

การสร้างแบบจำลองการงอกของสปอร์ราภายใต้สภาวะต่างๆ

MODELING FUNGAL SPORE GERMINATION UNDER VARIOUS CONDITIONS



ปานุลักษณ์ บุญเรือง
PANULUK BOONRUANG

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MODELING FUNGAL SPORE GERMINATION UNDER VARIOUS CONDITIONS

PANULUK BOONRUANG

A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างแบบจำลองการงอกของสปอร์ราภายใต้สภาวะต่างๆ
นักศึกษา	นายภานุลักษณ์ บุญเรือง
รหัสประจำตัว	62601117
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ธีรพล ฤกษ์เกษมสันต์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการงอกของสปอร์ราภายใต้สภาวะต่างๆ ซึ่งแบบจำลองใหม่ที่พัฒนาขึ้นสามารถเขียนได้ ดังนี้:

$$P = P_{\max} \left[1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{t}{\tau}\right)^{\frac{4 \cdot \tau \cdot \mu}{P_{\max}}}} \right]$$

โดยที่ P คือ สัดส่วนการงอกของสปอร์ t คือ เวลา P_{\max} คือ P เมื่อ $t \rightarrow \infty$ ส่วน μ คือ อัตราการงอกเฉลี่ยของสปอร์ และ τ คือ t เมื่อ $P = 0.5P_{\max}$ แบบจำลองใหม่ที่พัฒนาขึ้นได้ถูกนำไปใช้ในการทำนายการงอกของสปอร์ราทั้งหมด 6 สายพันธุ์ภายใต้สภาวะต่างๆ เทียบกับแบบจำลองอื่นๆ ผลการทำนายแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายการงอกของสปอร์ได้แม่นยำเทียบเท่ากับแบบจำลองอื่นๆ แต่ให้ความหมายได้สอดคล้องกับการงอกของสปอร์ราได้ดีกว่าแบบจำลองอื่นๆ อีกทั้งยังสามารถประมาณค่าตัวแปร μ และ τ ที่สภาวะต่างๆ ได้ผ่านแบบจำลอง Cardinal Model with Inflection (CMI) ซึ่งทำให้สามารถใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นทำนายการงอกของสปอร์ราภายใต้สภาวะอื่นๆ ได้อย่างสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังได้ขยายความสามารถของแบบจำลองให้สามารถทำนายการงอกของสปอร์ราภายใต้สภาวะแบบพลวัตได้ โดยการตั้งสมมติฐานว่า ความเครียดของสปอร์จากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมและความแตกต่างของระยะการเติบโตของสปอร์ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมส่งผลต่อ μ และ τ จากนั้น สมมติฐานดังกล่าว ได้ถูกนำไปใช้ในการทำนายการงอกของสปอร์ราภายใต้สภาวะที่มีการผันผวนของอุณหภูมิ ผลการทำนายแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองและสมมติฐานใหม่ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายการงอกของสปอร์ราภายใต้สภาวะดังกล่าวได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: การทำนายเชิงเชื้อราวิทยา; แบบจำลองการงอก; การเน่าเสียโดยเชื้อรา; เชื้อราวิทยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Modeling fungal spore germination under various conditions
Student	Mr. Panuluk Boonruang
Student ID.	62601117
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Nattapol Lerkkasemsan

ABSTRACT

In this research, we aimed to develop a new mathematical model for predicting fungal spore germination under various conditions. The present model can be rewritten

as: $P = P_{\max} \left[1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{t}{\tau}\right)^{\frac{4\tau\mu}{P_{\max}}}} \right]$ where P is the percentage of germinated spores at time t , P_{\max} is the P when $t \rightarrow \infty$, μ is the rate of fungal spore germination, and τ is the time that $P = 0.5P_{\max}$. This model was validated against the germination data of six fungal species, collected from the literature, compared to other models. The results showed that the present model could predict the germination of fungal spores as well as other models, however, it reasonably described the behaviour of fungal spore germination more than others. Moreover, the μ and τ parameters at various environmental conditions were estimated properly via the Cardinal Model with Inflection. This caused the present model to be more complete. Furthermore, we also extended our model to handle fungal spore germination under dynamic conditions. The extended model hypothesised that the spore stress due to the magnitude of condition change and the fraction of spores showing germs tube during condition change affected the μ and τ parameters. Then, it was validated by predicting the germination data of fungal spores under dynamic temperature conditions. Overall, the predictions, confirmed that our new hypothesis could well predict spore germination under this condition.

Keywords: Predictive mycology, Germination model, Fungal spoilage, Mycology

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณอย่างสุดซึ้งต่อ ผศ.ดร. ณัฐพล ฤกษ์เกษมสันดี ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่มีความเป็นอัจฉริยภาพ ที่ได้ถ่ายทอดจิตวิญญาณแห่งการทำวิจัยและการศึกษามาอย่างต่อเนื่อง หากปราศจากการช่วยเหลือและคำสอนจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ฉบับนี้อาจจะไม่บรรลุผลสำเร็จ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ดร. เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ และ ผศ.ดร. สันติ วัฒนานูสรณ์ ที่ให้คำแนะนำอันทรงคุณค่าในการทำวิจัยนี้มาโดยตลอด หากปราศจากท่านเหล่านี้ ข้าพเจ้าอาจจะไม่ประสบความสำเร็จในการทำวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณภาคีวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง รวมถึงอาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นางพิมพ์ใจ ภูชนะกิจ และ นายพิสันต์ ผลโพธิ์ ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และพื้นที่สำหรับการทำวิจัยมาโดยตลอด

ภาณุลักษณ์ บุญเรือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
ABSTRACT	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	4
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	4
2 ทฤษฎีและการสร้างแบบจำลอง	5
2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการงอกของสปอร์ภายใต้สภาวะคงตัว	5
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรจลนศาสตร์การงอกของสปอร์ (τ หรือ λ และ μ) กับสภาพแวดล้อมในการงอก	6
2.3 การงอกของสปอร์ภายใต้สภาวะแบบพลวัต	8
2.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการงอกของสปอร์ภายใต้สภาวะ แบบพลวัต	9
2.3.2 การปรับแก้ค่า μ หลังจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะ	10
2.3.3 การปรับแก้ค่า τ หลังจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะ	12
3 วิธีการทำวิจัย	14
3.1 การทำนายการงอกสปอร์ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบคงที่	14
3.1.1 การทำนายการงอกสปอร์ภายใต้สภาวะต่างๆ	14
3.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ และ μ/P_{\max}	14
3.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะแวดล้อมกับ μ และ τ	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การทำนายการงอกของสปอร์ราภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัต	15
4 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย	16
4.1 ผลการทำนายการงอกสปอร์ราภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบคงที่	16
4.1.1 การทำนายการงอกสปอร์ราภายใต้สภาวะต่างๆ	29
4.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ และ μ/P_{\max}	30
4.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะแวดล้อมกับ μ และ τ	31
4.2 ผลการทำนายการงอกสปอร์ราภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัต	32
4.2.1 กรณีที่ k $t_{a,s}$ f และ $t_{a,p}$ ไม่ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์ อย่างมีนัยสำคัญ	34
4.2.2 กรณีที่ k และ $t_{a,s}$ ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์ แต่ f และ $t_{a,p}$ ไม่ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ	46
4.2.3 กรณีที่ k $t_{a,s}$ f และ $t_{a,p}$ ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์	53
5 สรุปการวิจัย	58
5.1 สรุปการวิจัย	58
5.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม	59
บรรณานุกรม	60
ภาคผนวก	

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 เส้นโค้งการเติบโตของสปอร์รา	8
รูปที่ 2 ตัวอย่างลักษณะเส้นโค้งการเติบโตของสปอร์ราภายใต้สภาวะแบบพลวัต	9
รูปที่ 3 เส้นโค้งตัวอย่างแสดงความสัมพันธ์ของ (μ) μ vs T และ (χ) $\int_{T_{\min}}^T \mu \cdot dT$ vs T เพื่อใช้ในการคำนวณความเครียดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการงอกของสปอร์	11
รูปที่ 4 เส้นโค้งตัวอย่างแสดงความสัมพันธ์ของ (τ^{-1}) τ^{-1} vs T และ (χ) $\int_{T_{\min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ vs T เพื่อใช้ในการคำนวณเวลาที่ถูกละทิ้งเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะ	13
รูปที่ 5 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา <i>Penicillium expansum</i> ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ และ μ/P_{\max} (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ μ (ง) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ $1/\tau$	23
รูปที่ 6 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา <i>Penicillium expansum</i> ภายใต้อุณหภูมิและความชื้นต่างๆ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ และ μ/P_{\max} (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ μ (ง) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ $1/\tau$	24
รูปที่ 7 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา <i>Gloeosporium musarum</i> ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ และ μ/P_{\max} (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ μ (ง) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ $1/\tau$	25
รูปที่ 8 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา <i>Penicillium italicum</i> ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ และ μ/P_{\max} (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ μ (ง) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ $1/\tau$	26
รูปที่ 9 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา <i>Aspergillus niger</i> ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ และ μ/P_{\max} (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ μ (ง) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ $1/\tau$	27

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 10 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา <i>Fusarium proliferatum</i> ภายใต้ ความชื้นต่างๆ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ และ μ/P_{\max} (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง ความชื้นกับ μ (ง) ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับ $1/\tau$	28
รูปที่ 11 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา <i>Penicillium paneum</i> ภายใต้ความชื้น และ pH ต่างๆ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ และ μ/P_{\max}	29
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง t_n และ n ของสปอร์รา <i>Penicillium expansum</i> ที่ อุณหภูมิ (ก) 0 °C และ 1 °C และ (ข) 10 °C และ 25 °C	33
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่าง t_n และ n ของสปอร์รา <i>Aspergillus niger</i> ที่ อุณหภูมิ (ก) 10 °C และ (ข) 15 °C 30 °C และ 35 °C	34
รูปที่ 14 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา <i>Penicillium expansum</i> ภายใต้อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 9.7 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 10 °C (ข) ความสัมพันธ์ ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับ อุณหภูมิ T	36
รูปที่ 15 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา <i>Penicillium expansum</i> ภายใต้อุณหภูมิ 0 °C เป็นเวลา 24 (เส้นสีส้ม) และ 48 (เส้นสีน้ำเงิน) ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึง เปลี่ยนเป็น 25 °C (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T	37
รูปที่ 16 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา <i>Penicillium expansum</i> ภายใต้อุณหภูมิ 0 °C เป็นเวลา 185.3 (เส้นสีส้ม) และ 163 (เส้นสีน้ำเงิน) ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึง เปลี่ยนเป็น 25 °C (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T	38

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 17 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา <i>Penicillium expansum</i> ภายใต้อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 9 ชั่วโมง แล้วอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 10 °C เป็นเวลาอีก 3.5 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนกลับเป็น 25 °C อีกครั้ง จนกระทั่งการงอกสมบูรณ์	
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T	40
รูปที่ 18 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา <i>Aspergillus niger</i> ภายใต้อุณหภูมิ 10 °C เป็นเวลา 240 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 30 °C (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T	43
รูปที่ 19 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา <i>Aspergillus niger</i> ภายใต้อุณหภูมิ 10 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 30 °C (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T	44
รูปที่ 20 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา <i>Aspergillus niger</i> ภายใต้อุณหภูมิ 15 °C เป็นเวลา 30.8 ชั่วโมง (เส้นสีน้ำเงิน) และ 12 ชั่วโมง (เส้นสีส้ม) จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 35 °C (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T	45
รูปที่ 21 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา <i>Penicillium expansum</i> ภายใต้อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 9.7 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 0 °C (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T	47
รูปที่ 22 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา <i>Penicillium expansum</i> ภายใต้อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 1 °C (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T	48

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 23 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา <i>Aspergillus niger</i> ภายใต้อุณหภูมิ 30 °C เป็น 7.8 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 10 °C (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T	50
รูปที่ 24 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา <i>Aspergillus niger</i> ภายใต้อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 7.8 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 10 °C เป็นเวลาอีก 18.2 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนกลับเป็น 30 °C จนกระทั่งการงอกสมบูรณ์ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T	51
รูปที่ 25 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา <i>Penicillium expansum</i> ภายใต้อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 0 °C เป็นเวลาอีก 16.3 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนกลับเป็น 25 °C จนกระทั่งการงอกสมบูรณ์ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T	54
รูปที่ 26 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา <i>Aspergillus niger</i> ภายใต้อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 7.3 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 10 °C (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T	56

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรจลนศาสตร์และค่าทางสถิติจากการทำนายการงอกสปอร์รา ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบคงที่ด้วยแบบจำลองต่างๆ	16
ตารางที่ 2 ผลการทำนายความสัมพันธ์ของตัวแปรจลนศาสตร์การงอกของสปอร์ราที่ สภาวะต่างๆ ด้วยแบบจำลอง CMI	22
ตารางที่ 3 ค่าตัวแปรจลนศาสตร์และค่าทางสถิติจากการทำนายการงอกสปอร์รา <i>Penicillium expansum</i> ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัตด้วยแบบจำลองที่ พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้และแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis ในกรณี ที่ k $t_{a,s}$ f และ $t_{a,p}$ ไม่ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ	34
ตารางที่ 4 ค่าตัวแปรจลนศาสตร์และค่าทางสถิติจากการทำนายการงอกสปอร์รา <i>Aspergillus niger</i> ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัตด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นใน งานวิจัยนี้และแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis ในกรณีที่ k $t_{a,s}$ f และ $t_{a,p}$ ไม่ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ	42
ตารางที่ 5 ค่าตัวแปรจลนศาสตร์และค่าทางสถิติจากการทำนายการงอกสปอร์รา <i>Penicillium expansum</i> ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัตด้วยแบบจำลองที่ พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้และแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis ในกรณี ที่ k และ $t_{a,s}$ ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์ แต่ f และ $t_{a,p}$ ไม่ส่งผลต่อ การปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ	46
ตารางที่ 6 ค่าตัวแปรจลนศาสตร์และค่าทางสถิติจากการทำนายการงอกสปอร์รา <i>Aspergillus niger</i> ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัตด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นใน งานวิจัยนี้และแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis ในกรณีที่ k และ $t_{a,s}$ ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์ แต่ f และ $t_{a,p}$ ไม่ส่งผลต่อการปรับแก้ ค่าตัวแปรจลนศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ	49

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

<p>ตารางที่ 7 ค่าตัวแปรจลนศาสตร์และค่าทางสถิติจากการทำนายการงอกสปอร์รา <i>Penicillium expansum</i> ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัตด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้และแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis ในกรณี $k_{t,a,s,f}$ และ $t_{a,p}$ ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์</p>	53
<p>ตารางที่ 8 ค่าตัวแปรจลนศาสตร์และค่าทางสถิติจากการทำนายการงอกสปอร์รา <i>Aspergillus niger</i> ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัตด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้และแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis ในกรณีที่ $k_{t,a,s,f}$ และ $t_{a,p}$ ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์</p>	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โดยปกติแล้วสาเหตุหลักของการเน่าเสียของอาหารนั้นเกิดจากการที่อาหารปนเปื้อนเชื้อรา แม้จะมีปริมาณการปนเปื้อนของเชื้อราเพียงเล็กน้อยในอาหาร แต่ถ้าอาหารถูกเก็บไว้ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อรา เชื้อราก็จะสามารถเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนจนกระทั่งทำให้เกิดการเน่าเสียในอาหารได้ ดังนั้น การควบคุมสภาวะแวดล้อมในการจัดเก็บอาหารจึงเป็นหนึ่งในวิธีที่จะช่วยในการยืดอายุของอาหารได้ เพื่อที่จะออกแบบระบบจัดเก็บอาหารให้สามารถควบคุมการเจริญเติบโตของเชื้อราได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาพฤติกรรมของการเจริญเติบโตของเชื้อราภายใต้สภาวะต่างๆ

จากการศึกษาของหลายๆ งานวิจัยระบุว่า วัฏจักรการเจริญเติบโตของเชื้อราสามารถจำแนกได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ คือ 1) ระยะการผลิสปอร์ของเชื้อรา 2) ระยะการงอกของสปอร์ และ 3) ระยะการเจริญเติบโตของเส้นใยรา ในสถานการณ์จริงเชื้อราที่ปนเปื้อนในอาหารมักอยู่ในรูปของสปอร์ และแม้ว่าสปอร์จะไม่สามารถทำให้เกิดการเน่าเสียในอาหารได้โดยตรง แต่ถ้าอาหารถูกจัดเก็บในสภาวะที่เหมาะสมต่อการงอกของสปอร์ สปอร์ก็จะสามารถเจริญเติบโตกลายเป็นกลุ่มของเส้นใยรา และทำให้อาหารเน่าเสียได้ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยส่วนใหญ่จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาพฤติกรรมในขั้นของการงอกของสปอร์ จากงานวิจัยของ Gervais และคณะ [2] ระบุว่าขั้นตอนการงอกของสปอร์ของเชื้อราแบ่งได้เป็น 2 ระยะหลักๆ คือ ระยะการบวมและระยะการงอกของหลอดสปอร์ ซึ่งในระยะการบวมขนาดของสปอร์จะขยายใหญ่ขึ้นและมีการผลิตสารชีวมวลเพิ่มขึ้น ในระยะนี้จะถูกควบคุมจากหลายๆ ปัจจัย เช่น ความสามารถในการเผาผลาญพลังงานภายในเซลล์ การดูดซับสารอาหาร การสร้างสารยับยั้งตนเอง การขาดน้ำ และยีนส์ของราเกิดความบกพร่อง เป็นต้น เมื่อสปอร์ขยายตัวเต็มที่แล้วจะเกิดการงอกของหลอดสปอร์ขึ้น (Germ tube) การงอกจะสิ้นสุดลงเมื่อหลอดสปอร์มีความยาวเท่ากับด้านที่ยาวที่สุดของสปอร์ที่ขยายตัวเต็มที่แล้ว [3] หลังจากขั้นตอนการงอกของสปอร์สิ้นสุดลง หลอดสปอร์ที่ปรากฏขึ้นจะพัฒนากลายเป็นกลุ่มของเส้นใยรา [4] ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเน่าเสียของอาหาร

ผลการทดลองการเพาะเลี้ยงสปอร์ของหลายๆ งานวิจัย [1], [4]–[6] แสดงให้เห็นว่า ที่สภาวะ

ในการเพาะเลี้ยงต่างกัน สปอร์จะมีความสามารถในการเติบโตที่แตกต่างกัน ดังนั้น การสร้างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายลักษณะการเจริญเติบโตของสปอร์ของเราได้อย่างแม่นยำ ในสภาวะต่างๆ จึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการออกแบบระบบจัดเก็บอาหารที่สามารถควบคุมและยับยั้ง การเจริญเติบโตของเชื้อราได้อย่างมีประสิทธิภาพ แบบจำลองที่นิยมใช้ในการทำนายพฤติกรรม การงอกของสปอร์ คือ แบบจำลอง Logistic แบบจำลอง Gompertz และแบบจำลอง Asymmetric [7]– [9] โดยทั้งสามแบบจำลองจะทำนายสัดส่วนของจำนวนสปอร์ที่งอกสมบูรณ์แล้ว ณ เวลาต่างๆ ต่อ จำนวนสปอร์ทั้งหมดที่เพาะเลี้ยงภายใต้สภาวะที่คงตัว การทำนายสัดส่วนของจำนวนสปอร์ที่งอก สมบูรณ์แล้วต่อจำนวนสปอร์ทั้งหมดที่อยู่ในระบบนั้น เป็นที่นิยมมากกว่าการทำนายพฤติกรรม การเติบโตของสปอร์แต่ละตัว เนื่องจาก แม้ว่าสปอร์สายพันธุ์เดียวกันจะถูกเพาะเลี้ยงในสภาพแวดล้อม เดียวกัน ความสามารถในการเจริญเติบโตของสปอร์แต่ละตัวนั้นจะแตกต่างกัน เพราะสปอร์แต่ละตัว มีการหลังสารยับยั้งและสารเร่งการงอกที่ไม่เท่ากัน ทำให้ระยะเวลาการงอกของสปอร์แต่ละตัวไม่ เท่ากัน ยิ่งไปกว่านั้น ยังมีหลายๆ งานวิจัย ระบุว่า ถ้าสปอร์อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีความเครียดสูง หรือเติบโตได้ยาก เช่น สภาพแวดล้อมที่มีค่าความชื้นต่ำ ($\text{water activity} < 0.85$) หรือมีอุณหภูมิที่ สปอร์ราสายพันธุ์นั้นๆ เติบโตได้ยาก [10]–[13] เป็นต้น ระยะเวลาการงอกของสปอร์แต่ละตัวจะมี ความแตกต่างกันมาก [1], [13] ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยส่วนใหญ่ จึงเลือกที่จะศึกษาพฤติกรรม การงอก ของสปอร์ผ่านการทำนายสัดส่วนของจำนวนของสปอร์ที่งอกสมบูรณ์แล้ว ณ เวลาต่างๆ

สำหรับสมมติฐานเริ่มต้นที่ใช้เพื่อพัฒนาแบบจำลองทั้งสามนั้น สามารถอธิบายได้ดังนี้ แบบจำลอง Logistic ถูกตั้งขึ้นภายใต้สมมติฐานที่ว่า ภายในระบบหนึ่งๆ ลักษณะการเจริญเติบโตของ สิ่งมีชีวิตจะมีความสมมาตร กล่าวคือ จำนวนของสิ่งมีชีวิตที่เติบโตได้ช้าและเร็วมีจำนวนเท่าๆ กัน ส่วนแบบจำลอง Gompertz กลับมองว่าสิ่งมีชีวิตที่สามารถเติบโตได้เร็วมีจำนวนมากกว่าสิ่งมีชีวิตที่ใช้ เติบโตช้า [14] ทำให้รูปแบบการเติบโตของสิ่งมีชีวิตมีลักษณะไม่สมมาตร ในขณะที่แบบจำลอง Asymmetric ซึ่งพัฒนาโดย Dantigny และคณะ ในปี 2011 [9] สามารถทำนายการเจริญเติบโตของ สิ่งมีชีวิตได้ทั้งแบบที่สมมาตรและไม่สมมาตร ทำให้ในปัจจุบันแบบจำลอง Asymmetric ได้รับการ ยอมรับและมีการนำไปใช้ในหลายๆ งานวิจัยมากกว่าแบบจำลอง Logistic และ Gompertz [9], [15]–[21] นอกจากสมมติฐานเบื้องต้นของแต่ละแบบจำลองที่แตกต่างกันแล้ว ตัวแปรในแต่ละ แบบจำลองยังมีความแตกต่างกันด้วย กล่าวคือ:

(1) แบบจำลอง Logistic ประกอบด้วยตัวแปร ดังนี้ อัตราการงอกเฉลี่ยของสปอร์ เวลาที่ สปอร์ครึ่งหนึ่งงอกสมบูรณ์ และร้อยละการงอกสูงสุดของสปอร์

(2) แบบจำลอง Gompertz ประกอบด้วยตัวแปร ดังนี้ อัตราการงอกเฉลี่ยของสปอร์ เวลาที่ สปอร์ร้อยละ 6.6 ของสปอร์ทั้งหมดงอกสมบูรณ์ และร้อยละการงอกสูงสุดของสปอร์

- (3) แบบจำลอง Asymmetric ประกอบด้วยตัวแปร ดังนี้ ตัวแปรกำหนดรูปร่างของเส้นโค้ง (The shape parameter) เวลาที่สปอร์ครึ่งหนึ่งงอกสมบูรณ์ และร้อยละการงอกสูงสุดของสปอร์

อัตราการงอกเฉลี่ยของสปอร์ เวลาที่สปอร์ครึ่งหนึ่งงอกสมบูรณ์ และเวลาที่สปอร์ร้อยละ 6.6 ของสปอร์ทั้งหมดงอกสมบูรณ์จะแปรตามสภาพแวดล้อมในการเพาะเลี้ยงสปอร์ เช่น อุณหภูมิและความชื้น ซึ่งแบบจำลองที่ใช้เพื่อประมาณค่าตัวแปรทั้งสามภายใต้สภาพแวดล้อมต่างๆ คือแบบจำลอง Cardinal Model with Inflection (CMI) [22] ส่วนค่าตัวแปรร้อยละการงอกสูงสุดของสปอร์และตัวแปรกำหนดรูปร่างของเส้นโค้ง ภายใต้สภาพแวดล้อมต่างๆ ยังไม่มีการพัฒนาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้น หากพิจารณาข้อความข้างต้น จะเห็นได้ว่า ตัวแปรในแบบจำลอง Asymmetric มีข้อเสียเปรียบมากกว่าแบบจำลองอื่นๆ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้แบบจำลอง Asymmetric นิยมนำไปใช้ในการทำนายการงอกของสปอร์ภายใต้สภาวะที่เกิดจากการทดลองเท่านั้น หากต้องการทำนายการงอกของสปอร์ภายใต้สภาวะอื่นๆ ที่ยังไม่มีการข้อมูลจากการทดลอง แบบจำลองนี้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ในขณะที่แบบจำลองอื่นๆ สามารถทำนายได้ ดังนั้น เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของแบบจำลอง Asymmetric การแก้ไขตัวแปรกำหนดรูปร่างของเส้นโค้งให้สามารถประมาณค่าได้ที่สภาวะแวดล้อมต่างๆ จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง

นอกจากนี้ แบบจำลองที่กล่าวมาแล้วทั้งสิ้น [1], [7]–[9] เป็นเพียงการทำนายการงอกของสปอร์ภายใต้สภาวะที่คงตัวตลอดการงอกจนสมบูรณ์ แต่ในสถานการณ์จริง สภาวะที่ใช้ในการจัดเก็บอาหารหรือสินค้าต่างๆ ที่ปนเปื้อนเชื้อรา อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงและผันผวนตลอดเวลา เช่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างการเคลื่อนย้าย หรือขณะเปิด-ปิด ที่จัดเก็บสินค้าหรืออาหาร ดังนั้น จึงทำให้ไม่สามารถใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นจากสมมติฐานภายใต้สภาวะแบบคงที่มาทำนายได้ ทำให้ไม่สามารถระบุเวลาที่อาหารจะเน่าเสียหรือเสื่อมสภาพได้อย่างถูกต้อง ดังนั้น การศึกษาและพัฒนาแบบจำลองเพื่ออธิบายการงอกของสปอร์ในสภาวะจริงทั้งแบบคงที่และแบบพลวัตจึงมีความสำคัญอย่างมาก จากที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการงอกของสปอร์ภายใต้สภาวะต่างๆ ทั้งแบบคงที่และแบบพลวัต

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการงอกของสปอร์ภายใต้สภาวะต่างๆ
- 2) เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการงอกของสปอร์ภายใต้สภาวะ

ต่างๆ ทั้งแบบคงที่และแบบพลวัต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

- 1) แบบจำลอง Asymmetric ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย Dantigny และคณะ ในปี 2011 [9] สามารถทำนายการงอกของสปอร์ราได้เหมาะสมที่สุด
- 2) ตัวแปรกำหนดรูปร่างของเส้นโค้งในแบบจำลอง Asymmetric มีความสัมพันธ์กับตัวแปร จลนศาสตร์การงอกของสปอร์รา และสภาวะแวดล้อมในการงอกของสปอร์รา
- 3) สัดส่วนของสปอร์ราที่งอกสมบูรณ์แล้วและความเครียดจากการงอกของสปอร์ราภายใต้ สภาวะแวดล้อมแบบพลวัตส่งผลต่อตัวแปรจลนศาสตร์การงอกของสปอร์รา
- 4) ค่าคงตัวที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่สปอร์ครั้งหนึ่งงอกสมบูรณ์แล้วและค่าเฉลี่ย ของอัตราการงอกของสปอร์รา จะนำไปสู่การค้นพบค่าคงที่เฉพาะของสปอร์รานั้นๆ

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

- 1) พัฒนาตัวแปรกำหนดรูปร่างเส้นโค้งในแบบจำลอง Asymmetric ให้สามารถประมาณค่า ได้ภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆ
- 2) สายพันธุ์ของสปอร์ราที่จะนำมาใช้ในการประเมินความถูกต้องร่วมกับแบบจำลองที่ พัฒนาขึ้นมีทั้งหมด 6 ชนิด คือ *Penicillium expansum*; *Aspergillus niger*; *Penicillium italicum*; *Gloeosporium musarum*; *Fusarium proliferatum*; และ *Penicillium paneum*
- 3) พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการงอกของสปอร์ราภายใต้สภาวะต่างๆ ทั้งแบบคงที่และแบบพลวัต

บทที่ 2

ทฤษฎีและการสร้างแบบจำลอง

2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการงอกของสปอร์ภายใต้สภาวะคงตัว

จากการศึกษาของหลายๆ งานวิจัย [12], [23]–[25] ระบุว่าพฤติกรรมการงอกของสปอร์จากราสามารถถูกทำนายได้เป็นอย่างดีด้วยแบบจำลอง Logistic Gompertz และ Asymmetric ซึ่งแต่ละแบบจำลองสามารถเขียนได้ดังนี้

- แบบจำลอง Logistic:

$$P = \frac{P_{\max}}{1 + \exp\left\{\frac{4\mu}{P_{\max}}(\tau - t)\right\}} \quad (1)$$

- แบบจำลอง Gompertz:

$$P = P_{\max} \exp\left[-\exp\left\{\frac{\mu e}{P_{\max}}(\lambda - t) + 1\right\}\right] \quad (2)$$

- แบบจำลอง Asymmetric:

$$P = P_{\max} \left[1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{t}{\tau}\right)^d} \right] \quad (3)$$

โดยที่ P = ร้อยละของจำนวนสปอร์ที่งอกแล้ว ณ เวลาต่างๆ ต่อจำนวนสปอร์ทั้งหมดในระบบ

P_{\max} = ร้อยละของจำนวนสปอร์ที่งอกแล้วต่อจำนวนสปอร์ทั้งหมดในระบบเมื่อเวลาเป็นอนันต์

t = เวลาเพาะเลี้ยงสปอร์รา

τ = เวลาที่ทำให้ $P = 0.5P_{\max}$

λ = เวลาที่ทำให้ $P = 0.066P_{\max}$

d = ตัวแปรกำหนดรูปร่างของเส้นโค้งในแบบจำลอง Asymmetric

μ = ความชันของเส้นสัมผัสของแบบจำลองเมื่อ $P = 0.5P_{\max}$ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็น

อัตราการเติบโตเฉลี่ยของสปอร์ที่ถูกเพาะเลี้ยงภายในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของแบบจำลอง Asymmetric ในเรื่องของตัวแปร d ดังที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 1.1 จึงมีความพยายามในการเปลี่ยนตัวแปร d ให้อยู่ในรูปของตัวแปรอื่นๆ โดยกระบวนการดังต่อไปนี้

1) หาอนุพันธ์ของแบบจำลอง Asymmetric เทียบกับตัวแปร t ซึ่งได้ผลลัพธ์เป็น:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P_{\max} \cdot d \cdot t^{(d-1)}}{\left[1 + \left(\frac{t}{\tau}\right)^d\right]^2 \cdot \tau^d} \quad (4)$$

2) กำหนดให้ $dP(t = \tau)/dt = \mu$ ในสมการที่ (4) ซึ่งได้ผลลัพธ์เป็น:

$$\frac{dP}{dt} = \mu = \frac{P_{\max} \cdot d \cdot \tau^{(d-1)}}{\left[1 + \left(\frac{\tau}{\tau}\right)^d\right]^2 \cdot \tau^d} \quad (5)$$

$$\mu = \frac{P_{\max} \cdot d}{4\tau} \quad (6)$$

$$d = \frac{4 \cdot \tau \cdot \mu}{P_{\max}} \quad (7)$$

3) แทนค่า $d = 4 \cdot \tau \cdot \mu / P_{\max}$ ในสมการที่ (3) ซึ่งได้ผลลัพธ์เป็น:

$$P = P_{\max} \left[1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{t}{\tau}\right)^{\frac{4 \cdot \tau \cdot \mu}{P_{\max}}}} \right] \quad (8)$$

สมการที่ (8) คือ แบบจำลอง Asymmetric ที่ได้รับการแก้ไขในงานวิจัยนี้ ซึ่งทุกตัวแปรในแบบจำลองได้รับการตีความเชิงชีววิทยา

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรจลนศาสตร์การงอกของสปอร์รา (τ หรือ λ และ μ) กับสภาพแวดล้อมในการงอก

ในงานวิจัยที่ผ่านมา ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรจลนศาสตร์การเติบโตของสิ่งมีชีวิตระดับจุลภาคกับสภาพแวดล้อมในการเติบโตสามารถอธิบายได้ดีด้วยแบบจำลอง Cardinal Model with Inflection (CMI) [1], [10], [21], [26] ซึ่งพัฒนาโดย Rosso และคณะ ในปี 1993 [22] แบบจำลอง CMI มีข้อดี คือ สามารถทำนายค่าสภาวะที่ขอบเขตเขตและสภาวะที่เหมาะสมของการเติบโตของสิ่งมีชีวิตระดับจุลภาคได้ นอกจากนี้ ในปี 2012 Gougouli และ Koutsoumanis ได้ดัดแปลง

แบบจำลอง CMI ให้สามารถนำมาใช้ในการทำนายอิทธิพลของอุณหภูมิในการงอกของสปอร์ราต่อตัวแปรจลนศาสตร์การงอกของสปอร์รา (τ หรือ λ และ μ) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\mu(T) = \frac{\mu_{\text{opt}}(T - T_{\text{max}})(T - T_{\text{min}})^2}{(T_{\text{opt}} - T_{\text{min}})[(T_{\text{opt}} - T_{\text{min}})(T - T_{\text{opt}}) - (T_{\text{opt}} - T_{\text{max}})(T_{\text{opt}} + T_{\text{min}} - 2T)]} \quad (9)$$

$$\tau^{-1}(T) = \frac{\tau^{-1}_{\text{opt}}(T - T_{\text{max}})(T - T_{\text{min}})^2}{(T_{\text{opt}} - T_{\text{min}})[(T_{\text{opt}} - T_{\text{min}})(T - T_{\text{opt}}) - (T_{\text{opt}} - T_{\text{max}})(T_{\text{opt}} + T_{\text{min}} - 2T)]} \quad (10)$$

$$\lambda^{-1}(T) = \frac{\lambda^{-1}_{\text{opt}}(T - T_{\text{max}})(T - T_{\text{min}})^2}{(T_{\text{opt}} - T_{\text{min}})[(T_{\text{opt}} - T_{\text{min}})(T - T_{\text{opt}}) - (T_{\text{opt}} - T_{\text{max}})(T_{\text{opt}} + T_{\text{min}} - 2T)]} \quad (11)$$

ในปี 2017 Kalai และคณะ ได้พัฒนาแบบจำลอง CMI ให้สามารถนำมาใช้ในการทำนายอิทธิพลของความชื้นในการงอกของสปอร์ราต่อตัวแปรจลนศาสตร์การงอกของสปอร์รา (τ หรือ λ และ μ) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\mu(aw) = \frac{\mu_{\text{opt}}(aw - aw_{\text{max}})(aw - aw_{\text{min}})^2}{(aw_{\text{opt}} - aw_{\text{min}})[(aw_{\text{opt}} - aw_{\text{min}})(aw - aw_{\text{opt}}) - (aw_{\text{opt}} - aw_{\text{max}})(aw_{\text{opt}} + aw_{\text{min}} - 2aw)]} \quad (12)$$

$$\tau^{-1}(aw) = \frac{\tau^{-1}_{\text{opt}}(aw - aw_{\text{max}})(aw - aw_{\text{min}})^2}{(aw_{\text{opt}} - aw_{\text{min}})[(aw_{\text{opt}} - aw_{\text{min}})(aw - aw_{\text{opt}}) - (aw_{\text{opt}} - aw_{\text{max}})(aw_{\text{opt}} + aw_{\text{min}} - 2aw)]} \quad (13)$$

$$\lambda^{-1}(aw) = \frac{\lambda^{-1}_{\text{opt}}(aw - aw_{\text{max}})(aw - aw_{\text{min}})^2}{(aw_{\text{opt}} - aw_{\text{min}})[(aw_{\text{opt}} - aw_{\text{min}})(aw - aw_{\text{opt}}) - (aw_{\text{opt}} - aw_{\text{max}})(aw_{\text{opt}} + aw_{\text{min}} - 2aw)]} \quad (14)$$

- โดยที่ T = อุณหภูมิที่เพาะเลี้ยงสปอร์
 T_{max} = อุณหภูมิที่มากที่สุดที่สปอร์สามารถงอกได้
 T_{min} = อุณหภูมิที่น้อยที่สุดที่สปอร์สามารถงอกได้
 T_{opt} = อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการงอกของสปอร์
 aw = ความชื้นที่เพาะเลี้ยงสปอร์
 aw_{max} = ความชื้นที่มากที่สุดที่สปอร์สามารถงอกได้
 aw_{min} = ความชื้นที่น้อยที่สุดที่สปอร์สามารถงอกได้
 aw_{opt} = ความชื้นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการงอกของสปอร์
 $\mu(T)$ = μ ณ อุณหภูมิ T
 $\mu(aw)$ = μ ณ ความชื้น aw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

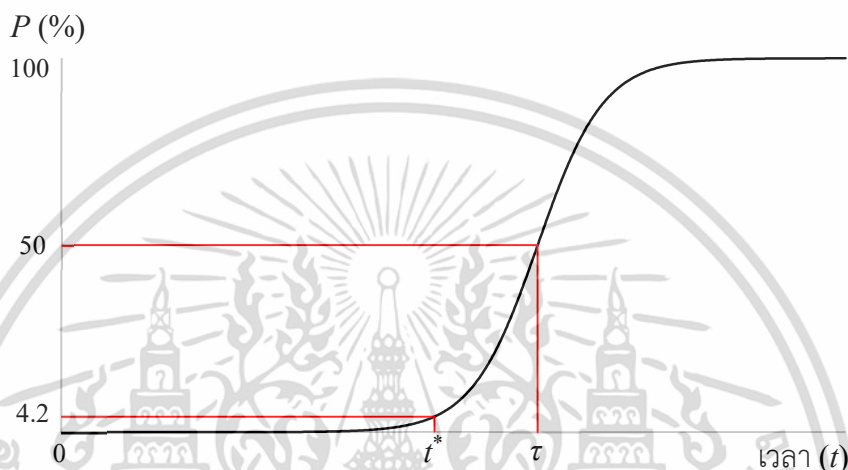
$$\mu_{\text{opt}} = \mu \text{ ณ } aw_{\text{opt}} \text{ หรือ } T_{\text{opt}}$$

$$\tau^{-1}(T) = \text{ส่วนกลับของ } \tau \text{ ณ อุณหภูมิ } T$$

$$\tau^{-1}(aw) = \text{ส่วนกลับของ } \tau \text{ ณ ความชื้น } aw$$

$$\tau^{-1}_{\text{opt}} = \text{ส่วนกลับของ } \tau \text{ ณ } aw_{\text{opt}} \text{ หรือ } T_{\text{opt}}$$

2.3 การออกของสปอร์ภายใต้สภาวะแบบพลวัต



รูปที่ 1 เส้นโค้งการเติบโตของสปอร์รา

เพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับอธิบายการออกสปอร์ภายใต้สภาวะแบบพลวัต จำเป็นต้องเริ่มต้นจากการพิจารณาจลนศาสตร์การออกของสปอร์รา ซึ่งได้รับการอธิบายครั้งแรกโดย Trinci ในปี 1971 [27] ดังนี้ ในช่วงที่สปอร์อยู่ในระยะบวม อัตราการขยายตัวของสปอร์จะมีค่าต่ำ และหลังจากระยะบวมสิ้นสุดลงขนาดของสปอร์ที่เพิ่มขึ้นจะคิดเป็นร้อยละประมาณ 4.2 ของขนาดสปอร์ที่ออกสมบูรณ์ จากนั้นเมื่อสปอร์เริ่มมีการปรากฏขึ้นของหลอดสปอร์ อัตราการออกของหลอดสปอร์จะมีค่าสูงอย่างมากเมื่อเทียบกับอัตราการเติบโตของสปอร์ในระยะบวม และอัตราการออกของหลอดสปอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งสปอร์มีการเติบโตได้ประมาณร้อยละ 50 ของสปอร์ที่เติบโตสมบูรณ์ หลังจากนั้น อัตราการออกของหลอดสปอร์จะลดลงจนกระทั่งสปอร์ออกสมบูรณ์ จากคำอธิบายข้างต้นสามารถนำมาสร้างเป็นเส้นโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 1

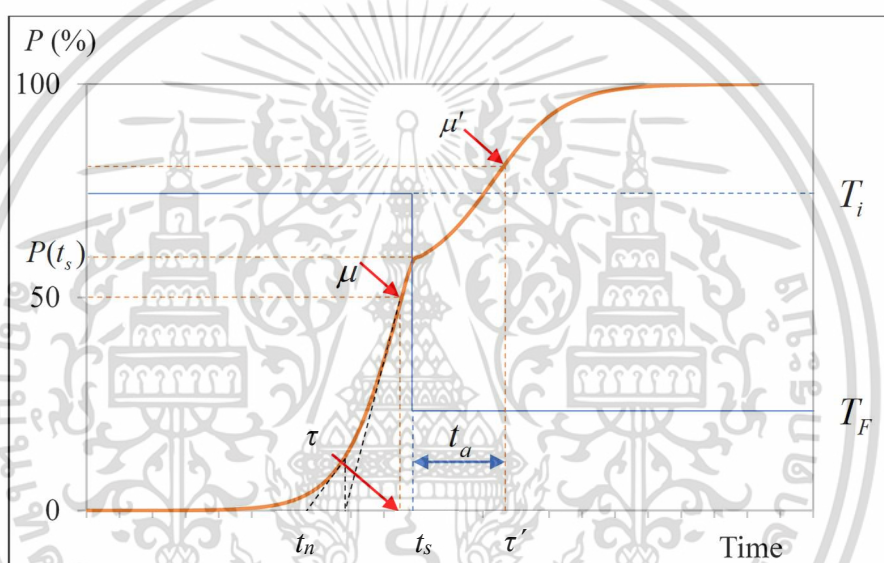
จากที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 1.1 ว่า การทำนายร้อยละของจำนวนสปอร์ที่ออกสมบูรณ์แล้วต่อจำนวนสปอร์ทั้งหมดที่อยู่ในระบบนั้นเหมาะสมมากกว่าการทำนายพฤติกรรมการเติบโตของสปอร์เพียงหนึ่งตัว เนื่องจาก ความสามารถในการเจริญเติบโตของสปอร์แต่ละตัวนั้นแตกต่างกัน แม้ว่าจะเป็นสปอร์ชนิดเดียวกันและเติบโตในสภาพแวดล้อมเดียวกันก็ตาม [1], [13] นอกจากนี้จากหลายๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัย [1], [15], [20], [28], [29] แสดงให้เห็นว่า หากมีการทำนายร้อยละของจำนวนสปอร์ที่ออกสมบูรณ์แล้วต่อจำนวนสปอร์ทั้งหมดที่อยู่ในระบบเดียวกันมาสร้างกราฟในแต่ละช่วงเวลา ผลของกราฟก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกับกราฟในรูปที่ 1 ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงกำหนดให้:

- (1) ในช่วงเวลาที่ $t < t^*$ ถือว่า สปอร์ทุกตัวในระบบอยู่ในระยะบวม
- (2) ในช่วงเวลาที่ $t^* < t < \tau$ ถือว่า สปอร์บางกลุ่มสามารถงอกหลอดสปอร์ขึ้นมาได้จนสมบูรณ์ ในขณะที่อาจจะมีสปอร์บางกลุ่มที่ยังอยู่ในระยะบวม
- (3) ในช่วงเวลาที่ $\tau < t$ ถือว่า สปอร์ทุกตัวสามารถงอกหลอดสปอร์ได้แล้ว

2.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการงอกของสปอร์ภายใต้สภาวะแบบพลวัต



รูปที่ 2 ตัวอย่างลักษณะเส้นโค้งการเติบโตของสปอร์ภายใต้สภาวะแบบพลวัต

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [1], [18] แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมขณะที่สปอร์อยู่ในกระบวนการงอก ตัวแปรจลนศาสตร์จะได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงนั้นด้วย ซึ่งวิธีการคำนวณค่าตัวแปรจลนศาสตร์เมื่อสภาวะแวดล้อมเปลี่ยนแปลงจะถูกอธิบายในหัวข้อ 2.3.2 และ 2.3.3 สำหรับแบบจำลองหลักที่จะนำมาใช้ทำนายการงอกของสปอร์ภายใต้สภาวะแบบพลวัตคือ แบบจำลอง Asymmetric ที่พัฒนาต่อยอดจากสมการที่ (8) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้:

$$P = P(t_s) + (P_{\max} - P(t_s)) \left[1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{t}{\tau}\right)^{\left(\frac{4 \cdot \tau \cdot \mu'}{P_{\max} - P(t_s)}\right)}} \right] \quad (15)$$

โดยที่ t_s = เวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ (รูปที่ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

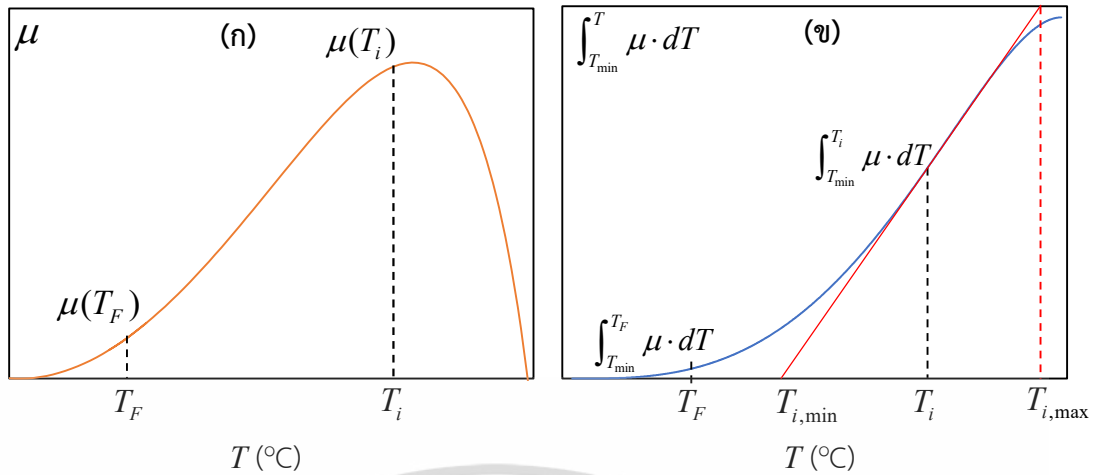
- $P(t_s)$ = ร้อยละของจำนวนสปอร์ที่งอกแล้ว ณ เวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ (รูปที่ 2)
 τ' = ค่าปรับแก้ของ τ หลังการเปลี่ยนแปลงสภาวะ (รูปที่ 2)
 μ' = ค่าปรับแก้ของ μ หลังการเปลี่ยนแปลงสภาวะ (รูปที่ 2)
 T_i = สภาวะแวดล้อมก่อนการเปลี่ยนแปลง (ในงานวิจัยนี้ อ้างถึง อุณหภูมิก่อนการเปลี่ยนแปลง)
 T_F = สภาวะแวดล้อมหลังการเปลี่ยนแปลง (ในงานวิจัยนี้ อ้างถึง อุณหภูมิหลังการเปลี่ยนแปลง)

รูปที่ 2 แสดงถึง ตัวอย่างลักษณะของเส้นโค้งของแบบจำลอง Asymmetric ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ (สมการที่ (15))

2.3.2 การปรับแก้ค่า μ หลังจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะ

การปรับแก้ค่า μ ขึ้นอยู่กับเวลาที่เปลี่ยนแปลงสภาวะและความแตกต่างของสภาวะที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการงอกของสปอร์รา [18] เนื่องจาก ในงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นที่จะศึกษาการงอกของสปอร์ภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างฉับพลัน ดังนั้นความแตกต่างของสภาวะที่เปลี่ยนแปลงจึงเป็นการคำนวณจากอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการงอกของสปอร์รา

ช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะส่งผลต่อค่า μ ดังนี้ กรณีที่การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเกิดขึ้นในระยะบวม ($t_s < t^*$) ค่า μ' จะมีค่าเท่ากับค่า μ ที่สภาวะใหม่ กล่าวคือ หากอุณหภูมิถูกเปลี่ยนจาก T_i เป็น T_F แล้ว $\mu' = \mu(T_F)$ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะในระยะนี้ สปอร์ทุกตัวในระบบยังไม่มี การงอกของหลอดสปอร์ แต่จากในหัวข้อที่ 2.3.1 อธิบายไว้ว่า ค่า μ จะปรากฏขึ้นหลังจากสปอร์ในระบบเริ่มมีการปรากฏหลอดสปอร์ขึ้นแล้ว ($t_s > t^*$) ดังนั้น อัตราการงอกหลอดสปอร์เฉลี่ยหรือค่า μ จึงไม่ถูกรบกวนจากความต่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ในทางกลับกัน หากการเปลี่ยนแปลงสภาวะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่มีการงอกของหลอดสปอร์แล้ว ($t_s > t^*$) การคำนวณค่า μ' จะต้องพิจารณาจาก 2 ปัจจัยควบคู่กัน คือ 1) ความเครียดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะ และ 2) สัดส่วนของจำนวนสปอร์ที่ปรากฏของหลอดสปอร์แล้วต่อจำนวนของสปอร์ทั้งหมดในระบบ



รูปที่ 3 เส้นโค้งตัวอย่างแสดงความสัมพันธ์ของ (ก) μ vs T และ (ข) $\int_{T_{min}}^T \mu \cdot dT$ vs T เพื่อใช้ในการคำนวณความเครียดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการงอกของสปอร์

จากรูปที่ 3 การวิเคราะห์ผลกระทบจากความเครียดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสามารถทำได้ ดังนี้ หากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป (T_F) อยู่ระหว่าง $T_{i,min}$ และ $T_{i,max}$ จะถือว่าไม่มีผลของความเครียด กล่าวคือ $\mu' = \mu(T_F)$ อย่างไรก็ตาม หากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป (T_F) มีค่าน้อยกว่า $T_{i,min}$ หรือมากกว่า $T_{i,max}$ ผลของความเครียดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะต้องถูกนำมาพิจารณาด้วย

สำหรับปัจจัยของสัดส่วนของจำนวนสปอร์ที่มีการปรากฏของหลอดสปอร์แล้วต่อจำนวนของสปอร์ทั้งหมดในระบบจะถูกนำมาพิจารณา เมื่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป (T_F) อยู่ใกล้กับอุณหภูมิบริเวณขอบเขตการเจริญเติบโตของสปอร์รา และเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อสปอร์อยู่ในช่วง $t^* < t_s < \tau$ การคำนวณสัดส่วนของจำนวนสปอร์ที่ปรากฏของหลอดสปอร์แล้วต่อจำนวนของสปอร์ทั้งหมดในระบบสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{N_{\text{germtube}}(t_s)}{N_{\text{total}}} = \frac{2P(t_s)}{P_{\text{max}}} \tag{16}$$

โดยที่ $N_{\text{germtube}}(t_s)$ = จำนวนของสปอร์ที่ปรากฏหลอดสปอร์แล้ว ณ เวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
 N_{total} = จำนวนของสปอร์ทั้งหมดในระบบ

จากที่กล่าวมาข้างต้น การปรับแก้ค่า μ หลังการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างการงอกของสปอร์ราสามารถสรุปเป็นสมการได้ดังนี้

$$\mu' = k \cdot f \cdot \mu(T_F) \tag{17}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k = \begin{cases} \frac{T_F - T_{\min}}{T_{i,\min} - T_{\min}} & \text{if } t_s > t^* \text{ and } T_F < T_{i,\min} \\ \frac{T_F - T_{\max}}{T_{i,\max} - T_{\max}} & \text{if } t_s > t^* \text{ and } T_F > T_{i,\max} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

$$f = \begin{cases} \frac{2P(t_s)}{P_{\max}} & \text{if } t^* < t_s < \tau \text{ and } T_F < T_{b,\min} \text{ or } T_F > T_{b,\max} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

โดยที่ k = ความเครียดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างการออกของสปอร์
 f = สัดส่วนของจำนวนสปอร์ที่ปรากฏตลอดสปอร์แล้วต่อจำนวนสปอร์ทั้งหมดในระบบ

$T_{i,\min}$ และ $T_{i,\max}$ ถูกกำหนดตามรูปที่ 3

$T_{b,\min}$ และ $T_{b,\max}$ สามารถหาได้จากการแก้สมการที่ (20):

$$\frac{\int_{T_{\min}}^{T_{b,\min}} \mu \cdot dT}{\int_{T_{\min}}^{T_{opt}} \mu \cdot dT} = \frac{\int_{T_{\max}}^{T_{b,\max}} \mu \cdot dT}{\int_{T_{\max}}^{T_{opt}} \mu \cdot dT} = 0.0228 \quad (20)$$

2.3.3 การปรับแก้ค่า τ หลังจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะ

การคำนวณค่า τ หลังจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะ หรือ τ' ได้ถูกเสนอขึ้นครั้งแรกโดย Zwietering และคณะ [30] ซึ่งได้ระบุไว้ว่า τ' เกิดจากผลรวมของ 3 พจน์ ดังสมการต่อไปนี้

$$\tau' = t_s + t_r + t_a \quad (21)$$

โดยที่ t_s = เวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ

t_r = สัดส่วนของเวลาที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการงอกตลอดสปอร์

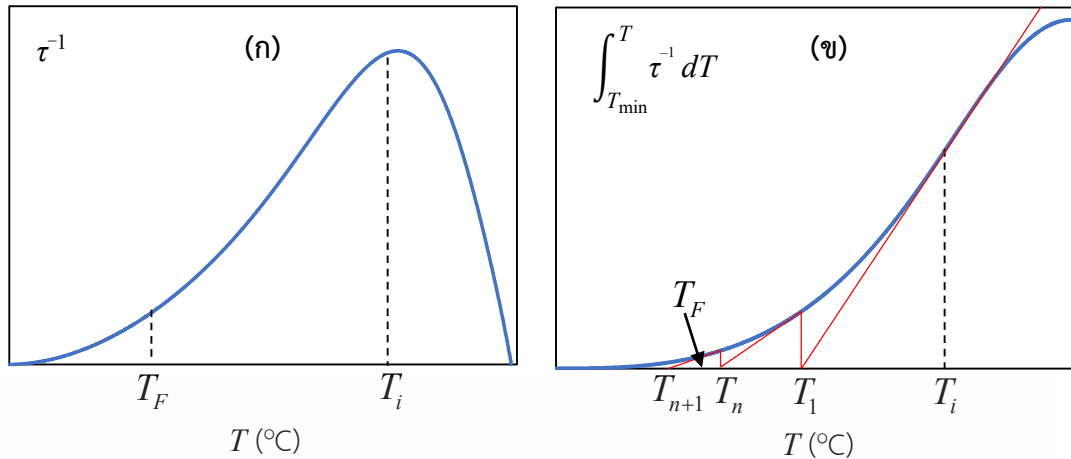
t_a = เวลาที่ถูกหน่วงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะ

สำหรับค่า t_r สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$t_r = \begin{cases} \tau(T_F) \cdot \left(1 - \frac{t_s}{\tau(T_i)}\right) & \text{if } t_s < t^* \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (22)$$

โดยที่ $\tau(T_F)$ และ $\tau(T_i)$ คือ ค่า τ เมื่ออุณหภูมิมีค่าเป็น T_F และ T_i ตามลำดับ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่

(9) – (10)



รูปที่ 4 เส้นโค้งตัวอย่างแสดงความสัมพันธ์ของ (ก) τ^{-1} vs T และ (ข) $\int_{T_{min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ vs T เพื่อใช้ในการคำนวณเวลาที่ถูกหน่วงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสถานะ

แม้ว่า Zwietering และคณะ [30] จะเป็นผู้ที่เสนอหลักการคำนวณค่า τ อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยของเขาและงานวิจัยอื่นๆ ที่ผ่านมา ยังไม่มีการกล่าวถึงวิธีที่ใช้ในการคำนวณค่า t_a ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้มีความพยายามในการค้นหาวีธีที่ใช้ในการคำนวณค่าดังกล่าว ซึ่งสามารถสรุปเป็นสมการได้ดังนี้

$$t_a = t_{a,s} + t_{a,p} \quad (23)$$

$$t_{a,s} = \begin{cases} [\tau(T_F) - t_n(T_F)] \cdot \left[\frac{T_F - T_i}{T_{min} - T_i} \right] & \text{if } T_F < T_i \text{ for } n \geq 0 \\ [\tau(T_F) - t_n(T_F)] \cdot \left[\frac{T_F - T_i}{T_{max} - T_i} \right] & \text{if } T_F > T_i \text{ for } n \geq 0 \end{cases} \quad (24)$$

$$t_{a,p} = \begin{cases} \tau(T_F) \cdot \left[\frac{1}{2} - \frac{P(t_s)}{P_{max}} \right] & \text{if } t^* < t_s < \tau \text{ and } T_F < T_{b,min} \text{ or } T_F > T_{b,max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (25)$$

โดยที่ $t_{a,s}$ = เวลาที่ถูกหน่วงเนื่องจากความเครียดจากการเปลี่ยนแปลงสถานะ

$t_{a,p}$ = เวลาที่ถูกหน่วงเนื่องจากสัดส่วนของสปอร์ที่ปรากฏตลอดสปอร์แล้วต่อจำนวนสปอร์ทั้งหมด

n = อันดับของจุดตัดบนแกนอุณหภูมิของเส้นสัมผัสที่ลากผ่านจุด $\int_{T_{min}}^{T_{n-1}} \tau^{-1} \cdot dT$ (ดูรูปที่ 4)

$t_n(T_F)$ = จุดตัดบนแกนเวลาตามรูปที่ 2 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ:

$$t_n(T_F) = \tau(T_F) - \frac{P(\tau(T_F))}{P'(\tau(T_F))} - \sum_{n=1}^{n-1} \frac{P(t_n(T_F))}{P'(t_n(T_F))} \quad (26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการทำวิจัย

3.1 การทำนายการงอกสปอร์ราภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบคงที่

3.1.1 การทำนายการงอกสปอร์ราภายใต้สภาวะต่างๆ

1) รวบรวมข้อมูลการงอกของสปอร์ราจากงานวิจัยต่างๆ ทั้งหมด 6 สายพันธุ์ ประกอบด้วย *Penicillium expansum* [1], [19] *Gloeosporium musarum* [5] *Penicillium italicum* [6] *Penicillium paneum* [20] *Fusarium proliferatum* [31] และ *Aspergillus niger* [1]

2) ทำนายการงอกของสปอร์ราทั้ง 6 สายพันธุ์ ด้วยแบบจำลอง Asymmetric ที่พัฒนาขึ้น (สมการที่ (8)) เทียบกับแบบจำลองอื่นๆ เช่น แบบจำลอง Logistic (สมการที่ (1)) แบบจำลอง Gompertz (สมการที่ (2)) และแบบจำลอง Asymmetric เดิม (สมการที่ (3)) สำหรับค่าคงที่ในแต่ละแบบจำลองจะถูกคำนวณโดยการแก้สมการหาค่าที่น้อยที่สุดของรากที่สองของผลรวมกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error: RMSE) [32] ด้วย “Solver Add-in” ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ย่อยใน “Microsoft Excel 365” สำหรับกระบวนการในการคำนวณสามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ ก.1 (ภาคผนวก)

3) ประเมินผลและเปรียบเทียบความแม่นยำจากการทำนายการงอกของสปอร์ราทั้ง 6 สายพันธุ์ ด้วยแบบจำลองทั้งสี่ (สมการที่ (1) (2) (3) และ (8)) โดยพิจารณาจากความแม่นยำของเส้นกราฟเทียบกับผลการทดลอง ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และ RMSE [33]

3.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ และ μ/P_{\max}

1) นำค่าตัวแปร τ μ และ P_{\max} ที่ได้จากการทำนายการงอกของสปอร์ราแต่ละสายพันธุ์ (หัวข้อ 3.1.1) ด้วยแบบจำลอง Asymmetric ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ (สมการที่ (8)) มาสร้างเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ และ μ/P_{\max}

2) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ และ μ/P_{\max} ของสปอร์ราแต่ละสายพันธุ์ พร้อมทั้งสร้างแบบจำลองสำหรับอธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าว

3.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะแวดล้อมกับ μ และ τ

1) นำค่าตัวแปร τ และ μ ที่ได้จากการทำนายการงอกของสปอร์ราแต่ละสายพันธุ์ (หัวข้อ 3.1.1) ด้วยแบบจำลอง Asymmetric ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ (สมการที่ (8)) มาสร้างเป็นเส้นกราฟ

เทียบกับสภาวะแวดล้อมที่สปอร์ราแต่ละสายพันธุ์งอกด้วยแบบจำลอง CMI (สมการที่ (9) – (14)) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าคงที่ในแบบจำลอง CMI จะถูกคำนวณโดยการแก้สมการหาค่าที่น้อยที่สุดของรากที่สองของผลรวมกำลังสองเฉลี่ย [32] ด้วย “Solver Add-in” ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ย่อยใน “Microsoft Excel 365” สำหรับกระบวนการในการคำนวณสามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ ก.1 (ภาคผนวก)

2) ประเมินผลและเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลอง CMI (สมการที่ (9) – (14)) ในการอธิบายค่าตัวแปร τ และ μ ที่สภาวะแวดล้อมต่างๆ ของสปอร์ราแต่ละสายพันธุ์ โดยพิจารณาจากความแม่นยำของเส้นกราฟเทียบกับผลการทดลอง ค่า R^2 และ RMSE [33]

3.2 การทำนายการงอกของสปอร์ราภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัต

1) รวบรวมข้อมูลการงอกของสปอร์ราภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัต ซึ่งข้อมูลที่ได้รวบรวมมาใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย การงอกของสปอร์รา *P. expansum* และ *A. niger* จากงานวิจัยของ Gougouli และ Koutsoumanis ในปี 2012 [1]

2) ทำนายการงอกของสปอร์ราทั้งสองสายพันธุ์ด้วยแบบจำลองการงอกของสปอร์ราภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัตที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ (สมการที่ (15) – (26)) เทียบกับแบบจำลองเดิมที่พัฒนาโดย Gougouli และ Koutsoumanis ในปี 2012 [1] ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้:

$$P = P(t_s) + \{P_{\max} - P(t_s)\} \exp\{-\exp[\frac{\mu(T_F) \cdot e}{P_{\max} - P(t_s)} (\lambda' - t) + 1]\} \quad (27)$$

$$\lambda' = \begin{cases} t_s + \lambda(T_F) \left[1 - \frac{t_s}{\lambda(T_i)}\right] & \text{if } t_s < \lambda(T_i) \\ t_s & \text{if } t_s \geq \lambda(T_i) \end{cases} \quad (28)$$

3) ประเมินผลและเปรียบเทียบความแม่นยำในการทำนายระหว่างแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ (สมการที่ (15) – (26)) เทียบกับแบบจำลองเดิม (สมการที่ (27) – (28)) โดยพิจารณาจากความแม่นยำของเส้นกราฟเทียบกับผลการทดลอง ค่า R^2 และ RMSE [33]

หมายเหตุ: เพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจการใช้งานแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น (สมการที่ (15) – (26)) ได้ อย่างชัดเจน ผลการทำนายจะถูกแบ่งเป็น 3 กรณี ดังนี้

- 1) กรณีที่ k , $t_{a,s}$, f และ $t_{a,p}$ ไม่ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ
- 2) กรณีที่ k และ $t_{a,s}$ ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์ แต่ f และ $t_{a,p}$ ไม่ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ
- 3) กรณีที่ k , $t_{a,s}$, f และ $t_{a,p}$ ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

4.1 ผลการทำนายการงอกสปอร์ราภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบคงที่

งานวิจัยส่วนนี้เป็นการพิสูจน์ว่าแบบจำลอง Asymmetric ที่พัฒนาขึ้น (สมการที่ (8)) สามารถใช้ทำนายการงอกของสปอร์ราชนิดต่างๆ ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบคงที่ได้เป็นอย่างดี เทียบเท่าแบบจำลอง Asymmetric เดิมที่พัฒนาขึ้นโดย Dantigny และคณะ (สมการที่ (3)) ในปี 2011 [9] รวมถึงแบบจำลองอื่นๆ เช่น แบบจำลอง Logistic (สมการที่ (1)) และ Gompertz (สมการที่ (2)) เป็นต้น ผลการทำนายการงอกของสปอร์ราแต่ละชนิดภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆ ด้วยแบบจำลองทั้งสี่จะถูกแสดงในรูปที่ 5 (ก) – 11 (ก) ค่าตัวแปรจลนศาสตร์และค่าความแม่นยำในการทำนาย (R^2 และ RMSE) ของทั้งสี่แบบจำลองจะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1

ความสัมพันธ์ของตัวแปรจลนศาสตร์ของสปอร์ราแต่ละสายพันธุ์ในแบบจำลอง Asymmetric ที่พัฒนาขึ้น ($1/\tau$ vs μ/P_{max}) จะถูกอธิบายด้วยสมการที่ (29) และแสดงผลลัพธ์ในรูปที่ 5 (ข) – 11 (ข) นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะแวดล้อมกับ μ และ $1/\tau$ จะถูกอธิบายด้วยแบบจำลอง CMI (สมการที่ (9) – (14)) และแสดงผลลัพธ์ในรูปที่ 5 (ค) และ (ง) – 10 (ค) และ (ง) ส่วนรูปที่ 11 จะไม่มีรูปย่อย (ค) และ (ง) เนื่องจาก ข้อมูลการงอกของสปอร์รา *P. paneum* ไม่เพียงพอที่จะนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะแวดล้อมกับ μ และ $1/\tau$ ด้วยแบบจำลอง CMI ได้ ผลความแม่นยำในการทำนาย (R^2 และ RMSE) และค่าตัวแปรต่างๆ ของสมการ CMI จะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2 ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรจลนศาสตร์และค่าทางสถิติจากการทำนายการงอกสปอร์ราภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบคงที่ด้วยแบบจำลองต่างๆ

สภาวะแวดล้อม	แบบจำลอง	ตัวแปรจลนศาสตร์					R^2	RMSE
		μ (%·h ⁻¹)	τ (h)	P_{max} (%)	d	λ (h)		
<i>Penicillium expansum</i> ^a (รูปที่ 5)								
0.1 °C, pH 4.2, aw = 0.997	mAs-model ^d	1.77	183.17	101.55	12.98 ^c	–	0.9969	2.23
	Asymmetric	–	183.81	101.06	14.08	–	0.9977	1.94
	Gompertz	2.04	–	100.00	–	157.50	0.9965	2.38
	Logistic	1.97	183.96	100.00	–	–	0.9976	1.97
5.2 °C, pH 4.2, aw = 0.997	mAs-model ^d	5.50	59.26	100.04	12.98 ^c	–	0.9996	0.78
	Asymmetric	–	59.07	99.59	13.86	–	0.9998	0.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	Gompertz	5.40	–	100.00	–	49.78	0.9994	1.04
	Logistic	6.06	59.97	100.00	–	–	0.9960	2.66
10.5 °C, pH 4.2, aw = 0.997	mAs-model ^d	12.20	28.52	101.54	12.98 ^c	–	0.8938	9.86
	Asymmetric	–	28.82	105.37	12.75	–	0.8999	9.74
	Gompertz	14.61	–	100.00	–	25.03	0.8895	10.81
	Logistic	13.05	28.62	100.00	–	–	0.9017	9.82
25.5 °C, pH 4.2, aw = 0.997	mAs-model ^d	34.29	9.46	99.09	12.98 ^c	–	0.9717	6.69
	Asymmetric	–	9.53	100.88	10.56	–	0.9761	5.94
	Gompertz	29.03	–	100.00	–	7.72	0.9726	6.43
	Logistic	28.16	9.55	100.00	–	–	0.9768	5.76
30.5 °C, pH 4.2, aw = 0.997	mAs-model ^d	22.18	13.92	98.39	12.98 ^c	–	0.9688	5.48
	Asymmetric	–	13.92	98.39	10.12	–	0.9749	4.57
	Gompertz	18.62	–	100.00	–	11.24	0.9790	4.32
	Logistic	21.87	13.95	100.00	–	–	0.9609	6.20
<i>Penicillium expansum</i> ^b (รูปที่ 6)								
5.0 °C, pH 4.2, aw = 0.980	mAs-model ^d	4.93	65.62	98.98	12.58 ^c	–	0.9243	10.08
	Asymmetric	–	67.02	97.55	16.30	–	0.9473	8.81
	Gompertz	6.40	–	98.34	–	59.19	0.9462	9.12
	Logistic	5.40	67.44	100.00	–	–	0.9454	8.93
27.0 °C, pH 4.2, aw = 0.980	mAs-model ^d	24.17	12.68	100.67	12.58 ^c	–	0.8745	13.10
	Asymmetric	–	13.07	104.67	10.58	–	0.8858	12.36
	Gompertz	23.50	–	103.99	–	10.77	0.8901	12.29
	Logistic	22.99	13.00	100.00	–	–	0.8827	12.46
20.0 °C, pH 4.2, aw = 0.980	mAs-model ^d	20.76	15.27	100.11	12.58 ^c	–	0.9661	6.53
	Asymmetric	–	15.50	101.11	11.51	–	0.9713	5.90
	Gompertz	18.63	–	102.44	–	12.69	0.9700	6.09
	Logistic	20.22	15.53	100.00	–	–	0.9718	5.95
20.0 °C, pH 4.2, aw = 0.900	mAs-model ^d	8.47	35.88	97.23	12.58 ^c	–	0.9121	9.91
	Asymmetric	–	35.95	97.23	12.52	–	0.9125	9.90
	Gompertz	8.68	–	98.78	–	30.19	0.9183	9.72
	Logistic	9.83	36.29	100.00	–	–	0.9137	10.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20.0 °C, pH 4.2, aw = 0.995	mAs-model ^d	23.32	13.75	99.10	12.58 ^c	–	0.9955	2.51
	Asymmetric	–	13.68	99.10	15.09	–	0.9948	2.68
	Gompertz	28.04	–	100.11	–	11.84	0.9979	1.80
	Logistic	22.12	13.74	100.00	–	–	0.9925	3.20
<i>Gloeosporium musarum</i> (รูปที่ 7)								
15.0 °C	mAs-model ^d	11.94	16.12	105.47	7.43 ^c	–	1.0000	0.02
	Asymmetric	–	16.12	105.47	7.30	–	1.0000	0.02
	Gompertz	21.17	–	100.00	–	12.40	0.9977	1.84
	Logistic	15.16	15.32	100.00	–	–	0.9989	1.27
35.0 °C	mAs-model ^d	20.24	10.88	100.09	7.43 ^c	–	0.9984	1.72
	Asymmetric	–	10.88	100.09	10.10	–	0.9999	0.49
	Gompertz	28.41	–	100.00	–	8.80	0.9983	1.85
	Logistic	20.08	11.23	100.00	–	–	0.9988	1.47
32.0 °C	mAs-model ^d	29.02	6.26	99.95	7.43 ^c	–	0.9843	5.22
	Asymmetric	–	6.64	99.95	7.27	–	0.9985	1.60
	Gompertz	29.61	–	100.00	–	4.78	0.9955	2.81
	Logistic	32.45	6.42	100.00	–	–	0.9877	4.72
27.0 °C	mAs-model ^d	34.01	5.35	100.43	7.43 ^c	–	0.9785	6.11
	Asymmetric	–	5.56	100.43	5.89	–	0.9876	4.44
	Gompertz	28.25	–	100.00	–	3.75	0.9893	4.17
	Logistic	36.49	5.54	100.00	–	–	0.9727	7.00
30.0 °C	mAs-model ^d	32.38	5.62	99.22	7.43 ^c	–	0.9748	6.61
	Asymmetric	–	5.20	99.22	7.00	–	0.9960	2.58
	Gompertz	35.02	–	100.00	–	4.17	0.9738	6.90
	Logistic	35.98	5.65	100.00	–	–	0.9740	6.88
<i>Penicillium italicum</i> (รูปที่ 8)								
4.0 °C, pH 5.5, aw = 0.99	mAs-model ^d	1.88	113.30	102.50	11.23 ^c	–	0.9905	2.79
	Asymmetric	–	113.30	102.70	7.73	–	0.9910	2.67
	Gompertz	1.81	–	100.00	–	83.47	0.9924	2.46
	Logistic	1.88	113.26	100.00	–	–	0.9884	3.07
	mAs-model ^d	10.93	26.38	98.45	11.23 ^c	–	0.9746	6.05
	Asymmetric	–	26.38	99.20	8.76	–	0.9798	5.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.0 °C,	Gompertz	10.32	–	100.00	–	21.98	0.9753	5.76
pH 5.5,	Logistic	8.61	26.96	100.00	–	–	0.9888	3.76
aw = 0.99								
25.0 °C,	mAs-model ^d	29.41	10.20	99.90	11.23 ^c	–	0.9835	5.20
pH 5.5,	Asymmetric	–	10.20	100.12	10.48	–	0.9854	4.73
aw = 0.99	Gompertz	28.35	–	100.00	–	8.27	0.9850	4.83
	Logistic	25.67	10.29	100.00	–	–	0.9858	4.72
30.0 °C,	mAs-model ^d	10.03	17.55	99.46	11.23 ^c	–	0.9905	3.84
pH 5.5,	Asymmetric	–	17.55	100.41	6.01	–	0.9933	3.11
aw = 0.99	Gompertz	9.02	–	100.00	–	11.78	0.9937	3.05
	Logistic	8.82	17.78	100.00	–	–	0.9902	3.81
<i>Aspergillus niger</i> (รูปที่ 9)								
10.5 °C,	mAs-model ^d	0.50	206.00	102.16	26.92 ^c	–	0.9862	3.74
pH 4.2,	Asymmetric	–	206.75	102.16	3.97	–	0.9861	3.73
aw = 0.997	Gompertz	0.53	–	100.00	–	108.72	0.9863	3.72
	Logistic	0.60	204.77	100.00	–	–	0.9804	4.48
12.5 °C,	mAs-model ^d	8.97	73.88	98.73	26.92 ^c	–	0.9978	2.06
pH 4.2,	Asymmetric	–	73.63	98.73	34.33	–	0.9991	1.35
aw = 0.997	Gompertz	11.35	–	100.00	–	69.20	0.9986	1.65
	Logistic	10.81	73.71	100.00	–	–	0.9987	1.59
15.0 °C,	mAs-model ^d	20.78	31.88	99.61	26.92 ^c	–	0.9218	10.43
pH 4.2,	Asymmetric	–	31.68	99.61	43.06	–	0.9534	8.82
aw = 0.997	Gompertz	34.87	–	100.00	–	30.19	0.9480	9.44
	Logistic	23.71	31.70	100.00	–	–	0.9369	9.60
19.5 °C,	mAs-model ^d	37.23	17.79	101.57	26.92 ^c	–	0.9683	7.04
pH 4.2,	Asymmetric	–	17.87	101.57	22.19	–	0.9725	6.26
aw = 0.997	Gompertz	33.95	–	100.00	–	16.24	0.9635	7.22
	Logistic	54.31	17.88	100.00	–	–	0.9497	9.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25.5 °C, pH 4.2, aw = 0.997	mAs-model ^d	57.56	11.51	99.31	26.92 ^c	–	0.9551	8.01
	Asymmetric	–	11.46	95.31	31.10	–	0.9570	7.74
	Gompertz	59.96	–	100.00	–	10.66	0.9515	8.57
	Logistic	96.92	11.51	100.00	–	–	0.9539	8.96
30.0 °C, pH 4.2, aw = 0.997	mAs-model ^d	85.94	7.71	99.18	26.92 ^c	–	0.9303	9.24
	Asymmetric	–	7.71	99.18	43.62	–	0.9765	6.04
	Gompertz	148.65	–	100.00	–	7.36	0.9750	6.38
	Logistic	117.41	7.72	100.00	–	–	0.9704	6.54
37.0 °C, pH 4.2, aw = 0.997	mAs-model ^d	95.38	6.95	97.04	26.92 ^c	–	0.9657	7.34
	Asymmetric	–	6.95	97.04	24.32	–	0.9656	7.13
	Gompertz	87.43	–	100.00	–	6.36	0.9639	7.61
	Logistic	99.40	6.97	100.00	–	–	0.9645	7.75
<i>Fusarium proliferatum</i> (รูปที่ 10)								
25 °C, pH 5.5, aw = 0.88	mAs-model ^d	2.26	86.11	97.77	7.86 ^c	–	0.9852	5.03
	Asymmetric	–	85.73	99.02	6.69	–	0.9866	4.62
	Gompertz	1.95	–	99.34	–	59.75	0.9846	5.02
	Logistic	2.04	85.77	95.98	–	–	0.9882	4.30
25 °C, pH 5.5, aw = 0.90	mAs-model ^d	5.20	37.43	99.50	7.86 ^c	–	0.9825	5.12
	Asymmetric	–	38.20	104.62	6.94	–	0.9826	5.04
	Gompertz	4.59	–	110.36	–	26.64	0.9804	5.37
	Logistic	5.00	37.96	98.39	–	–	0.9837	4.83
25 °C, pH 5.5, aw = 0.92	mAs-model ^d	11.17	21.65	101.78	7.86 ^c	–	0.9458	8.26
	Asymmetric	–	21.65	108.78	8.89	–	0.9571	7.58
	Gompertz	10.31	–	117.41	–	16.26	0.9502	8.13
	Logistic	11.72	21.52	103.61	–	–	0.9602	7.27
25 °C, pH 5.5, aw = 0.94	mAs-model ^d	13.86	14.06	101.97	7.86 ^c	–	0.9788	4.74
	Asymmetric	–	14.22	103.77	7.99	–	0.9819	4.52
	Gompertz	13.88	–	109.98	–	10.45	0.9781	4.99
	Logistic	15.26	14.08	98.40	–	–	0.9836	4.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25 °C, pH 5.5, aw = 0.96	mAs-model ^d	21.07	9.24	99.19	7.86 ^c	–	0.9885	3.54
	Asymmetric	–	9.60	110.88	5.88	–	0.9933	2.60
	Gompertz	16.72	–	115.98	–	6.27	0.9941	2.45
	Logistic	18.70	9.31	99.63	–	–	0.9910	2.99
25 °C, pH 5.5, aw = 0.98	mAs-model ^d	27.42	7.10	101.29	7.86 ^c	–	0.9885	3.79
	Asymmetric	–	7.22	105.81	6.76	–	0.9900	3.51
	Gompertz	24.47	–	107.60	–	5.01	0.9879	3.89
	Logistic	25.42	7.18	101.33	–	–	0.9913	3.23
<i>Penicillium paneum</i> (รูปที่ 11)								
25 °C, pH 5.1, aw = 0.93	mAs-model ^d	4.73	40.91	96.25	9.20 ^c	–	0.9907	3.91
	Asymmetric	–	40.68	98.87	6.03	–	0.9966	2.29
	Gompertz	2.54	–	99.04	–	27.23	0.9975	1.95
	Logistic	3.92	40.40	94.24	–	–	0.9928	3.27
25 °C, pH 5.8, aw = 0.93	mAs-model ^d	8.67	26.79	100.04	9.20 ^c	–	0.9970	2.34
	Asymmetric	–	26.79	100.04	9.00	–	0.9970	2.31
	Gompertz	5.94	–	100.58	–	20.91	0.9983	1.77
	Logistic	8.50	26.81	98.11	–	–	0.9953	2.86
25 °C, pH 5.5, aw = 0.93	mAs-model ^d	7.15	32.52	102.37	9.20 ^c	–	0.9978	2.04
	Asymmetric	–	32.77	102.37	8.19	–	0.9991	1.28
	Gompertz	4.35	–	103.31	–	24.54	0.9984	1.71
	Logistic	6.57	32.79	99.99	–	–	0.9991	1.26
25 °C, pH 5.1, aw = 0.94	mAs-model ^d	7.58	30.67	101.01	9.20 ^c	–	0.9891	3.39
	Asymmetric	–	30.74	101.01	12.27	–	0.9994	0.87
	Gompertz	6.79	–	103.60	–	25.52	0.9990	1.07
	Logistic	10.27	30.72	99.09	–	–	0.9989	1.14
25 °C, pH 5.1, aw = 0.95	mAs-model ^d	7.53	31.85	101.30	9.20 ^c	–	0.9914	3.17
	Asymmetric	–	32.40	107.30	10.43	–	0.9969	1.98
	Gompertz	5.67	–	114.50	–	25.85	0.9984	1.45
	Logistic	9.02	32.17	102.19	–	–	0.9958	2.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25 °C, pH 5.8, aw = 0.94	mAs-model ^d	7.97	29.99	101.22	9.20 ^c	–	0.9916	2.68
	Asymmetric	–	31.16	116.80	8.82	–	0.9972	1.62
	Gompertz	5.11	–	128.61	–	23.24	0.9962	1.88
	Logistic	9.06	30.83	109.03	–	–	0.9976	1.49

^a ผลการรอกของ *Penicillium expansum* ของ Gougouli และ Koutsoumanis ในปี 2012 [1]

^b ผลการรอกของ *Penicillium expansum* ของ Nguyen Van Long และคณะ ในปี 2017 [19]

^c ค่าตัวแปร d ที่คำนวณจากสมการที่ (30)

^d แบบจำลอง Asymmetric ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ (สมการที่ (8))

ตารางที่ 2 ผลการทำนายความสัมพันธ์ของตัวแปรจลนศาสตร์การรอกของสปอร์ราที่สภาวะต่างๆ ด้วยแบบจำลอง CMI

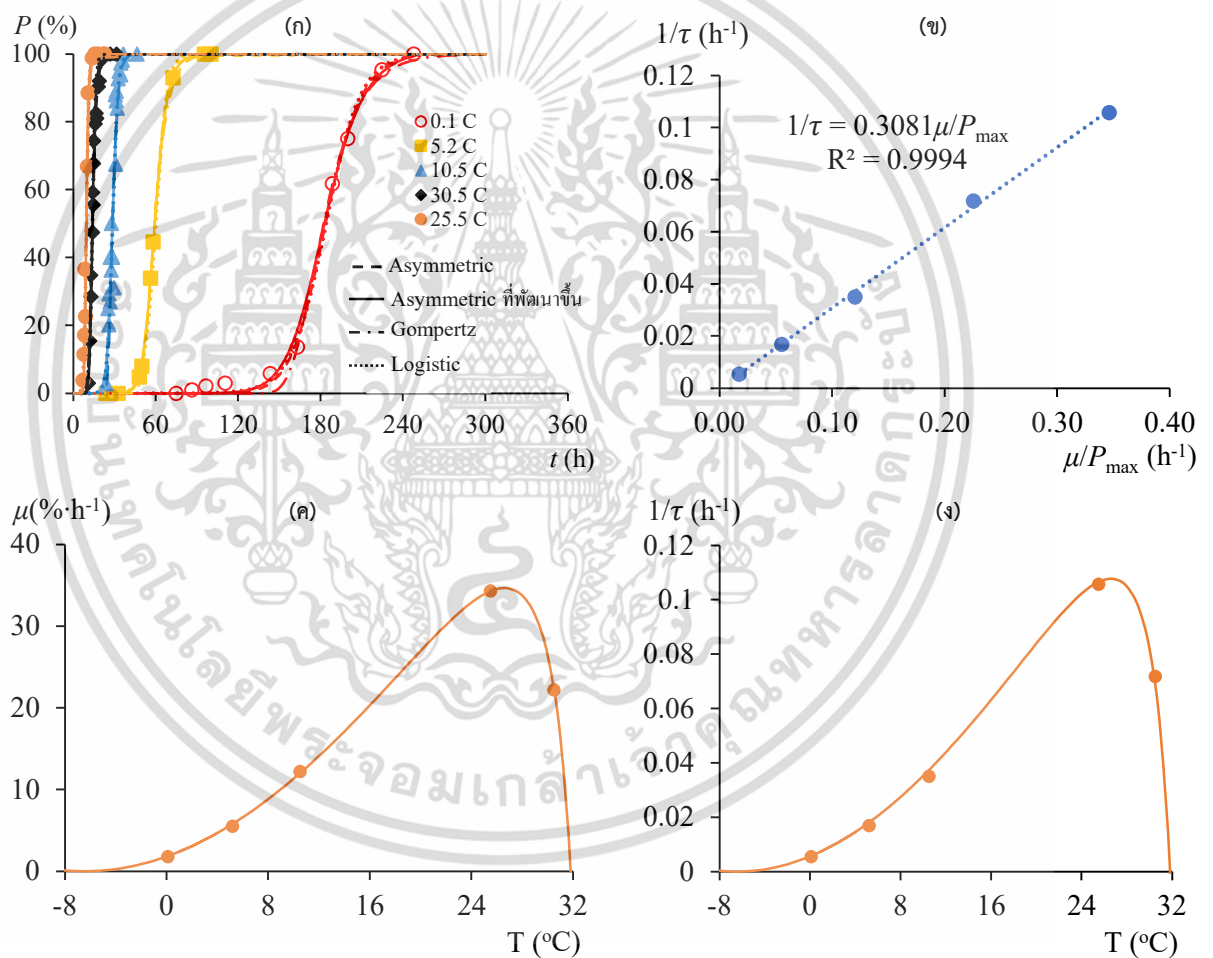
ชนิดรา	ตัวแปรของแบบจำลอง CMI					R ²	RMSE	รูป
<i>Penicillium expansum</i> ^a	μ (%·h ⁻¹)	τ ¹ _{opt} (h)	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	T_{opt} (°C)			
	34.67	–	31.79	–6.50	26.58	0.9998	0.04	รูปที่ 5 (ค)
	–	0.11	31.79	–6.50	26.58	0.9976	0.00	รูปที่ 5 (ง)
<i>Penicillium expansum</i> ^b	μ (%·h ⁻¹)	τ ¹ _{opt} (h)	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	T_{opt} (°C)			
	24.73	–	31.62	–7.50	25.56	1.0000	0.00	รูปที่ 6 (ค) สีส้ม
	–	0.080	31.52	–7.50	25.90	1.0000	0.00	รูปที่ 6 (ง) สีส้ม
	μ (%·h ⁻¹)	τ ¹ _{opt} (h)	aw_{max}	aw_{min}	aw_{opt}			
	23.41	–	1.0000	0.7594	0.9965	1.0000	0.00	รูปที่ 6 (ค) สีน้ำเงิน
	–	0.073	1.0000	0.7511	0.9958	1.0000	0.00	รูปที่ 6 (ง) สีน้ำเงิน
<i>Gloeosporium musarum</i>	μ (%·h ⁻¹)	τ ¹ _{opt} (h)	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	T_{opt} (°C)			
	34.02	–	39.22	8.21	27.22	1.0000	0.01	รูปที่ 7 (ค)
	–	0.19	37.48	6.45	27.80	0.9995	0.00	รูปที่ 7 (ง)
<i>Penicillium italicum</i>	μ (%·h ⁻¹)	τ ¹ _{opt} (h)	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	T_{opt} (°C)			
	32.03	–	31.26	1.00	22.22	0.9986	0.10	รูปที่ 8 (ค)
	–	0.10	33.06	–1.00	23.00	0.9984	0.00	รูปที่ 8 (ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<i>Aspergillus niger</i>	μ (%·h ⁻¹)	τ^1_{opt} (h)	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	T_{opt} (°C)			
	96.39	–	48.01	7.66	34.48	0.9746	1.49	รูปที่ 9 (ค)
	–	0.14	46.74	7.31	34.80	0.9778	0.00	รูปที่ 9 (ง)
<i>Fusarium proliferatum</i>	μ (%·h ⁻¹)	τ^1_{opt} (h)	aw_{max}	aw_{min}	aw_{opt}			
	29.61	–	1.0000	0.8367	0.9907	0.9922	0.18	รูปที่ 10 (ค)
	–	0.15	1.0000	0.8421	0.9911	0.9969	0.00	รูปที่ 10 (ง)

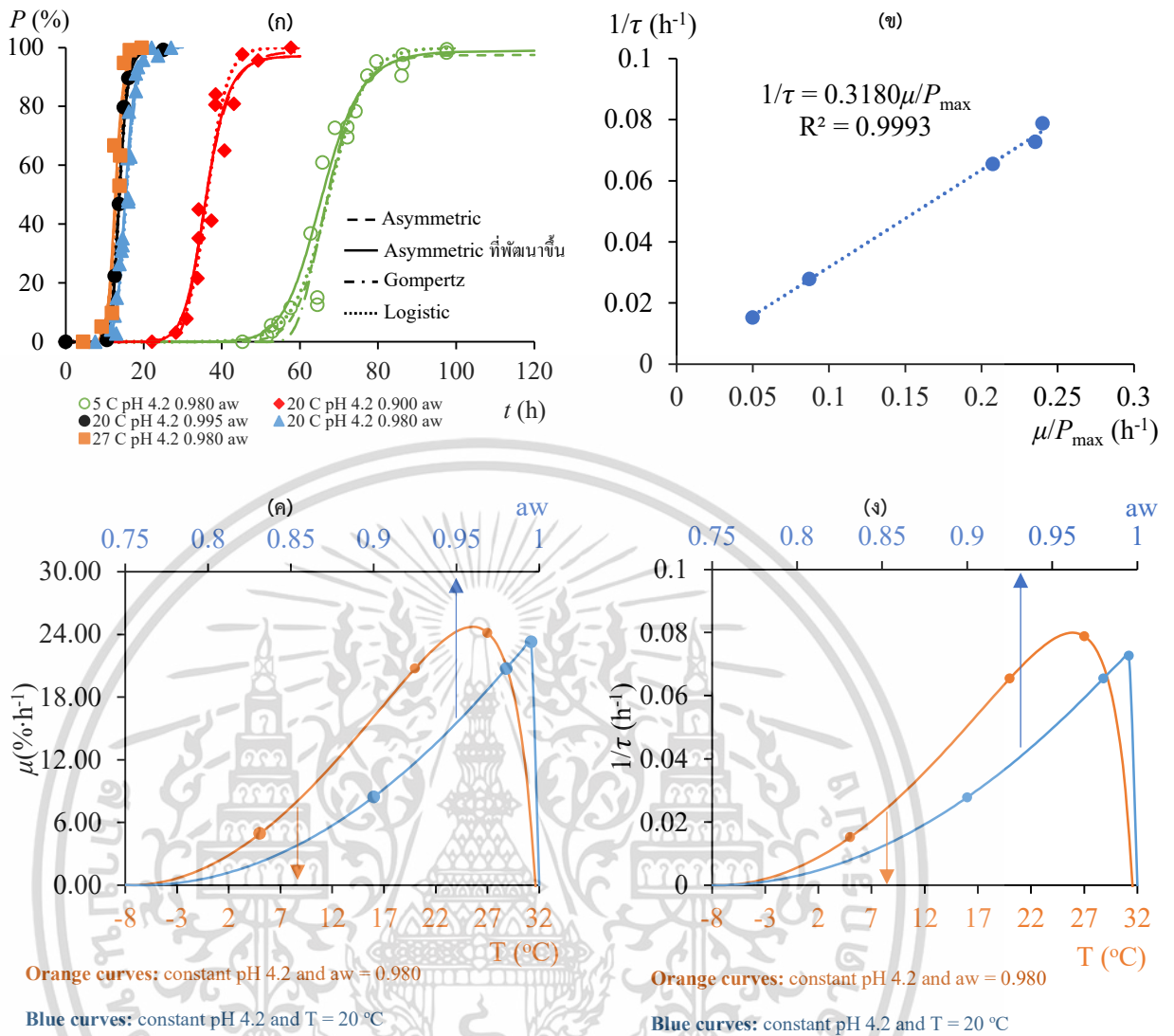
^a ผลการรอกของ *Penicillium expansum* ของ Gougouli และ Koutsoumanis ในปี 2012 [1]

^b ผลการรอกของ *Penicillium expansum* ของ Nguyen Van Long และคณะ ในปี 2017 [19]



รูปที่ 5 (ก) เส้นโค้งการรอกของสปอร์รา *Penicillium expansum* ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ และ μ/P_{max} (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ μ (ง) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ $1/\tau$
 ผลการทดลองของ Gougouli และ Koutsoumanis ในปี 2012 [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



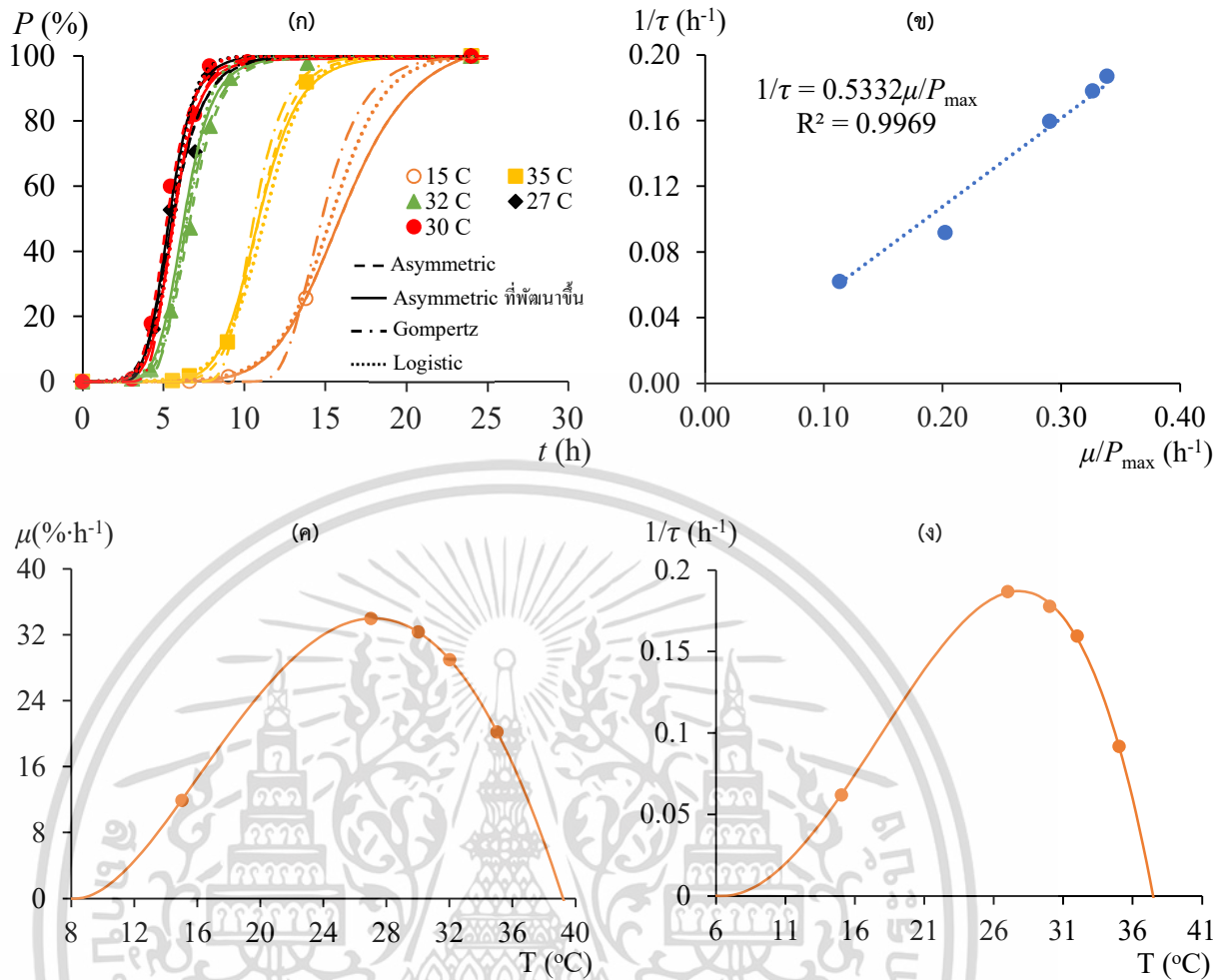
รูปที่ 6 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา *Penicillium expansum* ภายใต้อุณหภูมิและความชื้นต่างๆ

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ และ μ/P_{max} (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับ μ

(ง) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับ $1/\tau$

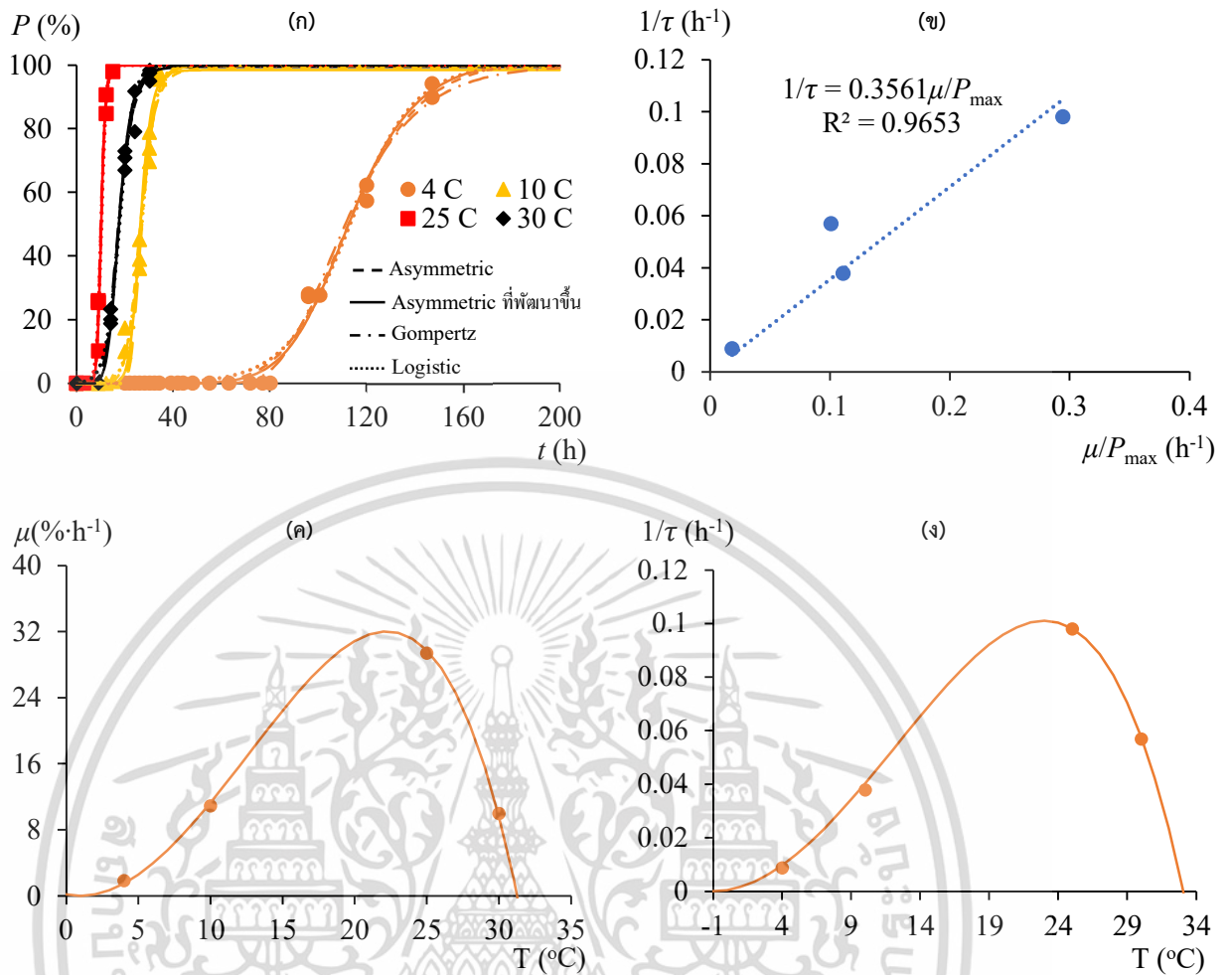
ผลการทดลองของ Nguyen Van Long และคณะ ในปี 2017 [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



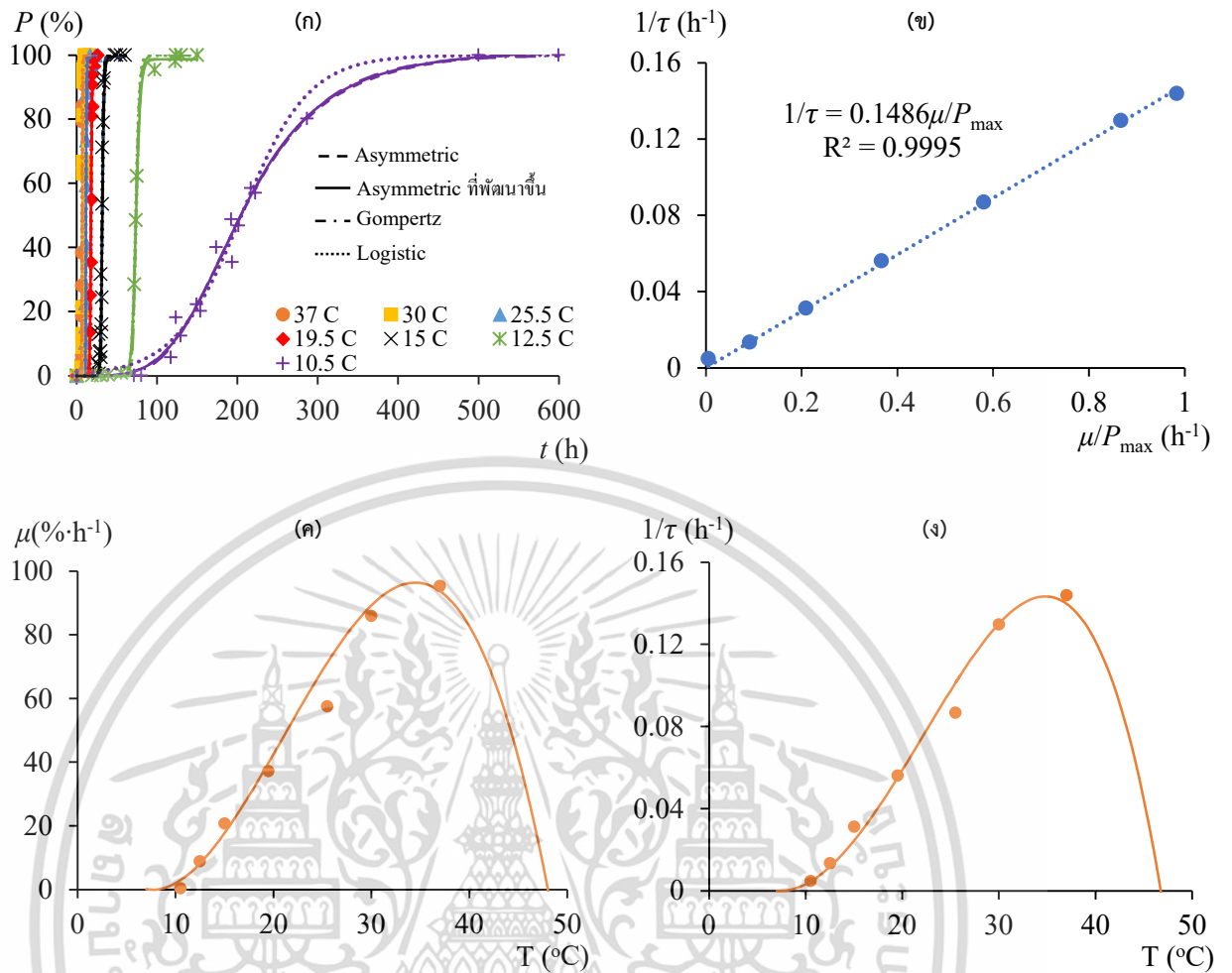
รูปที่ 7 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา *Gloeosporium musarum* ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ และ μ/P_{max} (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ μ (ง) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ $1/\tau$ ผลการทดลองของ Goos และ Tschirsch ในปี 1962 [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



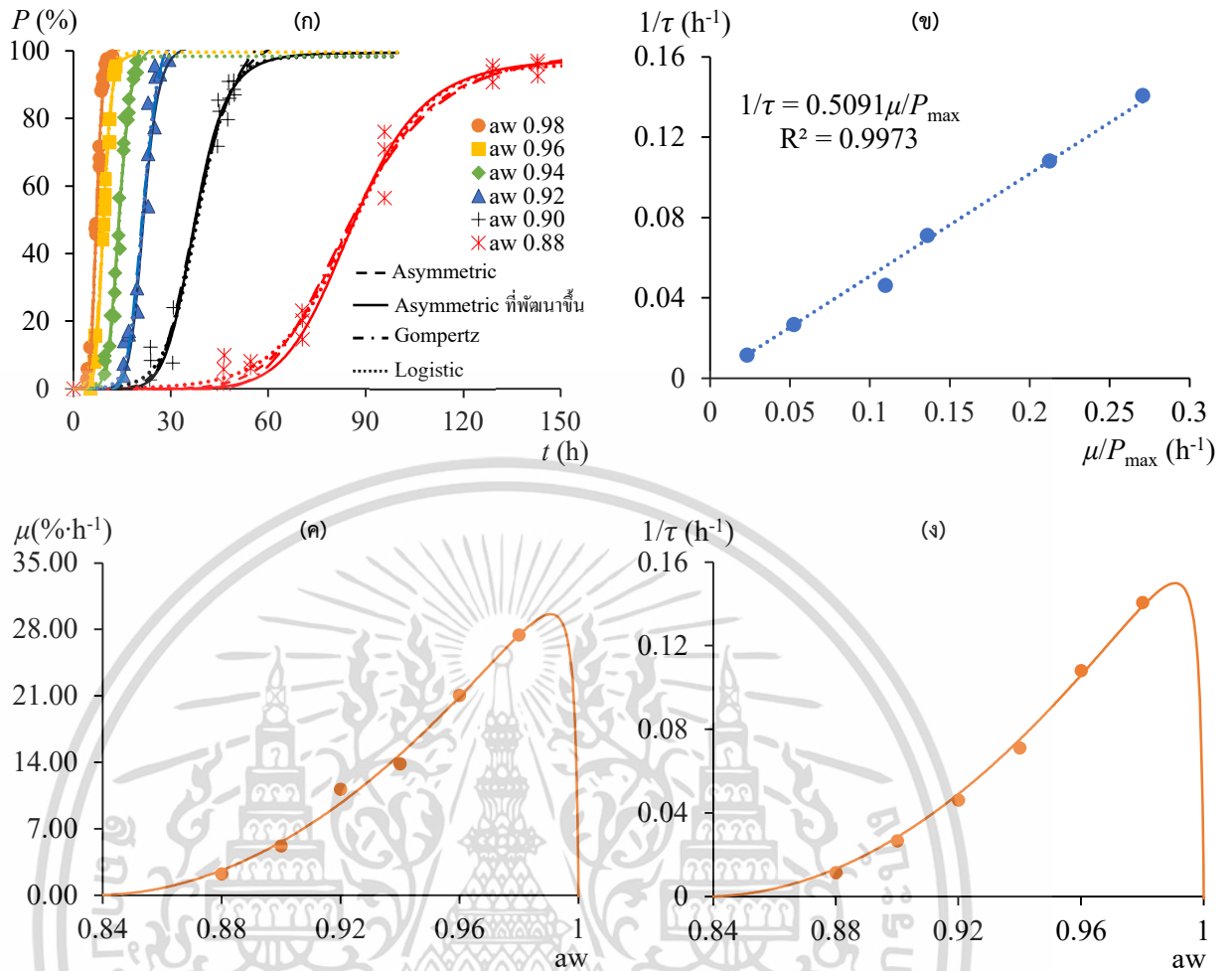
รูปที่ 8 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา *Penicillium italicum* ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ และ μ/P_{\max} (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ μ (ง) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ $1/\tau$
ผลการทดลองของ Plaza และคณะ ในปี 2003 [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



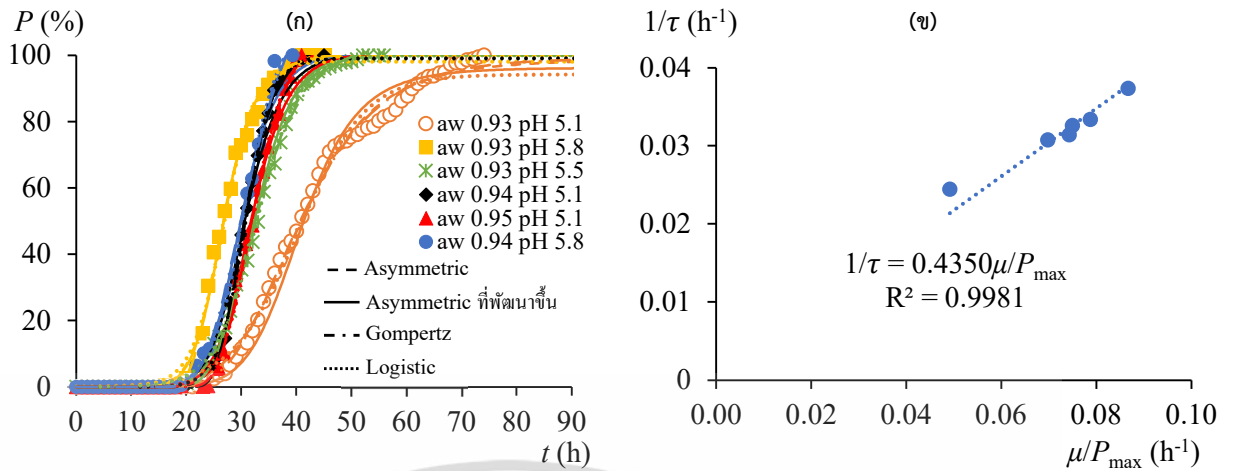
รูปที่ 9 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา *Aspergillus niger* ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ และ μ/P_{\max} (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ μ (ง) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ $1/\tau$
 ผลการทดลองของ Gougouli และ Koutsoumanis ในปี 2012 [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา *Fusarium proliferatum* ภายใต้ความชื้นต่างๆ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ และ μ/P_{max} (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับ μ (ง) ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับ $1/\tau$ ผลการทดลองของ Marin และคณะ ในปี 1996 [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา *Penicillium paneum* ภายใต้ความชื้นและ pH ต่างๆ

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ และ μ/P_{max}

ผลการทดลองของ Santos และคณะ ในปี 2020 [20]

4.1.1 การทำนายการงอกสปอร์ภายใต้สภาวะต่างๆ

รูปที่ 5 (ก) – (11) (ก) แสดงให้เห็นว่า เส้นโค้งจากการทำนายด้วยแบบจำลอง Asymmetric ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถทำนายข้อมูลการงอกของสปอร์ราชนิดต่างๆ ได้แม่นยำเทียบเท่ากับแบบจำลองอื่นๆ นอกจากนี้ ในตารางที่ 1 ยังให้ผลลัพธ์ในทิศทางเดียวกันว่า แบบจำลองทั้งสองให้ค่าความแม่นยำในการทำนาย (ค่า R^2 และ RMSE) ที่ใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะค่าความแม่นยำระหว่างแบบจำลอง Asymmetric ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้และแบบเดิมที่พัฒนาโดย Dantigny และคณะ ซึ่งผลลัพธ์นี้เป็นข้อพิสูจน์ที่ยืนยันได้ว่าการปรับแก้แบบจำลอง Asymmetric ด้วยวิธีการตามสมการที่ (4) – (8) มีความถูกต้อง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองสำหรับทำนายการงอกของสปอร์ราจะพบว่า:

(1) แม้ว่าแบบจำลอง Logistic และ Gompertz จะสามารถทำนายการงอกของสปอร์ราได้ดียิ่งขึ้นก็ตาม หากพิจารณาแบบจำลองทั้งสองโดยละเอียด (สมการที่ (1) และ (2)) จะพบว่า เมื่อกำหนดให้ $t = 0$ แล้ว $P \neq 0$ ซึ่งขัดแย้งกับหลักความเป็นจริง เนื่องจาก ณ เวลาเริ่มต้น ไม่ควรมีสปอร์ที่งอกสมบูรณ์แล้วปรากฏอยู่ในระบบ ส่วนแบบจำลอง Asymmetric สามารถให้ค่า $P = 0$ เมื่อ $t = 0$ ได้ นอกจากนี้ ลักษณะเส้นกราฟของแบบจำลองทั้งสองยังเสียเปรียบเส้นกราฟของแบบจำลอง Asymmetric กล่าวคือ แบบจำลอง Logistic จะให้เส้นกราฟแบบสมมาตร ในขณะที่แบบจำลอง Gompertz จะให้เส้นกราฟแบบอสมมาตรเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) แม้ว่าแบบจำลอง Asymmetric สามารถสร้างเส้นกราฟได้ทั้งแบบสมมาตรและอสมมาตร เพื่อให้โค้งรับกับข้อมูลได้ดีกว่าแบบจำลอง Logistic และ Gompertz อย่างไรก็ตาม ตัวแปร d ของแบบจำลองไม่ได้ให้ความหมายทางชีวภาพ แต่ถูกอธิบายไว้ว่า ตัวแปร d แปรผันโดยตรงกับความสมมาตรของเส้นกราฟ ถ้าค่าตัวแปร d เพิ่มขึ้น จะทำให้รูปแบบของเส้นกราฟมีความสมมาตรมากขึ้น [9]

(3) ค่า R^2 และ RMSE ในตารางที่ 1 ของแบบจำลอง Asymmetric ที่พัฒนาขึ้นในงานนี้และแบบเดิมที่พัฒนาโดย Dantigny และคณะ มีค่าใกล้เคียงกันมาก ทำให้สามารถสรุปได้ว่า แบบจำลอง Asymmetric ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้แทนแบบจำลอง Asymmetric แบบเดิมได้ โดยที่ยังคงคุณสมบัติที่ได้เปรียบของแบบจำลอง Asymmetric กล่าวคือ ยังสามารถสร้างเส้นกราฟได้ทั้งแบบสมมาตรและอสมมาตร และสามารถให้ค่า $P=0$ เมื่อ $t=0$ อีกทั้ง เนื่องจากตัวแปร d ได้ถูกแทนที่ด้วย $4 \cdot \tau \cdot \mu / P_{\max}$ ดังสมการที่ (7) ทำให้ทุกตัวแปรในแบบจำลอง Asymmetric ใหม่ที่พัฒนาขึ้นมีความหมายทางชีวภาพ จากที่กล่าวมาข้างต้น จึงทำให้สามารถกล่าวได้ว่า แบบจำลอง Asymmetric ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้อธิบายการงอกสปอร์ของรามมากกว่าแบบจำลองอื่นๆ

4.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ และ μ/P_{\max}

เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ กับ μ/P_{\max} ของราแต่ละสายพันธุ์ที่ศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้ มาสร้างเป็นเส้นกราฟดังที่ปรากฏในรูปที่ 5 (ข) – 11 (ข) จะพบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ ดังนี้

$$1/\tau = m \cdot \mu/P_{\max} \quad (29)$$

โดยที่ m = ความชันของความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ กับ μ/P_{\max}

สมการที่ (29) สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\tau$ กับ μ/P_{\max} ของราแต่ละสายพันธุ์ที่ศึกษาได้อย่างแม่นยำ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่า R^2 ในรูปที่ 5 (ข) – 11 (ข) ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.9653 – 0.9995 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่าง $1/\tau$ กับ μ/P_{\max} ทำให้สามารถอนุมานได้ว่า ค่าตัวแปร d นั้นอาจจะเป็นค่าคงที่ของสปอร์ราแต่ละชนิด เนื่องจาก ค่า m ของสปอร์ราแต่ละสายพันธุ์ที่ศึกษาเป็นค่าคงที่ และเมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ (7) และ (29) จะได้ว่า ค่าตัวแปร d นั้นสามารถคำนวณได้อีกหนึ่งวิธีโดยสมการดังต่อไปนี้

$$d = 4/m \quad (30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (30) ถูกนำไปใช้ในการคำนวณค่าตัวแปร d ให้กับแบบจำลอง Asymmetric ที่พัฒนาขึ้นใหม่ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งทำให้ทราบว่า ค่าตัวแปร d ของราแต่ละสายพันธุ์ที่ศึกษามีค่าแตกต่างกันและเป็นค่าคงที่ของเชื้อราชนิดนั้นๆ ไม่ขึ้นอยู่กับปัจจัยของสภาวะแวดล้อมที่สปอร์งอก เช่น ความเป็นกรด - ด่าง อุณหภูมิ และความชื้น เป็นต้น ซึ่งผลการวิจัยที่พิสูจน์ได้ว่า ค่าตัวแปร d เป็นค่าคงที่ของเชื้อราชนิดนั้นๆ ได้ชัดเจนที่สุด คือ ผลการทำนายการงอกของสปอร์ราในรูปที่ 5 และ 6 ซึ่งรูปทั้งสองเป็นผลการทำนายการงอกของสปอร์รา *P. expansum* จากสองงานวิจัยที่เพาะเลี้ยงสปอร์ราภายใต้สภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน กล่าวคือ รูปที่ 5 เป็นการเพาะเลี้ยงสปอร์รา *P. expansum* ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกันโดย Gougouli และ Koutsoumanis ในปี 2012 [1] ส่วนรูปที่ 6 เป็นการเพาะเลี้ยงสปอร์รา *P. expansum* ภายใต้อุณหภูมิและความชื้นที่แตกต่างกันโดย Nguyen Van Long และคณะ ในปี 2017 [19] อย่างไรก็ตาม ผลการคำนวณค่าตัวแปร d จากรูปที่ 5 ($d = 12.98$) และ 6 ($d = 12.58$) ยังให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันมาก การค้นพบว่า ค่าตัวแปร d เป็นค่าคงที่ของเชื้อราชนิดนั้นๆ ในงานวิจัยนี้อาจจะนำมาซึ่งองค์ความรู้ใหม่ๆ ที่จะทำให้เกิดความเข้าใจที่ลึกซึ้งยิ่งขึ้นในการศึกษาเชื้อราได้ เช่น ค่าตัวแปร d อาจจะเกี่ยวข้องกับช่วงสภาวะแวดล้อมที่สปอร์รานั้นๆ สามารถเติบโตได้ เป็นต้น ทั้งนี้ยังต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในอนาคต

4.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะแวดล้อมกับ μ และ τ

นอกจากการแทนที่ตัวแปร d ด้วย $4 \cdot \tau \cdot \mu / P_{\max}$ จะทำให้แบบจำลอง Asymmetric มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นแล้ว งานวิจัยนี้ยังได้มีความพยายามในการประมาณค่าตัวแปร τ และ μ กับสภาพแวดล้อมในการเพาะเลี้ยงสปอร์ราด้วยแบบจำลอง CMI (สมการที่ (9) – (14)) เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของแบบจำลอง Asymmetric เดิมที่ไม่สามารถประมาณค่าตัวแปร d ที่สภาพแวดล้อมต่างๆ ที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงได้ ซึ่งเป็นผลทำให้แบบจำลองเดิมไม่สามารถใช้ในการทำนายการงอกของสปอร์ราภายใต้สภาวะที่ไม่มีผลการทดลองมารองรับหรือสภาวะที่ไม่ทราบค่าตัวแปร d ได้

ผลการประมาณค่าตัวแปร τ และ μ กับสภาพแวดล้อมในการเพาะเลี้ยงสปอร์ราด้วยแบบจำลอง CMI (สมการที่ (9) – (14)) ดังแสดงในรูปที่ 5 (ค) และ (ง) – 10 (ค) และ (ง) แสดงให้เห็นว่า เส้นกราฟจากแบบจำลอง CMI สามารถประมาณค่าตัวแปร τ และ μ ที่สภาพแวดล้อมต่างๆ ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ ค่า RMSE (0.00 – 1.49) และ R^2 (0.9746 – 1.0000) ในตารางที่ 2 ยังแสดงให้เห็นในทำนองเดียวกันว่า แบบจำลอง CMI สามารถทำนายค่าตัวแปร τ และ μ ที่สภาพแวดล้อมต่างๆ ได้อย่างแม่นยำเช่นกัน อีกทั้ง การทำนายด้วยแบบจำลอง CMI ยังทำให้สามารถ

ประมาณค่าขอบเขตสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการงอกของสปอร์ รวมถึงค่าสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยคณะผู้บริหารศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สุดที่ใช้ในการงอกของสปอร์ได้ ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงไว้ในตารางที่ 2 ค่าขอบเขตการงอกและค่าที่เหมาะสมที่สุดในการงอกของสปอร์จากรา *P. expansum* และ *A. niger* ที่คำนวณได้ในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากงานต้นฉบับ [1] แม้ในงานวิจัยต้นฉบับจะใช้แบบจำลอง CMI ในการทำนายค่าตัวแปร λ และ μ ที่สภาวะแวดล้อมต่างๆ ความสอดคล้องกันนี้เป็นข้อพิสูจน์ว่า การกำหนดให้ $d = 4 \cdot \tau \cdot \mu / P_{\max}$ (สมการที่ (7)) นั้นมีความถูกต้องตามหลักชีววิทยา เนื่องจาก ค่าขอบเขตการงอกและค่าที่เหมาะสมที่สุดในการงอกของสปอร์สมควรเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับสรีรวิทยาของสปอร์และไม่ขึ้นกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4.2 ผลการทำนายการงอกของสปอร์ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัต

จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า แบบจำลองสำหรับอธิบายการงอกของสปอร์ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัตเคยมีการพัฒนามาแล้วโดย Gougouli และ Koutsoumanis ในปี 2012 [1] (สมการที่ (27) และ (28)) อย่างไรก็ตาม แบบจำลองดังกล่าวยังไม่สามารถใช้ทำนายการงอกของสปอร์ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัตได้อย่างสมบูรณ์ สามารถใช้ทำนายได้เฉพาะบางกรณีเท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยในส่วนนี้จึงมีได้มีการพัฒนาแบบจำลองขึ้นมาใหม่ (สมการที่ (15) – (26)) ให้สามารถทำนายการงอกของสปอร์ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัตได้อย่างสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผลการงอกของสปอร์รา *P. expansum* และ *A. niger* ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัตจากงานวิจัยของ Gougouli และ Koutsoumanis ในปี 2012 [1] ถูกนำมาใช้ในการประเมินความแม่นยำในการทำนายด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ผลการทำนายด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น (สมการที่ (15) – (26)) ได้ถูกเปรียบเทียบกับผลการทำนายด้วยแบบจำลองเดิม (สมการที่ (27) และ (28)) ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 12 – 24 ค่าตัวแปรจลนศาสตร์และผลความแม่นยำในการทำนาย (R^2 และ RMSE) จะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3 – 8 สำหรับวิธีการคำนวณค่าตัวแปรจลนศาสตร์และการใช้งานแบบจำลองจะถูกอธิบายโดยละเอียดในส่วนถัดไป

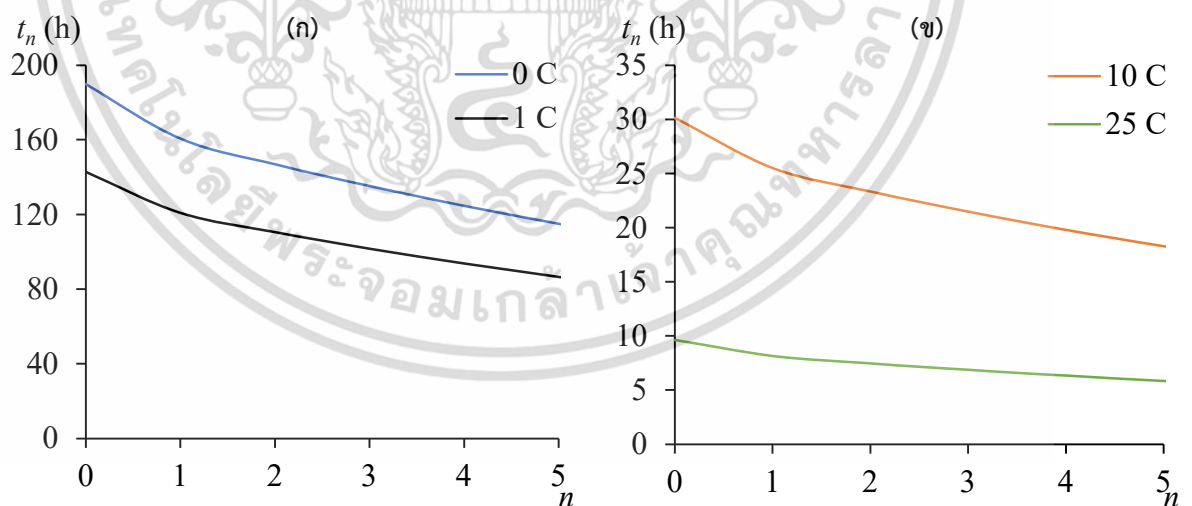
ตัวแปรจลนศาสตร์ (τ และ μ) ถือเป็นตัวแปรสำคัญในการทำนายการงอกของสปอร์ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัต ซึ่งการแปรเปลี่ยนของตัวแปรดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของความเครียดของสปอร์อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมและความแตกต่างของระยะการเติบโตของสปอร์ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อม (ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ มีสปอร์บางสปอร์บางส่วนอยู่ในระยะบวมและส่วนที่เหลืออยู่ในระยะงอกหลอดสปอร์) อิทธิพลของความเครียดของสปอร์อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมจะ

แทนด้วยตัวแปร k ในสมการที่ (18) เพื่อใช้ในการปรับแก้ค่า μ และจะแทนด้วยตัวแปร $t_{a,s}$ ในสมการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ (24) เพื่อใช้ในการปรับแก้ค่า τ ส่วนอิทธิพลของความแตกต่างของระยะเวลาเติบโตของสปอร์ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะแวดล้อมจะแทนด้วยตัวแปร f ในสมการที่ (19) เพื่อใช้ในการปรับแก้ค่า μ และจะแทนด้วยตัวแปร $t_{a,p}$ ในสมการที่ (25) เพื่อใช้ในการปรับแก้ค่า τ ซึ่งหากพิจารณาสมการที่ (19) และ (25) จะพบว่า ตัวแปร f และ $t_{a,p}$ จะส่งผลต่อตัวแปรจลนศาสตร์ เมื่อสถานะแวดล้อมถูกเปลี่ยนไปยังสถานะแวดล้อมที่เป็นขอบเขตการงอกของสปอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผลการงอกของสปอร์รา *P. expansum* และ *A. niger* ที่ศึกษาเป็นการงอกภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น ค่าขอบเขตการงอกของสปอร์จึงหมายถึงค่าของอุณหภูมิที่ใกล้กับค่าต่ำสุดหรือสูงสุดของการงอกของสปอร์รา ซึ่งแสดงด้วยตัวแปร $T_{b,min}$ และ $T_{b,max}$ (สมการที่ 20) จากสมการที่ 20 ทำให้สามารถคำนวณค่า $T_{b,min}$ และ $T_{b,max}$ ของ *P. expansum* ได้เป็น 2.69 °C และ 32.00 °C ตามลำดับ ส่วนค่า $T_{b,min}$ และ $T_{b,max}$ ของ *A. niger* มีค่าเป็น 14.12 °C และ 46.52 °C ตามลำดับ

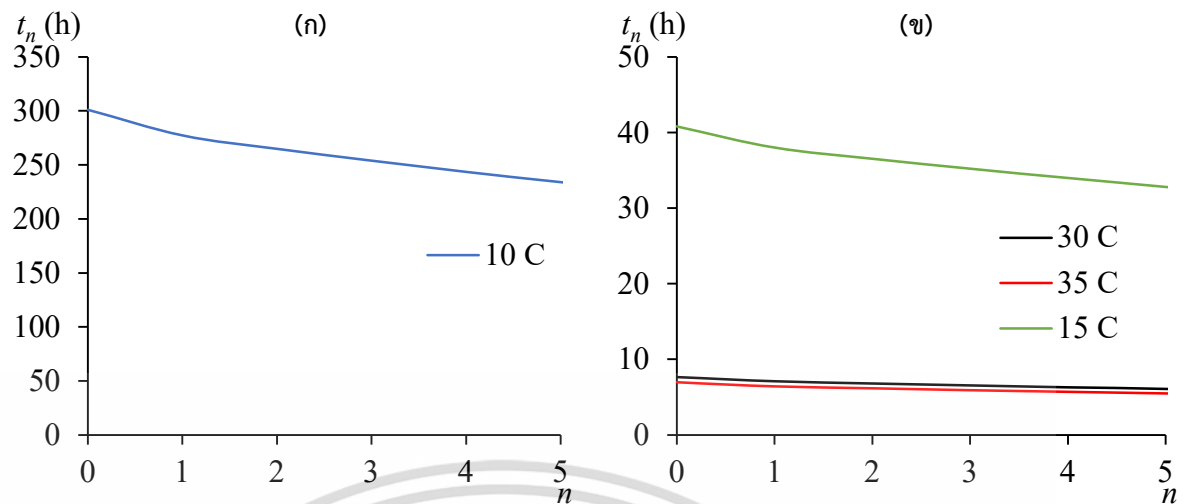
นอกจากนี้ ตัวแปร $t_{a,s}$ ในสมการที่ (24) ถือเป็นอีกหนึ่งตัวแปรสำคัญที่ช่วยให้การทำนายมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ซึ่งการคำนวณตัวแปรดังกล่าวจะคำนวณผ่านตัวแปร t_n ในสมการที่ (26) อย่างไรก็ตาม การคำนวณตัวแปร t_n มีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก ดังนั้น ในงานวิจัยนี้เพื่อให้การอธิบายในส่วนถัดไปไม่ซับซ้อนมากเกินไป จึงได้มีการสร้างกราฟเพื่อแสดงค่าตัวแปร t_n ของสปอร์รา *P. expansum* และ *A. niger* ในรูปที่ 12 และ 13 ตามลำดับ



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง t_n และ n ของสปอร์รา *Penicillium expansum* ที่อุณหภูมิ

(ก) 0 °C และ 1 °C และ (ข) 10 °C และ 25 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่าง t_n และ n ของสปอร์ริรา *Aspergillus niger* ที่อุณหภูมิ
(ก) 10 °C และ (ข) 15 °C 30 °C และ 35 °C

4.2.1 กรณีที่ k , $t_{a,s}$ และ $t_{a,p}$ ไม่ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ

1) สปอร์ริรา *P. expansum*

ตารางที่ 3 ค่าตัวแปรจลนศาสตร์และค่าทางสถิติจากการทำนายการงอกสปอร์ริรา *Penicillium expansum* ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัตด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้และแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis ในกรณีที่ k , $t_{a,s}$ และ $t_{a,p}$ ไม่ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ

รูป	แบบจำลอง	สถานการณ์	ตัวแปรจลนศาสตร์	R^2	RMSE
รูปที่ 14	แบบจำลอง A ^a	25 °C → 9.7 h → 10 °C	$\mu = 33.78 \% \cdot h^{-1}$ $\tau = 9.64$ h	0.9670	6.48
		10 °C → ∞	$\mu' = 8.96 \% \cdot h^{-1}$ $\tau' = 12.43$ h		
	แบบจำลอง B ^b	25 °C → 9.7 h → 10 °C	$\mu = 31.77 \% \cdot h^{-1}$ $\lambda = 7.94$ h	0.9744	6.11
		10 °C → ∞	$\mu' = 12.21 \% \cdot h^{-1}$ $\lambda' = 9.70$ h		
รูปที่ 15	แบบจำลอง A ^a	0 °C → 48 h → 25 °C	$\mu = 1.72 \% \cdot h^{-1}$ $\tau = 189.78$ h	0.9982	1.70
		25 °C → ∞	$\mu' = 33.78 \% \cdot h^{-1}$ $\tau' = 56.13$ h		
	แบบจำลอง B ^b	0 °C → 48 h → 25 °C	$\mu = 2.15 \% \cdot h^{-1}$ $\lambda = 238.35$ h	0.9916	3.65
		25 °C → ∞	$\mu' = 31.77 \% \cdot h^{-1}$ $\lambda' = 54.34$ h		
	แบบจำลอง A ^a	0 °C → 24 h → 25 °C	$\mu = 1.72 \% \cdot h^{-1}$ $\tau = 189.78$ h	0.8330	14.47
		25 °C → ∞	$\mu' = 33.78 \% \cdot h^{-1}$ $\tau' = 33.35$ h		
	แบบจำลอง B ^b	0 °C → 24 h → 25 °C	$\mu = 2.15 \% \cdot h^{-1}$ $\lambda = 238.35$ h	0.8915	12.44

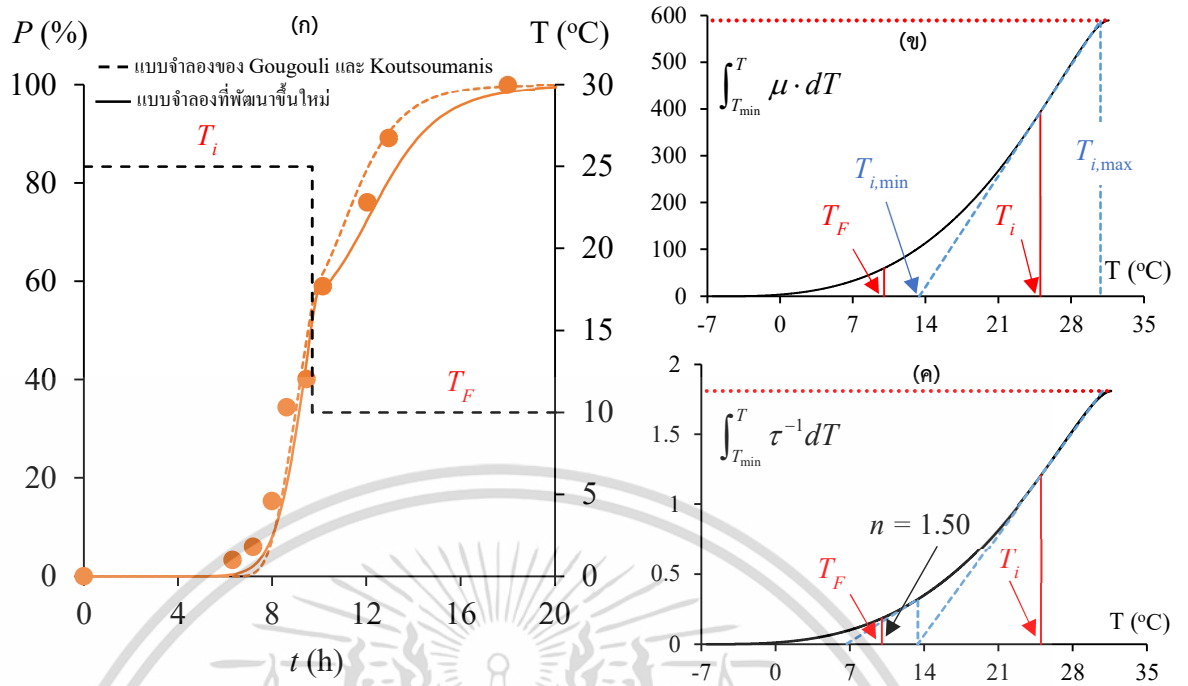
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		25 °C → ∞	$\mu' = 31.77\% \cdot h^{-1}$	$\lambda' = 31.14 \text{ h}$		
รูปที่ 16	แบบจำลอง A ^a	0 °C → 185.3 h → 25 °C	$\mu = 1.72 \% \cdot h^{-1}$	$\tau = 189.78 \text{ h}$	0.9769	6.19
		25 °C → ∞	$\mu' = 33.78 \% \cdot h^{-1}$	$\tau' = 186.22 \text{ h}$		
	แบบจำลอง B ^b	0 °C → 185.3 h → 25 °C	$\mu = 2.15 \% \cdot h^{-1}$	$\lambda = 238.35 \text{ h}$	-0.0849	39.64
		25 °C → ∞	$\mu' = 31.77\% \cdot h^{-1}$	$\lambda' = 187.07 \text{ h}$		
	แบบจำลอง A ^a	0 °C → 163 h → 25 °C	$\mu = 1.72 \% \cdot h^{-1}$	$\tau = 189.78 \text{ h}$	0.9296	11.62
		25 °C → ∞	$\mu' = 33.78 \% \cdot h^{-1}$	$\tau' = 163.93 \text{ h}$		
แบบจำลอง B ^b	0 °C → 163 h → 25 °C	$\mu = 2.15 \% \cdot h^{-1}$	$\lambda = 238.35 \text{ h}$	0.3451	32.19	
	25 °C → ∞	$\mu' = 31.77\% \cdot h^{-1}$	$\lambda' = 165.51 \text{ h}$			
รูปที่ 17	แบบจำลอง A ^a	25 °C → 9 h → 10 °C	$\mu = 33.78 \% \cdot h^{-1}$	$\tau = 9.64 \text{ h}$	0.8949	11.85
		10 °C → 3.5 h → 25 °C	$\mu' = 8.96 \% \cdot h^{-1}$	$\tau' = 11.73 \text{ h}$		
		25 °C → ∞	$\mu' = 33.78 \% \cdot h^{-1}$	$\tau' = 13.21 \text{ h}$		
	แบบจำลอง B ^b	25 °C → 9 h → 10 °C	$\mu = 31.77 \% \cdot h^{-1}$	$\lambda = 7.94 \text{ h}$	0.9146	10.85
		10 °C → 3.5 h → 25 °C	$\mu' = 12.21 \% \cdot h^{-1}$	$\lambda' = 9.00 \text{ h}$		
		25 °C → ∞	$\mu' = 31.77\% \cdot h^{-1}$	$\lambda' = 12.50 \text{ h}$		

^a แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ สมการที่ (15) – (26)

^b แบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis สมการที่ (27) – (28)

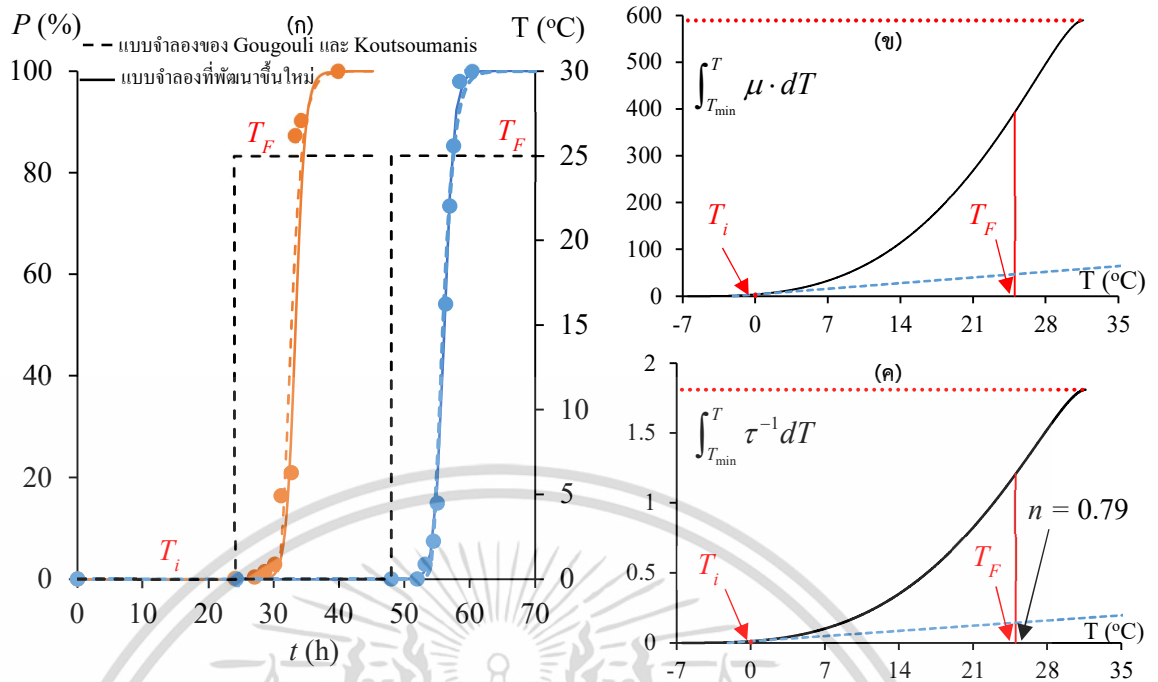
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 14 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา *Penicillium expansum* ภายใต้อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 9.7 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 10 °C (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{min}}^T \tau^{-1} dT$ กับอุณหภูมิ T

รูปที่ 14 แสดงเส้นโค้งการทำนายการงอกของสปอร์รา *P. expansum* ภายใต้อุณหภูมิ 25 °C (T_i) เป็นเวลา 9.7 ชั่วโมง (t_s) จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 10 °C (T_F) ในกรณีนี้ $T_{b,min} < T_F < T_{b,max}$ ดังนั้น $f = 1$ และ $t_{a,p} = 0$ ส่วน $T_F < T_{i,min}$ (รูปที่ 14 (ข)) ดังนั้น ต้องพิจารณาผลของความเครียดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ส่งผลต่อตัวแปรจลนศาสตร์ จากสมการที่ (18) ซึ่งคำนวณได้ว่า $k = 0.83$ และสมการที่ (17) คำนวณได้ว่า $\mu' = (0.83) \cdot \mu(T_F) = (0.33)(10.80) = 8.96 \% \cdot h^{-1}$ ในส่วนของการคำนวณค่า τ' สมการที่ (22) ระบุไว้ว่า หาก $t_s > t^*$ แล้ว $t_r = 0$ ดังนั้น $\tau' = t_s + t_{a,s}$ จากรูปที่ 14 (ค) $n = 1.50$ ทำให้ $t_n(T_F) = 24.42$ h (รูปที่ 12) และ $t_{a,s} = 2.73$ h (สมการที่ (24)) ดังนั้น $\tau' = 9.7 + 2.73$ h = 12.43 h จากนั้น ค่า μ' และ τ' ที่คำนวณได้ จะถูกนำไปแทนค่าในสมการที่ (15) เส้นโค้งจากการทำนายในรูปที่ 14 (ก) และผลความแม่นยำในการทำนาย (R^2 และ RMSE) ที่แสดงในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ($R^2 = 0.9670$ และ RMSE = 6.48) และแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis สมการที่ (27) – (28) ($R^2 = 0.9744$ และ RMSE = 6.11) ให้ผลลัพธ์การทำนายที่ใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 15 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา *Penicillium expansum* ภายใต้อุณหภูมิ 0 °C เป็นเวลา 24 (เส้นสีส้ม) และ 48 (เส้นสีน้ำเงิน) ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 25 °C (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T

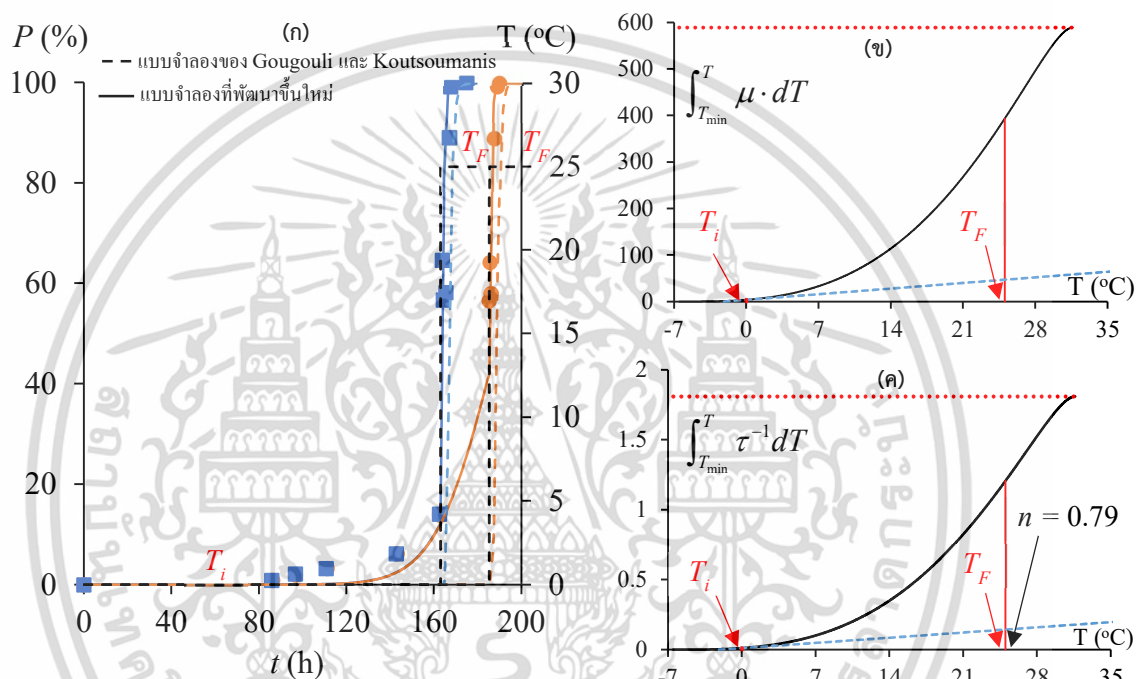
รูปที่ 15 แสดงเส้นโค้งการทำนายการงอกของสปอร์รา *P. expansum* ภายใต้อุณหภูมิ 0 °C (T_i) เป็นเวลา 24 (เส้นสีส้ม: t_{s1}) และ 48 (เส้นสีน้ำเงิน: t_{s2}) ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 25 °C (T_F) ทั้งสองกรณีนี้ $T_{b,min} < T_F < T_{b,max}$ ดังนั้น $f = 1$ และ $t_{a,p} = 0$ อีกทั้ง $T_{i,min} < T_F < T_{i,max}$ (รูปที่ 15 (ข)) และอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่สปอร์ทุกตัวในระบบยังอยู่ในระยะบวม ($t_s < t^*$) ทำให้อัตราการงอกตลอดสปอร์เฉลี่ยหรือค่า μ' ไม่ถูกรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (อธิบายในหัวข้อ 2.3.1) ด้วยเหตุนี้ ทำให้ทั้งสองกรณีมีค่า $k = 1$ และ $\mu_1' = \mu_2' = \mu(T_F) = 33.78 \% \cdot h^{-1}$

ในส่วนของการคำนวณค่า τ' เนื่องจาก $t_{s1} < t_1^*$ และ $t_{s2} < t_2^*$ ทำให้ $\tau_1' = t_{s1} + t_{a,s1} + t_{r1}$ และ $\tau_2' = t_{s2} + t_{a,s2} + t_{r2}$ ตามลำดับ จากสมการที่ (22) จะได้ว่า $t_{r1} = 8.42$ h และ $t_{r2} = 7.20$ h และเนื่องจากทั้งสองกรณีมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เท่ากัน ทำให้ $t_{a,s1} = t_{a,s2}$ จากรูปที่ 15 (ค) จะเห็นว่า จุดตัดของเส้นที่สัมผัสที่จุด ($T_i, \int_{T_{min}}^{T_i} \tau^{-1} \cdot dT$) กับเส้นกำกับ (เส้นประสีแดง) อยู่นอกช่วงการเติบโตของสปอร์ ($> T_{max}$) ทำให้ไม่สามารถหาค่า n ได้เหมือนกับกรณีทั่วไป ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาสมการสำหรับคำนวณค่า n ขึ้นมาใหม่โดยเฉพาะ ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$n = \frac{T_F - T_i}{T_{max} - T_i} \tag{31}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (31) ทำให้ได้ว่า $n = 0.79$ ซึ่งทำให้ $t_n(T_F) = 8.47$ h (รูปที่ 12) และ $t_{a,s1} = t_{a,s2} = 0.93$ h (สมการที่ (24)) ดังนั้น $\tau_1' = 24 + 0.93 + 8.42$ h = 33.35 h และ $\tau_2' = 48 + 0.93 + 7.20$ h = 56.13 h จากนั้น ค่า μ_1' μ_2' τ_1' และ τ_2' ที่คำนวณได้ จะถูกนำไปแทนค่าในสมการที่ (15) เส้นโค้งจากการทำนายในรูปที่ 15 (ก) และผลความแม่นยำในการทำนาย (R^2 และ RMSE) ที่แสดงในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ($R^2 = 0.9982$ และ RMSE = 1.70) และแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis สมการที่ (27) – (28) ($R^2 = 0.9916$ และ RMSE = 3.65) ให้ผลลัพธ์การทำนายที่ใกล้เคียงกัน



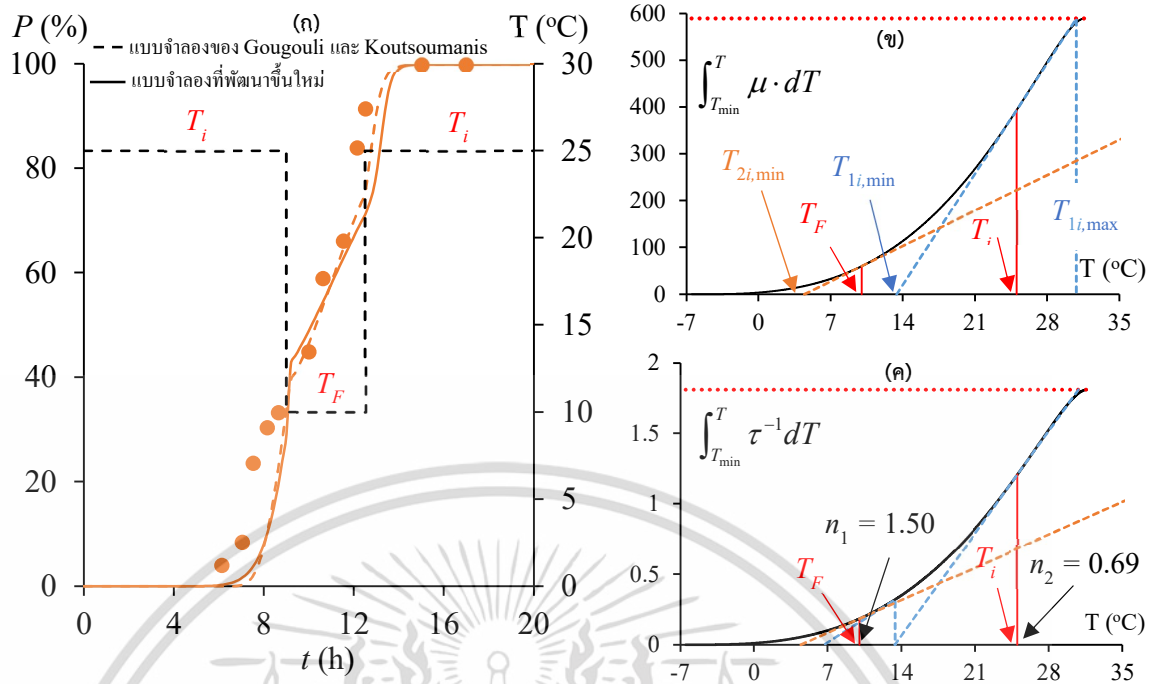
รูปที่ 16 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา *Penicillium expansum* ภายใต้อุณหภูมิ 0 °C เป็นเวลา 185.3 (เส้นสีส้ม) และ 163 (เส้นสีน้ำเงิน) ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 25 °C (ข) ความสัมพันธ์

ระหว่าง $\int_{T_{min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T

รูปที่ 16 แสดงเส้นโค้งการทำนายการงอกของสปอร์รา *P. expansum* ภายใต้อุณหภูมิ 0 °C (T_i) เป็นเวลา 185.3 (เส้นสีส้ม: t_{s1}) และ 163 (เส้นสีน้ำเงิน: t_{s2}) ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 25 °C (T_F) ทั้งสองกรณีนี้ $T_{b,min} < T_F < T_{b,max}$ ดังนั้น $f = 1$ และ $t_{a,p} = 0$ อีกทั้ง $T_{i,min} < T_F < T_{i,max}$ (รูปที่ 16 (ข)) ทำให้อัตราการงอกตลอดสปอร์เฉลี่ยหรือค่า μ' ไม่ถูกรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (อธิบายในหัวข้อ 2.3.1) ด้วยเหตุนี้ ทำให้ทั้งสองกรณีมีค่า $k = 1$ และ $\mu_1' = \mu_2' = \mu(T_F) = 33.78 \% \cdot h^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของการคำนวณค่า τ' เนื่องจาก $t_{s1} > t_1^*$ และ $t_{s2} > t_2^*$ ทำให้ $t_{r1} = t_{r2} = 0$ h ดังนั้น $\tau_1' = t_{s1} + t_{a,s1}$ และ $\tau_2' = t_{s2} + t_{a,s2}$ ตามลำดับ และเนื่องจากทั้งสองกรณีมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เท่ากัน ทำให้ $t_{a,s1} = t_{a,s2}$ จากรูปที่ 16 (ค) และสมการที่ (31) จะได้ว่า $n = 0.79$ ทำให้ $t_n(T_F) = 8.47$ h (รูปที่ 12) และ $t_{a,s1} = t_{a,s2} = 0.93$ h (สมการที่ (24)) ดังนั้น $\tau_1' = 185.3 + 0.93$ h = 186.23 h และ $\tau_2' = 163 + 0.93$ h = 163.93 h จากนั้น ค่า μ_1' , μ_2' , τ_1' และ τ_2' ที่คำนวณได้ จะถูกนำไปแทนค่าในสมการที่ (15) เส้นโค้งจากการทำนายในรูปที่ 16 (ก) และผลความแม่นยำในการทำนายที่แสดงในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ให้ค่า $R^2 = 0.9769$ และ RMSE = 6.19 สำหรับผลการทำนายกรณีที่ 1 (เส้นสีส้ม) และ $R^2 = 0.9296$ และ RMSE = 11.62 สำหรับผลการทำนายกรณีที่ 2 (เส้นสีน้ำเงิน) ส่วนแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis สมการที่ (27) – (28) ให้ค่า $R^2 = -0.0849$ และ RMSE = 39.64 สำหรับผลการทำนายกรณีที่ 1 (เส้นสีส้ม) และ $R^2 = 0.3451$ และ RMSE = 32.19 สำหรับผลการทำนายกรณีที่ 2 (เส้นสีน้ำเงิน) ซึ่งแสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถทำนายได้แม่นยำกว่าแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis



รูปที่ 17 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา *Penicillium expansum* ภายใต้อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 9 ชั่วโมง แล้วอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 10 °C เป็นเวลาอีก 3.5 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนกลับเป็น 25 °C อีกครั้ง จนกระทั่งการงอกสมบูรณ์ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T

รูปที่ 17 แสดงเส้นโค้งการทำนายการงอกของสปอร์รา *P. expansum* ภายใต้อุณหภูมิ 25 °C (T_i) เป็นเวลา 9 ชั่วโมง (t_{s1}) แล้วอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 10 °C (T_f) เป็นเวลาอีก 3.5 ชั่วโมง (t_{s2}) จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนกลับเป็น 25 °C (T_i) อีกครั้ง จนกระทั่งการงอกสมบูรณ์ การเปลี่ยนอุณหภูมิลับไปมาเช่นนี้มีความน่าสนใจอย่างมาก เนื่องจาก มีลักษณะใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในสถานการณ์จริง ดังนั้น หากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายการงอกภายใต้ความผันผวนของอุณหภูมิเช่นนี้ได้อย่างแม่นยำ จะทำให้สามารถยืนยันได้ว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้ในสถานการณ์จริง จากรูปที่ 17 การเปลี่ยนอุณหภูมิในครั้งแรกจาก 25 °C (T_i) เป็น 10 °C (T_f) ในครั้งนี้ $T_{b,\min} < T_f < T_{b,\max}$ ดังนั้น $f_1 = 1$ และ $t_{a,p1} = 0$ แต่ $T_f < T_{1i,\min}$ (รูปที่ 17 (ข)) ดังนั้น จากสมการที่ (18) จึงคำนวณได้ว่า $k_1 = 0.83$ และจากสมการที่ (17) จะได้ว่า $\underline{\mu_1'} = (0.83) \cdot \mu(T_f) = (0.33)(10.80) = 8.96 \% \cdot \text{h}^{-1}$ ส่วนค่า τ_1' จากสมการที่ (22) ระบุไว้ว่า หาก $t_{s1} > t^*$ แล้ว $t_{r1} = 0$ ดังนั้น $\tau_1' = t_{s1} + t_{a,s1}$ จากรูปที่ 17 (ค) $n_1 = 1.50$ ทำให้ $t_{n1}(T_f) = 24.42$ h (รูปที่ 12) และ $t_{a,s1} = 2.73$ h (สมการที่ (24)) ดังนั้น $\underline{\tau_1'} = 9 + 2.73$ h = 11.73 h

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการเปลี่ยนอุณหภูมิในครั้งที่สองจาก $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_F) กลับเป็น $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_i) ในครั้งนี้ $T_{b,\min} < T_i < T_{b,\max}$ ดังนั้น $f_2 = 1$ และ $t_{a,p2} = 0$ และ $T_{2i,\min} < T_i < T_{2i,\max}$ (รูปที่ 17 (ข)) ดังนั้น จากสมการที่ (18) จึงได้ว่า $k_2 = 1$ และจากสมการที่ (17) จะได้ว่า $\mu_1' = \mu(T_i) = 33.78\% \cdot \text{h}^{-1}$ ส่วน ค่า τ_2' จากสมการที่ (22) ระบุไว้ว่า หาก $t_{s2} > t^*$ แล้ว $t_{r2} = 0$ ดังนั้น $\tau_2' = t_{s2} + t_{a,s2}$ จากรูปที่ 17 (ค) $n_2 = 0.69$ ทำให้ $t_{n2}(T_F) = 8.37\text{ h}$ (รูปที่ 12) และ $t_{a,s2} = 0.71\text{ h}$ (สมการที่ (24)) ดังนั้น $\tau_2' = 12.5 + 0.71\text{ h} = 13.21\text{ h}$

จากนั้น ค่า μ_1' , μ_2' , τ_1' และ τ_2' ที่คำนวณได้ จะถูกนำไปแทนค่าในสมการที่ (15) เส้นโค้งจากการทำนายในรูปที่ 17 (ก) และผลความแม่นยำในการทำนายที่แสดงในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ($R^2 = 0.8949$ และ $\text{RMSE} = 11.85$) สามารถทำนายได้แม่นยำเทียบเท่าแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis สมการที่ (27) – (28) ($R^2 = 0.9146$ และ $\text{RMSE} = 10.85$)

จากรูปที่ 14 – 17 เป็นการทำการทำนายการงอกของสปอร์รา *P. expansum* ภายใต้สภาวะแบบพลวัตที่ผลของความเครียดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความแตกต่างของระยะการเติบโตของสปอร์ในช่วงที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ไม่ส่งผลกระทบต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสังเกตได้จาก ค่าตัวแปร k ที่เข้าใกล้ 1 และ $t_{a,s}$ ที่ส่งผลกระทบต่อการปรับแก้ค่า τ' น้อยกว่า 25% รวมถึงค่าตัวแปร f และ $t_{a,p}$ ที่มีค่าเป็น 0 ซึ่งการงอกของสปอร์ราที่สภาวะเช่นนี้ สอดคล้องกับสมมติฐานของแบบจำลองเดิมที่พัฒนาโดย Gougouli และ Koutsoumanis (สมการที่ (27) – (28)) ทำให้ผลการทำนายส่วนใหญ่ (รูปที่ 14 15 และ 17) แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ (สมการที่ (15)) และแบบจำลองเดิมที่พัฒนาโดย Gougouli และ Koutsoumanis (สมการที่ (27) – (28)) สามารถทำการทำนายการงอกของสปอร์รา *P. expansum* ได้แม่นยำใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม ผลการทำนายด้วยแบบจำลองเดิมในรูปที่ 16 ให้ผลลัพธ์ที่คลาดเคลื่อนจากค่าความเป็นจริงมากพอสมควร ซึ่งเป็นผลมาจาก แบบจำลองเดิมคำนวณค่าตัวแปรจลนศาสตร์ในช่วงก่อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (μ และ λ) คลาดเคลื่อนไปจากค่าความเป็นจริง ซึ่งสังเกตได้ชัดเจนจากรูปที่ 16 ที่แสดงให้เห็นว่า ในช่วงเวลาก่อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ มีสปอร์บางส่วนงอกหลุดสปอร์แล้ว แต่ผลการทำนายด้วยแบบจำลองเดิม (เส้นประ) กลับทำนายว่ายังไม่มีสปอร์ที่งอกหลุดสปอร์

2) สปอร์รา *A. niger*

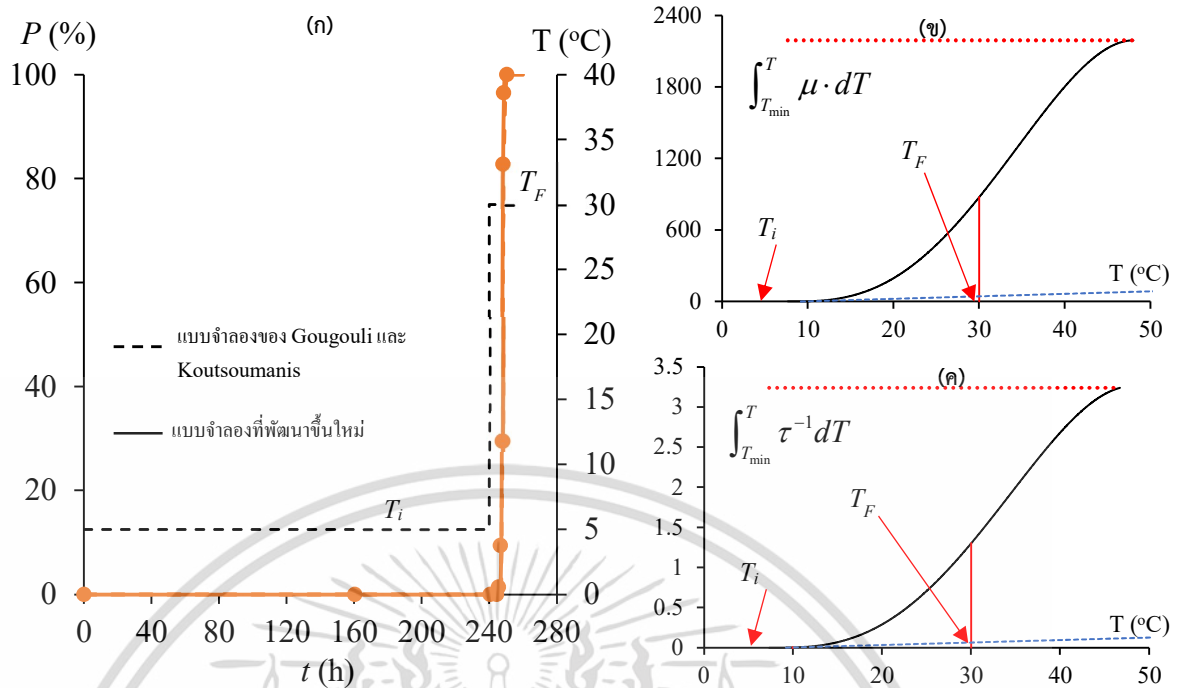
ตารางที่ 4 ค่าตัวแปรจลนศาสตร์และค่าทางสถิติจากการทำนายการงอกสปอร์รา *Aspergillus niger* ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัตด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้และแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis ในกรณีที่ k , $t_{a,s}$, f และ $t_{a,p}$ ไม่ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ

รูป	แบบจำลอง	สถานการณ์	ตัวแปรจลนศาสตร์		R ²	RMSE
รูปที่ 18	แบบจำลอง A ^a	5 °C → 240 h → 30 °C	$\mu = 0 \% \cdot h^{-1}$	$\tau = \infty$ h	0.9965	2.49
		30 °C → ∞	$\mu' = 89.28 \% \cdot h^{-1}$	$\tau' = 247.69$ h		
	แบบจำลอง B ^b	5 °C → 240 h → 30 °C	$\mu = 0 \% \cdot h^{-1}$	$\lambda = \infty$ h	0.9543	8.20
		30 °C → ∞	$\mu' = 71.07 \% \cdot h^{-1}$	$\lambda' = 247.18$ h		
รูปที่ 19	แบบจำลอง A ^a	10 °C → 72 h → 30 °C	$\mu = 2.09 \% \cdot h^{-1}$	$\tau = 301.31$ h	0.9598	9.28
		30 °C → ∞	$\mu' = 89.28 \% \cdot h^{-1}$	$\tau' = 78.00$ h		
	แบบจำลอง B ^b	10 °C → 72 h → 30 °C	$\mu = 1.14 \% \cdot h^{-1}$	$\lambda = 107.12$ h	0.3506	41.43
		30 °C → ∞	$\mu' = 71.07 \% \cdot h^{-1}$	$\lambda' = 74.35$ h		
รูปที่ 20	แบบจำลอง A ^a	15 °C → 12 h → 35 °C	$\mu = 17.82 \% \cdot h^{-1}$	$\tau = 40.81$ h	0.9261	10.51
		35 °C → ∞	$\mu' = 96.29 \% \cdot h^{-1}$	$\tau' = 17.11$ h		
	แบบจำลอง B ^b	15 °C → 12 h → 35 °C	$\mu = 15.56 \% \cdot h^{-1}$	$\lambda = 32.89$ h	0.7791	18.51
		35 °C → ∞	$\mu' = 57.08 \% \cdot h^{-1}$	$\lambda' = 15.80$ h		
	แบบจำลอง A ^a	15 °C → 30.8 h → 35 °C	$\mu = 17.82 \% \cdot h^{-1}$	$\tau = 40.81$ h	0.8790	15.73
		35 °C → ∞	$\mu' = 96.29 \% \cdot h^{-1}$	$\tau' = 32.70$ h		
แบบจำลอง B ^b	15 °C → 30.8 h → 35 °C	$\mu = 15.56 \% \cdot h^{-1}$	$\lambda = 32.89$ h	0.9321	11.19	
	35 °C → ∞	$\mu' = 57.08 \% \cdot h^{-1}$	$\lambda' = 31.18$ h			

^a แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ สมการที่ (15) – (26)

^b แบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis สมการที่ (27) – (28)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

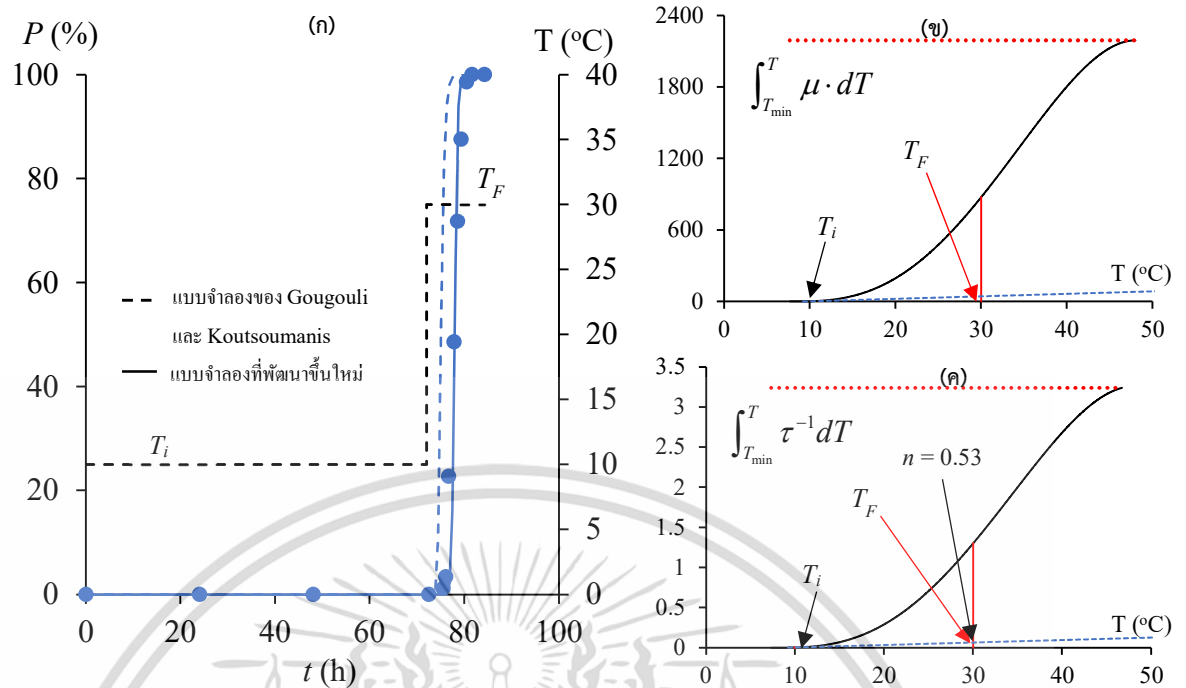


รูปที่ 18 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา *Aspergillus niger* ภายใต้อุณหภูมิ 10 °C เป็นเวลา 240 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 30 °C (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T

รูปที่ 18 แสดงเส้นโค้งการทำนายการงอกของสปอร์รา *A. niger* ภายใต้อุณหภูมิ 5 °C (T_i) เป็นเวลา 240 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 30 °C (T_F) ซึ่งในกรณีนี้ $T_{b,min} < T_F < T_{b,max}$ ดังนั้น $f = 1$ และ $t_{a,p} = 0$ h อีกทั้ง ในรูปที่ 18 (ข) ยังแสดงให้เห็นว่า $T_{i,min} < T_F < T_{i,max}$ ดังนั้น $k = 1$ (สมการที่ (18)) ซึ่งทำให้ $\mu' = \mu(T_F) = 89.28 \% \cdot h^{-1}$

ในส่วนของการคำนวณค่า τ' ในกรณีนี้ เนื่องจากอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 5 °C เป็นอุณหภูมิที่อยู่นอกขอบเขตการงอกของสปอร์รา *A. niger* จึงถือได้ว่า การเปลี่ยนอุณหภูมิในกรณีนี้ไม่ส่งผลต่อตัวแปรจลนศาสตร์การงอกของสปอร์ ดังนั้น $\tau' = t_s + \tau(T_F) = 240 + 7.69 \text{ h} = 247.69 \text{ h}$ จากนั้น ค่า μ' และ τ' ที่คำนวณได้ จะถูกนำไปแทนค่าในสมการที่ (15) เส้นโค้งจากการทำนายในรูปที่ 18 (ก) และผลความแม่นยำในการทำนายที่แสดงในตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ($R^2 = 0.9965$ และ $RMSE = 2.49$) สามารถทำนายได้แม่นยำกว่าแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis สมการที่ (27) – (28) ($R^2 = 0.9543$ และ $RMSE = 8.20$)

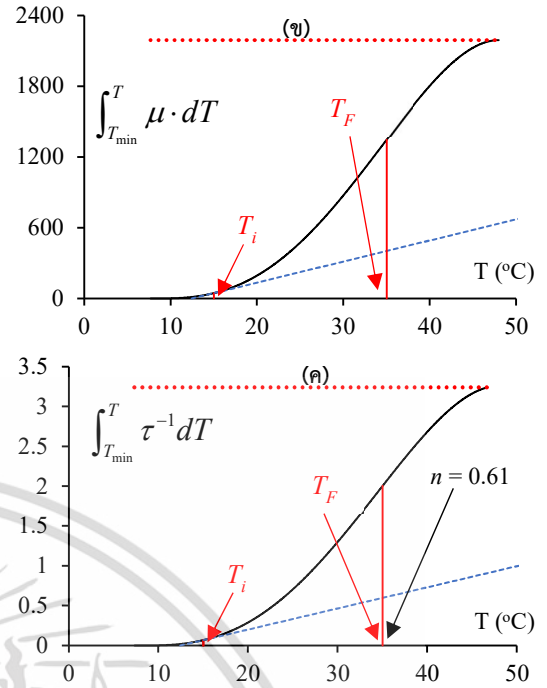
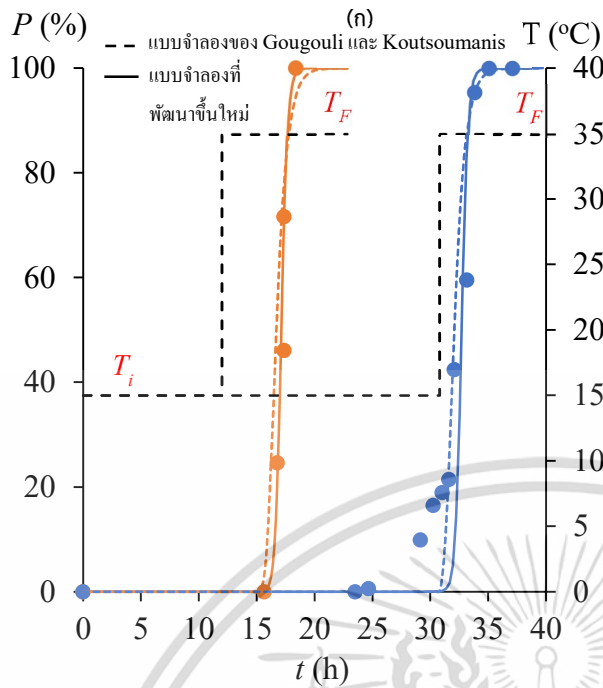
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 19 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา *Aspergillus niger* ภายใต้อุณหภูมิ 10 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 30 °C (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T

รูปที่ 19 แสดงเส้นโค้งการทำนายการงอกของสปอร์รา *A. niger* ภายใต้อุณหภูมิ 10 °C (T_i) เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 30 °C (T_F) ในกรณีนี้ $T_{b,\min} < T_F < T_{b,\max}$ ดังนั้น $f = 1$ และ $t_{a,p} = 0$ h อีกทั้ง ในรูปที่ 19 (ข) แสดงให้เห็นว่า $T_{i,\min} < T_F < T_{i,\max}$ ดังนั้น $k = 1$ (สมการที่ (18)) ซึ่งทำให้ $\mu' = \mu(T_F) = 89.28 \% \cdot \text{h}^{-1}$

ในส่วนของการคำนวณค่า τ' เนื่องจาก $t_s < t^*$ ทำให้ $t_r \neq 0$ h ดังนั้น $\tau' = t_s + t_{a,s} + t_r$ และจากสมการที่ (22) ทำให้ทราบว่า $t_r = 5.85$ h นอกจากนี้ จากรูปที่ 19 (ค) แสดงให้เห็นว่า $n = 0.53$ ทำให้ $t_n(T_F) = 7.39$ h (รูปที่ 13) และ $t_{a,s} = 0.15$ h ดังนั้น $\tau' = 72 + 5.85 + 0.15 \text{ h} = 78.00 \text{ h}$ จากนั้น ค่า μ' และ τ' ที่คำนวณได้ จะถูกนำไปแทนค่าในสมการที่ (15) เส้นโค้งจากการทำนายในรูปที่ 19 (ก) และผลความแม่นยำในการทำนายที่แสดงในตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ($R^2 = 0.9598$ และ $\text{RMSE} = 9.28$) สามารถทำนายได้ดีกว่าแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis ($R^2 = 0.3506$ และ $\text{RMSE} = 41.43$) อย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 20 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา *Aspergillus niger* ภายใต้อุณหภูมิ 15 °C เป็นเวลา 30.8 ชั่วโมง (เส้นสีน้ำเงิน) และ 12 ชั่วโมง (เส้นสีส้ม) จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 35 °C (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T

รูปที่ 20 แสดงเส้นโค้งการทำนายการงอกของสปอร์รา *A. niger* ภายใต้อุณหภูมิ 15 °C (T_i) เป็นเวลา 30.8 ชั่วโมง (เส้นสีน้ำเงิน: t_{s1}) และ 12 ชั่วโมง (เส้นสีส้ม: t_{s2}) จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 35 °C (T_F) ทั้งสองกรณีนี้ $T_{b,min} < T_F < T_{b,max}$ ดังนั้น จึงไม่มีอิทธิพลของความแตกต่างของระยะเวลาการเติบโตของสปอร์มารบกวนการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์ ($f_1 = f_2 = 1$ และ $t_{a,p1} = t_{a,p2} = 0$ h) และในรูปที่ 20 (ข) แสดงให้เห็นว่า $T_{i,min} < T_F < T_{i,max}$ ดังนั้น $k_1 = k_2 = 1$ (สมการที่ (18)) ซึ่งทำให้ $\mu_1' = \mu_2' = \mu(T_F) = 96.29 \% \cdot h^{-1}$

จากรูปที่ 20 (ก) แสดงให้เห็นว่า ขณะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ $t_{s1} < t_1^*$ และ $t_{s2} < t_2^*$ ดังนั้น $\tau_1' = t_{s1} + t_{a,s1} + t_{r1}$ และ $\tau_2' = t_{s2} + t_{a,s2} + t_{r2}$ ตามลำดับ จากสมการที่ (22) ทำให้ทราบว่า $t_{r1} = 1.71$ h และ $t_{r2} = 4.92$ h นอกจากนี้ จากรูปที่ 20 (ค) แสดงให้เห็นว่า $n = 0.61$ ทำให้ $t_n(T_F) = 6.66$ h (รูปที่ 13) และเนื่องจากทั้งสองกรณีนี้ มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เท่ากัน ดังนั้น $t_{a,s1} = t_{a,s2} = 0.19$ h ซึ่งทำให้ $\tau_1' = 30.8 + 0.19 + 1.71$ h = 32.70 h และ $\tau_2' = 12 + 0.19 + 4.92$ h = 17.11 h ตามลำดับ จากนั้น ค่า $\mu_1' \mu_2' \tau_1'$ และ τ_2' ที่คำนวณได้ จะถูกนำไปแทนค่าในสมการที่ (15) เส้นโค้งจากการทำนายในรูปที่ 20 (ก) และผลความแม่นยำในการทำนายที่แสดงใน

ตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่า ในกรณีแรก (เส้นสีน้ำเงิน) แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ($R^2 =$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.9261 และ RMSE = 10.51) สามารถทำนายการงอกของสปอร์ราได้ดีกว่าแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis ($R^2 = 0.7791$ และ RMSE = 18.51) ส่วนในกรณีที่สอง (เส้นสีส้ม) แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ($R^2 = 0.8790$ และ RMSE = 15.73) สามารถทำนายการงอกของสปอร์ราได้ใกล้เคียงกับแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis ($R^2 = 0.9321$ และ RMSE = 11.19)

จากรูปที่ 18 – 20 เป็นการทำนายการงอกของสปอร์รา *A. niger* ภายใต้สภาวะแบบพลวัตที่ผลของความเครียดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความแตกต่างของระยะการเติบโตของสปอร์ในช่วงที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ไม่ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการงอกของสปอร์ราที่สภาวะเช่นนี้ สอดคล้องกับสมมติฐานของแบบจำลองเดิมที่พัฒนาโดย Gougouli และ Koutsoumanis (สมการที่ (27) – (28)) ทำให้ผลการทำนายในรูปที่ 18 และ 20 ด้วยแบบจำลองเดิมและแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ (สมการที่ (15)) ให้ผลลัพธ์การทำนายการงอกของสปอร์รา *A. niger* ได้แม่นยำใกล้เคียงกัน ส่วนผลการทำนายด้วยแบบจำลองเดิมในรูปที่ 19 ให้ผลลัพธ์ที่คลาดเคลื่อนจากค่าความเป็นจริงมากพอสมควร เนื่องจาก แบบจำลองเดิมคำนวณค่าเวลาที่สปอร์จะใช้เพื่องอกตลอดสปอร์หลังเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (λ) คลาดเคลื่อนไปจากค่าความเป็นจริง ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 19 ที่แสดงให้เห็นได้ว่า หลังเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เส้นกราฟจากแบบจำลองเดิม (เส้นประ) ทำนายว่าสปอร์ราเติบโตได้เร็วกว่าผลลัพธ์จากการทดลอง

4.2.2 กรณีที่ k และ $t_{a,s}$ ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์ แต่ f และ $t_{a,p}$ ไม่ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ

1) สปอร์รา *P. expansum*

ตารางที่ 5 ค่าตัวแปรจลนศาสตร์และค่าทางสถิติจากการทำนายการงอกสปอร์รา *Penicillium expansum* ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัตด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้และแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis ในกรณีที่ k และ $t_{a,s}$ ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์ แต่ f และ $t_{a,p}$ ไม่ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ

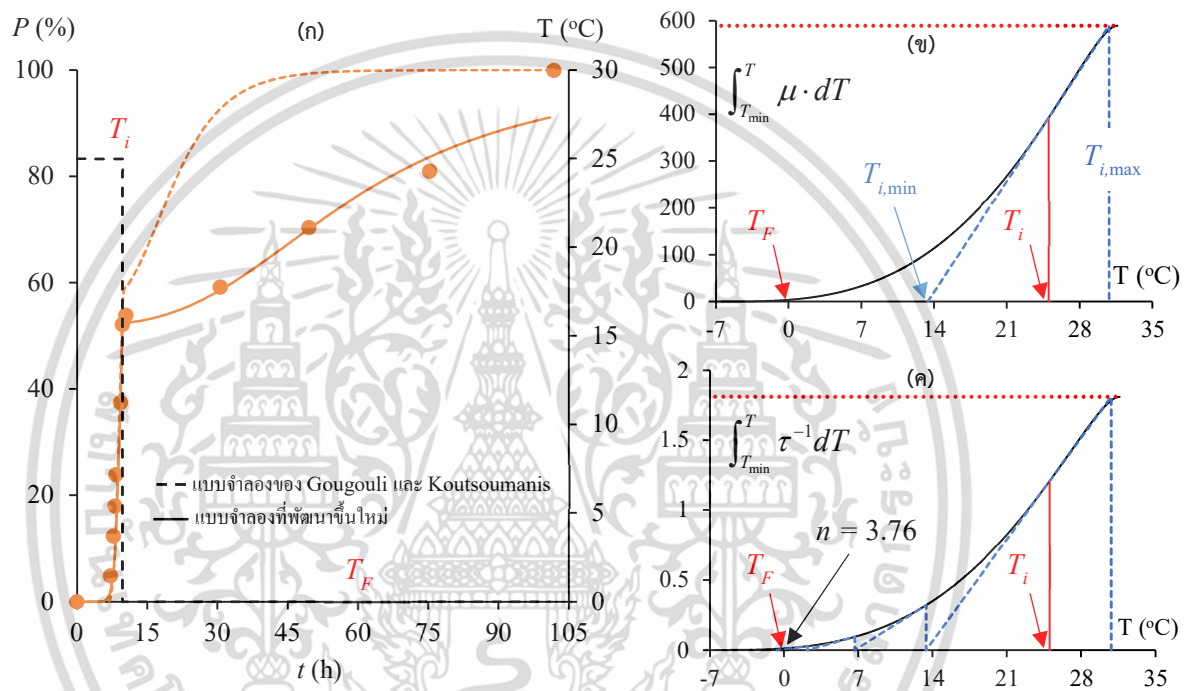
รูป	แบบจำลอง	สถานการณ์	ตัวแปรจลนศาสตร์	R^2	RMSE
รูปที่ 21	แบบจำลอง A ^a	25 °C → 9.7 h → 0 °C	$\mu = 33.78 \% \cdot h^{-1}$ $\tau = 9.64$ h	0.9725	5.26
		0 °C → ∞	$\mu' = 0.56 \% \cdot h^{-1}$ $\tau' = 59.37$ h		
	แบบจำลอง B ^b	25 °C → 9.7 h → 0 °C	$\mu = 31.77 \% \cdot h^{-1}$ $\lambda = 7.94$ h	0.8661	14.82
		0 °C → ∞	$\mu' = 2.15 \% \cdot h^{-1}$ $\lambda' = 9.70$ h		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 22	แบบจำลอง A ^a	25 °C → 3 h → 1 °C	$\mu = 33.78 \% \cdot h^{-1}$	$\tau = 9.64$ h	0.9696	7.18
		1 °C → ∞	$\mu' = 2.28 \% \cdot h^{-1}$	$\tau' = 135.15$ h		
แบบจำลอง B ^b	25 °C → 3 h → 1 °C		$\mu = 31.77 \% \cdot h^{-1}$	$\lambda = 7.94$ h	0.8785	15.86
		1 °C → ∞	$\mu' = 2.81 \% \cdot h^{-1}$	$\lambda' = 98.63$ h		

^a แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ สมการที่ (15) – (26)

^b แบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis สมการที่ (27) – (28)



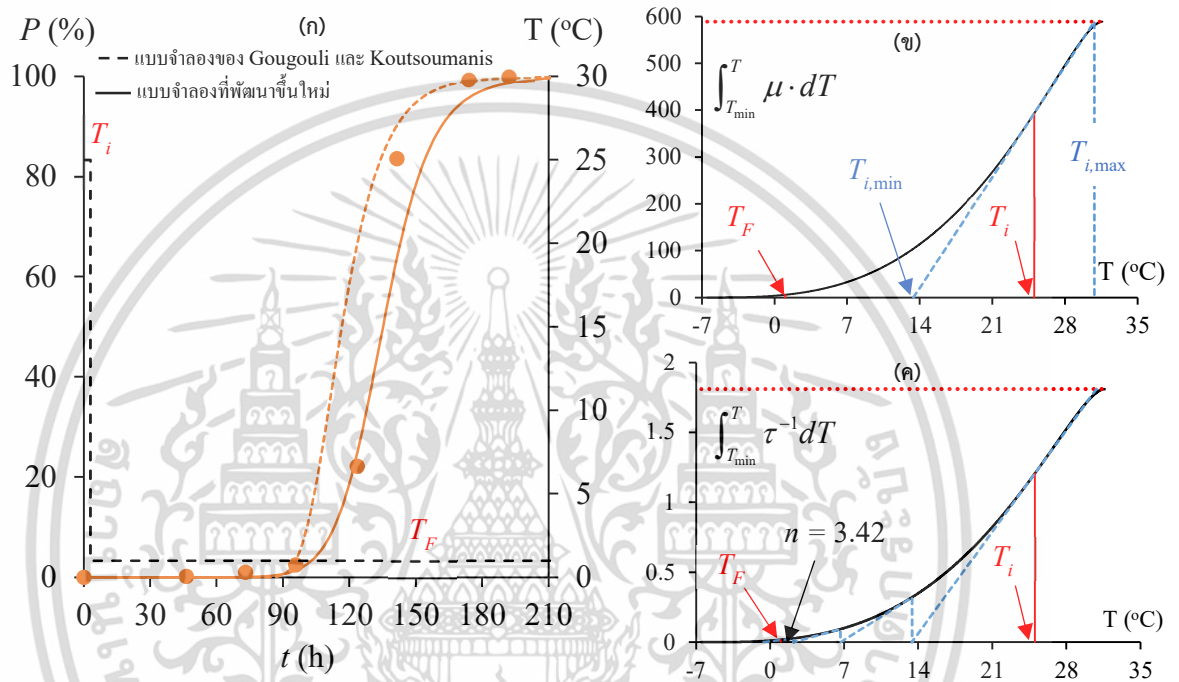
รูปที่ 21 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา *Penicillium expansum* ภายใต้อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 9.7 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 0 °C (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T

รูปที่ 21 แสดงเส้นโค้งการทำนายการงอกของสปอร์รา *P. expansum* ภายใต้อุณหภูมิ 25 °C (T_i) เป็นเวลา 9.7 ชั่วโมง (t_s) จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 0 °C (T_F) ในกรณีนี้ แม้ว่า $T_F < T_{b,min}$ แต่ช่วงเวลาที่เปลี่ยนอุณหภูมิ สปอร์ทุกตัวในระบบอยู่ในระยะที่งอกหมดสปอร์แล้ว ($t_s > \tau$) ดังนั้น $f = 1$ และ $t_{a,p} = 0$ ส่วนอิทธิพลของความเครียดของสปอร์อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิยังส่งผลต่อตัวแปรจลนศาสตร์ เนื่องจาก $T_F < T_{i,min}$ (รูปที่ 21 (ข)) ดังนั้นสมการที่ (18) จึงคำนวณได้ว่า $k = 0.33$ และสมการที่ (17) คำนวณได้ว่า $\mu' = (0.33) \cdot \mu(T_F) = (0.33)(1.72) = 0.56 \% \cdot h^{-1}$ ในส่วนของการคำนวณค่า τ' สมการที่ (22) ระบุไว้ว่า หาก $t_s > t^*$ แล้ว

$t_r = 0$ ดังนั้น $\tau' = t_s + t_{a,s}$ จากรูปที่ 21 (ค) $n = 3.76$ ทำให้ $t_n(T_F) = 127.20$ h (รูปที่ 12) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$t_{a,s} = 49.67 \text{ h}$ (สมการที่ (24)) ดังนั้น $\tau' = 9.7 + 49.67 \text{ h} = 59.37 \text{ h}$ จากนั้น ค่า μ' และ τ' ที่คำนวณได้ จะถูกนำไปแทนค่าในสมการที่ (15) เส้นโค้งจากการทำนายในรูปที่ 21 (ก) และผลความแม่นยำในการทำนายที่แสดงในตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ($R^2 = 0.9725$ และ $RMSE = 5.26$) สามารถทำนายได้แม่นยำกว่าแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis ($R^2 = 0.8661$ และ $RMSE = 14.82$) อย่างชัดเจน



รูปที่ 22 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา *Penicillium expansum* ภายใต้อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 1 °C (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T

รูปที่ 22 แสดงเส้นโค้งการทำนายการงอกของสปอร์รา *P. expansum* ภายใต้อุณหภูมิ 25 °C (T_i) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (t_s) จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 1 °C (T_F) ในกรณีนี้ แม้ว่า $T_F < T_{b,min}$ แต่ $t_s < t^*$ ดังนั้น $f = 1$ และ $t_{a,p} = 0$ และแม้ว่า $T_F < T_{i,min}$ (รูปที่ 22 (ข)) อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่สปอร์ทุกตัวในระบบยังอยู่ในระยะบวม ($t_s < t^*$) ทำให้อัตราการงอกตลอดสปอร์เฉลี่ยหรือค่า μ' ไม่ถูกรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (อธิบายในหัวข้อ 2.3.1) ด้วยเหตุนี้ ทำให้ $k = 1$ และ $\mu' = \mu(T_F) = 2.28 \% \cdot h^{-1}$ แต่ผลของความเครียดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมียังส่งผลต่อตัวแปร τ'

ในส่วนของการคำนวณค่า τ' เนื่องจาก $t_s < t^*$ ทำให้ $\tau' = t_s + t_{a,s} + t_r$ จากสมการที่ (22) จะได้ว่า $t_r = 98.34$ h และจากรูปที่ 22 (ค) $n = 3.42$ ทำให้ $t_n(T_F) = 98.40$ h (รูปที่ 12) และ $t_{a,s} = 33.81$ h (สมการที่ (24)) ดังนั้น $\tau' = 3 + 33.81 + 98.34$ h = **135.15 h** จากนั้น ค่า μ' และ τ' ที่คำนวณได้ จะถูกนำไปแทนค่าในสมการที่ (15) ผลความแม่นยำในการทำนายที่แสดงในตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ($R^2 = 0.9696$ และ $RMSE = 7.18$) สามารถทำนายได้แม่นยำกว่าแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis ($R^2 = 0.8785$ และ $RMSE = 15.86$) หากพิจารณาเฉพาะเส้นโค้งในรูปที่ 22 (ก) จะพบว่า แบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis ทำนายช่วงที่ $P \rightarrow 100\%$ ได้เหมาะสมกว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ในขณะที่แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นทำนาย P ช่วงอื่นๆ ได้เหมาะสมกว่า

รูปที่ 21 และ 22 เป็นการทำนายการงอกของสปอร์รา *P. expansum* ภายใต้สภาวะแบบพลวัตที่ผลของความเครียดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์ ($k < 0.8$ หรือ $t_{a,s}$ ที่ส่งผลต่อการปรับแก้ค่า τ' มากกว่า 25%) แต่ไม่มีผลของความแตกต่างของระยะเวลาเติบโตของสปอร์ในช่วงที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์ ($f_2 = 1$ และ $t_{a,p2} = 0$) ซึ่งเงื่อนไขนี้ไม่มีอยู่ในสมมติฐานของแบบจำลองเดิมที่พัฒนาโดย Gougouli และ Koutsoumanis ในปี 2012 (สมการที่ (27) – (28)) ทำให้แบบจำลองเดิมไม่สามารถทำนายการงอกของสปอร์รา *P. expansum* ในรูปที่ 21 – 22 ได้แม่นยำเทียบเท่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้

2) สปอร์รา *A. niger*

ตารางที่ 6 ค่าตัวแปรจลนศาสตร์และค่าทางสถิติจากการทำนายการงอกสปอร์รา *Aspergillus niger* ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัตด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้และแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis ในกรณีที่ k และ $t_{a,s}$ ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์ แต่ f และ $t_{a,p}$ ไม่ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ

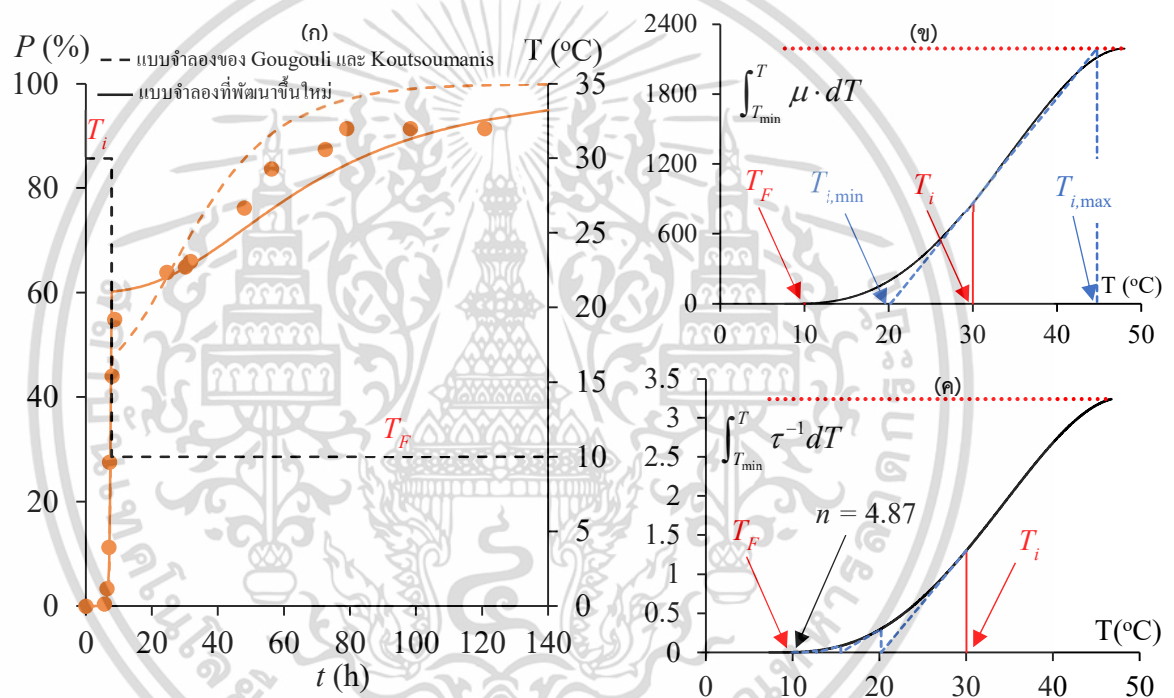
รูป	แบบจำลอง	สถานการณ์	ตัวแปรจลนศาสตร์	R^2	RMSE
รูปที่ 23	แบบจำลอง A ^a	30 °C → 7.8 h → 10 °C	$\mu = 89.28 \% \cdot h^{-1}$ $\tau = 7.69$ h	0.9660	6.20
		10 °C → ∞	$\mu' = 0.39 \% \cdot h^{-1}$ $\tau' = 66.01$ h		
	แบบจำลอง B ^b	30 °C → 7.8 h → 10 °C	$\mu = 71.07 \% \cdot h^{-1}$ $\lambda = 7.18$ h	0.9614	7.66
		10 °C → ∞	$\mu' = 1.14 \% \cdot h^{-1}$ $\lambda' = 7.80$ h		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 24	แบบจำลอง A ^a	30 °C → 7.8 h → 10 °C	$\mu = 89.28 \% \cdot h^{-1}$	$\tau = 7.69$ h	0.9699	6.56
		10 °C → 18.2 h → 30 °C	$\mu' = 0.39 \% \cdot h^{-1}$	$\tau' = 66.01$ h		
		30 °C → ∞	$\mu' = 89.28 \% \cdot h^{-1}$	$\tau' = 26.16$ h		
แบบจำลอง B ^b	30 °C → 7.8 h → 10 °C	$\mu = 71.07 \% \cdot h^{-1}$	$\lambda = 7.18$ h	0.9658	6.95	
		10 °C → 18.2 h → 30 °C	$\mu' = 1.14 \% \cdot h^{-1}$			$\lambda' = 7.80$ h
		30 °C → ∞	$\mu' = 71.07 \% \cdot h^{-1}$			$\lambda' = 26.00$ h

^a แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ สมการที่ (15) – (26)

^b แบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis สมการที่ (27) – (28)



รูปที่ 23 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา *Aspergillus niger* ภายใต้อุณหภูมิ 30 °C เป็น 7.8 ชั่วโมง

จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 10 °C (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ

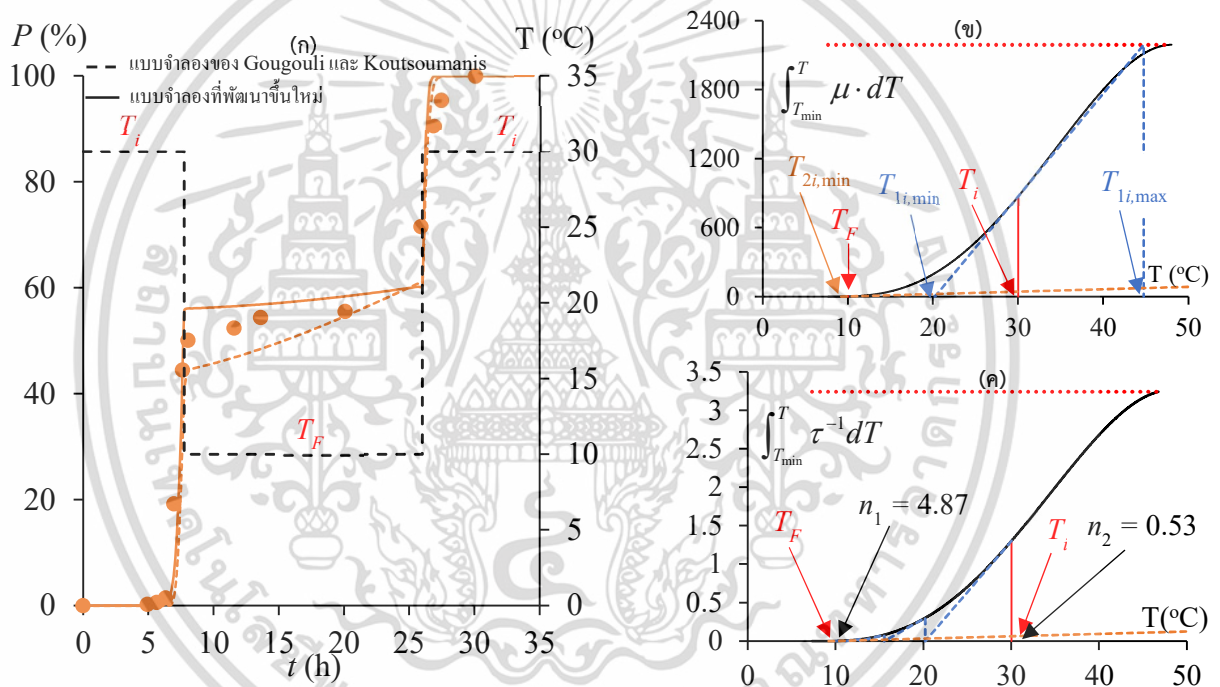
(ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T

รูปที่ 23 แสดงเส้นโค้งการทำนายการงอกของสปอร์รา *A. niger* ภายใต้อุณหภูมิ 30 °C (T_i) 7.8 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 10 °C (T_F) ในกรณีนี้ $T_F < T_{b,min}$ แต่ $t_s > \tau(T_i)$ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ $f = 1$ และ $t_{a,p} = 0$ h นอกจากนี้ จากรูป 23 (ข) $T_F < T_{i,min}$ ทำให้อัตราการงอกหมดสปอร์เฉลี่ยหรือค่า μ' ถูกרבกวนจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทำให้ $k = 0.19$ (สมการที่ (18)) และจาก

สมการที่ (17) จะได้ว่า $\mu' = (0.19)\mu(T_F) = (0.19)(2.09) = 0.39 \% \cdot h^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของการคำนวณค่า τ' เนื่องจาก $t_s > t^*$ ทำให้ $t_r = 0$ h ดังนั้น $\tau' = t_s + t_{a,s}$ และจากรูปที่ 23 (ค) จะได้ว่า $n = 4.87$ ทำให้ $t_m(T_F) = 235.28$ h (รูปที่ 13) และ $t_{a,s} = 58.21$ h (สมการที่ (24)) ดังนั้น $\tau' = 7.8 + 58.21$ h = **66.01 h** จากนั้น ค่า μ' และ τ' ที่คำนวณได้ จะถูกนำไปแทนค่าในสมการที่ (15) ผลความแม่นยำในการทำนายที่แสดงในตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ($R^2 = 0.9660$ และ $RMSE = 6.20$) และแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis สมการที่ (27) – (28) ($R^2 = 0.9614$ และ $RMSE = 7.66$) ให้ผลลัพธ์การทำนายที่ใกล้เคียงกัน แต่หากพิจารณาเส้นโค้งจากการทำนายในรูปที่ 23 (ก) จะเห็นว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ให้ผลลัพธ์ได้เหมาะสมกว่าแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis



รูปที่ 24 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา *Aspergillus niger* ภายใต้อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 7.8 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 10 °C เป็นเวลาอีก 18.2 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนกลับเป็น 30 °C จนกระทั่งการงอกสมบูรณ์ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T

รูปที่ 24 แสดงเส้นโค้งการทำนายการงอกของสปอร์รา *A. niger* ภายใต้อุณหภูมิ 30 °C (T_i) เป็นเวลา 7.8 ชั่วโมง (t_{s1}) จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 10 °C (T_F) เป็นเวลาอีก 18.2 ชั่วโมง (t_{s2}) จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนกลับเป็น 30 °C (T_i) จนกระทั่งการงอกสมบูรณ์ การเปลี่ยนอุณหภูมิในครั้งแรกจาก 30 °C (T_i) เป็น 10 °C (T_F) ในครั้งนี้ แม้ว่า $T_F < T_{b,\min}$ แต่ $t_{s1} > \tau(T_i)$ ดังนั้น จึงไม่มี

อิทธิพลของความแตกต่างของระยะเวลาเติบโตของสปอร์ต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์ ($f = 1$ และ $t_{a,p} = 0$)

รูปที่ 24 (ข) แสดงให้เห็นว่า $T_F < T_{1i,\min}$ ดังนั้น จึงคำนวณได้ว่า $k_1 = 0.19$ (สมการที่ (18)) และจากสมการที่ (17) จะได้ว่า $\mu_1' = (0.19) \cdot \mu(T_F) = (0.19)(2.09) = 0.39 \% \cdot h^{-1}$ ส่วนค่า τ_1' จากสมการที่ (22) ระบุไว้ว่า หาก $t_{s1} > t^*$ แล้ว $t_{r1} = 0$ ดังนั้น $\tau_1' = t_{s1} + t_{a,s1}$ จากรูปที่ 24 (ค) $n_1 = 4.87$ ทำให้ $t_{n1}(T_F) = 235.28 \text{ h}$ (รูปที่ 13) และ $t_{a,s1} = 58.21 \text{ h}$ (สมการที่ (24)) ดังนั้น $\tau_1' = 7.8 + 58.21 \text{ h} = 66.01 \text{ h}$

สำหรับการเปลี่ยนอุณหภูมิในครั้งที่สองจาก $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (T_F) กลับเป็น $30 \text{ }^\circ\text{C}$ (T_i) ในครั้งนี้ $T_{b,\min} < T_i < T_{b,\max}$ ดังนั้น จึงไม่มีอิทธิพลของความแตกต่างของระยะเวลาเติบโตของสปอร์มารบกวน การปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์ หรือ $f_2 = 1$ และ $t_{a,p2} = 0$ และ $T_{2i,\min} < T_i < T_{2i,\max}$ (รูปที่ 24 (ข)) ดังนั้น จากสมการที่ (18) จึงได้ว่า $k_2 = 1$ และจากสมการที่ (17) จะได้ว่า $\mu_2' = \mu(T_i) = 89.28 \% \cdot h^{-1}$ ส่วนค่า τ_2' จากสมการที่ (22) ระบุไว้ว่า หาก $t_{s2} > t^*$ แล้ว $t_{r2} = 0$ ดังนั้น $\tau_2' = t_{s2} + t_{a,s2}$ จากรูปที่ 24 (ค) $n_2 = 0.53$ ทำให้ $t_{n2}(T_F) = 7.39 \text{ h}$ (รูปที่ 13) และ $t_{a,s2} = 0.16 \text{ h}$ (สมการที่ (24)) ดังนั้น $\tau_2' = 26 + 0.16 \text{ h} = 26.16 \text{ h}$

จากนั้น ค่า μ_1' , μ_2' , τ_1' และ τ_2' ที่คำนวณได้ จะถูกนำไปแทนค่าในสมการที่ (15) เส้นโค้งจากการทำนายในรูปที่ 24 (ก) และผลความแม่นยำในการทำนายที่แสดงในตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ($R^2 = 0.9699$ และ $RMSE = 6.56$) สามารถทำนายได้แม่นยำเทียบเท่ากับแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis สมการที่ (27) – (28) ($R^2 = 0.9658$ และ $RMSE = 6.95$) ทุกช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

รูปที่ 23 และ 24 เป็นการทำนายการงอกของสปอร์รา *A. niger* ภายใต้สภาวะแบบพลวัตที่ผลของความเครียดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์ แต่ไม่มีผลของความแตกต่างของระยะเวลาเติบโตของสปอร์ในช่วงที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์ ($f_2 = 1$ และ $t_{a,p2} = 0$) แม้เงื่อนไขไม่มีอยู่ในสมมติฐานของแบบจำลองเดิมที่พัฒนาโดย Gougouli และ Koutsoumanis ในปี 2012 (สมการที่ (27) – (28)) อย่างไรก็ตาม ผลการทำนายของสปอร์รา *A. niger* ในรูปที่ 23 – 24 กลับให้ผลลัพธ์จากการทำนายการงอกของสปอร์ราได้แม่นยำใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ (สมการที่ (15)) ทั้งนี้ผู้วิจัยคาดว่า สปอร์ราสายพันธุ์นี้สามารถปรับตัวได้ดีในสภาวะแวดล้อมแบบพลวัต จนทำให้สามารถละทิ้งอิทธิพลของ

ความเครียดจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมที่มีต่อตัวแปรจลนศาสตร์ได้ อย่างไรก็ตาม จำเป็นจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสปอร์ราชนิดนี้ เพื่อหาข้อสรุปที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

4.2.3 กรณีที่ $k_{t,a,s,f}$ และ $t_{a,p}$ ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์

1) สปอร์รา *P. expansum*

ตารางที่ 7 ค่าตัวแปรจลนศาสตร์และค่าทางสถิติจากการทำนายการงอกสปอร์รา *Penicillium*

expansum ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัตด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้และ

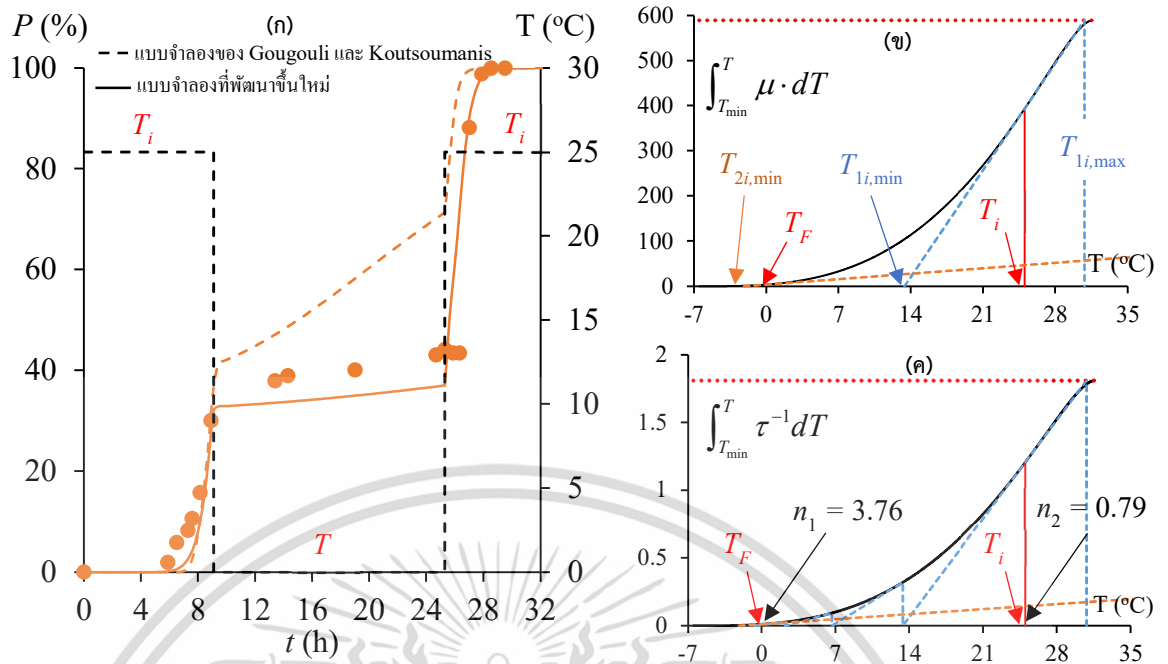
แบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis ในกรณีที่ $k_{t,a,s,f}$ และ $t_{a,p}$ ส่งผลต่อการปรับแก้

ค่าตัวแปรจลนศาสตร์

รูป	แบบจำลอง	สถานการณ์	ตัวแปรจลนศาสตร์	R^2	RMSE
รูปที่ 25	แบบจำลอง A ^a	25 °C → 9 h → 0 °C	$\mu = 33.78 \% \cdot h^{-1}$ $\tau = 9.64$ h	0.9401	8.72
		0 °C → 16.3 h → 25 °C	$\mu' = 0.33 \% \cdot h^{-1}$ $\tau' = 98.42$ h		
		25 °C → ∞	$\mu' = 33.78 \% \cdot h^{-1}$ $\tau' = 26.23$ h		
แบบจำลอง B ^b	แบบจำลอง B ^b	25 °C → 9 h → 0 °C	$\mu = 31.77 \% \cdot h^{-1}$ $\lambda = 7.94$ h	0.7845	18.78
		0 °C → 16.3 h → 25 °C	$\mu' = 2.15 \% \cdot h^{-1}$ $\lambda' = 9.00$ h		
		25 °C → ∞	$\mu' = 31.77 \% \cdot h^{-1}$ $\lambda' = 25.30$ h		

^a แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ สมการที่ (15) – (26)

^b แบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis สมการที่ (27) – (28)



รูปที่ 25 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา *Penicillium expansum* ภายใต้อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 0 °C เป็นเวลาอีก 16.3 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนกลับเป็น

25 °C จนกระทั่งการงอกสมบูรณ์ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ

(ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T

รูปที่ 25 แสดงเส้นโค้งการทำนายการงอกของสปอร์รา *P. expansum* ภายใต้อุณหภูมิ 25 °C (T_i) เป็นเวลา 9 ชั่วโมง (t_{s1}) แล้วอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 0 °C (T_F) เป็นเวลาอีก 16.3 ชั่วโมง (t_{s2}) จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนกลับเป็น 25 °C (T_i) อีกครั้ง จนกระทั่งการงอกสมบูรณ์ การเปลี่ยนอุณหภูมิในครั้งแรกจาก 25 °C (T_i) เป็น 0 °C (T_F) ในครั้งนี้ $T_F < T_{b,min}$ และ $t^* < t_{s1} < \tau(T_i)$ ดังนั้น จึงต้องมีการพิจารณาอิทธิพลของความแตกต่างของระยะการเติบโตของสปอร์ต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์ ($f \neq 1$ และ $t_{a,p} \neq 0$) จากสมการที่ (19) และ (25) จะได้ว่า $f_1 = 0.58$ และ $t_{a,p1} = 39.75$ h ตามลำดับ จากรูปที่ 25 (ข) และสมการที่ (18) จึงคำนวณได้ว่า $k_1 = 0.33$ และจากสมการที่ (17) จะได้ว่า $\mu_1' = (0.58) \cdot (0.33) \cdot \mu(T_F) = (0.58)(0.33)(1.72) = 0.33 \% \cdot h^{-1}$ ส่วนค่า τ_1' จากสมการที่ (22) ระบุไว้ว่า หาก $t_{s1} > t^*$ แล้ว $t_{r1} = 0$ ดังนั้น $\tau_1' = t_{s1} + t_{a,s1} + t_{a,p1}$ จากรูปที่ 25 (ค) $n_1 = 3.76$ ทำให้ $t_{n1}(T_F) = 127.20$ h (รูปที่ 12) และ $t_{a,s1} = 49.67$ h (สมการที่ (24)) ดังนั้น $\tau_1' = 9 + 49.67 + 39.75$ h = 98.42 h

สำหรับการเปลี่ยนอุณหภูมิในครั้งที่สองจาก 0 °C (T_F) กลับเป็น 25 °C (T_i) ในครั้งนี้

$T_{b,min} < T_i < T_{b,max}$ ดังนั้น จึงไม่มีอิทธิพลของความแตกต่างของระยะการเติบโตของสปอร์มา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รบกวนการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์ หรือ $f_2 = 1$ และ $t_{a,p2} = 0$ และ $T_{2i,\min} < T_i < T_{2i,\max}$ (รูปที่ 25 (ข)) ดังนั้น จากสมการที่ (18) จึงได้ว่า $k_2 = 1$ และจากสมการที่ (17) จะได้ว่า $\mu_2' = \mu(T_i) = 33.78 \% \cdot h^{-1}$ ส่วนค่า τ_2' จากสมการที่ (22) ระบุไว้ว่า หาก $t_{s2} > t^*$ แล้ว $t_{r2} = 0$ ดังนั้น $\tau_2' = t_{s2} + t_{a,s2}$ จากรูปที่ 25 (ค) $n_2 = 0.79$ ทำให้ $t_{n2}(T_F) = 8.47$ h (รูปที่ 12) และ $t_{a,s2} = 0.93$ h (สมการที่ (24)) ดังนั้น $\tau_2' = 25.3 + 0.93$ h = **26.23 h**

จากนั้น ค่า μ_1' μ_2' τ_1' และ τ_2' ที่คำนวณได้ จะถูกนำไปแทนค่าในสมการที่ (15) เส้นโค้งจากการทำนายในรูปที่ 25 (ก) และผลความแม่นยำในการทำนายที่แสดงในตารางที่ 7 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ($R^2 = 0.9401$ และ $RMSE = 8.72$) สามารถทำนายได้แม่นยำกว่าแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis ($R^2 = 0.7845$ และ $RMSE = 18.78$) ในทุกช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในขณะที่ แบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis [1] ไม่สามารถทำนายการงอกหลังการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิครั้งแรกได้ เนื่องจาก ในช่วงนี้ อิทธิพลของความเครียดของสปอร์อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมและความแตกต่างของระยะการเติบโตของสปอร์ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมส่งผลต่อตัวแปรจลนศาสตร์อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis [1] ไม่มีการคำนึงถึงอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าว จึงทำให้ไม่สามารถประมาณค่าตัวแปรจลนศาสตร์การงอกได้อย่างแม่นยำ ส่วนการเปลี่ยนอุณหภูมิในครั้งที่สองอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าวไม่ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์การงอกอย่างชัดเจน ทำให้แบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis [1] ยังสามารถทำนายการงอกของสปอร์ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองและได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้

2) สปอร์รา *A. niger*

ตารางที่ 8 ค่าตัวแปรจลนศาสตร์และค่าทางสถิติจากการทำนายการงอกสปอร์รา *Aspergillus niger*

ภายใต้สภาวะแวดล้อมแบบพลวัตด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้และแบบจำลองของ

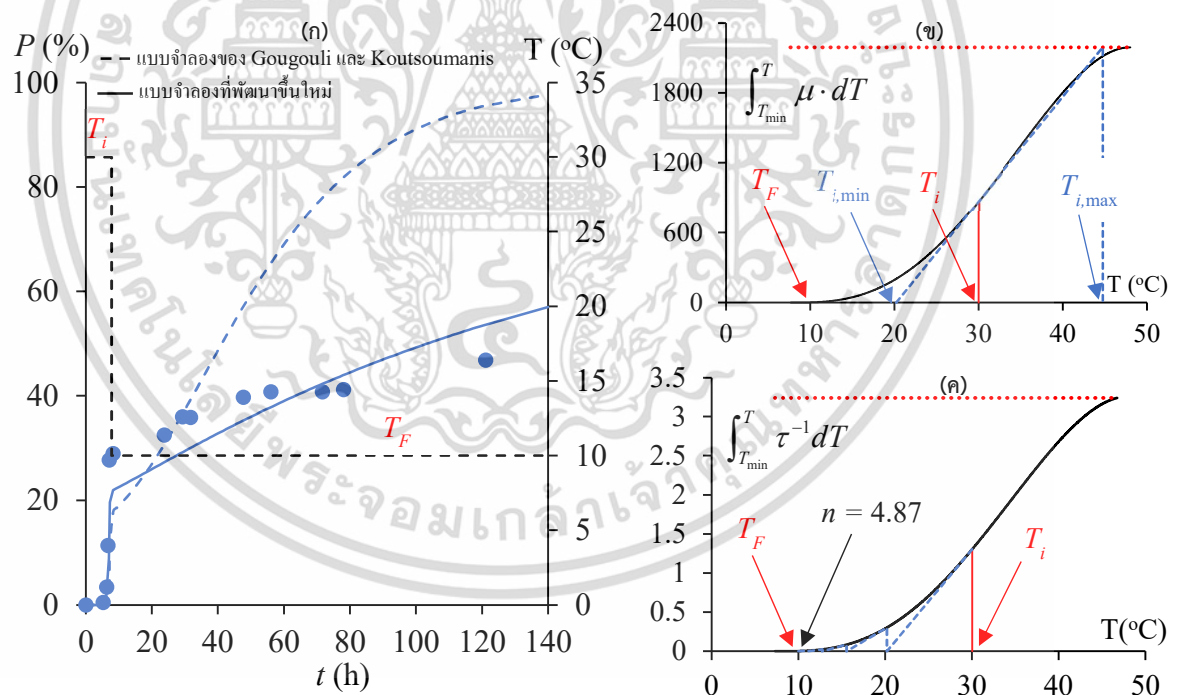
Gougouli และ Koutsoumanis ในกรณีที่ k $t_{a,s}$ f และ $t_{a,p}$ ส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปร

จลนศาสตร์

รูป	แบบจำลอง	สถานการณ์	ตัวแปรจลนศาสตร์	R ²	RMSE
รูปที่ 26	แบบจำลอง A ^a	30 °C → 7.3 h → 10 °C	$\mu = 89.28 \% \cdot h^{-1}$ $\tau = 7.69$ h	0.8593	6.77
		10 °C → ∞	$\mu' = 0.15 \% \cdot h^{-1}$ $\tau' = 157.09$ h		
	แบบจำลอง B ^b	30 °C → 7.3 h → 10 °C	$\mu = 71.07 \% \cdot h^{-1}$ $\lambda = 7.18$ h	0.5621	22.61
		10 °C → ∞	$\mu' = 1.14 \% \cdot h^{-1}$ $\lambda' = 7.30$ h		

^a แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ สมการที่ (15) – (26)

^b แบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis สมการที่ (27) – (28)



รูปที่ 26 (ก) เส้นโค้งการงอกของสปอร์รา *Aspergillus niger* ภายใต้อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 7.3 ชั่วโมง

จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 10 °C (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \mu \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T และ

(ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\int_{T_{\min}}^T \tau^{-1} \cdot dT$ กับอุณหภูมิ T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 26 แสดงเส้นโค้งการทำนายการงอกของสปอร์รา *A. niger* ภายใต้อุณหภูมิ 30 °C (T_i) เป็นเวลา 7.3 ชั่วโมง จากนั้นอุณหภูมิจึงเปลี่ยนเป็น 10 °C (T_F) ในกรณีนี้ $T_F < T_{b,\min}$ และ $t^* < t_{s1} < \tau(T_i)$ ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้มีอิทธิพลของความแตกต่างของระยะเวลาเติบโตของสปอร์มารบกวนการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์ ($f \neq 1$ และ $t_{a,p} \neq 0$) จากสมการที่ (19) และ (25) จะได้ว่า $f = 0.39$ และ $t_{a,p} = 91.58$ h ตามลำดับ จากรูป 26 (ข) $T_F < T_{i,\min}$ ทำให้ $k = 0.17$ (สมการที่ (18)) ดังนั้น $\mu' = (0.39)(0.17)\mu(T_F) = (0.39)(0.17)(2.09) = 0.15 \% \cdot h^{-1}$

ในส่วนของการคำนวณค่า τ' เนื่องจาก $t_s > t^*$ ทำให้ $t_r = 0$ h ดังนั้น $\tau' = t_s + t_{a,s} + t_{a,p}$ จากรูป 26 (ค) จะได้ว่า $n = 4.87$ ทำให้ $t_n(T_F) = 235.28$ h (รูปที่ 13) และ $t_{a,s} = 58.21$ h (สมการที่ (24)) ดังนั้น $\tau' = 7.3 + 58.21$ h + $91.58 = 157.09$ h จากนั้น ค่า μ' และ τ' ที่คำนวณได้ จะถูกนำไปแทนค่าในสมการที่ (15) เส้นโค้งจากการทำนายในรูปที่ 26 (ก) และผลความแม่นยำในการทำนายที่แสดงในตารางที่ 8 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ($R^2 = 0.8593$ และ $RMSE = 6.77$) สามารถทำนายได้ดีกว่าแบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis ($R^2 = 0.5621$ และ $RMSE = 22.61$) เนื่องจาก ในกรณีนี้ อิทธิพลของความเครียดของสปอร์อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมและความแตกต่างของระยะเวลาเติบโตของสปอร์ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมส่งผลต่อการปรับแก้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์อย่างมาก แต่แบบจำลองของ Gougouli และ Koutsoumanis [1] ไม่มีการคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ ทำให้ค่าตัวแปรจลนศาสตร์ที่คำนวณได้และผลการทำนายคลาดเคลื่อนไปจากค่าความเป็นจริงจากผลการทดลอง

บทที่ 5

สรุปการวิจัย

5.1 สรุปการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการงอกของสปอร์ราภายใต้สภาวะต่างๆ ทั้งแบบคงที่และแบบพลวัต ด้วยการปรับปรุงแบบจำลอง Asymmetric ที่พัฒนาขึ้นโดย Dantigny และคณะ ในปี 2011 [9] ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น การปรับปรุงในงานวิจัยนี้ คือ การนิยามความหมายใหม่ให้กับตัวแปรกำหนดรูปร่าง (a shape parameter: d) ให้สอดคล้องกับตัวแปรที่มีความหมายเชิงชีววิทยาของสปอร์รา เช่น อัตราการงอกเฉลี่ยของสปอร์ (μ) ระยะเวลาที่สปอร์เติบโตได้ครั้งหนึ่ง (τ) และสัดส่วนการงอกสูงสุดของสปอร์ (P_{max}) เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้สามารถพิสูจน์ได้ว่า $d = 4 \cdot \mu \cdot \tau / P_{max}$ หลังจากการปรับปรุงแบบจำลอง Asymmetric แล้วเสร็จ แบบจำลองใหม่ที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ได้ถูกนำไปใช้ในการทำนายการงอกของสปอร์ราทั้งหมด 6 สายพันธุ์ (*P. expansum* *A. niger* *P. italicum* *G. musarum* *F. proliferatum* และ *P. paneum*) ภายใต้สภาวะต่างๆ แบบคงที่ เทียบกับแบบจำลองอื่นๆ ที่เคยมีการพัฒนามา เช่น แบบจำลอง Asymmetric Logistic และ Gompertz เป็นต้น ผลการทำนายแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นใหม่ในงานวิจัยนี้สามารถทำนายการงอกของสปอร์ได้แม่นยำเทียบเท่ากับแบบจำลองอื่นๆ แต่สามารถให้ความหมายได้สอดคล้องกับกลไกการงอกของสปอร์ราได้ดีกว่าแบบจำลองอื่นๆ อีกทั้งยังสามารถประมาณค่าตัวแปร μ และ τ ที่สภาวะต่างๆ ได้ผ่านแบบจำลอง Cardinal Model with Inflection (CMI) ซึ่งทำให้สามารถใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นทำนายการงอกของสปอร์ราภายใต้สภาวะอื่นๆ ได้อย่างสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังได้พัฒนาแบบจำลองให้สามารถทำนายการงอกของสปอร์ราภายใต้สภาวะแบบพลวัตหรือสภาวะที่เกิดการผันผวนของสภาพแวดล้อมได้ โดยการตั้งสมมติฐานว่า ความเครียดของสปอร์อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมและความแตกต่างของระยะการเติบโตของสปอร์ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมส่งผลต่อตัวแปรจลนศาสตร์ (μ และ τ) จากนั้น สมมติฐานดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ในการทำนายการงอกของสปอร์รา *P. expansum* และ *A. niger* ภายใต้สภาวะที่มีการผันผวนของอุณหภูมิ ผลการทำนายแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองและสมมติฐานใหม่ที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ สามารถทำนายการงอกของสปอร์ราทั้งสองสายพันธุ์ภายใต้สภาวะดังกล่าวได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

(1) เนื่องจากข้อมูลการรอกของสปอร์ราที่รวบรวมมาเพื่อทดสอบกับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ มีค่า $P_{\max} \rightarrow 100\%$ อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยเห็นว่า ในสถานการณ์จริง P_{\max} อาจจะมีค่าต่างออกไปได้ ดังนั้น งานวิจัยในอนาคต ควรจะมีการรวบรวมข้อมูลการรอกของสปอร์ราภายใต้สภาวะที่ $P_{\max} \neq 100\%$ เพื่อพิสูจน์ว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถรองรับกับการทำนายสปอร์ราภายใต้สภาวะดังกล่าวได้

(2) ควรจะมีการพัฒนาแบบจำลองให้อยู่ในรูปแบบของซอฟต์แวร์ เพื่อความสะดวกต่อการใช้งานในอนาคต



บรรณานุกรม

- [1] M. Gougouli and K. P. Koutsoumanis, "Modeling germination of fungal spores at constant and fluctuating temperature conditions," *Int. J. Food Microbiol.*, vol. 152, no. 3, pp. 153–161, 2012, doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2011.07.030.
- [2] P. Gervais, J. P. Fasquel, and P. Molin, "Water relations of fungal spore germination," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 29, no. 6, pp. 586–592, 1988, doi: 10.1007/BF00260989.
- [3] P. Dantigny *et al.*, "Standardisation of methods for assessing mould germination: a workshop report," *Int. J. Food Microbiol.*, vol. 108, no. 2, pp. 286–291, 2006, doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2005.12.005.
- [4] C. D'Enfert, "Fungal spore germination: insights from the molecular genetics of *Aspergillus nidulans* and *Neurospora crassa*," *Fungal Genet. Biol.*, vol. 21, no. 2, pp. 163–172, 1997, doi: 10.1006/fgbi.1997.0975.
- [5] R. D. Goos and M. Tschirsch, "Effect of environmental factors on spore germination, spore survival, and growth of *Gloeosporium musarum*," *Mycologia*, vol. 54, no. 4, pp. 353–367, 1962, doi: 10.1080/00275514.1962.12025010.
- [6] P. Plaza, J. Usall, N. Teixidó, and I. Viñas, "Effect of water activity and temperature on germination and growth of *Penicillium digitatum*, *P. italicum* and *Geotrichum candidum*," *J. Appl. Microbiol.*, vol. 94, no. 4, pp. 549–554, 2003, doi: 10.1046/j.1365-2672.2003.01909.x.
- [7] P. Dantigny, A. Guilmart, and M. Bensoussan, "Predictive mycology: some definitions," *Cryptogam. Mycol.*, vol. 24, no. 4, pp. 377–383, 2003.
- [8] M. Peleg and M. D. Normand, "Modeling of fungal and bacterial spore germination under static and dynamic conditions," *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 79, no. 21, pp. 6764–6775, 2013, doi: 10.1128/AEM.02521-13.
- [9] P. Dantigny, S. P. M. Nanguy, D. Judet-Correia, and M. Bensoussan, "A new model for germination of fungi," *Int. J. Food Microbiol.*, vol. 146, no. 2, pp. 176–181, 2011, doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2011.02.022.
- [10] D. Sardella, R. Gatt, and V. P. Valdramidis, "Modelling the growth of pear postharvest fungal isolates at different temperatures," *Food Microbiol.*, vol. 76,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- pp. 450–456, 2018, doi: 10.1016/j.fm.2018.07.010.
- [11] Y. Huang, M. Begum, B. Chapman, and A. D. Hocking, “Effect of reduced water activity and reduced matric potential on the germination of xerophilic and non-xerophilic fungi,” *Int. J. Food Microbiol.*, vol. 140, no. 1, pp. 1–5, 2010, doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2010.02.026.
- [12] S. Samapundo, F. Devlieghere, B. De Meulenaer, and J. Debevere, “Growth kinetics of cultures from single spores of *Aspergillus flavus* and *Fusarium verticillioides* on yellow dent corn meal,” *Food Microbiol.*, vol. 24, no. 4, pp. 336–345, 2007, doi: 10.1016/j.fm.2006.07.020.
- [13] D. Judet, M. Bensoussan, J. M. Perrier-Cornet, and P. Dantigny, “Distributions of the growth rate of the germ tubes and germination time of *Penicillium chrysogenum* conidia depend on water activity,” *Food Microbiol.*, vol. 25, no. 7, pp. 902–907, 2008, doi: 10.1016/j.fm.2008.05.007.
- [14] P. H. Franses, “A method to select between Gompertz and logistic trend curves,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 46, no. 1, pp. 45–49, 1994, doi: 10.1016/0040-1625(94)90016-7.
- [15] S. Basak, “Modelling the effect of betel leaf essential oil on germination time of *Aspergillus flavus* and *Penicillium expansum* spore population,” *Lwt*, vol. 95, pp. 361–366, 2018, doi: 10.1016/j.lwt.2018.05.015.
- [16] N. Nguyen Van Long *et al.*, “Modeling the effect of modified atmospheres on conidial germination of fungi from dairy foods,” *Front. Microbiol.*, vol. 8, no. OCT, pp. 1–10, 2017, doi: 10.3389/fmicb.2017.02109.
- [17] P. Dantigny, “Applications of predictive modeling techniques to fungal growth in foods,” *Curr. Opin. Food Sci.*, vol. 38, pp. 86–90, 2021, doi: 10.1016/j.cofs.2020.10.028.
- [18] S. Kalai, M. Bensoussan, and P. Dantigny, “Lag time for germination of *Penicillium chrysogenum* conidia is induced by temperature shifts,” *Food Microbiol.*, vol. 42, pp. 149–153, 2014, doi: 10.1016/j.fm.2014.03.016.
- [19] N. Nguyen Van Long *et al.*, “Temperature, water activity and pH during conidia production affect the physiological state and germination time of *Penicillium* species,” *Int. J. Food Microbiol.*, vol. 241, pp. 151–160, 2017, doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2016.10.022.

[20] J. L. P. Santos, R. D. Chaves, and A. S. Sant’Ana, “Modeling the impact of water

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- activity, pH, and calcium propionate on the germination of single spores of *Penicillium paneum*,” *Lwt*, vol. 133, 2020, doi: 10.1016/j.lwt.2020.110012.
- [21] S. Kalai, L. Anzala, M. Bensoussan, and P. Dantigny, “Modelling the effect of temperature, pH, water activity, and organic acids on the germination time of *Penicillium camemberti* and *Penicillium roqueforti* conidia,” *Int. J. Food Microbiol.*, vol. 240, pp. 124–130, 2017, doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2016.03.024.
- [22] L. Rosso, J. R. . Lobry, and J. P. Flandrois, “An unexpected correlation between cardinal temperatures of microbial growth highlighted by a new model,” *J. Theor. Biol.*, vol. 162, no. 4, pp. 447–463, 1993, doi: 10.1006/jtbi.1993.1099.
- [23] D. Garcia, A. J. Ramos, V. Sanchis, and S. Marín, “Modelling mould growth under suboptimal environmental conditions and inoculum size,” *Food Microbiol.*, vol. 27, no. 7, pp. 909–917, 2010, doi: 10.1016/j.fm.2010.05.015.
- [24] P. Dantigny, C. Soares Mansur, M. Sautour, I. Tchobanov, and M. Bensoussan, “Relationship between spore germination kinetics and lag time during growth of *Mucor racemosus*,” *Lett. Appl. Microbiol.*, vol. 35, no. 5, pp. 395–398, 2002, doi: 10.1046/j.1472-765X.2002.01214.x.
- [25] P. Dantigny, I. Tchobanov, M. Bensoussan, and M. H. Zwietering, “Modeling the effect of ethanol vapor on the germination time of *Penicillium chrysogenum*,” *J. Food Prot.*, vol. 68, no. 6, pp. 1203–1207, 2005, doi: 10.4315/0362-028X-68.6.1203.
- [26] E. R. Omuse, S. Niassy, J. M. Wagacha, G. O. Ong’amo, A. G. A. Azrag, and T. Dubois, “Suitable models to describe the effect of temperature on conidial germination and mycelial growth of *Metarhizium anisopliae* and *Beauveria bassiana*,” *Biocontrol Sci. Technol.*, vol. 32, no. 3, pp. 281–298, 2022, doi: 10.1080/09583157.2021.1993133.
- [27] A. P. J. Trinci, “Exponential growth of the germ tubes of fungal spores,” *J. Gen. Microbiol.*, vol. 67, pp. 345–348, 1971, doi: 10.1099/00221287-67-3-345.
- [28] P. Dantigny and S. P. M. Nanguy, “Significance of the physiological state of fungal spores,” *Int. J. Food Microbiol.*, vol. 134, no. 1–2, pp. 16–20, 2009, doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2009.02.005.
- [29] P. Dantigny, S. Marín, M. Beyer, and N. Magan, “Mould germination: data treatment and modelling,” *Int. J. Food Microbiol.*, vol. 114, no. 1, pp. 17–24, 2007, doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2006.11.002.

- [30] M. H. Zwietering, J. C. De Wit, H. G. A. M. Cuppers, and K. Van't Riet, "Modeling of bacterial growth with shifts in temperature," *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 60, no. 1, pp. 204–213, 1994, doi: 10.1128/aem.60.1.204-213.1994.
- [31] S. Marín *et al.*, "Water and temperature relations and microconidial germination of *Fusarium moniliforme* and *Fusarium proliferatum* from maize," *Can. J. Microbiol.*, vol. 42, no. 10, pp. 1045–1050, 1996, doi: 10.1139/m96-134.
- [32] K. Y. Wong and S. N. Chiu, "An iterative approach to minimize the mean squared error in ridge regression," *Comput. Stat.*, vol. 30, no. 2, pp. 625–639, 2015, doi: 10.1007/s00180-015-0557-y.
- [33] D. A. Ratkowsky, "Model fitting and uncertainty," in *Modeling Microbial Responses in Food*, R. C. McKellar and X. Lu, Eds. Boca Raton, Florida USA: CRC Press, 2004, pp. 151–196.

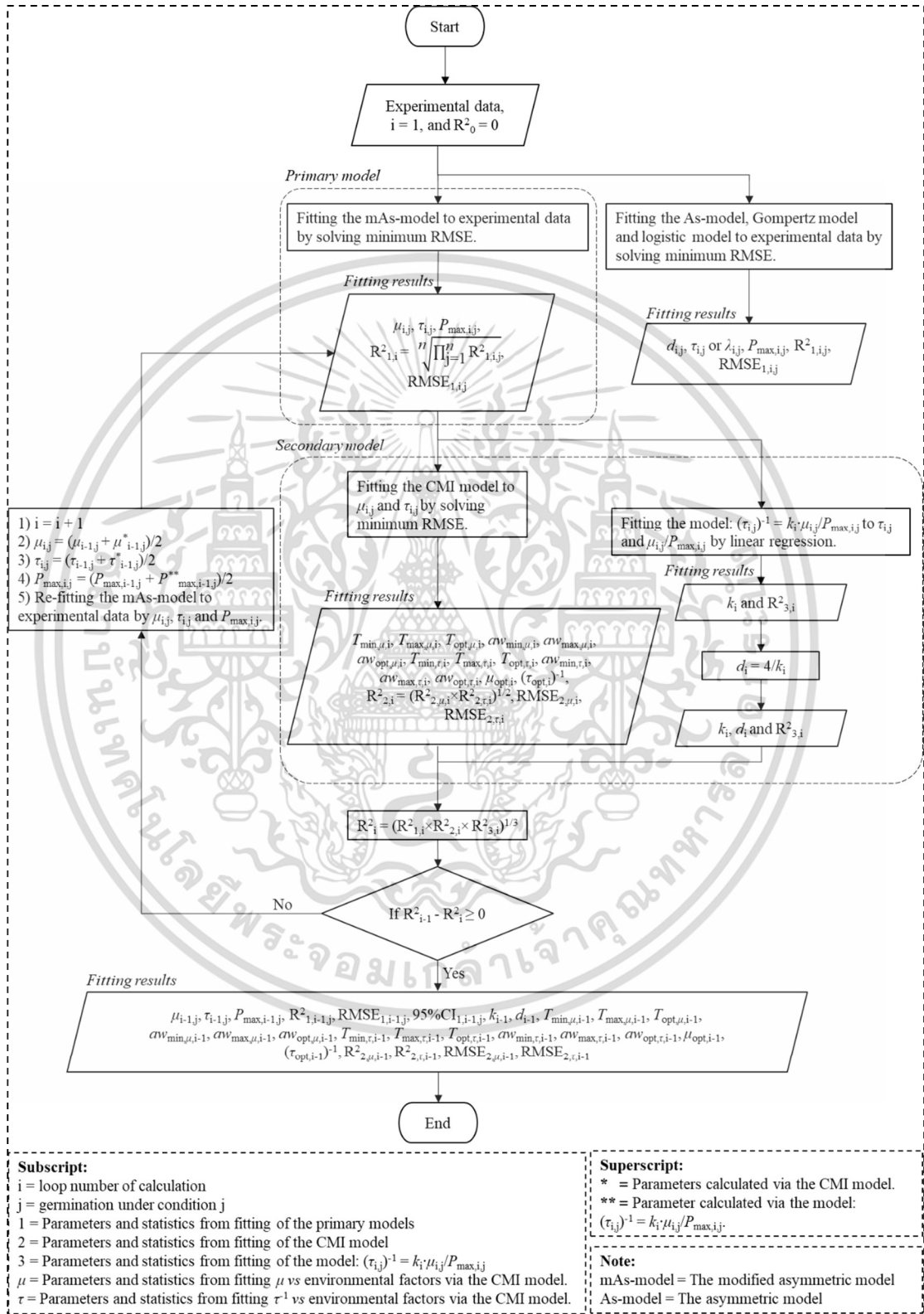


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



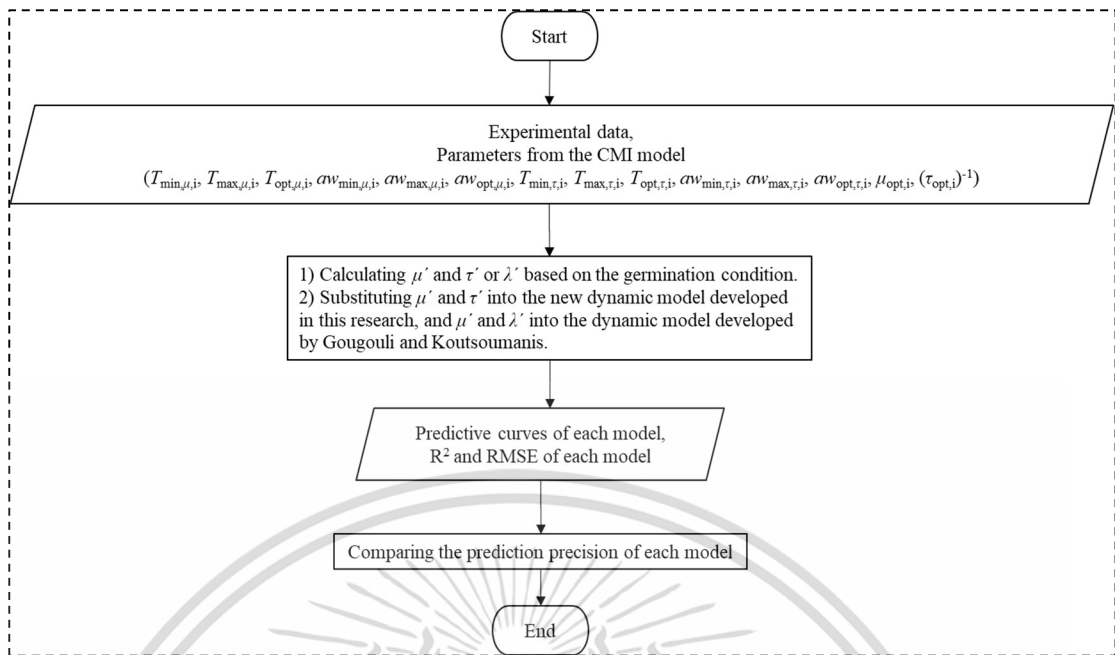
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก



รูปที่ ก.1 กระบวนการคำนวณเพื่อทำนายการงอกของสปอร์ราภายใต้สภาวะต่างๆ แบบคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2 กระบวนการคำนวณเพื่อทำนายการงอกของสปอร์ภายใต้สภาวะแบบพลวัต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ประวัติผู้เขียน

ประวัติโดยย่อ

ชื่อ – สกุล (ไทย): ภาณุลักษณะณ์ บุญเรือง

ชื่อ – สกุล (อังกฤษ): Panuluk Boonruang

เพศ: ชาย วันเกิด: 10 ตุลาคม 2539 สัญชาติ: ไทย

เชื้อชาติ: ไทย ศาสนา: พุทธ

ภูมิลำเนา: 57 หมู่ 2 ตำบล ไหล่หิน อำเภอกาญจนดิษฐ์ จังหวัด สุราษฎร์ธานี 82130



ช่องทางการติดต่อ

เบอร์โทรศัพท์: 0628106006

Email: sir.panuluk@gmail.com

Facebook: <https://web.facebook.com/vongola.xi.5> Line: sir-maxkro

ประวัติการศึกษา

ระดับมัธยมศึกษา: แผนการเรียน วิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์

โรงเรียนบุญวาทย์วิทยาลัย

เกรดเฉลี่ย: 3.64

ระดับปริญญาตรี: วิศวกรรมปิโตรเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เกรดเฉลี่ย: 3.79 (เกียรตินิยมอันดับหนึ่งเหรียญทอง)

ระดับปริญญาโท: วิศวกรรมเคมี (หลักสูตร ก 1: ทำเฉพาะงานวิจัย) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง

ทักษะ

- สามารถใช้งานซอฟต์แวร์พื้นฐาน เช่น Microsoft Word Excel และ PowerPoint ได้เป็นอย่างดี
- สามารถเขียนแบบ 3D ด้วยซอฟต์แวร์ AUTO-CAD Google Sketchup และ SOLIDWORKS ได้เป็นอย่างดี
- สามารถคำนวณและจำลองกระบวนการทางวิศวกรรมเคมีด้วยซอฟต์แวร์ ASPEN PLUS POLYMATH FOGLER และ MATLAB ได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สามารถเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์หรือเครื่องจักรต่างๆ ได้ด้วยซอฟต์แวร์ MS Visual C++/C# Arduino IDE และ PLC control เป็นต้น

ประสบการณ์ทำงาน/วิจัย

- 1) ปี พ.ศ. 2562: ฝึกงานที่บริษัท Thyssenkrupp Industrial Solutions (Thailand) Ltd.
- 2) ปี พ.ศ. 2562: วิจัยและพัฒนาเครื่องทำน้ำแข็งพลังงานแสงอาทิตย์ (อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. อนุรักษ์ ฤกษ์เกษมสันต์)
- 3) ปี พ.ศ. 2563: วิจัยและพัฒนาระบบระเหยชั้นแบบฟิล์มบาง (อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. อนุรักษ์ ฤกษ์เกษมสันต์)
- 4) ปี พ.ศ. 2563: วิจัยและพัฒนาเครื่อง Extra oral suction พร้อมระบบแยกน้ำเพื่อใช้ในงานทันตกรรม ติดตั้งที่โรงพยาบาล โรงพยาบาลจุฬารัตน์ (อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. อนุรักษ์ ฤกษ์เกษมสันต์)
- 5) ปี พ.ศ. 2564: วิจัยและพัฒนาห้องความดันลบที่สามารถเคลื่อนย้ายได้เพื่อใช้เป็นห้อง ICU ในโรงพยาบาลหรือโรงพยาบาลสนาม (อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. อนุรักษ์ ฤกษ์เกษมสันต์)
- 6) ปี พ.ศ. 2564: วิจัยและพัฒนาเตียงเคลื่อนย้ายผู้ป่วยความดันลบที่สามารถวัดและส่งค่าสัญญาณชีพผู้ป่วยผ่านระบบคลาวด์ (อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. อนุรักษ์ ฤกษ์เกษมสันต์)
- 7) ปี พ.ศ. 2565: วิจัยและพัฒนาเครื่องผลิตออกซิเจนอัตราการไหลสูง (อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. อนุรักษ์ ฤกษ์เกษมสันต์)
- 8) ปี พ.ศ. 2565: ตีพิมพ์บทความวิจัย เรื่อง “Re-parameterization of the asymmetric model for fungal spore germination” ในวารสาร International Journal of Food Microbiology (อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. อนุรักษ์ ฤกษ์เกษมสันต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้