการสร้างรูปไฮเพอร์โบลิกพาราโบลอยด์แบบอื่น เช่น ๒ ขา ก็ใช้หลักการเดียวกัน จากรูปสี่เหลี่ยม ABCD ให้กดจุด A และ C ลงไปถึง A′ และ C′ ซึ่งจะเป็นที่รองรับ ๒ จุด แล้วแบ่ง ๒ ด้านตรงกันข้ามกันให้มีจำนวนช่องที่แบ่งเท่า ๆ กัน แล้วลากเส้นตรงเชื่อมจุดต่าง ๆ ทั้ง ๒ ทิศทาง ก็จะได้รูปไฮเพอร์โบลิกพาราโบลอยด์แบบที่ต้องการ คือ มี ๒ เสา ตัวอย่างเช่น หลังคาโบสถ์ราฟาเอล จังหวัดสมุทรปราการ (รูปที่ ๙)

ถ้านำรูป hypa พื้นฐานในรูปแรกต่อกัน ๔ กลีบ ก็จะได้เปลือกบางรูปดอกเห็ด (mushroom shell) หรือรูปร่ม (umbrella shell) โดยมีเสา ๑ ต้นอยู่ตรงกลาง ถ้านำเปลือกบางรูปดอกเห็ดนี้หลาย ๆ ชิ้นมาต่อเรียงกัน ก็จะได้หลังคาคลุมพื้นที่กว้าง เช่น หลังคาสโมสรนิสิตมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (รูปที่ ๔) หรือถ้าจะใช้เสากลางเสาเดียวรับหลังคากว้าง ๆ ก็ได้ เช่น หลังคาอาคารที่ทำการหอพักมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ซึ่งมีขนาด ๑๖ x ๑๖ เมตร ในรูปที่ ๖ แม้ที่จริงจะมากกว่านั้นก็ได้ ถ้ายอมให้ความลึกของหลังคาเพิ่มขึ้น

รูปที่ ๔ หลังคาสโมสรมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

หลังคาของอาคารในรูปที่ ๔ ประกอบด้วยไฮเพอร์โบลิกพาราโบลอยด์ขนาด ๘ x ๘ เมตร ๔ ชิ้นต่อกันเป็นรูปดอกเห็ด ๑ ดอก และส่วนที่เป็นทางเดินมีขนาด ๔ x ๔ เมตร ต่อกันเป็นแนวลัดเลาะไปตามต้นไม้ใหญ่ โดยไม่ยอมให้ตัดต้นไม้เลย ฐานรากของเปลือกบางตัวเล็กนี้ทำเป็นรูปไฮเพอร์โบลิกพาราโบลอยด์คว่ำ โดยใช้คอนกรีตเสริมเหล็กหนา ๐.๑๐ เมตร แท้ที่จริงความหนา ๐.๐๕ เมตร ก็เพียงพอที่จะรับน้ำหนักหลังคาได้แล้ว ตามที่ได้ทดสอบหุ่นเท่าของจริง แต่ที่ใช้ความหนา ๐.๑๐ เมตร ก็เพื่อป้องกันเหล็กมิให้เป็นสนิม

รูปที่ ๕ ด้านในของอาคารสโมสร

รูปที่ ๖ อาคารที่ทำการของหอพักมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รูปที่ ๗ แสดงการเสริมเหล็กของหลังคาในรูปที่ ๖

ตรงรอยต่อระหว่างผนังกระจกกับหลังคามีช่องระบายอากาศเปิดไว้เล็กน้อย โดยมีชิ้นกระจกยาวตลอดติดตั้งไว้สำหรับกันฝนสาดและน้ำฝนไหลเข้าตัวอาคาร ด้วยวิธีนี้อากาศร้อนภายในสามารถไหลออก และอากาศเย็นไหลเข้าจากด้านล่าง หมุนเวียนตามธรรมชาติตลอดเวลา ภายในห้องจึงไม่ร้อนอบอ้าว ตรงกลางเสาฝังท่อเหล็กสำหรับระบายน้ำฝน ตรงปากท่อมีตะกร้อสำหรับป้องกันใบไม้ปลิวมาปิดท่อ อย่างไรก็ดี ได้จัดให้มีลิ้นนิรภัย (safety valve) ไว้ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำขังสูงเกินไป ในกรณีที่ลืมขจัดใบไม้ก่อนฝนตก

สำหรับหลังคารูปร่มขนาดใหญ่ ผลกระทบเกี่ยวกับความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวนอกของคอนกรีตกับอุณหภูมิภายในค่อนข้างมาก โดยเฉพาะถ้าใช้เครื่องทำความเย็นภายในห้อง ผลกระทบจะรุนแรงขึ้นจนหลังคาแตกร้าวได้ จึงควรเสริมเหล็ก ๒ ชั้น ตัวอย่างในรูปที่ ๖ และ ๗ เป็นหลังคารูปร่มขนาด ๑๖ x ๑๖ เมตร นับว่าค่อนข้างใหญ่สำหรับหลังคาที่มีเสาเพียงต้นเดียวตรงกลาง สิ่งที่สำคัญมากคือความสมดุลต้องพยายามรักษาให้เซ็นทรอยด์ของโครงสร้างอยู่ตรงกึ่งกลางเสา ฉะนั้นความหนาของคอนกรีตต้องได้สมมาตร ข้อยุ่งยากคือความหนาของหลังคาทั้งหมดไม่เท่ากัน ส่วนที่บางที่สุดคือขอบหลังคาโดยรอบซึ่งมีความหนาเพียง ๑๐ มิลลิเมตร นอกจากนี้ความไม่สมมาตรของแรงที่กระทำแก่โครงสร้าง เช่น ลมพัดข้างเดียว อุณหภูมิของผิวคอนกรีตไม่เท่ากัน อันเนื่องมาจากความร้อนจากแสงอาทิตย์ นับแต่พระอาทิตย์เคลื่อนตัวจากทิศตะวันออกไปทิศตะวันตก ฉะนั้นจึงได้เสริมเหล็ก ๙ มิลลิเมตร ตะแกรง ๒ ชั้น เพื่อป้องกันการยืดหดตัวของหลังคาที่ไม่เท่ากัน

ดังได้กล่าวแล้วว่า หลังคาเปลือกบางชนิดไฮเพอร์โบลิกพาราโบลอยด์สามารถพัฒนารูปร่างได้หลายแบบ

แบบที่รองรับด้วย ๒ ขา เป็นแบบพื้นฐาน คือมีเพียงกลีบเดียว (ดูวิธีการสร้างในรูปที่ ๓) ตัวอย่างการใช้งาน เช่น ทำเป็นซุ้มทางเข้าอาคารธรรมดา หรือทำเป็นตัวอาคารภายในหลังคานั้น ดังรูปที่ ๘ เป็นซุ้มทางเข้าอาคารโบว์ลิ่งที่ อ.บ้านโป่ง จ.ราชบุรี เนื่องจากสร้างเป็นรูปไฮเพอร์โบลิกพาราโบลอยด์แบบมี ๒ ขา ในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงความเสถียรให้มาก ต้องระวังให้น้ำหนักของคอนกรีตทั้ง ๒ ขาของแนวเสามีค่าเท่ากัน มิฉะนั้นอาจเกิดการพลิกคว่ำได้ จึงได้ทำเสาให้แบนกว้าง และฐานรากให้ยาวขนานกับแนวของปลายของหลังคา

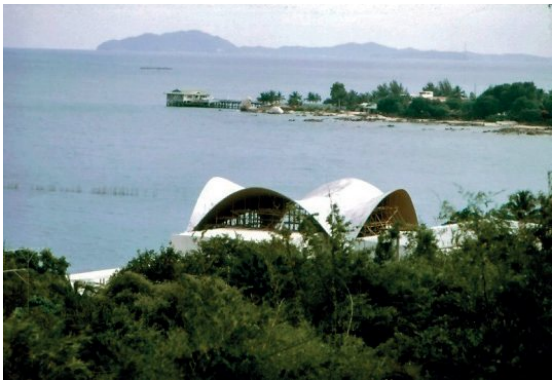
รูปที่ ๘ ซุ้มทางเข้าโรงโบว์ลิ่ง

ไฮเพอร์โบลิกพาราโบลอยด์ขนาดใหญ่แบบ ๒ ขา ในรูปที่ ๙ เป็นหลังคาของโบสถ์ราฟาเอล จังหวัดสมุทรปราการ เนื่องจากเป็นเปลือกบางชิ้นเดียวที่มีขนาดใหญ่ตั้งอยู่ใกล้ทะเล จึงได้ออกแบบเผื่อไว้สำหรับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวัน ความต่างของอุณหภูมิผิวล่างกับผิวบนของหลังคา การระบายความร้อนภายในอาคาร ความคงทนต่อไอน้ำเค็ม ตลอดจนอันตรายจากฟ้าผ่า เนื่องจากยอดของหลังคายกสูงกว่าระดับเฉลี่ยของอาคารข้างเคียงมาก

รูปที่ ๙ โบสถ์ราฟาเอล ที่สมุทรปราการ

จากผลกระทบต่าง ๆ ดังกล่าว โดยเฉพาะที่เกี่ยวกับอุณหภูมิจึงได้ตัดส่วนหลังคาเปลือกบางออกจากเสาเอ็น, เคร่า และครีบกันแดดให้ขาดจากกันโดยสมบูรณ์ (ดูรูปที่ ๑๐) เพื่อให้หลังคาสามารถขยับตัวได้โดยอิสระ ไม่เกิดการเหนี่ยวรั้ง อันจะทำให้เกิดการแตกร้าวได้ อีกเรื่องหนึ่งที่ต้องระวังคือ ส่วนที่เป็นปลายแหลมชี้ขึ้นไปเสี่ยงต่อฟ้าผ่า ซึ่งปรกติจะลงตรงจุดสูงที่แหลม ฉะนั้นต้องออกแบบให้สามารถป้องกันฟ้าผ่าด้วย อาจใช้วิธีติดตั้งสายล่อฟ้าบริเวณใกล้ ๆ กัน หรือติดไว้ที่ยอดแหลมของหลังคาเลยก็ได้ ให้สูงกว่ายอดแหลมของหลังคา หรืออาจเฉือนยอดแหลมนั้นให้เตี้ยและป้านลง

รูปที่ ๑๐ ภายในของโบสถ์



รูปที่ ๑๑ หลังคาภัตตาคารที่ จ.ชลบุรี ทำเป็นรูปอานม้า

รูปที่ ๑๒ โครงเคร่าของหลังคาแบบอานม้า ประกอบด้วยเส้นตรงทั้งสิ้น

ดังเช่น หลังคาของภัตตาคารแห่งหนึ่ง ในรูปที่ ๑๑ ซึ่งทำเป็นรูปเปลือกบางรูปอานม้า (saddle shell) ขนาด ๒๕ x ๒๕ เมตร มีที่รองรับ ๔ จุด คือ ไฮเพอร์โบลิกพาราโบลอยด์ชนิด ๒ ขา ๒ ชิ้นวางขวางซ้อนกัน และลบมุมแหลมออกนั่นเอง ดูเผิน ๆ แล้วเหมือนกับจะก่อสร้างยาก แต่ถ้าเข้าใจวิธีการขึ้นรูปของไฮเพอร์โบลิกพาราโบลอยด์แล้วจะง่ายมาก เพราะไม้เคร่าทุกชิ้นเป็นเส้นตรงทั้งหมด ไม่มีเลยที่จะเป็นเส้นโค้ง เนื่องจากหลังคาแบบอานม้านี้ไม่มีจุดใดที่แหลมและความสูงทั้งหมดก็อยู่ในระดับที่ไม่ต่างกันมากนักจึงไม่เสี่ยงต่อการถูกฟ้าผ่า

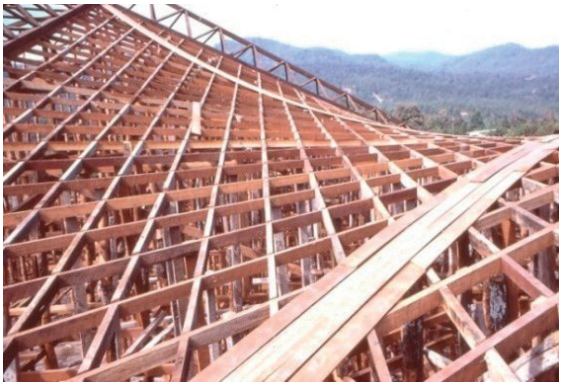
นอกจากนี้ยังสามารถนำเปลือกบาง เช่น ไฮเพอร์โบลิกพาราโบลอยด์หลาย ๆ หน่วยมาต่อกัน เช่น หอสมุดกลาง หลังแรกของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (รูปที่ ๑๓) มีขนาด ๒๐ x ๘๐ เมตร ประกอบด้วยเปลือกบางชนิดไฮเพอร์โบลิกพาราโบลอยด์รวม ๑๓ กลีบต่อกันด้วยโครงถักเหล็ก มุงด้วยวัสดุโปร่งแสง

รูปที่ ๑๓ อาคารหอสมุดมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รูปที่ ๑๔ สร้างแบบจำลองเพื่อให้แน่ใจว่าระบบไม้แบบถูกต้อง

เนื่องจากผู้รับจ้างก่อสร้างยังไม่เคยทำแบบหลังคาเปลือกบางมาก่อน เพื่อให้เกิดความแน่ใจว่าการสร้างแบบหล่อเป็นไปอย่างถูกต้อง ก่อนอื่นต้องให้ผู้ที่จะก่อสร้างจัดทำแบบจำลองแสดงวิธีการทำโครงเคร่า และการวางไม้แบบ (รูปที่ ๑๔) เพื่อให้ผู้จะสร้างเข้าใจรายละเอียดทุกขั้นตอนอย่างถูกต้อง เพราะถ้าไม่เข้าใจหลักการสร้างรูปไฮเพอร์โบลิกพาราโบลอยด์ อาจเกิดความผิดพลาดจนพังทลายลงมาได้

ได้กล่าวมาแล้วว่า งานทำแบบหล่อคอนกรีตสำหรับเปลือกบางรูปไฮเพอร์โบลิกพาราโบลอยด์ง่ายมาก เพราะไม้เคร่าเป็นเส้นตรงทั้งหมด ส่วนไม้แบบที่ปูบนไม้เคร่าจะเป็นรูปไฮเพอร์โบลิกพาราโบลอยด์เองโดยอัตโนมัติ



รูปที่ ๑๕ การสร้างไม้เคร่า ไม้แบบที่สร้างจริง

รูปที่ ๑๖ แสดงให้เห็นไม้เคร่าและไม้แบบที่ขึ้นรูปเป็นไฮเพอร์โบลิกพาราโบลอยด์เสร็จแล้ว ส่วนอีกกลีบหนึ่งผูกเหล็กเสริมเรียบร้อยแล้ว จะเห็นโครงถักเหล็กรูปพรรณเชื่อมประกบกันเป็นท่อรูปสี่เหลี่ยมเพื่อถ่ายแรงอัดลงสู่เสา ในขณะเดียวกันใช้เป็นช่องสำหรับบุแผ่นโปร่งแสงเพื่อกระจายแสงสว่างลงสู่พื้นล่างได้สม่ำเสมอ โดยแทบไม่ต้องใช้ไฟฟ้าแสงสว่างในเวลากลางวันเลย (รูปที่ ๑๗)

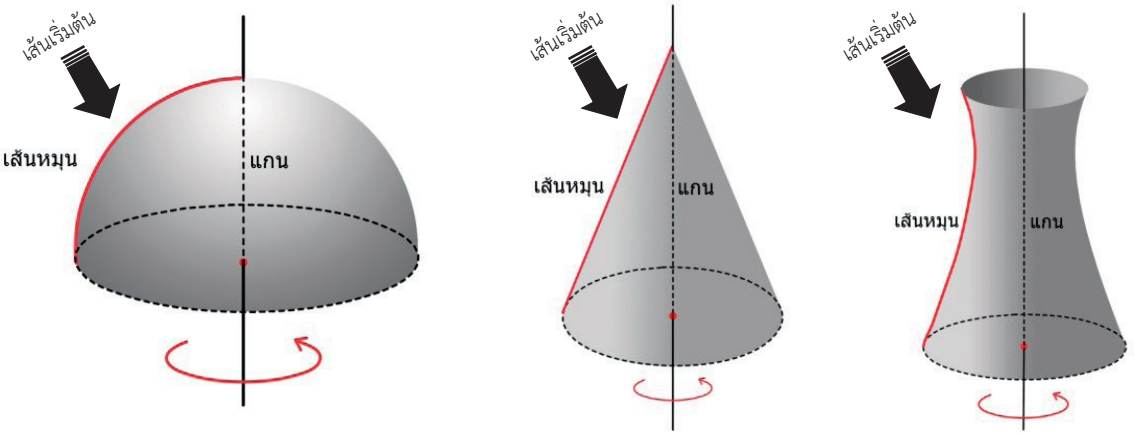
รูปที่ ๑๖ การวางไม้เคร่า ไม้แบบ ตลอดจนการผูกเหล็กเสริม

รูปที่ ๑๗ บริเวณภายในหอสมุดหลังจากเปิดใช้งานแล้ว

๑.๓ เปลือกบางชนิดหมุนรอบแกน (shell of surface revolution) เปลือกบางชนิดนี้ประกอบด้วยเส้นแกนและเส้นเริ่มต้น (directrix) เมื่อหมุนเส้นเริ่มต้น ซึ่งเป็นรูปอะไรก็ได้ตามต้องการแล้วหมุนรอบเส้นแกน ก็จะได้เปลือกบางรูปต่าง ๆ (รูปที่ ๑๘) เช่น

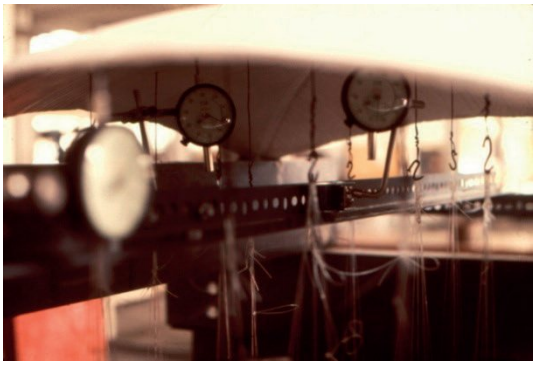
- หมุนเส้นโค้งที่เป็นส่วนหนึ่งของวงกลมรอบแกนจะได้โดม
- หมุนเส้นเอียงรอบแกน จะได้เปลือกบางรูปกรวย (conoid) ปรกติมักตัดเพียงบางส่วนนำไปใช้เป็นหลังคาคลุมหน้าทางเข้าอาคาร
- หมุนเส้นไฮเพอร์โบลารอบแกน จะได้รูปไฮเพอร์โบลอยด์ที่เห็นบ่อย ๆ ใช้ทำเป็นท่อระบายความร้อน (cooling tower) สำหรับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

ถ้าแกนเป็นเส้นโค้ง เมื่อหมุนวงกลมรอบแกนโค้ง จะได้รูปห่วงยาง (torus) ถ้าหมุนวงกลมรอบแกนโค้ง ๒ เส้น ตัดตั้งฉากกัน จะได้รูปห่วงยางคู่ (double tori) ตัวอย่างเช่น หลังคาของตึกประชุมอาคารรัฐสภา ใช้ส่วนหนึ่งของห่วงยางคู่ ลักษณะคล้ายรูปโดมตรงกลางรองรับด้วยที่รองรับ ๔ ขา เพื่อให้หลังคาดูกลมกลืนกับหลังคาพระที่นั่งอนันตสมาคม ตามแนวคิดของสถาปนิก



รูปที่ ๑๘ ตัวอย่างการสร้างรูปเปลือกบางชนิดหมุนรอบแกน

รูปที่ ๑๙ อาคารรัฐสภา



รูปที่ ๒๐ การทดสอบความแข็งแรงของหลังคาโดยใช้หุ่นทำด้วยปูนปลาสเตอร์

รูปที่ ๒๑ การเสริมเหล็กหลังคาเสร็จสิ้นพร้อมเทคอนกรีต

ในรูปที่ ๑๙ จะเห็นหลังคาห้องประชุมที่มีลักษณะโค้งอยู่เหนือหลังคาที่แบนราบเป็นหลังคาเปลือกบางแบบห่วงยางคู่ดังที่กล่าวมา ส่วนด้านหน้าเหนือประตูทางเข้าเป็นเปลือกบางชนิดโค้งทางเดียว ๓ ชิ้นต่อเนื่องกัน เนื่องจากเป็นหลังคาที่มีขนาดใหญ่ ๓๓ × ๓๓ เมตร มีที่รองรับเพียง ๔ จุด สมมาตรทั้ง ๒ แกน ทั้งระยะและน้ำหนักบรรทุกจร รวมทั้งน้ำหนักของตัวหลังคาเองด้วย

หน่วยแรง (stress) ที่เกิดขึ้นจากความต่างกันของอุณหภูมิ ซึ่งปรกติถือว่าเป็นหน่วยแรงรอง (secondary stress) จะกลายเป็นหน่วยแรงหลัก เป็นต้นว่าความร้อนจากแสงแดดไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งหลังคา เนื่องจากดวงอาทิตย์เคลื่อนที่จากทิศตะวันออกไปสู่ทิศตะวันตก ความร้อนจากตอนกลางวันเปลี่ยนเป็นความเย็นในตอนกลางคืน ผิวนอกของคอนกรีตร้อนจัดเมื่อถูกแสงแดด ในขณะเดียวกันข้างใต้ของคอนกรีตหลังคาเย็นจากการใช้เครื่องปรับอากาศ

รูปที่ ๒๐ แสดงการทดสอบหุ่นจำลองที่ทำด้วยปูนปลาสเตอร์ เพื่อวัดค่าโก่งตัว ณ จุดต่าง ๆ ของเปลือกบางในขณะที่เพิ่มน้ำหนักบรรทุกเป็นขั้น ๆ เป็นการพิสูจน์ความถูกต้องของการคำนวณ และแฟกเตอร์ความปลอดภัยเพียงพอ เพื่อป้องกันการร้าวอันเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง จึงได้เสริมเหล็กทั่วไปให้กระจายออกเป็น ๒ ชั้น โดยเฉพาะที่ขอบของเปลือกบาง ได้เสริมเหล็กมากเป็นพิเศษ และตรงบริเวณหัวเสาทั้ง ๔ ต้น ได้พับเหล็กเสริมในเสาแผ่เป็นรัศมี (รูปที่ ๒๑) หลังจากบ่มคอนกรีตหลังคาจนได้กำลังที่ต้องการแล้ว ก็ถึงเวลาที่จะถอดไม้แบบและค้ำยันออก การถอดต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ คือต้องพยายามถอดไม้แบบให้หลุดจากคอนกรีตพร้อม ๆ กันโดยให้ตัดค้ำยัน

รูปที่ ๒๒ หลังจากถอดไม้แบบและไม้ค้ำยันออกแล้ว

รูปที่ ๒๓ ภายนอกของหลังคาเปลือกบางเสร็จเรียบร้อย

รูปที่ ๒๔ ตึกประชุม multidispensary คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ให้สมมาตรเฉลี่ยตลอดทั้งพื้นที่ ทั้งนี้ให้ตัดเฉพาะปลายค้ำยันก่อน ให้ห่างจากไม้แบบเล็กน้อย แล้วตอกลิ่มไม้รองรับแทน เมื่อตัดปลายค้ำยันและเสียบลิ่มค้ำไว้แทนครบทั้งหมดแล้ว จากนั้นให้ตอกลิ่มออกพร้อม ๆ กัน และสมมาตรต่อกัน ถึงขั้นนี้ไม้แบบจะหลุดออกมาโดยง่าย หลังคาเปลือกบางก็เป็นอิสระ น้ำหนักทั้งหมดก็ลงสู่ที่รองรับเท่า ๆ กันทั้ง ๔ จุด (รูปที่ ๒๒)

เมื่อถอดแบบเสร็จเรียบร้อยแล้ว ขั้นสุดท้ายคือทาสี เนื่องจากหลังคามีพื้นที่ต่อเนื่องกันกว้างมาก จึงได้เลือกใช้สีที่มีเบสเป็นยาง สามารถป้องกันมิให้แสงแดดสัมผัสกับผิวหลังคาโดยตรง และสามารถยืดหดตัวตามคอนกรีตที่ใช้ทำหลังคาเปลือกบางได้ ทั้งนี้เพื่อป้องกันการร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ ดังได้กล่าวแล้ว (รูปที่ ๒๓)

๑.๔ หลังคาเปลือกบางชนิดผสม

หลังคาเปลือกบางสามารถปรับปรุงรูปแบบได้มากมาย บ้างก็นำเปลือกบางชนิดต่าง ๆ มาผสมผสานกันหรือดัดแปลงให้เป็นรูปเครื่องใช้ไม้สอย เช่น ถังเก็บน้ำสูง ๆ บ้างก็ทำเป็นรูปร่างอิสระ ปราศจากหลักเกณฑ์ทางคณิตศาสตร์ หรือเรขาคณิตใด ๆ

ตัวอย่างเช่น ตึกประชุม multidispensary คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในรูปที่ ๒๔ หลังคาเปลือกบางโค้งไปตามลักษณะของห้องที่ใช้งาน เช่น โค้งที่ใหญ่ที่สุดคลุมห้องประชุม โค้งเล็กเป็นห้องทำงาน ด้านตะวันออกโค้งหงายขึ้นคลุมห้องฉายภาพยนตร์ การคำนวณออกแบบค่อนข้างยาก เพราะไม่มีหลักทางเรขาคณิตที่จะใช้เป็นเกณฑ์ในการคำนวณ การสร้างแบบหล่อคอนกรีตก็ยาก เพราะแทบจะไม่มีส่วนใดที่โค้งเท่ากัน รัศมีการโค้งต่างกันทั้งหมด (รูปที่ ๒๕)

รูปที่ ๒๕ ไม้เคร่ารองรับแบบหล่อคอนกรีตซึ่งยุ่งยากมาก

รูปที่ ๒๖ หลังจากปูไม้แบบและวางเหล็กเสริมหลักแล้ว

รูปที่ ๒๗ ขณะเทคอนกรีต

ฉะนั้น ในการก่อสร้างจึงต้องใช้วิธีวัดระยะความสูงของหลังคาที่ปรากฏในแบบโดยตรง โดยตีเส้นเป็นตะแกรง แล้ววัดความสูงที่จุดตัดทุกจุด แล้วจึงตั้งค้ำยัน และปูไม้แบบตามนั้น รูปที่ ๒๖ แสดงการเสริมเหล็กโดยกระจายเหล็กเสริมทั่วไปทั้งหมดออกเป็นตะแกรง ๒ ชั้น ที่เห็นเป็นแถบตรงแนวบรรจบของส่วนโค้งหลังคาที่ต่อเนื่องกัน มีลักษณะเหมือนโครงโค้ง (arch) รูปตัววีแบน ๆ ทำหน้าที่ถ่ายแรงอัดลงสู่ที่รองรับลงสู่ฐานราก ในรูปยังขาดเหล็กเสริมตามแนวขอบของหลังคา ซึ่งเมื่อเสริมเหล็กดังกล่าวเสร็จ ก็ถึงขั้นเทคอนกรีต

การเทคอนกรีตกำหนดให้เทจากข้างล่างขึ้นไป เพื่อให้คอนกรีตด้านล่างมีกำลังเพียงพอที่จะรับน้ำหนักของคอนกรีตที่เทข้างบนในเวลาต่อมา และให้เทต่อเนื่องกันทั้งกลางวันกลางคืน เพื่อไม่ให้มีรอยต่อเลย ทั้งนี้เพื่อป้องกันการร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต

นอกจากใช้ทำหลังคาแล้ว ยังสามารถนำเปลือกบางมาประยุกต์เป็นหอถังน้ำได้ เช่น ที่แสดงในรูปที่ ๒๘ และรูปที่ ๒๙ ซึ่งเป็นหอถังน้ำที่มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์และมหาวิทยาลัยศิลปากร โดยนำเอาส่วนของเปลือกบางรูปโคนอยด์ (conoid) มาประยุกต์เป็นตัวถัง ทำให้น้ำที่มีแรงดันสูงมีปริมาณมากกว่าปริมาณน้ำที่มีแรงดันต่ำสุด (คือที่ก้นถัง) ซึ่งดีกว่าถังน้ำรูปทรงกระบอกที่มีพื้นที่ก้นถังเท่ากับขอบบนของถัง ส่วนค่าก่อสร้างก็ไม่ได้สูงกว่าถังรูปทรงกระบอก เพราะถังรูปกรวยจะมีแรงดัดน้อยกว่า ข้อได้เปรียบอีกอย่างหนึ่งก็คือ เสาที่ขึ้นไปรับถังน้ำจะแคบกว่า เช่น ถังน้ำในรูปที่ ๒๘ มีเสาเพียงต้นเดียว ทำเป็น ๔ แฉก สามารถเจาะเสานั้นเป็นช่อง ให้บันไดเวียนคอนกรีตผ่านได้ สำหรับคนขึ้นไปตรวจสอบบำรุงรักษาได้สะดวก มีผนังกันตกป้องกันอุบัติเหตุได้ด้วย

รูปที่ ๒๘ หอถังน้ำที่มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ท่าพระจันทร์) สูง ๒๙ เมตร

รูปที่ ๒๙ หอถังน้ำ บริเวณมหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม

เปลือกบางที่นับว่าสร้างง่ายที่สุด เห็นจะเป็นพวกเปลือกบางทรงปริซึม (prismatic shell) คือ ไม่มีส่วนใดโค้ง ไม้เคร่าเป็นแนวตรง ตัวเปลือกบางก็เป็นแผ่นเรียบ พับแบบเดียวกับการพับกระดาษ เช่น หรือ รูปร่างจึงค่อนข้างจำกัด และช่วงยาวก็มักจะไม่มากนัก ดังตัวอย่างในรูปที่ ๓๐ และ ๓๑

เปลือกบางแบบนี้คำนวณออกแบบโดยทฤษฎีแรงดัด (bending theory) เช่นเดียวกับที่ใช้คำนวณออกแบบคานแบน ๆ คือใช้ส่วนตั้งทำหน้าที่รับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนเช่นเดียวกัน แม้การสร้างแบบหล่อง่ายกว่าเปลือกบางที่โค้ง ๒ ทาง แต่จะสิ้นเปลืองเหล็กเสริมมากกว่า

อีกประการหนึ่ง การระบายความร้อนภายในอาคารที่ใช้เปลือกบางชนิดนี้ค่อนข้างยาก ไม่สามารถที่จะให้อากาศร้อนระบายออกเองโดยธรรมชาติ จำเป็นต้องใช้พัดลมดูดอากาศร้อนออก หรือมิฉะนั้นก็ต้องใช้เครื่องปรับอากาศ

รูปที่ ๓๐ อาคารคณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รูปที่ ๓๑ หลังคาห้องประชุม คณะมนุษยศาสตร์

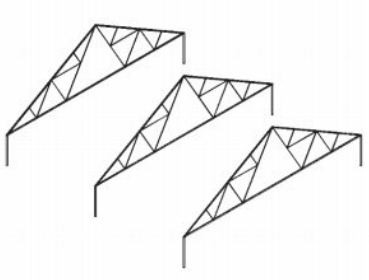
๒. โครงข้อหมุน (truss)

ก่อนที่จะข้ามไปพูดถึงโครงข้อหมุน ๓ มิติ จะขอทำความเข้าใจกับคำว่า truss เสียก่อน truss หมายถึง โครงข้อหมุน หรือบางครั้งเรียกว่า โครงถัก คือโครงสร้างที่ประกอบด้วยองค์อาคารเป็นท่อน ๆ ต่อเข้าด้วยกันเป็นรูปสามเหลี่ยม โดยมีสมมุติฐานว่า ณ จุดที่องค์อาคารมาบรรจบกันเป็นจุดหมุนนั้น โมเมนต์มีค่าเท่ากับศูนย์ แม้ของจริงไม่เป็นเช่นนั้น มี Vierandeel truss เพียงอย่างเดียวที่ไม่ได้ประกอบด้วยรูปสามเหลี่ยม แต่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส และจุดต่อก็ไม่เป็นจุดหมุนแต่มีลักษณะแข็งเกร็ง

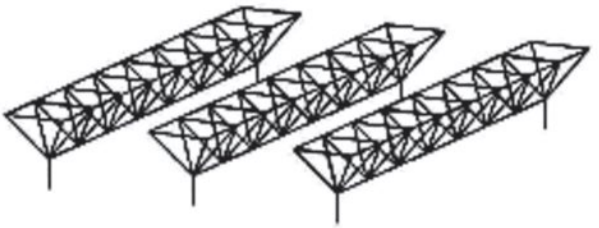
โครงข้อหมุนมีทั้ง ๒ มิติ และ ๓ มิติ มีความแตกต่างกันดังนี้

๒.๑ โครงข้อหมุน ๒ มิติ โครงหลังคาขนาดเล็กมักใช้ไม้หรือเหล็กชนิดเบา (light gauge steel) ทำเป็นจั่ว หรือจันทันพาดเฉย ๆ ก็ได้ หรือถ้าเป็นดาดฟ้า สามารถใช้แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดาได้ สำหรับหลังคาขนาดใหญ่ทั่วไปที่มีช่วงของที่รองรับห่างกันไม่เกิน ๓๐ หรือ ๔๐ เมตร เช่น หลังคาโรงงานมักนิยมใช้โครงสร้างชนิดโครงข้อหมุน ๒ มิติ เพราะสร้างง่าย ยกง่าย แต่หลังคาชนิดนี้ ต้องการความสูง ยิ่งกว้างมากก็ยิ่งต้องการความสูงมาก เพื่อประหยัดวัสดุ โดยเฉพาะถ้าใช้โครงเหล็กรูปพรรณซึ่งมีราคาแพง นอกจากนี้ ยังเป็นการลดการแอ่นตัวของโครงหลังคาด้วย

องค์อาคารของโครงข้อหมุน ๒ มิติ ถ้ายาวมากหรือสูงและบางมาก ย่อมไม่สะดวกที่จะยกติดตั้ง ปรกติจะต่อเชื่อมโครงข้อหมุนบนพื้นรวมชั้นล่างหรือนอกบริเวณก่อสร้าง เมื่อจะยกโครงข้อหมุนดังกล่าวขึ้นเพื่อติดตั้งบนหัวเสาซึ่งต้องทำเตรียมไว้แล้ว อาจแกว่งหรือบิดไปมาจนเกิดการวิบัติได้ และถ้ายกติดตั้งได้แล้ว จะต้องยึดโยงให้ดี โดยอาจเชื่อมเหล็กยึดชั่วคราวหรือใช้แปยึดเป็นการถาวรก็ได้ เพื่อกันล้ม เช่น เมื่อมีลมกระโชก หรืออีกวิธีหนึ่งทำโครงข้อหมุนแต่ละโครงให้เป็นโครง ๓ มิติเฉพาะตัวเอง เช่น รูป จะเกิดความเสถียรในตัว การยกติดตั้งก็ง่าย การยึดขวางก็ไม่ต้องทำมากนัก แต่โดยรวมทั้งระบบแล้วยังคงถือว่าเป็นระบบ ๒ มิติอยู่ เพราะยังมีลักษณะเป็นองค์อาคารรับแรงดัดเช่นเดียวกับคาน



โครงข้อหมุน ๒ มิติ ธรรมดา ถ้าช่วงยาวมาก ความสูงจะมากตาม ทำให้การยกติดตั้งยาก และเสี่ยงต่อการวิบัติ



การทำโครงข้อหมุนให้เป็น ๓ มิติ เฉพาะตัวเองจะเพิ่มความเสถียรในการยกติดตั้ง

รูปที่ ๓๒ โครงรับหลังคาโรงงาน ชนิด ๒ มิติ ทำด้วยเหล็กรูปพรรณ

รูปที่ ๓๓ อาคารที่เป็นคอนโดมิเนียมพักอาศัย อาคารพาณิชย์ ห้องโถงจัดเลี้ยง

รูปที่ ๓๔ การยกโครงข้อหมุน ๑ ชุดเข้าที่

ตัวอย่างโครงหลังคาโรงงานในรูปที่ ๓๒ มีช่วงกว้างประมาณสิบกว่าเมตร แต่ด้านข้างยอมให้มีเสาห่างกันประมาณ ๕ เมตรเป็นระยะ ๆ โครงข้อหมุนนี้ทำด้วยเหล็กรูปพรรณชนิดรูปตัว U และรูปตัว C ต่อกันที่จุดต่อด้วยแผ่นเหล็กประกับ แต่ละโครงถูกประกอบบนพื้นซึ่งหล่อคอนกรีตเสร็จเรียบร้อย แล้วใช้รถยกธรรมดาในการยกติดตั้ง ข้อควรระวังคือ เมื่อยกโครงเสร็จจำนวนหนึ่ง ต้องรีบใช้เหล็กเชื่อมขวางชั่วคราว เพื่อยึดแต่ละโครงไม่ให้ล้มเพราะลมกระโชกดังได้กล่าวมาแล้ว โดยเฉพาะถ้าเป็นโครงรูปจั่วจะล้มง่าย เพราะสูง

รูปที่ ๓๓ แสดงถึงอาคารสูง ๓๒ ชั้น รวมทั้งหลังคาที่ทำเป็นอาคาร ๓ แห่ง แต่ละแห่งมีขนาด ๓๖ × ๓๖ เมตร ช่วงว่างระหว่างอาคาร (clear span) ๒๕ เมตร ตั้งแต่ชั้น ๒๕ ขึ้นไปอีก ๗ ชั้น ต่อเชื่อมอาคารทั้ง ๓ แห่งเข้าด้วยกัน ถ้าก่อสร้างแบบธรรมดาจะต้องใช้นั่งร้านค้ำยันที่สูงมาก และต้องวางค้ำยันบนพื้นที่ชั้น ๗ อีกด้วย จึงได้ออกแบบให้เป็นโครงข้อหมุนชนิด ๒ มิติ ทั้งหมด ๔ ชุด ชุดละ ๒ โครง แล้วใช้แม่แรงไฮดรอลิกยกโครงเหล็กทั้งระบบ ครั้งละ ๑ ชุด ขึ้นไปวางบนที่รองรับชั้น ๒๕ เสร็จแล้วจึงสร้างต่อจนถึงชั้นที่ ๓๒

การที่ประกอบโครงข้อหมุนที่พื้นชั้นล่างเพราะการเชื่อมเหล็กรูปพรรณที่เป็นองค์อาคารเป็นท่อน ๆ กระทำได้ง่าย การตรวจสอบความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมด้วยเอกซเรย์ก็ทำได้ทั่วถึง ไม่มีจุดบอด อุปสรรคในการยกโครงใหญ่ขนาดนี้มีอยู่อย่างเดียว คือกระแสลมเวลานั้นค่อนข้างแรง ทุกอย่างต้องเตรียมพร้อมทั้งตัวแม่แรง เครื่องควบคุม ลวดสลิง รอก รอยเชื่อม ต้องตรวจสอบอย่างละเอียด ถ้าพบข้อบกพร่องใด ๆ

รูปที่ ๓๕ กำลังยกชุดที่ ๒

รูปที่ ๓๖ โครงข้อหมุนทำด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก คอร์ดบนรับหลังคา คอร์ดล่างรับพื้นที่ทำการ

แม้แต่น้อยจะต้องแก้ไขทันที ไม่ใช่ฝืนยกขึ้นไป ทั้งนี้เพื่อป้องกันมิให้เกิดอุบัติเหตุ และต้องรีบยกให้เสร็จเร็วที่สุด เพื่อไม่ให้ทันได้แกว่ง แต่ต้องยกให้ระดับเท่ากันตลอดเวลา โดยปราศจากการกระตุก

วัสดุที่ใช้ทำโครงข้อหมุนชนิด ๒ มิติ ส่วนใหญ่ใช้เหล็กรูปพรรณ เพราะหาซื้อง่าย มีรูปร่างและขนาดต่าง ๆ กัน สามารถต่อได้ด้วยแผ่นเหล็กประกับ (gusset plate) มีอยู่บ้างที่ใช้องค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังเช่นในรูปที่ ๓๖ เป็นโครงถักคอนกรีตเสริมเหล็ก ช่วงประมาณ ๓๐ เมตร ช่วงเสาด้านข้างประมาณ ๑๐ เมตร สูง ๕ เมตร กรณีเช่นนี้จะเรียก “โครงข้อหมุน” ก็ไม่สนิทใจนัก เพราะจะเกิดโมเมนต์ที่จุดร่วมมากพอสมควร ซึ่งวิศวกรผู้คำนวณออกแบบจะต้องคำนึงถึงด้วย

๒.๒ โครงข้อหมุนชนิด ๓ มิติ

โครงข้อหมุนชนิดนี้อาจเรียกว่าโครง ๓ มิติ (space frame) หรือโครงข้อหมุน ๓ มิติ (space truss) ปรกติใช้กับหลังคาที่มีช่วงกว้างและยาวมาก ๆ แต่มีความสูงจำกัด ลักษณะคล้ายกับนำเอาโครงข้อหมุนวางเรียงติด ๆ กันทั้ง ๒ ทางตั้งฉากกัน จุดต่อ (joint) ขององค์อาคารที่เป็นเหล็กรูปพรรณหรือท่อเหล็กอย่างหนาจะต้องออกแบบเป็นพิเศษ เพราะมีจำนวนมากกว่าชนิด ๒ มิติมาก โครงสร้างที่เป็นส่วนหลังคาจะผลิตภายในประเทศ หรือสั่งผลิตจากต่างประเทศก็ได้ ผลิตเสร็จแล้วนำมาประกอบ ณ สถานที่ก่อสร้าง คือบริเวณที่จะติดตั้งหลังคานั่นเอง เมื่อประกอบเสร็จก็ยกขึ้นติดตั้งบนที่รองรับ ซึ่งสร้างไว้ล่วงหน้าแล้ว ปรกติจะไม่ใช้วิธีเชื่อมโครงหลังคากับที่รองรับที่เป็นคาน โดยเฉพาะที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก เพราะอาจเกิดปัญหาการหดตัวของเหล็กที่ใช้ทำโครงข้อหมุน ซึ่งถ้าการหดตัวนั้นมีปริมาณมากอาจทำให้เกิดการวิบัติของที่รองรับได้

รูปที่ ๓๗ หลังคาห้องประชุมขนาด ๑๔ × ๑๔ เมตร คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รูปที่ ๓๘ ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์

ตัวอย่างหลังคาห้องประชุมขนาด ๑๔ × ๑๔ เมตร (รูปที่ ๓๗) ซึ่งนับว่าเป็นขนาดเล็ก องค์อาคารทำด้วยท่อเหล็ก จุดต่อรวมเชื่อมติดกับแผ่นเหล็กรอง ใช้วิธีก่อสร้างแบบยกทีละท่อน เพื่อประกอบให้เป็นโครง ๓ มิติ เป็นวิธีที่ยุ่งยาก ทำงานลำบาก เพราะต้องขึ้นไปทำงานบนที่สูง ทำให้เกิดปัญหามากมาย ตัวหลังคาทำด้วยไฟเบอร์กลาสส์รูปพีระมิดตั้งบนกริดรางน้ำโลหะ ที่ติดตั้งบนโครงหลังคาอีกชั้นหนึ่ง

รูปที่ ๓๙ ถึงรูปที่ ๔๔ แสดงถึงภาพการประกอบติดตั้งโครงหลังคาข้อหมุน ๓ มิติ ที่ห้อง plenary hall ขนาด ๔๕ × ๙๐ เมตร ของศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ โครงการนี้เป็นโครงการที่เร่งรีบมาก เพราะมีกำหนดเปิดใช้งานตายตัว เลื่อนวันไม่ได้แม้แต่วันเดียว ฉะนั้น การวางแผนจะต้องละเอียดและรอบคอบที่สุด ถึงขั้นที่ต้องสมมติปัญหาขึ้นแล้วเตรียมหาวิธีแก้ไขล่วงหน้า สถานที่ตั้งเป็นบ่อใหญ่ และลึกต้องถมด้วยดินทั้งกลางวันและกลางคืน และลงมือก่อสร้างทุกอย่างพร้อม ๆ กัน ทำการก่อสร้างรวมทั้งการออกแบบเป็นระบบ fast track ขณะวางผังเตรียมการตอกเสาเข็ม ต้องสั่งทำโครงหลังคาระบบโครงข้อหมุน ๓ มิติแล้ว จากประเทศเยอรมนี

รูปที่ ๓๙ โครงหลังคาข้อหมุน ๓ มิติ

รูปที่ ๔๐ จุดต่อรวมขององค์อาคาร

รูปที่ ๔๑ ที่รองรับโครงหลังคาทำเป็นเสาขึ้นไปรับ ซึ่งเสาชั้นล่างมีตำแหน่งไม่ตรงกับเสาที่รับหลังคา จึงมีรูปร่างอย่างที่เห็นในภาพ

รูปที่ ๔๒ แม่แรงไฮดรอลิก ๘ ตัว ที่ใช้ยกโครง ๓ มิติ ที่ประกอบเสร็จแล้วและวางบนพื้น พร้อมยกเข้าที่

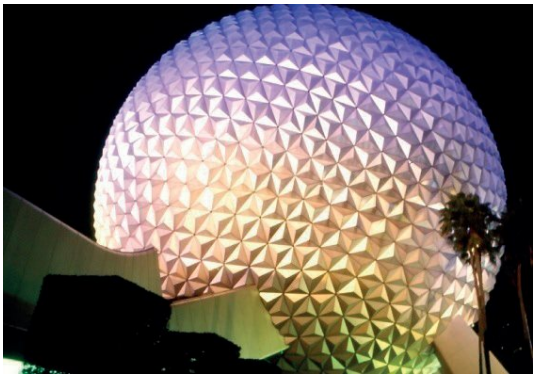
การผลิตตัวท่อและลูกกลมเจาะรูทำเกลียวต้องมีความละเอียด ถูกต้องแม่นยำอย่างมาก หากเกิดผิดพลาดแม้แต่น้อย เมื่อสะสมอาจทำให้รูเกลียวที่ทำไว้ไม่ตรงกับตำแหน่งเกลียวตัวผู้ อาจทำให้ไม่สามารถจะประกอบเป็นโครงได้ โครง ๓ มิติดังกล่าว หลังจากได้ทดลองประกอบเสร็จจากโรงงาน แล้วทำเครื่องหมายไว้ เมื่อขนส่งถึงหน่วยงานก่อสร้างจึงประกอบได้เรียบร้อยตามเดิม ทั้งนี้ต้องคำนวณเผื่อสำหรับการยืดหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิที่ต่างกันมากด้วย ปรากฏว่าส่วนประกอบทั้งหมดได้มาถึงหน่วยงานก่อสร้างทันเวลา โดยทางหน่วยงานได้ทำเสาเข็มเจาะหล่อในที่เสร็จแล้ว รีบเทพื้นชั้นล่างของห้อง plenary hall เสร็จ และมีกำลังพอที่จะรับน้ำหนักโครง ๓ มิติทั้งหมดได้ ขณะเดียวกันก็หล่อตอม่อและเสาขึ้นรับโครงหลังคา (รูปที่ ๔๑) ไว้คอยล่วงหน้า

การยกติดตั้ง ได้ใช้แม่แรงไฮดรอลิก ๘ ตัว ตั้งบนโครงเสาชั่วคราว ๘ โครง (รูปที่ ๔๒) โดยใช้เครื่องควบคุมการยกของแม่แรงทั้ง ๘ ตัวนั้นให้ระยะที่ยกสม่ำเสมอเท่า ๆ กัน และพร้อมๆ กัน การยกเสร็จสิ้นภายในวันเดียว ขั้นสุดท้ายคือมุงหลังคาด้วยแผ่นโลหะ ซึ่งพ่นด้านล่างด้วย vermiculite เพื่อป้องกันเสียงดังจากเม็ดฝนและสามารถดูดเสียงสะท้อนภายในห้องด้วยในตัว

รูปที่ ๔๓ อุปกรณ์ควบคุมแม่แรง ๘ ตัว ให้ยกโครง ๓ มิติ ขึ้นพร้อมกัน

รูปที่ ๔๔ โครงหลังคา ๓ มิติ ที่วางอยู่บนเสาจริง เรียบร้อยแล้ว

รูปที่ ๔๕ ภายในห้อง plenary hall เมื่อยกติดตั้งโครงหลังคาและติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ เสร็จแล้ว



รูปที่ ๔๖ Geodesic dome ถ่ายเมื่อมีโอกาสไปที่รัฐฟลอริดา สหรัฐอเมริกา

๒.๓ Geodesic dome

เปลือกบางชนิดนี้เป็นโครงสร้างที่มีลักษณะทรงกลม หรือส่วนของทรงกลม ประกอบด้วยโครงรูปสามเหลี่ยมเล็ก ๆ ต่อเนื่องกันจนเป็นรูปทรงกลม เป็นผลงานของ Prof. Buckminsters Fuller ต่อมาได้มีการใช้กันแพร่หลาย วัสดุที่ใช้คลุมมักใช้ไฟเบอร์กลาสส์ แผ่นใยสังเคราะห์ หรือแผ่นโลหะเบา ส่วนมากใช้เป็นอาคารถาวรสำหรับแสดงนิทรรศการ เช่น ในรูปที่ ๔๖ เป็น geodesic dome ที่สวนสนุกในรัฐฟลอริดา สหรัฐอเมริกา

๓. แผ่นพื้นกระทง (waffle slab)

เปลือกบางชนิดนี้เป็นแผ่นพื้นที่มีผิวบนเรียบธรรมดา แต่ข้างใต้มีลักษณะเป็นหลุมเหมือนกับควักคอนกรีตหนา ๆ ออก เหลือแต่ครีบ เรียงตัดกันเป็น grid โดยไม่มีคานลึก ๆ พาดกลางห้อง เหมาะสำหรับพื้นกว้าง ๆ แต่มี head room น้อย

ในการสร้างแผ่นพื้นกระทง ส่วนที่เสียเวลามากกว่าแผ่นพื้นธรรมดาคือ ระบบแบบหล่อคอนกรีต เพราะต้องทำเป็นกระทงคว่ำ บางรายทำแบบกระทงด้วยไม้ตอกกับที่ ซึ่งจะสิ้นเปลืองไม้แบบมากเพราะใช้

รูปที่ ๔๗ ด้านหน้าของตึกคณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

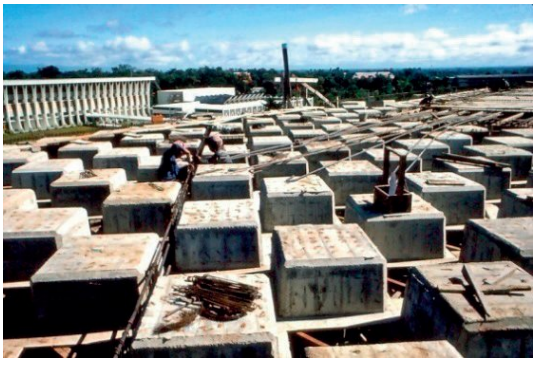
รูปที่ ๔๘ แบบรูปกระทงทำด้วยมอร์ทาร์

รูปที่ ๔๙ เมื่อสร้างถึงชั้นดาดฟ้า แบบรูปกระทงก็เสร็จครบพอดี

เพียงครั้งเดียว ที่จริงควรทำเป็นรูปกระทงหรือกล่องเพื่อใช้ได้หลาย ๆ ครั้ง หรือใช้เหล็กแผ่นต่อเป็นรูปกระทงแต่ชุดหนึ่ง ๆ ก็ควรทำให้เต็มช่วง เมื่อหล่อคอนกรีตเสร็จช่วงหนึ่งและคอนกรีตมีกำลังสูงพอจะถอดแบบได้ ก็ถอดชุดนั้นออกนำไปใช้กับช่วงอื่น วิธีนี้สามารถลดจำนวนแบบเหล็กที่ใช้หล่อกระทงลงไปได้ระดับหนึ่ง และต้องซ่อมแบบเหล็กที่อาจบุบหรือเสียรูปไปในขณะรื้อแบบหล่อออก

มีอีกวิธีหนึ่ง ทำแบบเหล็กที่ค่อนข้างหนาเพียงไม่กี่ชุด แล้วหล่อกระทงด้วยมอร์ทาร์บางเพียง ๑๐-๒๐ มิลลิเมตร เมื่อถอดแบบเหล็กออก ก็จะได้แบบกระทงทำด้วยมอร์ทาร์จำนวนมากเท่าที่ต้องการ (ดูรูปที่ ๔๘ ถึงรูปที่ ๕๐) มีขนาดเท่ากัน และลักษณะภายในเรียบร้อย ไม่ต้องแต่งอีกในภายหลัง ทำให้ลดเวลางานตกแต่งด้านใต้กระทงลงได้มาก

ฉะนั้น จะต้องเริ่มทำแบบหล่อด้วยมอร์ทาร์ตั้งแต่เริ่มต้น เพื่อให้ครบจำนวนที่ต้องการก่อนที่จะสร้างถึงชั้นดาดฟ้า



รูปที่ ๕๐ คว่ำกระทงกล่องเว้นกล่องเพื่อสะดวกในการเรียงและผูกเหล็ก

รูปที่ ๕๑ การผูกเหล็กเสร็จสมบูรณ์พร้อมเทคอนกรีต

รูปที่ ๕๒ สนามกีฬาโอลิมปิก ประเทศเยอรมนี

รูปที่ ๕๓ เสานี้ใช้หิ้วหลังคา

รูปที่ ๕๔ ภายใต้หลังคามีโครงเหล็ก

๔. หลังคาแขวน (hanging roof)

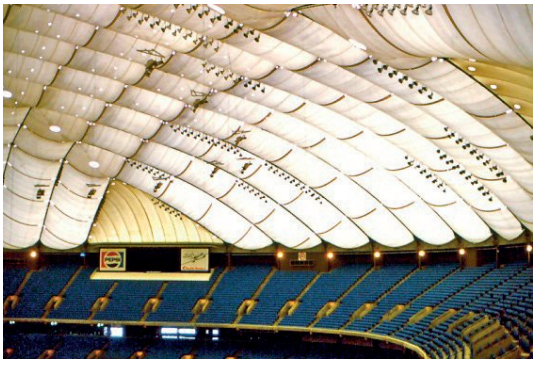
เปลือกบางชนิดนี้ในที่นี้หมายถึงหลังคาแขวนชนิด ๓ มิติเท่านั้น สำหรับหลังคาแขวน ๒ มิติ ปรกติจะหิ้วจากคาน หรือโครงข้อหมุนที่อยู่เหนือหลังคา หรือยึดรั้งกับเสาโดยใช้สายเคเบิล หรือองค์อาคารรับแรงดึงอื่น ๆ พาดบนเสา ดังเช่นที่แสดงในรูปที่ ๕๖ ซึ่งเป็นอาคารศูนย์ประชุมและแสดงนิทรรศการ BITEC ในกรุงเทพฯ โดยมีองค์อาคารรับแรงดึงพาดจากเสาเพื่อหิ้วโครงหลังคา ลักษณะทำนองเดียวกับสะพานขึง (stayed bridge)

ส่วนโครงหลังคาแขวน ๓ มิติ จะใช้เสาจำนวนน้อยและอยู่ภายนอกทั้งหมด โปรดดูรูปที่ ๕๒ ถึง ๕๕ ซึ่งได้ถ่ายไว้ในโอกาสที่ได้ไปเยี่ยมชมสถานที่ เป็นรูปภายนอกของส่วนที่เป็นหลังคาแขวนของสนามกีฬาโอลิมปิก ประเทศเยอรมนี ตัวหลังคาทำด้วยแผ่นวัสดุสังเคราะห์ประเภทเทฟลอน เนื่องจากเป็นอาคารถาวรมีการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น โคมไฟ เครื่องเสียง จึงต้องมีการเสริมเหล็กพิเศษ เพื่อสะดวกในการติดตั้ง ถ้าเป็นหลังคาของ pavilion สำหรับแสดงสินค้าขนาดย่อม ไม่มีการเสริมเหล็กพิเศษ การยกติดตั้งก็สะดวก และใช้เวลาในการประกอบติดตั้งน้อยมาก

รูปที่ ๕๕ การเสริมเหล็กบริเวณหัวเสา ซึ่งทำด้วยท่อเหล็กขนาดใหญ่

รูปที่ ๕๖ หลังคาศูนย์ประชุมและแสดงสินค้า BITEC ที่บางนา กรุงเทพฯ

รูปที่ ๕๗ สนามกีฬาในร่มที่ British Columbia, ประเทศแคนาดา เป็นโครงสร้างชนิดอัดลม

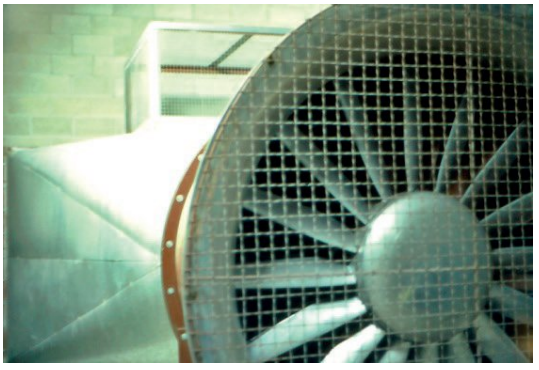


รูปที่ ๕๘ โครงหลังคาภายในเหนืออัฒจันทร์

๕. โครงสร้างอัดอากาศ (pneumatic structure)

โครงสร้างชนิดนี้ทำงานเหมือนถุงลมขนาดใหญ่อัดอากาศให้เต็ม วัสดุที่ใช้เป็นเหมือนผ้าสังเคราะห์มีความเหนียว ทนทานต่อแรงอัดภายใน และน้ำหนักบรรทุกภายนอก เช่น ลมกระโชก ฝน ลูกเห็บ หิมะ รวมทั้งอุณหภูมิที่เย็นจัดจนถึงร้อนจัด และต้องทนทานต่อผลกระทบจากการที่ต้องสัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากแสงแดด

โครงสร้างแบบอัดอากาศนี้ มักใช้ทำเป็นหลังคาขนาดกลางชั่วคราว เช่น ในงานแสดงสินค้า แต่ก็มีใช้เป็นหลังคาถาวรขนาดใหญ่ เช่น สนามกีฬาในร่มที่ประเทศแคนาดา ดังรูปที่ ๕๗ ถึง ๕๙ ซึ่งถ่ายไว้เมื่อครั้งที่ไปทัศนศึกษากับสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ การอัดอากาศใช้พัดลมขนาดใหญ่หลายเครื่องเปิดเต็มที่เมื่อจะใช้งาน เมื่อไม่มีการแข่งกีฬาก็จะเปิดเพียง ๒-๓ เครื่อง พอให้หลังคาทรงตัวอยู่ได้ หลังคานี้เมื่อไม่มีพัดลมอัดอากาศ จะยุบลงมาภายใน ๓-๔ ชั่วโมง แต่ถ้าอัดอากาศจนมีความดันสูงเกินไปจะมีลิ้นนิรภัยโดยเจาะหลังคาส่วนบน เป็นช่องสำหรับระบายอากาศส่วนที่เกินออก จนความดันอยู่ในระดับที่พอดี



รูปที่ ๕๙ พัดลมขนาดใหญ่ที่ใช้พ่นลมอัดอากาศให้หลังคาทรงตัวอยู่ได้

รูปที่ ๖๐ ด้านหน้าอาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รูปที่ ๖๑ หลังคาทั้งหมดเป็นชนิดคอนกรีตหล่อสำเร็จ

ปรกติเมื่อมีการเดินผ่านประตู จะมีการสูญเสียความดัน และเมื่อความดันระหว่างภายนอกและภายในแตกต่างกัน จะมีปัญหาเรื่องการเปิดปิดประตู จึงแก้ปัญหาด้วยการทำ air lock คือ ประตู ๒ ชั้น

๖. โครงสร้างพิเศษอื่น ๆ

เปลือกบางที่มีรูปร่างไม่เป็นไปตามทรงเรขาคณิต หรือผสมผสานกันหลายอย่าง จะยากแก่การวิเคราะห์และคำนวณออกแบบ บางครั้งต้องใช้วิธีสมมติให้โครงสร้างนั้นมีรูปร่างทางเรขาคณิตที่ใกล้เคียงที่สุด แล้ววิเคราะห์ และคำนวณ แล้วสร้างให้โครงสร้างมีการถ่ายแรงตามที่ตั้งสมมุติฐานไว้ เวลาออกแบบจริงควรทำการทดสอบการรับน้ำหนักเสียก่อน โดยอาจใช้ค่าแฟกเตอร์ปลอดภัยสูงกว่าปรกติก็ได้

หลังคาคอนกรีตชนิดหล่อสำเร็จชนิด ๓ มิติ เป็นโครงสร้างพิเศษอีกชนิดหนึ่ง

อาคารที่ทำการของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (รูปที่ ๖๐-๖๗) หลังคาใช้ระบบคอนกรีตหล่อสำเร็จทั้งหมด โดยหล่อทุกชิ้น ณ สถานที่ก่อสร้าง

รูปที่ ๖๒ การหล่อชิ้นส่วนหลังคาเป็นรูปพีระมิดกลวง

รูปที่ ๖๓ ชิ้นส่วนหลังคาที่หล่อไว้ตั้งแต่เริ่มงานก่อสร้าง พร้อมที่จะยกไปติดตั้ง

รูปที่ ๖๔ เสา ๑ ต้น แยกออกเป็น ๔ แฉก

สำหรับโครงสร้าง ใช้เสาห่างกัน ๑๐ × ๑๐ เมตร ทั้งหมด ตรงคอเสาแยกเป็น ๔ แขน เพื่อตัดช่วงหลังคาให้มีที่รองรับทุก ๆ ๕ เมตร ฉะนั้น มอดูล (module) ของหลังคาคือ ๑.๒๕ × ๑.๒๕ เมตร ทำให้ประหยัดค่าก่อสร้างลงได้มาก โครงสร้างทั้งหมดประกอบด้วยรูปพีระมิดกลวงทำด้วยคอนกรีตหนาเพียง ๔๐ มิลลิเมตร เพียงเพื่อหุ้มเหล็กให้มิด และไม่ต้องมีคานรองรับ ปลายแขนที่ขึ้นไปรับหลังคาใช้เหล็กตันขนาด ๒๕ × ๒๕ มิลลิเมตร เท่านั้นเป็นที่รองรับ

ขณะเริ่มการก่อสร้างได้หล่อพีระมิดกลวงจนได้จำนวนครบตามต้องการ เสร็จทันพอดีที่ตั้งเสา ๔ แฉกเสร็จ จากนั้นใช้เครื่องยกเล็ก ๆ ประกอบกันเองบนโครงซึ่งมี ๔ ล้อ (ซ้ายมือของรูปที่ ๖๔) สามารถเข็นไปได้ทั่วบริเวณ เป็นตัวยกชิ้นส่วนเหล่านี้วางบนที่รองรับโดยเชื่อมเหล็กขนาด ๑๕ มิลลิเมตร ที่อยู่รอบฐานพีระมิดให้ติดกันจนเสร็จครบทุกชิ้น ส่วนด้านบนใช้ท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ๒๕ มิลลิเมตร เชื่อมระหว่างยอดพีระมิดทุกชิ้นซึ่งมีรูระบายอากาศร้อน ๔ รู และมีครอบเหล็กเพื่อกันนกไปทำรังด้วย

โดยสรุป โครงสร้าง ๓ มิติ มีอยู่มากมายหลายชนิด ที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นเพียงตัวอย่างที่พบกันทั่วไป ในการออกแบบอาคารจะเลือกใช้โครงสร้างชนิดใด ควรพิจารณาให้รอบคอบถึงความเหมาะสม ไม่ใช่ออกแบบสวยจริงแต่แพงมาก หรือใช้งานไม่ได้ตามความต้องการ คิดง่าย ๆ อาจใช้หลัก S.A.F.E ก็ได้ คือ

S = strength & safety
A = aesthetics
F = function
E = economy

รูปที่ ๖๕ ปลายเสาฝังเหล็กขนาด ๒๕ × ๒๕ มิลลิเมตร เพื่อรองรับหลังคา

รูปที่ ๖๖ อาคารปฏิบัติการใช้ท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ๕๐.๘ มิลลิเมตร ถ่ายน้ำหนักหลังคาลงสู่เสาคอนกรีต

รูปที่ ๖๗ แสดงพื้นที่ทั้งหมดของหลังคาสังเกตดี ๆ จะเห็น compression members ทำด้วยท่อเหล็กอาบสังกะสี

ประการแรก โครงสร้างต้องแข็งแรง ทนทาน และปลอดภัย ตัวอาคารก็ต้องมีความสวยงาม และอยู่ได้อย่างสะดวกสบาย พร้อมงานวิศวกรรมระบบที่ดี การจัดวางพื้นที่ใช้งานต้องเหมาะสม ถูกต้องตามหลักวิชาและความประสงค์ของเจ้าของโครงการ และสิ่งสำคัญก็คือ ต้องพยายามให้ค่าก่อสร้างอยู่ภายในงบประมาณที่ตั้งไว้ ผู้เกี่ยวข้องทั้งหมดนับตั้งแต่ผู้ออกแบบซึ่งประกอบด้วยสถาปนิก วิศวกรโครงสร้าง วิศวกรงานระบบ สถาปนิกออกแบบงานตกแต่งภายใน ภูมิสถาปนิก ผู้ควบคุมงาน ผู้รับจ้างก่อสร้าง ผู้บริหารโครงการ แม้แต่เจ้าของโครงการเอง ต้องทำหน้าที่ของตนให้สมบูรณ์ เพื่อให้งานก่อสร้างถูกต้องตามแบบ และมีคุณภาพดี ข้อสำคัญคือค่าก่อสร้างไม่บานปลายมากนัก เพราะถ้าเกินงบประมาณไปมาก ก็จะเป็นภาระของผู้ลงทุนอย่างใหญ่หลวง จนอาจเป็นการลงทุนที่ไม่คุ้มค่าก็ได้

เช่นเดียวกับระยะเวลาของการก่อสร้าง จะต้องบริหารงานก่อสร้างให้สอดคล้องกับงวดงาน ปรกติถ้าเป็นการลงทุนเชิงการค้า อาจกำหนดให้สร้างเป็นระยะ (phase) ฉะนั้น งานก็ต้องให้เสร็จตามระยะที่จะใช้งานก่อนเพื่อการบริหารการเงินเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ความประณีตในการทำงานก็มีผลกระทบมากเหมือนกัน ไม่ใช่เปิดใช้งานไม่ทันไร หลังคาแตกร้าว ฝนตกหลังคารั่ว หน้าร้อนร้อนจนใช้งานไม่ได้ เสียงก้องมากเกินไป ฯลฯ คือ เพื่อให้ได้งานที่สมบูรณ์จริง ๆ จะต้องเอาใจใส่ในทุก ๆ เรื่องที่กล่าวมาทั้งหมด

บรรณานุกรม
อรุณ ชัยเสรี... “เกร็ดความรู้เกี่ยวกับการควบคุมงานก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก” ปรับปรุงครั้งที่ ๔

Abstract **Thin Shells and Other Space Structures**

Arun Chaiseri

Fellow of the Academy of Sciences, The Royal Institute, Thailand

A large roof covering a very large area without undesirable interior columns usually requires a 3-dimensional structure such as a thin shell which has various shapes and sizes. In choosing the most appropriate one, the available vertical space, the atmospheric as well as environmental condition of the surrounding area should be carefully considered. A thin-shell roof usually means a reinforced concrete structure having very small thickness compared with the other two dimensions. In designing a double-curvature shell, “membrane theory” is normally applied, where the thin curved concrete slab is treated like a large membrane which can take only tensile force; while the compression force is carried to the foundation through compression members.

Other 3-dimensional structures popularly used nowadays are space frames or space trusses. The members of the lattice-like structures are made of structural steel or steel pipes joined together by welding or steel balls. They may be fabricated from a far away factory and shipped to the construction site and are assembled on the floor right under the roof space. The whole assembly is then simultaneously lifted upward to sit on preconstructed columns and finally cover the whole roof structures with proper roofing materials such as metal sheets.

Still other 3-dimensional structures are pneumatic structures, waffle slabs, hanging structures or their combinations. To obtain the most appropriate 3-D structure to suit a building, the following factors should be carefully studied. The first things to be considered are the strength and safety, followed by aesthetics of the building as well as its required functions, while the most important factor is the cost of construction which should not overrun the budget. Otherwise, the project might not be feasible.

Keywords: thin shell, membrane theory, hyperbolic paraboloid, 3-dimensional structure, space frame, S.A.F.E.

วารสารราชบัณฑิตยสถาน
ปีที่ ๓๙ ฉบับที่ ๒ เม.ย.-มิ.ย. ๒๕๕๗

ปฏิทินจันทรคติ : ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากความคลาดเคลื่อนในปฏิทินจันทรคติของไทย และแนวทางในการพัฒนาข้อมูลทางจันทรคติด้วยวิธีการทางดาราศาสตร์*

นิพนธ์ ทรายเพชร
ราชบัณฑิต สำนักวิทยาศาสตร์
ราชบัณฑิตยสถาน
จตุรงค์ สุคนธชาติ
กรรมการจัดทำพจนานุกรมศัพท์ดาราศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงระบบปฏิทินสุริยจันทรคติที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลทางสุริยคติจากระบบปฏิทินเกรกอรีและข้อมูลทางจันทรคติจากระบบปฏิทินจันทรคติของไทย อันเป็นระบบปฏิทินที่ระบุถึงวัน-เดือน-ปีตามลักษณะของดิถีและตำแหน่งของดวงจันทร์ที่ปรากฏในท้องฟ้า การคำนวณข้อมูลทางจันทรคติที่พบในประเทศไทยมี ๓ วิธี ได้แก่ การคำนวณหาดิถีเฉลี่ยและตำแหน่งโดยประมาณของดวงจันทร์ตามคัมภีร์สุริยยาตร์ การหาดิถีเฉลี่ยของดวงจันทร์ด้วยการเดินปักข์บนกระดานปักขคณนา และการคำนวณหาดิถีและตำแหน่งของดวงจันทร์จริงด้วยวิธีการทางดาราศาสตร์ การหาดิถีเฉลี่ยของดวงจันทร์ใน ๒ วิธีแรกนั้นจะคำนวณโดยใช้ดวงจันทร์สมมุติที่โคจรรอบโลกด้วยอัตราเร็วคงตัว มีคาบดิถีเฉลี่ยประมาณ ๒๙.๕๓๐๕๘๓๒๑๕ วัน และ ๒๙.๕๓๐๕๙๓๕๑๔ วัน ตามลำดับ ส่วนวิธีที่ ๓ เป็นการคำนวณโดยใช้ดวงจันทร์จริงที่โคจรรอบโลกด้วยอัตราเร็วไม่คงตัว มีคาบดิถีเฉลี่ยประมาณ ๒๙.๕๓๐๕๘๗๙๘๑ วัน เนื่องจากระบบปฏิทินจันทรคติของไทยอาศัยผลการคำนวณจากคัมภีร์สุริยยาตร์เป็นหลัก ดังนั้น จึงพบการระบุวันธรรมสวนะ (วัน ๑๔ ค่ำ วัน ๑๕ ค่ำ และวัน ๘ ค่ำ ของเดือนจันทรคติ) เร็วกว่าวันที่ควรจะเป็นตามดิถีของดวงจันทร์จริงประมาณ ๑ วันได้มากถึง ๒๔ ครั้งใน พ.ศ. ๒๕๕๖ และ ๓๔ ครั้งใน พ.ศ. ๒๕๕๗

*บรรยายในการประชุมสำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน เมื่อวันที่ ๒ ตุลาคม พ.ศ. ๒๕๕๖

บทความนี้จึงขอเสนอผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากความคลาดเคลื่อนในระบบปฏิทินสุริยจันทรคติของไทยใน ๔ ประเด็น ได้แก่ ผลกระทบต่อพระธรรมวินัยเรื่องการกำหนดวันเข้าพรรษา ผลกระทบต่อการระบุวันสำคัญทางพระพุทธศาสนา ผลกระทบต่อวันสำคัญตามวัฒนธรรมของไทย และผลกระทบต่อการบอกฤดูกาลในประเทศไทย ผลกระทบเหล่านี้จะลดลงหรืออาจจะไม่เกิดขึ้นหากระบบปฏิทินจันทรคติของไทยมีการระบุถึงวันและเวลาที่สังเกตพบ "จันทร์เพ็ญ" บนเมริเดียนอ้างอิงของประเทศไทยอย่างถูกต้องเป็นประจำทุกเดือนจันทรคติ การระบุนี้เป็นประเด็นสำคัญซึ่งผู้ที่เกี่ยวข้องทั้งในการจัดทำและในการใช้งานปฏิทินจันทรคติของไทยส่วนใหญ่คาดหวังให้มีความถูกต้อง พร้อมกันนี้จะขอเสนอแนวความคิดของ "ปฏิทินสุริยคติดาราศาสตร์ไทย" ซึ่งเป็นระบบปฏิทินทางดาราศาสตร์ที่จะช่วยแสดงถึงดิถี ตำแหน่ง และระยะห่างเชิงมุมจากดาวฤกษ์เด่น (ฤกษ์ทางโหราศาสตร์) ในระบบพิกัดสุริยวิถีของดวงจันทร์ในปฏิทินสุริยคติ ปฏิทินนี้อาจเป็นแหล่งข้อมูลในการพัฒนาระบบปฏิทินจันทรคติของไทยให้เป็นเอกภาพ เนื่องจากจะช่วยกำหนดนิยามที่เหมาะสมในการบัญญัติคำศัพท์ดาราศาสตร์ คือ "วันเพ็ญ" หรือ "วันขึ้น ๑๕ ค่ำ" นอกจากนี้ ยังอาจเป็นข้อมูลประกอบสำหรับการวางปีอธิกมาสและปีอธิกวารให้สอดคล้องกับประเพณีทางพระพุทธศาสนาและฤดูกาลในประเทศไทยได้มากยิ่งขึ้น หากปฏิทินจันทรคติของไทยสามารถกำหนด "วันเพ็ญ เดือน ๘" หรือ "วันเพ็ญ เดือน ๘๘" ได้สอดคล้องกับพระธรรมวินัยเกี่ยวกับวันเข้าพรรษา โดยอ้างอิงจันทร์เพ็ญจริงปรากฏอยู่ใกล้กับ "ปุพพสาฒฤกษ์ (ดาวเดลตา-คนยิงธนู)" และ "อุตตราสาฒฤกษ์ (ดาวซิกมา-คนยิงธนู)" ตามลำดับ และสอดคล้องกับฤดูฝนในประเทศไทยแล้ว จะเกิดความยอมรับจากทุกภาคส่วนที่เกี่ยวข้องกับปฏิทินจันทรคติของไทย

คำสำคัญ : **ปฏิทินสุริยคติ, ปฏิทินจันทรคติ, ดวงจันทร์, ดิถี, จันทร์เพ็ญ, วันเพ็ญ, วันขึ้น ๑๕ ค่ำ, วันเข้าพรรษา**

๑. ปฏิทินจันทรคติของไทย

ระบบปฏิทินสุริยจันทรคติที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทยประกอบไปด้วยข้อมูลทางสุริยคติจากระบบปฏิทินเกรกอรีและข้อมูลทางจันทรคติจากระบบปฏิทินจันทรคติของไทย ซึ่งเป็นระบบปฏิทินที่ระบุถึงวัน-เดือน-ปีตามลักษณะของดิถีและตำแหน่งของดวงจันทร์ที่ปรากฏในท้องฟ้า การคำนวณข้อมูลทางจันทรคติที่พบในประเทศไทยมี ๓ วิธี ได้แก่ การคำนวณหาดิถีและตำแหน่งของดวงจันทร์จริงด้วยวิธีการทางดาราศาสตร์ การคำนวณหาดิถีเฉลี่ยและตำแหน่งโดยประมาณของดวงจันทร์ตามคัมภีร์สุริยยาตร์ และการหาดิถีเฉลี่ยของดวงจันทร์ด้วยการเดินปักข์บนกระดานปักขคณนา ทั้ง ๓ วิธีได้ระบุคาบดิถีเฉลี่ยของดวงจันทร์ในรอบเดือนจันทรคติที่แตกต่างกัน จึงเป็นเหตุให้ระบุวันข้างขึ้นข้างแรมต่าง ๆ ในรอบเดือนของปฏิทินจันทรคติแตกต่างกัน การคำนวณปฏิทินจันทรคติวิธีทั้งสามข้างต้นมีดังต่อไปนี้

๑.๑ ความรู้ทางดาราศาสตร์สำหรับปฏิทินสุริยจันทรคติไทย

ความรู้ทางดาราศาสตร์ในปัจจุบันได้พัฒนาการสังเกตการณ์ดวงจันทร์ได้อย่างละเอียด จนสามารถพบคาบดิถีเฉลี่ยได้อย่างแม่นยำ สำหรับคริสต์ศตวรรษที่ ๒๑ นี้ คาบดิถีเฉลี่ยของดวงจันทร์จะมีค่าประมาณ ๒๙.๕๓๐๕๘๗๙๘๑ วัน หากกำหนดให้ ๑ ปีสุริยะมี ๑๒ เดือนดิถีแล้ว ๑ ปีสุริยะจะมีจำนวนวันเท่ากับ ๓๕๔.๓๗ วัน แต่เนื่องจากคาบเวลาเฉลี่ยของ ๑ ปีสุริยะตามปฏิทินเกรกอรีมีจำนวนวันเท่ากับ ๓๖๕.๒๔๒๕ วัน จึงอาจมีจำนวนวันแตกต่างกันได้ถึง ๑๐.๘๘ วันในรอบปี หรือมีจำนวนวันหายไปถึง ๓๒.๖๔ วัน (ประมาณ ๑ เดือนจันทรคติ) ในรอบ ๓ ปี ดังนั้น เมื่อระบบปฏิทินที่นิยมใช้ของประเทศไทยได้นำข้อมูลจากปฏิทินจันทรคติมาแสดงร่วมกับปฏิทินเกรกอรีซึ่งเป็นปฏิทินในระบบสุริยคติ (เรียกว่า ปฏิทินสุริยจันทรคติไทย หรือ Thai lunisolar calendar) แล้ว อาจก่อให้เกิดความแตกต่างของจำนวนวันในรอบปีได้มาก ระบบปฏิทินจันทรคติไทยจึงมีการชดเชยจำนวนเดือนจันทรคติที่หายไปนี้ด้วยการเพิ่มเดือนขึ้น ๑ เดือนในทุก ๆ รอบ ๒-๓ ปีจันทรคติ (เรียกชื่อว่า ปีอธิกมาส) หรือ ด้วยการเพิ่มจำนวนวันขึ้น ๑ วันในบางปี (เรียกชื่อว่า ปีอธิกวาร) เพื่อช่วยปรับให้ปฏิทินจันทรคติสอดคล้องกับปฏิทินเกรกอรีและธรรมชาติการเกิดดิถีของดวงจันทร์ ความพยายามในการปรับปฏิทินจันทรคติไทยให้มีความสอดคล้องนี้ก็เพื่อที่ระบบปฏิทินของไทยจะได้แสดงข้อมูลของทั้ง ๒ ระบบได้อย่างเหมาะสมกับวิถีชีวิต วัฒนธรรม และความศรัทธาทางศาสนา จึงได้มีการค้นคิดจากนักปราชญ์ชาวไทยกันอย่างต่อเนื่องตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

ความรู้ทางดาราศาสตร์สามารถคำนวณหาดิถีเฉลี่ยของดวงจันทร์ หรือ เฟสเฉลี่ยของดวงจันทร์ *(F)* ของแต่ละวันในรอบเดือนจันทรคติได้อย่างแม่นยำโดยคำนึงถึงผลการรบกวนสำคัญทั้งหมดที่อาจเกิดขึ้นได้ ดังความสัมพันธ์ตามชุดของสมการต่อไปนี้

$$F = 0.5\,(1 - \cos D)$$

$$D = l'' - \lambda_0$$

$$l'' = l' + v$$

$$v = 0.6583 \sin 2\,(l' - \lambda_0)$$

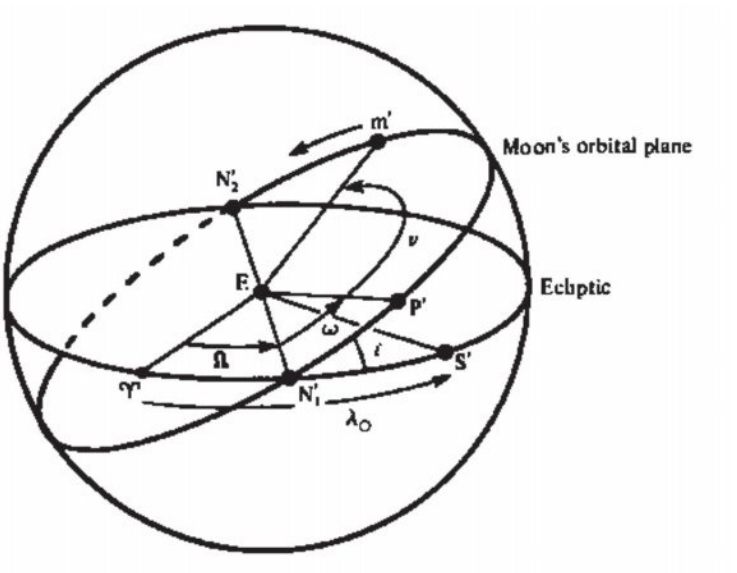
โดยที่ D คือ ค่ามุมที่แสดงอายุของดวงจันทร์ในวันที่ต้องการคำนวณหาดิถีเฉลี่ยของดวงจันทร์

λ_0 คือ ค่าลองจิจูดสุริยวิถีของดวงอาทิตย์ในวันที่ต้องการคำนวณหาดิถีเฉลี่ยของดวงจันทร์

v คือ ค่าความผันแปรของวงโคจรของดวงจันทร์

l'' คือ ค่าลองจิจูดจริง (true orbital longitude) ของดวงจันทร์ในวงโคจรจริง (true orbit) รอบโลก และ

l' คือ ค่าลองจิจูดแก้ไข (moon's corrected longitude) ของดวงจันทร์ในวงโคจรจริง ซึ่งนิยมใช้ค่าแก้ไขที่มีความละเอียดถึงพจน์ที่ ๔ (รายละเอียดแสดงในหนังสือของ Peter Duffett-Smith หน้า ๑๔๓)



รูปที่ ๑ วงโคจรจริงของดวงจันทร์เทียบกับระนาบสุริยวิถี และจุดสำคัญต่าง ๆ เพื่อใช้คำนวณหาเฟสเฉลี่ยของดวงจันทร์ของแต่ละวันในรอบเดือนจันทรคติ
ที่มา : Peter Duffett-Smith, Practical Astronomy with your Calculator, 3rd edition หน้า ๑๔๐

๑.๒ คัมภีร์สุริยยาตร์

คัมภีร์สุริยยาตร์เป็นแม่บทของคัมภีร์โหราศาสตร์ภาคคำนวณของไทยนับตั้งแต่โบราณ มีที่มาจากคัมภีร์ปัญจสิทธานติกา ของวราหมิหิระ ซึ่งเรียบเรียงจากตำราดาราศาสตร์ของอินเดียโบราณเมื่อ พ.ศ. ๑๐๔๘ โดยมีหลักฐานพบการใช้คัมภีร์สุริยยาตร์ในการคำนวณทางโหราศาสตร์นับตั้งแต่กรุงสุโขทัย และยังคงมีการใช้งานกันอย่างต่อเนื่องโดยโหราจารย์สำนักต่าง ๆ ของไทยตราบจนถึงปัจจุบัน กรมโหรหลวงในอดีตได้ใช้คัมภีร์สุริยยาตร์ร่วมกับคัมภีร์มานัตต์ ในการคำนวณตำแหน่งของดาวเคราะห์เพื่อใช้จัดทำปฏิทินโหราศาสตร์และปฏิทินจันทรคติไทย ดังนั้น เมื่อกล่าวถึงคัมภีร์สุริยยาตร์ในประเทศไทย จึงหมายถึงคัมภีร์สุริยยาตร์และมานัตต์เสมอ คัมภีร์สุริยยาตร์นี้เป็นคัมภีร์คู่บ้านคู่เมืองที่ใช้เป็นคัมภีร์ในการคำนวณปฏิทินโหราศาสตร์ เป็นเอกลักษณ์ประจำชาติที่ฝังลึกลงไปในประเพณี วัฒนธรรม และพุทธศาสนาของประเทศไทยอย่างแยกแยะไม่ออกนับตั้งแต่โบราณตราบจนถึงปัจจุบัน คัมภีร์สุริยยาตร์มีอิทธิพลต่อการคำนวณข้อมูลทางจันทรคติสำหรับปฏิทินจันทรคติเพื่อใช้กำหนดวันสำคัญทางราชการของประเทศไทย (เรียกว่า ปฏิทินจันทรคติราชการไทย หรือ ปฏิทินหลวง) เป็นอย่างมาก

อารี สวัสดี และ **วรพล ไม้สน** ได้นำเสนอการคำนวณหาดิถีเฉลี่ยของดวงจันทร์ในรอบเดือนจันทรคติจากคัมภีร์สุริยยาตร์ ซึ่งจะมีคาบดิถีเฉลี่ย (synodic peroid) หรือ อวมาร เท่ากับ ๒๙.๕๓๐๕๘๓๒๑๕ วัน ใกล้เคียงกับเดือนดิถี (synodic month) ที่มีค่าประมาณ ๒๙.๕๓๐๕๘๗๙๘๑๔๘๑๕ วัน สำหรับช่วงเวลาในคริสต์ศตวรรษที่ ๒๑ ด้วยวิธีการต่อไปนี้

๑ จตุรยุค มีจำนวนวันเท่ากับ ๑,๕๗๗,๙๑๗,๘๐๐ วันสุริยคติ และมีค่าใกล้เคียงกับค่าอวมาร ๑,๖๐๓,๐๐๐,๐๘๐ ดิถี

๑ วันสุริยะ มีค่า ๑,๖๐๓,๐๐๐,๐๘๐ ÷ ๑,๕๗๗,๙๑๗,๘๐๐ = ๗๐๓ ÷ ๖๙๒ ดิถีในคัมภีร์สุริยยาตร์

ดังนั้น จำนวนวันสุริยคติใน ๑ เดือนจันทรคติ มีค่าจำนวนดิถี หรือมีคาบดิถีเฉลี่ย = (๖๙๒ ÷ ๗๐๓) x ๓๐ วัน = ๒๙.๕๓๐๕๘๓๒๑๕ วัน

เนื่องจากคาบดิถีเฉลี่ยของปฏิทินปักขคณนามีความคลาดเคลื่อนจากเดือนดาราคติประมาณ ๐.๐๐๐๐๐๔๗๖๖ วันในรอบ ๑ เดือนจันทรคติ หรือประมาณ ๐.๐๐๐๐๕๗๑๙ วันในรอบ ๑ ปี ซึ่งดูเหมือนจะมีค่าน้อยมากแต่คัมภีร์สุริยยาตร์นี้ได้ใช้สืบต่อกันมาเป็นเวลายาวนานนับพันปี (นับตั้งแต่สมัยสุโขทัยเป็นอย่างน้อย) โดยไม่มีการปรับเทียบผลจากการสังเกตพบดิถีของดวงจันทร์ในธรรมชาติจริง ดังนั้น ในปัจจุบันดิถีจันทร์ที่คำนวณได้จึงอาจจะคลาดเคลื่อนจากธรรมชาติจริงได้มากที่สุดถึงประมาณ ๒.๑๗ วัน เช่น วันวิสาขบูชาใน พ.ศ. ๒๕๕๗ ถูกกำหนดให้เป็นวันอังคารที่ ๑๓ พฤษภาคม แต่จันทร์เพ็ญจริงจะเกิดขึ้นในวันพฤหัสบดีที่ ๑๕ พฤษภาคม เวลา ๐๒:๑๖ น. ในปัจจุบันได้มีโหราจารย์จากหลายสำนักโหราศาสตร์ภาคคำนวณของประเทศไทยพยายามปรับเทียบคัมภีร์สุริยยาตร์นี้ให้สอดคล้องกับการสังเกตการณ์ทางดาราศาสตร์ ซึ่งผู้เขียนเชื่อว่าหากปรับเทียบวันเริ่มต้นของจตุรยุคให้ตรงกับวันที่สังเกตพบปรากฏการณ์สุริยุปราคาเต็มดวงในประเทศไทย เช่น ใช้วันที่ ๒๔ ตุลาคม ๒๕๓๘ เป็นวันเริ่มต้นของจตุรยุคแล้ว คัมภีร์สุริยยาตร์จะให้ผลการคำนวณที่สอดคล้องกับธรรมชาติของดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ทันที

๑.๓ ปฏิทินปักขคณนา

ปฏิทินปักขคณนาเป็นปฏิทินจันทรคติไทยประเภทหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อใช้ทำศาสนกิจในพระสงฆ์คณะธรรมยุติของประเทศไทย คิดค้นขึ้นโดย **พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว** ซึ่งทรงใช้หลักการคำนวณดิถีเฉลี่ยของดวงจันทร์ในรอบเดือนจันทรคติจากคัมภีร์สารัมภ์ คาบดิถีเฉลี่ย หรือ ดิถีมาส มีค่าเท่ากับ ๒๙.๕๓๐๕๙๓๕๑๔ วัน ซึ่งใกล้เคียงกับเดือนดิถีที่มีค่าประมาณ ๒๙.๕๓๐๕๘๗๙๘๑๔๘๑๕ วัน สำหรับช่วงเวลาในคริสต์ศตวรรษที่ ๒๑

คาบดิถีเฉลี่ย $= (๓๖๐ \times ๖๐)/(\text{อัตราโคจรมัธยมจันทร์ใน ๑ วัน} \div ๑๐^{๖} - \text{อัตราโคจรมัธยมอาทิตย์ใน ๑ วัน} \div ๑๐^{๖})$

$= (๓๖๐ \times ๖๐)/(๗๙๐๕๘๑๐๐๓๒ \div ๑๐^{๖} - ๕๙๑๓๖๑๗๑๖ \div ๑๐^{๖}) =$ ๒๙.๕๓๐๕๙๓๕๑๔ วัน

ปฏิทินปักขคณนาคำนวณหาดิถีจันทร์ในแต่ละวันโดยการทดดิถีของดวงจันทร์ไปครั้งละ ๑ วัน จากวันอ้างอิงเริ่มต้น บนกระดานสำหรับเดินทดโดยใช้หมุดไม้ในการช่วยเดิน เรียกว่ากระดานปักขคณนา เนื่องจากคาบดิถีเฉลี่ยของปฏิทินปักขคณนาคลาดเคลื่อนจากเดือนดาราคติประมาณ ๐.๐๐๐๐๐๕๕๓๓ วันในรอบ ๑ เดือนจันทรคติ หรือประมาณ ๐.๐๐๐๐๖๖๔๐ วันในรอบ ๑ ปี ซึ่งดูเหมือนจะมีค่าความแตกต่างกันน้อยมาก หากแต่การเดินปักข์ในปฏิทินปักขคณนาได้กำหนดวันแรกในการเดินให้เป็นวันเสาร์ที่ ๒๘ มกราคม พ.ศ. ๒๒๗๙ (ค.ศ. ๑๗๓๖) ในรัชสมัยของสมเด็จพระนารายณ์มหาราชและให้เป็นวันแรม ๑ ค่ำ หากแต่ข้อมูลทางดาราศาสตร์พบว่าวันดังกล่าวควรเป็นวันขึ้น ๑๕ ค่ำ ดังนั้น จึงทำให้ปฏิทินปักขคณนาอาจคลาดเคลื่อนจากธรรมชาติของดวงจันทร์ที่พบในท้องฟ้าได้เช่นเดียวกับการคำนวณจากคัมภีร์สุริยยาตร์ อนึ่ง ความคลาดเคลื่อนของปฏิทินปักขคณนาที่พบในปัจจุบันมีค่าน้อยกว่าที่พบจากคัมภีร์สุริยยาตร์ เช่น วันวิสาขบูชาใน พ.ศ. ๒๕๕๗ ปฏิทินปักขคณนาจะคลาดเคลื่อนเพียง ๑.๐๘ วันเท่านั้น ส่วนปฏิทินที่คำนวณจากคัมภีร์สุริยยาตร์คลาดเคลื่อนมากที่สุดถึงประมาณ ๒.๑๗ วัน ผู้เขียนเชื่อว่าควรปรับการเดินปักข์ของปฏิทินปักขคณนาเทียบกับปรากฏการณ์สุริยุปราคาเต็มดวงในประเทศไทยในยุคปัจจุบัน เช่น วันที่ ๒๔ ตุลาคม พ.ศ. ๒๕๓๘ ปฏิทินปักขคณนาระบุให้เป็นวันขึ้น ๑ ค่ำ หากแต่ธรรมชาติของปรากฏการณ์เกิดสุริยุปราคาจะเกิดเมื่อดวงอาทิตย์ปรากฏอยู่ในวันข้างแรม ๑๔ หรือ ๑๕ ค่ำ ดังนั้น จึงควรปรับปฏิทินปักขคณนาให้สอดคล้องกัน การปรับเทียบปฏิทินปักขคณนากับธรรมชาตินี้อาจช่วยให้มีความแม่นยำต่อการเกิดดิถีของดวงจันทร์จริงมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ ๑ วันที่และเวลาสากล (UT) ณ ช่วงเวลาที่เกิดจันทร์เพ็ญ (Full Moon) จันทร์กึ่งดวงข้างแรม (Last Quarter) จันทร์ดับ (New Moon) และ จันทร์กึ่งดวงข้างขึ้น (First Quarter) ใน พ.ศ. ๒๒๗๙

1736 Phases of the Moon
Universal Time

New Moon	First Quarter	Full Moon	Last Quarter
d h m	d h m	d h m	d h m
			Jan 5 8 37
Jan 13 1 05	Jan 21 6 26	Jan 28 4 11	Feb 3 20 38
Feb 11 20 07	Feb 19 21 57	Feb 26 14 21	Mar 4 10 55
Mar 12 14 49	Mar 20 9 17	Mar 27 0 06	Apr 3 3 04
Apr 11 7 35	Apr 18 17 08	Apr 25 9 42	May 2 20 29
May 10 21 23	May 17 22 42	May 24 19 38	Jun 1 14 22
Jun 9 8 13	Jun 16 3 26	Jun 23 6 35	Jul 1 7 42
Jul 8 16 53	Jul 15 8 42	Jul 22 19 17	Jul 30 23 33
Aug 7 0 33	Aug 13 15 44	Aug 21 10 09	Aug 29 13 21
Sep 5 8 17	Sep 12 1 41	Sep 20 2 51	Sep 28 1 03
Oct 4 16 54	Oct 11 15 27	Oct 19 20 18	Oct 27 11 01
Nov 3 2 54	Nov 10 9 17	Nov 18 13 12	Nov 25 19 48
Dec 2 14 41	Dec 10 6 23	Dec 18 4 37	Dec 25 4 03

ที่มา : http://aa.usno.navy.mil/cgi-bin/aa_moonphases.pl?year=1736&ZZZ=END

ค้นคืน : ๒๓ มกราคม พ.ศ. ๒๕๕๗

๒. ผลจากความคลาดเคลื่อนของปฏิทินจันทรคติไทย

เนื่องจากกฎเกณฑ์สำหรับปฏิทินจันทรคติราชการของประเทศไทย หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า ปฏิทินหลวง นั้นมีกฎเกณฑ์ตายตัวที่ใช้สืบทอดกันมาแต่โบราณ กล่าวคือ

๑. เดือนคู่มี ๓๐ วันนับตั้งแต่วันขึ้น ๑ ค่ำถึงวันขึ้น ๑๕ ค่ำแล้วต่อด้วยวันแรม ๑ ค่ำถึงวันแรม ๑๕ ค่ำ ส่วนเดือนคี่จะมี ๒๙ วัน โดยจะไม่มีวันแรม ๑๕ ค่ำ

๒. การแทรกเดือนต้องกระทำระหว่างเดือน ๗ กับเดือน ๘ แล้วเรียกเดือนที่แทรกนี้ว่า เดือนแปดแรก หรือ เดือน ๘ ส่วนเดือนต่อมาเรียกว่า เดือนแปดหลัง หรือ เดือน ๘๘

๓. เดือนที่แทรกนี้จะต้องมีจำนวนวัน ๓๐ วันเท่านั้น แล้วเรียกปีที่มีการแทรกเดือนนี้ว่า ปีอธิกมาส

๔. การแทรกวันเพิ่มขึ้น ๑ วันจะต้องกระทำในเดือน ๗ แล้วเรียกวันที่แทรกเพิ่มนี้ว่า วันแรม ๑๕ ค่ำ เดือน ๗ และเรียกปีที่มีการแทรกวันเพิ่มนี้ว่า ปีอธิกวาร

กฎเกณฑ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นกฎที่ตายตัว ทำให้ผู้จัดทำปฏิทินมีขอบเขตจำกัดที่จะทำให้ปฏิทินจันทรคติสอดคล้องถูกต้องต่อปรากฏการณ์ธรรมชาติ ดังนั้น จึงพบความคลาดเคลื่อนของปฏิทินจันทรคติไทยในส่วนที่สำคัญ ๒ ส่วน ดังต่อไปนี้

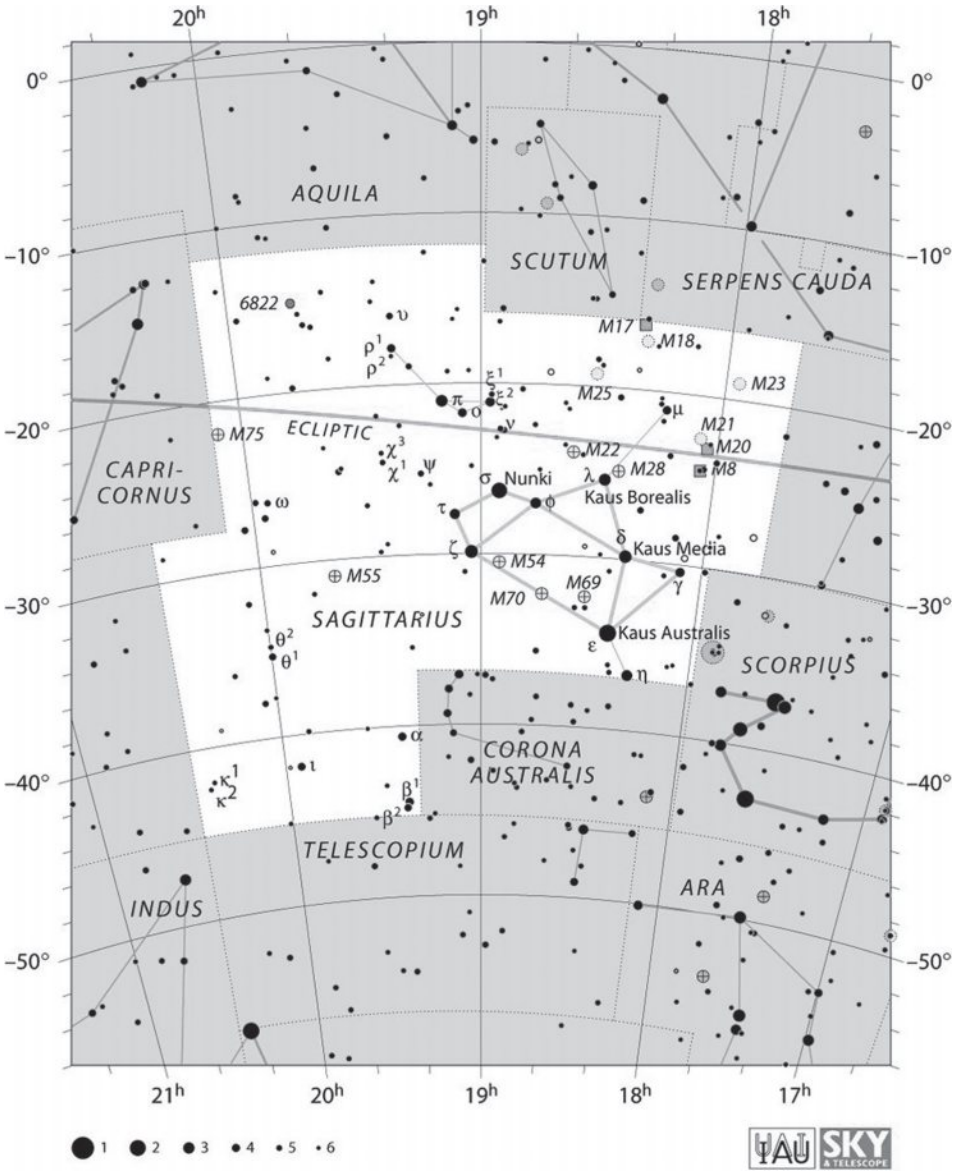
– **การระบุวันข้างขึ้นหรือข้างแรมที่ไม่ตรงกับดิถีของดวงจันทร์ในท้องฟ้า** ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเกิดขึ้นได้บ่อยมากในปฏิทินจันทรคติไทย เช่น วันธรรมสวนะมีดิถีคลาดเคลื่อนจากดิถีจริงของดวงจันทร์มากถึง ๓๔ วันในทั้งหมด ๕๒ วันใน พ.ศ. ๒๕๕๗ ในอดีต ความรู้ในการสังเกตดิถีของดวงจันทร์ยังไม่ได้แพร่หลายสู่สาธารณชน ความคลาดเคลื่อนนี้จึงไม่มีผลกระทบใด ๆ แต่ในปัจจุบันบุคคลทั่วไปสามารถค้นคว้าความรู้เรื่องนี้ได้สะดวกผ่านทางอินเทอร์เน็ต นอกจากนี้ ยังมีโปรแกรมสำหรับคำนวณหาร้อยละความสว่างของดวงจันทร์ได้ ผ่านโทรศัพท์ส่วนบุคคล ดังนั้น ความคลาดเคลื่อนในการระบุดิถีของดวงจันทร์นี้จึงส่งผลต่อความเชื่อมั่นในปฏิทินจันทรคติไทยอย่างกว้างขวางในสังคมไทยยุคปัจจุบัน

– **การระบุเดือนจันทรคติในปฏิทินจันทรคติไม่สอดคล้องกับการเกิดฤดูกาลของประเทศไทย** ความคลาดเคลื่อนนี้เกิดขึ้นเพราะเกณฑ์ในการวางปีอธิกมาสที่ใช้สืบต่อกันมาไม่สอดคล้องกับธรรมชาติหรือการเปลี่ยนแปลงฤดูกาลในยุคปัจจุบัน

ความคลาดเคลื่อนทั้ง ๒ ส่วนได้ก่อให้เกิดผลกระทบที่สำคัญต่อสังคมไทยดังที่ได้อภิปรายกันอย่างกว้างขวางจากในหลายภาคส่วนของประเทศไทย และสามารถสรุปได้ใน ๔ ประเด็น คือ

๒.๑ ผลกระทบต่อพระธรรมวินัยเรื่องการกำหนดวันเข้าพรรษา

การกำหนดวันเข้าพรรษาและวันออกพรรษานั้นได้ยึดตามพระธรรมวินัย ซึ่งเป็นเสมือนกฎที่พระภิกษุสงฆ์ทุกรูปต้องปฏิบัติเพื่อความอยู่เป็นสุข (พระไตรปิฎก เล่มที่ ๔ พระวินัยปิฎก เล่มที่ ๔ มหาวรรค ภาค ๑) กล่าวว่า *“พระผู้มีพระภาครับสั่งว่า ดูกรภิกษุทั้งหลาย วันเข้าพรรษานี้มี ๒ คือ ปุริมิกา วันเข้าพรรษาต้น ๑ ปัจฉิมิกา วันเข้าพรรษาหลัง ๑ เมื่อพระจันทร์เพ็ญเสวยฤกษ์อาสาฬหะล่วงไปแล้ววันหนึ่ง พึงเข้าพรรษาต้น เมื่อพระจันทร์เพ็ญเสวยฤกษ์อาสาฬหะล่วงไปแล้วเดือนหนึ่งพึงเข้าพรรษาหลัง ดูกรภิกษุทั้งหลาย วันเข้าพรรษามี ๒ วันเท่านี้แล”* ฤกษ์อาสาฬหะตามที่กล่าวถึงในพระธรรมวินัยข้อนี้นั้นได้ถูกกำหนดโดยโบราณาจารย์ให้มีอยู่ ๒ ฤกษ์ที่อ้างอิงตามดาวฤกษ์เด่น ๒ ดวงในกลุ่มดาวคนยิงธนู ได้แก่ “ปุพพสาฒฤกษ์” ในราศีธนู ตรงกับดาวฤกษ์มีชื่อเรียกว่า ดาวสัปคับช้าง ดาวปากนก ดาวช้างตัวผู้ ดาวราชสีห์ผู้ หรือ ดาวแรดตัวเมีย มีชื่อสากลว่า ดาวเดลตา-คนยิงธนู (δ-Sagittarii หรือ Kaus Media) และ “อุตตราสาฒฤกษ์” ในราศีมกร ตรงกับดาวฤกษ์มีชื่อเรียกว่า ดาวแตรงอน ดาวราชสีห์ตัวเมีย ดาวครุฑ ดาวช้างตัวเมีย ดาวแตรทอง ดาวแรดตัวผู้ มีชื่อสากลว่า ดาวซิกมา-คนยิงธนู (σ-Sagittarii หรือ Nunki) วันเข้าพรรษานั้นถูกกำหนดโดยใช้จันทร์เพ็ญที่พบในธรรมชาติ หากปฏิทินจันทรคติระบุวันเพ็ญเดือน ๘ สำหรับปีปรกติมาส หรือวันเพ็ญเดือน ๘๘ คลาดเคลื่อนไปจากการพบจันทร์เพ็ญในธรรมชาติจริงแล้ว จะทำให้การกำหนดวันเข้าพรรษาคลาดเคลื่อนไปจากพระธรรมวินัยข้อนี้



รูปที่ ๒ ฤกษ์อาสาฬหะที่กำหนดโดยโบราณาจารย์ไทย ๒ ฤกษ์ ได้แก่ “ปุพพสาฒฤกษ์” คือ ดาวเดลตา-คนยิงธนู (σ-Sagittarii หรือ Kaus Media) และ “อุตตราสาฒฤกษ์” ดาวเดลตา-คนยิงธนู (δ-Sagittarii หรือ Kaus Media) ดาวฤกษ์อ้างอิงทั้งสองอยู่ห่างกันประมาณ ๘.๙ องศาในแนวของลองจิจูดสุริยวิถี

ที่มา : http://www.iau.org/static/public/constellations/gif/SGR.gif

ค้นคืน : ๒๓ มกราคม พ.ศ. ๒๕๕๗

อนึ่ง การกำหนดวันเข้าพรรษาสำหรับปฏิทินจันทรคติไทยในปัจจุบันนิยมใช้การคำนวณหาวันออกพรรษาก่อน จากนั้นจึงนับย้อนหลังมา ๘๙ วันเป็นวันเข้าพรรษา (นับย้อนมา ๙๐ วันเป็นวันอาสาฬหบูชา) วิธีการนี้จะสามารถคำนวณหาวันออกพรรษาได้ถูกต้อง แต่อาจจะไม่สามารถกำหนดวันเข้าพรรษาได้ถูกต้องเสมอไป เพราะดวงจันทร์ในธรรมชาติมีวงโคจรรอบโลกด้วยวงโคจรรูปวงรีน้อย ๆ (เกือบเป็นวงกลม) และมีอัตราเร็วในการโคจรไม่คงตัว ผลจึงทำให้จำนวนวันใน ๓ เดือนทางจันทรคติที่ติดต่อกันไม่จำเป็นจะต้องเท่ากับ ๙๐ วันเสมอไป เช่น ใน พ.ศ. ๒๕๕๗ นี้ วันออกพรรษาได้ถูกกำหนดให้เป็นวันที่ ๘ ตุลาคม หรือ วันขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๑๑ และวันเข้าพรรษาได้ถูกกำหนดให้เป็นวันที่ ๑๒ กรกฎาคม หรือ วันแรม ๑ ค่ำ เดือน ๘ ซึ่งเป็นวันที่นับย้อนหลังจากวันเข้าพรรษามา ๘๙ วัน หากแต่เมื่อพิจารณาดวงจันทร์ในวันที่ ๑๒ กรกฎาคม เวลา ๒๔:๐๐ น. แล้ว จะพบว่าดวงจันทร์มีความสว่างร้อยละ ๙๙.๙ จึงควรกำหนดให้วันนี้เป็นวันขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๘ ซึ่งเป็นวันอาสาฬหบูชา และวันที่ ๑๓ กรกฎาคม ดวงจันทร์มีความสว่างร้อยละ ๙๗.๗ จึงควรเป็นวันแรม ๑ ค่ำ เดือน ๘ หรือวันเข้าพรรษา ตามการปรากฏของดวงจันทร์จริงในท้องฟ้า และจำนวนวันนับระหว่างวันที่ควรเป็นวันเข้าพรรษาถึงวันออกพรรษาใน พ.ศ. ๒๕๕๗ นี้ จึงมีเพียง ๘๘ วันเท่านั้น (เช่นเดียวกับใน พ.ศ. ๒๕๕๑ ตามข้อมูลในตารางที่ ๑) ปัญหาเช่นเดียวกันนี้ยังได้เกิดขึ้นแล้วใน พ.ศ. ๒๕๔๘ และถูกนำเสนอโดย **พลตำรวจตรี สุชาติ เผือกสกนธ์** การเข้าพรรษาที่เร็วกว่าธรรมชาติของดวงจันทร์ ใน พ.ศ. ๒๕๕๗ นั้นจะไม่ก่อให้เกิดปัญหาการเข้าพรรษาไม่ครบถ้วน แต่เป็นการเข้าพรรษาเกิน ๑ วัน ผู้เขียนเป็นผู้มีความรู้น้อยในทางพระพุทธศาสนาจึงไม่อาจระบุได้ว่าจัดเป็น อาบัติทุกกฎ ตามพระธรรมวินัยหรือไม่ อย่างไรก็ตาม การเข้าพรรษาไม่ตรงวันนี้ไม่ได้เกิดขึ้นด้วยความตั้งใจของผู้ที่เกี่ยวข้องทุกฝ่าย จึงขอฝากประเด็นนี้เอาไว้เพื่อท่านผู้ที่มีความรู้แตกฉานทางพระพุทธศาสนาเป็นผู้อภิปรายและให้ข้อสรุปต่อไป

ตารางที่ ๒ วันอาสาฬหบูชาและวันเข้าพรรษาจากปฏิทินจันทรคติราชการไทยเทียบกับปฏิทินจันทรคติดาราศาสตร์ ซึ่งส่วนใหญ่จะมีความสอดคล้องกัน ยกเว้นใน พ.ศ. ๒๕๕๑ และ พ.ศ. ๒๕๕๗ ที่มีความแตกต่างกัน

ปี พุทธศักราช	ปฏิทินจันทรคติราชการไทย		ปฏิทินจันทรคติดาราศาสตร์	
	วันอาสาฬหบูชา	วันเข้าพรรษา	วันอาสาฬหบูชา (ร้อยละความสว่างของดวงจันทร์ ณ เวลา ๒๔:๐๐ น.)	วันเข้าพรรษา (ร้อยละความสว่างของดวงจันทร์ ณ เวลา ๒๔:๐๐ น.)
๒๕๕๗	ศ. ๑๑ ก.ค. ขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๘	ส. ๑๒ ก.ค. แรม ๑ ค่ำ เดือน ๘	อ. ๑๒ ก.ค. ขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๘ (ร้อยละ ๙๙.๙)	จ. ๑๓ ก.ค. แรม ๑ ค่ำ เดือน ๘ (ร้อยละ ๙๗.๗)
๒๕๕๖	จ. ๒๒ ก.ค. ขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๘	อ. ๒๓ ก.ค. แรม ๑ ค่ำ เดือน ๘	อ. ๒๒ ก.ค. ขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๘ (ร้อยละ ๙๙.๙)	พ. ๒๓ ก.ค. แรม ๑ ค่ำ เดือน ๘ (ร้อยละ ๙๘.๕)
๒๕๕๕	พฤ. ๒ ส.ค. ขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๘๘	ศ. ๓ ส.ค. แรม ๑ ค่ำ เดือน ๘๘	พฤ. ๒ ส.ค. ขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๘๘ (ร้อยละ ๙๙.๔)	ศ. ๓ ส.ค. แรม ๑ ค่ำ เดือน ๘๘ (ร้อยละ ๙๖.๘)
๒๕๕๔	ศ. ๑๕ ก.ค. ขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๘	ส. ๑๖ ก.ค. แรม ๑ ค่ำ เดือน ๘	ส. ๑๕ ก.ค. แรม ๑ ค่ำ เดือน ๘ (ร้อยละ ๙๙.๗)	อ. ๑๖ ก.ค. แรม ๑ ค่ำ เดือน ๘ (ร้อยละ ๙๗.๖)
๒๕๕๓	ส. ๒๖ ก.ค. ขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๘๘	อ. ๒๗ ก.ค. แรม ๑ ค่ำ เดือน ๘๘	อ. ๒๖ ก.ค. แรม ๑ ค่ำ เดือน ๘๘ (ร้อยละ ๙๙.๖)	พ. ๒๗ ก.ค. แรม ๑ ค่ำ เดือน ๘๘ (ร้อยละ ๙๗.๔)
๒๕๕๒	อ. ๗ ก.ค. ขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๘	พ. ๘ ก.ค. แรม ๑ ค่ำ เดือน ๘	พ. ๗ ก.ค. ขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๘ (ร้อยละ ๙๙.๙)	พฤ. ๘ ก.ค. แรม ๑ ค่ำ เดือน ๘ (ร้อยละ ๙๘.๔)
๒๕๕๑	พฤ. ๑๗ ก.ค. ขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๘	ศ. ๑๘ ก.ค. แรม ๑ ค่ำ เดือน ๘	ส. ๑๘ ก.ค. ขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๘ (ร้อยละ ๙๙.๘)	อ. ๑๙ ก.ค. แรม ๑ ค่ำ เดือน ๘ (ร้อยละ ๙๘.๑)

ตารางที่ ๓ วันที่และเวลาสากล (UT) ณ ช่วงเวลาที่เกิดจันทร์เพ็ญ (Full Moon) จันทร์กึ่งดวงข้างแรม (Last Quarter) จันทร์ดับ (New Moon) และ จันทร์กึ่งดวงข้างขึ้น (First Quarter) ใน พ.ศ. ๒๕๕๗

2014 Phases of the Moon
Universal Time

New Moon	First Quarter	Full Moon	Last Quarter
d h m	d h m	d h m	d h m
Jan 1 11 14	Jan 8 3 39	Jan 16 4 52	Jan 24 5 20
Jan 30 21 38	Feb 6 19 22	Feb 14 23 53	Feb 22 17 15
Mar 1 8 00	Mar 8 13 27	Mar 16 17 08	Mar 24 1 46
Mar 30 18 45	Apr 7 8 31	Apr 15 7 42	Apr 22 7 52
Apr 29 6 14	May 7 3 15	May 14 19 16	May 21 12 59
May 28 18 40	Jun 5 20 39	Jun 13 4 11	Jun 19 18 39
Jun 27 8 08	Jul 5 11 59	Jul 12 11 25	Jul 19 2 08
Jul 26 22 42	Aug 4 0 50	Aug 10 18 09	Aug 17 12 26
Aug 25 14 13	Sep 2 11 11	Sep 9 1 38	Sep 16 2 05
Sep 24 6 14	Oct 1 19 32	Oct 8 10 51	Oct 15 19 12
Oct 23 21 57	Oct 31 2 48	Nov 6 22 23	Nov 14 15 15
Nov 22 12 32	Nov 29 10 06	Dec 6 12 27	Dec 14 12 51
Dec 22 1 36	Dec 28 18 31		

ที่มา : http://aa.usno.navy.mil/cgi-bin/aa_moonphases.pl?year=2014&ZZZ=END

ค้นคืน : ๒๓ มกราคม พ.ศ. ๒๕๕๗

๒.๒ ผลกระทบต่อการระบุวันสำคัญทางพระพุทธศาสนา

เนื่องจากการกำหนดวันธรรมสวนะและการกำหนดวันลงปาติโมกข์ของพระภิกษุสงฆ์ตามพระไตรปิฎก (พระไตรปิฎก เล่มที่ ๔ หน้าที่ ๑๖๖-๑๖๘) กล่าวว่า *"ลำดับนั้น พระผู้มีพระภาคทรงทำธรรมีกถา ในเพราะเหตุเป็นเค้ามูลนั้น ในเพราะเหตุแรกเกิดนั้น แล้วรับสั่งกะภิกษุทั้งหลายว่า ดูกรภิกษุทั้งหลาย เราอนุญาตให้ประชุมกันกล่าวธรรม ในวัน ๑๔ ค่ำ ๑๕ ค่ำ และ ๘ ค่ำ แห่งปักษ์"* ซึ่งการกำหนดได้ทำโดยอาศัยปฏิทินจันทรคติเป็นหลัก ไม่ได้กำหนดโดยการใช้ดิถีของดวงจันทร์ในธรรมชาติ เช่นเดียวกับการกำหนดวันเข้าพรรษา ดังนั้น หากปฏิทินจันทรคติราชการได้กำหนดวัน ๑๔ ค่ำ ๑๕ ค่ำ และ ๘ ค่ำ แห่งปักษ์อย่างไร วันธรรมสวนะและวันลงปาติโมกข์ของพระภิกษุสงฆ์ก็จะต้องถูกกำหนดตามวันในปฏิทินนั้น จึงไม่มีผลของความคลาดเคลื่อน หากแต่การกำหนดวันสำคัญทางพระพุทธศาสนาวันอื่น ๆ ได้แก่ วันมาฆบูชา (วันเพ็ญ เดือน ๓) วันวิสาขบูชา (วันเพ็ญ เดือน ๖) และวันอาสาฬหบูชา (วันเพ็ญ เดือน ๘ หรือ เดือน ๘๘) ซึ่งเป็นวันเพื่อระลึกถึงคุณของพระศรีรัตนตรัยนั้น หากประชาชนที่ไปเข้าร่วมการเวียนเทียนสังเกตเห็นดวงจันทร์ไม่มีลักษณะกลมสว่างเต็มดวงสอดคล้องกับความรู้สึกของบุคคลโดยทั่วไปแล้ว ประชาชนอาจเกิดความลังเลสงสัยว่าเพราะเหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น อาจจะทำให้เกิดความไม่เชื่อมั่นในการจัดทำปฏิทินจันทรคติไทยได้ ผู้เขียนเห็นว่าการระบุวันที่เกิดจันทร์เพ็ญจริงโดยอาศัยความรู้ทางดาราศาสตร์นั้นสามารถกระทำได้อย่างแน่นอนแล้วในยุคปัจจุบัน ดังนั้น การจัดทำปฏิทินจันทรคติไทยจึงควรใช้ความรู้นี้เพื่อก่อให้เกิดความเชื่อมั่นของประชาชนชาวไทยในวันสำคัญทางศาสนาดังกล่าว

๒.๓ ผลกระทบต่อวันสำคัญตามวัฒนธรรมของไทย

วิถีชีวิตของคนไทยนั้นมีความสัมพันธ์กับขนบธรรมเนียมและวัฒนธรรมของไทยอย่างแน่นแฟ้น และวัฒนธรรมไทยที่สำคัญหลายอย่างมีความสัมพันธ์กับปรากฏการณ์การเกิดดิถีของดวงจันทร์ เช่น ประเพณีลอยกระทง ที่จะต้องกระทำในวันเพ็ญ เดือน ๑๒ (หรือประเพณียี่เป็ง สำหรับภาคเหนือ) ประเพณีนมัสการองค์พระธาตุพนม จังหวัดนครพนม ในวันเพ็ญ เดือน ๓ ประเพณีบุญข้าวสาก จังหวัดอุบลราชธานี ที่จะต้องทำในวันเพ็ญ เดือน ๑๐ หรือ ประเพณีสารท เดือน ๑๐ ซึ่งเป็นความเชื่อทางภาคใต้ของประเทศไทยที่ส่งเสริมให้ลูกหลานอุทิศส่วนกุศลแด่ญาติผู้ใหญ่ผู้ล่วงลับในวันแรม ๑ ค่ำ เดือน ๑๐ วัฒนธรรมเหล่านี้สัมพันธ์กับการเกิดดิถีของดวงจันทร์โดยเฉพาะจันทร์เพ็ญ ดังนั้น การระบุดิถีของดวงจันทร์ให้ถูกต้องสอดคล้องกับที่ปรากฏในท้องฟ้าย่อมจะเป็นการส่งเสริมขนบธรรมเนียมและวัฒนธรรมต่าง ๆ ของคนไทยให้สอดคล้องกับการปฏิบัติที่สืบทอดต่อ ๆ กันมานับตั้งแต่โบราณ อีกทั้งการคำนวณปฏิทินจันทรคติให้สอดคล้องกับดิถีจริงของดวงจันทร์ก็ถือเป็นวัฒนธรรมที่สำคัญแก่วิถีชีวิตที่เกี่ยวข้องอย่างแน่นแฟ้นกับความเชื่อทางโหราศาสตร์ของคนไทยมาแต่โบราณกาล เช่น ความเชื่อเรื่องฤกษ์ยาม ความเชื่อเรื่องการทำนายดวงชะตาชีวิต หรือ ความเชื่อทางไสยศาสตร์ต่าง ๆ

๒.๔ ผลกระทบต่อการบอกฤดูกาลในประเทศไทย

จุดประสงค์ที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งสำหรับการจัดทำปฏิทินขึ้นใช้งานภายในภาคส่วนต่าง ๆ นั้นก็คือเพื่อบ่งบอกถึงฤดูกาลในการทำเกษตรกรรม ปฏิทินจันทรคติไทยเองก็สามารถใช้บ่งบอกถึงฤดูกาลได้อย่างแม่นยำเช่นเดียวกัน การบ่งบอกฤดูกาลของปฏิทินจันทรคติไทยเกี่ยวเนื่องกับการกำหนดปฏิทินจันทรคติไทยให้เป็นปีปรกติมาสหรือปีอธิกมาส ซึ่งที่ผ่านมาพบความสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงฤดูกาลของภาคกลางในประเทศไทยเสมอ มีเพียงใน พ.ศ. ๒๕๕๕ ซึ่งได้กำหนดเป็นปีอธิกมาสเท่านั้นที่ไม่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงฤดูกาลของประเทศไทย กล่าวคือ การเข้าพรรษาของพระภิกษุสงฆ์ในปีนั้นคาบเกี่ยวกับฤดูหนาว ไม่ตรงกับฤดูฝนในบริเวณภาคกลางของประเทศไทยนัก อีกทั้งประเพณีลอยกระทง ในวันเพ็ญ เดือน ๑๒ ก็ล่วงเข้าสู่ฤดูหนาวแล้ว เป็นต้น ผู้เขียนจึงขอเสนอว่า การกำหนดปีปรกติมาสหรือปีอธิกมาสสำหรับปฏิทินจันทรคติไทยนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงผลของความสอดคล้องในการเกิดฤดูกาลในพื้นที่บริเวณภาคกลางของประเทศไทยด้วย เพื่อช่วยให้ปฏิทินจันทรคติได้มีประโยชน์แก่การทำเกษตรกรรมซึ่งเป็นอาชีพหลักของคนไทยส่วนใหญ่

ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความคลาดเคลื่อนของปฏิทินจันทรคติไทยนี้มีความสำคัญแก่วิถีชีวิต ขนบธรรมเนียมและวัฒนธรรมของคนไทยมาก ดังนั้น จึงมีหลายภาคส่วนในประเทศไทยพยายามจะปรับแก้ปฏิทินจันทรคติไทยมานับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน หากแต่การปรับแก้ปฏิทินจันทรคติแม้เพียงเล็กน้อยก็จะส่งผลกระทบถึงคนจำนวนมากในประเทศไทย เช่น หากปฏิทินจันทรคติราชการไทยกำหนดวันเพ็ญและข้างขึ้นข้างแรมอื่น ๆ ไม่ตรงกับปฏิทินโหรจากสำนักต่าง ๆ ซึ่งได้คำนวณล่วงหน้ามาแล้ว จะทำให้ผลจากการทำนายดวงชะตาชีวิตแตกต่างไปอย่างชัดเจน อาจส่งผลกระทบใหญ่ถึงกลุ่มที่ทำงานด้านโหราศาสตร์ในประเทศไทยได้ ดังนั้น หากประเทศไทยจะปรับปรุงส่วนหนึ่งส่วนใดที่เกี่ยวข้องกับปฏิทินจันทรคติราชการไทยแล้ว ควรจะมีคณะกรรมการปรับปรุงที่มาจากทุกภาคส่วนที่เกี่ยวข้อง การรับฟังความคิดเห็นและผลกระทบจากการปรับปรุงปฏิทินจันทรคติไทยควรเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความขัดแย้งขึ้นภายในประเทศ ในรายงานฉบับนี้จะขอเสนอแนวทางการปรับปรุงให้ปฏิทินจันทรคติไทยให้แสดงดิถีของดวงจันทร์ได้อย่างถูกต้องตามธรรมชาติของการสังเกตการณ์ทางดาราศาสตร์ และยังทำให้ปฏิทินสามารถบ่งบอกถึงฤดูกาลในบริเวณภาคกลางของประเทศไทยได้อย่างถูกต้องด้วย

๓. ข้อเสนอแนะในการพัฒนาปฏิทินจันทรคติไทย

๓.๑ ปฏิทินจันทรคติดาราศาสตร์ไทย

เพื่อให้ปฏิทินจันทรคติราชการไทยมีความถูกต้องแม่นยำตรงกับดิถีจริงของดวงจันทร์ในท้องฟ้าในวันเพ็ญ ขึ้น ๑๕ ค่ำ ของทุกเดือนจันทรคติ และเพื่อช่วยลดผลกระทบที่จะก่อให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ผ่านมาทั้งหมด ผู้เขียนจึงขอนำเสนอแนวความคิดของปฏิทินจันทรคติ

ดาราศาสตร์ที่ได้ผสมผสานการบอกถึงดิถีจริงของดวงจันทร์ในวันขึ้น ๑๕ ค่ำให้ถูกต้องกับจันทร์เพ็ญเป็นประจำทุกเดือนจันทรคติ ผนวกกับการบอกถึงวันข้างขึ้นและข้างแรมอื่น ๆ ที่อยู่ระหว่างวันขึ้น ๑๕ ค่ำของ ๒ เดือนโดยการเฉลี่ยดิถีของดวงจันทร์เพื่อทำให้จำนวนวันในปฏิทินต่อเนื่อง

แนวความคิดนี้ไม่ได้กำหนดให้เดือนคี่ต้องมี ๒๙ วัน ส่วนเดือนคู่ต้องมี ๓๐ วัน ดังที่ใช้อยู่ในกฎระเบียบของปฏิทินจันทรคติราชการของไทย นอกจากนี้ ปฏิทินในระบบนี้ยังสามารถเปิดให้เกิดเดือนทางจันทรคติที่มีจำนวนวัน ๒๙ วัน หรือ ๓๐ วันติดต่อกันได้ตามดวงจันทร์ที่พบในธรรมชาติ ด้วยการจัดระบบเช่นนี้ จึงไม่จำเป็นที่ปฏิทินจันทรคติจะต้องวางปีที่มีจำนวนวันเพิ่มขึ้น ๑ วัน หรือ ปีอธิกวาร แต่จะมีปีที่มีจำนวนเดือนเพิ่มขึ้น ๑ เดือน (มี ๑๓ เดือนใน ๑ ปี) หรือ ปีอธิกมาส ปรากฏขึ้นมาจากธรรมชาติของดวงจันทร์ที่พบในรอบปีโดยอัตโนมัติ ปฏิทินจันทรคติดาราศาสตร์ดังกล่าวจะมีข้อกำหนดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

๓.๑.๑ เสนอให้ระบบปฏิทินจันทรคติของไทยระบุถึงวันและเวลาที่สังเกตพบ “จันทร์เพ็ญ (Full Moon)” บนเมริเดียนอ้างอิงของประเทศไทยอย่างถูกต้องเป็นประจำทุกเดือนจันทรคติโดยอาศัยความรู้ทางดาราศาสตร์ แล้วกำหนดให้วันดังกล่าวเป็น “วันเพ็ญ (Full Moon Day)” การทำเช่นนี้จะช่วยให้ปฏิทินจันทรคติไทยสอดคล้องกับการพบดวงจันทร์ที่มีลักษณะกลมสว่างในท้องฟ้ายามค่ำคืน นอกจากนี้ การกำหนดนี้ยังจะช่วยทำให้ปฏิทินจันทรคติไทยแสดงปรากฏการณ์อุปราคาได้อย่างถูกต้อง กล่าวคือ ปรากฏการณ์สุริยุปราคาจะเกิดในวันแรม ๑๔ หรือ ๑๕ ค่ำ และปรากฏการณ์จันทรุปราคาจะเกิดในวันขึ้น ๑๕ ค่ำเท่านั้น

๓.๑.๒ เพื่อให้ข้อเสนอแนะข้อ ๓.๑.๑ สามารถเกิดขึ้นได้ ระบบปฏิทินจันทรคติไทยจึงควรยกเลิกการกำหนดให้เดือนคี่มี ๒๙ วัน (ไม่มีวันแรม ๑๕ ค่ำ) และเดือนคู่มี ๓๐ วัน (มีวันแรม ๑๕ ค่ำ) แล้วปรับเปลี่ยนให้ธรรมชาติการเกิดดิถีของดวงจันทร์ในธรรมชาติเป็นตัวกำหนดวันข้างขึ้นและวันข้างแรมอื่น ๆ โดยการเพิ่มขึ้นหรือลดลงครั้งละ ๑ วันทางจันทรคติในรอบปักข์ และกำหนดให้แต่ละปักข์มีจำนวนวันได้ไม่เกิน ๑๕ วัน วันสุริยคติที่เพิ่มขึ้นจากวันเพ็ญ ขึ้น ๑๕ ค่ำนั้นกำหนดให้เป็นข้างแรม เริ่มจากวันแรม ๑ ค่ำ เพิ่มขึ้นครั้งละ ๑ วันไปจนถึงวันแรม ๑๔ หรือ ๑๕ ค่ำ ส่วนวันสุริยคติที่ลดลงจากวันเพ็ญ ขึ้น ๑๕ ค่ำนั้นจะกำหนดให้เป็นข้างขึ้นโดยจะลดลงครั้งละ ๑ วันไปจนถึงวันขึ้น ๑ ค่ำ การกำหนดนี้สอดคล้องกับหลักการเดินปักข์ของปฏิทินปักขคณนาในพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว แต่อาจมีความแตกต่างของการกำหนดวันเพ็ญที่ไม่ตรงกันของเดือนจันทรคติแต่ละเดือน และด้วยวิธีการนี้ปฏิทินจันทรคติดาราศาสตร์จึงไม่จำเป็นต้องมีการกำหนดปีอธิกวารขึ้นในระบบของปฏิทิน

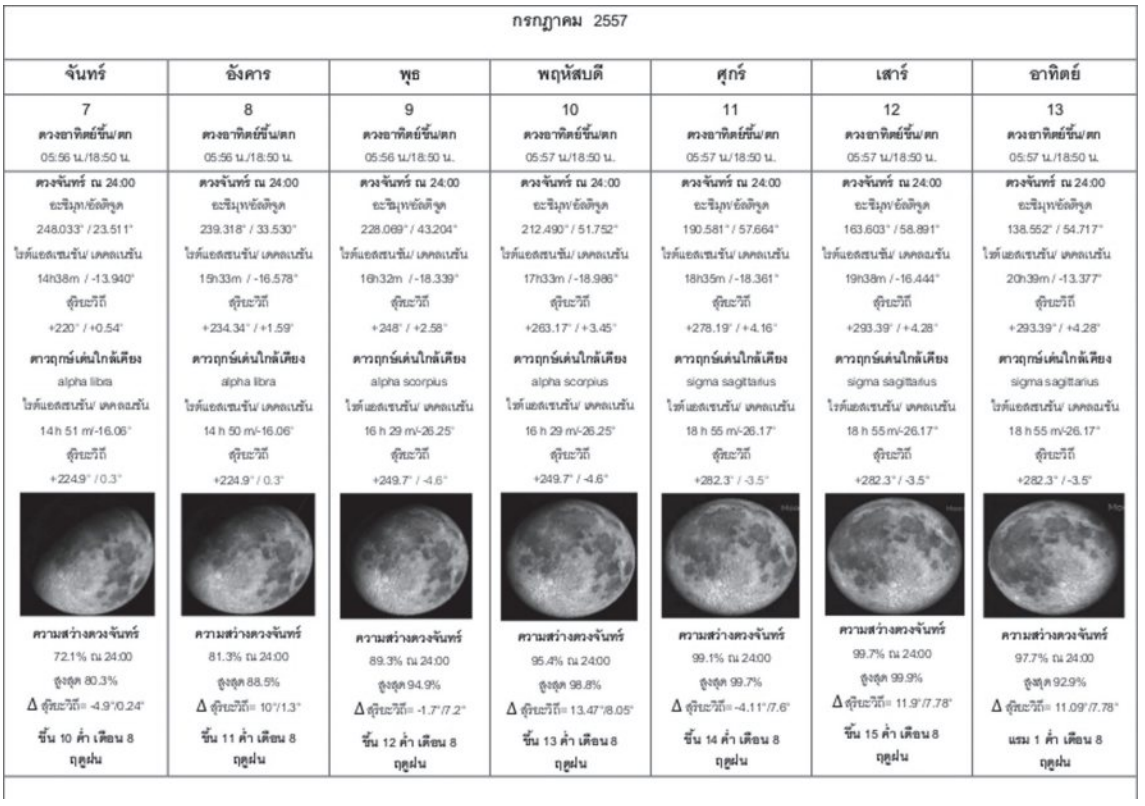
การกระทำตามข้อเสนอแนะในข้อ ๓.๑.๑ และ ๓.๑.๒ จะทำให้ปฏิทินจันทรคติดาราศาสตร์ไทยแตกต่างจากปฏิทินโหราศาสตร์จากสำนักโหราศาสตร์ของไทยทุกสำนักซึ่งคำนวณจากคัมภีร์สุริยยาตร์ แต่จะไม่เกิดผลกระทบใด ๆ ต่อวงการโหราศาสตร์ถ้าใช้ปฏิทินจันทรคติดาราศาสตร์เฉพาะในการระบุวันสำคัญทางศาสนาและทางวัฒนธรรมเท่านั้น กล่าวคือ เมื่อต้องการคำทำนายทางโหราศาสตร์

ก็ควรใช้ปฏิทินโหราศาสตร์ เมื่อต้องการทราบธรรมชาติของดวงจันทร์ในท้องฟ้าก็ควรใช้ปฏิทินจันทรคติดาราศาสตร์ไทย

๓.๑.๓ เพื่อให้ปฏิทินจันทรคติไทยสามารถกำหนดวันเข้าพรรษาได้สอดคล้องต้องตามพระธรรมวินัยในขณะเดียวกันก็สอดคล้องกับฤดูกาลของประเทศไทยด้วย ผู้เขียนจึงขอเสนอการกำหนดเกณฑ์การวางปีปรกติมาสและปีอธิกมาสสำหรับปฏิทินจันทรคติไทย คือโบราณาจารย์ของไทยถือว่าจันทร์เพ็ญจะเสวยอาสาฬหฤกษ์เมื่อจันทร์เพ็ญจะต้องปรากฏอยู่ใกล้กับฤกษ์ทางโหราศาสตร์ ๒ ฤกษ์ซึ่งตรงกับดาวฤกษ์เด่น ๒ ดวงในกลุ่มดาวคนยิงธนู ได้แก่ “ปุพพสาฒฤกษ์” ในราศีธนู ตรงกับ ดาวเดลตา-คนยิงธนู (δ-Sagittarii หรือ Kaus Media) และ “อุตตราสาฒฤกษ์” ในราศีมกร ตรงกับ ดาวซิกมา-คนยิงธนู (σ-Sagittarii หรือ Nunki) ซึ่งมีพิกัดในระบบสุริยวิถี (ecliptic coordinate) คือ (๒๗๔.๔°,-๖.๕°) และ (๒๘๒.๓°,-๓.๕°) ตามลำดับ หากพบจันทร์เพ็ญปรากฏอยู่ใกล้กับฤกษ์ทั้งสองนี้โดยที่จุดศูนย์กลางของจันทร์เพ็ญมีพิกัดลองจิจูดในระบบสุริยวิถีห่างไม่เกิน ๑๓.๓ องศาจากค่าพิกัดของปุพพสาฒฤกษ์และอุตตราสาฒฤกษ์ กล่าวคือ หากจุดศูนย์กลางของจันทร์เพ็ญมีลองจิจูดสุริยวิถีที่มีค่าระหว่าง ๒๖๑.๑ ถึง ๒๙๕.๖ องศา จะกำหนดให้วันดังกล่าวเป็น “วันเพ็ญ เดือน ๘” และหากวันเพ็ญที่พบเกิดขึ้นในฤดูฝนในบริเวณภาคกลางของประเทศไทยแล้ว ให้กำหนดปีดังกล่าวเป็น ปีปรกติมาส วันเพ็ญดังกล่าวจะเป็นวันอาสาฬหบูชา ส่วนวันรุ่งขึ้นจะเป็น “วันแรม ๑ ค่ำ เดือน ๘” ถือเป็นวันเข้าพรรษาของปีปรกติมาส ที่เรียกว่า “ปุริมิกา หรือ วันเข้าพรรษาต้น”

๓.๒.๔ ถ้าหากวันเพ็ญที่พบในข้อ ๓.๒.๓ เกิดขึ้นในฤดูร้อนในบริเวณภาคกลางของประเทศไทยแล้ว ให้กำหนดปีดังกล่าวเป็น “ปีอธิกมาส” โดยจะต้องเพิ่ม “เดือน ๘๘” อีก ๑ เดือนต่อจากเดือน ๘ วันเพ็ญดังกล่าวจะเป็น “วันเพ็ญ เดือน ๘” ยังไม่จัดเป็นวันอาสาฬหบูชา โดยที่ในปีอธิกมาสนี้วันอาสาฬหบูชาจะตรงกับ “วันเพ็ญ เดือน ๘๘” และวันถัดไปจะเป็น “วันแรม ๑ ค่ำ เดือน ๘๘” ซึ่งเป็นวันเข้าพรรษา ที่เรียกว่า “ปัจฉิมิกา หรือ วันเข้าพรรษาหลัง” การกำหนดปีปรกติมาสและปีอธิกมาสโดยใช้ธรรมชาติของการเริ่มต้นฤดูฝนเข้ามาพิจารณาร่วมกับการกำหนดวันเข้าพรรษานี้จะสอดคล้องกับหลักการ **๑๓ ดับบังคับ ๑๓ เพ็ญ** ที่นำเสนอโดย **รองศาสตราจารย์สมัย ยอดอินทร์ และคณะ** เพื่อปรับให้ปฏิทินจันทรคติไทยสอดคล้องกับฤดูกาล หากแต่เลือกใช้วิธีการพิจารณาการเริ่มต้นของฤดูฝนจากกรมอุตุนิยมวิทยาเพื่อความสอดคล้องกับความแปรปรวนของจุดเริ่มต้นฤดูฝนที่มีได้ถึงประมาณ ๒ สัปดาห์

The Journal of the Royal Institute of Thailand
Vol. 39 No. 2 April-June 2014



กรกฎาคม 2557

จันทร์	อังคาร	พุธ	พฤหัสบดี	ศุกร์	เสาร์	อาทิตย์
7	8	9	10	11	12	13
ดวงอาทิตย์ขึ้น/ตก 05:56 น./18:50 น.	ดวงอาทิตย์ขึ้น/ตก 05:56 น./18:50 น.	ดวงอาทิตย์ขึ้น/ตก 05:56 น./18:50 น.	ดวงอาทิตย์ขึ้น/ตก 05:57 น./18:50 น.	ดวงอาทิตย์ขึ้น/ตก 05:57 น./18:50 น.	ดวงอาทิตย์ขึ้น/ตก 05:57 น./18:50 น.	ดวงอาทิตย์ขึ้น/ตก 05:57 น./18:50 น.
ดวงจันทร์ ณ 24:00 อะซิมุท/ย้อนศร 248.033° / 23.511° ไรต์แอสเซนชัน/ เดคลเนชัน 14h38m / -13.940° สุริยะวิถี +220° / +0.54°	ดวงจันทร์ ณ 24:00 อะซิมุท/ย้อนศร 239.318° / 33.530° ไรต์แอสเซนชัน/ เดคลเนชัน 15h33m / -16.578° สุริยะวิถี +234.34° / +1.59°	ดวงจันทร์ ณ 24:00 อะซิมุท/ย้อนศร 228.069° / 43.204° ไรต์แอสเซนชัน/ เดคลเนชัน 16h32m / -18.339° สุริยะวิถี +248° / +2.58°	ดวงจันทร์ ณ 24:00 อะซิมุท/ย้อนศร 212.490° / 51.752° ไรต์แอสเซนชัน/ เดคลเนชัน 17h33m / -18.986° สุริยะวิถี +263.17° / +3.45°	ดวงจันทร์ ณ 24:00 อะซิมุท/ย้อนศร 190.581° / 57.664° ไรต์แอสเซนชัน/ เดคลเนชัน 18h35m / -18.361° สุริยะวิถี +278.19° / +4.16°	ดวงจันทร์ ณ 24:00 อะซิมุท/ย้อนศร 163.603° / 58.891° ไรต์แอสเซนชัน/ เดคลเนชัน 19h38m / -16.444° สุริยะวิถี +293.39° / +4.28°	ดวงจันทร์ ณ 24:00 อะซิมุท/ย้อนศร 138.552° / 54.717° ไรต์แอสเซนชัน/ เดคลเนชัน 20h39m / -13.377° สุริยะวิถี +293.39° / +4.28°
ดาวฤกษ์เด่นใกล้เคียง alpha libra ไรต์แอสเซนชัน/ เดคลเนชัน 14 h 51 m/-16.06° สุริยะวิถี +224.9° / 0.3°	ดาวฤกษ์เด่นใกล้เคียง alpha libra ไรต์แอสเซนชัน/ เดคลเนชัน 14 h 50 m/-16.06° สุริยะวิถี +224.9° / 0.3°	ดาวฤกษ์เด่นใกล้เคียง alpha scorpius ไรต์แอสเซนชัน/ เดคลเนชัน 16 h 29 m/-26.25° สุริยะวิถี +249.7° / -4.6°	ดาวฤกษ์เด่นใกล้เคียง alpha scorpius ไรต์แอสเซนชัน/ เดคลเนชัน 16 h 29 m/-26.25° สุริยะวิถี +249.7° / -4.6°	ดาวฤกษ์เด่นใกล้เคียง sigma sagittarius ไรต์แอสเซนชัน/ เดคลเนชัน 18 h 55 m/-26.17° สุริยะวิถี +282.3° / -3.5°	ดาวฤกษ์เด่นใกล้เคียง sigma sagittarius ไรต์แอสเซนชัน/ เดคลเนชัน 18 h 55 m/-26.17° สุริยะวิถี +282.3° / -3.5°	ดาวฤกษ์เด่นใกล้เคียง sigma sagittarius ไรต์แอสเซนชัน/ เดคลเนชัน 18 h 55 m/-26.17° สุริยะวิถี +282.3° / -3.5°
ความสว่างดวงจันทร์ 72.1% ณ 24:00 สูงสุด 80.3% Δ สุริยะวิถี= -4.9°/0.24° ขึ้น 10 ค่ำ เดือน 8 ฤดูฝน	ความสว่างดวงจันทร์ 81.3% ณ 24:00 สูงสุด 88.5% Δ สุริยะวิถี= 10°/1.3° ขึ้น 11 ค่ำ เดือน 8 ฤดูฝน	ความสว่างดวงจันทร์ 89.3% ณ 24:00 สูงสุด 94.9% Δ สุริยะวิถี= -1.7°/7.2° ขึ้น 12 ค่ำ เดือน 8 ฤดูฝน	ความสว่างดวงจันทร์ 95.4% ณ 24:00 สูงสุด 98.8% Δ สุริยะวิถี= 13.47°/8.05° ขึ้น 13 ค่ำ เดือน 8 ฤดูฝน	ความสว่างดวงจันทร์ 99.1% ณ 24:00 สูงสุด 99.7% Δ สุริยะวิถี= -4.11°/7.6° ขึ้น 14 ค่ำ เดือน 8 ฤดูฝน	ความสว่างดวงจันทร์ 99.7% ณ 24:00 สูงสุด 99.9% Δ สุริยะวิถี= 11.9°/7.78° ขึ้น 15 ค่ำ เดือน 8 ฤดูฝน	ความสว่างดวงจันทร์ 97.7% ณ 24:00 สูงสุด 92.9% Δ สุริยะวิถี= 11.09°/7.78° แรม 1 ค่ำ เดือน 8 ฤดูฝน

รูปที่ ๓ ตัวอย่างปฏิทินจันทรคติดาราศาสตร์ในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. ๒๕๕๗ ณ ตำแน่งพิกัด (๑๐๐.๓๐° E, ๑๓.๔๕° N) ในปฏิทินนี้แสดงข้อมูลของเวลาที่ดวงอาทิตย์ขึ้นและตก พิกัดของดวงจันทร์ในระบบเส้นขอบฟ้า ระบบศูนย์สูตรฟ้า และระบบสุริยวิถี ณ เวลา ๒๔:๐๐ น. ร้อยละความสว่างของดวงจันทร์ ที่เวลา ๒๔:๐๐ น. และเมื่อมีความสว่างมากที่สุดในแต่ละวัน พร้อมกับระบุความห่างของจุดศูนย์กลางของดวงจันทร์และดาวฤกษ์เด่น (ฤกษ์ทางโหราศาสตร์) ในระบบสุริยวิถี พร้อมทั้งระบุวันและเดือนทางจันทรคติ และฤดูกาลที่พบในบริเวณภาคกลางของประเทศไทย
ที่มา : วิชาโครงงานฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เรื่อง “ปฏิทินจันทรคติดาราศาสตร์สำหรับประเทศไทย” จัดทำโดย นายธนิต ชุ่มชื่นสระน้อย และนายกฤษฎี มีเครือ อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.จตุรงค์ สุคนธชาติ

๓.๒ ปฏิทินจันทรคติดาราศาสตร์เป็นฐานข้อมูลสำหรับปฏิทินจันทรคติราชการไทย

การประยุกต์ใช้ปฏิทินจันทรคติดาราศาสตร์เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการปรับเทียบปฏิทินจันทรคติราชการไทยนั้นสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบร้อยละความสว่างของดวงจันทร์ที่พบสว่างที่สุดในแต่ละวัน หรือการเปรียบเทียบร้อยละความสว่างของดวงจันทร์ ณ เวลา ๒๔:๐๐ น. ของแต่ละวัน การกระทำนี้จะสามารถช่วยระบุวันเพ็ญ หรือ วันขึ้น ๑๕ ค่ำ ของเดือนจันทรคติทุกเดือนได้อย่างถูกต้องตรงกับการสังเกตพบจันทร์เพ็ญจริง การจัดทำปฏิทินจันทรคติราชการไทยตามกฎ ๔ ข้อที่ยึดถือเป็นประเพณีมาแต่โบราณกาลนั้นจะมีความคลาดเคลื่อนไปจากธรรมชาติอย่างไรบ้าง รวมทั้งการกำหนดวันเข้าพรรษานั้นจะสอดคล้องกับการเกิดฤดูฝนในบริเวณภาคกลางของประเทศไทยหรือไม่ ควรกำหนดปีทางจันทรคติให้เป็น ปีปรกติมาส ปีอธิกมาส หรือ ปีอธิกวาร อย่างไรจึงจะสอดคล้องกับธรรมชาติและวันสำคัญทางพระพุทธศาสนาและประเพณีไทยมากที่สุด ผู้เขียนเชื่อว่าหากคณะผู้จัดทำปฏิทินจันทรคติราชการไทยสามารถมองเห็นถึงผลกระทบทั้ง ๔ ด้านที่เกี่ยวข้องกับปฏิทินจันทรคติอย่างเป็นรูปธรรมแล้ว การจัดทำปฏิทินจันทรคติราชการไทยจะสามารถกำหนดวันเดือนปีทางจันทรคติได้อย่างเหมาะสมสอดคล้องกับความต้องการของสังคมไทย เช่น หากเปรียบเทียบข้อมูลจากปฏิทินจันทรคติดาราศาสตร์กับข้อมูลจากปฏิทินจันทรคติราชการไทยแล้วจะพบว่าใน พ.ศ. ๒๕๕๗ นี้ ถ้าปฏิทินจันทรคติราชการกำหนดให้เป็นปีอธิกวาร กล่าวคือ มีวันแรม ๑๕ เดือน ๗ เพิ่มขึ้นมาอีก ๑ วัน จะทำให้วันขึ้น ๑๕ ค่ำ เดือน ๘ (วันอาสาฬหบูชา) ตรงกับวันที่ ๑๒ กรกฎาคม และจะทำให้ วันแรม ๑ ค่ำ เดือน ๘ (วันเข้าพรรษา) ตรงกับวันที่ ๑๓ กรกฎาคม ตรงกับธรรมชาติของดวงจันทร์ที่จะพบในท้องฟ้าจริง สอดคล้องกับพระธรรมวินัย เรื่อง การกำหนดวันเข้าพรรษา นอกจากนี้ ยังสอดคล้องกับฤดูฝนในบริเวณภาคกลางของประเทศไทยด้วย อนึ่ง การกำหนด พ.ศ. ๒๕๕๗ ให้เป็นปีอธิกวารนี้จะทำให้การกำหนดวันออกพรรษาในปฏิทินจันทรคติราชการไทยเลื่อนออกไป ๑ วันด้วย กล่าวคือ วันออกพรรษาจะถูกเลื่อนจากวันที่ ๘ ตุลาคม ไปเป็นวันที่ ๙ ตุลาคม การเลื่อนนี้จะทำให้ไม่สอดคล้องกับการเกิดจันทร์เพ็ญในธรรมชาติที่พบจันทร์เพ็ญในคืนวันที่ ๘ ตุลาคม ซึ่งถึงแม้ว่าจะไม่ขัดกับพระธรรมวินัย เรื่อง การกำหนดวันเข้าพรรษา แต่ก็ยังไม่สอดคล้องกับจันทร์เพ็ญจริง ซึ่งไม่ควรจะเกิดขึ้นในระบบปฏิทินจันทรคติใด ๆ จะเห็นได้ว่าข้อกำหนด ๔ ข้อในการจัดทำปฏิทินจันทรคติราชการไทยหรือปฏิทินหลวงนี้ควรจะมีการปรับปรุงเพื่อทำให้การจัดทำปฏิทินจันทรคติไทยมีความยืดหยุ่นเพียงพอที่จะกำหนดวันและเดือนทางจันทรคติให้สอดคล้องกับธรรมชาติจริงได้ ข้อกำหนดที่ควรปรับเปลี่ยนมากที่สุดคือ ข้อกำหนดที่ ๑ ที่กำหนดให้เดือนคู่จะต้องมี ๓๐ วัน ส่วนเดือนคี่จะต้องมี ๒๙ วันเท่านั้น การปรับเปลี่ยนข้อกำหนดให้เดือนทางจันทรคติต้องมีจำนวนวันไม่เกิน ๓๐ วันแทนข้อกำหนดเดิมจะทำให้ปฏิทินจันทรคติไทยในรูปแบบใหม่สามารถระบุวันทางจันทรคติให้สอดคล้องกับดิถีจริงของดวงจันทร์ได้มากที่สุด กล่าวคือจะผิดพลาดโดยเฉลี่ยไม่เกิน ๐.๕ วัน ดังเช่นข้อค้นพบของ **ลอย ชุนพงษ์ทอง** นอกจากนี้ยังทำให้ปฏิทินจันทรคติไทยในรูปแบบใหม่สามารถแสดงข้อมูลวันสำคัญทางพระพุทธศาสนาและวันสำคัญทางวัฒนธรรมไทยได้ถูกต้องสอดคล้องต่อความต้องการของสังคมไทยอีกด้วย

๔. สรุป

รายงานนี้นำเสนอผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากความคลาดเคลื่อนในระบบปฏิทินสุริยจันทรคติของไทยใน ๔ ประเด็น ได้แก่ ผลกระทบต่อพระธรรมวินัยเรื่องการกำหนดวันเข้าพรรษา ผลกระทบต่อการระบุวันสำคัญทางพระพุทธศาสนา ผลกระทบต่อวันสำคัญตามวัฒนธรรมของไทย และผลกระทบต่อการบอกฤดูกาลในประเทศไทย นอกจากนี้ ยังเสนอฐานข้อมูลทางดาราศาสตร์ในรูปแบบของปฏิทินสุริยคติดาราศาสตร์ไทย ซึ่งเป็นระบบปฏิทินทางดาราศาสตร์ที่จะช่วยแสดงถึงดิถี ตำแหน่ง และระยะห่างเชิงมุมจากดาวฤกษ์เด่น (ฤกษ์ทางโหราศาสตร์) ในระบบพิกัดสุริยวิถีของดวงจันทร์ในปฏิทินสุริยคติ ข้อมูลในปฏิทินนี้จะสามารถช่วยกำหนดวันและเดือนทางจันทรคติได้อย่างถูกต้องตรงกับธรรมชาติของการสังเกตพบดวงจันทร์ในท้องฟ้า และช่วยในการกำหนดนิยามที่เหมาะสมในการบัญญัติคำศัพท์ดาราศาสตร์ คือ “วันเพ็ญ” หรือ “วันขึ้น ๑๕ ค่ำ” นอกจากนี้ ยังเป็นข้อมูลประกอบสำหรับการวางปีอธิกมาสและปีอธิกวารให้ข้อมูลในปฏิทินจันทรคติราชการไทยสามารถกำหนดวันและเดือนทางจันทรคติให้สอดคล้องกับประเพณีทางพระพุทธศาสนาและฤดูกาลในประเทศไทยได้มากยิ่งขึ้น เมื่อปฏิทินจันทรคติราชการไทยสามารถกำหนด “วันเพ็ญ เดือน ๘” หรือ “วันเพ็ญ เดือน ๘๘” ได้สอดคล้องกับพระธรรมวินัยเกี่ยวกับวันเข้าพรรษา โดยอ้างอิงจันทร์เพ็ญจริงปรากฏอยู่ใกล้กับ “ปุพพสาฒฤกษ์ (ดาวเดลตา-คนยิงธนู)” และ “อุตตราสาฒฤกษ์ (ดาวซิกมา-คนยิงธนู)” ตามลำดับ และสอดคล้องกับฤดูฝนในประเทศไทยแล้ว จะทำให้ปฏิทินจันทรคติราชการไทยเป็นที่ยอมรับจากทุกภาคส่วนในประเทศไทย

เอกสารอ้างอิง

พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว, “พระบรมราชาธิบาย อธิกมาส อธิกวาร และปักขคณนาวิธี ของพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว”, มหามกุฏราชวิทยาลัย, พ.ศ. ๒๕๑๑.

พลตำรวจตรี สุชาติ เผือกสกนธ์, “ปฏิทินปี พ.ศ. ๒๕๔๘ คลาดเคลื่อน” จากหนังสือ “โหราเวสม์”, พ.ศ. ๒๕๔๘. http://www.horawej.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=376878&Ntype=14

รองศาสตราจารย์สมัย ยอดอินทร์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์มัลลิกา ถาวรอธิวาสน์ ดร.เชิดศักดิ์ แซ่ลี่ นายนพร พวงสมบัติ และ ดร.กมลวรรณ ก่อเจริญ, “เรื่องการเป็นหรือไม่เป็นปีอธิกมาสของปฏิทินจันทรคติไทย ปี พ.ศ. ๒๕๕๕”, กุมภาพันธ์ ๒๕๕๕.

ลอย ชุนพงษ์ทอง, ๑๖ สิงหาคม ๒๕๕๓ ปฏิทินไทย ทำไมคลาดเคลื่อน, วารสารราชบัณฑิตยสถาน ปีที่ ๓๕ ฉบับที่ ๒, พ.ศ. ๒๕๕๓.

วรพล ไม้สน, หลักสูตร “คัมภีร์สุริยยาตร์ ๒๕๕๒” ของมูลนิธิสมาคมโหรแห่งประเทศไทยในพระสังฆราชูปถัมภ์, พ.ศ. ๒๕๕๒.

อารี สวัสดี และ วรพล ไม้สน, “ดาราศาสตร์ราชสำนัก” สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน), พ.ศ. ๒๕๕๖.

Peter Duffett-Smith, Practical Astronomy with your Calculator 3rd edition, Cambridge University Press, 1988.

Abstract **Lunar Calendar: Effects that May Be Caused by Errors in the Thai Lunar Calendar and a Development of Lunar Data Using Astronomy Knowledge**

Nibondh Saibejra
Fellow of the Academy of Science, The Royal Institute, Thailand
Jaturong Sukonthachat
Academic committee in the preparation of the dictionary of astronomy, Academy of Science, The Royal Institute
Department of Physics, Faculty of Science, Srinakharinwirot University

This article discusses the lunisolar Buddhist calendar used widely in Thailand, which includes the data of the Gregorian calendar and the Thai lunar calendar, a calendar indicating the day-month-year according to the Moon’s phase and its position in the sky. There are 3 ways to calculate lunar data used in the Thai lunar calendar: calculating an average phase and an approximate location of the Moon as in the scripture named Suriyayart, finding an average phase of the Moon using an iteration on the Thai special board named Pakkhaganana, and calculating the true phase and the true position of the Moon using astronomy knowledge. In order to find the average lunar data in the first 2 approaches, they are calculated using a hypothetical lunar orbit at a constant speed with an approximate average period of 29.530583215 and 29.530593514 days respectively. The 3rd approach is to determine the true lunar phase by using the true Moon orbit at an inconsistent rate with the average period of 29.530587981 days. Because the Thai lunar calendar uses data obtained from the Suriyayart, causing Buddhist sabbath (the 8th , the 15th, the 23rd and the 29th or 30th day of the Thai lunar months) to be faster than it should be according to the true Moon’s phase by about 1 day up to 24 and 34 times in the Buddhist year 2556 and 2557 respectively. The article proposes 4 effects that may

be caused by errors in the Thai lunar calendar: an effect on the date of the Buddhist lent in each year, effect on the Buddhist memorial dates, effect on the Thai cultural dates, and an effect on identifying seasons in Thailand. These effects can be reduced or may not occur, if the Thai lunar calendar can identify date and time of the "full moon" on the reference meridian of Thailand correctly every lunar month. This identification is most important for those who involve in both the preparations and the uses of the lunar calendar in Thailand, in expecting it to be accurate. In addition, the paper aims to present an astronomical calendar called "Thai astronomical lunar calendar" that indicates phase and position of the Moon together with an angular distance of the Moon from the reference stars (the astrological auspices) in the ecliptic coordinate system. This astronomical calendar may be a source of information used to improve the Thai lunar calendar because it helps to define the appropriate formulation of an astronomical terminology; "the date of the full moon" or "the 15th date of the waxing moon". Moreover, it can be a data used for better specifying "the leap month" and "the leap day" of the Thai lunar calendar. If the Thai lunar calendar can specify "the 15th date of the waxing moon in the 8th Thai lunar month" and "the 15th date of the waxing moon in the second 8th Thai lunar month", it follows that the date of the Buddhist lent will be after the true full moon appearing close to the "Pubbasatha auspice (Delta-Sagitttarii)" and "Uttarasatha auspice (Sigma-Sagitttarii)" respectively. This corresponds to the rainy season in Thailand and the Thai lunar calendar will be accepted from all related sectors in the country.

Keywords: solar calendar, lunar calendar, Moon, phase of the Moon, full moon, the full moon date, the 15th date of the waxing moon, the Buddhist lent

วารสารราชบัณฑิตยสถาน
ปีที่ ๓๙ ฉบับที่ ๒ เม.ย.-มิ.ย. ๒๕๕๗

การเคลือบผิวผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว*

สายชล เกตุษา
ภาคีสมาชิก สำนักวิทยาศาสตร์
ราชบัณฑิตยสถาน

บทคัดย่อ

ผักและผลไม้เป็นผลิตผลสดพืชสวนที่เน่าเสียง่ายและมีอายุการเก็บรักษาสั้น หลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้ยังมีชีวิต การดำเนินกิจกรรมทั้งด้านสรีระและชีวเคมียังคงเกิดเช่นเดียวกับขณะยังอยู่บนต้นเดิม การเปลี่ยนแปลงหลายอย่างที่เกิดขึ้นในผักและผลไม้นำไปสู่การเสื่อมคุณภาพและเกิดการเน่าเสียที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ การเปลี่ยนแปลงอย่างหนึ่งที่เห็นชัดเจนคือการเหี่ยวของผักและผลไม้ การเหี่ยวทำให้ผลิตผลสูญเสียความสด ความกรอบลดลง และคุณค่าสารอาหารบางอย่างลดลง การเหี่ยวเกิดจากการคายน้ำของผลิตผล การคายน้ำจะเกิดเร็วและรุนแรงมากขึ้นเมื่อปัจจัยสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมซึ่งได้แก่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศ คืออุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ การคายน้ำของผลิตผลผ่านปากใบ ช่องเปิดธรรมชาติ พื้นที่ผิวและบาดแผล การลดหรือป้องกันการคายน้ำของผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยวสามารถทำได้หลายวิธี หนึ่งในหลายวิธีที่ปฏิบัติเป็นการค้าคือการเคลือบผิว สารเคลือบผิวที่ใช้อาจได้มาจากสารธรรมชาติหรือจากสารสังเคราะห์ สารทั้งสองแหล่งเป็นสารที่ไม่เป็นพิษแก่ผู้บริโภค สารเคลือบผิวที่ใช้กับผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยวจะเคลือบปากใบ ช่องเปิดธรรมชาติ พื้นที่ผิว และบาดแผล ทำให้สามารถลดการคายน้ำผ่านช่องทางเหล่านี้ได้ การเคลือบผิวยังช่วยเพิ่มความดึงดูดของผู้บริโภคที่มีต่อผลไม้ ชะลอการสุก และยืดอายุการเก็บรักษาอีกด้วย การเคลือบผิวนิยมทำกับผลิตผลบางชนิดเท่านั้น ความเข้มข้นของสารเคลือบผิวที่ใช้ต้องเหมาะสม มิฉะนั้นการเคลือบผิวอาจใช้ไม่ได้ผลหรืออาจเกิดผลเสียได้ ก่อนการใช้สารเคลือบผิวจะต้องมีข้อมูลการทดลองที่ชัดเจนสำหรับผลิตผลชนิดนั้น ๆ เพื่อทำให้การใช้สารเคลือบผิวมีประสิทธิภาพและป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น

คำสำคัญ : การเคลือบผิว, สารเคลือบผิวธรรมชาติหรือคิวทิน, ผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว

*บรรยายในการประชุมสำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน เมื่อวันที่ ๒๘ สิงหาคม พ.ศ. ๒๕๕๖

คำนำ

ผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวเป็นผลิตผลสดที่เน่าเสียง่ายและเสื่อมคุณภาพเร็ว การเน่าเสียและการเสื่อมคุณภาพเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านสรีระและชีวเคมีภายในผักและผลไม้ โดยปรกติการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เกิดขึ้นอยู่แล้วในผักและผลไม้ขณะยังอยู่บนต้นเดิม ทำให้มีการชดเชยสารอาหารและน้ำจากต้น แต่เมื่อผักและผลไม้ถูกเก็บเกี่ยวจากต้น ผลิตผลเหล่านี้จะถูกตัดออกจากแหล่งอาหารและน้ำ การเปลี่ยนแปลงทั้งสรีระและชีวเคมีของผักและผลไม้ยิ่งเกิดเร็วและรุนแรงขึ้น สภาพของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ไม่เหมาะสมจะทำให้การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้มีความรุนแรงมากขึ้น ผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยวเน่าเสียเร็วขึ้น การคายน้ำหรือการสูญเสียน้ำของผักและผลไม้เป็นกระบวนการทางสรีระ ผักและผลไม้ที่มีการสูญเสียน้ำมากทำให้เกิดการเหี่ยวหรือที่เราเรียกว่าผักและผลไม้ไม่สด บทความนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสูญเสียน้ำของผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว และการเคลือบผิวผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำของผักและผลไม้

ทำไมผักและผลไม้ต้องคายน้ำ

ผักและผลไม้มีน้ำเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ ๖๕-๙๕ ขึ้นอยู่กับชนิดของผักและผลไม้นั้น ๆ ความร้อนภายในของผักและผลไม้เกิดจากกระบวนการหายใจและพลังงานจากดวงอาทิตย์ ความร้อนจากทั้ง ๒ แหล่งทำให้อุณหภูมิภายในของผักและผลไม้สูงขึ้น ถ้าอุณหภูมิภายในของผักและผลไม้สูงขึ้นมาก ก็จะยับยั้งปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง ซึ่งทำให้ผักและผลไม้ได้รับอันตรายและเกิดความเสียหาย ผักและผลไม้มีกลไกการคายน้ำโดยธรรมชาติในการป้องกันไม่ให้อุณหภูมิภายในสูงมากเกินไปจนเกิดอันตราย

การสูญเสียน้ำทำให้ผักและผลไม้เสื่อมคุณภาพอย่างไร

กระบวนการคายน้ำทำให้ผักและผลไม้สูญเสียน้ำ การสูญเสียน้ำมากเกินไปมีผลกระทบต่อคุณภาพทั้งภายนอกและภายในของผักและผลไม้ ดังนี้

๑. การเหี่ยว ผักและผลไม้ที่สูญเสียน้ำหนักมากจะปรากฏอาการเหี่ยวให้เห็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งผักกินใบจะเกิดการเหี่ยวรุนแรงมากกว่าผลไม้ ผักและผลไม้ที่สูญเสียน้ำมากเกินไปจะเกิดอาการเหี่ยวและไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (ตารางที่ ๑)

ตารางที่ ๑ การสูญเสียน้ำหนักสูงสุดของผักและผลไม้ที่ยอมให้เกิดขึ้นได้และยังเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (ดัดแปลงจาก Burton, 1982)

ผักและผลไม้	การสูญเสียน้ำหนักสด (ร้อยละ)
กะหล่ำปลี	๗
กะหล่ำดอก	๗
แคร์รอต	๗
แตงกวา	๘
ผักกาดหอม	๔
ถั่วลันเตาฝักสด	๕
พริกหวาน	๗
มันฝรั่ง	๗
ข้าวโพดหวาน	๗
มะเขือเทศ	๗
ปวยเล้ง	๓
ราสป์เบอร์รี	๖
สตรอว์เบอร์รี	๖

๒. การสูญเสียความกรอบ ผักและผลไม้ที่สูญเสียน้ำมากจนกระทั่งปรากฏอาการเหี่ยวจะทำให้ความกรอบลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งผักกินผล เช่น มะเขือเทศ แตงกวา ถั่วฝักยาว ผลไม้ เพราะการสูญเสียน้ำมากทำให้ความเต่งของเซลล์ (turgidity) ลดลง และส่งผลกระทบต่อความกรอบของผักและผลไม้

๓. การสูญเสียคุณค่าอาหาร การสูญเสียน้ำมากทำให้คุณค่าอาหารของผักและผลไม้ลดลง วิตามินที่สูญเสียได้ง่ายเมื่อผักและผลไม้สูญเสียน้ำมากได้แก่ วิตามินซี ดังนั้น เมื่อผักกินใบ เช่น คะน้า กวางตุ้ง ผักสลัดต่าง ๆ เหี่ยวเนื่องจากการสูญเสียน้ำ จะทำให้ปริมาณวิตามินซีลดลง

๔. การเน่าเสียเนื่องจากเชื้อโรค การสูญเสียน้ำของผักและผลไม้ทำให้ผิวนอกแห้ง มีเชื้อโรคบางชนิดที่เข้าทำลายรุนแรงและเกิดการเน่าเสียมากเมื่อผิวของผักและผลไม้มีลักษณะแห้ง เช่น โรคเน่าของแคร์รอตที่เกิดจาก *Botrytis* และ *Rhizopus*

๕. มูลค่าการซื้อขายลดลง การซื้อขายผักและผลไม้ในตลาดคิดราคาตามน้ำหนักสดของผลิตผลชนิดนั้น ๆ น้ำหนักของผลิตผลที่ชั่งต้นทางจะสูงกว่าน้ำหนักของผลิตผลเมื่อถึงตลาดปลายทาง เนื่องจากมีการสูญเสียน้ำหนักระหว่างการขนส่ง ผักและผลไม้ที่วางขายในตลาดมีการสูญเสียน้ำหนักตลอดเวลา นั่นหมายถึงมูลค่าของผักและผลไม้จะลดลงตลอดเวลา ยิ่งวางขายนานยิ่งทำให้มูลค่าของการซื้อขายลดลงไปเรื่อย ๆ

ผักและผลไม้สูญเสียน้ำผ่านช่องทางใด

การสูญเสียน้ำหรือการคายน้ำของผักและผลไม้เกิดขึ้นตลอดเวลาขณะยังอยู่บนต้นและหลังการเก็บเกี่ยว แต่การสูญเสียน้ำของผักและผลไม้ขณะอยู่บนต้นจะไม่ค่อยปรากฏอาการเหี่ยวให้เห็นชัดเจน เพราะการสูญเสียน้ำของผักและผลไม้จะถูกชดเชยจากแหล่งน้ำใต้ดินโดยดูดผ่านรากและถูกส่งไปยังส่วนต่าง ๆ ของพืช แต่ผักและผลไม้ที่เก็บเกี่ยวจากต้นจะถูกตัดขาดจากแหล่งน้ำที่จะนำมาชดเชยน้ำที่สูญเสียไปโดยการคายน้ำ ดังนั้น ผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวจึงแสดงอาการเหี่ยวได้เร็วกว่าผักและผลไม้ที่ยังอยู่บนต้น การสูญเสียน้ำของผักและผลไม้เกิดขึ้นผ่านช่องทางต่าง ๆ ดังนี้

๑. ปากใบ (stomata) ปากใบเป็นเซลล์พืชที่มีชีวิตและมีกลไกควบคุมการปิดเปิดเพื่อควบคุมการคายน้ำและแลกเปลี่ยนแก๊สภายในพืชกับบรรยากาศรอบนอก ใบพืชมีปากใบมากกว่าอวัยวะส่วนอื่น ๆ ของพืช ผักกินใบที่มีปากใบมากย่อมสูญเสียน้ำมากกว่าผักกินใบที่มีปากใบน้อย

๒. ช่องอากาศ (lenticel) เป็นช่องเปิดธรรมชาติไม่มีชีวิต ไม่มีกลไกควบคุมการปิดเปิดเหมือนปากใบ ช่องอากาศมีอยู่ตามผิวของส่วนต่าง ๆ ของพืช ผักและผลไม้ที่มีช่องอากาศมากย่อมสูญเสียน้ำมากกว่าผักและผลไม้ที่มีช่องอากาศน้อย

๓. สารเคลือบชั้นผิว (cuticular surface) ผิวของผักและผลไม้มีสารเคลือบผิวธรรมชาติหรือคิวทิน (cutin) ที่เป็นชั้นบาง ๆ เคลือบอยู่ สารเคลือบผิวธรรมชาติมีสมบัติเป็นลิพิด (lipid) และมีหน้าที่ป้องกันไม่ให้พืชคายน้ำมากเกินไป การสูญเสียน้ำสามารถเกิดขึ้นผ่านสารเคลือบผิวได้ ขึ้นอยู่กับความหนาและความเป็นระเบียบของสารเคลือบผิว สารเคลือบผิวธรรมชาติที่หนามากย่อมสามารถป้องกันการสูญเสียน้ำได้ดีกว่าสารเคลือบผิวธรรมชาติที่บาง สารเคลือบผิวธรรมชาติที่สะสมบนผิวอย่างมีระเบียบย่อมสามารถป้องกันการสูญเสียน้ำได้ดีกว่าสารเคลือบผิวธรรมชาติที่สะสมบนผิวไม่เป็นระเบียบ

๔. บาดแผล (wound) ผักและผลไม้จะเกิดบาดแผลระหว่างการเก็บเกี่ยว การเตรียมผลิตผลเพื่อส่งตลาด หรือการขนส่ง บาดแผลเหล่านี้เพิ่มช่องทางการสูญเสียน้ำของผักและผลไม้ ผักและผลไม้ที่เกิดบาดแผลมากย่อมสูญเสียน้ำมากกว่าผักและผลไม้ที่บาดแผลน้อย

ทำไมต้องเคลือบผิวผักและผลไม้

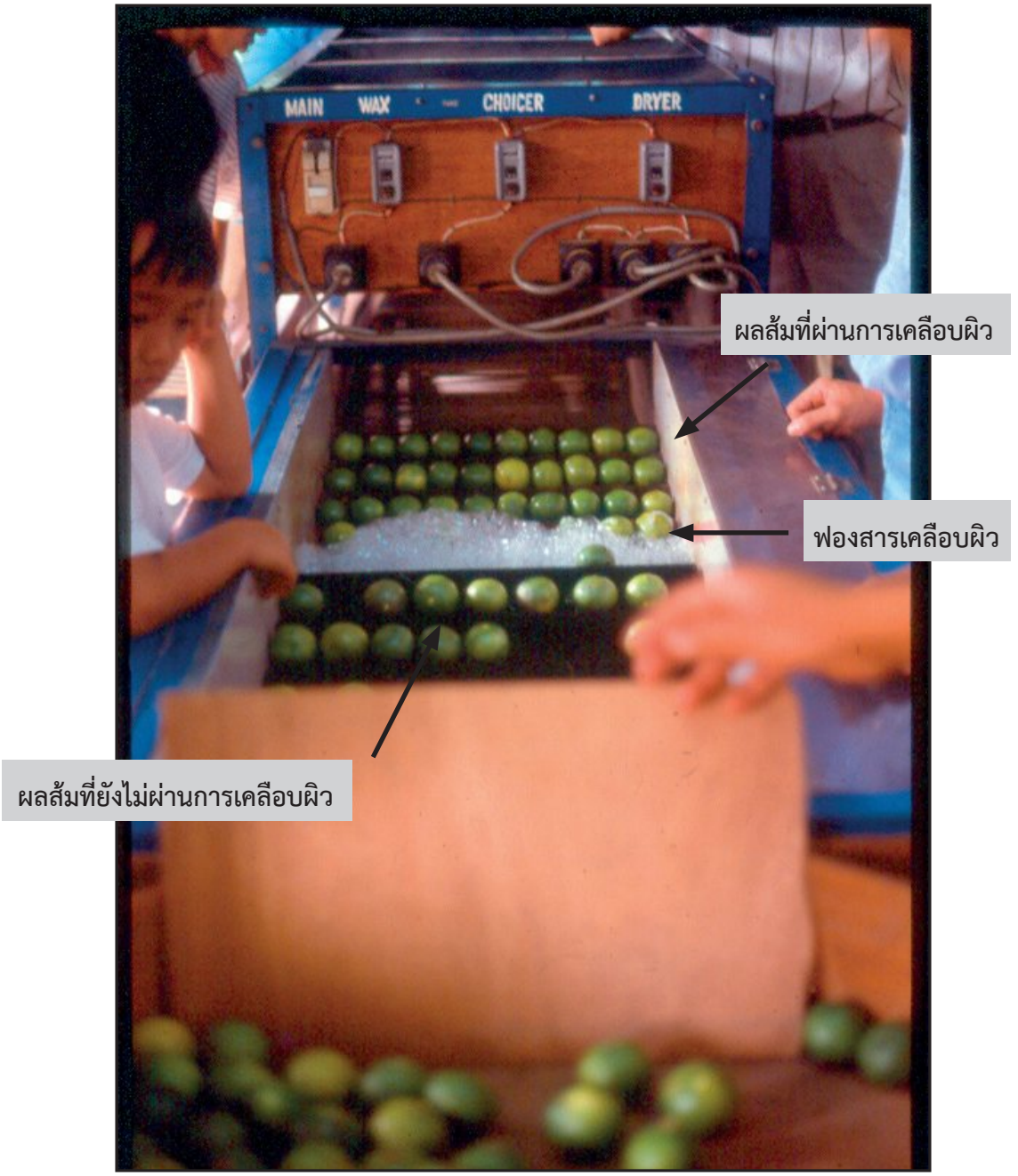
สารเคลือบผิวธรรมชาติที่อยู่บนผิวของผักและผลไม้สามารถสูญหายไปจากผิวได้ จากการสัมผัสหรือเสียดสีระหว่างการเก็บเกี่ยวหรือการล้างน้ำทำความสะอาดของผักและผลไม้ สารเคลือบผิวธรรมชาติที่สูญหายไปนี้จะทำให้ผักและผลไม้สูญเสียน้ำมากขึ้น ดังนั้น เมื่อผักและผลไม้ที่ผ่านขั้นตอนหลายอย่าง รวมถึงการล้างน้ำทำความสะอาด จะต้องมีการเคลือบผิวให้ผักและผลไม้เพื่อชดเชยสารเคลือบผิวธรรมชาติที่สูญหายไป การเคลือบผิวจะสามารถป้องกันไม่ให้ผักและผลไม้สูญเสียน้ำมากเกินไป สารเคลือบผิวจะเคลือบปากใบ ช่องอากาศ บาดแผล และพื้นผิวทั้งหมด

สารที่ใช้เคลือบผิวผักและผลไม้เป็นสารอะไร

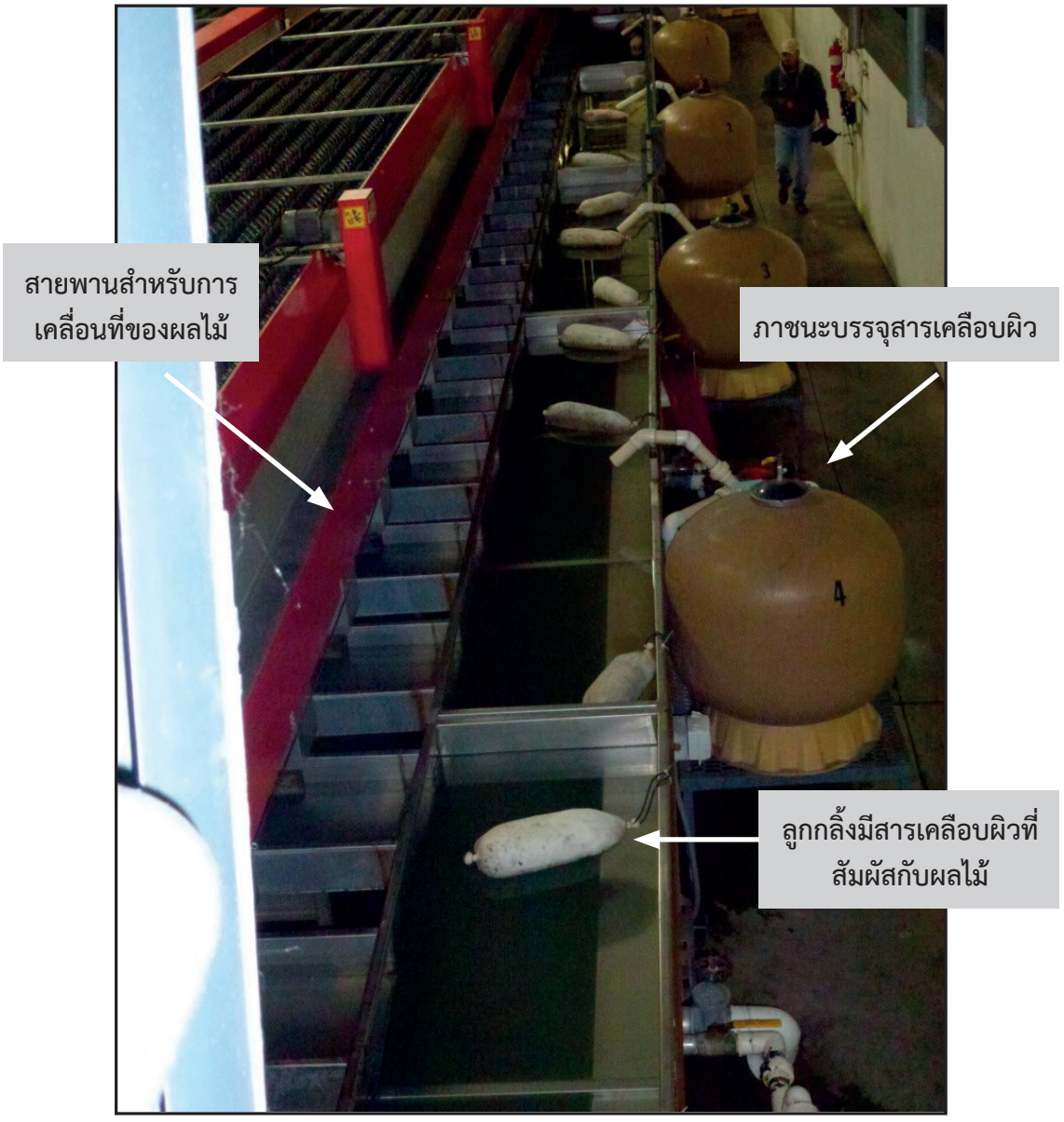
สารเคลือบผิวที่มีขายสำหรับการเคลือบผิวผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวเป็นสารจากธรรมชาติที่ได้จากพืชและสัตว์ สารเคลือบผิวธรรมชาติจากใบพืชบางชนิดมีปริมาณมาก ได้แก่ คาร์นอบา แคนเดลิลลา อ้อย และปาล์ม การที่จะได้สารนี้ต้องมีกระบวนการสกัดสารเคลือบผิวธรรมชาติจากใบพืชต่าง ๆ เหล่านี้ สารเคลือบผิวธรรมชาติจากสัตว์ได้แก่ไขจากรังผึ้ง ครั่ง ไขจากปลาวาฬ ไขจากเปลือกกุ้ง ส่วนสารเคลือบผิวจากการสังเคราะห์เป็นสารที่ได้จากการสังเคราะห์โดยกระบวนการทางเคมีและเป็นสารที่มีสมบัติเป็นลิพิดคล้ายกับสารเคลือบผิวธรรมชาติ สารเคลือบที่ได้จากการสังเคราะห์จะเป็นองค์ประกอบของเอสเตอร์ของน้ำตาลหรือกรดอินทรีย์ สารเคลือบผิวที่มีขายเป็นการค้าเป็นสารเคลือบผิวที่ไม่เป็นอันตรายแก่ผู้บริโภค สารเคลือบผิวทางการค้ามีหลายชนิดหรือยี่ห้อ เช่น Tal–Prolong, Semper–fresh, Frutox, Waxol, Citrus Shine, Masbrane

กระบวนการเคลือบผิวทำอย่างไร

งานวิจัยในการเคลือบผิวผักและผลไม้สามารถทำได้ง่าย โดยการจุ่มผักและผลไม้ในสารละลายเคลือบผิวตามความเข้มข้นที่ต้องการ แล้วนำมาผึ่งให้แห้ง ขณะที่การเคลือบผิวผักและผลไม้ในปริมาณมาก ๆ ที่เป็นการค้าจะต้องมีเครื่องจักรกลเข้ามาช่วยและทำอย่างมีระบบต่อเนื่อง ผักและผลไม้ต้องผ่านขั้นตอนเบื้องต้น เช่น การคัดเลือก การคัดขนาด การตัดแต่ง การทำความสะอาด หลังจากนั้นผักและผลไม้จะถูกเคลื่อนย้ายด้วยสายพานลงไปในถังที่มีสารละลายเคลือบผิว (รูปที่ ๑) หรือเคลื่อนที่ด้วยสายพานผ่านลูกกลิ้งที่มีสารเคลือบผิว (รูปที่ ๒) ผ่านพัดลมเป่าความร้อนเพื่อทำให้สารเคลือบผิวแห้งอย่างรวดเร็ว แล้วผ่านต่อไปยังกระบวนการขัดให้ผิวเป็นมันโดยเป็นลูกกลิ้งฟองน้ำหรือแปรงที่มีขนนิ่ม ในตอนท้ายจะเป็นการบรรจุกล่อง



รูปที่ ๑ เครื่องเคลือบผิวผลส้มในประเทศไทยซึ่งเป็นเครื่องนำเข้าจากประเทศไต้หวัน (ภาพถ่ายจากร้านขายส่งผลส้มเขียวหวานที่ตลาดรังสิต ปทุมธานี)



รูปที่ ๒ การเคลือบผิวผลแอปเปิลในต่างประเทศโดยที่ผลแอปเปิลเคลื่อนที่ผ่านและสัมผัสลูกกลิ้งที่อยู่ด้านบน และมีสารเคลือบผิว (ภาพถ่ายจากโรงคัดเลือกบรรจุในสหรัฐอเมริการะหว่างการเข้าร่วมประชุมวิชาการ Postharvest Unlimited 2011)

ผักและผลไม้ชนิดใดที่ควรเคลือบผิว

ผักและผลไม้ทุกชนิดมีการสูญเสียน้ำตลอดเวลา แม้ผักกินใบมีการสูญเสียน้ำมากกว่าผักชนิดอื่น ๆ และผลไม้ แต่ไม่มีการเคลือบผิวผักกินใบเพื่อป้องกันสูญเสียน้ำมาก การใช้สารเคลือบผิวนิยมทำแก่ผักกินผล และผลไม้บางชนิดเท่านั้น ได้แก่ มะเขือเทศ แตงกวา พริกหวาน องุ่น ส้ม แอปเปิล แตงเมลอน มะนาวฝรั่ง ท้อ และเสาวรส แม้มีการทดลองใช้สารเคลือบผิวกับทุเรียน มังคุด กล้วย และมะม่วง แต่ยังไม่มีการใช้สารเคลือบผิวในทางการค้ากับผลไม้เหล่านี้

การใช้สารเคลือบผิวมีข้อดีและข้อเสียอย่างไร

การใช้สารเคลือบผิวผักและผลไม้มีทั้งข้อดีและข้อเสียหลายอย่าง คือ

ข้อดีของการใช้สารเคลือบผิว

๑. ลดการสูญเสียน้ำ คงความสดไว้ได้นาน

๒. ทำให้ผิวเป็นมัน เพิ่มความดึงดูดผู้ซื้อ

๓. ชะลอการสุกของผลไม้ การเคลือบผิวลดการแลกเปลี่ยนแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ภายในผลไม้กับบรรยากาศรอบนอก ทำให้ผลไม้ขาดออกซิเจนสำหรับการสร้างและการทำงานของเอทิลีนซึ่งเป็นตัวการสำคัญทำให้ผลไม้สุก

ข้อเสียของการใช้สารเคลือบผิว

๑. เพิ่มต้นทุนของผักและผลไม้

๒. ทำให้ผิวด้าน ไม่เป็นมัน

๓. ทำให้เกิดรสชาติผิดปรกติได้ถ้าเคลือบผิวหนามากเกินไป เพราะทำให้ผักและผลไม้ขาดออกซิเจนและมีการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน ทำให้มีการสะสมแอลกอฮอล์และเกิดกลิ่นหมัก

ข้อควรระวังในการใช้สารเคลือบผิว

แม้ว่าการใช้สารเคลือบผิวกับผักและผลไม้มีประโยชน์หลายอย่าง แต่การใช้สารเคลือบผิวต้องระวังผลเสียที่จะเกิดกับผักและผลไม้ด้วย ดังนี้

๑. ความเข้มข้น การใช้สารเคลือบผิวจะต้องใช้ที่ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้สารเคลือบผิวที่ติดกับผิวของผักและผลไม้ไม่หนาหรือบางมากเกินไป

๒. ชนิดของผักและผลไม้ แม้ว่าผักกินใบมีการสูญเสียน้ำมากกว่าผลิตผลอย่างอื่น แต่ไม่นิยมเคลือบผิวผักกินใบ ผักและผลไม้ที่นิยมใช้สารเคลือบผิวได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น

๓. ควรทดลองใช้ก่อน ก่อนที่จะใช้สารเคลือบผิวจริงกับผักและผลไม้ ควรมีการทดลองใช้ภายใต้เงื่อนไขจริง คือ ชนิดและพันธุ์ของผลิตผล อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของการเก็บรักษาผลิตผลที่เคลือบผิว และช่วงเวลาของการเก็บรักษา

สรุป

การใช้สารเคลือบผิวกับผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวสามารถป้องกันการสูญเสียน้ำมากเกินไป การใช้สารเคลือบผิวกับผักและผลไม้แต่ละชนิดต้องศึกษาข้อมูลทางวิชาการของการใช้ให้ถูกต้องและเหมาะสมเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นได้แก่ผักและผลไม้

บรรณานุกรม

Anonymous, 2004, Waxing fruits and vegetables. Postharvest National Agricultural Research Institute of New Guyana. Handling Technical Bulletin No. 33. 11 p.

Banks, N.H., Cutting, J. G. M. and Nicholson, S.E., 1997, Approaches to optimising surface coatings for fruits. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science 25: 261-272.

Burton, W.G., 1982, Post-Harvest Physiology of Food Crops. Longman, London, 339 p.

Devlieghere, F., Vermeulen, A. and Debevere, J., 2004, Chitosan: antimicrobial activity, interactions with food components and applicability as a coating on fruit and vegetables. Food Technology 21: 703–714.

Nisperos-Carrierdo, M.O., Baldwin, E.A. and Shaw, P.E., 1991, Development of edible coating for extending shelf life of selected fruits and vegetables. Proceedings of Florida State Horticultural Science 104: 122-124.

Park, J.H., 1999, Development of advanced edible coatings for fruits. Trends in Food Science & Technology 10: 254–260.

Promyou, S., Ketsa, S. and van Doorn, W. G., 2007, Effect of surface coating on ripening and early peel spotting in ‘Sucrier’ banana *(Musa acuminata)*. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science 35: 259–265.

Tharanathan, N.R., 2003, Biodegradable films and composite coatings: past, present and future. Trends in Food Science & Technology 14: 371–378.

Youwei, Y and Yinzhe, R., 2013, Effect of chitosan Coating on preserving character of post-harvest fruit and vegetable: A review. Journal of Food Processing & Technology 4: 254-257.

Abstract **Surface Coating on Fruits and Vegetables after Harvest**

Saichol Ketsa

Associate Fellow of the Academy of Science, The Royal Institute, Thailand

Fruits and vegetables are perishable after harvest resulting in short shelf life. Physiological and biochemical changes of fruits and vegetables after harvest still go on similarly while they still are on the mother plant. However, their postharvest changes in physiology and biochemistry are much more pronounced than while being on the mother plant due to lack of the supply of food and water, together with unfavorable conditions. Wilting or shrivel is one of the physiological processes that reduces quality of fruits and vegetables after harvest. Wilting or shrivel reduces freshness, crunch, crisp, and nutritional values. Wilting is due to weight loss through transpiration. Wilting will be severe under high temperature or/and low relative humidity. Water loss of fruits and vegetables can take place through stomata, lenticels, cuticular surface and wound. Reduction or prevention of water loss can be done by many ways. Waxing or surface coating is one of those. Coating materials can be from either natural or synthetic materials, and they are safe for consumers. Coating materials will cover all the surface of fruits and vegetables including their stomata, lenticels and wound. Moreover, surface coating can increase the attraction of consumers and delay ripening too. Surface coating is preferable for some fruits and vegetables. Prior to application of coating materials, one must have adequate technical information such as concentration of coating material, temperature and relative humidity of storage condition, etc., otherwise it may cause damage to the produce.

Keywords: surface coating, cutin, postharvest fruits and vegetables

วารสารราชบัณฑิตยสถาน
ปีที่ ๓๙ ฉบับที่ ๒ เม.ย.-มิ.ย. ๒๕๕๗

เทคโนโลยีคอนกรีตพรุน

ปริญญา จินดาประเสริฐ
ภาคีสมาชิก สำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน
ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ยุวดี แซ่ตั้ง
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ
จังหวัดสกลนคร

บทคัดย่อ

คอนกรีตพรุน (pervious concrete) คือคอนกรีตชนิดพิเศษที่ได้ถูกออกแบบให้มีโพรงช่องว่างอยู่ในเนื้อคอนกรีต โพรงเหล่านี้สามารถยอมให้น้ำและอากาศผ่านได้ คอนกรีตชนิดนี้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการทำพื้นผิวทางเดิน ลานจอดรถ หรือแม้กระทั่งทำถนนที่สามารถระบายน้ำได้ ทั้งนี้เพื่อลดการเกิดปัญหาการไหลนองของน้ำฝนและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานเมื่อฝนตก นอกจากนี้ คอนกรีตพรุนยังสามารถนำไปใช้ทำเป็นวัสดุสำหรับการกรองน้ำ ดูดซับเสียง ฉนวนกันความร้อน และปะการังเทียม คอนกรีตพรุนจึงถือว่าเป็นคอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม สำหรับประเทศไทยนั้นยังมีการวิจัย รวบรวมองค์ความรู้ และใช้งานคอนกรีตพรุนไม่มากนัก บทความนี้เป็นผลการรวบรวมองค์ความรู้เกี่ยวกับสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตพรุนจากงานวิจัยและข้อมูลต่าง ๆ โดยครอบคลุมประวัติความเป็นมา การออกแบบส่วนผสม การใช้งาน และการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตพรุน

คำสำคัญ : **คอนกรีตพรุน, โพรง, ช่องว่าง, มวลรวม, ซีเมนต์เพสต์**

๑. บทนำ

คอนกรีตพรุน (pervious concrete) เป็นคอนกรีตที่แตกต่างจากคอนกรีตทั่วไป คือ มีปริมาณโพรง (void content) อยู่ในเนื้อคอนกรีตค่อนข้างมาก คอนกรีตประเภทนี้ทำจากมวลรวมหยาบและใช้เพสต์เป็นตัวเชื่อมประสาน โดยที่ปริมาณเพสต์มีเพียงที่จะเคลือบผิวและเชื่อมระหว่างมวลรวมเท่านั้น ทำให้เกิดโพรงช่องว่างจำนวนมากในเนื้อคอนกรีต ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าคอนกรีตพรุนประกอบด้วยส่วนหลัก ๓ ส่วน ส่วนแรกคือมวลรวมหยาบซึ่งมีปริมาณมากที่สุด ส่วนที่ ๒ คือวัสดุประสาน ทำหน้าที่เชื่อมมวลรวมหยาบเข้าไว้ด้วยกัน และส่วนสุดท้ายคือปริมาณโพรงช่องว่าง ดังแสดงในรูปที่ ๑ โพรงช่องว่างถือเป็นสมบัติพิเศษของคอนกรีตพรุนโดยทั่วไปแล้วปริมาณโพรงช่องว่างจะมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ ๑๕-๓๕ *(ACI 522R-10, 2010)* โพรงเหล่านี้ส่วนมากจะเป็นโพรงที่ต่อเนื่องกัน ซึ่งมีผลทำให้น้ำและอากาศสามารถผ่านตัวคอนกรีตได้ดี คอนกรีตชนิดนี้จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการทำพื้นผิวทางเดิน ลาดจอดรถ หรือแม้กระทั่งถนนที่ระบายน้ำได้เพื่อลดการเกิดปัญหาการไหลนองของน้ำฝนและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานเมื่อฝนตก

นอกจากนี้ การเจริญเติบโตของพื้นที่เมืองทำให้ต้องใช้พื้นที่มากขึ้น มีการก่อสร้างสาธารณูปโภคปิดทับพื้นดินเดิม เกิดการลดลงของแหล่งชะลอน้ำตามธรรมชาติ นำไปสู่การไหลนองของน้ำบนผิวดิน ปริมาณการไหลนองของน้ำที่มากขึ้นนี้กระตุ้นให้เกิดการกัดเซาะตลิ่งมากขึ้น น้ำไม่สามารถไหลซึมลงเติมแหล่งน้ำใต้ดิน และไม่ถูกกรองจากชั้นดินตามระบบของธรรมชาติ น้ำในแม่น้ำลำคลองจึงเกิดการปนเปื้อนได้ง่ายกว่า *(Field et al., 1982: 265-270), (Scholz and Grabowiecki, 2007: 3830-3836)* การใช้คอนกรีตพรุนเป็นพื้นผิวทางที่ระบายน้ำสามารถช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้ได้ คอนกรีตพรุนยังสามารถนำไปใช้งานเป็นวัสดุกรอง ปะการังเทียมเพื่อเป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์น้ำ และวัสดุในการดูดซับเสียงและฉนวนกันความร้อนได้อีกด้วย *(Chareerat et al., 2009), (Park et al., 2005: 1846-1854), (Wong et al., 2007: 647-655), (Zaetang et al., 2013: 585-591), (Park and Tia, 2004: 177-184)*

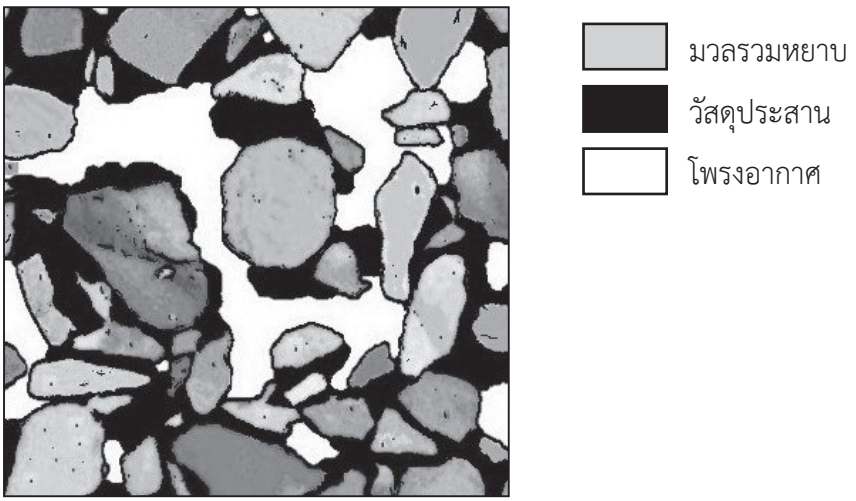
คอนกรีตพรุนถูกใช้งานมายาวนานกว่า ๖๐ ปี โดยที่ในยุคแรกคอนกรีตพรุนไม่ได้ถูกพัฒนาเพื่อเป็นผิวทางระบายน้ำ การพัฒนาคอนกรีตพรุนเกิดมาจากการใช้คอนกรีตไม่มีมวลรวมละเอียด *(no-fine aggregate concrete)* ในยุโรป ออสเตรเลีย และแคนาดามีการสร้างบ้านจากคอนกรีตที่ไม่มีทรายผสมอยู่ เป็นคอนกรีตที่มีเพียงหินหยาบผสมกับซีเมนต์ ซึ่งเป็นผลจากสงครามโลกครั้งที่ ๒ ที่ทำให้เกิดภาวะการขาดแคลนที่อยู่อาศัย การขาดแคลนวัสดุและการขาดแคลนฝีมือแรงงานในการก่อสร้าง ผนวกกับความต้องการกำจัดเศษอิฐจากซากปรักหักพังของโครงสร้าง ปัจจุบันคอนกรีตพรุนที่มีการวิจัยและพัฒนาสามารถแบ่งออกได้เป็น ๒ ประเภท ได้แก่ คอนกรีตพรุนที่ถูกพัฒนาเพื่อเป็นคอนกรีตมวลเบา *(lightweight concrete)* โดยจะมีโพรงอากาศในเนื้อคอนกรีตเพื่อให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบา สามารถใช้ในงานผนังและโครงสร้างอาคาร อาจมีโพรงอากาศที่ต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องก็ได้ แต่มุ่งเน้นที่กำลังและ

ความเบาของวัสดุเป็นหลัก และประเภทที่ ๒ คือคอนกรีตพรุนที่ระบายน้ำได้ (pervious concrete) ในสหรัฐอเมริกาและญี่ปุ่นคอนกรีตชนิดนี้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นผิวทางที่ระบายน้ำได้ โดยที่สำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (Environmental Protection Agency-EPA) *(http://www2.epa.gov/aboutepa)* สนับสนุนและยอมรับว่า การใช้ผิวทางที่น้ำซึมผ่านได้นี้สามารถช่วยลดปัญหาการจัดการน้ำฝนที่ไหลนองได้ดี นอกจากนี้สภาพอากาศในบริเวณพื้นที่ที่ปูด้วยผิวทางที่ระบายน้ำได้ยังคงมีสภาพที่เย็นกว่าพื้นที่ที่ปูด้วยถนนแอสฟัลต์หรือคอนกรีตธรรมดาอีกด้วย

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมองค์ความรู้เกี่ยวกับสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตพรุนจากงานวิจัยที่ผ่านมาและแหล่งข้อมูลต่าง ๆ เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับคอนกรีตพรุน โดยเนื้อหาจะเกี่ยวกับประวัติ การใช้ประโยชน์ดังที่กล่าวมาข้างต้น และครอบคลุมถึงส่วนประกอบของเนื้อคอนกรีต การออกแบบส่วนผสม การทดสอบสมบัติพื้นฐาน และสมบัติทั่วไปของคอนกรีตพรุน

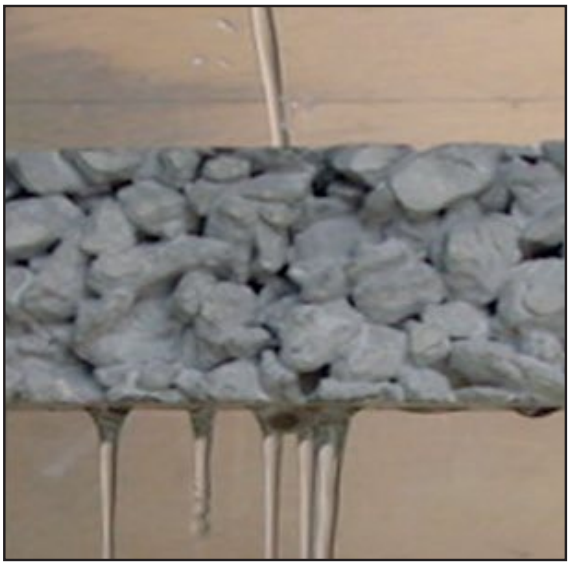
๒. ส่วนประกอบของคอนกรีตพรุน

คอนกรีตพรุนคือมวลรวมหยาบที่ถูกเชื่อมด้วยวัสดุประสานและส่วนที่เหลือเป็นโพรงช่องว่าง ดังนั้น คอนกรีตพรุนจึงประกอบด้วยส่วนหลัก ๓ ส่วน ดังนี้



ก) ส่วนประกอบ

ข) น้ำผ่านได้

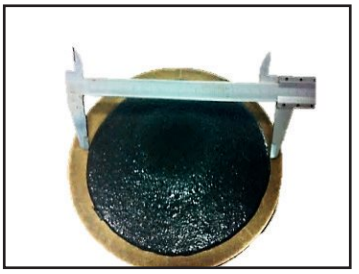


ค) วัชพืชขึ้นได้

รูปที่ ๑ ส่วนประกอบและลักษณะของคอนกรีตพรุน

๒.๑ มวลรวมหยาบ

มวลรวมหยาบที่ใช้ทำคอนกรีตพรุนมักมีขนาดคละเดียว (single grade) เพื่อให้เกิดโพรงช่องว่างในเนื้อคอนกรีต วัสดุที่ใช้อาจเป็น หินปูน กรวด หรือมวลรวมรีไซเคิล ในเนื้อคอนกรีตพรุนจะมีมวลรวมหยาบประมาณร้อยละ ๖๐-๗๐ โดยปริมาตร ACI 522R-10 *(ACI 522R-10, 2010)* ผู้นิพนธ์แนะนำว่ามวลรวมหยาบที่ใช้ในการทำคอนกรีตพรุนควรมีลักษณะตาม ASTM C33 *(ASTM C33 / C33M, 2013)* และ ASTM D448 *(ASTM D448, 2012)* จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ขนาดของมวลรวมมีผลต่อกำลังของคอนกรีตพรุน การใช้มวลรวมที่มีขนาดเล็กลงจะทำให้กำลังคอนกรีตพรุนสูงขึ้น *(ธวัชชัย โทอินทร์, ๒๕๕๕), (Yang and Jiang, 2003: 381-385), (Bhutta et al., 2012: 67-73)* ทั้งนี้เนื่องจากมวลรวมขนาดเล็กสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์ได้ อย่างไรก็ตาม มวลรวมขนาดเล็กนั้นต้องการปริมาณเพสต์เพื่อหุ้มมวลรวมมากกว่ามวลรวมขนาดใหญ่ นอกจากนี้ ความแข็งแรงของมวลรวมหยาบจะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตพรุน คือ คอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมที่แข็งแรงกว่าจะให้กำลังที่สูงกว่า *(Sata et al., 2013: 33-39)* ได้มีความพยายามในการใช้มวลรวมหยาบจากคอนกรีตรีไซเคิล และพบว่าคอนกรีตพรุนมีกำลังที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตพรุนที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ ทั้งนี้เนื่องจากสภาพผิวที่หยาบและขรุขระมากกว่าของมวลรวมรีไซเคิลช่วยให้การยึดเกาะระหว่างเพสต์กับมวลรวมดีขึ้น *(ยุวดี แซ่ตั้ง, ๒๕๕๗)*



รูปที่ ๒ การวัดค่าการไหลของซีเมนต์เพสต์ *(ยุวดี แซ่ตั้ง, ๒๕๕๗)*

๒.๒ วัสดุเชื่อมประสาน

วัสดุเชื่อมประสานเป็นส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมมวลรวมหยาบเข้าไว้ด้วยกัน โดยทั่วไปแล้วใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ (ซีเมนต์เพสต์) นอกจากนี้ อาจมีสารหรือวัสดุอื่น เช่น สารผสมเพิ่ม (admixture) หรือวัสดุผสมเพิ่ม (additive) เพื่อทำหน้าที่ปรับปรุงสมบัติของเพสต์ให้มีความแข็งแรงขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้สารลดน้ำพิเศษในซีเมนต์เพสต์สามารถลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนลงได้ ทำให้คอนกรีตพรุนที่ได้มีกำลังสูงขึ้นและเพสต์มีการห่อหุ้มมวลรวมได้ดี *(Chindaprasirt et al., 2008: 894-901)* และยังสามารถผสมซิลิกาฟูม (silica fume) ในเพสต์เพื่อช่วยเติมเต็มช่องว่างขนาดเล็ก (pores) และลดรอยแตกขนาดเล็ก (microcracks) เพิ่มความหนาแน่นของเพสต์และลดความหนาของเขตเปลี่ยนผ่าน (transition zone) ระหว่างมวลรวมกับเพสต์ได้ *(Yang and Jiang, 2003: 381-386)* คอนกรีตพรุนจะมีปริมาณเพสต์อยู่ระหว่างร้อยละ ๑๕-๒๕ โดยปริมาตร ปริมาณเพสต์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างมวลรวมหนาขึ้น ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตพรุนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ปริมาณของเพสต์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณและขนาดของโพรงช่องว่างลดลง ส่งผลให้ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุนลดลงด้วย *(Zaetang et al., 2013: 585-591)* สภาพความหนืด (viscosity) ของซีเมนต์เพสต์ถือเป็นสิ่งสำคัญในการทำคอนกรีตพรุน ซีเมนต์เพสต์ที่มีสภาพเหลวเกินไปจะทำให้เกิดการไหลลงไปอุดตันด้านล่าง และหากซีเมนต์เพสต์มีสภาพหนืดเกินไปอาจทำให้มีความสามารถในการทำงานต่ำ อัดแน่นได้ยากและเพสต์จะห่อหุ้มมวลรวมได้ไม่ดี การทดสอบค่าการไหลของเพสต์ตามมาตรฐาน JIS R5201 *(JIS R5201, 1997)* เป็นวิธีการทดสอบสมบัติของซีเมนต์เพสต์ว่ามีสภาพเหมาะสมในการนำไปใช้งานหรือไม่ ค่าการไหลของซีเมนต์เพสต์ที่เหมาะแก่การใช้งานมีค่าอยู่ในช่วง ๑๕๐-๒๓๐ มิลลิเมตร *(Chindaprasirt et al., 2008: 894-901)* เราสามารถทดสอบค่าการไหลของเพสต์โดยใช้โต๊ะการไหล (flow table) ดังแสดงในรูปที่ ๒ โดยวัดการแพร่ตัวของเพสต์บนโต๊ะการไหลเมื่อเกิดการตกกระแทก เพสต์ที่เหลวจะมีค่าการไหลสูง นอกจากนี้ วัสดุเชื่อมประสานที่ใช้อาจเป็นวัสดุชนิดอื่นที่มีสมบัติในการเชื่อมประสานได้ เช่น แอสฟัลต์ จีโอพอลิเมอร์เพสต์

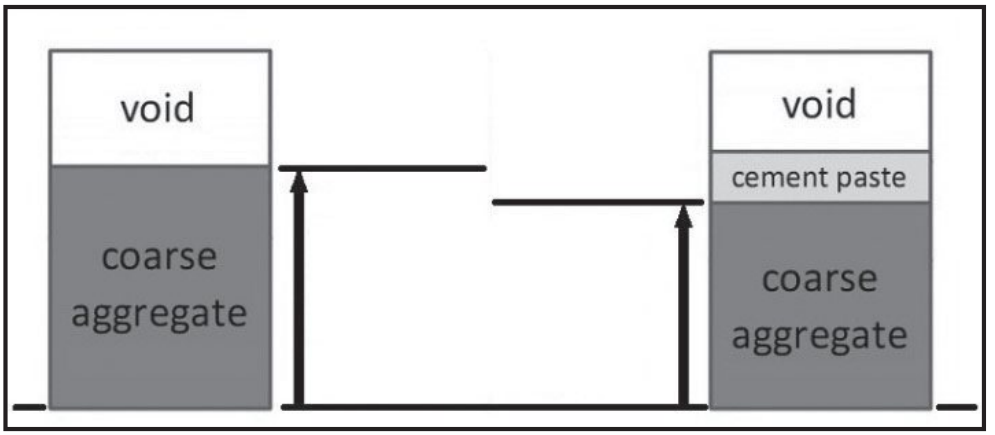
๒.๓ โพรงช่องว่าง

สำหรับโพรงและช่องว่างในคอนกรีตพรุน หากพิจารณาตำแหน่งที่โพรงเกิดอาจแบ่งได้ ๓ ประเภท ได้แก่ โพรงในเนื้อเพสต์ โพรงในเนื้อมวลรวม และโพรงช่องว่าง (voids) โดยที่โพรงในเนื้อเพสต์เป็นโพรงขนาดเล็ก ประกอบด้วยโพรงของเจล (gel pores) และโพรงแคพิลลารี (capillary pores) ซึ่งมีผลต่อกำลังของเพสต์ ปริมาณโพรงในเนื้อเพสต์นี้ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของเพสต์ *(ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ๒๕๕๒)* โพรงในเนื้อมวลรวมคือโพรงที่มีอยู่แล้วในมวลรวม ปริมาณและขนาดโพรงในเนื้อมวลรวมขึ้นอยู่กับชนิดของมวลรวมที่นำมาใช้ โพรงทั้ง ๒ ชนิดที่กล่าวมาข้างต้นมักมีขนาดเล็กและเป็นองค์ประกอบอย่างหนึ่งของคอนกรีตพรุน โพรงที่มีความสำคัญต่อคอนกรีตพรุนเป็นโพรงประเภทที่ ๓ คือ โพรงช่องว่างที่ตั้งใจให้เกิดขึ้นจากการใช้ส่วนผสมที่มีเพสต์เพียงพอแก่การเคลือบหุ้มมวลรวมหยาบ แต่ไม่เหลือสำหรับอุดช่องว่าง เป็นโพรงช่องว่างหลักที่น้ำและอากาศสามารถผ่านได้โดยง่าย นอกจากนี้ เราอาจจำแนกโพรงช่องว่างในคอนกรีตพรุนตามลักษณะความต่อเนื่องของโพรงได้เป็น ๒ ประเภท ได้แก่ โพรงแบบช่องว่างต่อเนื่อง (continuous voids) ซึ่งเป็นโพรงช่องว่างที่เชื่อมโยงกันและน้ำสามารถไหลผ่านได้ และโพรงช่องว่างแบบไม่ต่อเนื่อง (uncontinuous voids) ซึ่งเป็นโพรงปิดซึ่งน้ำไม่สามารถไหลผ่านได้ โพรงทั้ง ๒ ประเภทส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตพรุน ส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่มีปริมาณเพสต์มากหรือที่ใช้มวลรวมหยาบที่มีขนาดเล็กลงจะมีผลทำให้ความต่อเนื่องของโพรงลดลง *(Sumanasooriya and Neithalath, 2011: 778-787)* ACI 522R-10 *(ACI 522R-10, 2010)* ผู้นิพนธ์แนะนำว่าในการทำคอนกรีตพรุนที่น้ำสามารถไหลผ่านได้ดี โพรงช่องว่างควรมีขนาด ๒-๘ มิลลิเมตร และปริมาณร้อยละ ๑๕-๓๕ โดยปริมาตร

๓. การออกแบบส่วนผสม

การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตพรุนยังคงไม่มีมาตรฐานที่ยอมรับและใช้งานทั่วไปอย่างคอนกรีตธรรมดา ACI 522R-10 *(ACI 522R-10, 2010)* แนะนำการออกแบบคอนกรีตพรุนไว้ว่า คอนกรีตพรุนที่มีปริมาตร ๑ ลูกบาศก์เมตร ประกอบด้วยมวลรวมหยาบที่อยู่ชิดกันในสภาพที่หลวมกว่าสภาพอัดแน่นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากมีปริมาณเนื้อเพสต์เข้าไปเคลือบผิวมวลรวมและแทรกตัวอยู่ในช่องว่าง รูปที่ ๓ เปรียบเทียบปริมาตรของมวลรวมหยาบ เพสต์ และโพรงช่องว่างในคอนกรีตพรุนกับปริมาตรของมวลรวมหยาบอัดแน่นและโพรงช่องว่าง ทั้งนี้สภาพการอยู่ชิดกันของมวลรวมในคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติของเพสต์ ปริมาณเพสต์ และพลังงานที่ใช้ในการอัดแน่น เพสต์ที่มีค่าการไหลสูงจะเคลือบผิวมวลรวมได้บางกว่า ทำให้มวลรวมอยู่ชิดกันมากกว่า แต่จะไม่สามารถใช้ในปริมาณมากได้เนื่องจากจะเกิดการไหลของเพสต์ไปอุดตันด้านล่าง ขณะที่เพสต์ที่มีค่าการไหลต่ำจะเคลือบผิวมวลรวมได้หนากว่า ส่งผลให้มวลรวมอยู่ห่างกันมากขึ้น ปริมาณเพสต์ที่มากขึ้นจะส่งผลให้มวลรวมอยู่ห่างกันมากขึ้น และพลังงานในการอัดแน่นที่สูงขึ้นจะทำให้มวลรวมอยู่ชิดกันมากขึ้น โดยทั่วไปปริมาณเพสต์ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ ๑๕-๒๕

ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะของมวลรวม โดยที่มวลรวมขนาดเล็กหรือมีผิวหยาบจะมีพื้นที่ผิวมากกว่ามวลรวมขนาดใหญ่หรือผิวเรียบ ดังนั้น จึงต้องการปริมาณเพสต์ในการเคลือบผิวมากกว่า และปริมาณเพสต์ยังขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการอัดแน่น หากพลังงานในการอัดแน่นสูง ปริมาณเพสต์ที่ใช้ไม่ควรมาก ทั้งนี้เพื่อป้องกันการไหลลงด้านล่างของเพสต์



รูปที่ ๓ ปริมาตรของมวลรวมหยาบ น้ำ และโพรงช่องว่างของคอนกรีตพรุน

เนื่องจากไม่มีมาตรฐานที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ที่ชัดเจนของขนาดหิน ปริมาณเพสต์ และพลังงานในการอัดแน่น ดังนั้น การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตพรุนเบื้องต้นจึงต้องทำการทดลองหาปริมาณหินและปริมาณเพสต์ที่เหมาะสมกับระดับพลังงานที่ใช้ในการอัดแน่น สำหรับปริมาณปูนซีเมนต์ (c) นั้น เมื่อกำหนดปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ (V_P) ในคอนกรีตพรุน ๑ ลูกบาศก์เมตร และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/cm) แล้ว สามารถคำนวณหาปริมาณได้พร้อมทั้งปริมาณน้ำ (w) ตามสมการที่ ๑ และ ๒ คือ

$$V_P = c/(3.15 \times 1000\ kg/m^3) + w/1000\ kg/m^3 \quad (๑)$$

$$w = (w/cm)\ c \quad (๒)$$

และสามารถคำนวณหาปริมาณปูนซีเมนต์ได้จากสมการที่ ๓ คือ

$$c = [(V_P/0.315 + w/cm)] \times 1000\ kg/m^3 \quad (๓)$$

ACI 522R-10 *(ACI 522R-10, 2010)* แนะนำว่า อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้ควรอยู่ระหว่าง ๐.๒๖-๐.๔๐ อย่างไรก็ตาม การใส่สารลดน้ำจะสามารถช่วยลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลงได้ Chindaprasirt และคณะ *(Chindaprasirt et al., 2008: 894-901)* พบว่าสามารถลด w/cm ให้อยู่ระหว่าง ๐.๒๐-๐.๒๕ ได้โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ

๔. การผสมและอัดแน่นคอนกรีตพรุน

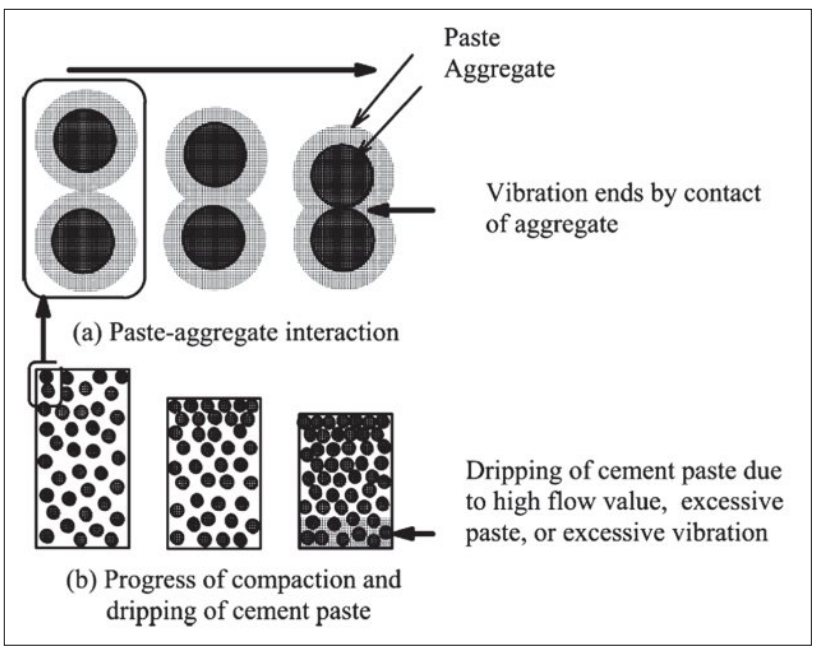
ลักษณะของคอนกรีตพรุนที่ดีนั้น เพสต์ควรเคลือบผิวมวลรวมดี คอนกรีตพรุนสดควรมีความสามารถในการอัดแน่นเข้าแบบดีเพื่อให้ได้ขนาดโพรงที่ต้องการ และเมื่อแข็งตัวแล้วต้องมีการกระจายตัวของโพรงช่องว่างอย่างสม่ำเสมอ ขั้นตอนการผสมคอนกรีตพรุนในห้องปฏิบัติการเริ่มจากการผสมส่วนผสมของเพสต์ก่อน เมื่อผสมได้เพสต์ที่มีค่าการไหลที่เหมาะสม ก็จะผสมมวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (saturated surface dry, SSD) ลงไป ทั้งนี้มวลรวมในสภาพ SSD จะไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำและสภาพการไหลของเพสต์ คอนกรีตพรุนที่ได้จะมีความหนืดลักษณะคล้ายคอนกรีตไม่ยุบตัว (no-slump concrete) การวัดความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตพรุนนั้นยังไม่มีมาตรฐานรองรับโดยตรง Yang และ Jiang *(Yang and Jiang, 2003: 381-386)* ได้นำการทดสอบวีบี (VB จาก V. Bahrner) มาใช้ ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตที่มีความหนืดหรือมีความสามารถเทได้ต่ำ

การอัดแน่นคอนกรีตพรุนด้วยแท่งเหล็กกระทุ้งทำได้ยากกว่าคอนกรีตทั่วไป การแบ่งชั้นกระทุ้งให้มากขึ้นจะช่วยให้เนื้อคอนกรีตมีความสม่ำเสมอ นอกจากนี้ การเขย่าด้วยโต๊ะเขย่าจะช่วยให้เนื้อคอนกรีตอัดตัวได้ดียิ่งขึ้นและเนื้อเพสต์เคลือบผิวมวลรวมได้ดีขึ้น ทั้งนี้ความเหมาะสมของวิธีการอัดแน่นยังคงขึ้นอยู่กับค่าการไหลและปริมาณของเพสต์เป็นหลัก จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ค่าการไหลของเพสต์มีผลต่อปริมาณโพรงและการไหลลงอุดตันด้านล่างของตัวอย่างคอนกรีตพรุน *(Chindaprasirt et al., 2008: 894-901), (Kim and Lee, 2010: 607-615)* รูปที่ ๔ แสดงสถานะของด้านล่างตัวอย่างคอนกรีตพรุนที่ใช้เพสต์ที่มีค่าการไหลและปริมาณโพรงช่องว่างต่างกัน

การอัดแน่นคอนกรีตพรุนสามารถใช้เครื่องเขย่าที่บนผิวหน้าของคอนกรีต รูปที่ ๕ แสดงตัวอย่างคอนกรีตพรุนที่อัดแน่นโดยการใช้เครื่องเขย่าบนผิวหน้า *(Chindaprasirt et al., 2008: 894-901)* การอัดแน่นจะไม่สม่ำเสมอตลอดความหนา บริเวณผิวด้านบนใกล้เครื่องเขย่าจะมีการอัดแน่นดีกว่าผิวด้านล่าง วิธีการบดอัดนี้นิยมใช้กันในการบดอัดพื้นคอนกรีตพรุนในสนาม นอกจากนี้ การเตรียมคอนกรีตพรุนที่ทำในห้องปฏิบัติการยังมีสมบัติที่แตกต่างจากคอนกรีตพรุนที่ใช้งานจริง จากการศึกษาของ Mahboub และคณะ *(Mahboub et al., 2009: 523-528)* พบว่า การอัดแน่นตัวอย่างตาม ASTM C192 *(ASTM C192 / C192M, 2013)* โดยใช้เหล็กกระทุ้งจะให้คอนกรีตที่มีสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างจากวิธีใช้แรงดันอัดและวิธีที่ใช้ก่อสร้างจริงในสนาม

Flow value (mm)	State at bottom portion		
F3 (230)			
F2 (190)			
F1 (150)			
Designed void ratio (vol.%)	15	20	25

รูปที่ ๔ สถานะของด้านล่างตัวอย่างคอนกรีตพรุนที่ใช้เพสต์ที่มีค่าการไหลและปริมาณเพสต์ต่างกัน
(Chindaprasirt et al., 2008: 894-901)



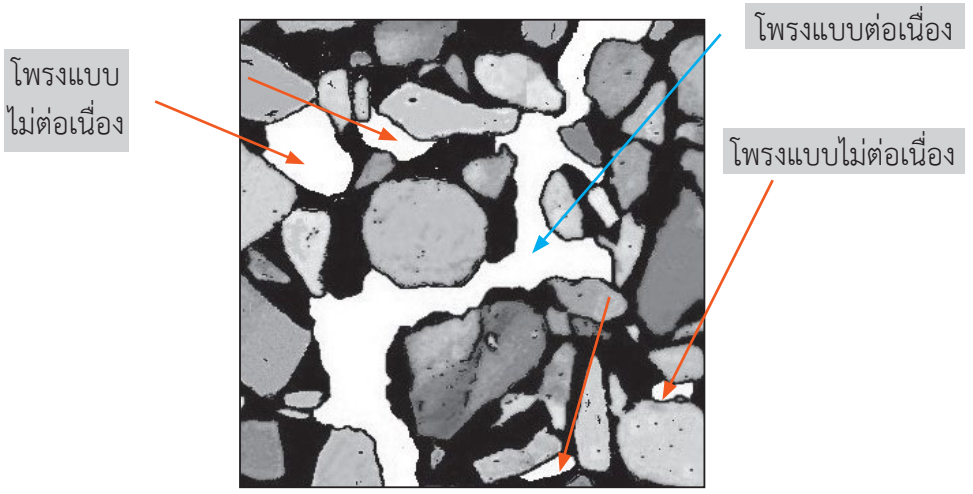
รูปที่ ๕ สภาพคอนกรีตพรุนจากการบดอัดด้วยเครื่องเขย่าบนผิวหน้า
(Chindaprasirt et al., 2008: 894-901)

๕. การทดสอบสมบัติ

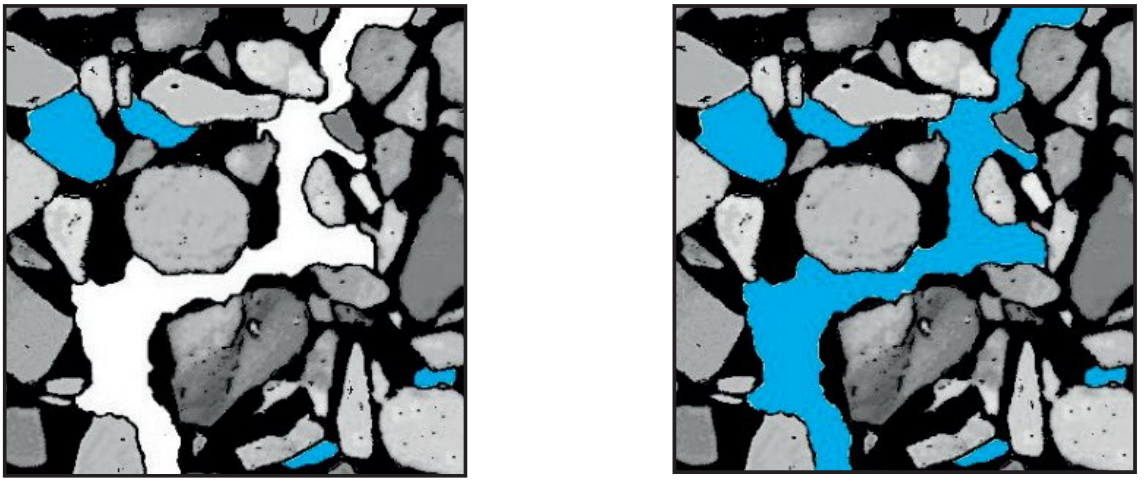
การทดสอบสมบัติด้านกำลังของคอนกรีตพรุน (กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด และกำลังรับแรงดึงแยกแบ่งซีก) สามารถใช้มาตรฐานของสมาคมการทดสอบและวัสดุอเมริกัน (American Society of Testing and Materials, ASTM) เหมือนการทดสอบกำลังของคอนกรีตทั่วไป ขณะที่การทดสอบทางด้านกายภาพของคอนกรีตพรุนนั้นเริ่มมีมาตรฐานมากขึ้น คือ ใน ค.ศ. ๒๐๐๙-๒๐๑๒ สมาคมการทดสอบและวัสดุอเมริกันได้ออกมาตรฐานสำหรับทดสอบสมบัติของคอนกรีตพรุน ASTM C1701 *(ASTM C1701 / C1701M, 2009)* คือ มาตรฐานที่ใช้ทดสอบการหาค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุนในสนาม, ASTM C1688 *(ASTM C1688 / C1688M, 2013)* คือ มาตรฐานในการทดสอบหาค่าความหนาแน่นและปริมาณโพรงอากาศของคอนกรีตพรุนสด, ASTM C1747 *(ASTM C1747 / C1747M, 2011)* คือ มาตรฐานที่ใช้ทดสอบหาค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของคอนกรีตพรุน และ ASTM C1754 *(ASTM C1754, 2012)* คือ มาตรฐานที่ใช้ทดสอบหาค่าความหนาแน่นและปริมาณโพรงของคอนกรีตพรุนที่แข็งตัวแล้ว สำหรับการทดสอบการซึมผ่านน้ำของตัวอย่างคอนกรีตพรุนในห้องปฏิบัติการนั้น ได้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาและพัฒนาเครื่องมือขึ้นมาเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตพรุน นอกจากนี้ คอนกรีตพรุนมักถูกใช้งานด้านถนน จึงควรทำการทดสอบการสึกกร่อนของผิวหน้าตามมาตรฐาน ASTM C944 *(ASTM C944 / C944M, 2012)* ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบค่าต้านทานการสึกกร่อนของผิวหน้าโดยวิธี Rotating Cutter

๕.๑ การทดสอบหาปริมาณโพรง

ได้กล่าวมาแล้วว่า ปริมาณโพรงอากาศที่อยู่ในคอนกรีตมีทั้งโพรงแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่อง ดังแสดงในภาพจำลองรูปที่ ๖ ตามทฤษฎีแล้วเมื่อคอนกรีตพรุนอยู่ในสภาพ SSD โพรงแบบไม่ต่อเนื่องด้านในของคอนกรีตจะมีน้ำอยู่เต็มขณะที่โพรงแบบต่อเนื่องจะไม่มีน้ำอยู่ ในการปฏิบัติจริงยังไม่มีมาตรฐานในการกำหนดการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตพรุนในสภาพ SSD และเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแช่ในน้ำ โพรงช่องว่างทั้งหมดจะถูกเติมด้วยน้ำ (ดังแสดงในรูปที่ ๗) ในการเตรียมตัวอย่างในสภาพนี้คอนกรีตต้องถูกแช่น้ำเป็นระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้น้ำสามารถซึมเข้าสู่โพรงที่ไม่ต่อเนื่องได้ เมื่อชั่งน้ำหนักในน้ำแล้ว น้ำหนักของตัวอย่างจะคงตัวไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ ๖ โพรงแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่อง



สภาพอิ่มตัวผิวแห้ง สภาพแช่ในน้ำ

รูปที่ ๗ น้ำในโพรงเมื่อคอนกรีตพรุนอยู่ในสภาพต่าง ๆ

การทดสอบหาปริมาณโพรงและความหนาแน่นของคอนกรีตพรุนที่แข็งตัวแล้วตามมาตรฐาน ASTM C1754 *(ASTM C1754, 2012)* นั้นสามารถหาความหนาแน่นในสภาพแห้งและปริมาณโพรงอากาศทั้งหมด ทั้งโพรงแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่อง โดยใช้สมการที่ ๔ และ ๕ คือ

ความหนาแน่นในสภาพแห้ง $= \frac{KA}{D^2L}$ (๔)

ปริมาณโพรงทั้งหมด $= \left[1 - \left(\frac{K(A-B)}{\rho_w D^2 L}\right)\right]100$ (๕)

โดยที่ A = น้ำหนักตัวอย่างในสภาพแห้ง ชั่งในอากาศ (กรัม),
D = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของตัวอย่าง (มิลลิเมตร),
L = ความยาวเฉลี่ยของตัวอย่าง (มิลลิเมตร),
K = ๑๒๗๓๒๔๐,
B = น้ำหนักตัวอย่างชั่งในน้ำ (กรัม),
ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิที่ชั่งตัวอย่าง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

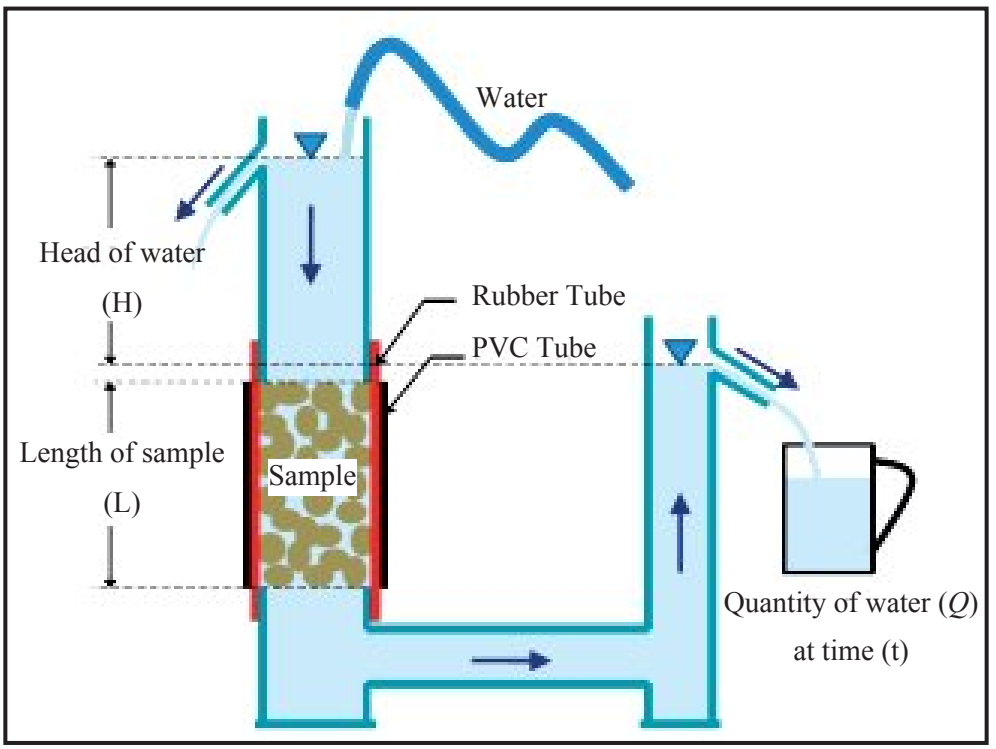
๕.๑ การทดสอบหาค่าการซึมผ่านน้ำ

การทดสอบการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุนเป็นการทดสอบหาความสามารถที่น้ำไหลผ่านคอนกรีต คอนกรีตที่มีค่าการซึมผ่านน้ำสูงคือคอนกรีตที่น้ำไหลผ่านได้ดี จากการศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่า มีการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุน ๒ วิธี คือ แบบแรงดันคงตัว (constant head method) และแบบแรงดันลด (falling head method) *(Mahboub et al., 2009: 523-528), (Neithalath et al., 2010: 802-813)*

รูปที่ ๘ แสดงภาพจำลองการทดสอบหาค่าการซึมผ่านน้ำแบบแรงดันคงตัว การทดสอบทำโดยเริ่มต้นจากการนำตัวอย่างคอนกรีตพรุนทรงกระบอกมาใส่ในแบบที่สามารถป้องกันการไหลซึมด้านข้างได้ จากนั้นนำตัวอย่างติดตั้งเข้ากับชุดทดสอบ ปล่อยน้ำเข้าสู่ชุดทดสอบโดยให้น้ำไหลเข้ากระบอกด้านบนเหนือตัวอย่างและไหลผ่านตัวอย่างไปสู่กระบอกอีกด้าน ไล่ฟองอากาศที่อยู่ในระบบออกให้หมด ปรับปริมาณน้ำไหลเข้าให้ระดับน้ำที่ทางออกทั้งสองคงตัวแล้ววัดปริมาณน้ำด้วยการชั่งน้ำหนัก จากนั้นคำนวณหาปริมาตรน้ำ (Q, ลูกบาศก์เซนติเมตร) โดยจับเวลา (t, วินาที) ค่าการซึมผ่านน้ำ (k, เซนติเมตรต่อวินาที) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ ๖ คือ

$$k = \frac{QL}{tHA} \quad (๖)$$

โดยที่ A คือขนาดหน้าตัดตัวอย่าง (ตารางเซนติเมตร),
L คือความสูงของตัวอย่าง (เซนติเมตร),
H คือระยะระหว่างระดับน้ำที่ทางออกสองทาง (เซนติเมตร)



รูปที่ ๘ ภาพจำลองการวัดค่าการซึมผ่านน้ำแบบแรงดันคงตัว *(ยุวดี แซ่ตั้ง, ๒๕๕๗)*

การทดสอบหาค่าการซึมผ่านน้ำแบบแรงดันลด (falling head) เหมาะกับการทดสอบตัวอย่างที่มีค่าการซึมผ่านต่ำ การทดสอบสามารถใช้ชุดเครื่องมือเดียวกับวิธีแรงดันคงตัว โดยการปล่อยน้ำเข้าจนสูงกว่าระดับทางออกน้ำด้านขวามือ ไล่ฟองอากาศที่อยู่ในระบบออกให้หมด ปิดน้ำที่ปล่อยเข้าและเริ่มจับเวลา ระดับน้ำที่สูงทางซ้ายมือจะค่อย ๆ ลดลง ผู้ทดลองสามารถคำนวณหาค่าการซึมผ่าน (k, เซนติเมตรต่อวินาที) ได้จากสมการที่ ๗ คือ

$$k = \frac{A_1 L}{A_2 t} \ln \frac{h_2}{h_1} \quad (๗)$$

โดยที่ h_1 คือความสูงของระดับน้ำ ณ เวลาที่เริ่มวัด (เซนติเมตร),
h_2 คือความสูงของน้ำ ณ เวลาที่หยุดวัด (เซนติเมตร),
t คือช่วงเวลาในการวัด (วินาที),
L คือความยาวของตัวอย่าง (เซนติเมตร),
A_1 คือพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (ตารางเซนติเมตร),
A_2 คือพื้นที่หน้าตัดของท่อ (ตารางเซนติเมตร)

๕.๒ การทดสอบการสึกกร่อนของผิวหน้า

การทดสอบการสึกกร่อนของผิวหน้าของตัวอย่างคอนกรีตวิธี Rotating Cutter ตามมาตรฐาน ASTM C944 *(ASTM C944 / C944M, 2012)* เป็นการทดสอบเพื่อวัดการต้านทานการสึกกร่อนผิวหน้าของคอนกรีตงานถนน สามารถนำมาใช้วัดการต้านทานการสึกกร่อนและการหลุดล่อนของผิวหน้าของคอนกรีตพรุนได้ดี การทดสอบทำได้โดยใช้เครื่องมือพร้อมหัวขัดดังแสดงในรูปที่ ๙ โดยใช้น้ำหนักกดหัวขัด ๙๘ นิวตันเป็นเวลา ๒ นาที ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นตัวอย่างรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด ๑๕ × ๑๕ × ๖ เซนติเมตร ตัวอย่างก่อนทดสอบควรอยู่ในสภาพเดียวกัน เนื่องจากปริมาณความชื้นที่แตกต่างกันส่งผลต่อค่าการต้านทานการสึกกร่อนที่แตกต่างกัน ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการใช้พลาสติกปิดผิวด้านข้างเพื่อป้องกันตัวอย่างแตกหักระหว่างการยึดจับ จากนั้นเป่าตัวอย่างด้วยแรงดันลมเพื่อให้ตัวอย่างสะอาด ชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนขัดด้วยตราชั่งที่มีความละเอียด ๐.๑ กรัม นำตัวอย่างเข้าเครื่องยึดตัวอย่างให้แน่น เริ่มขัดตัวอย่างโดยมีการจับเวลา หลังขัดต้องเป่าเพื่อทำความสะอาดแล้วนำตัวอย่างไปชั่งเพื่อหาน้ำหนักตัวอย่างหลังขัด นำมาคำนวณหาน้ำหนักที่สูญเสียจากการขัดผิวหน้า

รูปที่ ๙ การทดสอบการต้านทานการสึกกร่อนของตัวอย่างคอนกรีตพรุน *(ยุวดี แซ่ตั้ง, ๒๕๕๗)*

๕.๓ การทดสอบค่านำความร้อน

สภาพนำความร้อน (thermal conductivity) หรือสัมประสิทธิ์การนำความร้อน คือ ค่าที่บ่งบอกถึงอัตราเร็วของการส่งผ่านพลังงานความร้อนภายในโมเลกุลของวัสดุ จากโมเลกุลที่มีระดับพลังงานสูงกว่าไปยังระดับที่ต่ำกว่า วัสดุก่อสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำจะมีสมบัติเป็นฉนวนที่ดี คอนกรีตพรุนซึ่งมีโพรงช่องว่างอยู่มากจะมีสมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีกว่าคอนกรีตทั่วไป วิธีการทดสอบการนำความร้อนของวัสดุนั้นมีหลายวิธี วิธีการทดสอบหาค่าการนำความร้อนโดยวัดด้วยหัววัดแบบวางที่ผิวของวัสดุ (surface probe) แสดงไว้ในรูปที่ ๑๐ วิธีนี้สามารถใช้ทดสอบค่าการนำความร้อนของคอนกรีตพรุนง่ายกว่าวิธีอื่น เครื่องมือได้ผ่านการสอบเทียบกับการทดสอบหาค่าการนำความร้อนมาตรฐาน ASTM C5334 *(ASTM D5334, 2014)* ตัวอย่างที่ทดสอบควรมีขนาดหน้าตัดกว้างอย่างน้อย ๖ เซนติเมตร หนาอย่างน้อย ๒ เซนติเมตร และควรถูกอบแห้งที่อุณหภูมิ ๑๑๐±๕ องศาเซลเซียสเป็นเวลา ๒๔ ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกจากตัวอย่าง ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นของตัวอย่างมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่านำความร้อนอย่างมาก ควรทดสอบด้านที่ผิวหน้าเรียบเพื่อให้หัวสัมผัสผิวตัวอย่างได้ดี โดยวางหัววัดไว้ที่ผิวตัวอย่าง จากนั้นหัววัดจะวัดค่าการนำความร้อนโดยการส่งและรับความร้อนด้วยหัววัดด้านเดียว

รูปที่ ๑๐ การทดสอบการนำความร้อนของตัวอย่างคอนกรีตพรุน *(ยุวดี แซ่ตั้ง, ๒๕๕๗)*

๖. สมบัติของคอนกรีตพรุน

เนื่องจากคอนกรีตพรุนมีปริมาณโพรงช่องว่างที่มากกว่าคอนกรีตทั่วไปมาก ดังนั้น สมบัติของคอนกรีตพรุนจึงมักสัมพันธ์กับปริมาณโพรงอย่างเด่นชัด ในส่วนนี้จะกล่าวถึงสมบัติทางกลและทางกายภาพที่สำคัญของคอนกรีตพรุน

๖.๑ การซึมผ่านน้ำ

ACI 522R-10 *(ACI 522R-10, 2010)* แนะนำว่า คอนกรีตพรุนที่แข็งแรงควรมีค่าการซึมผ่านน้ำ (drainage rate) อยู่ระหว่าง ๐.๑๔-๑.๒๒ เซนติเมตรต่อวินาที การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุนมีความสัมพันธ์กับปริมาณโพรงช่องว่าง คอนกรีตพรุนที่มีปริมาณโพรงมากจะให้ค่าการซึมผ่านน้ำที่มาก อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยของ Sumanasooriya และ Neithalath *(Sumanasooriya and Neithalath, 2011: 778-787)* พบว่าค่าการซึมผ่านน้ำไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณโพรงเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับขนาดและความต่อเนื่องของโพรง ปริมาณเพสต์ที่มากขึ้นมีผลให้ความต่อเนื่องของโพรงลดลง *(Zaetang et al., 2013: 585-591)* การใช้มวลรวมขนาดเล็กลงมีผลให้ความต่อเนื่องของโพรงลดลงเช่นกัน นอกจากนี้ งานวิจัยของ Huang และคณะ *(Huang et al., 2010: 818-823)* แสดงว่าการเติมสารพอลิเมอร์ เช่น Styrene-butadiene latex ส่งผลต่อการลดลงของความต่อเนื่องของโพรง นอกจากนี้ Neithalath และคณะ *(Neithalath et al., 2010: 802-813)* ได้ศึกษาพฤติกรรมของปริมาณโพรง ขนาดโพรง ความต่อเนื่องของโพรงสำหรับคอนกรีตพรุนเพื่อทำนายค่าการซึมผ่านน้ำจากงานวิจัยในอดีต *(Low et al., 2008), (Montes and Haselbach, 2006: 960-969), (Neithalath, 2004), (ACI 522R-06, 2006), (Wang et al., 2006)* โดยพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านน้ำกับปริมาณโพรงเป็นสมการแบบเลขชี้กำลัง (exponential) ดังแสดงในรูปที่ ๑๑ *(Sata et al., 2013: 33-39)*

๖.๒ กำลังของคอนกรีตพรุน

คอนกรีตพรุนมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไป ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณโพรงที่มีอยู่มาก จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาณโพรงช่องว่างของคอนกรีตพรุนสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเลขชี้กำลัง *(Lian et al., 2011: 4294-4298), (Kendall et al., 1983: 139-153), (Tho-in et al., 2012: 360-371)* โดยที่คอนกรีตพรุนทั่วไปที่ประกอบด้วยมวลรวมหยาบที่แข็งแรงกว่าเพสต์นั้น เพสต์จะเคลือบและหุ้มมวลรวมหยาบไว้เสมือนเป็นหนึ่งเดียวกับมวลรวม เมื่อรับน้ำหนัก โพรงช่องว่างในเนื้อคอนกรีตพรุนจะเป็นจุดอ่อนหรือจุดที่ทำให้เกิดความเค้นสูงและทำให้เกิดรอยแตก และรอยแตกนี้จะขยายตัวผ่านเนื้อเพสต์ *(Chindaprasirt et al., 2008: 894-901)* พฤติกรรมนี้คล้ายกับพฤติกรรมของวัสดุพรุนที่อธิบายโดย Ryshkewitch *(Ryshkewitch, 1953: 65-68)* ว่า กำลังรับแรงอัดของวัสดุพรุนขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงอัดของวัสดุและความพรุน โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาณโพรงสามารถแสดงดังสมการที่ ๘ รูปที่ ๑๒ แสดงกำลังรับแรงอัดกับปริมาณโพรงของคอนกรีตพรุนที่ทำจากเพสต์กำลังสูง *(Chindaprasirt et al., 2008: 894-901)*

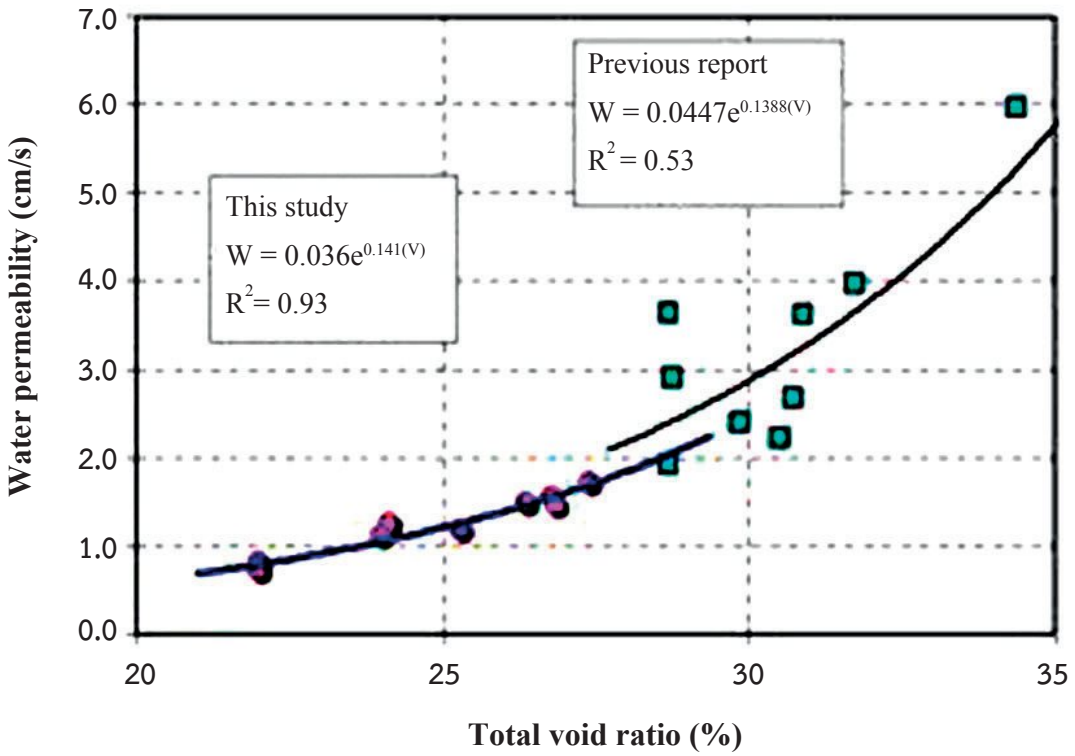
$$\sigma = \sigma_0 e^{-bV} \qquad (๘)$$

โดยที่ σ คือกำลังรับแรงอัด (เมกะพาสคัล),

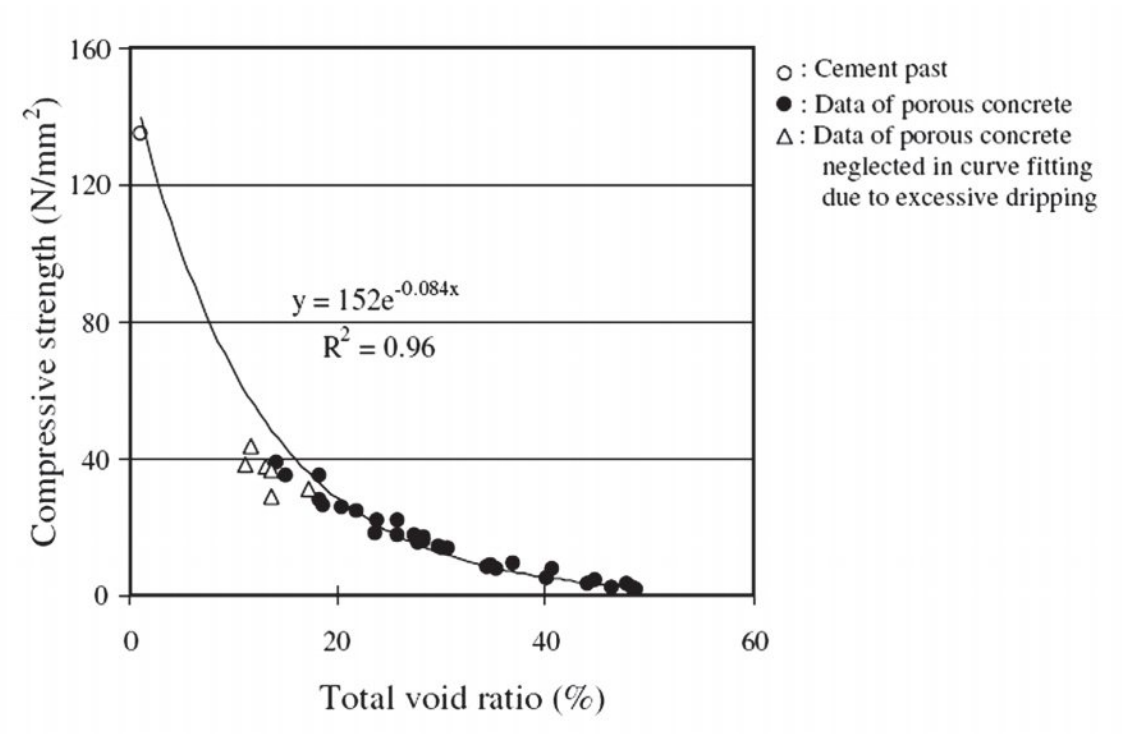
σ_0 คือกำลังรับแรงอัดที่ปริมาณโพรง 0 เปอร์เซ็นต์ (เมกะพาสคัล),

V คือปริมาณโพรง (เปอร์เซ็นต์),

b คือค่าคงตัวที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ ๑๑ การซึมผ่านน้ำและปริมาณโพรง *(Sata et al., 2013: 33-39)*



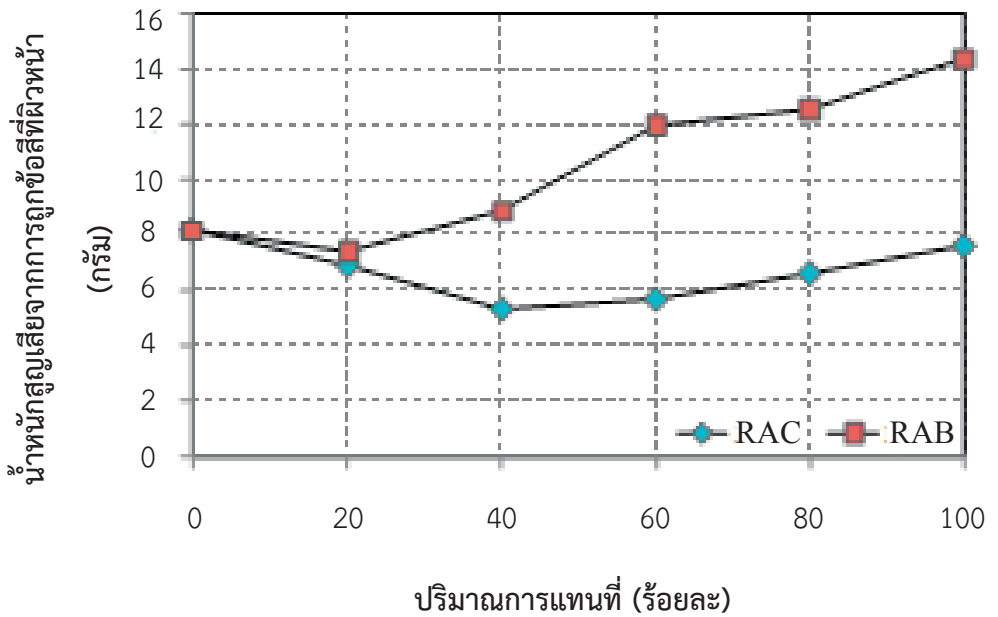
รูปที่ ๑๒ กำลังรับแรงอัดและปริมาณโพรงของคอนกรีตพรุน *(Chindaprasirt et al., 2008: 894-901)*

โดยทั่วไปคอนกรีตพรุนจะมีกำลังอัดอยู่ระหว่าง ๒.๘-๒๘.๐ เมกะพาสคัล การเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนด้วยการปรับปรุงส่วนผสมของคอนกรีตพรุนมี ๒ แนวทาง คือ การเพิ่มกำลังของเพสต์หรือความหนาของเพสต์ และการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสโดยการลดขนาดของมวลรวมหรือการคละขนาดของมวลรวม งานวิจัยของ Yang และ Jiang *(Yang and Jiang, 2003: 381-386)* ได้ปรับปรุงกำลังของเพสต์ด้วยซิลิกาฟูมและสารลดน้ำพิเศษ ร่วมกับการใช้มวลรวมขนาดเล็ก สามารถทำให้คอนกรีตพรุนมีกำลังรับแรงอัดมากกว่า ๕๐ เมกะพาสคัล ในทำนองเดียวกัน งานวิจัยของ Chen และคณะ *(Chen et al., 2012: 3329-3334)* พบว่า การใช้ซิลิกาฟูม เถ้าลอย และสารลดน้ำพิเศษสามารถปรับปรุงกำลังของเพสต์ ทำให้คอนกรีตพรุนมีกำลังสูงขึ้น นอกจากนี้ การใช้สารพอลิเมอร์ยังช่วยปรับปรุงกำลังรับแรงดึง ทำให้คอนกรีตพรุนที่ได้มีความเหนียว (toughness) มากขึ้น

นอกจากนี้ จากการศึกษาที่ผ่านมาของ Chen และคณะ *(Chen et al., 2012: 3329-3334)* และ Sata และคณะ *(Sata et al., 2013: 33-39)* พบว่า การแตกหักในคอนกรีตพรุนอาจเกิดขึ้นได้ ๒ ลักษณะ กรณีแรกคือเพสต์มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับมวลรวม ดังนั้น จะเกิดการแตกโดยที่แนวแตกจะผ่าเนื้อมวลรวม และกรณีที่ ๒ เมื่อเพสต์มีความแข็งแรงน้อยกว่ามวลรวม แนวการแตกจะเกิดขึ้นระหว่างรอยต่อระหว่างมวลรวมกับเพสต์

๖.๓ การสึกกร่อนของผิวหน้า

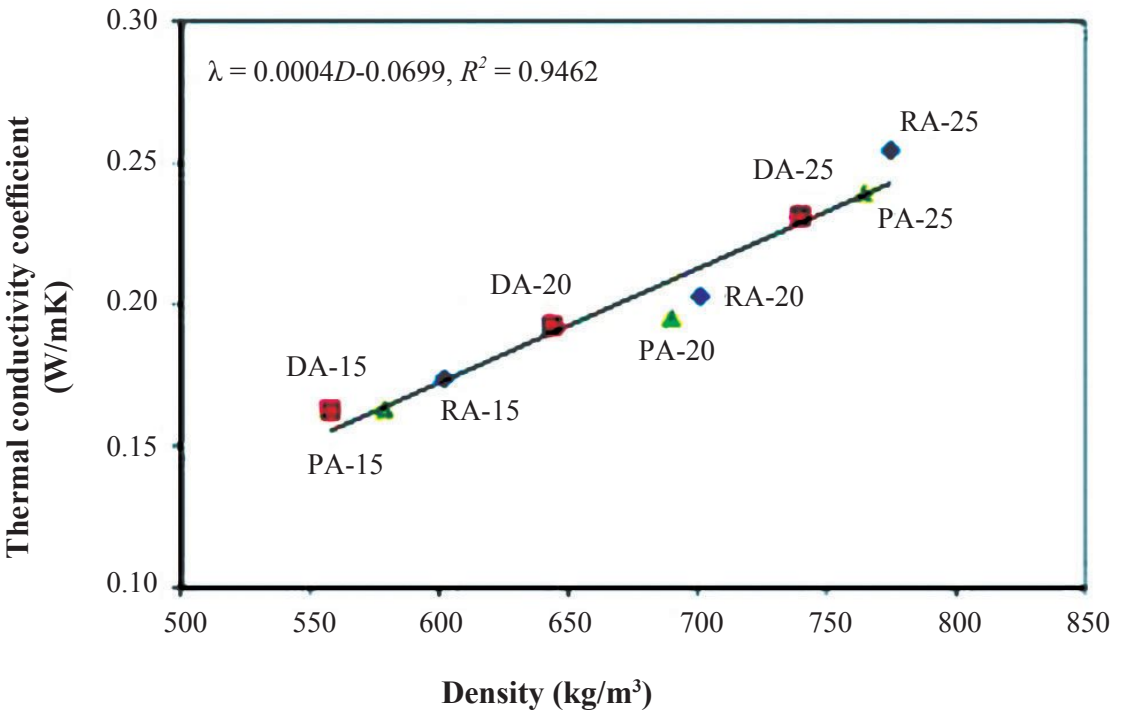
ค่าน้ำหนักสูญเสียจากการขัดถูที่ผิวหน้าของคอนกรีตพรุนมีแนวโน้มแปรผันโดยตรงกับกำลังรับแรงอัด จึงสามารถใช้บ่งบอกถึงความแข็งแรงของคอนกรีตพรุนได้ ค่าน้ำหนักสูญเสียจากการขัดถูที่ผิวหน้าของคอนกรีตพรุนที่ทำจากคอนกรีตรีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบ (aggregate from recycled concrete, RAC) มีค่าต่ำกว่าน้ำหนักสูญเสียของคอนกรีตพรุนที่ทำจากมวลรวมหยาบของคอนกรีตบล็อกที่นำกลับมาใช้ (aggregate from recycled concrete block, RAB) ดังแสดงในรูปที่ ๑๓ นอกจากนี้ ลักษณะการแตกหักจากการขัดถูยังสามารถบอกถึงความแตกต่างของความแข็งแรงระหว่างเพสต์กับมวลรวมได้อีกด้วย คอนกรีตพรุนที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ (RAC ปริมาณการแทนที่ร้อยละ ๐) มีแนวโน้มที่จะให้ค่าน้ำหนักที่สูญเสียจากการขัดถูที่ผิวหน้าสูงกว่าคอนกรีตพรุนที่ใช้คอนกรีตรีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบ (RAC) *(ยุวดี แซ่ตั้ง, ๒๕๕๗)* ทั้งนี้เนื่องจากหินปูนมีความแข็งแรงกว่าเพสต์มาก จึงเกิดรอยแตกตามแนวเพสต์ ทำให้หินปูนหลุดล่อนเป็นเม็ด ขณะที่คอนกรีตรีไซเคิลมีความแข็งแรงน้อยกว่าหินปูนและน้อยกว่าเพสต์ จึงเกิดการแตกของหินเป็นชิ้นเล็ก ๆ นอกจากนี้ การใช้วัสดุผสมเพิ่มประเภทพอซโซลานในส่วนผสมของเพสต์สามารถเพิ่มความต้านทานการสึกกร่อนที่ผิวหน้าได้ *(ยุวดี แซ่ตั้ง, ๒๕๕๗)*



รูปที่ ๑๓ ค่าน้ำหนักสูญเสียจากการขัดถูที่ผิวหน้าของคอนกรีตพรุนทดสอบตาม ASTM C944 *(ยุวดี แซ่ตั้ง, ๒๕๕๗)*

๖.๔ การนำความร้อน

จากการศึกษาของ Demirboğa และ Gül *(Demirboğa and Gül, 2003: 723-727)* พบว่าคอนกรีตที่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่านำความร้อนของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตาม คือ คอนกรีตทั่วไปจะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอยู่ระหว่าง ๑.๐-๒.๐ วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน *(Wong et al., 2007: 647-655), (Demirboğa, 2007: 2467-2471), (Uysal et al., 2004: 845-848)* ขณะที่คอนกรีตมวลเบาซึ่งมีสมบัติของฉนวนที่ดีจะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอยู่ระหว่าง ๐.๑๑-๐.๙๓ วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน *(Khedari et al., 2001: 65-70), (Narayanan and Ramamurthy, 2000: 321-329), (Ünal et al., 2007: 584-590), (Sengul et al., 2011: 671-676)* คอนกรีตมวลเบาที่มีปริมาณโพรงอากาศมากหรือความหนาแน่นน้อยจะมีค่าการนำความร้อนต่ำ ส่วนคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินธรรมชาติจะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอยู่ระหว่าง ๐.๗๘-๑.๐ วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน *(Wong et al., 2007: 647-655)* คอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นมวลรวมเบาซึ่งมีปริมาณโพรงช่องว่างอยู่มากจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่น้อยกว่าคอนกรีตพรุนทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ ๑๔ คอนกรีตพรุนเบาจะมีค่าการนำความร้อนอยู่ระหว่าง ๐.๒-๐.๔ วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ซึ่งสามารถพัฒนาเป็นฉนวนกันความร้อนได้ *(Zaetang et al., 2013: 585-591)*



รูปที่ ๑๔ ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตพรุนที่ทำจากมวลรวมเบา *(Zaetang et al., 2013: 585-591)*

๗. บทสรุป

คอนกรีตพรุนเป็นคอนกรีตที่มีสมบัติที่ดีในด้านการระบายน้ำซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้เป็นผิวทางที่ระบายน้ำได้ การเข้าใจพฤติกรรมของคอนกรีตพรุนจะช่วยให้สามารถพัฒนากำลังของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้น และสามารถนำไปใช้งานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม ถือเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและน่าสนใจ ควรที่จะพัฒนาต่อไป ปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานการออกแบบและทดสอบคอนกรีตประเภทนี้อย่างสมบูรณ์ แต่จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า สมบัติด้านกำลังและการซึมผ่านน้ำมีความสัมพันธ์กับปริมาณโพรงช่องว่าง การใช้วัสดุพอซโซลานและสารลดน้ำสามารถเพิ่มกำลังของคอนกรีตพรุนได้ นอกจากนี้ คอนกรีตพรุนยังมีสมบัติการนำความร้อนที่ต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไปอีกด้วย

๘. เอกสารอ้างอิง

ธวัชชัย โทอินทร์, ๒๕๕๕, “จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตพรุน”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ๒๕๕๒, “ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต” พิมพ์ครั้งที่ ๕. กรุงเทพ: สมาคมคอนกรีตไทย. ๓๘๑ หน้า.

ยุวดี แซ่ตั้ง, ๒๕๕๗, “คอนกรีตพรุนที่ทำจากมวลรวมรีไซเคิลและมวลรวมเบา”, วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ACI 522R-06, 2006, “Pervious Concrete”. American Concrete Institute Committee.

ACI 522R-10, 2010, “Report on pervious concrete” *American Concrete Institute.*

ASTM C1688 / C1688M, 2013, “Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete”, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02.

ASTM C1701 / C1701M, 2009, “Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete”, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02.

ASTM C1747 / C1747M, 2011, “Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion”, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02.

ASTM C1754, 2012, “Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete”, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02.

ASTM C192 / C192M, 2013, “Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory”, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02.

ASTM C33 / C33M, 2013, “Standard Specification for Concrete Aggregates”, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02.

ASTM C944 / C944M, 2012, “Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method”, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02.

ASTM D448, 2012, “Standard Classification for Sizes of Aggregate for Road and Bridge Construction”, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.03.

ASTM D5334, 2014, “Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure”, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.08.

Bhutta, M.A.R., K. Tsuruta, and J. Mirza, 2012, "Evaluation of high-performance porous concrete properties", *Construction and Building Materials.* Vol. 31, No. 6, pp. 67-73.

Chareerat, T., Y. Hirun, T. Tanchaisawat, P. Chindaprasirt, and S. Hatanaka, 2009, "Porous concret: environmentally friendly concrete for sustainable urban development." in *RSID6*. Bangkok Thailand.

Chen, Y., K.-J. Wang, and D. Liang, 2012, "Mechanical properties of pervious cement concrete", *Journal of Central South University.* Vol. 19, No. 11, pp. 3329-3334.

Chindaprasirt P., Hatanaka S., Chareerat T., Mishima N., Yuasa Y., 2008, Cement paste characteristics and porous concrete properties, *Construction and Building Materials,* Vol. 22, No. 5, pp. 894-901.

Demirboğa, R. and R. Gül, 2003, "The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete", *Cement and Concrete Research*. Vol. 33, No. 5, pp. 723-727.

Demirboğa, R., 2007, "Thermal conductivity and compressive strength of concrete incorporation with mineral admixtures", *Building and Environment.* Vol. 42, No. 7, pp. 2467-2471.

Environmental Protection Agency (EPA). Available from: http://www2.epa.gov/aboutepa.

Field, R., H. Masters, and M. Singer, 1982, "An overview of porous pavement research", *JAWRA Journal of the American Water Resources Association.* Vol. 18, No. 2, pp. 265-270.

Huang, B., H. Wu, X. Shu, and E.G. Burdette, 2010, "Laboratory evaluation of permeability and strength of polymermodified pervious concrete", *Construction and Building Materials.* Vol. 24, No. 5, pp. 818-823.

JIS R5201, 1997, "Physical Testing Methods for Cement", Japanese Industrial Standards.

Kendall, K., A.J. Howard, J.D. Birchall, P.L. Pratt, B.A. Proctor, and S.A. Jefferis, 1983, "The relation between porosity, microstructure and strength, and the approach to advanced cement-based materials [and discussion]", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences.* Vol. 310, No. 1511, pp. 139-153.

Khedari, J., B. Suttisonk, N. Pratinthong, and J. Hirunlabh, 2001, "New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity", *Cement and Concrete Composites.* Vol. 23, No. 1, pp. 65-70.

Kim, H.K. and H.K. Lee, 2010, "Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete", *Applied Acoustics*. Vol. 71, No. 7, pp. 607-615.

Lian, C., Y. Zhuge, and S. Beecham, 2011, "The relationship between porosity and strength for porous concrete", *Construction and Building Materials*. Vol. 25, No. 11, pp. 4294-4298.

Low, K., D. Harz, and N. Neithalath, 2008, "Statistical characterization of the pore structure of enhanced porosity concrete." in *Proceedings in CD of the 2008 Concrete Technology Forum,* Denver: National Ready Mix Concrete Association.

Mahboub, K.C., J. Canler, R. Rathbone, T. Robl, and B. Davis2, 2009, "Pervious Concrete: Compaction and Aggregate Gradation", *ACI Materials Journal.* Vol. 106, No.6, pp. 523-528.

Montes, F. and L. Haselbach, 2006, "Measuring hydraulic conductivity in pervious concrete", *Environmental Engineering Science.* Vol. 23, No. 6, pp. 960-969.

Narayanan, N. and K. Ramamurthy, 2000, "Structure and properties of aerated concrete: a review", *Cement and Concrete Composites.* Vol. 22, No. 5, pp. 321-329.

Neithalath, N., 2004, "Development and characterization of acoustically efficient cementitious materials", in Purdue University: West Lafayette, Indiana.

Neithalath, N., M.S. Sumanasooriya, and O. Deo, 2010, "Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction", *Materials Characterization.* Vol. 61, No. 8, pp. 802-813.

Park, S.-B. and M. Tia, 2004, "An experimental study on the water-purification properties of porous concrete", *Cement and Concrete Research.* Vol. 34, No. 2, pp. 177-184.

Park, S.B., D.S. Seo, and J. Lee, 2005, "Studies on the sound absorption characteristics of porous concrete based on the content of recycled aggregate and target void ratio", *Cement and Concrete Research.* Vol. 35, No. 9, pp. 1846-1854.

Ryshkewitch, E., 1953, "Compression strength of porous sintered alumina and zirconia", *Journal of the American Ceramic Society.* Vol. 36, No. 2, pp. 65-68.

Sata, V., A. Wongsa, and P. Chindaprasirt, 2013, "Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates", *Construction and Building Materials*. Vol. 42, No. 5, pp. 33-39.

Scholz, M. and P. Grabowiecki, 2007, "Review of permeable pavement systems", *Building and Environment.* Vol. 42, No. 11, pp. 3830-3836.

Sengul, O., S. Azizi, F. Karaosmanoglu, and M.A. Tasdemir, 2011, "Effect of expanded perlite on

the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete", *Energy and Buildings.* Vol. 43, No. 2–3, pp. 671-676.

Sumanasooriya, M.S. and N. Neithalath, 2011, "Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction", *Cement and Concrete Composites.* Vol. 33, No. 8, pp. 778-787.

Tho-in, T., V. Sata, P. Chindaprasirt, and C. Jaturapitakkul, 2012, "Pervious high-calcium fly ash geopolymer concrete", *Construction and Building Materials.* Vol. 30, No. 5, pp. 366-371.

Ünal, O., T. Uygunoğlu, and A. Yildiz, 2007, "Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation", *Building and Environment.* Vol. 42, No. 2, pp. 584-590.

Uysal, H., R. Demirboğa, R. Şahin, and R. Gül, 2004, "The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete", *Cement and Concrete Research.* Vol. 34, No. 5, pp. 845-848.

Wang, K., V.R. Schaefer, J.T. Kevern, and M.T. Suleiman, 2006, "Development of mix proportion for functional and durable pervious concrete." in *Proceedings in CD of the 2006 Concrete Technology Forum.* Nashville: National Ready Mix Concrete Association.

Wong, J.M., F.P. Glasser, and M.S. Imbabi, 2007, "Evaluation of thermal conductivity in air permeable concrete for dynamic breathing wall construction", *Cement and Concrete Composites.* Vol. 29, No. 9, pp. 647-655.

Yang, J. and G. Jiang, 2003, "Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials", *Cement and Concrete Research.* Vol. 33, No. 3, pp. 381-386.

Zaetang, Y., A. Wongsa, V. Sata, and P. Chindaprasirt, 2013, "Use of lightweight aggregates in pervious concrete", *Construction and Building Materials.* Vol. 48, No.11, pp. 585-591.

Abstract **Pervious concrete Technology**

Parinya Chindaprasirt
Associate Fellow of the Academy of Science, The Royal Institute, Thailand
Yuwadee Zaetang
Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Science and Engineering, Kasetsart University, Chalermphrakiat Sakon Nakhon Province Campus

Pervious concrete is a special type of concrete designed to contain voids in the concrete matrix in which air and water are allowed to pass through. This concrete is used in the construction of permeable sidewalk, parking lot and roadway in order to reduce storm water runoff and increase the efficiency under raining condition. In addition, pervious concrete can be used as materials for water purifying, acoustic and thermal insulation, and artificial fishing reef. Pervious concrete is, therefore, classified as an environmentally friendly concrete. For Thailand, however, there is still limited amount of research, body of knowledge and utilization of pervious concrete. This article aims to provide knowledge of basic properties of pervious concrete from past researches and other informations. The history, mix design and proportioning, utilization and testing of various properties of pervious concrete are included.

Keywords: pervious concrete, voids, aggregate, cement paste

วารสารราชบัณฑิตยสถาน
ปีที่ ๓๙ ฉบับที่ ๒ เม.ย.-มิ.ย. ๒๕๕๗

ส้วมยุคใหม่และประเด็นด้านเทคโนโลยี สุขภาพ และสิ่งแวดล้อม*

จงรักษ์ ผลประเสริฐ
ภาคีสมาชิก สำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาทิตยา ภานุวัฒน์วนิชย์
สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย
ณวัชร สุรินทร์กุล
สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย
ธรรมรัตน์ คุตตะเทพ
สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

บทคัดย่อ

ปัจจุบัน ประชากรในประเทศกำลังพัฒนากว่า ๒๐,๐๐๐ ล้านคน นอกจากจะไม่มีส้วมที่ถูกสุขลักษณะใช้ในการขับถ่ายแล้ว ยังคงใช้งานระบบบำบัดของเสียจากการขับถ่ายที่ไม่ถูกหลักสุขาภิบาล เนื่องจากส่วนใหญ่ยังคงใช้บ่อเกรอะ (**septic tank**) ที่ไม่ได้ป้องกันการกันซึมหรือใช้ถังซึม (**cesspool**) ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำในการบำบัดมลสารและไม่สามารถฆ่าเชื้อโรคที่ปนเปื้อนอยู่ในของเสียดังกล่าวได้ ของเสียที่ถูกกักอยู่ในระบบเหล่านี้ หรือที่เรียกว่า “สิ่งปฏิกูล” จะไหลต่อไปในแหล่งน้ำใกล้เคียง ทำให้เกิดการปนเปื้อนในแม่น้ำลำคลองและน้ำใต้ดิน เพราะในสิ่งปฏิกูลจะมีเชื้อโรคอยู่หลากหลายประเภท ได้แก่ แบคทีเรีย ไวรัส โพรโทซัว และไข่พยาธิ เชื้อโรคเหล่านี้ยังเป็นสาเหตุสำคัญของปัญหาสุขภาพอนามัยของประชาชน จากสถิติด้านสาธารณสุขระบุว่า โรคท้องร่วงที่เกิดขึ้นทั่วโลกเกือบร้อยละ ๙๐ มีสาเหตุมาจากปัญหาส้วมที่ไม่ถูกสุขลักษณะ น้ำอุปโภคบริโภคที่ไม่สะอาด ประชากรในประเทศกำลังพัฒนาเสียชีวิตจากเชื้อโรคที่มาจากสิ่งปฏิกูลประมาณ ๑๗ ล้านคนต่อปี ประกอบกับประชากรในประเทศกำลังพัฒนายังคงเพิ่มจำนวนมากขึ้น ปัญหาสุขภาพและมลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการไม่มีส้วมที่ถูกสุขลักษณะและระบบการบำบัดที่มีประสิทธิภาพต่ำ รวมถึงการรวบรวมสิ่งปฏิกูลซึ่งมีความเข้มข้นของมลสารสูงและมีเชื้อโรคสะสมในปริมาณมาก ๆ และไม่มีระบบบำบัดที่เหมาะสม ก็จะทำให้ปัญหาทวีความรุนแรงขึ้นเรื่อย ๆ เหมือนกับปัญหาภัยพิบัติอื่น ๆ ที่มนุษย์

*ปรับปรุงจากการบรรยายในการประชุมสำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน เมื่อวันที่ ๑๙ มิถุนายน พ.ศ. ๒๕๕๖

สร้างขึ้น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการพัฒนาเศรษฐกิจ การท่องเที่ยว และความมั่นคงของประเทศและภูมิภาคในวงกว้าง จากปัญหาดังกล่าว โครงการพัฒนานวัตกรรมส้วมยุคใหม่ที่มีเป้าหมายในการกำจัดเชื้อโรคและกลิ่นในสิ่งปฏิกูล รวมทั้งสามารถใช้ประโยชน์จากธาตุอาหารในสิ่งปฏิกูล เช่น การผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ผลิตไฟฟ้า หรือถ่านอินทรีย์เพื่อการเกษตรกรรม ตัวอย่างนวัตกรรมส้วมยุคใหม่ที่กำลังพัฒนาคือ ส้วมผลิตไฟฟ้า ส้วมไมโครเวฟ และส้วมพลังแสงอาทิตย์ เป็นต้น

คำสำคัญ **: ส้วมยุคใหม่, บ่อเกรอะ, การสุขาภิบาล**

บทนำ

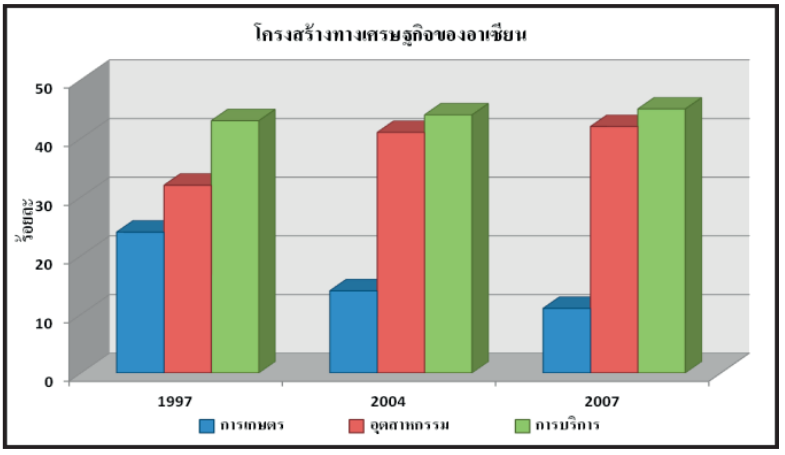
ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ส่งผลให้ประเทศสมาชิกของสมาคมประชาชาติเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (อาเซียน) เผชิญกับปัญหาในการดูแลสภาพสิ่งแวดล้อม ควบคู่กับการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ ความก้าวหน้าทางสังคม และการพัฒนาทางวัฒนธรรม อย่างไรก็ตาม ยังคงเป็นความท้าทายครั้งใหญ่ในการดูแลให้ครอบคลุมด้านการสุขาภิบาลที่ดีในเอเชียและแปซิฟิก หนึ่งในเป้าหมายของการพัฒนาที่ยั่งยืนที่จะลดสัดส่วนของประชากรครึ่งหนึ่งที่ยังไม่สามารถเข้าถึงหลักสุขาภิบาลที่ถูกต้องภายใน พ.ศ. ๒๕๕๘ ปัจจุบันยังคงพบว่าประชากรประมาณ ๑.๗๔ พันล้านคนในเอเชียและแปซิฟิกดำเนินชีวิตโดยไม่ถูกหลักสุขาภิบาล ขณะที่มากกว่า ๗๙๒ ล้านคนยังคงไม่ตระหนักถึงความสำคัญของเรื่องนี้

สถานการณ์ปัญหาด้านสุขาภิบาลดังกล่าวยังเป็นสาเหตุของการเกิดโรคและเสียชีวิต ปัญหามลพิษจากแหล่งน้ำ ปัญหาความเสื่อมโทรมของสภาพแวดล้อม และสูญเสียประโยชน์จากการใช้อุจจาระสำหรับการผลิตพลังงาน หรือปุ๋ย โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มของเด็ก ผู้หญิง และผู้สูงอายุ มีความเสี่ยงที่จะได้รับผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของพวกเขา โรคท้องร่วงมีสาเหตุหลักมาจากการได้รับเชื้อก่อโรคในน้ำ โดยที่ร้อยละ ๘๘ ของโรคท้องร่วงจากทั่วโลกเกิดจากการขาดน้ำสะอาดและการสุขาภิบาลที่ดี จากสถิติพบว่ามากกว่า ๘๐๐ คนจาก ๑๐,๐๐๐ คน กำลังเผชิญกับปัญหาโรคท้องร่วงอย่างรุนแรง เนื่องจากปัญหาด้านการสุขาภิบาล การขาดน้ำอุปโภคบริโภคที่สะอาด และสุขอนามัยที่ดี

๑. สถานการณ์ในปัจจุบัน

อัตราการเจริญเติบโตที่เพิ่มขึ้นทางเศรษฐกิจส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มวลรวมประชาชาติต่อหัวประชากรในภูมิภาคเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การเติบโตทางเศรษฐกิจและการพัฒนาเป็นกุญแจสำคัญในการมีคุณภาพชีวิตที่ดี โดยสามารถนำไปสู่การพัฒนาทางด้านสุขภาพและการศึกษา เพื่อเพิ่มมาตรฐานการดำรงชีวิตที่ดีของประชากรและการลดลงของเด็กที่ขาดสารอาหาร ดังแสดงในรูปที่ ๑ ผลิตภัณฑ์มวลรวมประชาชาติต่อหัวประชากรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่ พ.ศ. ๒๕๔๔ ดังนั้น การเติบโตทางเศรษฐกิจเป็น

ประโยชน์อย่างมากแก่โครงสร้างทางเศรษฐกิจของภูมิภาค ซึ่งประกอบด้วย ส่วนหลัก ๓ ส่วน คือ ภาคการเกษตร ภาคอุตสาหกรรม และการบริการ แผนภูมินี้นำเสนอให้เห็นว่า ใน พ.ศ. ๒๕๕๐ ภาคการเกษตรมีแนวโน้มลดลงร้อยละ ๑๐.๙ สวนทางกับภาคอุตสาหกรรมและการบริการ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ ๔๑.๘ และร้อยละ ๔๗.๔ ตามลำดับใน พ.ศ. ๒๕๕๐ ภาคอุตสาหกรรมและการบริการเป็นส่วนที่ส่งผลดีต่อด้านเศรษฐกิจของภูมิภาคและผลิตภัณฑ์มวลรวมประชาชาติต่อหัวประชากร แต่ส่งผลกระทบในด้านความยั่งยืนของสิ่งแวดล้อม เช่น คุณภาพน้ำ ปัญหาทางด้านมลพิษ



รูปที่ ๑ ภาวะทางเศรษฐกิจและโครงสร้างทางเศรษฐกิจของภูมิภาคอาเซียน
ที่มา : Second and Fourth ASEAN State of the Environment Report (๒๕๔๔, ๒๕๕๒, ๒๕๕๕)

ขณะที่ภาคอุตสาหกรรมและการบริการในด้านโครงสร้างทางเศรษฐกิจมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ เห็นได้จากความเป็นมลพิษในแม่น้ำลำคลอง ผลจากสถานี ๑,๗๖๔ แห่งซึ่งตรวจสอบคุณภาพน้ำทั่วทั้งภูมิภาคอาเซียน พบว่า แม่น้ำส่วนใหญ่มีคุณภาพน้ำลดลง เนื่องจากการขยายตัวของเมืองและอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ ๑ นอกจากนี้มลพิษของแม่น้ำส่วนใหญ่พบอยู่ในเขตท่าเรือและนิคมอุตสาหกรรม

ตารางที่ ๑ สถานการณ์คุณภาพน้ำในประเทศอาเซียน

ประเทศสมาชิกอาเซียน	สถานการณ์คุณภาพน้ำ
ประเทศอินโดนีเซีย (พ.ศ. ๒๕๕๑)	แม่น้ำ ๓๓ สายเกิดปัญหามลพิษอย่างรุนแรงคิดเป็นร้อยละ ๔๘
ประเทศฟิลิปปินส์ (พ.ศ. ๒๕๕๑)	แม่น้ำที่มีค่าบีโอดี เกินค่าที่กำหนดไว้คิดเป็นร้อยละ ๑๔-๒๘
ประเทศไทย (พ.ศ. ๒๕๕๑)	แม่น้ำที่มีคุณภาพต่ำใน พ.ศ. ๒๕๕๐ คิดเป็นร้อยละ ๔๘ เพิ่มขึ้นจาก พ.ศ. ๒๕๔๘ มีร้อยละ ๒๙
ประเทศเวียดนาม (พ.ศ. ๒๕๓๙-พ.ศ. ๒๕๔๔)	แม่น้ำที่มีค่าบีโอดี เกินค่ามาตรฐาน ๒-๓.๘ เท่า

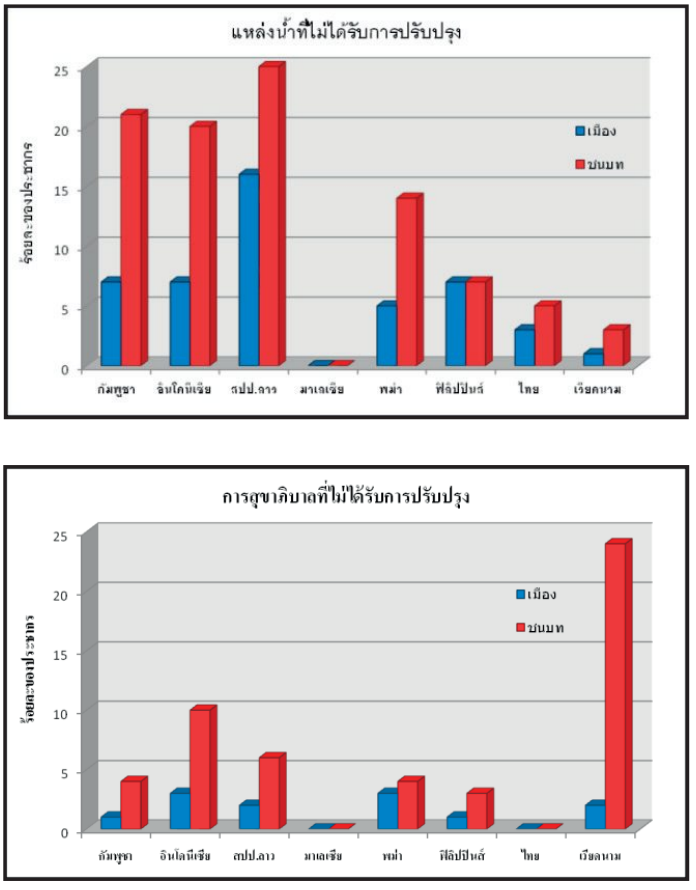
ที่มา : ADB (๒๕๕๐) WHO (๒๕๕๓) และ Fourth ASEAN State of the Environment Report (๒๕๕๒)

๑.๑ สุขภาพและการสุขาภิบาล

นอกจากภาวะความกดดันที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเติบโตอย่างรวดเร็วของประชากร ในปัจจุบันประชากรในชนบทและเมืองของกลุ่มประเทศอาเซียนยังไม่สมดุล โดยมีแนวโน้มการขยายตัวของเมือง ประเทศบรูไนและสิงคโปร์เป็น ๒ ประเทศที่มีที่ดินจำกัด ทำให้ทั้งประเทศเกิดเป็นชุมชนเมือง โดยที่ประชากรทั้งหมดได้รับการสุขาภิบาลและแหล่งน้ำที่ดี ซึ่งตรงกันข้ามกับประเทศอื่น ๆ ในอาเซียน ที่มีอัตราการขยายตัวของเมืองสูง ไม่เพียงพอที่จะได้รับการปรับปรุงด้านสุขาภิบาลและแหล่งน้ำ รูปที่ ๒ แสดงให้เห็นถึงความไม่เพียงพอของการได้รับการสุขาภิบาลที่ดีของประชากรในชนบทและเมืองของแต่ละประเทศ พบว่าข้อปฏิบัติสุขอนามัยขั้นพื้นฐานส่วนบุคคล เช่น การล้างมือ ยังด้อยอยู่ในประเทศที่ด้อยพัฒนาของภูมิภาคอาเซียน ความแตกต่างระหว่างพื้นที่ชนบทกับเมืองในด้านการสุขาภิบาลและแหล่งน้ำ ส่งผลให้พื้นที่ชนบทยังคงมีสัดส่วนของประชากรที่ยังไม่ได้รับการสุขาภิบาลและแหล่งน้ำที่ดีพอ ถึงแม้ว่าพื้นที่เขตเมืองจะได้รับการบริการที่ดีกว่าพื้นที่ชนบท แต่ก็ยังต้องพัฒนาเพื่อให้ทันกับการเจริญเติบโตของประชากรที่เพิ่ม

สูงขึ้น ตัวอย่างเช่น ชุมชนเมืองของประเทศพม่าคิดเป็นร้อยละ ๗๐ แต่ประมาณร้อยละ ๕ ของประชากรในเมืองยังขาดทรัพยากรแหล่งน้ำ นอกจากนี้การศึกษาผลกระทบด้านสุขาภิบาลพบว่าประเทศกัมพูชา อินโดนีเซีย และสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว ได้รับการสุขาภิบาลและแหล่งน้ำสะอาดไม่เพียงพอ

ถึงแม้ว่าประเทศไทย มาเลเซีย และฟิลิปปินส์ จะมีสถิติที่บ่งชี้ว่า ประชากรสามารถเข้าถึงการสุขาภิบาลที่ดีขึ้นโดยพิจารณาจากจำนวนส้วมต่อประชากร อย่างเช่นประชากรประเทศไทยมีส้วมกว่าร้อยละ ๙๕ แต่การจัดการสิ่งปฏิกูลจากส้วมอย่างถูกหลักสุขาภิบาลยังมีอยู่น้อยมาก ไม่ว่าจะเป็นชุมชนเมืองหรือชนบท



รูปที่ ๒ ความไม่เพียงพอของการสุขาภิบาลที่ดีสำหรับประชากรในชนบทและเมืองของแต่ละประเทศในอาเซียน

ที่มา : WHO (๒๕๕๖)

ความไม่ถูกหลักสุขาภิบาล ได้นำไปสู่การเกิดโรคและการเสียชีวิต ปัญหามลพิษจากแหล่งน้ำ การสูญเสียเวลา ปัญหาความเสื่อมโทรมของสภาพแวดล้อม และการสูญเสียประโยชน์จากการใช้อุจจาระสำหรับการผลิตพลังงาน หรือปุ๋ย โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มของเด็ก ผู้หญิง และผู้สูงอายุ มีความเสี่ยงที่จะได้รับผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของพวกเขา จากการศึกษาในหลายประเทศพบว่า ความไม่ถูกหลักสุขาภิบาลเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเจ็บป่วยและการเสียชีวิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มเด็ก ตารางที่ ๒ แสดงการเกิดโรคและเสียชีวิตที่เกิดจากความไม่ถูกหลักสุขาภิบาล พบว่ามากกว่า ๑๔๐ ล้านกรณีศึกษาเกิดจากโรคท้องร่วง ประเทศอินโดนีเซียพบมากกว่าร้อยละ ๖๐ ตามด้วยประเทศฟิลิปปินส์ที่มีมากกว่าร้อยละ ๒๕ ในประเทศอินโดนีเซียยังพบการเกิดโรคพยาธิมากกว่าหนึ่งล้านคน และอีก ๒๘ ล้านคนเป็นหิด ถึงแม้จะมีความไม่แน่นอนที่เกี่ยวข้องกับอัตราที่แท้จริงของการเกิดโรคเหล่านี้ โรคริดสีดวงตายังเป็นโรคสำคัญในประเทศเวียดนามและอินโดนีเซีย สำหรับประเทศฟิลิปปินส์พบว่าประมาณสองในสามเป็นโรคท้องร่วงชนิดไม่รุนแรงและโรคบิด จากการศึกษาในเด็กอายุต่ำกว่า ๕ ปี ในประเทศกัมพูชาพบว่า ร้อยละ ๙๐ ของเด็กอายุต่ำกว่า ๕ ปีเสียชีวิตจากโรคท้องร่วง ผลที่ตามมาในประเทศกัมพูชา อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ และเวียดนาม ได้ประมาณการสูญเสียจากการไม่ถูกหลักสุขาภิบาลไว้ประมาณ ๙ ล้านเหรียญสหรัฐ การสุขาภิบาลที่ไม่ถูกหลักมีส่วนสำคัญในการเพิ่มมลพิษทางน้ำ และเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายสำหรับน้ำสะอาดที่ใช้ในครัวเรือน ทำให้จำนวนปลาในแม่น้ำและทะเลสาบลดลง เกิดการสูญเสียมูลค่าทางเศรษฐกิจจากการสุขาภิบาลที่ไม่ดีมากกว่า ๒.๓ พันล้านเหรียญสหรัฐต่อปี แบ่งเป็น ๑.๕ พันล้านเหรียญสหรัฐในประเทศอินโดนีเซีย, ๓๒๐ ล้านเหรียญสหรัฐในประเทศฟิลิปปินส์, ๒๙๐ ล้านเหรียญสหรัฐในประเทศเวียดนาม และ ๑๕๐ ล้านเหรียญสหรัฐในประเทศกัมพูชา นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดการสูญเสียด้านสิ่งแวดล้อมจากการขาดทุนที่ดินถึง ๒๒๐ ล้านเหรียญสหรัฐในประเทศอินโดนีเซียและเวียดนาม รวมถึง ๑.๓ พันเหรียญสหรัฐด้านสวัสดิการอื่น ๆ และ ๓๕๐ ล้านเหรียญสหรัฐด้านการท่องเที่ยว

ตารางที่ ๒ อัตราการเสียชีวิตที่เกิดจากความไม่ถูกหลักสุขาภิบาล

อัตราการเสียชีวิต	กัมพูชา	อินโดนีเซีย	ฟิลิปปินส์	เวียดนาม
โรคท้องร่วงในเด็กอายุต่ำกว่า ๕ ปี	๕,๘๐๘	๒๐,๕๙๒	๑๐,๔๗๑	๔,๑๓๖
โรคท้องร่วงในเด็กอายุตั้งแต่ ๕ ปีขึ้นไป	๖๔๓	๒,๒๘๘	๒,๙๕๕	๔๔๐
สุขาภิบาล				
ร้อยละการปรับปรุงในชนบท	๑๖	๔๐	๕๙	๕๐
ร้อยละการปรับปรุงในเมือง	๕๖	๗๓	๘๐	๙๒
ร้อยละการได้รับการบำบัดท่อน้ำทิ้งในเมือง	๒๙	๒	๓	๑๔

ที่มา : WSP (๒๕๕๑)

กรณีศึกษาที่ชุมชนคลองหลวง จังหวัดปทุมธานีของประเทศไทย พบการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคจากผักที่ล้างด้วยน้ำคลอง ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อผู้บริโภค แหล่งมลพิษจากแม่น้ำลำคลองส่วนใหญ่เกิดจากน้ำที่ซึมจากบ่อเกรอะ

ในปัจจุบันถังซึมได้รับความนิยมทั่วไปในทุกพื้นที่ ยกเว้นพื้นที่เมืองใหม่ ในขณะที่ได้รับความนิยมทุกพื้นที่ในชนบท ครัวเรือนนิยมใช้ถังซึม ซึ่งอาจจะเป็นแบบ ๒ ถังหรือ ๑ ถังถึงร้อยละ ๘๖.๓ ในขณะที่บ่อเกรอะและถังบำบัดน้ำเสียสำเร็จรูป คิดเป็นร้อยละ ๑๐ และร้อยละ ๕ ตามลำดับ ดังนั้น น้ำซึมจากถังซึมซึ่งมีการปนเปื้อนของสิ่งปฏิกูลจะแทรกซึมโดยตรงบริเวณดินรอบ ๆ และบริเวณที่น้ำไหลผ่าน

๑.๒ ระบบการบำบัดน้ำเสียจากครัวเรือน (Decentralized wastewater treatment type or DEWAT)

ในปัจจุบัน ระบบบำบัดน้ำเสียจากครัวเรือน (DEWAT) ส่วนใหญ่ทั้งในเขตเมืองและชนบทเป็นแบบถังซึม ระบบถังซึมนี้ประกอบด้วยแบบ ๑ บ่อและ ๒ บ่อ นิยมใช้ประมาณร้อยละ ๘๖.๓ ของครัวเรือนที่สำรวจ ในขณะที่บ่อเกรอะและถังบำบัดน้ำเสียสำเร็จรูปคิดเป็นร้อยละ ๑๐ และร้อยละ ๕ ตามลำดับ *(Dulyakasem et al., 2013)* ดังนั้น น้ำซึมจากถังซึมซึ่งมีการปนเปื้อนของสิ่งปฏิกูลจะแทรกซึมโดยตรงบริเวณดินรอบ ๆ และบริเวณที่น้ำไหลผ่าน

ระบบบำบัดน้ำเสียจากครัวเรือนที่ใช้ส่วนใหญ่ในประเทศไทยคือ ๑) ถังซึมแบบ ๑ บ่อ ๒) ถังซึมแบบ ๒ บ่อ ๓) บ่อเกรอะ และ ๔) ถังบำบัดน้ำเสียสำเร็จรูป มีการวิเคราะห์ลักษณะของตัวอย่างที่มาจากระบบบำบัดน้ำเสียจากครัวเรือน ตารางที่ ๓ แสดงผลจากการวิเคราะห์ค่าของแข็งทั้งหมด ค่าบีโอดี ไนโตรเจนทั้งหมด และฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำทิ้งจากแต่ละระบบ โดยพบว่าถังซึมแบบ ๑ บ่อและ ๒ บ่อ มีค่าเหล่านี้สูงกว่าเมื่อเทียบกับถังบำบัดน้ำเสียสำเร็จรูป

ตารางที่ ๓ ผลจากการวิเคราะห์ค่าของแข็งทั้งหมด ค่าบีโอดี ไนโตรเจนทั้งหมด และฟอสเฟตทั้งหมดของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียจากครัวเรือนแต่ละระบบ (หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร)

ชนิดของระบบบำบัดน้ำเสียจากครัวเรือน	ของแข็งทั้งหมด		ค่าบีโอดี		ไนโตรเจนทั้งหมด		ฟอสเฟตทั้งหมด	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
ถังซึมแบบ ๑ บ่อ	๑,๐๒๐-๒,๓๖๐	๙๐๐-๔,๒๕๐	๘๙๐-๑๐,๑๒๐	๑๕-๗๐	๑๗๐-๑,๖๒๐	๕๐-๒๗๐	๓๐-๓๕๐	-
ถังซึมแบบ ๒ บ่อ	๒,๔๒๐-๑๖,๘๖๐	๙๖๐-๑,๔๕๐	๙๒๐-๗,๖๑๐	๑๐-๓๐	๒๐๐-๑,๑๑๐	๔๐-๑๐๐	๗๐-๒๔๐	๒-๔
บ่อเกรอะ	๑๐,๐๙๐	๑,๓๐๐	๔,๙๕๐	๗๐	๑,๑๐๐	๑๘๐	๑๗๐	๖
ถังบำบัดน้ำเสียสำเร็จรูป	๖๔๐-๔,๕๑๐	๖๘๐-๑,๖๘๐	๒๓-๘๔๐	๓๐-๒๔๐	๕๐-๓๘๐	๖๐-๓๙๐	๖๐-๓๔๐	๖-๒๒๐

ผลการวิเคราะห์จากตารางที่ ๔ พบว่าปริมาณเชื้อโคลิฟอร์มทั้งหมด เชื้อโคลิฟอร์มในอุจจาระและเชื้ออี. โคไลจำนวนมากในถังซึมแบบ ๑ บ่อ ถังซึมแบบ ๒ บ่อ ส่วนถังบำบัดน้ำเสียสำเร็จรูปมีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ไม่ต่างกันของระบบน้ำเข้าและระบบน้ำทิ้ง ในทำนองเดียวกัน ปริมาณเชื้อก่อโรคในระบบน้ำทิ้งไม่ได้มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากชุดของถังมีประสิทธิภาพต่ำ จึงพบว่าปริมาณของเชื้อแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดในระบบน้ำทิ้งสูงกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำแหล่งน้ำผิวดิน โดยที่แบคทีเรียโคลิฟอร์มในอุจจาระหรือเชื้ออี. โคไลบ่งชี้การปนเปื้อนของน้ำและขยะสิ่งปฏิกูลที่เป็นอันตรายหรือก่อให้เกิดโรคในสิ่งมีชีวิต

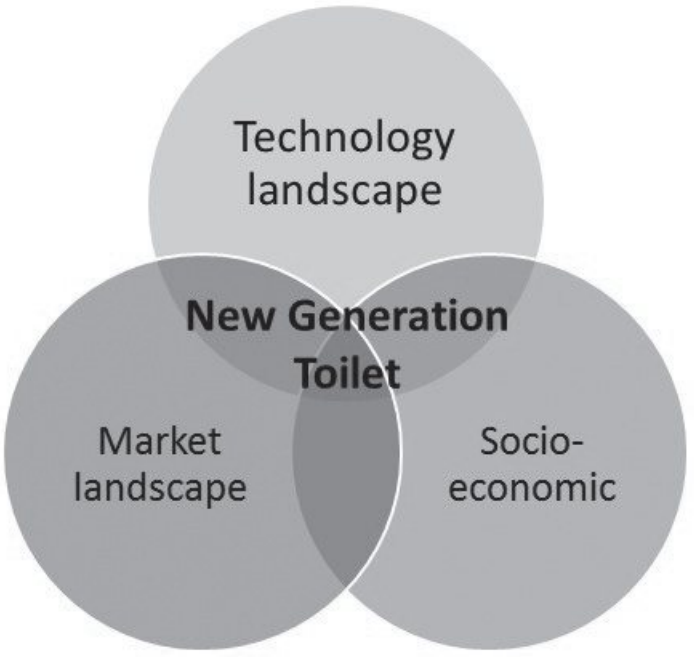
ตารางที่ ๔ ปริมาณเชื้อโคลิฟอร์มทั้งหมด เชื้อโคลิฟอร์มในอุจจาระและเชื้ออี. โคไลของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียจากครัวเรือนแต่ละระบบ (หน่วยเป็นเอ็มพีเอ็นต่อ ๑๐๐ มิลลิลิตร)

ชนิดของระบบบำบัดน้ำเสียจากครัวเรือน	เชื้อโคลิฟอร์มทั้งหมด		เชื้อโคลิฟอร์มในอุจจาระ		เชื้ออี. โคไล	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
ถังซึมแบบ ๑ บ่อ	๕.๔๒ × ๑๐^{๕}- ๘.๙๖ × ๑๐^{๑๐}	๓.๕ × ๑๐^{๓}- ๑.๒๑ × ๑๐^{๗}	๒.๕๕ × ๑๐^{๕}- ๗.๐๙ × ๑๐^{๑๐}	๑.๗ × ๑๐^{๓}- ๕.๕๐ × ๑๐^{๖}	๕.๔๕ × ๑๐^{๔}- ๕.๔๕ × ๑๐^{๑๐}	๑๔๐-๓.๕ × ๑๐^{๖}
ถังซึมแบบ ๒ บ่อ	๖.๙๔ × ๑๐^{๖}- ๑.๖๐ × ๑๐^{๑๐}	๒.๘ × ๑๐^{๔}- ๓.๙ × ๑๐^{๕}	๓.๙๙ × ๑๐^{๖}- ๙.๐๒ × ๑๐^{๙}	๑.๔ × ๑๐^{๔}- ๒.๔ × ๑๐^{๕}	๒.๓๘ × ๑๐^{๖}- ๗.๕๕ × ๑๐^{๘}	๒๖-๑.๐ × ๑๐^{๕}
บ่อเกรอะ	๒.๕ × ๑๐^{๘}	๒.๒ × ๑๐^{๖}	๑.๗ × ๑๐^{๘}	๑.๗ × ๑๐^{๗}	๑.๑ × ๑๐^{๗}	๒.๖ × ๑๐^{๕}
ถังบำบัดน้ำเสียสำเร็จรูป	๒.๒๑ × ๑๐^{๕}- ๙.๒๐ × ๑๐^{๘}	๙.๙๓ × ๑๐^{๔}- ๕.๔ × ๑๐^{๘}	๑.๔๗ × ๑๐^{๕}- ๓.๕ × ๑๐^{๘}	๖.๐๘ × ๑๐^{๔}- ๒.๔๐ × ๑๐^{๘}	๖.๕๔ × ๑๐^{๔}- ๑.๓๐ × ๑๐^{๘}	๓.๓๙ × ๑๐^{๔}- ๑.๓๐ × ๑๐^{๘}

ระบบถังซึมที่ใช้ในปัจจุบันทำงานได้ไม่ดีเนื่องจากอายุการใช้งานสั้น ขาดการออกแบบที่ดี และระบบการก่อสร้างที่เกิดการรั่วไหลมากเกินไป น้ำท่วม และได้รับการบำรุงรักษาไม่ดี แม้จะมีหลายรัฐบาลในเอเชียลงทุนหลายพันล้านเหรียญสหรัฐเพื่อพัฒนาระบบบำบัดท่อน้ำทิ้งส่วนกลาง ก็ยังพบว่ามีประสิทธิภาพเพียงน้ำสำหรับรดน้ำต้นไม้ เนื่องจากเสียค่าใช้จ่ายสูงในการดำเนินงาน การบำรุงรักษา และไม่คุ้มค่าการใช้จ่าย ดังนั้น จึงมีความจำเป็นสำหรับการพัฒนาส้วมยุคใหม่ที่มีระบบบำบัดน้ำเสียจากครัวเรือนที่ไม่ใช้ท่อระบายน้ำ ซึ่งสามารถแก้ปัญหาด้านสุขอนามัยและลดความเสี่ยงต่อสุขภาพ

๒. แนวทางดำเนินการ

วิธีการเกี่ยวกับการพัฒนาของนวัตกรรมส้วมยุคใหม่คือการรวบรวมข้อมูลในเชิงการตลาด เริ่มต้นจากการวิเคราะห์ความต้องการของตลาดของระบบการจัดการน้ำเสียที่มีอยู่ในปัจจุบันและความต้องการของผู้ใช้ การศึกษาภูมิทัศน์ในการระบุความรู้ที่มีอยู่ ความรู้ใหม่และเทคโนโลยีที่เหนือกว่า ดังแสดงในรูปที่ ๓ ความสัมพันธ์ของปัจจัยการตลาดเป็นตัวขับเคลื่อนที่สำคัญ ทบทวนเทคโนโลยีที่เน้นระบบใหม่ที่มีศักยภาพเพื่อแก้ไขปัญหาของฐานข้อมูลเกี่ยวกับประเภทของส้วม ระบบบำบัดน้ำเสียจากครัวเรือน และข้อมูลอื่น ๆ ทางเศรษฐกิจและสังคมที่เข้าใจในความต้องการของผู้ใช้เป็นสำคัญ และความเข้าใจในการตลาดเริ่มต้น และสุดท้ายคือปัญหาหรือการชะลอตัวของเทคโนโลยีของการสุขาภิบาลในปัจจุบัน เพื่อกำหนดให้เป็นส่วนที่ชัดเจนทั้งเรื่องการพัฒนาใหม่ทั้งจากผู้ใช้และมุมมองทางเทคนิค



รูปที่ ๓ แนวทางดำเนินการส้วมยุคใหม่

โครงการพัฒนานวัตกรรมส้วมยุคใหม่มีเป้าหมายในการกำจัดเชื้อโรคและกลิ่นในสิ่งปฏิกูล รวมทั้งสามารถใช้ประโยชน์จากธาตุอาหารในสิ่งปฏิกูล เช่นการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง การผลิตไฟฟ้า หรือถ่านอินทรีย์เพื่อการเกษตรกรรม ตัวอย่างส้วมยุคใหม่ที่กำลังพัฒนาคือส้วมผลิตไฟฟ้า ส้วมไมโครเวฟ และส้วมพลังแสงอาทิตย์ ส้วมยุคใหม่เหล่านี้มีศักยภาพที่จะนำไปใช้ประโยชน์อย่างมากในชุมชนที่มีรายได้น้อย สิ่งที่สำคัญที่สุดคือการได้เข้าถึงสุขอนามัยที่ดี ในขณะเดียวกันได้รับพลังงานจากกากตะกอนอุจจาระโดยการผลิตแก๊สชีวภาพ และปุ๋ยที่นำมาใช้ในการเกษตรกรรมจะก่อให้เกิดประโยชน์กับชุมชนที่มีรายได้น้อย เป็นการลดความเสี่ยงต่อสุขภาพและการปรับปรุงสวัสดิการสังคมของคนที่มีรายได้น้อย โดยทางอ้อม วิธีนี้สามารถลดการลงทุนในการก่อสร้างท่อระบายน้ำและเพิ่มความปลอดภัยของอาหาร ดังนั้น จึงเอื้อต่อการแก้ไขและบรรเทาปัญหาความยากจน

๓. สรุป

ปัจจุบันส้วมที่ใช้ขับถ่ายในประเทศไทยและประเทศกำลังพัฒนามีระบบบำบัดของเสียแบบบ่อเกรอะหรือถังซึมซึ่งไม่ถูกหลักสุขาภิบาล และมีประสิทธิภาพในการบำบัดมวลสารต่ำ ทำให้มีการปนเปื้อนของเชื้อโรค และเกิดมลพิษต่อแหล่งน้ำและสิ่งแวดล้อม โครงการพัฒนาส้วมยุคใหม่มีเป้าหมายในการกำจัดเชื้อโรค กลิ่น และสารมลพิษในสิ่งปฏิกูล รวมทั้งสามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ไฟฟ้า และถ่านอินทรีย์ เพื่อการเกษตรกรรม ตัวอย่างนวัตกรรมส้วมยุคใหม่ ได้แก่ ส้วมผลิตไฟฟ้า ส้วมไมโครเวฟ และส้วมพลังแสงอาทิตย์ ซึ่งคาดว่ามีราคาเหมาะสมกับชุมชนส่วนใหญ่ และเป็นที่ยอมรับของประชาชนทั่วไป

เอกสารอ้างอิง

ADB, 2007, Asian Environment Outlook: Water Supply and Sanitation in Asia. Asian Development Bank, Manila, Philippines.

ASEAN, 2001, Second ASEAN State of the Environment Report, Indonesia. Association of Southeast Asian Nations, Jakarta, Indonesia.

ASEAN, 2009, Fourth ASEAN State of the Environment Report (Executive Summary). Association of Southeast Asian Nations, Jakarta, Indonesia.

ASEAN, 2009, Fourth ASEAN State of the Environment Report (Full Report). Association of Southeast Asian Nations, Jakarta, Indonesia.

Dulyakasem, S., Watanatanachart, J., Saentip, C., Aksornpin, P., Chaichai, P., Singhopon, T., Surinkul, N., and Koottatep, T., 2013, Determinations of blackwater characteristics and sludge accumulation rates in decentralized wastewater treatment systems (DEWATs) in Thailand. Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental Science, Engineering and Management. Khon Kaen, Thailand.

Surinkul, N., 2009, Integrated pathogen flow analysis (PFA) and quantitative microbial risk assessment (QMRA) for health and environmental sanitation planning. Doctoral dissertation, Asian Institute of Technology, Bangkok.

WHO, 2010, Progress on Sanitation and Drinking Water.

WHO, 2013, Progress on Sanitation and Drinking Water.

WSP, 2008, Economic Impacts of Sanitation in Southeast Asia: A four-country study conducted in Cambodia, Indonesia, the Philippines and Vietnam under the Economics of Sanitation Initiative (ESI). Water and Sanitation Program, South Asia.

Abstract

New Generation Toilet for Health and Environmental Improvement

Chongrak Polprasert
Associate Fellow of the Academy of Science, The Royal Institute, Thailand
Faculty of Engineering, Thammasat University
Atitaya Panuvatvanich
Asian Institute of Technology
Nawach surinkul
Asian Institute of Technology
Thammarat Kuttathep
Asian Institute of Technology

At present about 1.74 billion people in Asia and the Pacific continue to live without access to improved sanitation while more than 792 million people still suffer the indignity of practicing open defecation. This poor sanitation has caused adverse impacts leading to diseases and premature death, polluted water resources, time loss from daily activities, degraded environment, and lost opportunities for use of human excreta for energy or fertilizer production. Diarrheal diseases are caused mainly by the ingestion of pathogens in water or food. About 88% of all diarrhea cases worldwide have been attributed to lack of adequate access to water and sanitation. Most of septic and/or cesspool systems currently in use do not function well because of unknown lifespan, poor design and construction leading to the system leakage, overloading and flooding, and poor maintenance. Thus, there is a need for new generation toilets system, an approach towards decentralized or non-sewer sanitation which can solve the current sanitation problems and minimizing health risks. The novel approaches to the design of new generation toilets at an affordable cost which can produce biogas, electricity or biochar have potentials to bring benefits to the poor communities. It will result in ceasing of open defecation, thereby, reducing the health risks and bringing up the social welfare status of the poor. Indirectly, investment on sewer construction can be saved and increased food security for the poor could be achieved, thereby contributing to poverty alleviation.

Keywords: cesspool, septic tank, sanitation

วารสารราชบัณฑิตยสถาน
ปีที่ ๓๙ ฉบับที่ ๒ เม.ย.-มิ.ย. ๒๕๕๗

วันเดือนปีที่สุนทรภู่แต่งงานคำกลอนห้าเรื่อง ระหว่าง พ.ศ. ๒๓๘๔-๒๓๘๕

ทศพร วงศ์รัตน์
ราชบัณฑิต สำนักวิทยาศาสตร์
ราชบัณฑิตยสถาน

บทคัดย่อ

ด้วยข้อสันนิษฐานของผู้เขียน ว่างานทุกเรื่องของสุนทรภู่ เหมือนจะเป็นเรื่องเดียวกัน แต่งขึ้นจากประสบการณ์ชีวิตในแง่มุมต่าง ๆ ด้วยหลักฐานทั้งจากในและนอกเรื่อง ระหว่าง ๕ เรื่อง ที่นำมาศึกษารวมทั้งบางตอนจากเรื่องพระอภัยมณีคำกลอน ที่แต่งในระยะเวลาเดียวกัน ซึ่งตรงกับช่วงเกิดปัญหาใหญ่ กับเจ้าหญิงองค์หนึ่งในระหว่าง พ.ศ. ๒๓๘๔-๒๓๘๕ ทั้งหมดได้นำไปสู่การค้นพบวันเวลาของการแต่งแต่ละเรื่อง ในผลงานฉบับนี้ผู้เขียนได้เสนอขั้นตอนในการสืบค้นจนได้วัน เดือน ปี แต่งที่แน่นอน ของเรื่องกาพย์พระไชยสุริยา โคลงนิราศสุพรรณ รำพันพิลาป นิราศพระประธม และนิราศเมืองเพชร ตามลำดับ ซึ่งทั้งหมดเป็นการแต่งในเวลาและเนื้อหาเดียวกัน หรือต่อเนื่องกัน เหมือนเป็นเรื่องเดียวกัน

คำสำคัญ **: สุนทรภู่, งานคำกลอนสุนทรภู่, ปีที่แต่ง**

ต่อจากผลงานเรื่อง *“พระอภัยมณี... มาจากไหน?”* ที่เผยแพร่ใน พ.ศ. ๒๕๕๐ ผู้เขียนได้ทำการค้นคว้าต่อเป็นงานเรื่อง *“ลายแทงของสุนทรภู่”* ที่เผยแพร่ต่อมาในเดือนมิถุนายน พ.ศ. ๒๕๕๒ เพื่อแสดงหลักฐานและเหตุผลว่า *“ทุกเรื่องของสุนทรภู่จึงดูเหมือนเรื่องเดียวกัน ในด้านประวัติของตัวท่านเอง เพียงแต่เป็นคนละตอนเท่านั้น”* นอกจากนี้ก็ยังสามารถตอบคำถามได้ว่า *“นิราศภูเขาทอง”* *“นิราศอิเหนา”* และ *“นิราศเมืองเพชร”* ซึ่งล้วนเป็นสุดยอดคำกลอนนั้นแต่งขึ้นเมื่อใด และเมืองใน *“พระอภัยมณีคำกลอน”* มีอยู่ที่ไหนบ้าง

เพราะตามนิสัยของการแต่งเรื่องเป็นคำกลอนของสุนทรภู่ นอกจากเนื้อหาตามหัวข้อเรื่องแล้ว เขาจะสอดแทรกเรื่องของตัวเอง อารมณ์ ความคิดความหวัง ความรู้สึกว้าเหว่ผิดหวัง ทั้งอดีตและขณะนั้นลงไปด้วย เสน่ห์ของคำกลอนในทุกเรื่องมีอยู่ที่คำพังเพย คำเปรียบเทียบมากมาย เกี่ยวกับคนและธรรมชาติที่ล้วนกินใจ ประวัติและความคิดในแง่มุมต่าง ๆ นั้นดูเหมือนจะมีครบอยู่ทุกเรื่องตลอดชีวิตของสุนทรภู่ โดยมีกระจายอยู่ตั้งแต่ในเรื่องแรก (พ.ศ. ๒๓๔๙) จนถึงเรื่องสุดท้าย (พ.ศ. ๒๓๘๕) และยังมีที่ซ้ำแล้วซ้ำอีก

หรือขยายความกันอยู่ในงานชิ้นต่าง ๆ ซึ่งโดยมากเรียงตามลำดับของเหตุการณ์ ที่น่าสนใจอีกก็คือ ในทุกครั้งที่ผู้เขียนได้อ่านซ้ำ ก็มักจะได้รู้ถึงสิ่งที่ไม่เคยได้รู้จากสุนทรภู่อยู่เสมอ ซึ่งช่วยทำให้ได้ปรับความเข้าใจอย่างน้อยก็ทำให้เรื่องที่เคยรู้มาก่อนชัดเจนขึ้น หรืออ่านแล้วสนุกขึ้น เนื่องจากได้รู้เรื่องตามนัยจนสามารถเรียงเรื่องได้สมจริงมากขึ้น

ที่ผ่านมา เนื่องจากยังมีการปฏิเสธกันว่า งานหลายชิ้นไม่ใช่ของสุนทรภู่ ดังนั้น ด้วยความคิดเช่นนี้ข้อมูลสำคัญที่สุนทรภู่ตั้งใจสำทับ หรือบอกกล่าวเป็นลายแทงไว้มากมายในชิ้นงานเหล่านั้นจึงขาดไปพร้อม ๆ กับประวัติขณะนั้นเหมือนตัวต่อที่หายไป เช่นเดียวกับการวินิจฉัยปีแต่ง ซึ่งหากคลาดเคลื่อนหรือไม่มีโอกาสได้เอามาใช้ ก็จะก่อปัญหาได้ไม่ยิ่งหย่อนกว่ากัน ที่เรื่องเช่นนี้ยังดำเนินอยู่ เพราะงานที่สร้างปัญหาเหล่านั้น มากมายยังมีการพิมพ์ซ้ำอยู่เสมอ โดยมิได้มีการปรับปรุงแก้ไข เหมือนผู้เกี่ยวข้องยังสำคัญว่าความรู้ของตนนั้นถูกต้อง หรือคิดว่างานเหล่านั้นถูกต้อง

ผู้ค้นคว้างานคำกลอนของสุนทรภู่ที่เคร่งครัด จึงต้องมีคุณสมบัติในการเอางานของสุนทรภู่มาอ่านแล้วอ่านอีก และจดจำข้อมูล โดยเฉพาะเวลาและเหตุการณ์ที่สลับซับซ้อนกับเรื่องจินตนาการ จนสามารถปะติดปะต่อเรื่องทั้งจากภายในและภายนอกของแต่ละเรื่อง ให้ได้ผลใกล้ความจริงที่ต่อเนื่อง และสอดคล้องกับเวลามากที่สุด เพราะกล่าวได้ว่า คำกลอนทุกบทของสุนทรภู่ล้วนมีนัยหรือมีที่มาที่ไปแทบทั้งสิ้น เรื่องจริงหลายเรื่องที่ปนอยู่กับเรื่องจินตนาการก็ไม่ยากที่จะเข้าใจ และแยกออกจากกันได้ อีกทั้งจากคำเปรียบเทียบอุปมาอุปไมย แต่ละเรื่องจึงสามารถกรองออกมาได้ เหมือนด้วยเครื่องมือจับสัตว์น้ำต่างชนิดต่างพฤติกรรม ก็ต้องมีเป็นเฉพาะงานหรือวิธีใช้ให้เกิดประโยชน์ที่ต่างกัน แต่สอดคล้องและต่อเนื่องกันช่วยอธิบายกันได้

หลังจากนั้น ผู้เขียนได้ทยอยค้นคว้าต่อ จนขณะนี้ได้เป็นผลงานที่ยังไม่ได้ตีพิมพ์อีกเกือบ ๒๐ ชิ้นงาน เกี่ยวกับบุคคล ระหว่างบุคคล พฤติกรรมของลูกหลาน ผู้ร่วมคณะ การเดินทาง สุภาษิต ภาษาคำกลอน ประวัติศาสตร์ สังคม คารมของการเปรียบเทียบ รำพึงรำพัน ความอาลัยอาวรณ์ แสดงความหวัง ความผิดหวัง ชื่อบ้าน ชื่อเมือง เจ้านาย ชาวบ้าน หญิงคนรักที่เกี่ยวข้องทั้งในอดีตและในช่วงระหว่างนั้น อีกทั้งบทอัศจรรย์ การบ้านการเมือง ธรรมชาติ การละเล่นรื่นเริงและอื่น ๆ เพื่อจุดประสงค์ที่จะเข้าใจว่าสุนทรภู่คือใคร พระอภัยมณี... มาจากไหน? ใครเป็นใครในเหตุการณ์ใด และอะไรเป็นอะไร ในงานคำกลอนของสุนทรภู่

เมื่อประกอบกับผลงานเรื่อง *“สุนทรภู่แต่งนิราศพระแท่นดงรังทั้งสองสำนวน”* ที่เผยแพร่มาก่อนในวารสารราชบัณฑิตยสถาน ฉบับ พ.ศ. ๒๕๕๑; ๓๓ (๑) หน้า ๒๐๑-๒๒๐ และข้อมูลสำคัญอื่น ๆ ที่ตีความได้จากงานที่แต่งขึ้นโดยสุนทรภู่ ทั้งหมดจึงสามารถนำมาร้อยเรียงได้เป็นประวัติและงานของสุนทรภู่ ระหว่าง พ.ศ. ๒๓๔๙-๒๓๘๕ ติดต่อกันทุกปี จะมีที่ยังขาดไปก็เป็นระหว่างวัยเด็กตั้งแต่เกิด พ.ศ. ๒๓๒๙-๒๓๔๘ ซึ่งอาจจะมีอยู่ในเรื่อง *“โคบุตร”* ที่แต่งใน พ.ศ. ๒๓๔๙-๒๓๕๐ หรือ *“สิงหไกรภพ”*

งานใน พ.ศ. ๒๓๖๕-๒๓๖๗ หรือ "ลักษณวงศ์" ที่แต่งใน พ.ศ. ๒๓๘๐-๒๓๘๕ หรือ *"อภัยนุราช"* พ.ศ. ๒๓๘๕-? ส่วนในวัยสูงอายุ ก็อาจจะมีกล่าวอยู่ใน *"พระอภัยมณีคำกลอน"* ภาคบริบูรณ์ ตอนที่ ๖๕-๑๓๒ หรืองานที่กล่าวมาแล้ว แต่แต่งหลัง พ.ศ. ๒๓๘๐ ซึ่งทั้งหมดนี้ผู้เขียนยังไม่ได้สืบค้นหาเทียบเคียงอย่างจริงจัง

ต่อมาจากเหตุการณ์มหันตภัยน้ำท่วม ในช่วงปลาย พ.ศ. ๒๕๕๔ ที่นำความเสียหายอย่างยับเยินมาสู่บ้านเมือง เพราะความไร้สาระ เกเร เฉไฉ ของบุคคลในรัฐบาลใหม่ ที่เข้ามาปกครองประเทศด้วยระบบประชานิยม และครอบครัว รวมทั้งการทำให้แตกแยกแล้วปกครอง นับตั้งแต่วันแรกในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. ๒๕๕๔ จนถูกขับออกไปในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. ๒๕๕๗ ระหว่างมหาอุทกภัยครั้งนั้น ผู้เขียนได้ถือโอกาสเรียบเรียงเรื่อง *"สุนทรภู่บอกเหตุน้ำท่วมจากพุทธทำนาย"* โดยเอาเรื่อง *"กาพย์พระไชยสุริยา"* มาศึกษาประวัติและวิจารณ์ แล้วลงความเห็นเป็น *"ข้อสันนิษฐานสำหรับปีแต่ง 'กาพย์พระไชยสุริยา' ที่ผู้เขียนคิดว่าน่าเชื่อถือมากที่สุดในขณะนี้คือ พ.ศ. ๒๓๘๓-๒๓๘๔ ซึ่งอยู่ระหว่าง พ.ศ. ๒๓๘๒-๒๓๘๕ โดยคำบอกเล่าของพระยาธรรมปรีชา บุญ ผู้เคยบวชอยู่ที่วัดเทพธิดาราม ในสมัยที่สุนทรภู่ก็จำพรรษาอยู่ในอารามแห่งนี้"*

วันเดือนปีแต่ง *"กาพย์พระไชยสุริยา"*

การที่ผู้เขียนเริ่มยกเรื่อง ข้อสันนิษฐานสำหรับปีแต่ง *"กาพย์พระไชยสุริยา"* มาไว้ในที่นี้ก็เพราะที่ผ่านมาจนถึงขณะนี้ ผู้เขียนมีข้อมูลเพิ่มขึ้น และได้ศึกษาจนพบว่า *"เดือนแปดวันจันทวาร์เวลานอน"* ใน *"รำพันพิลาป"* ได้นำไปสู่คำกลอนบทอัศจรรย์ ในนิทาน *"พระอภัยมณีคำกลอน"* ตอนที่ ๔๕ หน้า ๘๙๗ และใน *"กาพย์พระไชยสุริยา"* ที่แต่งพร้อมกันที่เพชรบุรี ระหว่างเดือน ๑๒ ถึงเดือนยี่ ปีฉลู พ.ศ. ๒๓๘๔ หลังเหตุการณ์ ๓-๔ เดือน ที่มีอยู่ตามลำดับ ว่า

"อัศจรรย์ลั่นเลื่อนสะเทื้อนไป ที่ถ่านไฟเก่าดับก็กลับโพลง
เหมือนเมื่อปีมีวันจันทร์อังคาส โลกธาตุเลื่อนลั่นควันโขมง
เขาเนมินท์อิสินธรเคลื่อนคลอนโคลง ทะเลโล่งลมคลื่นเสียงครื้นครึก"

(สุรางคนางค์ ๒๘)

"พระชวนนวลนอน เข็ญใจไม้ขอน เหมือนหมอนแม่นา ภูธรสอนมนต์ ให้บ่นภาวนา เย็นค่ำร่ำว่า กันป่าภัยพาล

วันนั้นจันทร มีดาราก เป็นบริวาร เห็นสิ้นเดือนฟ้า ในป่าท่าธาร มาลีคลี่บาน ใบก้านอรชร"

"จันทราคลาเคลื่อน กระเวนไพรไก่เถื่อน เตือนเพื่อนขานขัน ปู่เจ้าเขาเขิน กู่เกริ่นหากัน สินธุพุลั่น ครื้นครั่นหวั่นไหว"

(ยานี ๑๑)

“ยากเย็นเห็นหน้าเจ้า สร้างโศกเศร้าเจ้าพี่อา
อยู่วังดังจันทรา มาหม่นหมองลอองนวล”

(ยานี ๑๑)

“ขึ้นกดบทอัศจรรย์ เสียงครื้นครั่นชั้นเขาหลวง
นกหกตกรังรวง สัตว์ทั้งปวงง่วงงุนโงง
แดนดินถิ่นมนุษย์ เสียงดังดุจเพลิงโพลง
ตึกกว้านบ้านเรือนโรง โคลงคลอนเคลื่อนเขยื้อนโยน
บ้านช่องคลองเล็กใหญ่ บ้างตื่นไฟตกใจโจน
ปลุกเพื่อนเตือนตะโกน ลุกโลดโผนโดนกันเอง”
“สององค์ทรงสังวาส โลกธาตุหวาดหวั่นไหว
ตื่นนอนอ่อนอกใจ เดินไม่ได้ให้อาดูร”

สำหรับเรื่องราวเดียวกันนี้ ที่มีเนื้อหาตรงกัน มีปรากฏอยู่ในนิทานพระอภัยมณี ตอนที่ ๔๘ หน้า ๙๖๘, ๙๗๓, ๙๗๘ ซึ่งผู้เขียนเข้าใจว่าน่าจะเกี่ยวข้องกับสุขภาพของเจ้าหญิง ด้วยเพราะมีหลักฐานเป็นงานเรื่อง *“พระอาการประชวรของกรมหมื่นอัปสรสุดาเทพ”* โดย คุณสุวรรณ ที่ถวายตัวอยู่ในสำนักของพระองค์ มาตั้งแต่ปีฉลู พ.ศ. ๒๓๘๔ และได้แต่งเรื่องนี้หลังเหตุการณ์ใน *“เมื่อเดือนสี่ปีเถาะเคราะห์เหลือใจ”* หรือมีนาคม ปีเถาะ พ.ศ. ๒๓๘๖ โดยยังได้ย้อนกล่าวถึงเหตุการณ์ของพระองค์กับสุนทรภู่ไว้ด้วย ว่า

“สารพัดขัดคิดเป็นนิจกาล สิ่งสำราญหายวับไปกับตา
แต่ปีฉลูเดือนเก้าเป็นคราวยาก น้ำท่วมปากโอ้นาถหนอวาสนา”

ผู้เขียนขอถือโอกาสนี้ เพราะบริบทเหมาะที่สุดเท่าที่เคยมีมา เพื่อที่จะบันทึกไว้ว่า ตัวละคร *“กระเทยที่เคยใช้”* หรือ *“มาลัยมาลา”* หรือ *“มาลามาลัย”* ที่ปรากฏอยู่เพียงในตอนที่ ๔๘ ถึง ๕๑ เธอคือหม่อมสุด และหม่อมขำ หรือคุณโม่ง และหม่อมเป็ด ที่มีประวัติเป็นหม่อมห้าม ในกรมพระราชวังบวรมหาศักดิพลเสพย์ เมื่อพระองค์สวรรคต จึงย้ายมาประจำที่ตำหนักของเจ้าหญิงพระองค์นี้ ทั้งสองมีพฤติกรรมแปลก เป็นคู่เล่นเพื่อนกัน จึงได้รับประทานชื่อดังกล่าว เข้าใจได้ว่าคนเหล่านี้ทั้งหมดได้ติดตามเจ้าหญิงไปในทุกโอกาส รวมทั้งครั้ง *“น้ำท่วมปาก”* ที่สุนทรภู่อ้างตามที่จดบันทึกไว้ว่าเป็น *“เดือนแปด”*

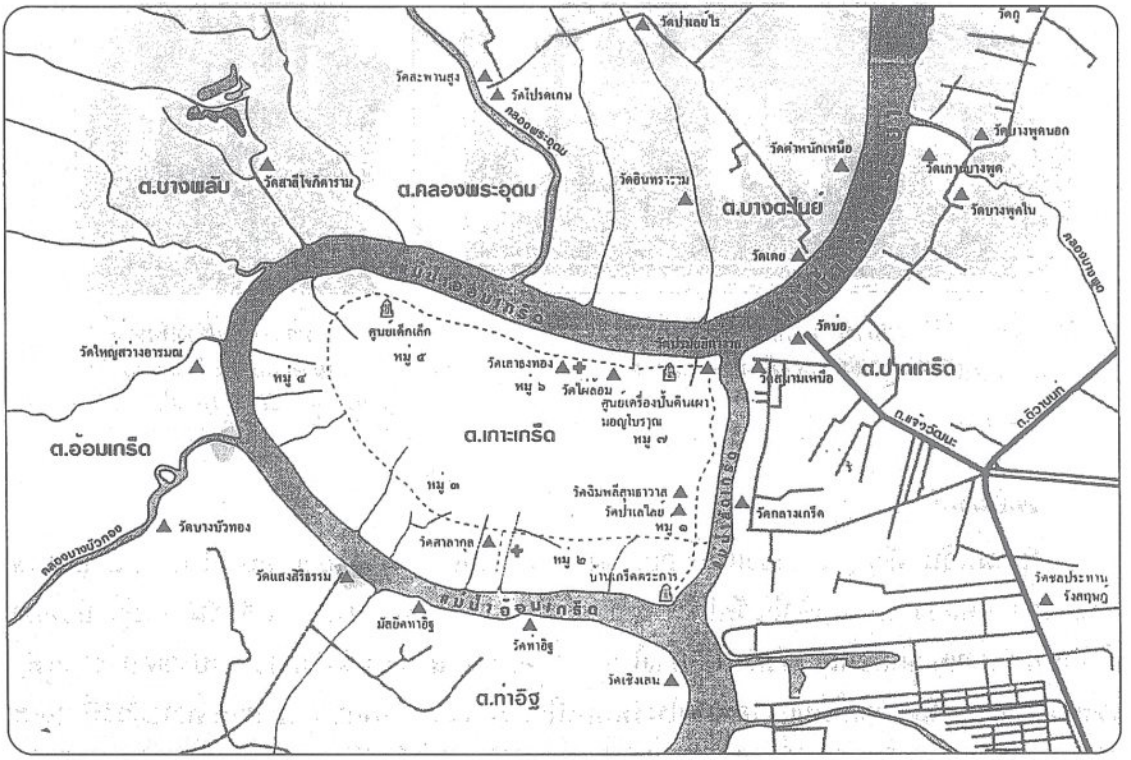
ส่วนเรื่องราวเกี่ยวกับสุขภาพของเจ้าหญิง โดยสุนทรภู่ ในนิทานหน้าดังกล่าว ก็มีอยู่ดังนี้ คือ

“วิบากกรรมจำเป็นไม่เว้นว่าง *ให้อ้างว้างวิญญาณ์เพียงอาสัญ*
ระทวยองค์ลงบนที่บุตรีนั้น *สะอื้นอั้นอ่อนซบสลบไปฯ”*
“สามกษัตริย์อัศจรรย์ก็หวั่นหวาด *เห็นหน่อนาถนิ่งไปก็ใจหาย*
ช่วยแก้ไขพอค่อยทรงดำรงกาย *แกล้งอุบายบ่นว่าเคยมาพบ*
ผู้ที่นั่งทางปราสาทประหลาดนัก *หมายว่ารักเสาวคนธ์จนสลบ”*
“ทั้งข่วนผลักสักเท่าไรก็ไม่เจ็บ *จนเสียเล็บหักหมดกำสรดกันแสง*
พระสวมสอดกอดกระหวัดนางวัดแวง *จนสิ้นแรงอ่อนพับนิ่งหลับตา”*

เหล่านี้ ในความคิดของผู้เขียนขณะนี้ สุนทรภู่ต้องหมายถึงเหตุการณ์วันที่เกิดปัญหาระหว่างตนกับกรมหมื่นอัปสรสุดาเทพ ที่ *“จึงจดวันเวลาด้วยอาวรณ์”* คือเป็นวันจันทร์ เดือน ๘ กรกฎาคม ปีฉลู พ.ศ. ๒๓๘๔ มากกว่าที่จะตีความว่าเป็นวันแต่ง *“รำพันพิลาป”* อย่างที่คิดกัน โดยที่ตามประวัติ สุนทรภู่ได้สึกจากพระตั้งแต่ปีมะแม พ.ศ. ๒๓๗๘ เพื่อให้ได้ใกล้ชิดกับนางม่วง ตามที่นางขอร้อง แล้วบวชใหม่ในต้นปีกุน พ.ศ. ๒๓๘๒ ด้วยนิมนต์ของกรมหมื่นอัปสรสุดาเทพ จึงได้มาจำพรรษาที่วัดเทพธิดาราม ตั้งแต่วัดสร้างเสร็จในเดือนธันวาคม ปีกุน พ.ศ. ๒๓๘๒ วันเกิดเหตุ โดยนัยของเนื้อหารวมถึงกาละและเทศะ จึงน่าจะเป็นช่วงที่กรมหมื่นอัปสรสุดาเทพถือบวชเป็นชีพราหมณ์ คือไม่เป็นทั้งชีหรือพราหมณ์ หรือไม่โกนผมแต่ห่มขาว ถือศีล พักอยู่ตามวัด ทั้งนี้โดยได้รับพระราชานุญาตให้ไปในทิศพายัพ เข้าใจว่าน่าจะเป็นการผ่านไปในเขตนนทบุรี ทั้งนี้เพราะมีการพาดพิงถึงเกาะโดยตรง จึงน่าจะหมายถึงเกาะเกร็ด ที่ตามประวัติเปลี่ยนสภาพเป็นเกาะมาตั้งแต่สมัยพระเจ้าท้ายสระ เมื่อทรงให้มีการขุดคลองเกร็ดน้อย หรือเตร็จน้อย ในปีขาล พ.ศ. ๒๒๖๕ ยาวประมาณ ๒๙ เส้น เป็นทางลัด เรียกว่า คลองลัดเกร็ด (เดิมเรียกคลองเตร็จน้อย ที่บ้านปากเตร็จ) ให้แม่น้ำอ้อมเกร็ดหรือแม่น้ำเจ้าพระยาบริเวณนี้เปลี่ยนทิศทาง ไหลตรงลงใต้แทนการไหลโค้งไปทางทิศตะวันตก บริเวณนี้จึงเกิดชุมชนใหญ่ขึ้น เป็นจุดผ่านและจอดเรือสินค้าตรงบริเวณที่เป็นอ่าว ทำให้ต้องตั้งด่านปากเกร็ด เดิมเรียกปากเตร็จ เพื่อตรวจสินค้าขึ้นเก็บภาษี ที่บริเวณฝั่งตะวันออกของตัวเกาะในปัจจุบัน ซึ่งมีวัดปากอ่าว หรือต่อมาคือ วัดปรมัยยิกาวาส

แต่ก่อนที่ผู้เขียนจะกล่าวต่อไปถึงการเดินทางของนางเสาวคนธ์ในภาพของกรมหมื่นอัปสรสุดาเทพไปแสวงบุญที่บริเวณเกาะเกร็ดจนเกิดปัญหากับสุนทรภู่ ซึ่งเป็นการเล่าย้อนเหตุการณ์ของสุนทรภู่เป็นนิทานพระอภัยมณีตอนที่ ๔๘ ผู้เขียนก็ใคร่จะยกคำกลอนในตอนที่ ๔๗ ซึ่งสุนทรภู่เล่าถึง การกราบบังคมทูลขอพระกรุณาอภัยโทษ ซึ่งมีอยู่ในหน้า ๙๕๘-๙๕๙ ว่า

“แล้วนางแกล้งแต่งธูปเทียนดอกไม้ *มาตั้งไว้ขอสมาวันทาถวาย*
จะเคียงคู่อยู่ไปก็ได้อาย *ขอสู้ตายเสียให้พ้นคนนินทา*
ได้ผิดพลั้งครั้งใดอภัยโทษ *อย่าถือโกรธเลยเป็นขาดวาสนา”*



รูปที่ ๑ แผนที่บริเวณเกาะเกร็ด จังหวัดนนทบุรี

สำหรับขนาดและสภาพของเกาะเกร็ด ที่สมัยนั้นคงจะมีการต้มเคี่ยวน้ำตาลเมาทั่วไป จนมีควันโขมง มีงูชุกชุม และชื่อปากอ่าว ปากน้ำ เหล่านี้ ผู้เขียนพบมีกล่าวอยู่ในนิทาน *“พระอภัยมณีคำกลอน”* ตอนที่ ๔๘, ๔๙, ๕๐, ๕๑ หน้า ๙๖๗, ๙๗๖, ๙๘๐, ๙๘๑, ๙๘๒, ๙๙๙, ๑๐๐๒, ๑๐๒๐, ๑๐๓๔ โดยกรมหมื่นอัปสรสุดาเทพถูกจัดให้อยู่ในร่างของนางเสาวคนธ์ แปลงกายเปลี่ยนนามเป็นฤๅษี แล้วเรื่องไม่ดีไม่งามโดยสุนทรภู่ก็ได้เกิดเป็นเรื่องแพร่งพราย สำหรับคำกลอนที่ผู้เขียนเข้าใจว่าหมายถึงสถานที่เกิดเหตุดังกล่าวมีต่อไปนี้ตามลำดับ คือ

“ให้ใช้ใบไปทางทิศพายัพ
“พอออกจากปากน้ำเกณฑ์กำปั่น
“ฝ่ายนงเยาว์เสาวคนธ์วิมลมิ่ง
นางแปลงองค์ทรงสำอางเหมือนอย่างพราหมณ์
“จนเข้าเขตพาราวาหุโลม
เห็นเกาะเพลิงเริงแรงแสงสว่าง
ออกลึกลับลำเดียวเปลี่ยวหนักหนา”
ให้แยกกันทุกไปทิศเหมือนคิดหมาย”
เป็นยอดหญิงเจนศึกไม่นึกขาม
กับคนตามพันร้อยแล่นลอยไป”
ทางขึ้นโรมวิสัยเมืองใหญ่พราหมณ์
ลุกอยู่กลางเกาะเองน่าเกรงขาม

ตีนสิงขรล่อนโล่นพลุ่งโพลงพลาม
จึงดูแดนแผนที่มีหนังสือ
มีเรื่องราวกล่าวแถลงให้แจ้งใจ
ขึ้นพ่นพิษฤทธิ์เริงดังเพลิงพลุ่ง
ถูกเทวดาสารพัดสิงสัตว์ตาย
มาปิดปล่องช่องชะวากที่นาคผุด
เหลือเปลวปล่งตรงปล่องเหมือนกองกูณฑ์
“สมาทานถือศีลครองอินทรีย์
เปลี่ยนชื่อพระอัคนีมีสง่า
ทั้งหญิงชายแปลงกายเป็นชีพราหมณ์
ให้บอกกล่าวว่าเราชาวกบิลพัสดุ์
“แล้วสั่งให้นายท้ายบ่ายเภตรา
เห็นปากน้ำทำป้อมคร่อมภูเขา
แลพิลึกตึกกว้านสำราญใจ
สังเกตดูผู้คนบนตลิ่ง
ส่วนเครื่องขาวเจ้านายฝ่ายผู้ดี
แต่ไพร่นายฝ่ายทหารชาญกำแหง
ด้วยห้ามปรามตามแผนกให้แปลกกัน
ล้วนเสื้อกลีบจีบนุ่งคาดพุงทับ
“ถือดาบแดงแซงสลอนนครบาล
“จะกลับกล่าวชาวบ้านด่านสมุทร
นางโฉมยงนงลักษณ์อัคนี
“พวกปากน้ำนำหน้าโยธาหาญ
“พวกโยธีรี้พลหลีกลนลาน
“จะล่วงเข้าอ่าวสินธุ์ถิ่นนาคา
ดูโพลงพลุ่งรุ่งโรจน์โชติสว่าง
จะแลซ้ายฝ่ายขวาล้วนนาคิน
“พอแลเห็นเป็นชะวากที่ปากอ่าว
ควันโขมงสงสัยในวิญญาณ์
ยาวสักสามสิบเส้นล้วนเป็นไฟ
ว่าเกาะชื่อชุมเพลิงเชิงไศล
ว่าเกาะใหญ่พระยานาคมีมากมาย
เป็นควันฟุ้งฟ้าดินสิ้นทั้งหลาย
พระนารายณ์รู้เรื่องเปลื้องอาดูร
ถอนพิษภุชงค์ร้ายให้หายสูญ
เป็นไฟฟูนสักเท่าเขาคิรินฯ”
เป็นฤๅษีทรงพรตดูดงาม
นำพวกข้าโดยเสด็จไม่เข็ดขาม
ต่างเปลี่ยนนามบวชทั่วตัวที่มี
เที่ยวโปรดสัตว์ตามจริตกิจฤๅษี”
เข้าอ่าววาหุโลมแล่นดูแดนไตร
จำเพาะเข้าออกเดินเนินไศล
เข้าจอดใกล้เมืองด่านชานบุรี
ทั้งชายหญิงโพกผมนุ่งห่มสี
พวกเสนีทุกตำแหน่งแต่งทั้งนั้น
ใส่เสื้อแสงสีดำล้วนล่ำสัน
สีหมอกนั้นเป็นของคนพลเรือน
ไม่สลับสีไหนก็ให้เหมือน”
เอานายด่านปากน้ำมาจำจอง”
เป็นที่สุดนับถือพระฤๅษี
ขึ้นอยู่ที่ป้อมปืนทุกคืนวัน”
โห่สะท้านสะเทื้อนลั่นเสียงหวั่นไหว”
เห็นนายด่านปากน้ำด่าสำทับ”
เห็นภูผาวุ้งเวิ้งเชิงคิริน
อยู่ท่ามกลางเกลียวมหาชลาสินธุ์
ขึ้นไล่กินกุ้งปลาในสาชล”
ที่เกาะยาวใหญ่ขวางอยู่ข้างหน้า
จึงขับม้าขึ้นละเมาะเกาะค้างคาว”

รูปที่ ๒ พระสาทิสลักษณ์พระเจ้าบรมวงศ์เธอ กรมหมื่นอัปสรสุดาเทพ ที่ประดิษฐานอยู่ในกุฏิที่สุนทรภู่เคยอยู่ วัดเทพธิดารามวรวิหาร

รูปที่ ๓ วัดเทพธิดารามวรวิหาร พระบาทสมเด็จพระนั่งเกล้าเจ้าอยู่หัวเสด็จพระราชดำเนินมาในพระราชพิธีผูกพัทธสีมา ด้วยพระองค์เอง เมื่อวันอาทิตย์ที่ ๒๒ ธันวาคม ปีกุน พ.ศ. ๒๓๘๒

ที่น่าสนใจกว่า เพราะเป็นหลักฐานอีกข้อหนึ่งที่ทำให้ผู้เขียนปักใจว่า โดยภาพหรือฉากรวม บริเวณเหล่านี้เป็นบริเวณของเกาะเกร็ด นั่นคือ คำว่า *“เกาะค้างคาว”* ซึ่งพาดพิงได้ถึงชื่อ *“วัดค้างคาว”* ที่ตั้งอยู่เหนือปากคลองบางกรวยด้านฝั่งตะวันตกของแม่น้ำเจ้าพระยา ใต้แม่น้ำอ้อม เป็นวัดที่สร้างขึ้นในปีเถาะ พ.ศ. ๒๓๒๖ หรือก่อนสุนทรภู่เกิด ๓ ปี อาจเป็นวัดที่อยู่ใกล้บ้านบิดามารดาของนางนิ่มภรรยาของสุนทรภู่

น่าสังเกตว่า ตัวอย่างคำกลอนที่ยกมากล่าวนี้ มีเค้าของเนื้อหาเดียวกันที่มีกล่าวอยู่ในบทรำพันฝัน ของ *“รำพันพิลาป”* ซึ่งผู้เขียนจะเลือกยกมาเสนอต่อไป

จากคำกลอนตอนที่ ๕๐ นางเสาวคนธ์ได้เมืองวาหุโลม หน้า ๙๘๑, ๑๐๐๒ ดังกล่าว ที่สุนทรภู่กล่าวถึง *“ป้อม”* *“ป้อมปืน”* น่าจะหมายถึง *“ป้อมแก้ว”* ที่คงจะตั้งอยู่บริเวณตลาดแก้ว และ *“ป้อมทับทิม”* ที่เคยอยู่หน้าวัดเฉลิมพระเกียรติ แต่ต่อมาน้ำได้เซาะจนพังหมดไปแล้ว ปัจจุบันเหลือเพียงกำแพงหน้าวัด แต่ก็ได้เปลี่ยนสภาพ เพราะมีการบูรณะซ่อมแซมต่อ ๆ กันมาหลายครั้ง ทั้ง ๒ ป้อมสร้างขึ้นใน พ.ศ. ๒๒๐๘ สมัยสมเด็จพระนารายณ์มหาราช

สำหรับการเดินทางด้วยเรือไปแสวงบุญ ที่เข้าใจว่าเป็นวัดปากอ่าว บนเกาะเกร็ด ของกรมหมื่นอัปสรสุดาเทพ ในเดือน ๘ ปีฉลู พ.ศ. ๒๓๘๔ น่าจะต้องได้รับพระราชานุญาต เพราะนอกจากจะมีผู้ติดตามแล้ว ก็มีการตระเตรียมเป็นการส่วนพระองค์ ดังมีกล่าวอยู่ในนิทาน ตอนที่ ๔๘, ๕๑ หน้า ๙๖๓, ๑๐๓๖, ๑๐๓๗ ว่า

“ให้ลอบทำสำเภายาวเก้าเส้น *สำหรับเล่นทะเลลึกฝึกทหาร*
เลือกล้าต้าต้นหนพวกคนงาน *ล้วนชำนาญทวาในสาชล*
พวกนารีที่เป็นข้าทั้งห้าร้อย *เคยใช้สอยการศึกได้ฝึกฝน*
จะไปด้วยช่วยเจ้าเมื่อคราวจน *ทั้งพวกพลขอเฝ้าตามเจ้านาย*
ขนข้าวน้ำลำเลียงเสบียงไพร่ *บรรทุกไว้ในเรือนั้นเหลือหลาย*
กำหนดนัดจัดแจงไม่แพร่งพราย *ทั้งไพร่นายพันร้อยรอคอยฟังฯ”*
“มีรับสั่งทั้งชนกชนนี *พระอัยกีอัยกาส่งมาเรือ”*
“ออกน้ำเชี่ยวฝ่าคลื่นขึ้นข้างเหนือ *ใหญ่กว่าเรือไปมาเที่ยวค้าขาย*
สังเกตแดนแผนที่บุรีราย *จะเข้าฝ่ายฝั่งพาราวาหุโลม”*
“สำเภาจอดทอดท่าริมสาคร *เห็นแน่นอนนางจะมาเภตรานี้*
เมื่อแรกทำจำได้ทั้งใบเสา *ผิดสำเภาชาวเมืองมีเครื่องสี่”*

ส่วนความแพร่งพรายของเหตุการณ์ จนทำให้ต้องมีการหลบหน้าหลบตากัน และความวิตกว่าเจ้าหญิง *“จะทรงครรภ์”* ก็มีกล่าวอยู่ในนิทาน ตอนที่ ๔๕, ๕๑ หน้า ๘๙๙, ๑๐๔๑, ๑๐๔๔ ว่า

“แม้มิพ้นจนใจจะให้อยู่ *คงจะสู้ซอกซอนสัญจรหนี*
พรุ่งนี้เช้าเราจะลาไปธานี *อยู่ที่นี่อีทมิฬจะนินทา*

แต่นิ่งนึกตรึกไตรมิใคร่หลับ
ทั้งโฉมยงค์องค์อรุณขุ่นวิญญาณ์
จะเสกสองครองคู่ดูเป็นน้อย
คะนึงนอนร้อนฤทัยดังไฟเลีย
“วิบากกรรมจำจนให้อ้นอั้น
สุดจะอายขายหน้าพวกข้าไท
จะใคร่ล้วงดวงใจออกให้เห็น
จึงริรักมักง่ายให้ชายชิด
“อยู่วันหนึ่งจึงองค์นางนงลักษณ์
แม้มีผู้รู้แจ้งมาแพร่งพราย
“เสร็จธุระจะได้ไปเสียให้ลับ
อยู่ที่นี่มีผู้รู้ระคาย
ให้กระสับกระส่ายจิตกนิษฐา
ด้วยตรึกตราโกรธพระพี่ว่ามีเมีย
ต้องต่ำต้อยเต็มอายสู้ตายเสีย
น้ำตาเรี่ยรดแขนแน่นอุรา”
สุดจะผันสุดจะแปรสุดแก้ไข
น่าน้อยใจใจเอ๋ยไม่เคยคิด
ว่ามันเป็นอย่างไรหนอในจิต
ช่างไม่คิดเกรงกลัวมืดมัวเมา”
คิดอายพักตร์พวกทมิฬสิ้นทั้งหลาย
ทั้งระคายคิดถึงองค์จะทรงครรภ์”
จึงสึกกลับแปลงนามให้ความหาย
จะได้อายอัประมาณรำคาญใจฯ”

จากเนื้อหาคำกลอนในตอนที่ ๔๕ หน้า ๙๐๒, ๙๑๐ ประมาณได้ว่าตั้งแต่ราวเดือน ๑๒ ของปีเดียวกัน สุนทรภู่จึงถูกให้หลบไปทางบกด้วยม้า ผ่านนครปฐม ไปเพชรบุรี ลังกาหรือสิงหลตามในนิทาน ขณะที่พระปฐมเจดีย์กำลังมีงานในวันเพ็ญ เดือน ๑๒ (สังเกตมีคำกลอนที่ตรงกัน อยู่ใน *“นิราศพระประธม”* ที่จะกล่าวต่อไป) ส่วนคำกลอนในนิทานพระอภัยมณีหน้าดังกล่าวนั้น คือ

“ถึงสระศรีสี่เหลี่ยมต่างเยี่ยมหยุด
บ้างแตกขาวง่าวงอกเป็นดอกดวง
ปลาเงินทองล่องลอยขึ้นคอยคาบ
ดอกบัวเผื่อนเหมือนจีบเป็นกลีบซ้อน
ที่ร่มรอบขอบสระรุกขชาติ
มีที่แท่นแผ่นผาศิลาลาย
บ้างก็หยุดบ้างก็เดินเพลินประพาส
มะเดื่อดูกลูกเหลืองมะเฟืองมะไฟ
“พระน้องจงทรงรถใต้ร่มฝน
แล้วพระองค์ทรงพระยาม้ามังกร
ขับม้าลัดตัดทุ่งกรุงสิงหล
อุตส่าห์ตามยามสองทันน้องยา
ชมปลาผุดเห็นตัวทั้งบัวหลวง
เกสรร่วงโรยรายขจายจร
กลีบอังกาบโกมินทร์กินเกสร
บานสลอนแลขาวดังดาวราย
แปลกประหลาดหลายหลากดูมากหลาย
เก้าอี้รายสำหรับชมทุกร่มไม้
รุกขชาติช่อดอกออกไสว
นางสาวใช้ชิงกันเก็บเสียเล็บเยินฯ”
พาไพร่พลเดินทางหว่างสิงขร
อัสดรโดดร้องก้องโกลา
บัดเดี๋ยวดลทางเดินขึ้นเนินผา
เทียบขึ้นหน้ารถนางเหมือนอย่างเคย”

เรื่องราวของพระประธมในสมัยนั้นถูกรื้อฟื้นขึ้นหลังจากรกร้างมานาน โดยภิกษุเจ้าฟ้ามงกุฎได้เสด็จไปนมัสการในปีมะโรง พ.ศ. ๒๓๗๕ จึงเป็นไปได้ที่สุนทรภู่ใช้โอกาสเจริญตามรอยพระบาท และอีก ๑๐ ปีต่อมาได้เดินทางพร้อมหนูตาบ และหนูนิลไปแต่ง *“นิราศพระประธม”*

ด้วยบริบทของกาลเทศะ ผู้เขียนเชื่อว่า ระหว่างอยู่ที่เพชรบุรีราว ๒ เดือน สุนทรภู่ได้แต่ง *“กาพย์พระไชยสุริยา”* และนิทานพระอภัยมณีคำกลอน เป็นตอนที่ ๔๕ เป็นตอนแรกที่เริ่มถวายกรมหมื่นอัปสรสุดาเทพ ตามที่พระองค์มีพระประสงค์ โดยน่าจะต้องมีการดัดแปลงท้าย ตอนที่ ๔๔ ที่แต่งแล้วว่างเว้นมานานเหมือนจบนิทานให้กลมกลืนกับเรื่องใหม่ในตอนที่ ๔๕

วันเดือนปีแต่ง *“โคลงนิราศสุพรรณ”*

จนกระทั่งถึงเดือนยี่ ปีฉลู พ.ศ. ๒๓๘๔ สุนทรภู่ได้ข่าวมารดาเสียชีวิต และมีผู้เอาเรือมารับจากเพชรบุรีกลับกรุงเทพฯ ตามคำกลอน ตอนที่ ๔๖ พระอภัยมณีกลับเมือง หน้า ๙๒๖ ว่า

“ฝ่ายทุกองค์พงศ์กษัตริย์ต่างจัดทัพ ลงเรือกลับข้ามคุ้งไปกรุงศรี
ต่างถึงเมืองเรืองสำราญผ่านบุรี พอเดือนยี่ยามหนาวคราวเหมันต์ฯ”

เรื่องนี้ ยังมีกล่าวอยู่ใน *“รำพันพิลาป”* เป็นคำกลอนใกล้ท้ายบทระลึกความหลัง ด้วยยังสำนึกในความผิด และเค้าการเดินทางไปสุพรรณบุรี ใน *“ปลายปีฉลู”* พ.ศ. ๒๓๘๔ ว่า

“ถึงเดือนยี่มีเทศน์สมเพชพักตร์ เหมือนลงรักรู้ว่าบุญสิ้นสูญหาย
สู้ซ่อนหน้าฝ่าฝืนสะอื้นอาย จนถึงปลายปีฉลูมีธุระ
ไปทางเรือเหลือสลดด้วยปลดเปลื้อง ระคางเคืองข้องขัดสลัดสละ”

จากคำว่า *“ปลายปีฉลูมีธุระ”* และ *“ทางเรือเหลือสลด”* จึงสอดคล้องกับการเดินทาง ที่มีผู้กำหนดเช่นเดียวกับตอนไปเพชรบุรี โดยทางบก ในระหว่างเดือน ๑๒ ถึงเดือนยี่ ดังกล่าวมาแล้ว โดยครั้งนี้เป็นการไปในเขตจังหวัดสุพรรณบุรี ตั้งแต่เดือน ๓ ราววันเพ็ญ ดังคำกลอน ตอนที่ ๔๗, ๔๘ หน้า ๙๓๕, ๙๗๖ ว่า

“พอออกจากปากน้ำก็ค่ำพลบ จุดเพลิงคบโคมรายขึ้นปลายเสา
เป็นเดือนสามยามหนาวลมข้าวเบา พัดเพลาเพลาพอได้ใช้ใบสบาย
ลำที่นั่งดั้งกันเป็นหลั่นแล่น ไปตามแผนที่ทะเลคะเนหา
ล้วนเคยคลื่นชื่นใจทั้งไพร่นาย นั่งสบายบังลมแลชมดาว

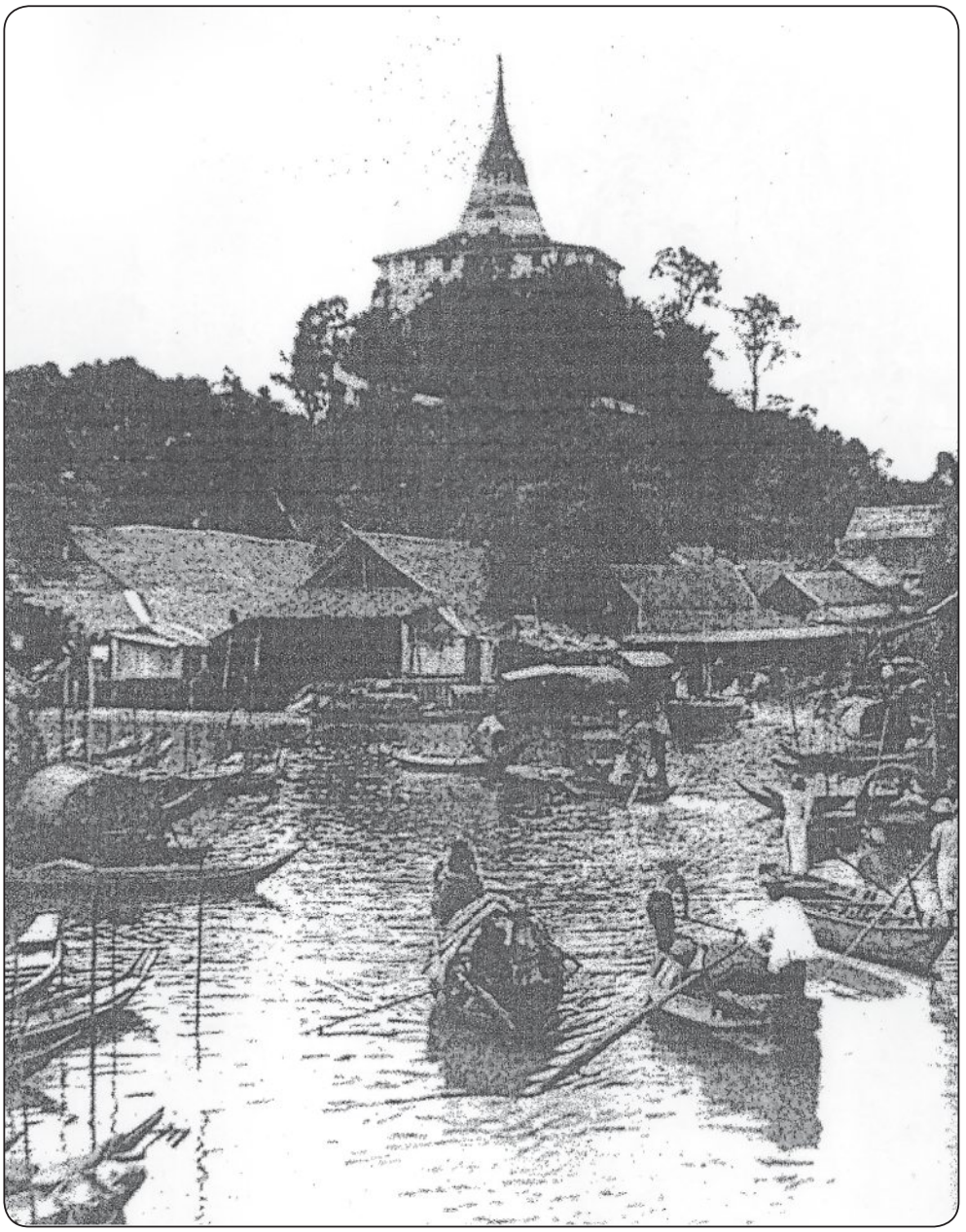
พวกผู้หญิงพี่พิงเอนดูเดือนแจ่ม *จับผิวแก้มแลล้วนเป็นนวลขาว”*
“พลางตีทัพขับเพลงบรรเลงพิณ *จนพลบสิ้นสุริยงลับคงคา*
ดาวสว่างลางคืนทั้งคลื่นเงียบ *ดูเรือเรียบแล่นรายทั้งซ้ายขวา”*

ในตอนเริ่มออกเดินทาง คือ *“เดือนแจ่ม” “ดาวสว่าง”* เข้าใจว่าออกจากวัดสระเกศ บริเวณคลองมหานาค เพราะเป็นที่เก็บศพมารดาของตนเอง สุนทรภู่ได้ถือโอกาสเริ่มแต่ง *“โคลงนิราศสุพรรณ”* ที่สอดคล้องกันไว้ว่า *“เดือนช่วงดวงเด่นฟ้า”* จนเชื่อได้ว่าแต่งพร้อมกัน ว่า

“๑ เดือนช่วงดวงเด่นฟ้า *ดาดาว*
จรูญจรัดรัศมีพราว *พร่างพร้อย*
ยามดึกนึกหนาวหนาว *เขนยแนบ แอบเอย*
เยนฉ่ำน้ำค้างย้อย *เยือกฟ้าพาหนาวฯ”*
“๕ เลี้ยวลัดวัดษเกษก้ม *คมลา*
กุฎศพนบมานดา *เกิดเกล้า*
เดชะพระกุศลภา *พ้นโลก โอกฆเอย*
เสวยศุภทุกค่ำเช้า *ช่องชั้นสวรรยางคฯ”*

โดยบริบทหลักฐานต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้ว และที่จะกล่าวต่อไป พอจะอนุมานได้ว่า ในการที่สุนทรภู่ถูกกำหนดให้เดินทางไปเพชรบุรีในเดือน ๑๒ หลังออกพรรษา ปีฉลู พ.ศ. ๒๓๘๔ แล้วได้แต่ง *“กาพย์พระไชยสุริยา”* มาตอนนี้เป็นการเดินทางโดยมีผู้กำหนดอีกเช่นกันให้ไปสุพรรณบุรี แล้วได้แต่ง *“โคลงนิราศสุพรรณ”* คำโคลงต่อไปนี้ ทำให้เชื่อได้ว่างานทั้ง ๒ เรื่องนี้ สุนทรภู่แต่งขึ้น โดยพระราชประสงค์ของพระบาทสมเด็จพระนั่งเกล้าเจ้าอยู่หัว เพราะทรงรู้จิตรู้ใจ ตลอดจนความสามารถ และวิธีสยบปัญหาที่เกิดขึ้น

“๒๗๔ เล่าความตามเรื่องแหร้ *แต่หลัง*
ใช่คิดบิดเบือนบัง *บอกแจ้ง*
ขัดเคราะเพราะยุกยัง *อยู่อย่า มาเอย*
กายสิทพิศกล้าแกล้ง *กลบกลุ้มคลุ้มควันฯ*
“๒๗๕ รู้ศึกนึกเรื่องเจ้า *เล่าความ*
ทราบหมดจดหมายตาม *แต่งไว้*
โออกตกวัยยาม *ยุกยาก มากเอย*
บุญบวดกรวดกระสินให้ *แห่งเจ้าเล่าความฯ”*



รูปที่ ๔ บรมบรรพต หรือ เจดีย์ภูเขาทอง วัดสระเกศราชวรมหาวิหาร ที่เริ่มสร้างขึ้นในสมัยพระบาทสมเด็จพระนั่งเกล้าเจ้าอยู่หัว ในบริเวณวัดโบราณ ชื่อวัดสะแก สำเร็จในรัชสมัยพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว มีคลองมหานาค ที่พระบาทสมเด็จพระพุทธยอดฟ้าจุฬาโลกมหาราช โปรดเกล้าฯ ให้ขุดขึ้นทางด้านทิศเหนือ ติดต่อกับคลองบางลำพู และคลองโอ่งอ่าง

จากทิศทาง เป็นที่แน่ว่าต้องเป็นการออกจากกรุงเทพฯ ไปสุพรรณบุรี และได้แต่ง *“โคลงนิราศสุพรรณ”* ไปพร้อมกัน เพราะสุนทรภู่ยังได้กล่าวไว้ในนิทาน *“พระอภัยมณีคำกลอน”* ตอนที่ ๔๘ หน้า ๙๖๗, ๙๗๒, ๙๗๓ ตามลำดับ อีกว่า

“ให้ใช้ใบในทางทิศพายัพ *ออกลึกลับลำเดียวเปลี่ยวหนักหนา”*
“จึงทูลความตามดิถีต้องตรียางค์ *ว่าไปทางทิศพายัพจะลับนาน”*
“หมายพายัพขับใหญ่วิ่งไวว่อง *ระเริงร้องเร็วรีบโถมถีบถอน”*

แม้การเดินทางไปสุพรรณบุรีของสุนทรภู่จะเป็นการไปเพื่อหลบให้ปัญหาคลี่คลาย แต่ในความเป็นจริง ก็คงจะมีการส่งข่าวถึงกรุงเทพฯ กันอยู่ตลอดเวลา จากฝ่ายนายด่าน ตลอดเส้นทางที่สุนทรภู่ผ่าน ดังที่สุนทรภู่เองได้แต่งเป็นนิทานไว้ เช่น ในตอนที่ ๔๙, ๕๐ หน้า ๙๙๑, ๙๙๒, ๙๙๓, ๑๐๐๑, ๑๐๑๓ ตามลำดับ ว่า

“จะบอกกล่าวราวเรื่องไปเมืองหลวง *ตามกระทรวงทูลเหตุแจ้งเขตขัณฑ์*
ขอเบิกด่านท่านให้เสร็จทั้งเจ็ดชั้น *ได้ผายผันไปตามความสบาย”*
“ต่างบอกข่าวราวเรื่องไปเมืองหลวง *ด่านทั้งปวงเกณฑ์ตรวจทุกหมวดหมาย*
จะยกไปหลายทัพจับโจรร้าย *พอพวกนายด่านถือหนังสือมา*
ผิดสำเหนียกเรียกเอาสำเนาอ่าน *ขอเบิกด่านว่าฤๅษีดีหนักหนา*
เนื้อความกลับทัพยั้งหยุดรั้งรา *รีบส่งม้าใช้ถือหนังสือไป”*
“ฝ่ายเสนามานั่งสั่งเสมียน *ให้เร่งเขียนข้อรับสั่งสิ้นทั้งหลาย*
ฝ่ายม้าใช้ได้ตรากรำลานาย *ขึ้นม้ารายไปทุกเมืองแจ้งเรื่องความฯ”*
“ท้าวเคืองขัดตรัสว่าแม้ฆ่าเสีย *พวกลูกเมียมันจะอพยพหนี*
จะปล่อยไปให้มันสู้จะดูดี *แล้วให้มีธงหนังสือให้ถือไป”*
“จึงรอรั้งตั้งค่ายอยู่ชายทุ่ง *พอย่ำรุ่งเรียกเสมียนเขียนอักษร*
ให้บ่าวไปในเมืองแจ้งเรื่องร้อน *เจ้านครรับอ่านดูสารพลันฯ”*

ในนิทานที่ยังต้องแต่งถวายกรมหมื่นอัปสรสุดาเทพ คือ *“พระอภัยมณีคำกลอน”* สุนทรภู่ยังอธิบายเรื่องเกี่ยวกับเวลาระหว่างเดินทาง *“ขึ้นข้างเหนือ”* ขณะอยู่ในสุพรรณบุรี เป็นเวลา ๘-๙ เดือน โดยเหมือนจะมีการกำหนดเส้นทางตามแผนที่ กล่าวคือ เมื่อข้ามเวลาจากปีฉลู พ.ศ. ๒๓๘๔ มาเป็นปีใหม่ คือ ปีขาล พ.ศ. ๒๓๘๕ ก็ได้แต่งเป็นคำพูดของตัวละครโต้ตอบกัน ถึงเดือนสี่ถัดจากเดือนสามในปีเดียวกันของการเริ่มออกเดินทางเมื่อปีกลายมาได้ ๑ เดือน ไว้ ในตอนที่ ๕๑ หน้า ๑๐๓๖ ว่า

“แล้วถามว่าตาครูอยู่ที่นี่ เห็นเภตรามาทางนี้บ้างหรือไฉน
เฒ่าชราว่าเขม้นเห็นไรไร เขาแล่นไปแต่เดือนสี่เมื่อปีกลาย
ออกน้ำเชี่ยวฝ่าคลื่นขึ้นข้างเหนือ ใหญ่กว่าเรือไปมาเที่ยวค้าขาย
สังเกตแดนแผนที่บุรีราย จะเข้าฝ่ายฝั่งพาราวาหุโลม”

จากชื่อ *“วาหุโลม” “โรมวิสัย”* หรือ *“กบิลพัสดุ์”* ที่กล่าวมาแล้ว และ *“เวพุวัน”* ที่จะกล่าวต่อไป สุนทรภู่คงจะนึกถึงอินเดีย ดินแดนแห่งแม่น้ำคงคาของพวกพราหมณ์พวกฮินดู ต้นกำเนิดรามเกียรติ์ โดย *“วาหุโลม”* เป็นชื่อมุขมนตรีวานร อยู่เมืองขีดขิน หนึ่งใน ๙ นายที่เรียก *“เตียวเพชร”* ต่างจากกลุ่ม *“สิบแปดมงกุฎ”* ในบทละครเรื่องรามเกียรติ์ของ พระบาทสมเด็จพระพุทธเลิศหล้านภาลัย ที่กล่าวอยู่ว่า *“ปีกขวาวาหุโลมเป็นตัวนาย ปีกซ้ายขุนกบินทร์นิลนนท์”* เพื่อทำให้เรื่องแปลกออกไปจากความรู้ที่มีอยู่

วันเดือนปีแต่ง *“รำพันพิลาป”*

สำหรับเรื่องราวการเดินทางของกรมหมื่นอัปสรสุดาเทพไปถือศีลกินบวชในร่างของนางเสาวคนธ์ที่แปลงเป็นฤๅษี หรือพระอัคนี ในตอนที่ ๔๙ ที่กล่าวมาแล้ว สุนทรภู่ได้ผันเรื่องให้เป็นการเดินทางของตัวละครไปชมพูทวีป และได้กล่าวไว้มากใน ๔-๕ หน้าแรก ในตอนต้นนี้ตามความเข้าใจของตัวสุนทรภู่เองที่ได้จากการอ่าน หรือรวมทั้งได้ยินได้ฟัง เรื่องทำนองนี้ต่อมาสุนทรภู่ก็เอาไปเลียบเคียง ขยายต่อ เหมือนเป็นนัยแฝงการพาเที่ยว ในความคิดพาหนีไว้อีก ใน *“รำพันพิลาป”* บทรำพึงฝัน เป็นคำกลอน เช่น

“แล้วจะใช้ใบเยื้องไปเมืองเทศ ชมประเภทพวกแขกแปลกภาษา
ทั้งหนุ่มสาวเกล้ามวยสวยโสภา แต่งกายาอย่างพราหมณ์งามงามดี”
“จะพาไปให้สร้างทางกุศล ขึ้นสิงหลเห็นจะได้ไปสวรรค์
ไหว้เจดีย์ที่ทำเลเวพุวัน พระรากขวัญอันเป็นยิ่งเขาสิงคุตร์ฯ”

น่าสังเกตว่าใน *“รำพันพิลาป”* ยังมีคำกลอนที่ให้ความหมายถึงความสำนึกผิดและต้องสึกจากพระของสุนทรภู่ เข้าใจว่าในสัปดาห์สุดท้ายของการเดินออกจากสุพรรณบุรี ที่ใช้เวลาจริง ๒ วันครึ่งถึงกรุงเทพฯ และได้เข้าเฝ้ากราบบังคมทูล ตามคำกลอนในนิทาน ตอนที่ ๕๐ หน้า ๑๐๒๗ ก่อนออกพรรษาที่วัดเทพธิดาราม คำกลอนเหล่านี้มีตามลำดับ คือ

“ซึ่งสั่งให้ไปสวรรค์หรือชันษา จะมรณาในปีนี้เป็นปีขาล”
“โอ้ปีนี้ปีขาลบันดาลฝัน ที่หมายมั่นเหมือนจะหมางระคางเขิน”

“โอ้ยามนี้ปีขาลสงสารวัด *เคยโสมนัสในอารามสามวัสสา*
สิ้นกุศลผลบุญการุณา *จะจำลาเลยลับไปนับนาน”*
“ต่างรับสั่งพรั่งพร้อมน้อมประณต *จากบรรพตหมายมุ่งไปกรุงไกรฯ*
สองวันครึ่งถึงเมืองนำเรื่องข่าว *เฝ้าหน่อท้าวทูลแจ้งแถลงไข”*

การที่ผู้เขียนคาดเวลาว่าอยู่ในระยะ ๑ สัปดาห์ดังกล่าว เพราะสุนทรภู่คงจะต้องมีแผนที่จะกลับกรุงเทพฯ จึงได้ปวารณาที่จะอยู่จำพรรษาที่วัด ในตำบลและอำเภอสองพี่น้อง ตามคำกลอน ใน *“รำพันพิลาป”* บทระลึกความหลังว่า *“เข้าวัสสามาอยู่ที่สองพี่น้อง”* ทั้งนี้เพราะตามพระวินัยเพื่อไม่ให้เกิน ๗ วัน ที่จะพักที่อื่นระหว่างพรรษา แม้จะมีข้อยกเว้นที่อ้างได้ก็ตาม

ส่วนในนิทาน *“พระอภัยมณีคำกลอน”* ตอนที่ ๔๘, ๔๙, ๕๑ หน้า ๙๖๗, ๙๙๙, ๑๐๔๑-๑๐๔๒, ๑๐๔๓ ที่แต่งในช่วงเดียวกัน ก็มีกล่าวเป็นรายละเอียดถึงโทษของพี่เลี้ยงที่ติดตาม (คุณสุวรรณ หม่อมสุด หม่อมขำ ดังกล่าวมาแล้วเป็นต้น) ที่รู้เห็นเป็นใจกับเหตุการณ์ รวมทั้งนายด่านบ้านปากอ่าว เกาะเกร็ด ที่ต้องรู้ระแคะระคายอยู่บ้าง ว่า

“จึงตรัสสั่งทั้งหลายฝ่ายข้าหลวง *ให้ทั้งปวงปิดความใครถามหา*
บอกว่าเราเข้าบำเพ็ญภาวนา *ไม่พูดจากว่าจะเสร็จสักเจ็ดวัน”*
“มนตรีรับอภิวาทมามาตรหมาย *ตำแหน่งนายเพชฌฆาตอันอาจหาญ*
ถือดาบแดงแซงสลอนนครบาล *เอานายด่านปากน้ำมาจำจอง*
ตัดคาคอข้อมือใส่ขื่อเล็ก *สายโซ่เหล็กล่ามรั้งไว้ทั้งสอง*
พวกตรวจตรัดพัศดีเดินตีฆ้อง *สอนให้ร้องโทษฑัณฑ์ที่พันพัว*
ใครอย่าดูเยี่ยงอย่างข้าคนขบถ *คิดเลี้ยวลดลวงกษัตริย์ให้ตัดหัว*
นายด่านหมายตายแท้สุดแก้ตัว *นึกถึงกลัวก็ต้องเฉยไม่เวยวายฯ”*
“ลงจากแท่นแค้นสี่พระพี่เลี้ยง *เรียกมาเคียงค่อนว่าไม่ปราศรัย*
นั่งอยู่นี่พี่ยามาเมื่อไร *ไม่บอกให้แจ้งจิตแกล้งปิดบัง*
เป็นลมจับหลับอยู่ไม่รู้แจ้ง *นี่เนื้อแกล้งจะให้อายเมื่อภายหลัง*
ให้นอนเคียงเรียงกันบนบัลลังก์ *เห็นงามทั้งห้าไร่จะได้ดู*
คิดว่าดีพี่เลี้ยงก็เพียงพี่ *ทีนี้ดีแตกหมดน่าอดสู*
แกล้งรู้เห็นเป็นใจทำไม่รู้ *ให้จู่ลู่ลามลวนไม่ควรเป็นฯ”*
“เจ้าเป็นที่พี่เลี้ยงรู้เยี่ยงอย่าง *จึงได้วางพระทัยให้สั่งสอน*
ถึงพระน้องข้องขัดให้ตัดรอน *ควรผันผ่อนเพ็ดทูลมูลิกา*

นี่กลับเห็นเป็นดีพาหนีหาย *โทษถึงตายหรือไม่เล่าหม่อมเจ้าขา*
ซึ่งทั้งปวงลวงพระราชอาชญา *ให้เรามาตัดศีรษะเสียบประจาน”*
“พี่เลี้ยงนางต่างว่าข้าพเจ้า *มีโทษเท่าดินฟ้าควรอาสัญ*
ถ้าลงพระอาญาให้ฆ่าฟัน *สุดจะผันผ่อนตนให้พ้นตาย*
ได้ทูลห้ามสามครั้งไม่ฟังห้าม *ต้องติดตามทรามสวาทเหมือนมาดหมาย*
สืบสนองรองบาทไม่คลาดคลาย *แม้เจ้านายไปถึงไหนก็ไม่ทิ้ง*
ด้วยเป็นข้าสาพิภักดิ์ถึงจักม้วย *สู้ตายด้วยพระธิดาประสาหญิง*
ไม่แกล้งว่าสารพัดเป็นสัตย์จริง *สุดจะทิ้งเจ้าพระคุณกรุณาฯ*
พระฟังคำทำเป็นเคืองชำเลืองค้อน *ที่โทษกรณ์ก็รู้จักว่าหนักหนา*
จะหยุดยั้งรั้งพระราชอาชญา *ให้คิดหาความชอบปลอบพระน้อง*
ให้เจ้านายหายดื้อได้หรือไม่ *ไปกรุงไกรแล้วก็จะทูลฉลอง*
ให้พ้นโทษโปรดปราณกินพานทอง *จงตรึกตรองเกรงพระราชอาชญาฯ”*

ส่วนเค้าการสึกจากพระ หลังเสร็จ *“ธุระ”* และแต่ง *“รำพันพิลาป”* ในสัปดาห์สุดท้ายก่อนออกพรรษา ของเดือน ๑๑ ปีขาล พ.ศ. ๒๓๘๕ ก็มีอยู่ในนิทาน *“พระอภัยมณีคำกลอน”* ตอนที่ ๕๑ หน้า ๑๐๔๔, ๑๐๔๕ ว่า

“เสร็จธุระจะได้ไปเสียให้ลับ *จะสึกกลับแปลงนามให้ความหาย*
อยู่ที่นี่มีผู้รู้ระคาย *จะได้อายอัประมาณรำคาญใจฯ*
พระยิ้มพรางทางว่าจะลาบวช *ฉันมิชวดอยู่หรือกรรมจะทำไฉน”*

น่าสังเกตว่า เมื่อสุนทรภู่แต่งนิทาน *“พระอภัยมณีคำกลอน”* ตอนที่ ๕๒ พระอภัยมณีทำศพท้าวสุทัศน์ ซึ่งตอนเริ่มนิทาน ตอนที่ ๑ หมายถึง พระบาทสมเด็จพระพุทธเลิศหล้านภาลัย ที่มีเค้าของการสวรรคตไปแล้วตั้งแต่ตอนที่ ๗ หน้า ๑๐๕ ฉะนั้น โดยกาละและเทศะ ตอนนี้ก็น่าจะเป็นระยะที่สุนทรภู่สึกจากพระในช่วงก่อนออกพรรษาพอดี มาทำศพมารดาและบิดา โดยที่มารดาได้เสียชีวิตก่อน ตามคำกลอนตอนที่ ๔๖ หน้า ๙๒๖ และใน *“รำพันพิลาป”* ที่มีข้อความเข้ากันตามลำดับ ว่า

“ฝ่ายทุกองค์พงศ์กษัตริย์ต่างจัดทัพ *ลงเรือกลับข้ามคุ้งไปกรุงศรี*
ต่างถึงเมืองเรืองสำราญผ่านบุรี *พอเดือนยี่ยามหนาวคราวเหมันต์”*
“ถึงเดือนยี่มีเทศน์สมเพชพักตร์ *เหมือนลงรักรู้ว่าบุญสิ้นสูญหาย”*

แล้วต่อมาก็เป็นบิดา ในตอนที่ ๕๐ หน้า ๑๐๒๗ ในเค้าว่าเสียชีวิตเพราะไปผ่านศึกมา ซึ่งในเหตุการณ์จริงตอนนั้น เป็นระยะที่ไทยส่งกองทัพไปรบเมื่อเขมรไปฝักใฝ่ข้างญวน เป็นคำกลอน ว่า

“โอ้พระองค์ทรงเดชเกศกษัตริย์ *มารีบรัดตัดชาติวาสนา*
เสียแรงลูกผูกยนต์รู้มนตรา *กำบังตาล่องหนทั้งทนคง*
ครั้นศึกมีก็มิให้ลูกไปด้วย *ไม่ได้ช่วยสงครามตามประสงค์*
จนเสียทีชีวิตพระบิตุรงค์ *มาปลดปลงเปล่าใจกระไรเลย*
โอ้ผ่านเกล้าเจ้าพระคุณทูลกระหม่อม *เลี้ยงถนอมลูกมานิจจาเอ๋ย*
เคยจูบเกล้าเผ้าผมเคยชมเชย *มาละเลยลูกไว้ให้ได้อาย”*

เป็นไปได้ว่า ในการแต่งนิทาน เมื่อเริ่มแทรกเรื่องอิเหนา ไว้สั้น ๆ ในตอนที่ ๔๘ หน้า ๙๗๖ แล้วไปขยายไว้ในงานที่แต่งก่อนสึกจากพระ คือ *“รำพันพิลาป”* เป็นคำกลอนอย่างหยดย้อย รวมถึง ๑๑๖ คำ จนจบเรื่องก็มาแทรกไว้สั้น ๆ อีก ในนิทานตอนที่ ๕๑ หน้า ๑๐๓๗ หลังจากที่กรมหมื่นอัปสรสุดาเทพทรงเลิกจากการถือศีลภาวนาเป็นชีพราหมณ์ จนมีการใช้คำว่า *“สึกชี”* จึงขอยกมาแสดงไว้ในที่นี้ ตามลำดับ คือ

“ฝ่ายพระหน่อวรนาถราชบุตร *ลินสมุทรตั้งแต่พระแม่สอน*
ค่อยคิดเห็นเล่นสนุกไม่ทุกข์ร้อน *ร้องละครเมื่ออิเหนาเข้ามะละกา*
พระอุ้มองค์นงลักษณ์ใส่ตักไว้ *ชี้ชวนให้ศรีสวัสดิ์ชมมัจฉา*
หนุ่มน้อยน้อยคอยรับทับรำมะนา *ค่อยช้าช้าเฉื่อยเสียงสำเนียงนวล”*
“พระฟังคำร่ำแถลงแจ้งประจักษ์ *เหมือนพบพักตร์เสาวคนธ์วิมลโฉม*
เป็นฤๅษีพี่จะได้ไปเป็นโยม *ปลอบประโลมลองวิชาของตาครู*
แม้สมนึกสึกชีเหมือนอิเหนา *ไม่ปลอดเปล่าเปลื้องปลดที่อดสู*
จะบวชตามทรามวัยลอบไปดู *มิให้ผู้อื่นแจ้งจะแพร่งพราย”*

เรื่องอิเหนาดังกล่าว ผู้เขียนเข้าใจว่าพร้อม ๆ กันนั้น สุนทรภู่เอาไปขยายความเป็นเรื่องชวนสนุกหยอกล้อ โดยอุ้มใส่ตัก เป็นนัยถึงกรมหมื่นอัปสรสุดาเทพ ไว้ในบทรำพันฝัน ของ *“รำพันพิลาป”* อย่างยืดยาวจนจบเรื่อง คำกลอนที่น่าสนใจ คือ

“แม้นรับรักหักว่าเมตตาตอบ *เมื่อผิดชอบผ่ายหน้าจะพาหนี*
เหมือนอิเหนาเขาก็รู้ไม่สู้ดี *แต่เพียงพี่นี้ก็ได้ด้วยง่ายดาย”*

“โดยหากว่าถ้าไปปะเรือสลัด
จะอุ้มวางกลางตักสะพักไว้
แล้วจะใช้ใบเยื้องไปเมืองเทศ
ทั้งหนุ่มสาวเกล้ามวยสวยโสภา
ล้วนนุ่งห่มโขมพัสตร์ถือสัจศีล
แลพิลึกตึกตั้งล้วนมั่งมี
“แล้วจะชวนนวลละอองตระกองอุ้ม
ไปเกาะที่อิเหนาชาวชวา
“รูปก็งามนามก็เพราะเสนาะนาม
เดิมของแขกแตกฝ่าหรั่งไปตั้งตึก
เมื่อครั้งนั้นปันหยีอุ้มวียะดา
แม้นเหมือนหมายสายสุดใจไปด้วยพี่
ประคองเคียงเอียงเอกเขนกนอน
แล้วจะใช้ใบบากออกจากฝั่ง
ศรีสวัสดิ์แพรวจะพรั่นประหวั่นไหว
โบกธงชัยให้จังงังกำบังตา
ชมประเภทพวกแขกแปลกภาษา
แต่งกายาอย่างพราหมณ์งามงามดี
ใส่เพชรนิลแนมประดับสลับสี
ชาวบุรีขี่รถบทจรฯ”
ให้ชมเพลินเนินมะงุมมะงาหรา
วงศ์อสัญแดหวาน่าหัวเราะ”
จะพาข้ามเข้าละเมาะเกาะมาลากา
แลพิลึกครึกครื้นขายปืนผา
ชี้ชมสัตว์มัจฉาในสาครฯ
จะช่วยชี้ชมตลิ่งเหล่าสิงขร
ร้องละครอิเหนาเข้ามาลากา
ไปชมละเมาะเกาะวังกัลพังหา”

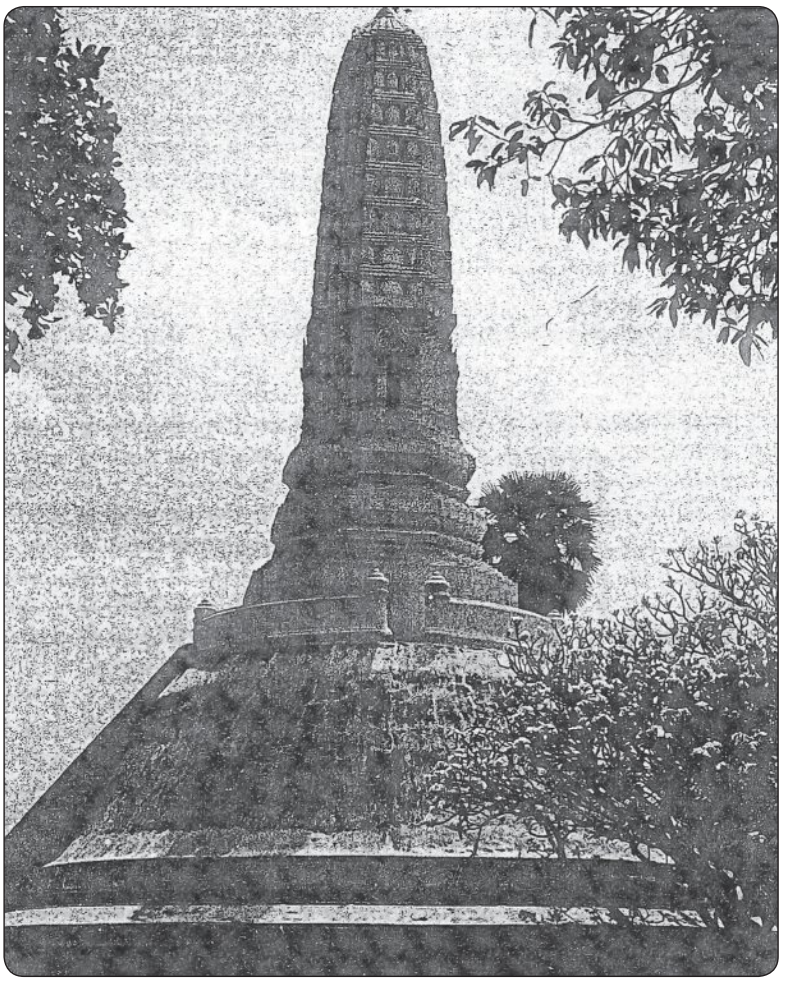
น่าสังเกตว่า คำกลอนดังตัวอย่างจาก *“รำพันพิลาป”* ที่ยกมานี้ แต่งขึ้นจากเค้าของเหตุการณ์เดียวกัน คือ ระหว่างสุนทรภู่กับกรมหมื่นอัปสรสุดาเทพ ที่บริเวณเกาะเกร็ด ดังกล่าวมาแล้ว แต่เป็นในนิทานพระอภัยมณี ตอนที่ ๔๘-๕๑ หน้า ๙๖๗, ๙๗๖, ๙๘๐, ๙๘๑, ๙๘๒, ๙๙๙, ๑๐๐๒, ๑๐๒๐, ๑๐๓๔

วันเดือนปีแต่ง *“นิราศพระประธม”*

จากนั้นสุนทรภู่ก็เดินทางไปแต่ง *“นิราศพระประธม”* ในวันจันทร์ขึ้น ๕ ค่ำ เดือน ๑๒ ครั้งนี้อีกเช่นกัน ซึ่งตรงกับวันที่ ๗ พฤศจิกายน ปีขาล พ.ศ. ๒๓๘๕ เข้าใจว่าตรงกับเทศกาลงานฉลองประจำปี ในวันเพ็ญเดือน ๑๒ สุนทรภู่ยังได้กล่าวถึงสิ่งแวดล้อมที่ละม้ายกับครั้งเดินทางผ่าน จากกรุงเทพฯ ไปเพชรบุรีในปีฉลูที่ผ่านมา ๑ ปี พอดี ตรงกับในนิทานพระอภัยมณี ตอนที่ ๔๕ หน้า ๙๐๒, ๙๑๐ ซึ่งได้กล่าวไปแล้ว ส่วนครั้งนี้มีตามลำดับ ว่า

“ถวิลวันจันทร์ทิวาขึ้นห้าค่ำ
พอเสียงย่ำยามสองกลองประโคม
อนาถหนาวนึกเคยได้เชยโฉม”
ระดะดาษดอกดวงบัวหลวงสลอน
ลงนาวาคลาเคลื่อนออกเลื่อนลำ
น้ำค้างย้อยพรอยพรมเป็นลมว่าว
“ทั้งสระมีสี่มุมปทุมชาติ

บ้างร่วงโรยโปรยปรายกระจายจร
มีเต่าปลาอาศัยอยู่ในน้ำ
ฝูงกริมกรายรายเรียงขึ้นเคียงคอย
เหมือนด้วยรักหนักหน่วงไม่ร่วงหล่น
แสนสนุกรุกขชาติดาษเดียร
หอมเกสรเสาวคนธ์ที่หล่นลอย
บ้างผุดดำโดดคะนองพ่นฟองฝอย
จะคาบสร้อยเสาวคนธ์ว่ายวนเวียน
ไห้เวียนวนหวั่นจิตตะขวิดตะเขวียน
เที่ยวเดินเวียนวนชมประธมทองฯ”



รูปที่ ๕ พระประธม หรือพระปฐมเจดีย์องค์เดิมที่จำลองไว้ที่ด้านใต้ของพระเจดีย์องค์ปัจจุบัน พระประธมองค์จริงที่สุนทรภู่ได้เห็น ถูกสร้างครอบตั้งแต่ พ.ศ. ๒๓๙๖ สมัยพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว และต่อมาใน พ.ศ. ๒๔๐๓ ได้ครอบเป็นพระเจดีย์ขนาดใหญ่สูงประมาณ ๑๒๐ เมตร พร้อมวิหาร ๔ ด้าน และระเบียงโดยรอบ

ในการเดินทางไปแต่ง *"นิราศพระประธม"* หลังทำศพบิดาและมารดา สุนทรภู่คงจะเชื่อแน่แล้วว่าหลังจากสึกมาครั้งนี้ ขณะอายุได้ ๕๖ ปี ตนคงจะต้องได้รับพระอุปการะจากสมเด็จเจ้าฟ้าจุฬามณี กรมขุนอิศเรศรังสรรค์ ดังนั้น เมื่อได้มีโอกาสเขียนคำกลอน จึงพาดพิงถึงพระองค์ ที่ยังได้ทรงมีพระเมตตาช่วยกลบเกลื่อน หรือหาที่หลบให้แก่ตน ในกรณีกับกรมหมื่นอัปสรสุดาเทพ ที่ทรงมีพระประวัติสมทบทุนส่วนพระองค์ สร้างเป็นวัดเทพธิดารามจนสำเร็จ และสุนทรภู่ก็ขอพระกรุณาที่ได้ล่วงเกิน ขออย่าทรง *"แค้นเคือง"* เป็นคำกลอนผูกเรื่องแสดงความเกี่ยวข้องกัน ระหว่างเรื่องต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว และต่อไป ว่า

"ถึงล่วงแล้วแก้วเกิดกับบุญฤทธิ์ *ยังช่วยปิดปกอยู่ไม่รู้สูญ*
สิ้นแผ่นดินทินกรรอนจำรูญ *ให้เพิ่มพูนพอสว่างหนทางเดิน*
ดังจินดาห้าดวงช่วงทวีป *ได้ชูชีพช่วยทุกข์เมื่อฉุกเฉิน*
เป็นทำนุปอุปถัมภ์ไม่กั้นเกิน *จงเจริญเรียงวงศ์ทรงสุธาฯ"*
"อนึ่งน้อมจอมนิกรอัปสรราช *บำรุงศาสนาสงฆ์ทรงสิกขา*
จงไพบูลย์พูนสวัสดิ์วัฒนา *ชนมาหมื่นแสนอย่าแค้นเคืองฯ"*

ไม่ปรากฏมีข้อความเป็นคำกลอนที่ชัดเจนในนิทานพระอภัยมณี เกี่ยวกับการเดินทางไปแต่ง *"นิราศพระประธม"* โดยหลังจากแต่งเป็นเค้าการทำศพบิดาและมารดาเมื่อเริ่มตอนที่ ๕๒ แล้ว สุนทรภู่ก็ไปกล่าวต่อไว้อีก เป็นคำกลอนตอนเดียวกันอยู่ใน หน้า ๑๐๗๓ ว่า

"แล้วเร่งรัดจัดเกณฑ์ทำเมรุใหญ่ *สมทบไพร่พวกพหลพลขันธ์*
อีกทึกครึกครื้นทุกคืนวัน *แต่การนั้นยังไม่เสร็จสำเร็จการฯ"*

ผู้เขียนเข้าใจว่า การที่สุนทรภู่จบตอนนี้ลงอย่างห้วน ๆ ดังกล่าว น่าจะเป็นเพราะหมดเล่มสมุดไทย แล้วไปแต่งต่อเรื่องทำศพบิดาและมารดาจนสำเร็จ ในตอนที่ ๕๕ หน้า ๑๑๑๙ เป็นคำกลอน ว่า

"ด้วยองค์พระชนกชนนี *จอมบุรีรัตนานิคาลัย*
พระเชษฐาพาพระวงศ์ไปปลงศพ *ตามโบราณผ่านพิภพสบสมัย"*

วันเดือนปีแต่ง *"นิราศเมืองเพชร"*

การเดินทางไปแต่ง *"นิราศเมืองเพชร"* หรือเมืองผลึก และเมืองลังกาตามนิทาน แต่เริ่มด้วย *"ลงนาวาหน้าวัดนมัสการ"* ซึ่งควรเป็นวัดอรุณหรือวัดแจ้งทันที น่าจะหลังจากได้มาอยู่วังในพระอุปถัมภ์ของสมเด็จเจ้าฟ้าจุฬามณี กรมขุนอิศเรศรังสรรค์ ที่พระราชวังเดิม ธนบุรี โดยในนิทานพระอภัยมณี ที่

สุนทรภู่ได้แต่งพร้อมกัน มีเค้าคำกลอนที่เริ่มไว้ในตอนที่ ๕๒ หน้า ๑๐๕๕-๑๐๕๖ แสดงการออกเดินทางไปเพชรบุรี หรือเมืองผลึก ตามนิทาน ว่า

“ลอยลำเลื่อนเคลื่อนคลาจากหน้าวัง *ได้กำลังลมดีได้คลื่นใบ*
แล่นออกจากปากอ่าวลมว่าวส่ง *สะบัดธงปลายปลิวหวิวหวิวไหว*
ดูอ้างว้างกลางทะเลว้าเหว่ใจ *ชลาลัยลมคลื่นเสียงครื้นครึกฯ*
หน่อกษัตริย์ตรัสสั่งให้ตั้งเข็ม *ออกแล่นเล็มจะไปเข้าอ่าวผลึก*
พอแดดลบพลบค่ำออกน้ำลึก *เรือสะทึกสะท้านเลื่อนสะเทื้อนคลอน”*

จากขั้นตอนของเวลาที่มีสภาพบังคับ ต่อเนื่องสอดคล้องกันระหว่างงานคำกลอนชิ้นต่าง ๆ ของสุนทรภู่ เริ่มจากงาน *“กาพย์พระไชยสุริยา”* ซึ่งแต่งก่อน *“โคลงนิราศสุพรรณ”* จึงควรมีการแต่งในช่วงเวลาหลังเหตุการณ์ในเดือน ๘ ราว ๓-๔ เดือน ที่สุนทรภู่ได้หลบไปอยู่เพชรบุรี ระหว่างเดือน ๑๒ ถึงเดือนอ้าย หรือเดือนยี่ ปีฉลู พ.ศ. ๒๓๘๔ ต่อจากนั้นตั้งแต่เดือน ๓ ปีฉลู ถึงเดือน ๑๑ ปีขาล พ.ศ. ๒๓๘๕ จึงเป็นการแต่ง *“โคลงนิราศสุพรรณ”* แล้วก็มาแต่ง *“รำพันพิลาป”* ที่วัดเทพธิดาราม ในระยะออกพรรษาปลายเดือน ๑๑ ของปีเดียวกัน ซึ่งก็คือก่อนที่สุนทรภู่จะลาสิกขามาทำศพบิดาและมารดาดังกล่าวมาแล้ว ก่อนเดินทางไปแต่ง *“นิราศพระประธม”* ในเดือน ๑๒ และต่อมาเป็น *“นิราศเมืองเพชร”* ในระหว่าง ๕ วันของเดือนอ้าย หรือเดือนธันวาคม ปีขาล พ.ศ. ๒๓๘๕ *(ทศพร วงศ์รัตน์, ๒๕๕๒ : ๑-๒๘๘)*

มีเรื่องที่น่าสังเกตเป็นอย่างยิ่ง คือ ในการแต่ง *“พระอภัยมณีคำกลอน”* ตอนที่ ๔๕, ๔๖ ซึ่งตรงกับระยะเวลาที่สุนทรภู่อยู่เพชรบุรี และได้แต่ง *“กาพย์พระไชยสุริยา”* พร้อมกันในนิทานหน้า ๘๙๗, ๙๐๔-๙๐๕, ๙๑๒-๙๑๓, ๙๒๗ สุนทรภู่ได้กล่าวถึงแผ่นดินไหว กลืนไปกับบทอัศจรรย์เป็นคำกลอน โดยเฉพาะในหน้า ๘๙๗ ที่มีคำว่า *“เหมือนเมื่อปีมีวันจันทร์อังคาส”* ดังเคยกล่าวมาแล้ว และอื่น ๆ อีกหลายครั้งตามลำดับ ในไม่กี่หน้า และก็คงเป็นตอนแรกที่เริ่มแต่งถวายกรมหมื่นอัปสรสุดาเทพด้วย คือ

“พลางอิงแอบแนบหลังนั่งกระแซะ *ปะเหลาะปะแหละลูบต้องทำนองใน*
ประคองนางวางแท่นแสนสวาท *สัมผัสพาดเพิ่มจิตพิสมัย*
อัศจรรย์ลั่นเลื่อนสะเทื้อนไป *ที่ถ่านไฟเก่าดับก็กลับโพลง*
เหมือนเมื่อปีมีวันจันทร์อังคาส *โลกธาตุเลื่อนลั่นควันโขมง*
เขาเนมินท์อิสินธรเคลื่อนคลอนโคลง *ทะเลโล่งลมคลื่นเสียงครื้นครึก*
พวกสำเภาเหล่าที่รอค้างมรสุม *ออกแล่นลุ้มกลางคืนจนดื่นดึก”*
“ค่อยสั่นคลอนถอนหลุดหลากสุดใจ *แผ่นดินไหวเลื่อนลั่นเสียงครั่นครื้น*

ทวีปวังลังกาสุธาหย่อน เหมือนจะคลอนโคลงคว่ำน้ำเป็นคลื่น”
“มาชมเตร็จเพชรนิลแผ่นดินไหว เพราะจะได้ปรากฏเป็นยศศักดิ์”
“ฝ่ายลูกสาวเจ้าลังกาตรึกตราเหตุ ซึ่งอาเพศเพชรนิลแผ่นดินไหว
จะร้ายดีมิได้แจ้งยังแคลงใจ จึงตรัสใช้นางรำภาอย่าช้าการฯ”
“กูจับยามตามตำราไตรดายุค ยังเป็นทุกข์ที่ว่าสุธาไหว
โศลกว่านารีจะหนีไป เอาหัวใจเมืองออกนอกบุรินทร์”
“แล้วทูลท้าวว่าเข้าขุดพอหลุดเลื่อน สุธาสะเทื้อนโคลงเคลงน่าเกรงขาม”

ส่วนใน *“กาพย์พระไชยสุริยา”* ก็มีกล่าวสั้น ๆ แต่ตรงกันไว้ว่า

(ยานี ๑๑)
“วันนั้นครั้นแผ่นดินไหว เกิดเหตุใหญ่ในปะถะพี
เล็งดูรู้คะดี กาลกิณีสี่ประการ
ประกอบชอบเป็นผิด กลับจริตผิดโบราณ
สามัญอันธพาล ผลาญคนซื่อถือสัตย์ธรรม์”

ถ้าถือตามเนื้อหา เช่นที่ก็มีกล่าวอยู่ในนิทานพระอภัยมณี ตอนที่ ๔๕-๕๑ คำกลอนตอนนี้ก็เป็นการแสดงความสำนึกผิดของสุนทรภู่ และเป็นอัปมงคลร้ายแรง ขั้นเสนียดจัญไร ที่เทพยดาฟ้าดินก็ไม่พอใจและสำแดงด้วยแผ่นดินไหว *(ทศพร วงศ์รัตน์, ๒๕๕๔ : ๑-๑๔๔)*

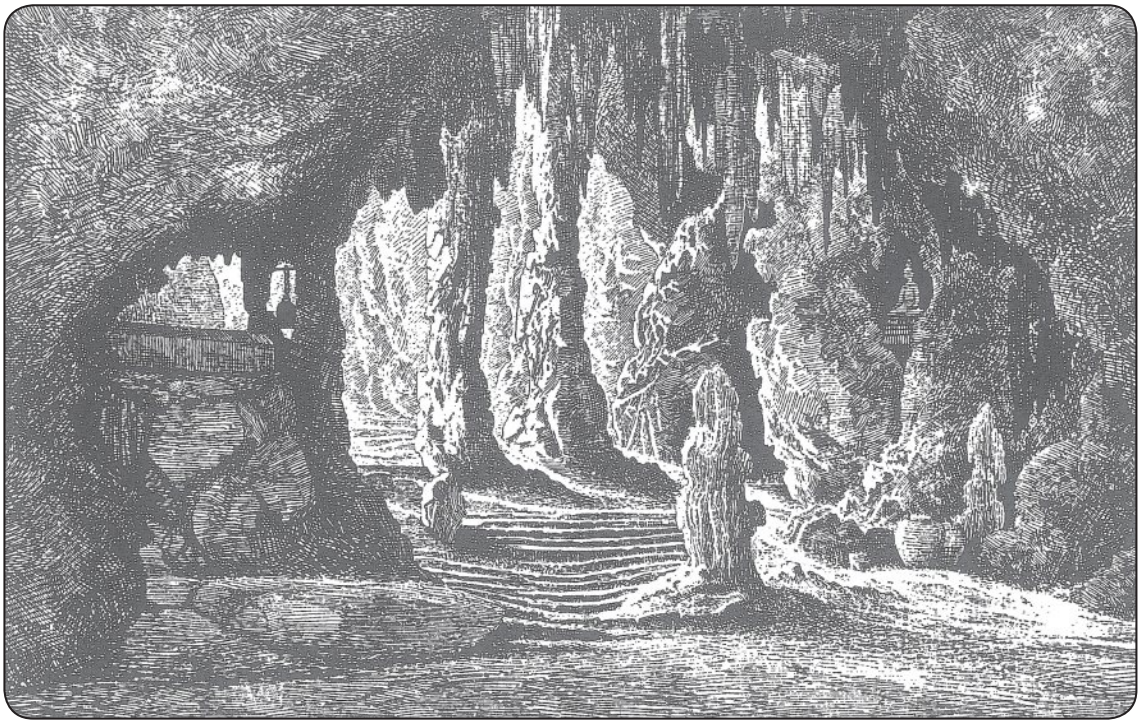
ความรู้เรื่องบาปบุญคุณโทษดังกล่าว สุนทรภู่ก็เคยพูดถึง แต่อาจต่างไป ไว้ในนิทานพระอภัยมณี ตั้งแต่ในตอนที่ ๑๔ หน้า ๒๐๓ เป็นคำกลอนเทศนานางจัน ครั้งติดตามมาทวงหนูพัดคืนที่เพชรบุรี ในปีชวด พ.ศ. ๒๓๕๙ ว่า

“แล้วทรงเดชเทศนาภาษาไทย ด้วยความในโลกีย์สี่ประการ
คือรูปรสกลิ่นเสียงเคียงสัมผัส ที่คฤหัสถ์หวงแหนไม่แก่นสาร
ครั้นระงับดับขันธสันดาน ย่อมสาธารณ์เปื่อยเน่าเสียเปล่าดาย”

ด้วยเหตุการณ์ที่ตรงกันได้ในลักษณะนี้ โดยเฉพาะจากคำว่า *“วันนั้น”* ผู้เขียนจึงต้องคิดว่าน่าจะเป็นเรื่องจริง แม้จะไม่ปรากฏมีอยู่ในบันทึกของพงศาวดาร ยิ่งกว่าที่จะพาดพิงถึงแผ่นดินไหวครั้งที่ผ่านมา ใน ปีชวด พ.ศ. ๒๓๘๓ ตรงกับวันพุธ เดือน ๑๑ แรม ๓ ค่ำ เวลาเช้า ๓ โมง ดังมีกล่าวอยู่ใน *“พงศาวดาร*

กรุงรัตนโกสินทร์ รัชกาลที่ ๓" ของเจ้าพระยาทิพากรวงศมหาโกษาธิบดี พ.ศ. ๒๕๔๗ และอาจจะเป็นครั้งเดียวกับที่เป็นฉากอยู่ในนิทาน ตอนที่ ๔๔ โดยครั้งนี้ *"วันนั้น"* สุนทรภู่ได้ย้อนนำมาใช้แต่งสวมกับเรื่องของตัวเองกับกรมหมื่นอัปสรสุดาเทพ ใน *"จันทร์อังคาส"* ของตอนที่ ๔๕ และในเรื่อง *"กาพย์พระไชยสุริยา"* แล้วไปเล่าเป็นนิทานอีกครั้ง ในตอนที่ ๕๑ อย่างไรก็ตาม *"วันนั้น"* อาจจะมีพื้นฐานมาจากพายุฝนฟ้าคะนองอย่างรุนแรงที่เพชรบุรีก็เป็นได้ ที่น่าสนใจคือ หลายครั้งที่มีปรากฏการณ์ธรรมชาติเป็นแผ่นดินไหว หรืออสุนีบาต เช่นใน พ.ศ. ๒๓๗๖, ๒๓๗๘, ๒๓๘๐, ๒๓๘๓ สุนทรภู่มักจะหาเรื่องบันทึกเป็นบทอัศจรรย์ไว้ในนิทาน ได้แก่ ตอนที่ ๓๖, ๓๗, ๔๐, ๔๕ หน้า ๖๘๙-๖๙๐, ๗๒๒-๗๒๓, ๗๘๒, ๘๙๗, ๘๙๙, ๙๐๔, ๙๐๕, ๙๑๒, ๙๑๓

อนึ่ง ในนิทาน *"พระอภัยมณีคำกลอน"* ตอนที่ ๔๕ เดียวกันนี้ หน้า ๙๑๔ ยังมีคำกล่าวถึง *"ดินถนัน"* ที่เป็นยาอายุวัฒนะ และสุนทรภู่เคยกล่าวถึงมาก่อน ในตอนที่ ๓๑ ขณะเดินทางไปเพชรบุรี ในเดือนมกราคม ปีเถาะ พ.ศ. ๒๓๗๔ เพื่อบังสุกุลศพขุนแพ่ง การอ้างถึง *"ดินถนัน"* ครั้งหลังนี้ จึงเท่ากับเป็นข้อยืนยันได้อีกว่า ขณะนั้น คือระหว่างเดือน ๑๒ ถึงเดือนอ้าย หรือเดือนยี่ ปีฉลู พ.ศ. ๒๓๘๔ สุนทรภู่น่าจะ



รูปที่ ๖ ถ้ำเขาหลวง จังหวัดเพชรบุรี ตั้งอยู่ห่างจากตัวเมืองด้านทิศเหนือ ประมาณ ๒ กิโลเมตร จากหนังสือ King Maha Mongkut of Siam โดย John Blofeld, 1987

อยู่ที่เพชรบุรี และนึกถึงประสบการณ์ในเรื่องนี้ที่นั่น มากกว่าที่อื่นใด ซึ่งก็ไม่เคยกล่าวถึงที่ไหนอีก

ยังมีข้อยืนยันการมาเพชรบุรี ในครั้งแต่ง *"กาพย์พระไชยสุริยา"* และนิทานพระอภัยมณี ตอนที่ ๔๕ ดังกล่าวมาแล้วอยู่อีกในนิทานเรื่องนี้ หน้า ๑๐๕๘ ของตอนที่ ๕๒ ซึ่งเป็นการมาเมืองนี้ในราวเดือนอ้าย หรือธันวาคม ปีเถาะ พ.ศ. ๒๓๘๕ *(ทศพร วงศ์รัตน์, ๒๕๕๒ : ๑-๒๘๘)* หรืออีก ๑ ปีต่อมาพอดี ในครั้งแต่ง *"นิราศเมืองเพชร"* ถวายสมเด็จเจ้าฟ้าจุฑามณี กรมขุนอิศเรศรังสรรค์ ที่ทรงอุปถัมภ์สุนทรภู่อยู่ขณะนั้น คำกลอนนั้น คือ

"แล้วตรัสถามตามทำนองถึงสองกษัตริย์ ยังไพบูลย์พูนสวัสดิ์หรือขัดขวาง
แต่จากมากว่าปีอันพี่นาง ยังได้ข่าวคราวบ้างหรืออย่างไรฯ"

ซึ่ง *"พี่นาง"* ในที่นี้ก็คือ หม่อมบุนนาค หรือ ฤๅษีแห่งเกาะแก้วพิสดารนั่นเอง

เอกสารประกอบการเรียบเรียง

คุณสุวรรณ. **พระอาการประชวรของกรมหมื่นอัปสรสุดาเทพ.** ๒๓๘๖.

ทศพร วงศ์รัตน์. **พระอภัยมณี... มาจากไหน?.** กรุงเทพฯ : บริษัทคอมฟอร์ม จำกัด; ๒๕๕๐. หน้า ๑-๒๙๒.

ทศพร วงศ์รัตน์. **สุนทรภู่แต่งนิราศพระแท่นดงรังทั้งสองสำนวน.** วารสารราชบัณฑิตยสถาน ๒๕๕๑; ๓๓ (๑) : ๒๐๑-๒๒๐.

ทศพร วงศ์รัตน์. **ลายแทงของสุนทรภู่.** กรุงเทพฯ : วันทูพริ้นท์; ๒๕๕๒. หน้า ๑-๒๘๘.

ทศพร วงศ์รัตน์. **สุนทรภู่บอกเหตุน้ำท่วมจากพุทธทำนาย.** กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด วันทูพริ้นท์; ๒๕๕๔. หน้า ๑-๑๔๔.

ทิพากรวงศมหาโกษาธิบดี, เจ้าพระยา. **พระราชพงศาวดารรัตนโกสินทร์ รัชกาลที่ ๓.** กรุงเทพฯ : กรมศิลปากร; ๒๕๔๗. หน้า ๑-๑๙๐.

สุนทรโวหาร (ภู่), พระ. **โคบุตร.** ๒๓๔๙-๒๓๕๐.

สุนทรโวหาร (ภู่), พระ. **สิงหไกรภพ.** ๒๓๖๕-๒๓๖๗.

สุนทรโวหาร (ภู่), พระ. **พระอภัยมณีคำกลอน.** ๒๓๖๖-๒๓๘๘.

สุนทรโวหาร (ภู่), พระ. **นิราศภูเขาทอง.** ๒๓๗๓.

สุนทรโวหาร (ภู่), พระ. **นิราศอิเหนา.** ๒๓๗๗.
สุนทรโวหาร (ภู่), พระ. **ลักษณวงศ์.** ๒๓๖๔-๒๓๖๗, ๒๓๘๐-๒๓๘๕.
สุนทรโวหาร (ภู่), พระ. **กาพย์พระไชยสุริยา.** ๒๓๘๔.
สุนทรโวหาร (ภู่), พระ. **โคลงนิราศสุพรรณ.** ๒๓๘๔-๒๓๘๕.
สุนทรโวหาร (ภู่), พระ. **รำพันพิลาป.** ๒๓๘๕.
สุนทรโวหาร (ภู่), พระ. **นิราศพระประธม.** ๒๓๘๕.
สุนทรโวหาร (ภู่), พระ. **นิราศเมืองเพชร.** ๒๓๘๕.
สุนทรโวหาร (ภู่), พระ. **บทละครเรื่องอภัยนุราช.** ๒๓๘๕-๒๓๙๘.
หวน พินธุพันธ์. **ประวัติศาสตร์เมืองนนทบุรี.** กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์; ๒๕๔๗. หน้า ๑-๑๒๔.
อลิสา รามโกมุท. **เกาะเกร็ด : วิถีชีวิตชุมชนมอญริมน้ำเจ้าพระยา.** กรุงเทพฯ : กองวรรณกรรมและประวัติศาสตร์ กรมศิลปากร; ๒๕๔๒. หน้า ๑-๑๐๑.

Abstract **Publicized Dates of Five Articles by Sunthorn-Phu During 2384-2385 B.E.**

Thosaporn Wongratana
Fellow of the Academy of Science, The Royal Institute, Thailand

The author's hypothesis is that all of Sunthorn Phu's writings are likely the same story based on his various life experiences. Depending upon the internal and external evidences within five articles and certain parts of the Tale of Pra Apai-manee prepared during his serious personal problem with a princess, B.E. 2384-2385, the editing date of each article can be denoted. In this paper the author proposes his proceedings for the exact date of กาพย์พระไชยสุริยา, โคลงนิราศสุพรรณ, รำพันพิลาป, นิราศพระประธม and นิราศเมืองเพชร respectively and rendered them as one continuous story.

Keywords: Sunthorn Phu, Phu's articles, dates of writing

วารสารราชบัณฑิตยสถาน
ปีที่ ๓๙ ฉบับที่ ๒ เม.ย.-มิ.ย. ๒๕๕๗

วิวัฒนาการ อนุกรมวิธาน และการกระจายตัวของผึ้งในประเทศไทย

สิริวัฒน์ วงษ์ศิริ
ภาคีสมาชิก สำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้
สิทธิพงษ์ วงศ์วิลาศ
โครงการจัดตั้งวิทยาเขตนครสวรรค์ มหาวิทยาลัยมหิดล

บทคัดย่อ

วิวัฒนาการของแมลงสังคมมีมานานไม่ต่ำกว่า ๓๐๐ ล้านปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งปลวกจัดเป็นพวกที่มีระบบสังคมแท้ มีบรรพบุรุษที่มีวิวัฒนาการร่วมกับบรรพบุรุษแมลงสาบป่า มีมาก่อนที่ปรากฏในแมลงสังคมของผึ้ง

หลักฐานการค้นพบซากดึกดำบรรพ์ของผึ้งในสภาพที่สมบูรณ์ได้ถูกนำไปใช้อธิบายการเกิดวิวัฒนาการของผึ้งเมื่อ ๘๐-๑๒๐ ล้านปีที่ผ่านมา ผึ้งเป็นแมลงสังคมที่ได้แยกสายวิวัฒนาการออกจากแมลงจำพวกอื่นได้อย่างชัดเจน โดยมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาและพฤติกรรมที่สอดคล้องกับการเก็บเกสรจากพืชมีดอกมาใช้เป็นอาหารสำหรับดำรงชีวิต ซึ่งเป็นความสัมพันธ์กันแบบพึ่งพาอาศัย ลักษณะของผึ้งที่มีตะกร้าเก็บเกสรจึงถูกจำแนกออกเป็น ๔ วงศ์ย่อย คือ ผึ้งกล้วยไม้ (**Euglossini**) ผึ้งหึ่ง (**Bombini**) ชันโรง (**Meliponini**) และผึ้ง (**Apini:** ***Apis***) ผึ้งในสกุล ***Apis*** จัดได้ว่ามีวิวัฒนาการสูงกว่าผึ้งสกุลอื่น ๆ และจากการวิเคราะห์ข้อมูลทาง **DNA** พบทั้งหมด ๙ ชนิดจากทั่วโลก คือ ***Apis florea, Apis andreniformis, Apis laboriosa, Apis dorsata, Apis cerana, Apis nigrocincta, Apis koschevnikovi, Apis nuluensis*** และ ***Apis mellifera*** และพบการกระจายตัวในประเทศไทยทั้งหมด ๕ ชนิด คือ ผึ้งหลวง (***Apis dorsata***) ผึ้งพันธุ์ (***Apis mellifera***) ผึ้งโพรงไทย (***Apis cerana***) ผึ้งมิ้ม (***Apis florea***) และ ผึ้งม้าน (***Apis andreniformis***) อย่างไรก็ตาม ผึ้งม้านเป็นผึ้งเพียงชนิดเดียวที่หาพบได้ยากและได้ลดจำนวนลงจนได้สูญหายไปจากพื้นที่บางแห่งแล้ว โดยเฉพาะบริเวณภาคกลางของประเทศไทยที่มีสภาพเป็นชุมชนเมือง

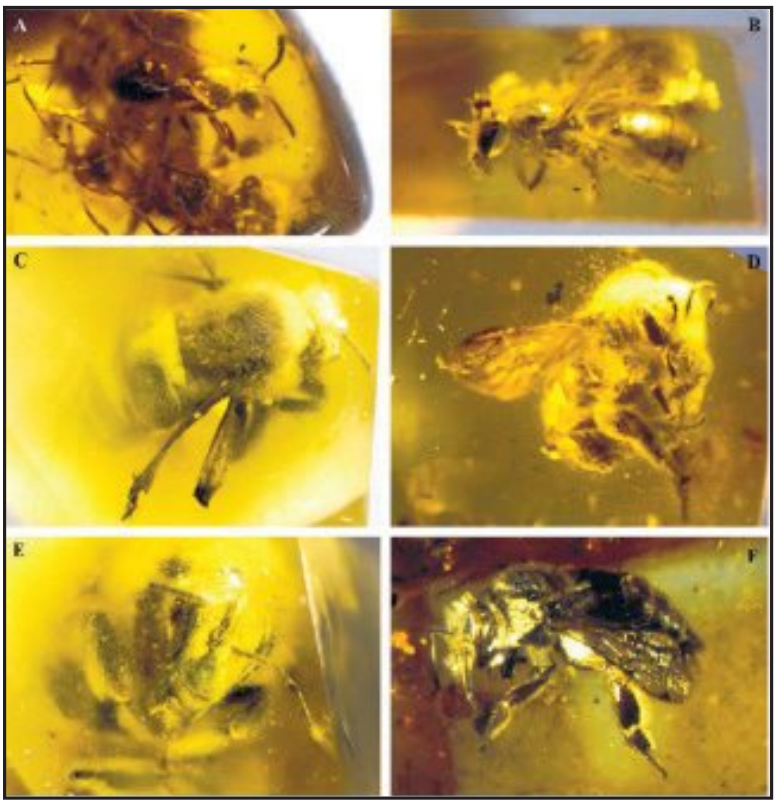
คำสำคัญ : วิวัฒนาการ, แมลงสังคม, ซากดึกดำบรรพ์, ผึ้ง

วิวัฒนาการของแมลงสังคมมีมานานไม่ต่ำกว่า ๓๐๐ ล้านปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งปลวกจัดเป็นพวกที่มีระบบสังคมแท้ มีบรรพบุรุษที่มีวิวัฒนาการร่วมกับบรรพบุรุษแมลงสาบป่า มีมาก่อนที่ปรากฏในแมลงสังคมของผึ้ง

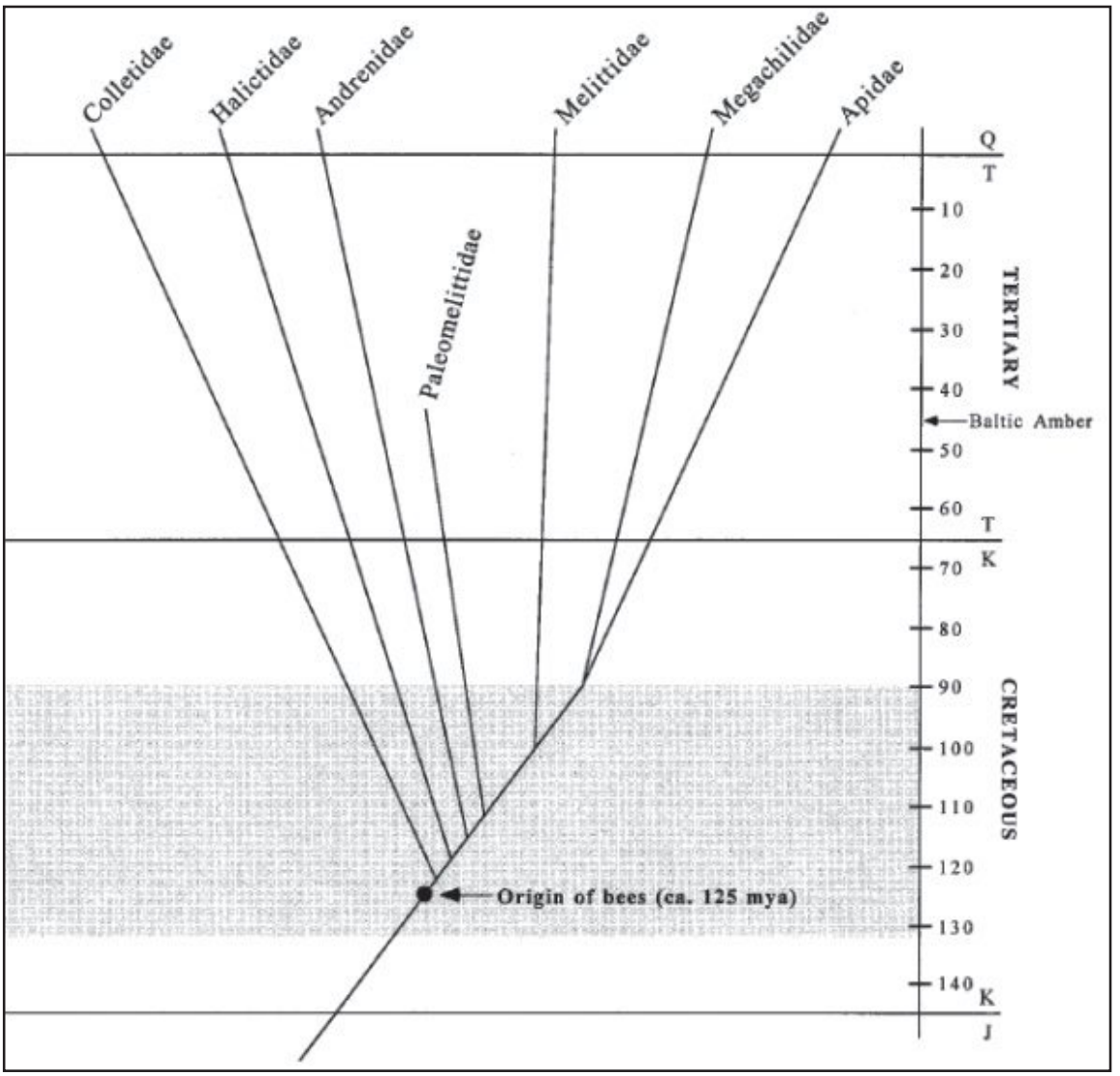
ปัจจุบันนี้ได้มีผู้นำหลักฐานจากซากดึกดำบรรพ์มาใช้อธิบายความเป็นมาของวิวัฒนาการสิ่งมีชีวิต การค้นพบซากดึกดำบรรพ์ (fossil) ผึ้งที่อยู่ในสภาพสมบูรณ์มากนำไปสู่การวิจารณ์ผลทางวิวัฒนาการของผึ้งสกุล *Apis* ได้อย่างน่าเชื่อถือ มีซากดึกดำบรรพ์มากมายที่สวยงามถูกปกป้องด้วยอำพันหรือแผ่นหิน (รูปที่ ๑ และ รูปที่ ๒) และได้ถูกนำมาเก็บไว้เป็นตัวอย่างในการศึกษา *(Seeley, 1985)* เมื่อ ๑๒๐ ล้านปีที่ผ่านมา เหล่าแมลงที่ตอมพืชมีดอกในยุคเริ่มแรกเป็นแมลงจำพวกต่อ (wasp) ที่มีลิ้นสั้น (short-tongued) ปกคลุมไปด้วยขน และอาศัยอยู่ตามโพรงไม้ ตัวเต็มวัยจะพึ่งพิงอาศัยดอกไม้เหล่านั้น โดยออกไปเก็บอาหารจากดอกไม้ดอกหนึ่งไปสู่อีกดอกหนึ่ง ซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยกัน *(Engel, 2001: 5-192)* ดอกไม้เป็นแหล่งอาหารของผึ้ง (bee) ผึ้งมีการพัฒนาลักษณะสัณฐานภายนอกให้เหมาะกับการเก็บเกสรดอกไม้ต่าง ๆ *(Michener, 2000)* ดังนั้น ผึ้งและพืชมีดอกจึงมีความสัมพันธ์กัน โดยที่ผึ้งจะช่วยผสมเกสรให้ดอกไม้ซึ่งเป็นแหล่งอาหารมาตั้งแต่ในอดีตกาล *(Crane et al., 1995: 27-33)*

รูปที่ ๓ แสดงให้เห็นว่า ผึ้งได้แยกออกมาจากวิวัฒนาการชาติพันธุ์ (phylogeny) ของแตน (sphecid wasp) ในยุคครีเทเชียสช่วง ๑๒๐-๑๓๐ ล้านปีที่ผ่านมา *(Engel, 2001: 5-192)* ผึ้งบางชนิดมีความเฉพาะเจาะจงกับชนิดของพืช ในทางตรงกันข้ามยังมีผึ้งชนิดอื่น ๆ ที่ไม่เฉพาะเจาะจงกับชนิดของพืช ปัจจุบันพบว่ามีผึ้ง ๑๗,๐๐๐ ชนิด ซึ่งน้อยกว่าครึ่งหนึ่งจากที่เคยประมาณไว้ ผึ้งที่มีตะกร้าเก็บเกสร (corbiculate bee) ได้ปรากฏขึ้นในช่วง ๙๐-๑๐๐ ล้านปีที่ผ่านมา จัดอยู่ในวงศ์ย่อย (subfamily) Apinae *(Michener, 2000)* ผึ้งเหล่านี้มีลิ้นยาว (long-tongued) มีตะกร้าเก็บเกสร (pollen basket or corbicula) ซึ่งเป็นขนที่แข็งแรงเส้นเดียว พื้นที่รอบ ๆ เป็นหลุม อยู่บริเวณแข้ง (tibia) ของขาคู่ที่ ๓ ใช้สำหรับแทงเกสรดอกไม้ หรือที่เรียกว่าตะกร้าเก็บเกสร (pollen basket) ผึ้งที่มีตะกร้าเก็บเกสรมี ๔ วงศ์ย่อยคือ ผึ้งกล้วยไม้ (orchid bee: Euglossini) ผึ้งหึ่ง (bumble bee: Bombini) ชันโรง (stingless bee: Meliponini) และผึ้ง (honey bee: Apini) *(Oldroyd and Wongsiri, 2006)*

รูปที่ ๑ ซากดึกดำบรรพ์ฮอโลไทป์ของ *Apis henshawi* Cockerell *(ดัดแปลงจาก Engel, 1998: 265-281)*



รูปที่ ๒ ผึ้งวงศ์ Apidae ที่อยู่ในอำพัน (A) พาราไทป์ตัวเมีย *Boreallodape mollyae* Engel, (B) ฮอโลไทป์ตัวเมีย *B. baltica* Engel, (C) ฮอโลไทป์ตัวเมีย *Electrobombus samlandensis* Engel, (D) นีโอไทป์ตัวเมีย *Protobombus hirsutus* Cockerell, (E) ฮอโลไทป์ตัวเมีย *E. samlandensis* และ (F) ฮอโลไทป์ตัวเมีย *Thaummastobombus andreniformis* Engel *(Engel, 2001: 5-192)*



รูปที่ ๓ วิวัฒนาการชาติพันธุ์ของวงศ์ผึ้งที่แยกออกมาในยุคครีเทเชียส *(ดัดแปลงจาก Engel, 2001: 5-192)*

รูปที่ ๔ ผึ้งกล้วยไม้

ผึ้งกล้วยไม้ (Euglossini) เป็นแมลงสังคมที่สร้างรังจากยางไม้อยู่ใต้พื้นดิน พบการกระจายตัวทางตอนใต้และตอนกลางของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยทั่วไปตัวเมียแต่ละตัวจะแยกรังออกมาดูแลตัวอ่อนของตัวเอง *(Michener, 2000)* ลูกตัวเมีย (daughter) ที่ออกมาจะช่วยเลี้ยงดูตัวอ่อน ส่วนตัวผู้จะออกหาอาหารจากดอกกล้วยไม้ และแหล่งอาหารอื่น ๆ *(Robinson, 1984: 68-73)* ยังไม่มีรายงานว่าพบในประเทศไทย

รูปที่ ๕ ผึ้งหึ่ง *(ภาพโดย สิทธิพงษ์ วงศ์วิลาศ)*

ผึ้งหึ่ง (Bombini) เป็นแมลงสังคมซึ่งพบเฉพาะในภาคเหนือของประเทศไทย คล้ายคลึงกับแมลงภู่ แต่แตกต่างกับแมลงภู่อย่างมีนัยสำคัญ แมลงภู่ที่พบทั้งในภาคเหนือและภาคกลางของประเทศไทยมีพฤติกรรมเป็นแมลงสังคมขั้นต้นถึงขั้นกลาง โดยที่หลังจากตัวเมียของผึ้งหึ่งได้รับการผสมพันธุ์แล้ว จะทำหน้าที่เลี้ยงดูตัวอ่อนชุดแรกเอง *(Alford, 1975)* พบการกระจายตัวที่กว้างขวางในแถบอเมริกา เอเชีย ยุโรป และทางตอนเหนือของแอฟริกา *(Goulson, 2003)* ในประเทศไทยมีมากกว่า ๑๐ ชนิดแต่ยังไม่มีรายงานที่ชัดเจน

รูปที่ ๖ ชันโรง *(ภาพโดย สิทธิพงษ์ วงศ์วิลาศ)*

ชันโรง (Meliponini) เป็นแมลงสังคมชั้นสูงที่คล้ายคลึงกับผึ้ง (honey bee) แต่ไม่มีเหล็กใน ภายในรังมีประชากร ๕๐๐-๑๐๐,๐๐๐ ตัวต่อรัง นางพญามีขนาดใหญ่ที่สุดภายในรัง บางชนิดมีนางพญามากกว่า ๑ ตัว และไม่มีตะกร้าเก็บเกสร อาศัยอยู่ในโพรง พบการกระจายตัวในแถบแอฟริกา เอเชีย ออสเตรเลีย รวมถึงตอนกลางและตอนใต้ของอเมริกา มีมากกว่า ๕๐๐ ชนิด และพบในประเทศไทยเพียง ๓๕ ชนิด ในสกุล *Trigona (Oldroyd and Wongsiri, 2006)* และพบเพิ่มอีก ๑ สกุล คือ *Tetragonula (Rasmussen, 2008)*

รูปที่ ๗ ผึ้งหลวง *Apis dorsata (ภาพโดย สิทธิพงษ์ วงศ์วิลาศ)*

ผึ้ง (Apini: *Apis*) เป็นแมลงสังคมที่พบการกระจายตัวในแถบเอเชีย ยุโรป และแอฟริกา มีพฤติกรรมที่แตกต่างไปจากผึ้งที่มีตะกร้าเก็บเกสรกลุ่มอื่น ๆ พบว่านางพญาสามารถผสมพันธุ์กับผึ้งตัวผู้เป็นจำนวนมากในคราวเดียวกัน *(Palmer and Oldroyd, 2000: 235-248)* เช่น ในผึ้งหลวง *A. dorsata* พบว่านางพญาผสมพันธุ์กับผึ้งตัวผู้มากกว่า ๑๐๐ ตัว *(Oldroyd and Wongsiri, 2006)* และมีการเต้นรำเป็นภาษาเพื่อสื่อสารกันในกลุ่มผึ้งงาน เพื่อบอกแหล่งอาหารและสถานที่สร้างรัง อย่างไรก็ตาม วิวัฒนาการของผึ้งมีความสำคัญเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมตลอดจนการสร้างรังของผึ้ง รวมไปถึงชีววิทยา และวัฏจักรชีวิตที่แตกต่างกัน ซึ่งล้วนเกิดจากการควบคุมโดยยีน

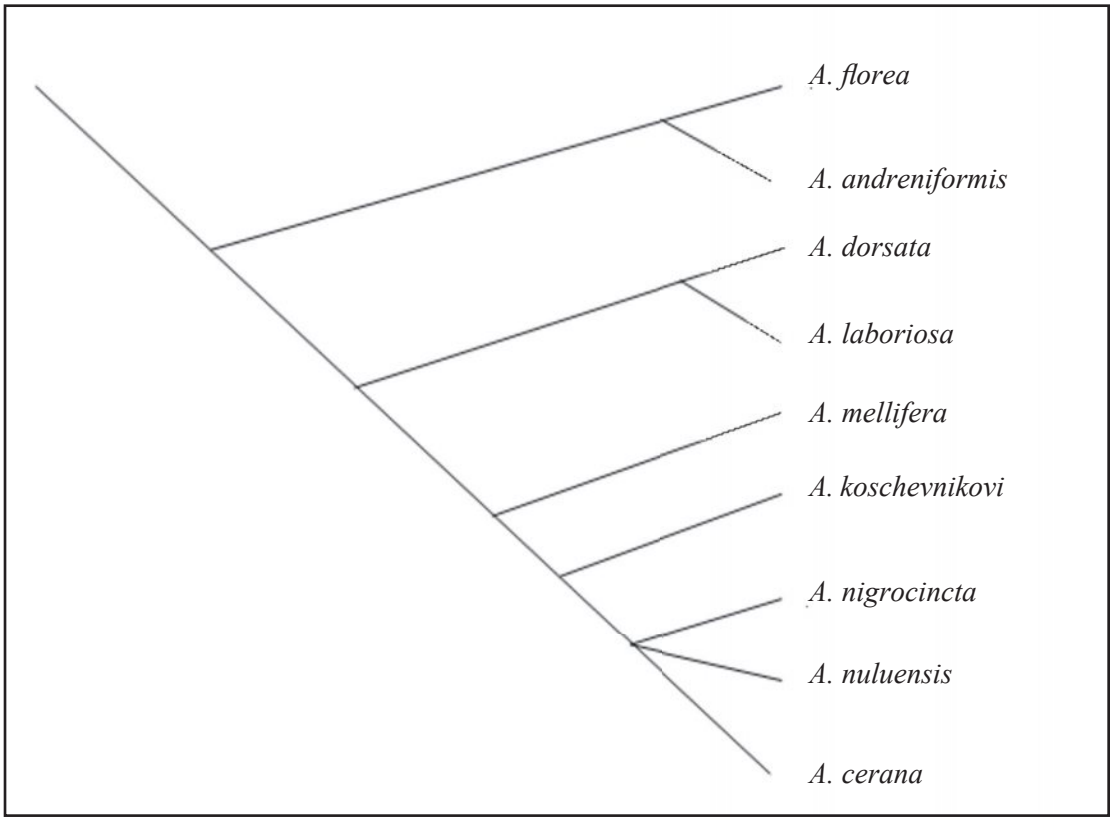
วิวัฒนาการชาติพันธุ์ของกลุ่มผึ้งที่มีตะกร้าเก็บเกสรยังเป็นที่โต้เถียงกันโดยใช้ลักษณะทางชีววิทยาระดับโมเลกุลกับสัณฐานวิทยาและพฤติกรรม ซึ่งพบว่าบรรพบุรุษของผึ้งปรากฏขึ้นเมื่อ ๓๕-๔๕ ล้านปีที่ผ่านมาในอินเดีย-ยุโรป และในสมัยโอลิโกซีนถึงไมโอซีน อากาศหนาวเย็นเป็นเหตุให้ผึ้งในยุโรปสูญพันธุ์ แต่ยังอยู่ได้ในเขตร้อนชื้นแถบเอเชีย บรรพบุรุษผึ้งรังเดียว ปรากฏในช่วง ๑๐ ล้านปีก่อน หลังจากนั้น ๖ ล้านปีต่อมาผึ้งโพรงที่อยู่ในโพรงไม้ โพรงหิน หรือโพรงดิน ที่มีหลายรังซ้อนกันเริ่มปรากฏในแถบภูเขาหิมาลัย และได้แพร่กระจายไปทางทิศตะวันออกและทางทิศเหนือ จนกระทั่งพบการแพร่กระจายทั่วทั้งเอเชีย *(Oldroyd and Wongsiri, 2006)* ไปสิ้นสุดที่ตะวันออกกลางของทวีปเอเชียโดยตรง นอกจากนี้ยังมีรายงานพบสกุลใหม่คือ *Cretotrigona* ซึ่งเป็นซากดึกดำบรรพ์ผึ้งกลุ่มเดียวกับชันโรง อยู่ในยุคครีเทเชียส *(Engel, 2000: 1-11)*

การแบ่งวงศ์ต่าง ๆ ของกลุ่มผึ้งอาศัยลักษณะที่แตกต่างกันในโครงสร้างภายนอกเป็นหลัก เช่น เส้นลายปีก ลักษณะปาก หนวด จำนวนขน สีของลำตัวผึ้ง ลักษณะของขาหลัง ขนาดลำตัวผึ้ง ตัวอย่างคือ ชันโรงเป็นผึ้งขนาดเล็กที่สุด และไม่มีเหล็กใน แต่แมลงภู่เป็นผึ้งขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังอาศัยลักษณะพฤติกรรมทางสังคม เช่น ผึ้งเป็นแมลงสังคมชั้นสูง แต่ผึ้งกัดใบ (leaf cutting bee) เป็นผึ้งที่อยู่เดี่ยว ๆ วิวัฒนาการทางสังคมผึ้งตลอดจนความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมได้แสดงไว้ในแผนภูมิวิวัฒนาการชาติพันธุ์ ทำให้ทราบวิวัฒนาการของผึ้งจากพวกต่ำสุดไปถึงพวกผึ้งที่มีโครงสร้างสังคมสูงที่สุดตามลำดับวงศ์ต่าง ๆ *(Morse, 1975)*

ตารางที่ ๑ แมลงสังคมในอันดับ Hymenoptera *(สิริวัฒน์ วงษ์ศิริ และ สุรีรัตน์ เดี่ยววาณิชย์, ๒๕๕๕; Michener, 2007)*

วงศ์ใหญ่ (Superfamilies)	**ชื่อสามัญ**
สโคลิออยเดีย (Scolioidea)	มด ต่อ และแตนเบียน
เวสพอยเดีย (Vespoidea)	ต่อหัวเสือ ต่อหลุม และต่อแมงมุม
สฟีคอยเดีย (Sphecoidea)	ต่อหมาร่า และแตน
เอพอยเดีย (Apoidea)	ผึ้งต่าง ๆ
วงศ์ต่าง ๆ ของผึ้ง (Families)	
คอลเลทิดี (Colletidae)	ผึ้งรู สีดำ มีสีขาวคาดที่ปล้องท้อง หัวมีแถบสีเหลือง
ฮาลิกทิดี (Halictidae)	ผึ้งรูสีเขียววาว บางชนิดมีสีดำ ชอบตอมเหงื่อ และของเค็ม
แอนเดรนิดี (Andrenidae)	ผึ้งรูสีน้ำตาล ริมฝีปากสีเหลือง มีขนาดใหญ่
เมกะคิลิดี (Megachilidae)	ผึ้งกัดใบ มีขนาดใหญ่สีดำ ท้องปล้องแรกสีขาว บางครั้งพบตัวเล็ก สีเขียว
เมลิทิดี (Melitidae)	ผึ้งรูตัวสีดำขนาดเล็ก
บอมบิดี (Bombidae)	ผึ้งหึ่งขนาดใหญ่ขนปุกปุย
เอพิดี (Apidae)	ชันโรง และผึ้ง ผึ้งหึ่งขนาดใหญ่ขนปุกปุย แมลงภู่ ผึ้งขุดรู
สเตโนเทรทิดี (Stenotretidae)	ผึ้งรู พบในทวีปออสเตรเลียเท่านั้น

Oldroyd และคณะ *(Oldroyd et al.,1998: 700-709)* ได้ศึกษาพฤติกรรมและลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เกี่ยวข้องกับการผสมพันธุ์ของผึ้งในสกุล *Apis* แล้วนำมาสร้างแผนภาพวิวัฒนาการชาติพันธุ์ (cladogram) (รูปที่ ๘) โดยนำเอาลักษณะ mating sign ซึ่งเป็นส่วนของอวัยวะสืบพันธุ์ของผึ้งตัวผู้ที่ติดมากับนางพญาหลังจากผสมพันธุ์เสร็จแล้วเป็นตัวชี้วัด การผสมพันธุ์พบในกลุ่มชันโรงซึ่งเป็นผึ้งไม่มีเหล็กในที่ใกล้เคียงกับผึ้งในสกุล *Apis* การปรับกลไกการผสมพันธุ์ของผึ้งกลุ่มนี้เป็นแนวทางที่เพิ่มความสำเร็จในการผสมพันธุ์ พบในกลุ่มที่สร้างรังในที่โล่งแจ้ง ได้แก่ ผึ้งมิ้ม ผึ้งม้าน และผึ้งหลวง นางพญาผึ้งจะผสมพันธุ์หลายครั้งและขับเอาตัวอสุจิส่วนเกินออก ลักษณะนี้ถือว่าเป็นลักษณะโบราณ ส่วนผึ้งกลุ่มที่มีการสร้างรังหลายชั้นและอยู่ในโพรง คือ ผึ้งพันธุ์และผึ้งโพรง จะเพิ่มประสิทธิภาพของการผสมพันธุ์โดยการมีช่องรับตัวอสุจิ (penile bulb) ขนาดใหญ่ทำให้สามารถส่งต่อตัวอสุจิเข้าสู่ถุงเก็บตัวอสุจิในผึ้งนางพญาโดยตรง ผลการใช้ลักษณะดังกล่าวเมื่อนำมาสร้างแผนภาพวิวัฒนาการชาติพันธุ์พบว่า ผึ้งมิ้ม ผึ้งม้าน และผึ้งหลวง มีวิวัฒนาการที่ต่ำกว่าผึ้งพันธุ์และผึ้งโพรง ซึ่งค่อนข้างสอดคล้องกับสายวิวัฒนาการของ Engel และ Sholtz (1997) ที่ใช้ RNA และลักษณะทางสัณฐานวิทยาร่วมกันในการสร้างสายวิวัฒนาการขึ้นมาและพบว่า ผึ้งมิ้ม ผึ้งม้าน และผึ้งหลวง อยู่ในกลุ่มที่มีวิวัฒนาการใกล้เคียงกันและมีวิวัฒนาการต่ำกว่าผึ้งพันธุ์และผึ้งโพรง อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์ข้อมูลทาง DNA ของผึ้งทั้ง ๙ ชนิด (รูปที่ ๘) ทำให้ Oldroyd และ Wongsiri *(Oldroyd and Wongsiri , 2006)* กล่าวว่า ผึ้งมิ้มและผึ้งม้านมีวิวัฒนาการใกล้เคียงกันมาก โดยพบว่าผึ้งมิ้มมีวิวัฒนาการแยกจากผึ้งม้านไม่ถึงหนึ่งล้านปี เมื่อพิจารณาจากทฤษฎีวิวัฒนาการของคอคอดกระ (biogeography of the Isthmus of Kra)



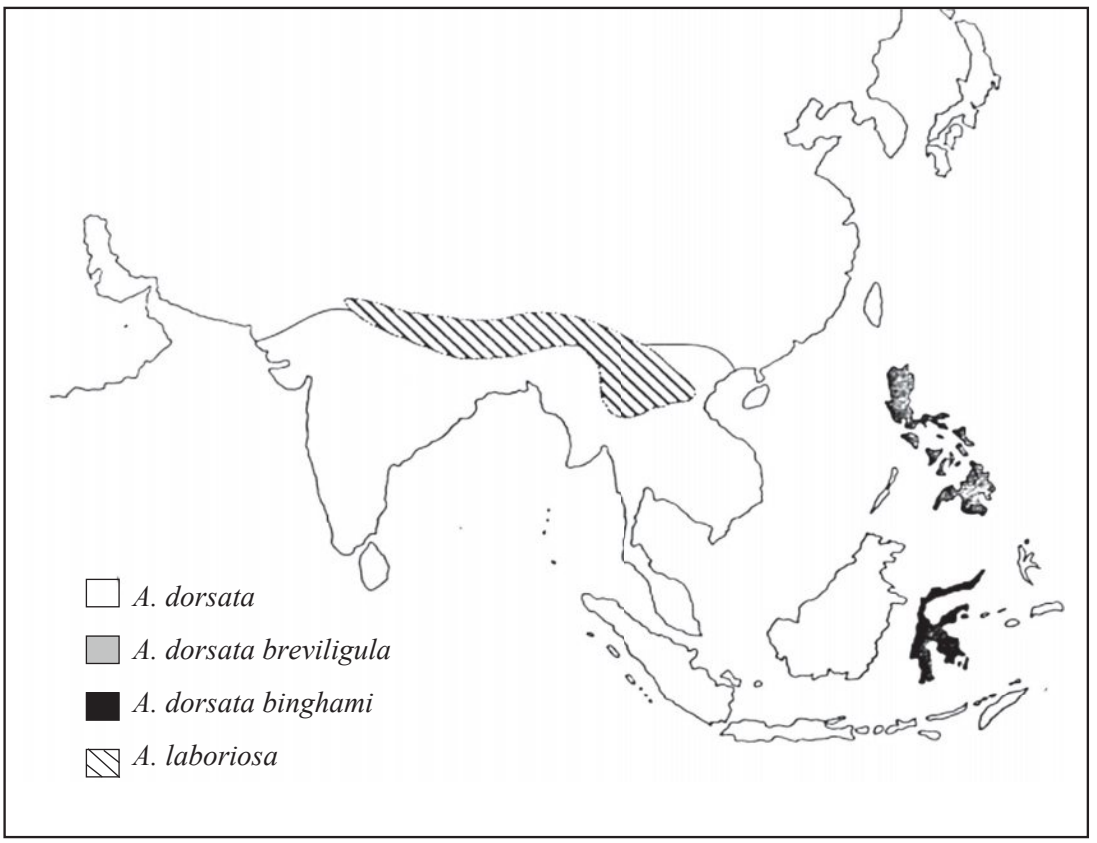
รูปที่ ๘ วิวัฒนาการชาติพันธุ์ของผึ้ง ๙ ชนิด *(Oldroyd and Wongsiri, 2006)*

ผึ้งสามารถจัดจำแนกตามลักษณะทางอนุกรมวิธานได้ดังนี้

อาณาจักร (Kingdom) เมทาซัว (Metazoa)
ไฟลัม (Phylum) อาร์โทรโพดา (Arthropoda)
ชั้น (Class) อินเซกตา (Insecta)
อันดับ (Order) ไฮมีนอปเทอรา (Hymenoptera)
วงศ์ใหญ่ (Superfamily) เอพอยเดีย (Apoidea)
วงศ์ (Family) เอพิดี (Apidae)
วงศ์ย่อย (Subfamily) เอพินี (Apinae)
สกุล (Genus) เอพิส (*Apis*)

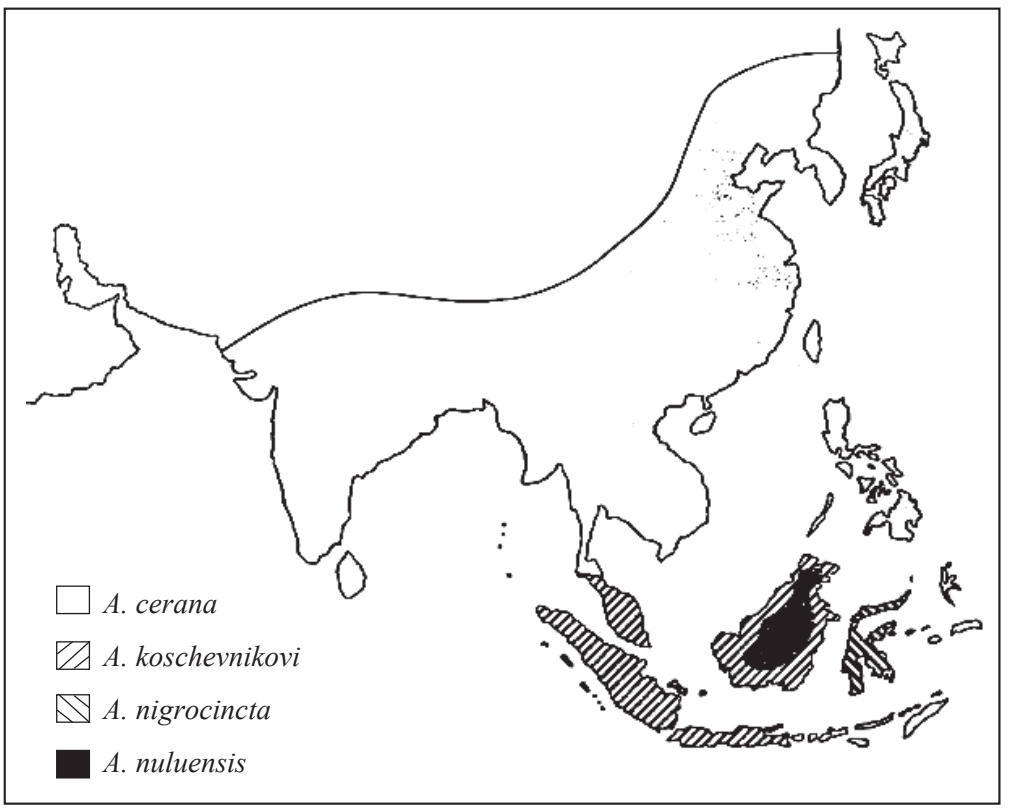
ปัจจุบันผึ้งถูกจำแนกออกเป็น ๓ กลุ่ม คือ ผึ้งขนาดใหญ่ (giant honey bee) ในกลุ่มผึ้งหลวง, ผึ้งที่สร้างรังในโพรง (cavity-nest honey bee) และผึ้งขนาดเล็ก (dwarf honey bee) *(Oldroyd and Wongsiri, 2006)*

ผึ้งขนาดใหญ่เป็นผึ้งที่มีขนาดตัวใหญ่ สร้างรังแบบรวงเดี่ยว อยู่ตามต้นไม้ใหญ่ หน้าผา หรืออาคารสิ่งปลูกสร้าง มี ๒ ชนิด คือ **ผึ้งภูเขาเนปาล** *Apis laboriosa* ซึ่งเป็นผึ้งภูเขาที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในบรรดาผึ้งทั้งหมด พบบริเวณภูเขาสูงกว่า ๑,๕๐๐ เมตร พบมากบริเวณหุบเขาหิมาลัย และ**ผึ้งหลวง** *Apis dorsata* ซึ่งเป็นผึ้งที่มีขนาดรองลงมา พบได้ทั่วไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ของเอเชียจนถึงประเทศอินเดีย รวมทั้งเกาะฟิลิปปินส์ และสุลาเวสี *(Oldroyd and Wongsiri, 2006)* ผึ้งเหล่านี้มีนิสัยก้าวร้าว อาจเนื่องมาจากการสร้างรังในที่โล่ง ไม่มีสิ่งบดบังรังจากผู้ล่าหรือศัตรู ผึ้งทหารจึงมีความดุร้าย เพื่อป้องกันรังจากศัตรู *(Wongsiri et al., 2000: 20-29)*



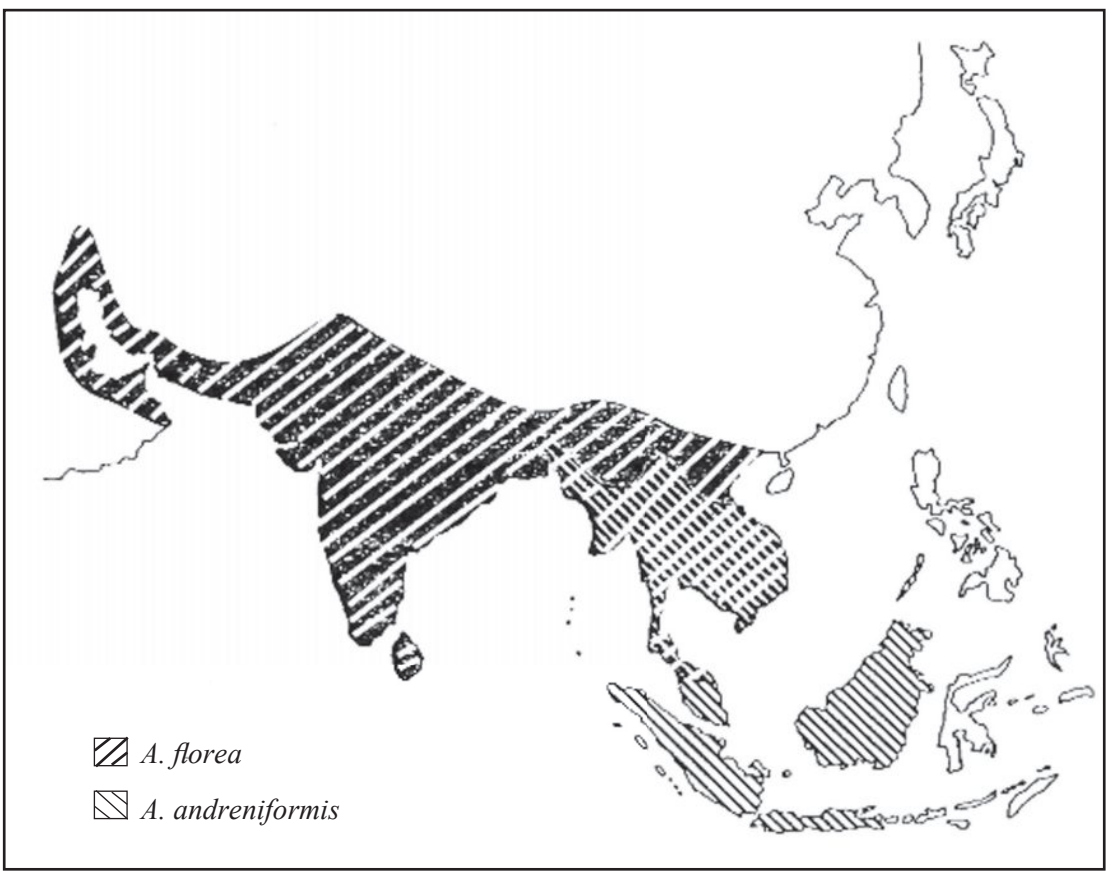
รูปที่ ๙ การกระจายตัวของผึ้งสกุลย่อย *Megapis* ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ *(Oldroyd and Wongsiri, 2006)*

ผึ้งที่สร้างรังในโพรงมีขนาดตัวปานกลาง เล็กกว่าผึ้งหลวง สร้างรังหลายรวง อาศัยอยู่ตามโพรงไม้ โพรงดิน โพรงหิน หรือตามอาคารบ้านเรือน มี ๕ ชนิด คือ **ผึ้งพันธุ์** *Apis mellifera* ซึ่งมีถิ่นกำเนิดทางยุโรปและแอฟริกา เชื่อว่ามีบรรพบุรุษร่วมกันกับผึ้งโพรงของเอเชีย แต่ได้มีวิวัฒนาการแยกสายออกไปอาศัยอยู่ในทวีปยุโรปและแอฟริกา หลังจากนั้นได้ถูกนำเข้ามาเลี้ยงในทวีปเอเชียในศตวรรษที่ ๑๙-๒๐ ปัจจุบันมีการเลี้ยงแพร่หลายไปทั่วโลก รวมทั้งประเทศไทย *(สิริวัฒน์ วงษ์ศิริ และ สุรีรัตน์ เดี่ยววาณิชย์, ๒๕๕๕),* **ผึ้งโพรง** *Apis cerana* ซึ่งพบแพร่กระจายเกือบทุกประเทศในทวีปเอเชีย จากตะวันตกของประเทศอัฟกานิสถานถึงประเทศฟิลิปปินส์และเหนือสุดคืออัสซูเรียจนถึงใต้สุดของเกาะชวาและติมอร์ ในประเทศไทยพบทุกพื้นที่ โดยเฉพาะเกาะสมุย จังหวัดสุราษฎร์ธานี, **ผึ้งซาบา** *Apis koschevnikovi* ซึ่งพบที่มาเลเซียและบอร์เนียว, **ผึ้งภูเขาบอร์เนียว** *Apis nuluensis* ซึ่งมีรายงานพบที่บอร์เนียว และ**ผึ้งโพรงอินโดนีเซีย** หรือ**ผึ้งสุลาวีเซียน** *Apis nigrocincta* พบบริเวณสุลาเวสี สากิห์ และมินดาเนา *(Oldroyd and Wongsiri, 2006)*



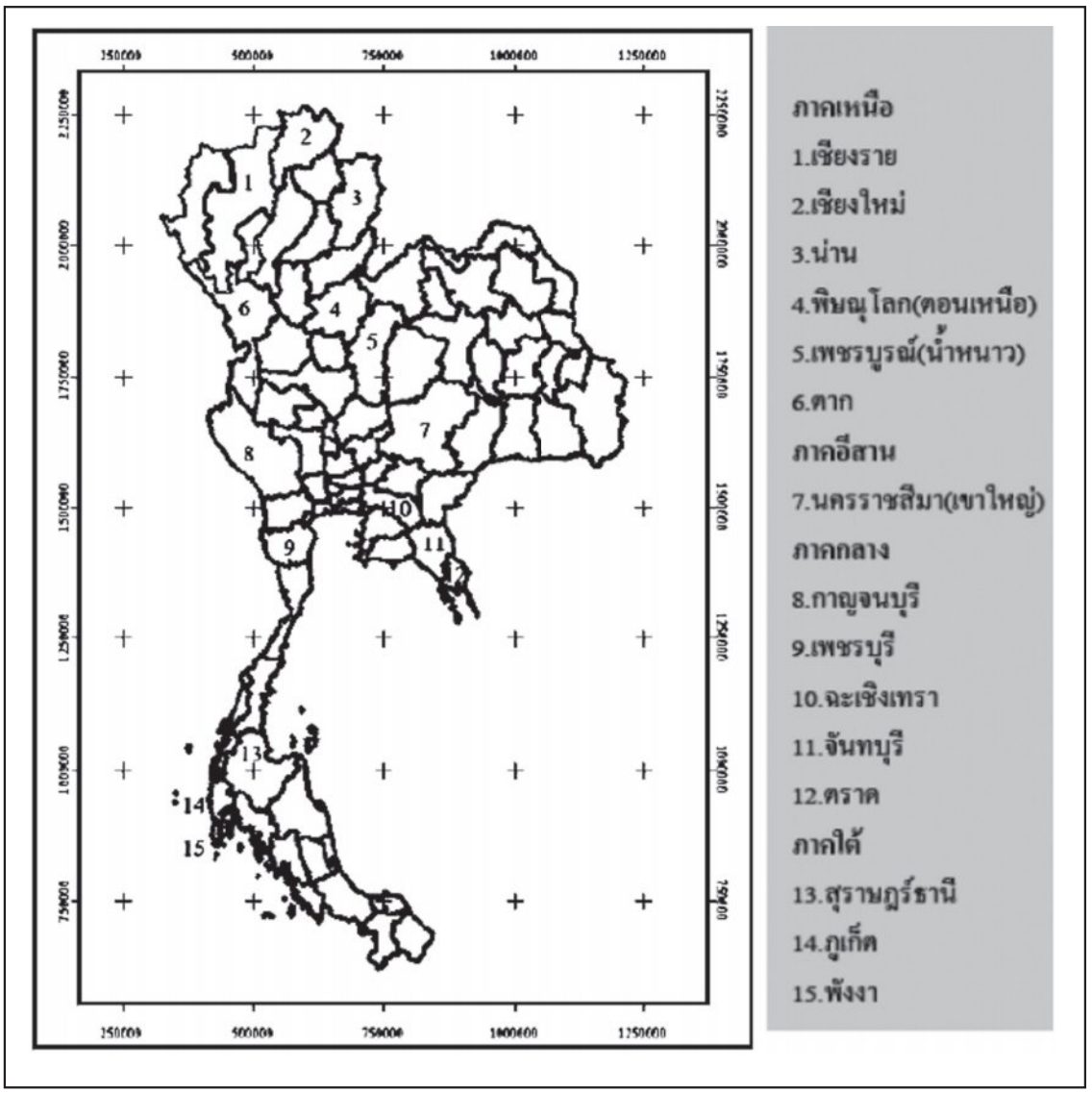
รูปที่ ๑๐ การกระจายตัวของผึ้งที่สร้างรังในโพรงในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้
(Oldroyd and Wongsiri, 2006)

ผึ้งขนาดเล็ก มีขนาดตัวเล็กกว่าผึ้งที่สร้างรังในโพรง สร้างแบบรวงเดี่ยวบนกิ่งไม้ขนาดเล็กของต้นไม้ที่มีทรงพุ่มขนาดเล็กจนถึงขนาดกลาง มี ๒ ชนิด คือ **ผึ้งมิ้ม** *Apis florea* ซึ่งมีขนาดตัวใหญ่กว่า **ผึ้งม้าน** *Apis andreniformis* เล็กน้อย ท้องปล้องแรกมีสีเหลือง ที่เหลือเป็นปล้องสีดำสลับขาวชัดเจน มีเขตการแพร่กระจายในแถบประเทศจีนตอนใต้ อินเดียตะวันออก และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ส่วนในประเทศไทยพบกระจายตัวทั่วทั้งประเทศ แต่ยังไม่มีรายงานการพบผึ้งมิ้มทางตอนใต้ของประเทศมาเลเซีย อินโดนีเซีย บอร์เนียว และฟิลิปปินส์ และผึ้งม้านซึ่งมีลักษณะลำตัวเล็กกว่าผึ้งมิ้มและมีท้องปล้องแรกสีดำ ส่วนท้องปล้องที่เหลือเป็นสีขาวสลับดำ ผึ้งม้านเป็นผึ้งที่พบเฉพาะในบริเวณป่าใกล้ภูเขาที่มีความอุดมสมบูรณ์เท่านั้น พบการกระจายตัวทางตอนใต้ของเอเชีย *(สิริวัฒน์ วงษ์ศิริ และ สุรีรัตน์ เดี่ยววาณิชย์, ๒๕๕๕; Oldroyd and Wongsiri, 2006)*



รูปที่ ๑๑ การกระจายตัวของผึ้งขนาดเล็กในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ *(Oldroyd and Wongsiri, 2006)*

ในอดีตนักวิชาการในประเทศไทยเข้าใจว่า ผึ้งม้านเป็นชนิดเดียวกันกับผึ้งมิ้ม จนกระทั่ง Wongsiri และคณะ *(Wongsiri et al., 1990: 47-52)* ได้รายงานการพบผึ้งม้านเป็นครั้งแรก (new record) ในประเทศไทย ซึ่งมีรายงานว่าพบที่จังหวัดฉะเชิงเทรา จันทบุรี ตราด และบริเวณป่าเชิงเขาในจังหวัดทางภาคเหนือของประเทศไทย ส่วนในภาคอีสานพบที่จังหวัดนครราชสีมา ต่อมาใน พ.ศ. ๒๕๔๖ พบที่บริเวณป่าจังหวัดเพชรบุรี ภูเก็ต พังงา และสุราษฎร์ธานี *(Rattanawannee, 2007: 451-460)* และในจังหวัดกาญจนบุรีที่ตำบลห้วยเขย่ง อำเภอทองผาภูมิ *(สิทธิพงษ์ วงศ์วิลาศ, ๒๕๕๐)* ทำให้ทราบถึงขอบเขตการกระจายตัวของผึ้งชนิดนี้ในประเทศไทยมากขึ้น รูปที่ ๘ แสดงให้เห็นว่า ผึ้งมิ้มและผึ้งม้านมีสายวิวัฒนาการที่ใกล้เคียงกัน แต่การกระจายตัวของผึ้งมิ้มในประเทศไทยมีมากกว่าผึ้งม้าน รูปที่ ๑๒ แสดงให้เห็นว่า ผึ้งม้านมีการกระจายเพียงบางจังหวัดเท่านั้น จึงยังไม่ทราบสาเหตุที่ชัดเจนของความแตกต่างในการเลือกถิ่นอาศัยของผึ้งทั้ง ๒ ชนิด หากผึ้งทั้ง ๒ ชนิดอาศัยอยู่ในพื้นที่เดียวกัน น่าจะมีการแก่งแย่งแข่งขัน หรือมีการปรับตัวเพื่อลดการแก่งแย่งแข่งขันลง ให้สามารถอยู่ร่วมกันได้ แต่ถ้าผึ้งม้านมีความเฉพาะเจาะจงต่อการเลือกสร้างรัง ย่อมส่งผลต่อการอยู่รอดของผึ้งม้านที่อาจจะลดจำนวนลงและอาจถูกกำจัดออกไปจากพื้นที่ถิ่นอาศัยเดิมหรือสูญพันธุ์ได้ ในบางท้องถิ่นโดยเฉพาะในภาคกลางของประเทศไทย ผึ้งม้านไม่ปรากฏในท้องถิ่นที่มีสภาพเป็นเมืองในเขตกรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียง



รูปที่ ๑๒ การกระจายตัวของผึ้งม้านที่พบในประเทศไทย
(Wongsiri et al., 1990: 47-52; Rattanawannee et al., 2007: 451-460; สิทธิพงษ์ วงศ์วิลาศ, ๒๕๕๐)

เอกสารอ้างอิง

สิทธิพงษ์ วงศ์วิลาศ, ๒๕๕๐, *นิเวศวิทยาถิ่นอาศัยของผึ้งม้าน Apis andreniformis. รายงานการวิจัยโครงการ BRT 2550: ชุดโครงการทองผาภูมิตะวันตก.* กรุงเทพฯ : จิรวัฒน์ เอ็กเพรส.

สิริวัฒน์ วงษ์ศิริ และ สุรีรัตน์ เดี่ยววาณิชย์, ๒๕๕๕, ชีววิทยาของผึ้ง. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Alford, D. V., 1975, Bumblebees. London: Davis-poynter.

Brian, M. V., 1983, Social Insects. New York: Chapman and Hall.

Crane, E., Friis, E. M. and Pederson, K. R., 1995, The origin and early diversification of angiosperm. Nature 374: 27-33.

Engel, M. S., 1998, Fossil honey bees and evolution in the genus *Apis* (Hymenoptera: Apidae). *pidologie* 29: 265-281.

Engel, M. S., 2000, A new interpretation of the oldest fossil bee (Hymenoptera: Apidae). *American Museum Novitates* 3296: 1-11.

Engel, M. S., 2001, A monophyly and extensive extinction of advanced eusocial Bees (Hymenoptera). *Bulletin of the American Museum of Natural History* 259: 5-192.

Michener, C. D., 2000, *The Bee of the World.* Baltimore: John Hopkins University Press.

Michener, C. D., 2007, *The Bee of the World.* Baltimore: John Hopkins University Press.

Morse, R. A., 1975, *Bee and Beekeeping.* New York: Cornell Univ. Press.

Oldroyd, B. P. et al., 1998, Evolution of mating behavior in the genus *Apis* of mating frequency in *A. cerana* (Hymenoptera: Apidae). *Annals of the Entomological Society of America* 91: 700-709.

Oldroyd, B. P. and Wongsiri, S., 2006, *Asian Honey Bees Biology, Conservation, and Human Interactions.* Harvard University Press.

Palmer, K. A. and Oldroyd, B. P., 2000, Evolution of multiple mating in the genus *Apis*. *Apidologie* 31: 235-248.

Rasmussen, R., 2008, Catalog of the Indo-Malayan/Australasian Stingless Bees (Hymenoptera: Apidae: Meliponi). Zootaxa, Magulia Press, New Zealand.

Robinson, G. E., 1984, Orchids pollinated by Euglossine bees. *Bee World* 65: 68-73.

Rattanawannee, A., Chanchao, C. and Wongsiri, S., 2007, Morphometric and genetic

variation of small dwarf honeybees *Apis andreniformis* Smith, 1858 in Thailand. Insect Science 14: 451-460.

Seeley, T. D., 1985, *Honeybee Ecology.* New Jersey: Princeton University Press.

Wongsiri, S. et al., 1990, Evidence of reproductive isolation confirms that *Apis andreniformis* (Smith, 1858) is aseparate species form sympatric *Apis florea* (Fabricius, 1787). *Apidologie* 21 (1): 47-52.

Wongsiri, S. et al., 2000, Honeybee diversity and bee keeping in Thailand. *Bee World* 81 (1): 20-29.

Abstract **Evolution, Taxonomy and Distribution of Bees in Thailand**

Siriwat Wongsiri
Associate Fellow of the Academy of Science, The Royal Institute, Thailand
Sitthipong Wongwilas
Mahidol University Nakhonsawan Campus

The evolution of social insects began at least 300 million years ago, especially termites. Termites are one of the insects that have true social life. Their ancestors had co-evolution period with the ancestors of wild cockroaches. On the contrary, the evolutions of Hymenopteras which have real social life and are high class insects, especially bees' ancestors, are dated back only 80-120 million years.

Bees under *Apis* genus are high social life insects and have the most advanced evolution. Their population is classified into different castes based on individual work tasks. The evolution of *Apis* bee began no less than 20-30 million years ago.

Apis spp. are bees that produce honey which are divided into 9 species: *Apis florea, Apis andreniformis, Apis laboriosa, Apis dorsata, Apis cerana, Apis nigrocincta, Apis koschevnikovi, Apis nuluensis* and *Apis mellifera.*

Keywords: evolution, social insects, fossil, bee

วารสารราชบัณฑิตยสถาน
ปีที่ ๓๙ ฉบับที่ ๒ เม.ย.-มิ.ย. ๒๕๕๗

การเก็บรักษาผักและผลไม้สด โดยการดัดแปลงสภาพบรรยากาศ*

สายชล เกตุษา
ภาคีสมาชิก สำนักวิทยาศาสตร์
ราชบัณฑิตยสถาน

บทคัดย่อ

ผักและผลไม้เป็นผลิตผลสดพืชสวนที่เน่าเสียง่ายและมีอายุการเก็บรักษาสั้น ผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวยังมีชีวิต การดำเนินกิจกรรมทั้งด้านสรีระและชีวเคมียังคงเกิดเช่นเดียวกับขณะยังอยู่บนต้นเดิม การเปลี่ยนแปลงหลายอย่างที่เกิดขึ้นในผักและผลไม้นำไปสู่การเสื่อมคุณภาพและเกิดการเน่าเสียที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะเกิดเร็วและรุนแรงมากขึ้นเมื่อมีปัจจัยสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม ซึ่งได้แก่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศ กระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในผักและผลไม้ต้องการออกซิเจน การเก็บรักษาผักและผลไม้สดที่อุณหภูมิต่ำเป็นวิธีที่นิยมปฏิบัติทางการค้า แต่การใช้อุณหภูมิต่ำในสภาพบรรยากาศปรกติเพียงอย่างเดียวยังไม่ดีเพียงพอสำหรับการยืดอายุการเก็บรักษาและการรักษาคุณภาพของผลิตผลสดบางชนิด สภาพบรรยากาศปรกติมีออกซิเจนร้อยละ ๒๐.๙๕ คาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ ๐.๐๓ ไนโตรเจนร้อยละ ๗๘.๐๘ อาร์กอนร้อยละ ๐.๙๓ และแก๊สอื่น ๆ ร้อยละ ๐.๐๑ โดยปริมาตร การพัฒนาเทคโนโลยีการเก็บรักษาที่มีการดัดแปลงสภาพบรรยากาศให้มีปริมาณออกซิเจนลดลงและ/หรือปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นร่วมกับอุณหภูมิต่ำ ทำให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาและรักษาคุณภาพของผลิตผลสดได้ดีกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำเพียงอย่างเดียว การดัดแปลงสภาพบรรยากาศระหว่างการเก็บรักษานั้นทำได้ทั้งแบบที่ไม่สามารถควบคุม (**modified atmosphere, MA**) และแบบที่สามารถควบคุม (**controlled atmosphere, CA**) ปริมาณออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ การเก็บรักษาผลิตผลสดโดยการดัดแปลงสภาพบรรยากาศใช้ได้ดีกับผลิตผลบางชนิดเท่านั้น การที่จะนำวิธีการดังกล่าวมาใช้กับผลิตผลแต่ละชนิดจะต้องมีข้อมูลการทดลองที่ชัดเจนเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น

คำสำคัญ : ผัก, ผลไม้, การเก็บรักษา, การดัดแปลงสภาพบรรยากาศที่ควบคุมไม่ได้, การดัดแปลงสภาพบรรยากาศที่ควบคุมได้

*บรรยายในการประชุมสำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน เมื่อวันที่ ๒ เมษายน พ.ศ. ๒๕๕๗

คำนำ

ผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวเป็นของสดที่เสื่อมคุณภาพอย่างรวดเร็ว ทำให้อายุการใช้ประโยชน์สั้นและไม่สามารถวางขายได้นาน ดังนั้น การเก็บรักษาเพื่อยืดอายุการใช้ประโยชน์จึงเป็นเรื่องสำคัญ การเก็บรักษาผักและผลไม้เพื่อยืดอายุการใช้ประโยชน์โดยใช้อุณหภูมิต่ำหรือห้องเย็น/ตู้เย็น เป็นวิธีที่ได้ปฏิบัติกันตลอดมา แต่ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวได้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บรักษาผักและผลไม้สดให้มีอายุนานขึ้น การเก็บรักษาผักและผลไม้โดยการดัดแปลงสภาพบรรยากาศเป็นเทคโนโลยีอีกวิธีหนึ่งจากการวิจัยและพัฒนา ในปัจจุบันการเก็บรักษาผักและผลไม้โดยการดัดแปลงสภาพบรรยากาศนิยมทำอย่างแพร่หลาย บทความนี้จะกล่าวถึงว่า การเก็บรักษาผักและผลไม้โดยการดัดแปลงสภาพบรรยากาศทำได้อย่างไร และมีประโยชน์อะไร

ธรรมชาติของผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว

ผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวเป็นผลิตผลสดและยังมีชีวิต กระบวนการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ทางสรีระและชีวเคมียังคงเกิดขึ้นเช่นเดียวกับผักและผลไม้ที่ยังอยู่บนต้นเดิม การเปลี่ยนแปลงทางสรีระและชีวเคมีของผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวมีทั้งกระบวนการสร้าง (anabolism) และกระบวนการสลาย (catabolism) กระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาเคมีที่ต้องการออกซิเจนและมีเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี ปฏิกิริยาเคมีที่เป็นออกซิเดชันต้องมีออกซิเจนและอุณหภูมิที่เหมาะสม หากมีบรรยากาศที่ไม่เหมาะสม คือ มีปริมาณออกซิเจนต่ำ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สูง ปริมาณเอทิลีนสูง อุณหภูมิต่ำหรืออุณหภูมิสูง เงื่อนไขดังกล่าวเพียงอย่างใดอย่างหนึ่งหรือมากกว่า ๑ อย่างร่วมกัน จะทำให้สามารถยับยั้งหรือชะลอกระบวนการเปลี่ยนแปลงการสร้างและการทำลายในผักและผลไม้ ซึ่งจะส่งผลต่อการยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว

การเก็บรักษาโดยการดัดแปลงสภาพบรรยากาศทำได้อย่างไร

ถ้าเก็บรักษาผักและผลไม้ที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ ในสภาพบรรยากาศปรกติ ซึ่งมีออกซิเจนร้อยละ ๒๐.๙๕ คาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ ๐.๐๓ ไนโตรเจนร้อยละ ๗๘.๐๘ อาร์กอนร้อยละ ๐.๙๓ และแก๊สอื่น ๆ ร้อยละ ๐.๐๑ กระบวนการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ในผักและผลไม้ที่ต้องการออกซิเจนจะยังเกิดขึ้นได้อย่างปรกติระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ แต่อาจจะเกิดช้าลงในสภาพบรรยากาศดัดแปลงที่เปลี่ยนแปลงโดยการทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลงหรือปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น หรือทั้งลดปริมาณออกซิเจนและเพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้กระบวนการเปลี่ยนแปลงในผักและผลไม้เกิดขึ้นน้อยหรือเกิดขึ้นช้า การเปลี่ยนแปลงสภาพบรรยากาศดังกล่าวร่วมกับอุณหภูมิต่ำยิ่งทำให้สามารถลดหรือชะลอการเปลี่ยนแปลงในผักและผลไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้สามารถเก็บรักษาผัก

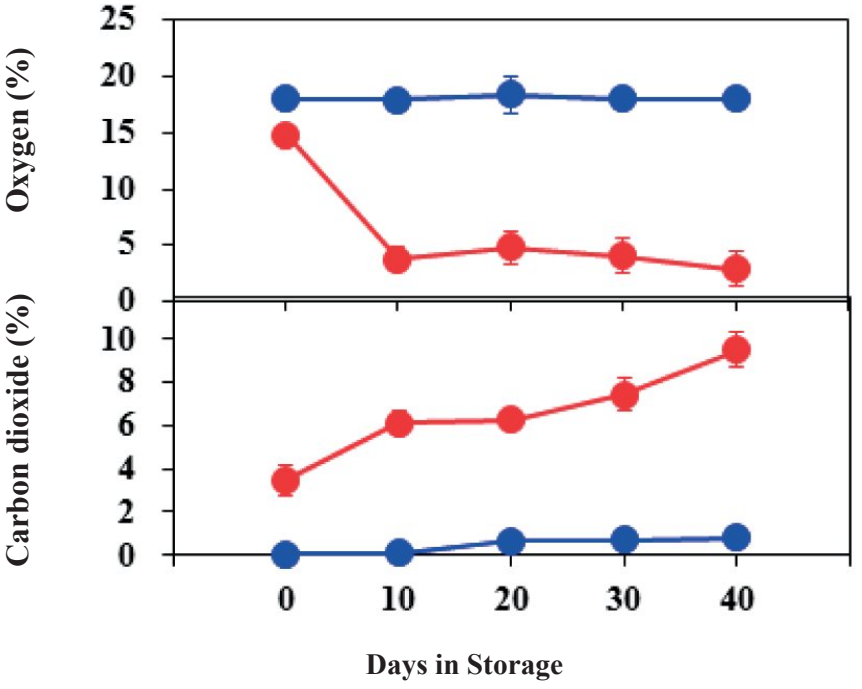
และผลไม้นานขึ้นกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำเพียงอย่างเดียว การดัดแปลงสภาพบรรยากาศมีทั้งไม่สามารถควบคุมให้เสถียร (modified atmosphere, MA) และสามารถควบคุมให้เสถียร (controlled atmosphere, CA) ระหว่างการเก็บรักษา

การดัดแปลงสภาพบรรยากาศที่ควบคุมไม่ได้ (MA)

แม้ว่าสภาพบรรยากาศดัดแปลงจะไม่สามารถควบคุมให้เสถียรตามที่ต้องการได้ระหว่างการเก็บรักษา แต่การเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศที่ไม่แน่นอนนี้ยังอยู่ในระดับที่สามารถยับยั้งหรือชะลอการเปลี่ยนแปลงโดยที่ยังไม่ทำให้เกิดอันตรายแก่ผักและผลไม้ การเก็บรักษาผักและผลไม้ในถุงพลาสติกเป็นตัวอย่างที่ดีของการเก็บรักษาในสภาพบรรยากาศที่ไม่สามารถควบคุมได้ ในช่วงแรกของการเก็บรักษาในสภาพดังกล่าว ปริมาณออกซิเจนยังคงสูง และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ยังคงต่ำ เมื่อเวลาการเก็บรักษาผ่านไป ปริมาณออกซิเจนจะค่อย ๆ ลดลง และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ค่อย ๆ เพิ่มขึ้น (รูปที่ ๑) เพราะการหายใจของผักและผลไม้จะใช้ออกซิเจน แต่ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ถ้าการระบายอากาศไม่ดีจนปริมาณออกซิเจนต่ำมาก และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สูงมาก จะทำให้เกิดอันตรายแก่ผักและผลไม้ และทำให้ผักและผลไม้เกิดกลิ่นและรสชาติที่ผิดปรกติได้ ดังนั้น เมื่อใช้ฟิล์มพลาสติกห่อหุ้มหรือถุงพลาสติกบรรจุผักและผลไม้ จะต้องระวังไม่ให้มีปริมาณออกซิเจนต่ำเกินไป และ/หรือปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์มากเกินไป (ตารางที่ ๑ และ ๒) เหตุการณ์นี้เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิ ชนิดฟิล์มพลาสติก ความหนาของฟิล์มพลาสติก การทำช่องระบายบนฟิล์มพลาสติก ชนิดและปริมาณของผักและผลไม้ในถุงพลาสติก ไม่เหมาะสม สภาพบรรยากาศที่เหมาะสมจะถูกกำหนดโดยปัจจัยดังกล่าว ดังนั้น จึงต้องมีการทดลองให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับผักและผลไม้แต่ละชนิดก่อนนำไปใช้จริง มิฉะนั้นอาจจะเกิดความเสียหายแก่ผักและผลไม้ได้ ในปัจจุบันมีการใช้ฟิล์มพลาสติกหรือถุงพลาสติกชนิดต่าง ๆ มากในการห่อหรือบรรจุผักและผลไม้สด (รูปที่ ๒) ทำให้รักษาความสดและยืดอายุผักและผลไม้สดซึ่งเป็นผลจากการทำให้เกิดสภาพบรรยากาศดัดแปลงแม้ว่าจะไม่สามารถควบคุมได้ แต่ก็เกิดประโยชน์มาก นอกจากนี้ ยังมีการใช้สารดูดซับเอทิลีน (ethylene absorbent) แก๊สเอทิลีนเป็นฮอร์โมนพืชที่สร้างและปล่อยออกมาโดยผักและผลไม้ เอทิลีนนี้เป็นตัวการสำคัญทำให้ผักและผลไม้เสื่อมคุณภาพอย่างรวดเร็วแม้ว่าจะเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ ในปัจจุบันมีการใช้สาร 1-methylcyclopropene (1-MCP) รมผักและผลไม้ก่อนการเก็บรักษาโดยวิธี MA และ CA สาร 1-MCP เป็นสารที่ยับยั้งการทำงานของเอทิลีน ทำให้ผักและผลไม้เสื่อมคุณภาพช้าและมีอายุการเก็บรักษานานขึ้น (ตารางที่ ๓)

ข้อดีของสภาพบรรยากาศดัดแปลงที่ไม่สามารถควบคุมได้

๑. เป็นวิธีการที่ง่ายและไม่ยุ่งยาก
๒. ต้นทุนต่ำ ฟิล์มพลาสติกและถุงพลาสติกมีราคาถูก
๓. ลดการสูญเสียน้ำของผลิตผล



รูปที่ ๑ ปริมาณออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาพการเก็บรักษา บรรยากาศปรกติ (●) และบรรยากาศดัดแปลง MA (●) ของกล้วยไข่ *(Ketsa et al., 2013)*

รูปที่ ๒ การเก็บรักษาผัก (บน) และผลไม้ (ล่าง) ในสภาพ MA

ตารางที่ ๑ ปริมาณหรือความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมในสภาพบรรยากาศของการเก็บรักษาผักโดย MA และ CA *(ดัดแปลงจาก Kader, 2002)*

ผัก	อุณหภูมิ (°ซ)	ปริมาณของแก๊ส (ร้อยละ)	
		ออกซิเจน	คาร์บอนไดออกไซด์
กะหล่ำปลี	๒-๕	๒-๓	๓-๖
กะหล่ำดอก	๐-๕	๒-๓	๓-๔
กระเทียมใบ	๐-๕	๑-๒	๒-๕
แตงกวา	๘-๑๒	๑-๔	๐
บร็อกโคลี	๐-๕	๑-๒	๕-๑๐
ผักกาดหอม	๐-๕	๑-๓	๐
ผักกาดขาวปลี	๐-๕	๑-๒	๐-๕
ถั่วลันเตาฝักสด	๐-๕	๒-๓	๒-๓
พริกหวาน	๕-๑๒	๒-๕	๒-๕
พริกเผ็ด	๕-๑๒	๒-๕	๒-๕
แรดิช	๐-๕	๑-๒	๒-๓
ข้าวโพดหวาน	๐-๕	๒-๔	๒-๑๐
มะเขือเทศดิบ	๑๒-๒๐	๓-๕	๓-๕
มะเขือเทศสุก	๑๐-๑๕	๓-๕	๓-๕
ปวยเล้ง	๐-๕	๗-๑๐	๕-๑๐
หอมหัวใหญ่	๐-๕	๑-๒	๐-๕

ตารางที่ ๒ ปริมาณหรือความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมในสภาพบรรยากาศของการเก็บรักษาผลไม้โดย MA และ CA *(ดัดแปลงจาก Kader, 2002)*

ผลไม้	อุณหภูมิ (°ซ)	ปริมาณของแก๊ส (ร้อยละ)	
		ออกซิเจน	คาร์บอนไดออกไซด์
กล้วย	๑๒-๑๖	๒-๕	๒-๕
เงาะ	๘-๑๕	๓-๕	๗-๑๒
มะม่วง	๑๐-๑๕	๓-๗	๕-๘
มะละกอ	๑๐-๑๕	๒-๕	๕-๘
ท้อ	๑-๒	๑-๒	๕-๘
ทับทิม	๕-๑๐	๓-๕	๕-๑๐
พลับ	๐-๕	๓-๕	๕-๘
ส้ม	๕-๑๐	๕-๑๐	๐-๕
สาลี่เอเชีย	๐-๕	๒-๔	๐-๓
สาลี่ยุโรป	๕-๑๒	๑-๓	๐-๓
สับปะรด	๘-๑๓	๒-๕	๕-๑๐
มะนาว	๑๐-๑๕	๕-๑๐	๐-๑๐
ลิ้นจี่	๕-๑๒	๓-๕	๓-๕
สตรอว์เบอร์รี	๐-๕	๕-๑๐	๓-๕
แอโวคาโด	๕-๑๓	๗-๑๐	๑๒-๒๐
องุ่น	๐-๕	๕-๑๐	๕-๑๐

ข้อเสียของสภาพบรรยากาศดัดแปลงที่ไม่สามารถควบคุมได้

๑. สัดส่วนของปริมาณออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ไม่แน่นอน

๒. อาจทำให้รสชาติและกลิ่นผิดปรกติได้

การดัดแปลงสภาพบรรยากาศดัดแปลงที่ควบคุมได้ (CA)

การเก็บรักษาในสภาพบรรยากาศดัดแปลงที่สามารถควบคุมได้จะทำให้ปริมาณของออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในระดับที่ต้องการตลอดเวลาของการเก็บรักษาผักและผลไม้ การควบคุมบรรยากาศนั้นอาจทำโดยควบคุมให้ปริมาณออกซิเจนต่ำลง หรือควบคุมให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์

สูงขึ้น หรือควบคุมทั้งปริมาณออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ให้อยู่ในระดับที่ต้องการ การควบคุมทั้งปริมาณออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในสมัยเริ่มต้นที่เก็บรักษาโดยวิธี CA นั้น การควบคุมทั้งปริมาณออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างยุ่งยาก กล่าวคือ การควบคุมระดับความเข้มข้นของออกซิเจนให้ลดลงตามที่ต้องการนั้นทำโดยการปลดปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าแทนที่แก๊สออกซิเจนในห้องเก็บรักษาจนกระทั่งได้ความเข้มข้นออกซิเจนตามที่ต้องการ ต่อมาได้มีการพัฒนาวิธีการควบคุมระดับออกซิเจนโดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน เช่น มีเทน แต่ทำให้เกิดปัญหามีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากจากการเผาไหม้ จึงเปลี่ยนเป็นวิธีการเผาแอมโมเนีย ซึ่งทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลงและไม่ปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ขณะที่การควบคุมความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์นั้น แก๊สนี้อาจจะมีความเข้มข้นสูงในระยะเริ่มการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ดังข้างต้น และคาร์บอนไดออกไซด์อาจจะเกิดจากการหายใจของผักและผลไม้ปล่อยออกมาระหว่างการเก็บรักษา วิธีการควบคุมความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ให้สูงมากเกินไปก็คือการใช้สารเคมีที่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น สารละลายของด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [$Ca(OH)_2$] หรืออาจจะใช้สารดูดซับประเภทอื่น ๆ เช่น ถ่านกัมมันต์ อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อการควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ให้อยู่ในระดับที่ต้องการด้วยวิธีการที่ง่าย โดยมีบริษัทที่ได้สร้างอุปกรณ์สำเร็จรูปเพื่อควบคุมระดับความเข้มข้นออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ตามที่ต้องการ (CA generator) อุปกรณ์สำเร็จรูปที่ใช้ควบคุม CA นี้ทำงานควบคุมโดยระบบคอมพิวเตอร์ อย่างไรก็ตาม ในการใช้อุปกรณ์สำเร็จรูปที่ใช้ควบคุม CA ผู้ใช้ต้องมีข้อมูลเบื้องต้นของความเข้มข้นออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ตามที่ต้องการสำหรับการเก็บรักษาผักและผลไม้พันธุ์นั้น ๆ ที่อุณหภูมิที่กำหนดด้วย ผู้ที่ต้องการเก็บรักษาผลิตผลโดยวิธี CA ไม่ใช่เพียงแต่สั่งอุปกรณ์ CA generator แล้วนำมาติดตั้งใช้งานร่วมกับห้องเย็นเท่านั้น หากต้องวางแผนการลงทุนใช้ CA ให้รอบคอบ เพราะอุปกรณ์ CA generator มีราคาค่อนข้างแพงคิดเป็นเงินหลายล้านบาท จากรายงานผลการวิจัยพบว่า ผักและผลไม้ที่มีถิ่นกำเนิดในเขตร้อนไม่ประสบความสำเร็จในการเก็บรักษาโดยวิธี CA อย่างผักและผลไม้ที่มีถิ่นกำเกิดในเขตหนาว มีผลไม้บางชนิดเท่านั้นที่สามารถเก็บรักษาโดยวิธี CA ได้ผลดีและทำเป็นการค้า คือ แอปเปิล การเก็บรักษาแอปเปิลโดยใช้อุณหภูมิต่ำหรือห้องเย็นในบรรยากาศปรกติสามารถเก็บรักษาแอปเปิลได้นาน ๔-๖ เดือน ขึ้นอยู่กับพันธุ์ การเก็บรักษาแอปเปิลโดยวิธี CA ทำให้สามารถเก็บรักษาแอปเปิลได้นานถึง ๑ ปีหรือนานกว่า ทำให้มีแอปเปิลขายในตลาดตลอดทั้งปีทั้งที่ไม่ใช่ฤดูกาลของแอปเปิล

การเก็บรักษาโดยวิธี CA นั้นอาจจะควบคุมเพียงความเข้มข้นของออกซิเจนอย่างเดียว หรือควบคุมความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์อย่างเดียว หรือความเข้มข้นของทั้งออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่เหมาะสำหรับผักและผลไม้ชนิดนั้น ๆ ความเข้มข้นของออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดและพันธุ์ของผักและผลไม้ และอุณหภูมิ (ตารางที่ ๑

และ ๒) นอกจากนี้ ยังมีการใช้สารดูดซับเอทิลีน (ethylene absorbent) แก๊สเอทิลีนเป็นฮอร์โมนพืชที่สร้างและปล่อยออกมาโดยผักและผลไม้ เอทิลีนนี้เป็นตัวการสำคัญที่ทำให้ผักและผลไม้เสื่อมคุณภาพอย่างรวดเร็ว แม้ว่าจะเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ ในปัจจุบันมีการใช้สาร 1-methylcyclopropene (1-MCP) รมผักและผลไม้ก่อนการเก็บรักษาโดยวิธี MA และ CA สาร 1-MCP เป็นสารที่ยับยั้งการทำงานของเอทิลีน ทำให้ผักและผลไม้เสื่อมคุณภาพช้าและมีอายุการเก็บรักษานานขึ้น (ตารางที่ ๓)

ตารางที่ ๓ อายุการเก็บรักษาของผลกล้วยหอมทองที่ไม่ได้รับและได้รับ 1-MCP ๑,๐๐๐ พีพีบี (ppb) ที่อุณหภูมิ ๒๕ °ซ นาน ๔ ชั่วโมง ก่อนเก็บรักษาในสภาพ MA ที่อุณหภูมิ ๑๔ °ซ *(ดัดแปลงจาก Ketsa, 2010)*

วิธีการเก็บรักษา	อายุการเก็บรักษา (สัปดาห์)[๑]
ชุดควบคุม (control)	๒ d
1-MCP	๓ c
MA	๖ b
1-MCP+MA	๗ a

[๑] ตัวเลขที่ตามด้วยอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้ง ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ ๙๕

ข้อดีของการเก็บรักษาโดยวิธี CA

๑. สามารถควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดช่วงการเก็บรักษา

๒. สามารถยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้ได้นานกว่าการเก็บรักษาโดยวิธี MA

ข้อเสียของการเก็บรักษาโดยวิธี CA

๑. ต้นทุนสูง

๒. วิธีการยุ่งยาก ต้องมีอุปกรณ์หลายอย่าง

๓. อาจทำให้ผักและผลไม้เกิดรสชาติและกลิ่นผิดปรกติได้ถ้าระดับความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำมากเกินไป และ/หรือความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์สูงมากเกินไป

นอกจากการเก็บรักษาโดยวิธี MA และ CA ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังมีการเก็บรักษาโดยวิธีการดัดแปลงสภาพบรรยากาศที่ควบคุมได้โดยวิธีการลดความดัน (low pressure, hypobaric) หลักการคือภายใต้ความดันที่ลดลง ปริมาณออกซิเจนจะลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันที่ลดลงของบรรยากาศ ซึ่งสามารถควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนให้อยู่ในระดับที่ต่ำและแน่นอนได้ดีกว่าวิธี CA แต่สภาพของห้องเก็บรักษาโดยวิธีลดความดันจะต้องแข็งแรงและทนต่อความดันที่ลดลงมาก สุ่มเสี่ยงต่ออันตรายที่จะเกิดแก่ทรัพย์สินและบุคคล ดังนั้น การเก็บรักษาโดยการลดความดันจึงเป็นเพียงงานวิจัยและไม่ได้นำมาใช้ในทางปฏิบัติทางการค้า

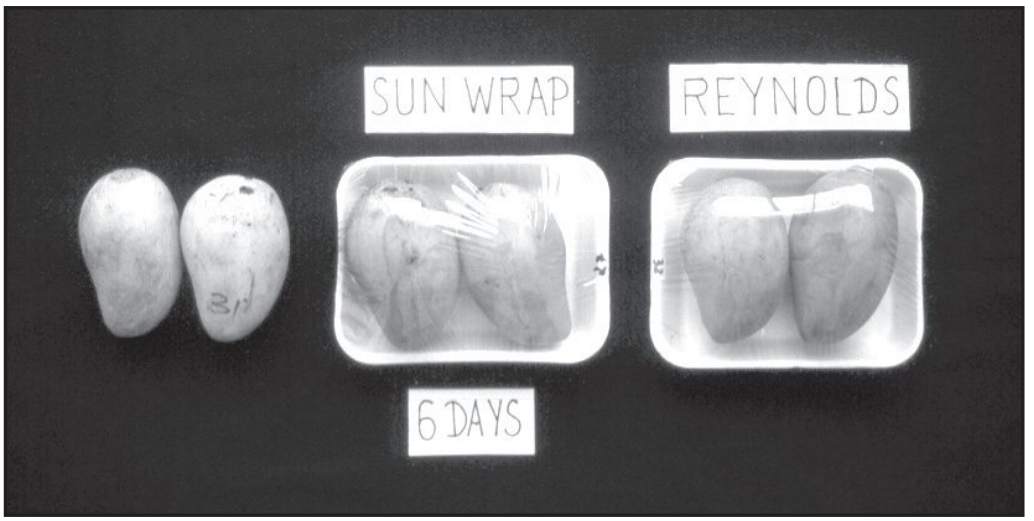
ประโยชน์ของการเก็บรักษาโดยการดัดแปลงสภาพบรรยากาศ

ถ้ามีการเก็บรักษาผักและผลไม้ ไม่ว่าจะเป็นวิธี CA หรือ MA อย่างถูกต้องร่วมกับอุณหภูมิต่ำที่เหมาะสม จะเกิดประโยชน์ทั้งสิ้น นอกเหนือจากการเพิ่มอายุการเก็บรักษาของผักและผลไม้แล้ว ยังมีประเด็นสำคัญที่ MA และ CA ทำให้เกิดประโยชน์คือ

๑. ยับยั้งกระบวนการสุกของผลไม้ (รูปที่ ๓) พร้อมกับกระบวนการเปลี่ยนทางชีวเคมีและสรีระต่าง ๆ เช่น การหายใจ การสร้างเอทิลีน การอ่อนนุ่ม การเปลี่ยนสี

๒. ลดความไวการตอบสนองของผลไม้ที่มีต่อเอทิลีนในบรรยากาศที่ออกซิเจนต่ำกว่าร้อยละ ๘ หรือคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าร้อยละ ๑ หรือทั้ง ๒ อย่างร่วมกัน

๓. ลดอาการผิดปรกติทางสรีระบางอย่างของผลิตผล เช่น อาการสะท้านหนาว ตกกระสีน้ำตาลของผักกาดหอม การผิดปรกติบางอย่างของผลแอปเปิลระหว่างการเก็บรักษา



รูปที่ ๓ การเก็บรักษามะม่วงที่อุณหภูมิห้องนาน ๖ วัน โดยที่ไม่อยู่ในสภาพ MA (ซ้าย) และในสภาพ MA โดยใช้ฟิล์มพลาสติกพีวีซีการค้าชนิดที่ ๑ (กลาง) และชนิดที่ ๒ (ขวา) (ภาพจากงานทดลองในห้องปฏิบัติการ)

๔. สภาพบรรยากาศดัดแปลงมีผลหลังการเก็บเกี่ยวที่ทำให้ผลิตผลเน่าเสีย บรรยากาศที่มีคาร์บอนไดออกไซด์มากถึงร้อยละ ๑๐-๑๕ สามารถยับยั้งการเน่าของผลสตรอว์เบอร์รีที่เกิดจากเชื้อรา *Botrytis* ได้

๕. บรรยากาศที่มีออกซิเจนร้อยละ ๑ หรือคาร์บอนไดออกไซด์มากถึงร้อยละ ๖๐ สามารถควบคุมหรือกำจัดแมลงในผลิตผลบางชนิดได้

ข้อควรระวัง

การเก็บรักษาโดยวิธี MA และ CA นั้นต้องใช้ร่วมกับอุณหภูมิต่ำที่เหมาะสม ไม่สามารถใช้ MA และ CA ทดแทนการเก็บรักษาโดยอุณหภูมิต่ำได้ การเก็บรักษาโดยวิธี MA และ CA มีเงื่อนไขว่าจะต้องมีข้อมูลหรือผ่านการทดลองให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมก่อนนำไปใช้จริง มิฉะนั้นจะเกิดความเสียหายแก่ผักและผลไม้ได้ สิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของการเก็บรักษาโดยวิธี MA และ CA คือจะต้องไม่เก็บรักษานานกว่าเวลาที่กำหนดไว้ ผักและผลไม้ที่ผ่านการเก็บรักษาโดยวิธี MA และ CA นั้น หลังจากนำออกมาจากห้องเก็บรักษาแล้วจะมีอายุสั้นที่อุณหภูมิห้องหรืออายุการวางขายสั้นกว่าผักและผลไม้สดที่ไม่ผ่านการเก็บรักษา ดังนั้น ผักและผลไม้ที่ผ่านการเก็บรักษาโดยวิธี MA และ CA จะต้องบริโภคหรือใช้ประโยชน์ให้เร็วที่สุดก่อนที่จะเสื่อมคุณภาพอย่างรวดเร็ว

สรุป

การเก็บรักษาโดยการดัดแปลงสภาพบรรยากาศทั้ง MA และ CA ต้องใช้ร่วมกับหรือใช้สนับสนุนการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะทำให้สามารถเก็บรักษาผักและผลไม้นานกว่าการเก็บรักษาโดยใช้อุณหภูมิต่ำเพียงอย่างเดียว การเก็บรักษาโดยวิธี MA และ CA ต้องทำตามเงื่อนไขที่เหมาะสมซึ่งผ่านการทดลองหรือทดสอบแล้วก่อนที่จะนำไปใช้ในทางปฏิบัติจริง มิฉะนั้นจะเกิดความเสียหายแก่ผักและผลไม้ได้

บรรณานุกรม

Chidtragool, S. and Ketsa, S., 2013, Modified atmosphere reduces chilling injury of mango fruit during low temperature storage. Acta Horticulturae 992: 513-519.

Isenberg, F.M.R., 1997, Controlled atmosphere storage of vegetables. Horticultural Reviews 1: 337-394.

Kader, A.A., 1986, Biochemical and physiological basis for effects of controlled and modified atmospheres of fruits and vegetables. Food Technology 40 (5): 99-100, 102-104.

Kader, A.A., 2002, Modified atmospheres during transport and storage, pp. 135-144. In: A.A. Kader (ed.). Postharvest Technology of Horticultural Crops. University of California Press, Publication 3311.

Kader, A.A., Zagory, D. and Kerbel, E.L., 1989, Modified atmosphere packaging of fruits and vegetables. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 28:1-30.

Ketsa, S., Wongs-aree, C. and Klein, J.D., 2000, Storage life and quality of 'Kluai Khai' banana fruit affected by modified atmosphere using bulk packaging. Thai J. Agric. Sci. 33: 37-44.

Ketsa, S., 2010, Additional effect of 1-MCP and modified atmosphere packaging (MAP) on the storage life of banana fruit. Acta Horticulturae 880: 353-359.

Ketsa, S., Wisutiamonkun, A. and van Doorn, W.G., 2013, Apparent synergism between the positive effects of 1-MCP and modified atmosphere on storage life of banana fruit. Postharvest Biology and Technology 85: 173–178.

Nguyen, T. B. T., Ketsa, S. and van Doorn, W. G., 2004, Effect of modified atmosphere packaging on chilling-induced peel browning in banana. Postharvest Biology and Technology 31(3): 313-317.

Smock, R.M., 1997, Controlled atmosphere storage of fruits. Horticultural Reviews 1: 301-336.

Abstract **Storage of Fruits and Vegetables under the Controlled and Modified Atmospheres**

Saichol Ketsa

Associate Fellow of the Academy of Science, The Royal Institute, Thailand

Fruits and vegetables are perishable after harvest, resulting in a short shelf life. Many physiological and biochemical changes of fruits and vegetables after harvest have led to deterioration and require oxygen. Deterioration can be aggravated under the unfavorable conditions. Technology development has led to creation of modified atmosphere (MA) and controlled atmosphere (CA) storage, resulting in maintaining better quality and longer storage life of fresh produce compared to low temperature alone. Both MA and CA cannot be used to replace low temperature and they must be used to supplement low temperature. Atmospheric conditions under MA cannot be controlled effectively, while atmospheric conditions under CA can be controlled effectively. Prior to usage of MA and CA, one must have basic information associated with levels of oxygen and carbon dioxide, which is specific for cultivar and temperature; otherwise, damage may be rendered to the produce.

Keywords: fruit, vegetable, storage, controlled atmosphere, modified atmosphere

วารสารราชบัณฑิตยสถาน
ปีที่ ๓๙ ฉบับที่ ๒ เม.ย.-มิ.ย. ๒๕๕๗

การประเมินต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในประเทศไทย

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์
ราชบัณฑิต สำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน
สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
สุขวัฒก์ ธันธรา
สายวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
วารุณี เตีย
สายวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ แกลบ ฟางข้าว ยอดใบอ้อย ซังข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง ใยปาล์ม กะลาปาล์ม และทะลายปาล์ม จากผลการวิจัยพบว่า เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากมวลชีวภาพที่นิยมใช้กันคือ ระบบ **Stoker boiler** ที่ใช้กังหันไอน้ำ ส่วนต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าขนาด ๑๐ เมกะวัตต์ ที่ใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิงพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง ๒.๑๐ ถึง ๖.๔๐ บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับค่าวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และค่าขนส่ง อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเทียบจากค่าอัตรารับซื้อไฟฟ้าที่ผลิตจากมวลชีวภาพปัจจุบัน กรณีที่รวมและไม่รวมส่วนเพิ่มราคารับซื้อไฟฟ้า ต้นทุนดังกล่าวเท่ากับ ๓.๓๐ และ ๓.๐๐ บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง ตามลำดับ ต้นทุนเชื้อเพลิงรวมค่าขนส่งควรมีค่าน้อยกว่า ๗๐.๕๘ × ๑๐$^{-๓}$ และ ๕๙.๕๕ × ๑๐$^{-๓}$ บาท/เมกะจูล ตามลำดับ ดังนั้น เชื้อเพลิงที่มีความเป็นไปได้ในการนำมาผลิตไฟฟ้าจึงได้แก่ ยอดใบอ้อย ซังข้าวโพด ใยปาล์ม และทะลายปาล์ม ถ้าให้ส่วนเพิ่มราคารับซื้อไฟฟ้าสูงขึ้น ก็จะช่วยส่งเสริมการนำมวลชีวภาพมาใช้ได้อย่างคุ้มค่ามากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ : การผลิตไฟฟ้า, มวลชีวภาพ, ต้นทุน

บทนำ

จากแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. ๒๕๕๕-๒๕๗๓ (ฉบับปรับปรุงครั้งที่ ๓) *(สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, ๒๕๕๕)* ได้กำหนดแผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้าจากมวลชีวภาพ ณ เวลาสิ้น พ.ศ. ๒๕๗๓ รวมทั้งสิ้น ๒,๖๐๒.๒๐ เมกะวัตต์ คิดเป็นร้อยละ ๑๗.๘๕ ของแผนทั้งหมด และใน พ.ศ. ๒๕๕๖ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตมีการกำหนดราคารับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนขนาดเล็กกรณีที่รวมและไม่รวมส่วนเพิ่มราคารับซื้อไฟฟ้าที่ ๓.๓๐ และ ๓.๐๐ บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง ทั้งนี้ควรมีการพิจารณาการกำหนดราคารับซื้อให้เหมาะสมตามต้นทุนการผลิตจริงโดยไม่สูงเกินไปจนเป็นภาระต่อผู้ใช้ไฟฟ้า เพื่อให้เป็นไปได้ที่จะผลิตไฟฟ้าจากมวลชีวภาพของประเทศเพิ่มขึ้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้คัดเลือกเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่เหมาะสมสำหรับใช้ในประเทศไทย และประเมินต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงดังกล่าว ผลที่ได้สามารถนำไปใช้กำหนดส่วนเพิ่มราคารับซื้อไฟฟ้าที่เหมาะสม

วิธีการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยมีดังต่อไปนี้

๑. ศึกษาข้อมูลทั่วไปของเทคโนโลยีในการผลิตไฟฟ้าจากมวลชีวภาพ และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรประเภทต่าง ๆ

๒. คัดเลือกประเภทเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสม และเลือกประเภทวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยประเมินศักยภาพและปริมาณที่ยังไม่ได้นำมาใช้

๓. วิเคราะห์การผลิตไฟฟ้า โดย

๓.๑ หาปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้า จากสมการที่ (๑)

$$W = (m)(E)(LHV)(OH)(3.6) \qquad (๑)$$

โดยที่ m = อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าระบบ (ตัน/ปี)

W = ขนาดโรงไฟฟ้า (เมกะวัตต์)

E = ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้ารวมของโรงไฟฟ้า (ร้อยละ)

LHV = ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (เมกะจูล/กิโลกรัม)

OH = ชั่วโมงการทำงานของโรงไฟฟ้า (ชั่วโมง/ปี)

๓.๒ การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้า

การประเมินต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดอายุโครงการ (levelized electricity cost, LEC) สามารถหาได้จากสมการที่ (๒)

$$\mathbf{LEC} = \frac{\sum_{t=0}^{n}\left(\frac{I_t + O\&M_t + F_t}{(\infty + r)^t}\right)}{\sum_{t=0}^{n}\left(\frac{E_t}{(\infty + r)^t}\right)} \qquad (๒)$$

โดยที่ LEC = ต้นทุนต่อหน่วยการผลิตไฟฟ้าตามเวลา (บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

I_t = ค่าการลงทุนในปีที่ t (บาท)

$O\&M_t$ = ค่าดำเนินการและบำรุงรักษาในปีที่ t (บาท)

F_t = ค่าการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าในปีที่ t (บาท)

E_t = พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในปีที่ t (บาท)

r = อัตราส่วนลด (ทศนิยม)

n = อายุของโครงการ (กำหนด ๒๐ ปี)

สมมุติฐานในการคำนวณต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้า แสดงไว้ในตารางที่ ๑

ตารางที่ ๑ รายละเอียดข้อมูลทางเทคนิคและทางการเงินของเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าแบบเผาตรง ขนาด ๑๐ เมกะวัตต์ *(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน [พพ.], ๒๕๔๙; ตลาดขนส่งออนไลน์, ๒๕๕๓)*

ข้อมูลทางเทคนิคของเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าแบบเผาตรง (ระบบ **Stoker boiler** ที่ใช้กังหันไอน้ำ) (พพ., ๒๕๔๙)		หมายเหตุ
ขนาด MW	๑๐	-
Efficiency, Power	ร้อยละ ๑๘	-
Operation Hours, hours/year	๗,๔๔๖	-
Power Production (Gross), MWh/year	๗๔,๔๖๐	-
Own Consumption - Power (๑๐%), MWh/year	๗,๔๔๖	-
Power Production (Net), MWh/year	๖๗,๐๑๔	-
Fuel Demand, MWh/year	๔๑๓,๖๖๖.๖๖๗	-
ข้อมูลทางการเงินของโรงไฟฟ้า		
Total Investment, baht	๔๙๓,๒๙๔,๙๐๓	-
Total O&M Costs, baht/year	๒๗,๐๘๒,๔๑๔	เพิ่มขึ้นร้อยละ ๑ ต่อปี
Total Salary and Administration, baht/year	๔,๒๖๙,๖๕๒	เพิ่มขึ้นร้อยละ ๓ ต่อปี
ข้อมูลทางการเงินของเชื้อเพลิง		
ราคาเชื้อเพลิง, บาท	ตามประเภทของเชื้อเพลิง	เพิ่มขึ้นร้อยละ ๓ ต่อปี
ราคาค่าขนส่ง, บาทต่อตัน (โดยรถบรรทุก ๑๐ ล้อ ปริมาตรการบรรทุก ๔๐ ลูกบาศก์เมตร)		เพิ่มขึ้นร้อยละ ๓ ต่อปี
อัตราคิดลด (discount rate)	ร้อยละ ๑๐	-

หมายเหตุ : กำหนดสมมุติฐานว่า เชื้อเพลิงเกิดขึ้นตามรอบการเก็บเกี่ยวจะถูกลำเลียงส่งเข้าโรงไฟฟ้าโดยตรง และพิจารณาราคาเชื้อเพลิงเศษวัสดุจากราคาก่อนส่งเข้าโรงไฟฟ้า และราคาค่าขนส่งอ้างอิงจากราคากลางค่าการขนส่ง *(ตลาดขนส่งออนไลน์, ๒๕๕๓)*

ผลการวิจัย

เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากมวลชีวภาพ

จากผลการศึกษาเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากมวลชีวภาพพบว่า ระบบการผลิตส่วนใหญ่เป็นระบบเผาตรง โดยที่กำลังผลิตติดตั้งอยู่ในช่วง ๑-๔๐๐ MWe ในกรณีที่ใช้เชื้อเพลิงผสม ขนาดโรงไฟฟ้าสามารถสูงถึง ๑,๕๐๐ MWe ส่วนเทคโนโลยีระบบแกซิฟิเคชัน มีกำลังผลิตติดตั้งค่อนข้างต่ำ อยู่ในช่วง ๐.๐๒๕-๑๒ MWe เช่นเดียวกับระบบการหมักแบบไร้อากาศ ค่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามขนาดระบบ

เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากมวลชีวภาพของประเทศไทยปัจจุบัน *(สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), ๒๕๕๐; สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, ๒๕๕๕)* ที่มีการผลิตไฟฟ้าจำหน่ายเข้าระบบสายส่งทั้งประเภท VSPP และ SPP เป็นระบบเผาตรง ร้อยละ ๗๘.๒๖ ระบบการหมักแบบไร้อากาศร้อยละ ๑๑.๖๖ ระบบแกซิฟิเคชัน ร้อยละ ๐.๖๕ และไม่ระบุระบบ ร้อยละ ๙.๔๓ โรงไฟฟ้าที่ใช้เทคโนโลยีเผาตรง ระบบ Stoker boiler ที่ใช้ condensing steam turbine ขนาดไม่เกิน ๑๐ เมกะวัตต์ จะมีความเสี่ยงต่ำด้านปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ การวิเคราะห์เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เชื้อเพลิงวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในประเทศไทยจึงใช้ระบบเผาตรง แบบ Stoker boiler ควบคู่กับ condensing steam turbine ขนาด ๑๐ เมกะวัตต์

ประเภทและราคาของมวลชีวภาพ

ประเภทมวลชีวภาพที่เลือกศึกษาในงานวิจัยฉบับนี้คือ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีใช้ในการผลิตไฟฟ้า ได้แก่ แกลบ ฟางข้าว ยอดใบอ้อย ซังข้าวโพด เหง้ามัน ใยปาล์ม กะลาปาล์ม ทะลายปาล์ม ศักยภาพมวลชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้าเฉลี่ย พ.ศ. ๒๕๕๐-๒๕๕๔ แสดงดังตารางที่ ๒

ตารางที่ ๒ ศักยภาพมวลชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้า

ประเภทวัสดุเหลือใช้	ปริมาณเฉลี่ย พ.ศ. ๒๕๕๐-๒๕๕๔ (ตัน/ปี) [๒]	การนำไปใช้	ร้อยละ	ที่มา	ปริมาณวัสดุคงเหลือเฉลี่ย พ.ศ. ๒๕๕๐-๒๕๕๔ (ตัน/ปี)
แกลบ	๗,๒๙๙,๘๒๔	ถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงสี	๙๕.๒๔	[๓]	๓๔๗,๔๗๒
		เหลือ	๔.๗๖		
ฟางข้าว	๓๘,๔๓๗,๑๒๖	ไถกลบเป็นปุ๋ย	๕๐.๐๐	[๔]	๓,๘๔๓,๗๑๓
		อัดก้อนเป็นอาหารสัตว์ และอื่น ๆ	๒๐.๐๐		
		ถูกเผาทิ้ง	๒๐.๐๐		
		เหลือ	๑๐.๐๐		
ยอดใบอ้อย	๑๕,๐๗๗,๐๖๒	ถูกเผาทิ้งและไม่สามารถรวบรวมได้	๘๕.๐๐	[๔]	๒,๒๖๑,๕๕๙
		เหลือ	๑๕.๐๐		
ซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	๘๑๖,๑๑๕	เหลือ	๘๓.๓๓	[๓]	๖๘๐,๐๖๙
เหง้ามันสำปะหลัง	๒,๒๙๔,๖๑๑	เหลือ	๙๘.๕๒	[๑]	๒,๒๖๐,๖๕๑
ใยปาล์ม	๑,๒๙๙,๘๒๙	เหลือ	๗.๗๐	[๓]	๑๐๐,๐๘๗
กะลาปาล์ม	๑,๑๒๕,๓๒๗	เหลือ	๒๖.๔๗		๒๙๗,๘๗๔
ทะลายปาล์ม	๑,๘๗๕,๖๘๘	เหลือ	๔๔.๔๕		๘๓๓,๗๔๓

หมายเหตุ : [๑] ธเนศ และคณะ, ๒๕๕๐ [๒] พพ., ๒๕๕๐-๒๕๕๔ [๓] ธราพงศ์ และคณะ, ๒๕๕๓ [๔] วัฒนชัย, ๒๕๕๓

จากตารางที่ ๒ ถ้าเปรียบเทียบค่าพลังงานและปริมาณที่เหลืออยู่ของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร พบว่า เชื้อเพลิงฟางข้าวมีศักยภาพพลังงานสูงที่สุด รองลงมาคือเหง้ามันสำปะหลัง

ราคาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้าแบ่งเป็น ๒ กลุ่ม คือ แบบไม่ต้องผ่านกระบวนการเตรียม ได้แก่ แกลบ เหง้า ใยปาล์ม กะลาปาล์ม และแบบที่ต้องผ่านการเตรียม ได้แก่ ฟางข้าว ยอดใบอ้อย ซังข้าวโพด ทะลายปาล์ม ขั้นตอนการเตรียมเชื้อเพลิงและราคาเชื้อเพลิงก่อนส่งโรงไฟฟ้า ตามประเภทเชื้อเพลิง แสดงดังตารางที่ ๓

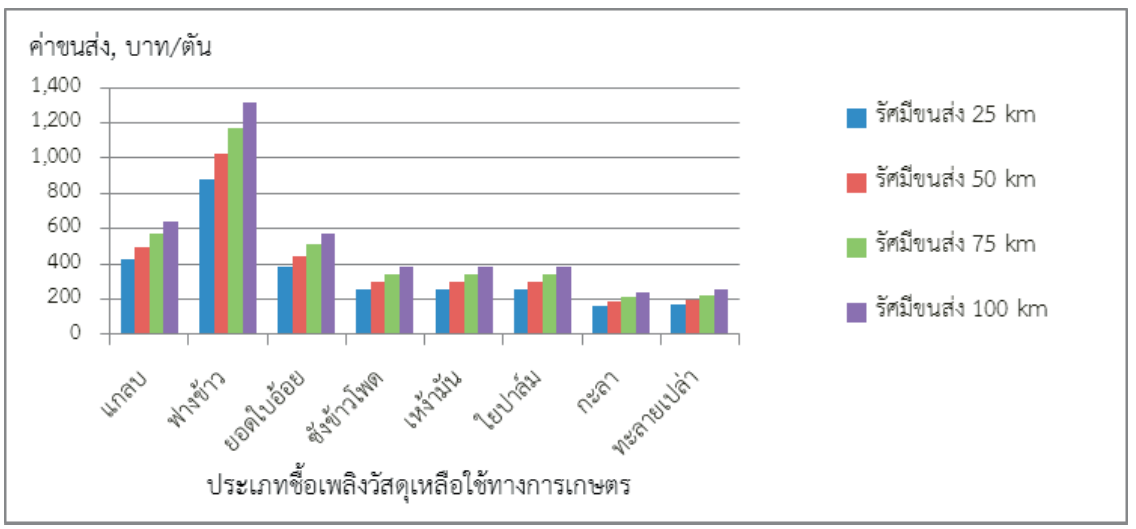
ตารางที่ ๓ ราคาเชื้อเพลิงก่อนส่งเข้าโรงไฟฟ้า

เชื้อเพลิง	กระบวนการลดขนาดหรือแปรรูป	ความชื้น (%)	ค่าความร้อนสุทธิ (MJ/kg)	ความหนาแน่น (kg/m^3)	ราคาขายก่อนส่งโรงไฟฟ้า (บาท/ตัน)
แกลบ	ไม่มี	๑๒.๐๐	๑๓.๕๑๗	๑๕๐	๔๐๐-๑,๔๕๐ (ไม่รวมขนส่ง) [๒]
ฟางข้าว	อัดก้อน	๑๐.๐๐	๑๒.๓๓๐	๖๕.๔๕-๗๒.๗๓	๘๐๐-๘๘๘ (ไม่รวมขนส่ง) [๓]
ยอดใบอ้อย	สับย่อย	๙.๒๐	๑๕.๔๗๙	๑๖๗.๔๒	๒๗๓.๔๖ (ไม่รวมขนส่ง) [๔]
ซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	ป่นรวมเปลือก	๒๐.๐๐	๑๒.๘๒๐	๒๕๐	๕๐๐-๘๕๐/๑,๕๐๐-๒,๐๐๐ (รวมขนส่ง) [๕]
เหง้ามัน	ไม่มี	๕๙.๔๐	๕.๔๙๔	๒๕๐	๕๑๙.๐๐ (ไม่รวมขนส่ง) [๑]
ใยปาล์ม	ไม่มี	๓๘.๕๐	๑๑.๔๐๐	๒๕๐	๔๖๗.๑๐ (ไม่รวมขนส่ง) [๑]
กะลาปาล์ม	ไม่มี	๑๒.๐๐	๑๖.๙๐๐	๔๐๐	๒,๐๗๖ (ไม่รวมขนส่ง) [๑]
ทะลายเปล่า	บด	๕๘.๖๐	๗.๒๔๐	๓๘๐	๕๐-๕๕ (ไม่รวมขนส่ง) [๒]

หมายเหตุ : ข้อมูลค่าความร้อนอ้างอิงจากฐานข้อมูลของมูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม (มพส.)
ข้อมูลราคาขายเชื้อเพลิงปรับฐานราคาเป็นมูลค่าเงิน ณ พ.ศ. ๒๕๕๔-๒๕๕๕
ข้อมูลราคายอดใบอ้อยจากการประมาณที่ระยะขนส่ง ๒๕ กิโลเมตร โดยรถบรรทุก ๖ ล้อ ปริมาตร ๒๐ ลูกบาศก์เมตร
[๑] พพ., ๒๕๕๐-๒๕๕๔ [๒] มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, ๒๕๕๕ [๓] Thaipromote, 2555
[๔] ศิราวุธ, ๒๕๕๓ [๕] Takoothai, 2555

ผลการวิเคราะห์ทางด้านการเงินของเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากมวลชีวภาพด้วยระบบเผาตรง

ในการขนส่ง กำหนดให้ขนส่งโดยรถบรรทุก ๑๐ ล้อ ปริมาตรการบรรทุก ๔๐ ลูกบาศก์เมตร ราคาขนส่งจำแนกตามประเภทเชื้อเพลิงและระยะทางแสดงดังรูปที่ ๑ พบว่า ฟางข้าว แกลบ และยอดใบอ้อย มีค่าขนส่งสูงเนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำ ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยแยกตามประเภทเชื้อเพลิงและระยะทาง แสดงดังตารางที่ ๔



รูปที่ ๑ ค่าขนส่งของเชื้อเพลิงแยกตามประเภทมวลชีวภาพและระยะทางขนส่ง

ตารางที่ ๔ ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยของโรงไฟฟ้าระบบ Stoker boiler ที่ใช้ condensing steam turbine ขนาด ๑๐ เมกะวัตต์ ตามประเภทเชื้อเพลิงและระยะทาง

ชนิดเชื้อเพลิง	ราคาเชื้อเพลิง (บาท/ตัน)	ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย (บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง) ตามระยะทางการขนส่งและราคาเชื้อเพลิง ที่ discount rate ๑๐% ขนาด ๑๐ เมกะวัตต์			
		รัศมีการขนส่งรอบโรงไฟฟ้า			
		๒๕ km	๕๐ km	๗๕ km	๑๐๐ km
แกลบ	๔๐๐.๐๐	๓.๐๔๒	๓.๑๘๕	๓.๓๒๘	๓.๔๗๑
	๑,๕๐๐.๐๐	๕.๒๖๒	๕.๔๐๕	๕.๕๔๘	๕.๖๙๑
ฟางข้าว	๘๐๐.๐๐	๕.๐๘๘	๕.๔๑๒	๕.๗๓๖	๖.๐๖๐
	๘๘๐.๐๐	๕.๒๖๕	๕.๕๘๙	๕.๙๑๓	๖.๒๓๗
ยอดใบอ้อย	๒๗๓.๔๖	๒.๕๒๙	๒.๖๔๑	๒.๗๕๔	๒.๘๖๖
	๓๒๘.๑๕	๒.๖๒๖	๒.๗๓๘	๒.๘๕๐	๒.๙๖๒
ซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	๕๐๐.๐๐	๒.๙๘๒	๓.๐๗๓	๓.๑๖๔	๓.๒๕๔
	๙๐๐.๐๐	๓.๘๓๔	๓.๙๒๔	๔.๐๑๕	๔.๑๐๕
เหง้ามันสำปะหลัง	๕๑๙.๐๐	๕.๒๒๑	๕.๔๓๒	๕.๖๔๔	๕.๘๕๕
	๖๒๒.๘๐	๕.๗๓๖	๕.๙๔๘	๖.๑๕๙	๖.๓๗๑
ใยปาล์ม	๔๖๗.๑๐	๓.๑๐๔	๓.๒๐๖	๓.๓๐๘	๓.๔๑๐
	๕๖๐.๕๒	๓.๓๒๘	๓.๔๒๙	๓.๕๓๑	๓.๖๓๓
กะลาปาล์ม	๒,๐๗๖.๐๐	๔.๙๘๓	๕.๐๒๖	๕.๐๖๙	๕.๑๑๒
	๒,๔๙๑.๒๐	๕.๖๕๔	๕.๖๙๖	๕.๗๓๙	๕.๗๘๒
ทะลายปาล์มเปล่า	๕๐.๐๐	๒.๑๙๗	๒.๓๐๒	๒.๔๐๘	๒.๕๑๓
	๖๐.๐๐	๒.๒๓๔	๒.๓๔๐	๒.๔๔๖	๒.๕๕๑

หมายเหตุ : ต้นทุนการดำเนินการของโรงไฟฟ้าไม่รวมค่ามูลค่าเชื้อเพลิง (ราคาเชื้อเพลิง และค่าขนส่ง) เท่ากับ ๑.๓๗๕ บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง

จากตารางที่ ๔ พบว่า ต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าของเชื้อเพลิงทั้ง ๘ ชนิดมีค่าอยู่ในช่วง ๒.๑๐ ถึง ๖.๔๐ บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง โดยที่ค่าความชื้นของเชื้อเพลิง ราคาเชื้อเพลิง และค่าขนส่ง เป็นปัจจัยโดยตรงที่ทำให้เกิดความแปรผันของต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้า เมื่อพิจารณาจากราคารับซื้อไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงซึ่งมีอัตราการรับซื้อไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่รวมและไม่รวมส่วนเพิ่มราคารับซื้อไฟฟ้า เท่ากับ ๓.๓๐ และ ๓.๐๐ บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่า ค่าเชื้อเพลิงควรมีค่าน้อยกว่า ๗๐.๕๘ × ๑๐$^{-๓}$ และ ๕๙.๕๕ × ๑๐$^{-๓}$ บาท/เมกะจูล ตามลำดับ เชื้อเพลิงวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเกือบทั้งหมดมีความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ ยกเว้น ฟางข้าวที่มีความหนาแน่นต่ำ กะลาปาล์มที่มีราคาสูง และเหง้ามันสำปะหลังที่มีค่าความชื้นเชื้อเพลิงสูง จึงเหมาะสมเป็นเชื้อเพลิงเสริมมากกว่าที่จะเป็นเชื้อเพลิงหลัก เชื้อเพลิงและแหล่งเชื้อเพลิงไม่ควรอยู่ห่างจากโรงไฟฟ้ามากเกินไป

สรุป

เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสมกับเชื้อเพลิงมวลชีวภาพที่มีในประเทศไทยคือระบบเผาตรง และเชื้อเพลิงมวลชีวภาพประเภทวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีความเป็นไปได้ในการนำมาผลิตไฟฟ้า ได้แก่ ยอดอ้อย ใบอ้อย ซังข้าวโพด ใยปาล์ม และทะลายปาล์ม โดยพบว่า ต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้ากว่าร้อยละ ๖๐ เป็นค่าเชื้อเพลิงและค่าขนส่ง แหล่งเชื้อเพลิงที่มีค่าความหนาแน่นต่ำไม่ควรอยู่ห่างจากโรงไฟฟ้า ถ้ามีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และ/หรือให้ส่วนเพิ่มราคารับซื้อไฟฟ้าสูงขึ้น ก็จะช่วยส่งเสริมการนำมวลชีวภาพมาใช้ได้อย่างคุ้มค่ามากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม (มพส.) กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.)

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.), ๒๕๔๙, การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์และการเงินของการพัฒนาพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทย. **โครงการส่งเสริมเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทย :** ๓๙-๙๓.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.), ๒๕๕๐-๒๕๕๔, **รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทยปี ๒๕๕๐-๒๕๕๔.** แหล่งที่มา : http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=1841%3A2010-09-22-07-02-07&catid=128&lang=th, October 7, 2013.

ตลาดขนส่งออนไลน์, ๒๕๕๓, **ราคากลางค่าการขนส่ง.** แหล่งที่มา : http://www.dxplace.com/price/list, ๗ ตุลาคม ๒๕๕๖.

ธราพงศ์ วิฑิตศานต์ และคณะฯ, ๒๕๕๓, **พลังงานทางชีวภาพของการพัฒนาที่ยั่งยืน.** สำนักพิมพ์สำนักงานพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, จัดพิมพ์ บริษัท วี พลัส กรุ๊ป (ไทแลนด์)

ธเนศ อุทิศธรรม และคณะฯ, ๒๕๕๐, ศักยภาพพลังงานจากชีวมวลเหลือทิ้งในประเทศไทย, น. ๑-๖. *ใน* **การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ ๓,** กรุงเทพฯ.

มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม (มพส.), ๒๕๕๕, ราคาชีวมวล. แหล่งที่มา : http://www.efe.or.th/efe-book.php?task=25, ๗ ตุลาคม ๒๕๕๖.

วัฒนชัย ภัทรเธียรสกุล, ๒๕๕๓, **การประเมินศักยภาพการผลิตเอทานอลจากลิกโนเซลลูโลสในประเทศไทย.** ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ศิราวุธ สาระขันธ์, ๒๕๕๓, **การศึกษาแนวทางที่เหมาะสมในการผลิตและใช้เชื้อเพลิงมวลชีวภาพจากใบอ้อย.** ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), ๒๕๕๐, รายงานฉบับสมบูรณ์. **โครงการวิจัยเชิงนโยบายเพื่อสนับสนุนการพัฒนาและการใช้พลังงานหมุนเวียนและการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในประเทศไทย เล่ม ๑** : ๔(๔๙)-๔(๖๒).

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน (สนพ.), ๒๕๕๕, **สรุปแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. ๒๕๕๕-๒๕๗๓ (ฉบับปรับปรุงครั้งที่ ๓)** : ๑๓.

Thaipromote, ๒๕๕๕, **ฟางข้าวอัดก้อน.** แหล่งที่มา : http://www.thaipromote.com/view/1775568/ ฟางอัดก้อน, ๗ ตุลาคม ๒๕๕๖.

Takoothai, ๒๕๕๕, **ซังข้าวโพด.** แหล่งที่มา : http://takoothai.tarad.com/product_584229_th, ๗ ตุลาคม ๒๕๕๖.

Abstract

Assessment of Cost of Power Generation from Agricultural Residues in Thailand

Somchart Soponronnarit
Fellow of the Academy of Science, The Royal Institute, Thailand
Division of Energy Technology, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand
Sukawat Thanthara
Division of Energy Management, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand
Warunee Tia
Division of Energy Management, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

This paper aims to assess the unit cost of biomass power generation in Thailand, focusing on common agricultural residues, namely, rice husk, rice straw, sugar cane leaves, maize cob, cassava roots, palm fiber, palm shells, and palm bunches. The result shows that the stoker boiler with steam turbine was a popular technology for generating electricity from biomass. The unit cost of power generation from a 10-MW power plant using the agricultural residues as fuel was in the range of 2.10 to 6.40 baht/kWh, which mainly depended on the feed cost (agricultural residues and transportation cost). However, according to the current biomass-generated electricity buyback rate with and without adder of 3.30 and 3.00 baht/kWh, the feed cost should be less than 70.58×10^{-3} and 59.55×10^{-3} baht/MJ, respectively. Thus sugar cane leaves, maize cob, palm fiber and palm bunches could feasibly be used as power fuel. To promote the use of biomass for power generation, adder should be increased.

Keywords: biomass, cost, electricity generation