การพัฒนาขั้นตอนวิธีสำหรับทำนายผลผลิตของต้นถั่วเหลืองเมื่อปลูกที่ระดับ pH ช่วง 4 - 8

นายประเทือง เชื้อสอาด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการคณนา ภาควิชาคณิตศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR PREDICTION OF THE SOYBEAN PRODUCTION WHEN GROWN AT pH 4 - 8

Mr.Prathuang Chuasa-ard

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Computational Science

Department of Mathematics
Faculty of Science
Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาขั้นตอนวิธีสำหรับทำนายผลผลิตของต้นถั่วเหลืองเมื่อปลูกที่ระดับ pH ช่วง 4 – 8
โดย	นาย ประเทือง เชื้อสอาด
สาขาวิชา	วิทยาการคณนา
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ สุชาดา ศิริพันธุ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศาสตราจารย์ ดร. ชิดชนก เหลือสินทรัพย์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนุสรณ์ ชนวีระยุทธ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ สุชาดา ศิริพันธุ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร. ชิดชนก เหลือสินทรัพย์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาตราจารย์ ดร. ศุภจิตรา ชัชวาลย์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประเทือง เชื้อสอาด : การพัฒนาขั้นตอนวิธีสำหรับทำนายผลผลิตของต้นถั่วเหลืองเมื่อปลูกที่ระดับ pH ช่วง 4 - 8 (DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR PREDICTION OF THE SOYBEAN PRODUCTION WHEN GROWN AT pH 4 - 8) อ.ที่ปรึกษา : รศ.สุชาดา ศิริพันธุ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ศ.ดร.ชิดชนก เหลือสินทรัพย์, 82 หน้า.

ในธรรมชาติ การเจริญเติบโตของพืชจำเป็นต้องใช้ปัจจัยหลายอย่าง อาทิเช่น น้ำ แสง อุณหภูมิ ปุ๋ย สภาพของดิน เป็นต้น ปริมาณของปัจจัยที่เปลี่ยนแปลงส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ ในสภาพของดินที่มีระดับ pH ต่างกันหรือในสภาพดินที่ไม่เหมาะสมก็ทำให้พืชมีการเจริญเติบโตแตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อผลผลิต งานวิจัยที่ผ่านมาจะศึกษาเกี่ยวกับการปลูกพืชในสภาพของดินที่มีระดับ pH ต่างกัน ส่วนใหญ่วิเคราะห์ว่าพืชแต่ละชนิดเหมาะสำหรับปลูกในดินที่มีระดับ pH เท่าใด

ในการศึกษานี้จะเน้นการเจริญเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในระดับ pH 4 – 8 ความสูงและน้ำหนักรวมของผลผลิตคือ ข้อมูลที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายความสูงและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายผลผลิต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา...คณิตศาสตร์.....	ลายมือชื่อนิสิต.....ประเทือง เชื้อสอาด.....
สาขาวิชา...วิทยาการคณนา.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....[illegible].....
ปีการศึกษา...2549.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....[illegible].....

4672324923 : MAJOR COMPUTATIONAL SCIENCE
KEY WORD: pH / NEURAL NETWORKS

PRATHUANG CHUASA-ARD : DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR PREDICTION OF THE SOYBEAN PRODUCTION WHEN GROWN AT pH 4 - 8. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SUCHADA SIRIPANT, THESIS CO-ADVISOR : PROF. CHIDCHANOK LURSINSAP, Ph.D., 82 pp.

Naturally there are a lot of factors affecting on plant growth, such as water, light, temperature, nutrient and soil condition, etc. Different pH level and improper soil condition also affect on plant growth and plant production. Most of the previous research, involving in growing plants in different pH level of soil, was aimed to investigate the appropriate soil pH for plant growth.

This research is concentrated on soybean growth in responding to the range of pH 4 - 8. Height and total seed weight is used as the data to create a mathematical model for predicting soy bean growth and neural networks model for predicting the production.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department...Mathematics..... Student's signature.....
Field of study...Computational Science..... Advisor's signature.....
Academic year...2006..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ด้วยความกรุณาช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ สุชาดา ศิริพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และศาสตราจารย์ ดร.ชิดชนก เหลือสินทรัพย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภจิตรา ชัชวาลย์ ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการทำการทดลองปลูกถั่วเหลืองในระบบไฮโดรโปนิกส์ จึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุสรณ์ ชนวีระยุทธ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภจิตรา ชัชวาลย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจสอบและให้คำแนะนำแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จด้วยดี

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการสรีรวิทยา ภาควิชาพฤกษศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ให้คำแนะนำการทดลอง และการใช้เครื่องมือผสมสารละลายธาตุอาหาร

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ สาขาวิทยาการคณนาทุกคน และเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ศูนย์วิจัย AVIC ทุกคนสำหรับคำปรึกษา คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ และความช่วยเหลือในทุก ๆ เรื่อง ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบพระคุณ นายโพธิ์ และนางแสง เชื้อสอาด และนายประทีป เชื้อสอาด และนางสุพัตรา ไชยโชค ที่ได้ให้กำลังใจช่วยเหลือและสนับสนุนในด้านต่าง ๆ อย่างดีจนกระทั่งตลอดมาจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ถ้าไม่ได้บุคคลเหล่านี้ ผู้วิจัยคงไม่มีวันนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญภาพ ..... ญ
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้ 2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย 2
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3
2.1 งานวิจัยทางพฤกษศาสตร์ที่ศึกษาระดับของ pH ที่มีผลต่อการเติบโตของพืช 3
2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับแบบจำลองการเจริญเติบโตของพืช 4
3 ทฤษฎีพื้นฐาน 5
3.1 มาตราของ pH 5
3.2 แบบจำลองการเติบโต 8
3.3 การวิเคราะห์การถดถอย 12
3.4 ระบบไฮโดรโปนิกส์ 18
3.5 โครงข่ายประสาทเทียม 22
4 การออกแบบการทดลองและการจำลองแบบ 26
4.1 การออกแบบการทดลอง 26
4.2 การเก็บข้อมูล 29
4.3 การจำลองแบบ 30

บทที่ หน้า

5 ผลการวิจัย 54
5.1 ผลการทดลองช่วงที่ 1 54
5.2 ผลการทดลองช่วงที่ 2 57
6 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ 60
6.1 สรุปผลการวิจัย 60
6.2 ข้อเสนอแนะ 61
รายการอ้างอิง 62
ภาคผนวก 64
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 72

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง $[H^+]$, pH, $[OH^-]$ และ Kw 7

ตารางที่ 3.2 ระดับขั้นของสภาพกรดหรือสภาพด่างของดิน 8

ตารางที่ 3.3 วิธีการเตรียมสารละลายเข้มข้น (Stock Solution) สำหรับสูตร Hoagland 20

ตารางที่ 3.4 ตารางสารละลายธาตุอาหารสมบูรณ์สูตร Hoagland ต่อน้ำ 2 ลิตร.....21

ตารางที่ 4.1 สารละลายเข้มข้น (Stock Solution) สำหรับสูตร Hoagland.....27

ตารางที่ 4.2 ตารางสารละลายธาตุอาหารสมบูรณ์สูตร Hoagland ต่อน้ำ 2 ลิตร.....28

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองการเติบโตของการทดลองช่วงที่ 1.....39

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองการเติบโตของการทดลองช่วงที่ 2.....44

ตารางที่ 5.1 แสดงผลของความสูงเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองของ
การทดลองช่วงที่ 1 54

ตารางที่ 5.2 แสดงผลความสูงของถั่วเหลืองที่ปลูกในระดับ pH 4.8-7.8 ของ
การทดลองช่วงที่ 1 54

ตารางที่ 5.3 แสดงผลของแบบจำลองเปรียบเทียบผลของข้อมูลการทดลองของ
การทดลองช่วงที่ 1 55

ตารางที่ 5.4 แสดงผลความสูงและน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองแต่ละ pH ของ
การทดลองช่วงที่ 1 56

ตารางที่ 5.5 แสดงผลของความสูงเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองของ
การทดลองช่วงที่ 2 57

ตารางที่ 5.6 แสดงผลความสูงของถั่วเหลืองที่ปลูกในระดับ pH 4.8-7.8 ของ
การทดลองช่วงที่ 2 57

ตารางที่ 5.7 แสดงผลของแบบจำลองเปรียบเทียบผลของข้อมูลการทดลองของ
การทดลองช่วงที่ 2 58

ตารางที่ 5.8 แสดงผลความสูงและน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองแต่ละ pH ของ
การทดลองช่วงที่ 2 59

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 3.1 การเติบโตแบบเอกซ์โปเนนเชียลและแบบลอจิสติก 9
รูปที่ 3.2 ค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละจุด (x_i, y_i) 13
รูปที่ 3.3 การปลูกพืชในสารละลายธาตุอาหาร 19
รูปที่ 3.4 โครงสร้างของเซลล์ประสาทและโครงสร้างของเซลล์ประสาทเทียม.....22
รูปที่ 3.5 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น 23
รูปที่ 4.1 กราฟข้อมูลการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ในการทดลองช่วงที่ 1 ตั้งแต่วันที่ 16 สิงหาคม 2548 - วันที่ 29 ตุลาคม 2548 (ก) pH 4.8 (ข) pH 5.8 (ค) pH 6.8 (ง) pH 7.8 31
รูปที่ 4.2 กราฟข้อมูลการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ในการทดลองช่วงที่ 2 ตั้งแต่วันที่ 11 มกราคม 2549 - วันที่ 26 มีนาคม 2549 (ก) pH 4.8 (ข) pH 5.8 (ค) pH 6.8 (ง) pH 7.8 32
รูปที่ 4.3 ระยะการเติบโตของถั่วเหลือง.....33
รูปที่ 4.4 พารามิเตอร์ของแบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 1 (ก) K_{R1} (ข) Δt_{R1} (ค) t_{Rm1} (ง) K_{R2} (จ) Δt_{R2} (ฉ) t_{Rm2} (ช) K_{R3} (ซ) Δt_{R3} (ฌ) t_{Rm3} 40
รูปที่ 4.5 พารามิเตอร์ของแบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 2 (ก) K_{S1} (ข) Δt_{S1} (ค) t_{Sm1} (ง) K_{S2} (จ) Δt_{S2} (ฉ) t_{Sm2} (ช) K_{S3} (ซ) Δt_{S3} (ฌ) t_{Sm3} 45
รูปที่ 4.6 กราฟข้อมูลการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ กับน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองหลังเก็บเกี่ยวในช่วงการทดลองที่ 1 ตั้งแต่วันที่ 16 สิงหาคม 2548 - วันที่ 29 ตุลาคม 2548 (ก) pH 4.8 (ข) pH 5.8 (ค) pH 6.8 (ง) pH 7.8.....49
รูปที่ 4.7 กราฟข้อมูลการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ กับน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองหลังเก็บเกี่ยวในช่วงการทดลองที่ 2 ตั้งแต่วันที่ 11 มกราคม 2549 - วันที่ 26 มีนาคม 2549 (ก) pH 4.8 (ข) pH 5.8 (ค) pH 6.8 (ง) pH 7.8.....49

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในธรรมชาติ การเจริญเติบโตของพืชจำเป็นต้องใช้ปัจจัยหลายอย่าง อาทิเช่น น้ำ แสง อุณหภูมิ พันธุกรรม ความชื้นสัมพัทธ์ สภาพของดิน ธาตุอาหารต่างๆ เช่นไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียมและอื่นๆ อีกมากมาย เป็นต้น ถ้าขาดปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งก็ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ การปลูกพืชในสภาพของดินที่มีระดับ pH ต่างกันหรือในสภาพดินที่ไม่เหมาะสมก็ทำให้พืชมีการเจริญเติบโตที่แตกต่างกันทำให้มีผลต่อผลผลิต ที่ผ่านมางานวิจัยเกี่ยวกับการปลูกพืชในสภาพของดินที่มีระดับ pH ต่างกันมีการทดลองมานานแล้ว ส่วนใหญ่วิเคราะห์ว่าพืชแต่ละชนิดเหมาะสำหรับปลูกในดินที่มีระดับ pH เท่าใด ดังนั้นการศึกษาสภาพความเป็นกรด - ด่างมีผลต่อการเจริญเติบโตและน้ำหนักของผลผลิตของพืช จึงเป็นปัญหาที่น่าสนใจในการนำมาศึกษาด้วยการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการประมาณผลผลิต โดยที่ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ถั่วเหลืองเป็นกรณีศึกษา

การศึกษาสภาพความเป็นกรดเป็นด่างมีผลต่อการเจริญเติบโตและน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลือง ได้ทำการทดลองปลูกถั่วเหลืองในสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ในระดับ pH 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8 ตามลำดับ เพื่อเก็บข้อมูลสำหรับนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายการเจริญเติบโตและน้ำหนักของผลผลิตของถั่วเหลือง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยมีดังนี้

1. เพื่อหาขั้นตอนวิธีสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายการเจริญเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในระดับ pH 4 – 8
2. เพื่อที่ประมาณการผลผลิตของถั่วเหลืองที่ปลูกในระดับ pH 4 – 8

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. พืชที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60
2. ในการเพาะปลูกจะทำการเพาะปลูกถั่วเหลืองในสารละลายธาตุอาหาร โดยใช้สารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland
3. ระยะเวลาการทดลองปลูกถั่วเหลืองในสารละลาย ตั้งแต่เริ่มปลูกจนกระทั่งเก็บเกี่ยวผลผลิตใช้เวลา 75 วัน มีการทดลองปลูก 2 ช่วงเวลาคือ ช่วงแรกตั้งแต่วันที่ 16 สิงหาคม 2548 - วันที่ 29 ตุลาคม 2548 และช่วงที่สองตั้งแต่วันที่ 11 มกราคม 2549 - วันที่ 26 มีนาคม 2549 และการเพาะปลูกถั่วเหลืองจะปลูกในสารละลายที่มีระดับ pH 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8
4. การเจริญเติบโตของถั่วเหลืองที่ใช้ในการศึกษาคือ ความสูงและน้ำหนักเมล็ดของถั่วเหลือง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้

แบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ได้จะสามารถนำไปพยากรณ์พฤติกรรมการเติบโตของต้นถั่วเหลืองที่ปลูกในดินในระดับ pH 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8 และสามารถทำนายผลผลิตอันอาจเกิดขึ้นได้

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวกับ pH ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช
2. ทำการทดลองปลูกถั่วเหลืองในสารละลายธาตุอาหารในระดับ pH 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8 เพื่อเก็บข้อมูลนำมาวิเคราะห์หาแบบจำลองที่เหมาะสม
3. สร้างสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการเจริญเติบโตของต้นถั่วเหลืองและน้ำหนักของผลผลิตของถั่วเหลืองในระดับ pH 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8
4. สร้างภาพนามธรรมการเจริญเติบโตของต้นถั่วเหลือง
5. จัดทำเอกสารรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้แบ่งออกเป็น 6 บท โดยบทที่ 2 จะกล่าวถึงเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง บทที่ 3 จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย บทที่ 4 จะกล่าวถึงการออกแบบการทดลองและการจำลองแบบ บทที่ 5 จะกล่าวถึงผลการวิจัย และส่วนสุดท้ายบทที่ 6 จะกล่าวถึงสรุปผลและข้อเสนอแนะของงานวิจัย

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ได้มีการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับการเติบโตของพืชกันอย่างกว้างขวางทั้งด้านพฤกษศาสตร์ การออกแบบจำลองและได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการปลูกพืชในระดับ pH ใดๆ

เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายการเจริญเติบโตและน้ำหนักของผลผลิตของถั่วเหลืองในระดับ pH ใดๆ ที่ได้ศึกษานี้ ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

- งานวิจัยทางพฤกษศาสตร์ที่ศึกษาระดับของ pH ที่มีผลต่อการเติบโตของพืช
- งานวิจัยเกี่ยวกับแบบจำลองการเจริญเติบโตของพืช

2.1 งานวิจัยทางพฤกษศาสตร์ที่ศึกษาระดับของ pH ที่มีผลต่อการเติบโตของพืช

Koca, Karadeniz และ Burdurlu ทำการวิจัยเกี่ยวผลกระทบของ pH ที่มีผลต่อคลอโรฟิลล์และสีใบของต้นถั่วเขียว โดยจะนำต้นถั่วเขียวมาปลูกในพื้นที่อุณหภูมิ 70, 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส และปลูกในสารละลายที่มีระดับ pH เท่ากับ 5.5, 6.5 และ 7.5 พบว่าอัตราที่เป็นอันตรายต่อสีใบและความเข้มของคลอโรฟิลล์จะลดลงเมื่อมีระดับของ pH เพิ่มขึ้น และความเข้มของคลอโรฟิลล์ a กับคลอโรฟิลล์ b จะมีอันตรายเพิ่มขึ้นเมื่อระดับ pH ลดลง [1]

ในปี ค.ศ. 2000 Symonds, Campbell และ Clemens ได้ศึกษาการตอบสนองของต้นยูคาลิปตัสที่ปลูกใน pH ต่าง ๆ โดยการปลูกต้นยูคาลิปตัสในช่วง pH เท่ากับ 5.1, 5.6, 6.8, 7.6, 8.5 และ 8.9 ผลการวิจัยสรุปได้ว่า pH เท่ากับ 5.1 และ 5.6 จะไม่มีความแตกต่างในเรื่องน้ำหนักแห้งและพื้นที่ของใบ เมื่อ pH มากกว่า 5.6 จะทำให้น้ำหนักแห้งและพื้นที่ของใบมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ และเมื่อค่า pH มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้สาร Ca และ Mg มีปริมาณเพิ่มขึ้น [2]

ในปี ค.ศ. 2002 Gudrupa, Kruzmane และ Ievinsh ได้ศึกษาผลกระทบของ trimethyl ammonium chloride (CCC) และ pH ที่มีผลต่อการขยายหน่อของต้น Sedum Rubrotinctum โดยการปลูกต้น Sedum Rubrotinctum ในสารละลายที่มีระดับ pH 5, 5.5, 6.0, 6.5 และ 7.0 เป็นระยะเวลา 3 เดือน จะพบว่า เมื่อค่า pH สูงขึ้นคือตั้งแต่ pH 6 จะทำให้ความสูงของลำต้นสูงตามไปด้วยและความยาวของแต่ละปล้องก็จะยาวตามไปด้วย [3]

ในปี ค.ศ. 2006 Batty และ Younger ได้ศึกษาผลกระทบของ pH ที่มีผลต่อพืชที่อยู่ในน้ำขังหรือน้ำท่วมโดยจะศึกษาในเรื่องธาตุโลหะ โดยจะนำต้น Common Reed มาปลูกไว้สารละลายที่มีระดับ pH เท่ากับ 3.0, 4.0, 5.0 และ 6.5 พบว่า pH ของน้ำจะมีส่วนสำคัญที่จะควบคุมการดูดซึมธาตุสังกะสี เมื่อ pH มากกว่าหรือเท่ากับ 5.0 และ pH ของน้ำจะไม่มีผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อฟอสฟอรัส [4]

2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับแบบจำลองการเจริญเติบโตของพืช

ในปี ค.ศ. 1968 Aristid Lindenmayer ได้เสนอ L-system ซึ่งเป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์ (Mathematics Formalism) ที่สามารถนำมาจำลองการเติบโตของพืชได้ ในปี ค.ศ. 1984 Alvy Ray Smith นักวิจัยด้านคอมพิวเตอร์กราฟิกได้แสดงว่า L-system สามารถนำไปใช้สร้างภาพนามธรรมของต้นไม้ที่เสมือนจริง [5]

ในปี ค.ศ. 1999 Meyer และ Ausubel ได้เสนอแบบจำลองการเติบโตแบบใหม่ที่เรียกว่าแบบจำลองการเติบโตแบบมัลติกลอจิสติก ซึ่งสามารถอธิบายการเติบโตของพืชได้ดีกว่าแบบจำลองลอจิสติก เนื่องจากอธิบายการเติบโตของพืชได้ทั้งแบบง่ายและการเติบโตแบบซับซ้อน [6]

Somporn Chuai-Aree Suchada Siripant และ Chidchanok Lursinsap ได้ใช้ Parametric Bracketed L-system มาสร้างแบบจำลองการเติบโตของต้นถั่วเหลืองซึ่งควบคุมการการเติบโตของพืชตลอดช่วงเวลาการเติบโต โดยใช้ข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองมาสร้างแบบจำลอง [7]

Anuchit Jitpattanakul Suchada Siripant และ Chidchanok Lursinsap ได้เสนอตัวแบบ Multi-logistic เป็นแบบจำลองการเจริญเติบโตในภาวการณ์ขาดน้ำของถั่วเหลือง การวิเคราะห์การถดถอย และสร้างภาพนามธรรมของการเจริญเติบโตในภาวะการขาดน้ำของถั่วเหลือง โดยใช้ข้อมูลการเจริญเติบโตจากแบบจำลองที่ได้ [8]

บทที่ 3
ทฤษฎีพื้นฐาน

ในการศึกษาวิจัยในด้านใดด้านหนึ่งนั้น ผู้ทำการวิจัยจะต้องศึกษาเกี่ยวกับความรู้พื้นฐานและเอกสารความรู้ต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นกับงานวิจัยนั้นๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น บทนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานที่ใช้ในการทำงานวิจัยคือ มาตราของ pH แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการเจริญเติบโตของพืช ที่เรียกว่า แบบจำลองการเติบโต (Growth model) ส่วนต่อไปจะกล่าวถึงวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear Regression Analysis) และจะหาค่าพารามิเตอร์ของสมการถดถอยไม่เชิงเส้นโดยวิธีกำลังสองน้อยสุดไม่เชิงเส้น (Non-Linear Least Square Regression)โดยใช้ วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ครอดท์ (Levenberg-Marquardt) สำหรับแก้สมการระบบสมการไม่เชิงเส้น และส่วนต่อไปจะกล่าวถึงระบบไฮโดรโปนิกส์ (Hydroponic Systems) เป็นการปลูกพืชบนสารละลายธาตุอาหารหรือที่เรียกกันว่า ปลูกพืชไร้ดิน ส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks)

3.1 มาตราของ pH

ตามหลักการทางเคมีนั้นการแตกตัวแบบผันกลับได้ของน้ำเป็นดังนี้

$$H_2O \quad \Leftrightarrow \quad H^+ + OH^-$$

ค่าคงที่เมื่อปฏิกิริยาอยู่ในภาวะสมดุล (Keq) คำนวณได้จากสูตร

$$Keq = \frac{[H^+][OH^-]}{[H_2O]}$$

เมื่อ $[H^+],[OH^-]$ และ $[H_2O]$ คือความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน, ไฮดรอกซิลไอออน และน้ำ มีหน่วยเป็นโมลาร์

สำหรับน้ำบริสุทธิ์มีข้อมูลดังนี้

- การแตกตัวน้อยมาก กล่าวคือทุก ๆ 10^7 โมเลกุลจะมีการแตกตัวเพียง 1 โมเลกุลเท่านั้น และน้ำ 1 ลิตรมีความเข้มข้น 55.5 โมลาร์

- ค่าคงที่เมื่อปฏิกิริยาอยู่ในภาวะสมดุลเท่ากับ 1.8×10^{-16} โมลาร์ จึงสามารถนำข้อมูลมาแทนค่าในสูตรข้างต้นได้ดังนี้

$$1.8\times10^{-16} = \frac{[H^+][OH^-]}{55.5}$$

$$\text{หรือ } [H^+][OH^-] = 1.8\times10^{-16}\times55.5$$
$$= 1\times10^{-14} \text{ (โมลาร์)}^2$$

สำหรับ $[H^+][OH^-]$ นั้นคือผลคูณของไอออนซึ่งเกิดจากการแตกตัวของน้ำ (Kw) จะมีค่าเท่ากับ 10^{-14} (โมลาร์)^2 เสมอ และน้ำบริสุทธิ์ซึ่งเป็นกลางย่อมมี $[H^+]$ เท่ากับ $[OH^-]$ หรือต่างก็มีความเข้มข้นเท่ากับ 10^{-7} โมลาร์ เมื่อใดก็ตามที่ $[H^+]$ ในสารละลายเพิ่มขึ้น $[OH^-]$ ก็ย่อมลดลง ในทางกลับกันถ้า $[OH^-]$ ในสารละลายเพิ่มขึ้น $[H^+]$ ก็ย่อมลดลงเช่นกัน สำหรับสารละลายที่มี $[H^+]$ มากกว่า 10^{-7} โมลาร์ถือว่าเป็นกรด แต่ถ้าต่ำกว่า 10^{-7} โมลาร์ถือว่าเป็นด่าง

มาตราพีเอช (pH scale) pH มาจากคำว่า positive potential of the hydrogen ions คือมาตราที่บ่งบอกเป็นตัวเลขและตัวเลขนั้นสัมพันธ์กับความเข้มข้นของ ในสารละลาย ซึ่งได้มาจากสูตร

$$pH = -\log[H^+]$$

ถ้า $[H^+]$ ในสารละลายมีค่าเท่ากับ 10^{-5} โมลาร์

$$pH = -\log[10^{-5}]$$
$$= 5$$

ในทำนองเดียวกันอาจแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $[H^+]$,pH, $[OH^-]$และ Kw ได้ตามตารางที่ 3.1 จากตารางนี้มีข้อสังเกตว่าสารละลาย 2 อย่าง ซึ่งมี pH เท่ากับ 5 และ 7 นั้น ค่า pH แตกต่างกันเพียง 2 หน่วยก็จริง แต่สารละลายซึ่งมี pH 5 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนมีมากกว่าสารละลายที่มี pH 7 ถึง 100 เท่า ดังนี้

pH ของสารละลาย	$[H^+]$ โมลาร์	ความเข้มข้นของ $[H^+]$ สูงกว่าสารละลายที่มี pH 7
7	10^{-7}	
6	10^{-6}	10 เท่า
5	10^{-5}	100 เท่า
4	10^{-4}	1000 เท่า
3	10^{-3}	10000 เท่า

$[H^+]$ โมลาร์	pH	$[OH^-]$ โมลาร์	Kw (โมลาร์)^2
10^0	0	10^{-14}	10^{-14}
10^{-1}	1	10^{-13}	10^{-14}
10^{-2}	2	10^{-12}	10^{-14}
10^{-3}	3	10^{-11}	10^{-14}
10^{-4}	4	10^{-10}	10^{-14}
10^{-5}	5	10^{-9}	10^{-14}
10^{-6}	6	10^{-8}	10^{-14}
10^{-7}	7	10^{-7}	10^{-14}
10^{-8}	8	10^{-6}	10^{-14}
10^{-9}	9	10^{-5}	10^{-14}
10^{-10}	10	10^{-4}	10^{-14}
10^{-11}	11	10^{-3}	10^{-14}
10^{-12}	12	10^{-2}	10^{-14}
10^{-13}	13	10^{-1}	10^{-14}
10^{-14}	14	10^0	10^{-14}

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง $[H^+]$, pH, $[OH^-]$ และ Kw

ปฏิกิริยาดิน หมายถึง ระดับขั้นของสภาพกรด หรือสภาพด่างของดิน ซึ่งแสดงด้วยค่า pH ของดิน ดังนี้

pH	สภาพกรดหรือสภาพด่างของดิน
< 3.5	กรดรุนแรงมากที่สุด (Ultra acid)
3.5 – 4.5	กรดรุนแรงมาก (extremely acid)
4.6 – 5.0	กรดจัดมาก (very strongly acid)
5.1 – 5.5	กรดจัด (strongly acid)
5.6 – 6.0	กรดปานกลาง (moderately acid)
6.1 – 6.5	กรดเล็กน้อย (slightly acid)
6.6 – 7.3	กลาง (neutral)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

pH	สภาพกรดหรือสภาพด่างของดิน
7.4 – 7.8	ด่างเล็กน้อย (slightly alkaline)
7.9 – 8.4	ด่างปานกลาง (moderately alkaline)
8.5 – 9.0	ด่างจัด (strongly alkaline)
> 9.0	ด่างจัดมาก (very strongly alkaline)

ตารางที่ 3.2 ระดับขั้นของสภาพกรดหรือสภาพด่างของดิน

3.2 แบบจำลองการเติบโต (Growth Model)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้ เป็นแบบจำลองที่มาจากสมการเชิงเส้นอนุพันธ์สามัญ (Ordinary Differential Equation) โดยจะกล่าวถึงแบบจำลองการเติบโตแบบมัลติลอจิสติกโดยพัฒนามาจากแบบจำลองการเจริญเติบโตแบบเอกซ์โปเนนเชียลและแบบจำลองการเติบโตแบบลอจิสติก ตามลำดับ

แบบจำลองการเติบโตแบบเอกซ์โปเนนเชียล เป็นแบบจำลองที่ง่ายและใช้กันอย่างกว้างขวางในยุคแรก ซึ่งเป็นการเจริญเติบโตแบบไม่มีขอบเขต ดังแสดงในรูป 3.1 อัตราการเติบโตของจำนวนประชากร $\frac{dG(t)}{dt}$ ที่เวลา t เป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนประชากร $G(t)$ เขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{dG(t)}{dt} \propto G(t) \tag{3.1}$$

ดังนั้นแบบจำลองการเติบโตแบบเอกซ์โปเนนเชียล เขียนในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ได้ดังนี้

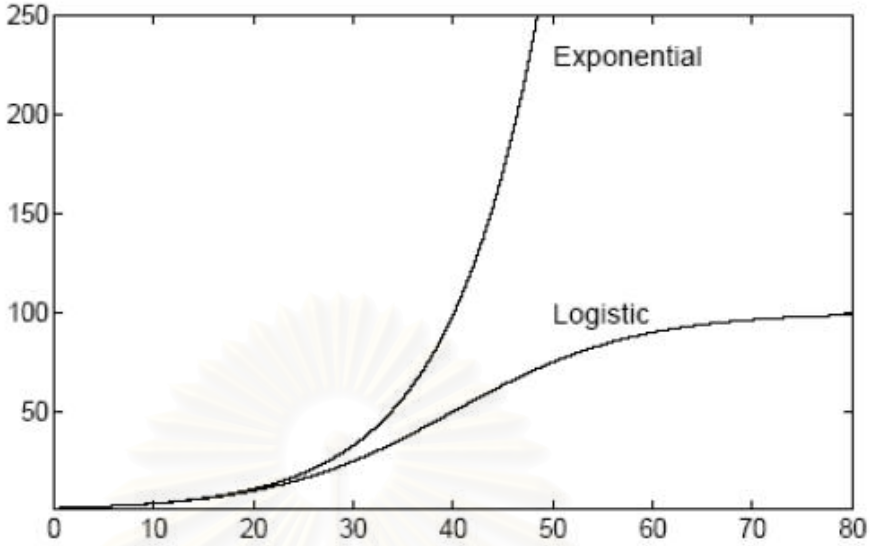
$$\frac{dG(t)}{dt} = \alpha\, G(t) \tag{3.2}$$

จากสมการที่ 3.2 แก้สมการแล้วเขียนอยู่ในฟังก์ชันของ $G(t)$ ได้ดังนี้

$$G(t) = \beta\, e^{\alpha t} \tag{3.3}$$

โดยที่ α คือ อัตราการเติบโตของประชากร

β คือ จำนวนประชากรเริ่มต้น $G(0)$



รูปที่ 3.1 การเติบโตแบบเอกซ์โปเนนเชียลและแบบลอจิสติก

จากสมการที่ 3.3 จะทำให้มีการเพิ่มขึ้นของประชากรของสิ่งมีชีวิตไปเรื่อย ๆ และไม่มีขอบเขตการเติบโตหรือค่าจำกัดการเติบโต ทำให้ไม่สามารถใช้กับประชากรของสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่ซึ่งมีขอบเขตการเติบโตได้ ด้วยเหตุนี้จึงต้องทำการปรับปรุงสมการที่ 3.3 ให้มีขอบเขตการเติบโตซึ่งเส้นโค้งที่ได้จะมีลักษณะตัวเอส (Sigmoidal Shape) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และจะได้แบบจำลองเติบโตที่ปรับปรุงใหม่ว่า แบบจำลองการเติบโตแบบลอจิสติก (Logistic Growth Model) [8], [9]

แบบจำลองการเติบโตแบบลอจิสติก เริ่มต้นการเพิ่มเทอม negative feedback $\left(1-\frac{G(t)}{K}\right)$ ซึ่งทำให้อัตราการเติบโตของประชากรลดลงเมื่อเข้าใกล้ค่าจำกัดการเติบโต K

$$\frac{dG(t)}{dt} = \alpha\, G(t)\left(1-\frac{G(t)}{K}\right) \tag{3.4}$$

สังเกตได้ว่าค่า feedback term $\left(1-\frac{G(t)}{K}\right)$ มีค่าเข้าใกล้ 1 เมื่อ $G(t)$ น้อยกว่า K มาก ๆ และเข้าใกล้ศูนย์เมื่อ $G(t)$ เข้าใกล้ K ดังนั้นอัตราการเติบโตจึงเป็นแบบเอกซ์โปเนนเชียลในช่วงแรกของการเติบโต แต่จะลดลงจนกระทั่งเป็นศูนย์เมื่อประชากรเข้าใกล้ค่าจำกัดการเติบโต K จึงส่งผลทำให้เส้นโค้งเป็นรูปเอส

เมื่อนำสมการเชิงอนุพันธ์ มาหาผลเฉลยจะได้รูปแบบดังนี้

$$G(t) = \frac{K}{1+\exp(-\alpha(t-\beta))} \tag{3.5}$$

โดยที่ G คือ การเติบโต

t คือ เวลา

K, α และ β คือ พารามิเตอร์ของการเจริญเติบโต

พารามิเตอร์การเติบโต α จะระบุถึงความกว้างของเส้นโค้ง เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ และง่ายต่อการนำไปใช้เพื่ออธิบายการเติบโตของพืช จึงเปลี่ยนพารามิเตอร์ α ให้อยู่ในรูป Δt ซึ่งหมายถึงช่วงเวลาการเติบโตจาก 10 % ถึง 90 % ของค่าจำกัดการเติบโต K จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง α และ Δt คือ

$$\alpha = \frac{\ln(81)}{\Delta t} \tag{3.6}$$

นำค่า α จากสมการที่ 3.6 แทนลงในสมการที่ 3.5 จะได้

$$G(t) = \frac{K}{1+\exp\left(-\frac{\ln(81)}{\Delta t}(t-\beta)\right)} \tag{3.7}$$

พารามิเตอร์ β เป็นตัวกำหนดระยะเวลาการเติบโตที่มีอัตราการเติบโตมากที่สุดที่ $\frac{1}{2}K$ เราจึงเปลี่ยนพารามิเตอร์ β ให้อยู่ในรูปของ t_m หมายถึงเวลาที่มีอัตราการเติบโตมากที่สุดจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง β และ t_m คือ

$$\beta = t_m \tag{3.8}$$

นำค่า β จากสมการที่ 3.8 แทนลงในสมการที่ 3.7 จะได้แบบจำลองการเติบโตแบบลอจิสติกใหม่คือ

$$G(t) = \frac{K}{1+\exp\left(-\frac{\ln(81)}{\Delta t}(t-t_m)\right)} \tag{3.9}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.1 แบบจำลองการเติบโตแบบมัลติลอจิสติก (Multi-Logistic Growth Model)

ในธรรมชาติ การเติบโตของพืชในช่วงเวลาหนึ่งอาจมีกระบวนการเติบโตเกิดขึ้นพร้อมกันมากกว่าหนึ่งกระบวนการ ด้วยเหตุผลนี้เองแบบจำลองการเติบโตแบบลอจิสติกจึงไม่สามารถนำมาใช้อธิบายกระบวนการเติบโตที่ซับซ้อนได้

แบบจำลองแบบมัลติลอจิสติก เป็นแบบจำลองที่รวมเอาแบบจำลองการเติบโตแบบลอจิสติกแบบง่ายมาไว้ด้วยกัน ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$G(t) = \sum_{i=1}^{n} G_i(t) \tag{3.10}$$

โดยที่ $G_i(t)$ หมายถึงการเติบโตช่วงที่ i ของการเติบโตทั้งหมด n ช่วง แสดงได้ดังนี้

$$G_i(t) = \frac{K_i}{1+\exp\left(-\frac{\ln(81)}{\Delta t_i}(t-t_{mi})\right)} \tag{3.11}$$

ค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองการเติบโตแบบมัลติลอจิสติก หาได้จากวิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นดังที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

อ่านรายละเอียดแบบจำลองการเติบโตเพิ่มเติมได้ที่รายการเอกสารอ้างอิงที่ [6], [7], [8] และ [9]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอย เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป และเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างตัวแปร 2 กลุ่ม คือตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น (independent variable) และตัวแปรตาม (dependent variable) และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์โดยเพียงอาศัยทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง แต่ส่วนมากแล้วความสัมพันธ์นั้น ๆ มักจะอยู่ในลักษณะที่ค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อน จึงต้องมีการประมาณลักษณะความสัมพันธ์อยู่ในสมการแบบไหน

3.3.1 การวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear Regression Analysis)

ข้อมูลต่าง ๆ ในงานวิจัยสำหรับทางด้านวิทยาศาสตร์ ด้านวิศวกรรมศาสตร์ และเกษตรศาสตร์ ลักษณะของข้อมูลส่วนมากจะมีความสัมพันธ์ไม่ได้อยู่ในรูปเชิงเส้น

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามที่มีความสัมพันธ์ในรูปแบบไม่เชิงเส้น เขียนอยู่ในรูปแบบสมการถดถอยได้ดังนี้

$$y = y(x;a) \tag{3.12}$$

โดยที่ y คือ ตัวแปรตามของสมการถดถอย

x คือ ตัวแปรอิสระของสมการถดถอย

a คือ พารามิเตอร์สมการถดถอย

3.3.2 การหาค่าพารามิเตอร์ของสมการการถดถอย

ในการวิเคราะห์การถดถอย นอกจากจะต้องทราบว่าตัวแปรใดเป็นตัวแปรตามหรือตัวแปรอิสระแล้ว ผู้วิเคราะห์จะต้องกำหนดรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระให้ถูกต้องเหมาะสมกับความเป็นจริง เมื่อกำหนดรูปแบบความสัมพันธ์ทั้งสองตัวแปรได้แล้ว ผู้วิเคราะห์จะทำการประมาณค่าคงที่ของความสัมพันธ์ของตัวแปรนั้นซึ่งเรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์หรือค่าพารามิเตอร์ของสมการการถดถอย

สำหรับวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์หรือค่าพารามิเตอร์ของสมการการถดถอย ที่นิยมที่สุดคือวิธีกำลังสองน้อยสุด และในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีกำลังสองน้อยสุดไม่เชิงเส้นและจะใช้วิธี Levenberg-Marquardt Method ซึ่งเป็นที่นิยมในการหาสัมประสิทธิ์หรือค่าพารามิเตอร์ของสมการการถดถอยไม่เชิงเส้น

3.3.3 วิธีกำลังสองน้อยสุดไม่เชิงเส้น (Non-Linear Least Square Regression)

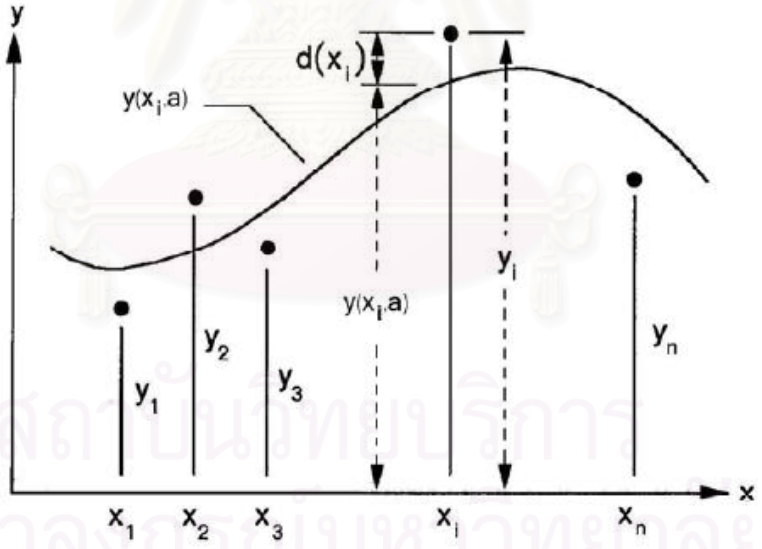
การหาค่าพารามิเตอร์ของสมการถดถอยโดยวิธีกำลังสองน้อยสุดเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก โดยพิจารณาจากการหาพารามิเตอร์ที่ทำให้มีค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองน้อยสุด

สมมติว่าต้องการหาสมการที่แทนข้อมูลจำนวน n จุด $(x_i, y_i); i = 1,2,..,n$ โดยมีพารามิเตอร์ที่ต้องการหา m ตัว คือ $a_j; j = 1,2,...,n$ เพื่อที่จะหาสมการถดถอยที่แทนความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ x กับตัวแปรตาม y จากสมการที่ 3.12 คือ

$$y = y(x_i; a) \tag{3.13}$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ a ในสมการที่ 3.12 แล้วนำสมการที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่กำหนดให้ พบว่าเกิดความคลาดเคลื่อน $d(x_i)$ ที่จุด x_i ดังแสดงในรูป 3.2 โดยที่ค่า $d(x_i)$ คือ

$$d(x_i) = y_i - y(x_i; a) \tag{3.14}$$



รูปที่ 3.2 ค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละจุด (x_i, y_i)

สมการที่หาได้ทำให้เกิด ค่าความผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุดจากข้อมูลทั้งหมดที่กำหนดให้ ขั้นตอนในการหาสมการถดถอยไม่เชิงเส้นนี้ เริ่มจากการหาค่าความคลาดเคลื่อน E ที่เกิดจากข้อมูลจำนวน n ข้อมูลในรูปแบบดังนี้

$$E = \sum_{i=1}^{n}\left[d(x_i)\right]^2 \tag{3.15}$$

ซึ่งสามารถเขียนให้ประกอบด้วยฟังก์ชันไม่เชิงเส้น ดังนี้

$$E(a) = \sum_{i=1}^{n}\left[y_i - y(x_i;a)\right]^2 \tag{3.16}$$

โดยที่ y_i เป็นตัวแปรตามที่ได้จากข้อมูลตัวที่ i

x_i เป็นตัวแปรอิสระที่ได้จากข้อมูลตัวที่ i

y เป็นตัวแปรตามที่ได้จากสมการถดถอยโดยมีพารามิเตอร์ a

a เป็นพารามิเตอร์การถดถอย

3.3.4 วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ครอดท์ (Levenberg-Marquardt Method)

การแก้สมการไม่เชิงเส้นเพื่อหาพารามิเตอร์ของ $a_1, a_2, ..., a_m$ รวมทั้งสิ้น m ค่า นั้นทำได้หลายวิธี ในงานวิจัยนี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะวิธี Levenberg-Marquardt

วิธี Levenberg-Marquardt Method เป็นวิธีที่เหมาะสมและนิยมใช้สำหรับการแก้สมการไม่เชิงเส้น เพื่อหาพารามิเตอร์ที่ต้องการ มีวิธีดังนี้

กำหนดให้ฟังก์ชันความคลาดเคลื่อนคือ $E(a)$ และเขียนอยู่ในรูปอนุกรมเทร์เลอร์ได้ดังนี้

$$E(a_{n+1}) \approx E(a_n) + \nabla E(a_n)^T \cdot (a_{n+1} - a_n) + \frac{1}{2}(a_{n+1} - a_n)^T \cdot \nabla^2 E(a_n) \cdot (a_{n+1} - a_n) + .. \tag{3.17}$$

โดยที่ $\nabla E(a_n) = \begin{bmatrix} \frac{\partial E(a_n)}{\partial a_{1n}} \\ \frac{\partial E(a_n)}{\partial a_{2n}} \\ \frac{\partial E(a_n)}{\partial a_{1n}} \\ \vdots \\ \frac{\partial E(a_n)}{\partial a_{mn}} \end{bmatrix}$

$$\nabla^2 E(a_n) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 E(a_n)}{\partial a_{1n}\partial a_{1n}} & \frac{\partial^2 E(a_n)}{\partial a_{1n}\partial a_{2n}} & \frac{\partial^2 E(a_n)}{\partial a_{1n}\partial a_{3n}} & \cdots & \frac{\partial^2 E(a_n)}{\partial a_{1n}\partial a_{mn}} \\ \frac{\partial^2 E(a_n)}{\partial a_{2n}\partial a_{1n}} & \frac{\partial^2 E(a_n)}{\partial a_{2n}\partial a_{2n}} & \frac{\partial^2 E(a_n)}{\partial a_{2n}\partial a_{3n}} & \cdots & \frac{\partial^2 E(a_n)}{\partial a_{2n}\partial a_{mn}} \\ \frac{\partial^2 E(a_n)}{\partial a_{3n}\partial a_{1n}} & \frac{\partial^2 E(a_n)}{\partial a_{3n}\partial a_{2n}} & \frac{\partial^2 E(a_n)}{\partial a_{3n}\partial a_{3n}} & \cdots & \frac{\partial^2 E(a_n)}{\partial a_{3n}\partial a_{mn}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \frac{\partial^2 E(a_n)}{\partial a_{mn}\partial a_{1n}} & \frac{\partial^2 E(a_n)}{\partial a_{mn}\partial a_{2n}} & \frac{\partial^2 E(a_n)}{\partial a_{mn}\partial a_{3n}} & \cdots & \frac{\partial^2 E(a_n)}{\partial a_{mn}\partial a_{mn}} \end{bmatrix}$$

จากสมการเขียนให้อยู่ในรูปเกรเดียนต์เวกเตอร์ (Gradient vector) g และเฮสเซียนเมตริกซ์ (Hessian matrix) H ได้ดังนี้

$$E(a_{n+1}) = E(a_n) + g^T \cdot (a_{n+1} - a_n) + \frac{1}{2}(a_{n+1} - a_n)^T \cdot H \cdot (a_{n+1} - a_n) \qquad (3.18)$$

โดยที่ g คือเวกเตอร์อนุพันธ์ย่อยอันดับหนึ่งของ $E(a_n)$

H คือเวกเตอร์อนุพันธ์ย่อยอันดับสองของ $E(a_n)$

สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ a ที่ทำให้มีค่าความคลาดเคลื่อน $E(a)$ น้อยที่สุด ทำได้โดยการหาอนุพันธ์เทียบ a_n ได้ดังนี้

$$\frac{\partial E(a_{n+1})}{\partial a_n} = \frac{\partial E(a_n)}{\partial a_n} + \frac{\partial g^T \cdot (a_{n+1} - a_n)}{\partial a_n} + \frac{1}{2}\frac{\partial (a_{n+1} - a_n)^T \cdot H \cdot (a_{n+1} - a_n)}{\partial a_n}$$

$$0 = \frac{\partial E(a_n)}{\partial a_n} + g^T \cdot (-1) + H \cdot (a_{n+1} - a_n)(-1)$$

พิจารณาจุดต่ำสุดโดยให้ $\frac{\partial E(a_n)}{\partial a_n} = 0$ จะได้

$$0 = g^T + H \cdot (a_{n+1} - a_n)$$

จะได้

$$a_{n+1} = a_n - H^{-1} g \qquad (3.19)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิจารณาเทอม $H^{-1}g$ ในสมการที่ 3.19 พบว่าเทอม $H^{-1}g$ คือค่า Step size หรือขนาดที่เปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ a ในแต่ละรอบการทำซ้ำ Levenberg-Marquardt เสนอให้เปลี่ยนเทอม $H^{-1}g$ เป็น $(H+\lambda I)^{-1}g$ เพื่อลดจำนวนรอบการทำซ้ำ คือเมื่อค่า λ มากทำให้ Step size จะมีขนาดใหญ่ ซึ่งส่งผลให้จำนวนรอบในการทำซ้ำลดลง สมการใหม่ที่ได้มีรูปแบบดังนี้

$$a_{n+1} = a_n - (H+\lambda I)^{-1} g \tag{3.20}$$

โดย λ จะเปลี่ยนไปทุกรอบการทำซ้ำขึ้นอยู่กับค่า $E(a)$

เมื่อพิจารณาเทอม H จะมีความยุ่งยากในการหาค่า Different อันดับที่ 2 จากรายการอ้างอิงที่ [10]

เราจะพิจารณาจากสมการที่ 3.15 จะได้

$$\left[\nabla E(a_n)\right]_j = \frac{\partial E(a_n)}{\partial a_j} \tag{3.21}$$

$$= 2\sum_{i=1}^{N} d(x_i)\cdot\frac{\partial d(x_i)}{\partial a_j} \tag{3.22}$$

จะเขียนเกรเดียนต์เวกเตอร์ (Gradient vector) g ได้ดังนี้

$$g = 2Jd(x_i) \tag{3.23}$$

โดยที่ J คือจาโคเบียนเมตริกซ์

ต่อไปจะหาเฮสเซียนเมตริกซ์ (Hessian matrix) H ดังนี้

$$\left[\nabla^2 E(a_n)\right]_{j,k} = \frac{\partial^2 E(a_n)}{\partial a_j \partial a_k} \tag{3.24}$$

$$= 2\sum_{i=1}^{n}\left\{\frac{\partial d(x_i)}{\partial a_j}\frac{\partial d(x_i)}{\partial a_j} + d(x_i)\frac{\partial^2 d(x_i)}{\partial a_j \partial a_k}\right\} \tag{3.25}$$

จะเขียนหาเฮสเซียนเมตริกซ์ (Hessian matrix) H ดังนี้

$$H \quad = \quad 2J \cdot J^T + S \tag{3.26}$$

โดยที่ $S = \sum_{i=1}^{n} d(x_i) \cdot \nabla^2 d(x_i)$

ค่า S จะเป็นค่าที่มีค่าน้อยมากดังนั้นจะหาเฮสเซียนเมตริกซ์ (Hessian matrix) H ได้ดังนี้

$$H \quad \cong \quad 2J \cdot J^T \tag{3.27}$$

จากสมการที่ 3.20 จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$a_{n+1} \quad = \quad a_n - \left(2J \cdot J^T + \lambda I\right)^{-1} J \tag{3.28}$$

ขั้นตอนวิธีการหาค่าพารามิเตอร์โดยวิธี Levenberg-Marquardt

กำหนดฟังก์ชันความคลาดเคลื่อนกำลังสอง

$$E(a) \quad = \quad \sum_{i=1}^{n} \left[y_i - y(x_i; a)\right]^2$$

ขั้นที่ 1 กำหนดค่า $tol = 10^{-10}$

ขั้นที่ 2 กำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น a_0

ขั้นที่ 3 คำนวณค่าความคลาดเคลื่อน $E(a)$

ขั้นที่ 4 กำหนด $\lambda = 0.001$

ขั้นที่ 5 คำนวณ a_{n+1} จากสมการที่ 3.17

ขั้นที่ 6 ตรวจสอบเงื่อนไข

- ถ้า $E(a_{n+1}) \geq E(a_n)$ แล้วให้ $\lambda = \lambda \cdot 10$ จากนั้นทำขั้นที่ 4
- ถ้า $E(a_{n+1}) < E(a_n)$ แล้วให้ $\lambda = \lambda / 10$ และ $a_{n+1} = a_n$ จากนั้นทำขั้นที่ 4
- ถ้าค่า $E(a_{n+1}) \leq tol$ หรือ $\left|E(a_{n+1}) - E(a_n)\right| \leq tol$ ให้จบการทำงาน

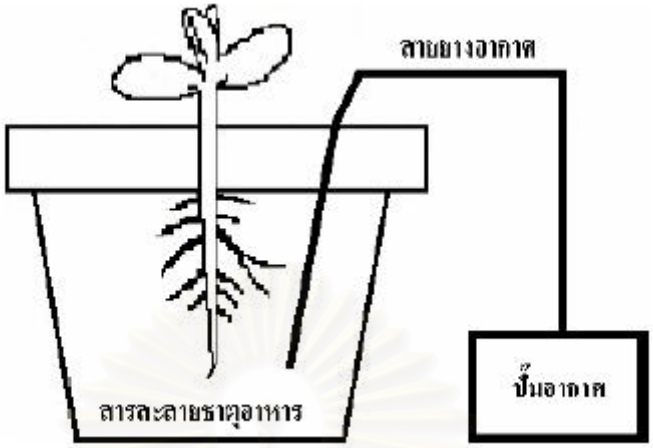
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 ระบบไฮโดรโปนิกส์ (Hydroponic Systems)

ไฮโดรโปนิกส์ (hydroponics) เป็นคำที่มาจากภาษากรีก 2 คำ คือคำว่า hydro ซึ่งแปลว่า น้ำ และคำว่า ponos แปลว่าทำงานหรือแรงงาน เมื่อรวมกันจึงมีความหมายว่าการทำงานที่เกี่ยวข้องกับน้ำ และไฮโดรโปนิกส์ เป็นวิธีการปลูกผักที่อาศัยหลักการคล้ายคลึงกันกับการปลูกผักแบบธรรมดา แต่แทนที่จะใช้ดินเป็นวัสดุปลูก กลับเป็นการให้พืชเจริญเติบโตโดยรากสามารถดูดธาตุอาหารที่ละลายในน้ำโดยตรง มีการพัฒนาปรับปรุงวิธีการเพื่อให้สามารถทำการปลูกผักในลักษณะแถวชิดได้ สามารถปลูกผักได้ในบริเวณบ้านที่มีพื้นที่จำกัด หรือในบริเวณที่พื้นที่ดินเดิมขาดความอุดมสมบูรณ์ก็ได้ โดยไม่จำเป็นต้องปรับปรุงสภาพพื้นที่ดินเดิม เนื่องจากสภาพพื้นที่ที่ใช้ปลูกมีการให้ธาตุอาหารในลักษณะของสารละลายผ่านระบบการปลูกพืชผัก โดยที่ระบบรากพืชไม่ได้สัมผัสกับดินจริงๆ แต่ต้นผักเจริญเติบโตและตั้งทรงต้นอยู่บนภาชนะปลูกได้ โดยระบบรากยึดอยู่กับแผ่นฟองน้ำ ที่วางอยู่ในรางปลูก หรือที่ใช้แผ่นโฟมขนาดใหญ่ตั้งเป็นฐานของรางปลูกที่ใช้ หรือใช้วัสดุปลูกเป็นก้อนดินเผาขนาดเล็กอัดเป็นเม็ด หรือใช้วัสดุประเภทเพอร์ไลท์หรือแผ่นใย สังเคราะห์แทนดินปลูกก็ได้และสถานที่เพาะปลูกควรเป็นเรือนกระจกหรือสถานที่ที่มีหลังคากันฝนและได้รับแสงอย่างเพียงพอ

การปลูกพืชในสารละลาย เพื่อศึกษาว่าธาตุใดบ้างที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช นักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้ทำการปรับปรุงสูตรของน้ำยาไฮโดรโปนิกส์ให้เหมาะสมกับพืช ในปัจจุบันสูตรสารละลายธาตุอาหารที่นิยมใช้เป็นสูตรของ Hoagland ซึ่งค้นพบโดยนักสรีรวิทยาของพืชชาวอเมริกัน ชื่อ Hoagland ในปี ค.ศ.1950 พืชชั้นสูงโดยทั่วไปต้องการธาตุอาหารที่จำเป็นทั้งหมด 16 ธาตุ ประกอบด้วยธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณมาก (macronutrient elements) 9 ธาตุ คือ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และกำมะถัน (S) ส่วนธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณน้อย (micronutrient elements) 7 ธาตุ คือ เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) โบรอน (B) โมลิบดีนัม (Mo) และ คลอรีน (Cl)

ในการปลูกพืชในสารละลายธาตุอาหาร ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และในการปลูกพืชในสารละลายธาตุอาหารนั้นควรตรวจดูปริมาตรของสารละลายในภาชนะทุก ๆ วัน เมื่อปริมาตรสารละลายลดลงควรเติมน้ำกรอง ในแต่ละวันพืชจะดูดธาตุอาหารในสารละลายทำให้ในสารละลายจะมีธาตุอาหารลดลงไปเรื่อยๆ ดังนั้นเมื่อครบทุกๆ สัปดาห์ควรทำการเปลี่ยนสารละลายธาตุอาหารอยู่เป็นประจำเพื่อให้สารละลายมีธาตุอาหารอยู่ครบ [11]



รูปที่ 3.3 การปลูกพืชในสารละลายธาตุอาหาร

วัสดุและอุปกรณ์

1. ต้นอ่อนของพืช

2. กระถางพลาสติกทึบแสงเพื่อไม่ให้สารละลายธาตุอาหารได้รับแสงเพราะจะทำให้สาหร่ายเจริญเติบโตได้ดีซึ่งจะไปแย่งธาตุอาหาร

3. ฝาปิดกระถางโดยทั่วไปจะใช้โฟมให้เจาะรูช่องใหญ่ตรงกลางและช่องเล็ก

4. เครื่องปั๊มอากาศ สายอากาศ และตัวปรับระดับอากาศเพื่อให้อากาศแก่ราก เพื่อให้รากได้รับออกซิเจนอย่างเพียงพอ

5. ฟองน้ำ

6. สารละลายเข้มข้น(Stock Solution) เพื่อใช้เป็นส่วนผสมสำหรับเป็นธาตุอาหารสูตร Hoagland มีส่วนผสมของสารสะลายเข้มข้นแสดงในตารางที่ 3.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Stock Solution	สารเคมีที่ใช้	ปริมาณ (กรัม)	ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรจนเป็น
1M calcium nitrate	$Ca(NO_3)_2.4H_2O$	236.1	1 ลิตร
1M magnesium sulfate	$MgSO_4.7H_2O$	246.5	1 ลิตร
1M potassium dihydrogen phosphate	KH_2PO_4	136.09	1 ลิตร
1M potassium nitrate	KNO_3	101.1	1 ลิตร
Fe-EDTA (2.5 mg/ml Fe)	EDTA disodium salt $(C_{10}H_{14}O_8Na_2.2H_2O)$	22.4	372 มิลลิลิตร
	$FeCl_3.6H_2O$	13.5	628 มิลลิลิตร
			เทสารละลายทั้งสองผสมกันทีละน้อยจนกระทั่งเป็นเนื้อเดียว
Micronutrient	H_3BO_3	2.86	1 ลิตร
	$CuCl_2.2H_2O$	0.05	
	$MnCl_2.4H_2O$	1.81	
	$ZnCl_2$	0.11	
	$Na_2MoO_4.2H_2O$	0.025	

ตารางที่ 3.3 วิธีการเตรียมสารละลายเข้มข้น (Stock Solution) สำหรับสูตร Hoagland [11]

วิธีการปลูกพืชในสารละลาย

1. เตรียม stock solution ได้แก่ calcium nitrate, magnesium sulfate, potassium dihydrogen phosphate, potassium nitrate, Fe-EDTA และ Micronutrient

2. เตรียมสารละลายที่มีธาตุอาหารสมบูรณ์สูตรของ Hoagland จาก Stock Solution ในข้อ 1 โดยมีปริมาตรของสาร ดังแสดงในตารางที่ 3.4

3. นำสารละลายธาตุอาหารที่ได้จากข้อ 2 ใส่ลงกระถางพลาสติก

4. นำต้นอ่อนพืชที่เตรียมไว้มาปลูก โดยใส่รากให้ผ่านรูช่องใหญ่ตรงกลางของฝากระถาง พร้อมกับยึดลำต้นพืชด้วยฟองน้ำ อย่าให้แน่นหรือหลวมเกินไป แล้วนำฝากระถางที่มีต้นพืชใส่ลงในกระถางพลาสติกที่มีสารละลายธาตุอาหาร นำกระถางไปตั้งในเรือนกระจกหรือสถานที่มีหลังคากันฝนและมีแสงอย่างเพียงพอ

5. ใส่สายอากาศลงในสารละลายตรงช่องเล็กของฝากระถาง พร้อมปรับอากาศให้พ่นเพียงเบาๆ

6. ทุกวันคอยตรวจดูปริมาตรสารละลาย หากพบว่าปริมาตรของสารละลายลดลงควรเติมน้ำกรอง

7. เมื่อครบ 1 สัปดาห์ควรทำการเปลี่ยนสารละลายธาตุอาหารใหม่

8. สำหรับต้นพืชบางชนิดเมื่อต้นพืชมีอายุมากจะทำให้ลำต้นสูงขึ้นไปเรื่อยและจะทำต้นพืชโน้มเอียงได้ จึงหาไม้มาค้ำต้นพืชเอาไว้

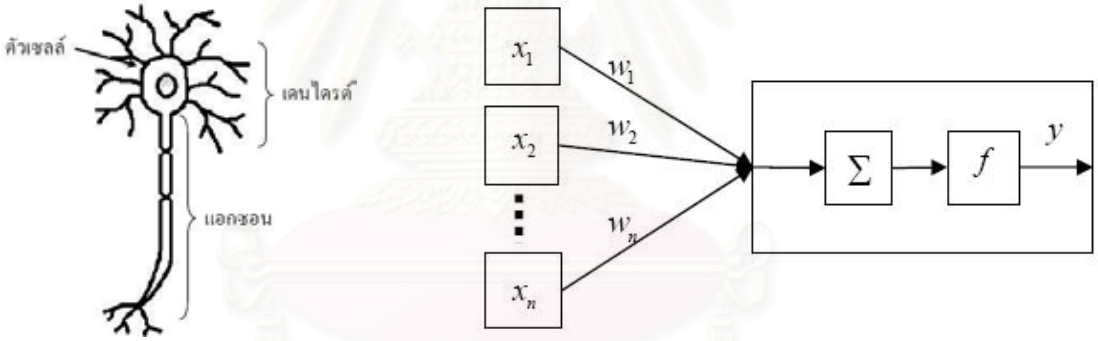
Stock Solution	ปริมาตร (มิลลิลิตร)
1 M $Ca(NO_3)_2.4H_2O$	10
1 M KNO_3	10
1 M $MgSO_4.7H_2O$	4
1 M KH_2PO_4	2
Fe-EDTA	4
Micronutrient	2

ตารางที่ 3.4 ตารางสารละลายธาตุอาหารสมบูรณ์สูตร Hoagland ต่อน้ำ 2 ลิตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks)

โครงข่ายประสาทเทียมคือ โมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับประมวลผลสารสนเทศด้วยการคำนวณโดยอาศัยวงจรโครงข่ายที่เลียนแบบการทำงานของสมองมนุษย์ และได้มีการสร้างแบบจำลองวงจรข่ายของเซลล์ประสาทดังรูปที่ 3.4 โดยเซลล์ประสาทเทียมถูกจำลองให้มีลักษณะโครงสร้างและการทำงานเช่นเดียวกับเซลล์ประสาท ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยที่เซลล์ประสาทเทียมมีข้อมูลเข้า $x_1, x_2, ..., x_n$ เปรียบได้กับสัญญาณกระแสประสาทที่ส่งเข้ามาตรงแต่ละเดนไดรต์ แต่ละข้อมูลนำเข้าคูณด้วยค่าถ่วงน้ำหนักที่สัมพันธ์กัน ค่าถ่วงน้ำหนัก $w_1, w_2, .., w_n$ เปรียบได้กับค่าความแข็งแรงของไซแนปส์ ผลรวมของผลคูณของข้อมูลนำเข้ากับค่าถ่วงน้ำหนักจะถูกรวมด้วยกันเพื่อกำหนดระดับการกระตุ้นของเซลล์ประสาทเปรียบได้กับกระแสประสาทผ่านตัวเซลล์ จากนั้นผลรวมที่ได้จะถูกผ่าน Activate function ได้แก่ ฟังก์ชันลอจิสติก (Logistic function) ฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoid fuction) หรือฟังก์ชันเส้นตรง (Linear function) เป็นต้น จะได้ข้อมูลนำออกมีค่าเป็น y เปรียบเทียบได้กับสัญญาณกระแสประสาทออกจากปลายแอกซอน [12]

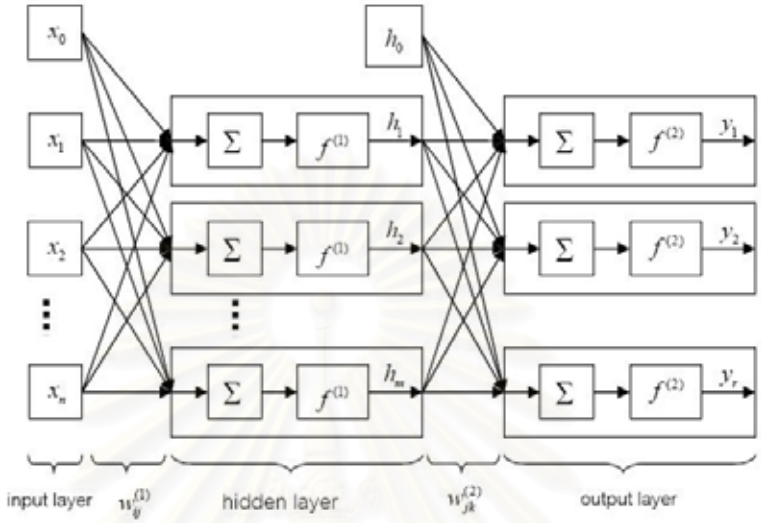


รูปที่ 3.4 โครงสร้างของเซลล์ประสาทและโครงสร้างของเซลล์ประสาทเทียม

3.5.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multilayer Perceptron Networks)

หลักการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นคือ ในแต่ละ layer ของ hidden layer จะมีฟังก์ชันสำหรับการคำนวณเมื่อได้รับค่าจาก output ของ layer ก่อนหน้านี้ว่า Activate function โดยแต่ละ layer ไม่จำเป็นต้องเป็นฟังก์ชันเดียวกันก็ได้ hidden layer มีหน้าที่สำคัญคือ จะพยายามแปลงข้อมูลที่เข้ามาใน layer นั้นๆ ให้เป็น linearly separable คือสามารถแยกแยะความแตกต่างได้โดยใช้เส้นตรงเส้น ก่อนที่ข้อมูลจะถูกส่งไปถึง output layer ในบางครั้งอาจจะจำเป็นต้องมี hidden layer มากกว่า 1

layer ในการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูป linearly separable วงจรนี้มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น

การทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นเริ่มต้นด้วยนำข้อมูล $x_0, x_1, ..., x_n$ เข้ามาจะถูกคูณกับค่าถ่วงน้ำหนัก $w_{ij}^{(1)}$ ระหว่าง input layer กับ hidden layer แล้วส่งค่าเข้าไปแต่ละ hidden node ในแต่ละ hidden node จะรวมค่าผลคูณแล้วส่งค่าผลรวมผ่าน activate function $f^{(1)}(a)$ จะได้ค่าเป็น $h_1, h_2, ..., h_m$ ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$h_j = f^{(1)}(\sum_{i=0}^{n} w_{ij}^{(1)} x_i) \qquad \text{สำหรับทุกๆ } j = 1,2,...,m$$

จากนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละ hidden node จะถูกคูณกับค่าถ่วงน้ำหนัก $w_{jk}^{(2)}$ ระหว่าง input layer กับ hidden layer แล้วส่งค่าเข้าไปในแต่ละ output node เพื่อรวมค่าผลคูณที่ได้แล้วส่งค่าผลรวมผ่าน activate function $f^{(2)}(a)$ จะได้ค่าเป็น $y_1, y_2, ..., y_r$ ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$y_k = f^{(2)}(\sum_{j=0}^{m} w_{jk}^{(2)} h_j) \qquad \text{สำหรับทุกๆ } k = 1,2,...,r$$

3.5.1.2 วิธีการแบคพรอพพาเกชัน (Backpropagation algorithm)

เป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ใน โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multilayer Perceptron Networks) เพื่อปรับค่าน้ำหนักในเส้นเชื่อมระหว่างโหนดให้เหมาะสม โดยการปรับค่านี้จะขึ้นกับความแตกต่างของชุดข้อมูลนำเข้าและชุดข้อมูลนำออก ผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมจะเป็นค่าถ่วงน้ำหนักน้ำหนัก $w_{ij}^{(1)}$ ระหว่างชั้นและค่าถ่วงน้ำหนัก $w_{ik}^{(2)}$

ขั้นตอนการเรียนรู้แบบแบคพรอพพาเกชัน

1. ทำการสุ่มค่าถ่วงน้ำหนัก $w_{ij}^{(1)}, w_{jk}^{(2)}$
2. กำหนดค่าสูงสุดของการเรียนรู้ (MaxEpoce) ค่าผิดพลาดรวมสูงสุด (E) และกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ (η)
3. ใส่ค่าข้อมูลอินพุต $x_0 = 1, x_1, x_2, ..., x_n$ และข้อมูลนำออก $d_1, d_2, ..., d_r$
4. คำนวณค่า $net_j^{(1)}, h_j$ ในรูปสมการดังนี้

$$net_j^{(1)} = \sum_{i=0}^{n} w_{ij}^{(1)} x_i \qquad \text{สำหรับทุกๆ } j = 1,2,...,n$$

$$h_j = f^{(1)}(net_j^{(1)}) \qquad \text{สำหรับทุกๆ } j = 1,2,...,n$$

5. คำนวณค่า $net_k^{(2)}, y_k$ ในรูปสมการดังนี้

$$net_k^{(2)} = \sum_{j=0}^{m} w_{jk}^{(2)} h_j \qquad \text{สำหรับทุกๆ } k = 1,2,...,r$$

$$y_k = f^{(2)}(net_k^{(2)}) \qquad \text{สำหรับทุกๆ } k = 1,2,...,r$$

6. คำนวณค่าผิดพลาดของ output layer ในรูปสมการดังนี้

$$\delta_k^{(2)} = (d_k - y_k) f'^{(2)}(net_k^{(2)}) \text{ สำหรับทุกๆ } k = 1,2,...,r$$

7. คำนวณค่าผิดพลาดของ hidden layer ในรูปสมการดังนี้

$$\delta_j^{(1)} = f'^{(1)}(net_j^{(1)})\sum_{k=1}^{r}\delta_k^{(2)}w_{jk}^{(2)} \quad \text{สำหรับทุกๆ } j = 1,2,...,m$$

8. ปรับปรุงค่าถ่วงน้ำหนัก $w_{jk}^{(2)}$ ในแต่ละรอบ t ในรูปสมการดังนี้

$$w_{jk}^{(2)}(t+1) = w_{jk}^{(2)}(t) + \eta\delta_k^{(2)}h_j \quad \text{สำหรับทุกๆ } j = 1,2,...,m$$

และสำหรับทุกๆ $k = 1,2,...,r$

9. ปรับปรุงค่าถ่วงน้ำหนัก $w_{ij}^{(1)}$ ในรูปสมการดังนี้

$$w_{ij}^{(1)}(t+1) = w_{ij}^{(1)}(t) + \eta\delta_j^{(1)}x_i \quad \text{สำหรับทุกๆ } i = 1,2,...,n$$

และสำหรับทุกๆ $j = 1,2,...,m$

10. ทำการเรียนรู้จนครบชุดข้อมูลนำเข้า ให้นับจำนวนรอบของการเรียนรู้เพิ่มทีละหนึ่ง และถ้ายังไม่ครบให้กลับไปข้อ 3

11. คำนวณค่าผิดพลาดรวม ในรูปสมการดังนี้

$$e = \frac{1}{2P}\sum_{p=1}^{P}\sum_{k=1}^{r}\left(d_{pk} - y_{pk}\right)^2$$ โดยที่ P คือจำนวนชุดข้อมูลนำเข้า

12. ตรวจสอบค่าผิดพลาดรวมที่คำนวณได้ ถ้าค่า e < E แล้วการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมเสร็จสมบูรณ์ ถ้ามากกว่าให้กลับไปทำข้อ 3 ใหม่โดยเริ่มต้นที่ชุดข้อมูลนำเข้าชุดแรก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
การออกแบบการทดลองและการจำลองแบบ

4.1 การออกแบบการทดลอง

การศึกษาการเติบโตและน้ำหนักของผลผลิตของถั่วเหลืองในสารละลายธาตุอาหาร เริ่มต้นด้วยทำการทดลองปลูกถั่วเหลืองในสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ที่กล่าวมาในบทที่ 3 โดยให้สารละลายมีระดับ pH เริ่มต้นเท่ากับ 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8 แล้วปรับระดับ pH ในแต่ละกระถางให้คงที่ทุก ๆ วันและทำการวัดความสูงของต้นถั่วเหลืองทุกๆ วัน ถั่วเหลืองที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นพันธุ์เชียงใหม่ 60 (ชม. 60) สถานที่ที่ใช้ในการทดลองคือ บริเวณชั้น 7 อาคารสถาบันวิจัยและตรวจสอบอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ระยะเวลาในการทดลอง 75 วัน มีการทดลองปลูก 2 ช่วงเวลาคือ ช่วงแรกตั้งแต่วันที่ 16 สิงหาคม 2548 - วันที่ 29 ตุลาคม 2548 ทำการทดลองปลูก 5 ซ้ำ และช่วงที่สองตั้งแต่วันที่ 11 มกราคม 2549 - วันที่ 26 มีนาคม 2549 ทำการทดลองปลูก 4 ซ้ำ พอถั่วเหลืองอายุ 75 วันก็ทำการเก็บเกี่ยวผลผลิตของถั่วเหลือง

4.1.1 การเตรียมสารละลายธาตุอาหาร

การปลูกพืชในสารละลายธาตุอาหารจำเป็นต้องเตรียมสารละลายเข้มข้น (stock solution) ของสารละลายเข้มข้นแต่ละชนิด แล้วจึงนำสารละลายเข้มข้น (stock solution) เหล่านั้นมาทำการผสมกันในน้ำกรอง ซึ่งใช้ปริมาตรสารละลายเข้มข้นตามที่กำหนดของสูตรสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland และก็ทำการปรับค่า pH ในสารละลายธาตุอาหารให้มีระดับ pH เท่ากับ 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8 ตามลำดับ เพื่อใช้สำหรับการทดลอง

4.1.1.1 การเตรียมสารละลายเข้มข้น (Stock Solution)

การเตรียมสารละลายธาตุอาหาร (stock solution) ที่ใช้สำหรับการทดลองระดับ pH ที่มีผลต่อการเติบโตของพืชในสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland จะต้องเตรียมสารเคมีที่ใช้ ตามตารางที่ 4.1

Stock Solution	สารเคมีที่ใช้	ปริมาณ (กรัม)	ละลายในน้ำกรองและปรับปริมาตรจนเป็น
1M calcium nitrate	$Ca(NO_3)_2.4H_2O$	236.1	1 ลิตร
1M magnesium sulfate	$MgSO_4.7H_2O$	246.5	1 ลิตร
1M potassium dihydrogen phosphate	KH_2PO_4	136.09	1 ลิตร
1M potassium nitrate	KNO_3	101.1	1 ลิตร
Fe-EDTA (2.5 mg/ml Fe)	EDTA disodium salt $(C_{10}H_{14}O_8Na_2.2H_2O)$	22.4	372 มิลลิลิตร
	$FeCl_3.6H_2O$	13.5	628 มิลลิลิตร
			เทสารละลายทั้งสองผสมกันทีละน้อยจนกระทั่งเป็นเนื้อเดียวในปริมาตร 1 ลิตร
Micronutrient	H_3BO_3	2.86	1 ลิตร
	$CuCl_2.2H_2O$	0.05	
	$MnCl_2.4H_2O$	1.81	
	$ZnCl_2$	0.11	
	$Na_2MoO_4.2H_2O$	0.025	
1 M sodium hydroxide	NaOH	40	1 ลิตร
hydrochloric acid10% HCl	HCl	100 c.c.	1 ลิตร

ตารางที่ 4.1 สารละลายเข้มข้น (Stock Solution) สำหรับสูตร Hoagland

เมื่อเตรียมสารละลายเตรียมสารละลายธาตุอาหาร (stock solution) ที่ใช้สำหรับการทดลองระดับ pH ที่มีผลต่อการเติบโตของพืชในสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland เรียบร้อยแล้วก็นำสารละลายผสมกับน้ำกรองตามตารางที่ 4.2

Stock Solution	ปริมาตร (มิลลิลิตร)
1 M $Ca(NO_3)_2.4H_2O$	10
1 M KNO_3	10
1 M $MgSO_4.7H_2O$	4
1 M KH_2PO_4	2
Fe-EDTA	4
Micronutrient	2

ตารางที่ 4.2 ตารางสารละลายธาตุอาหารสมบูรณ์สูตร Hoagland ต่อน้ำ 2 ลิตร

4.1.1.2 การเตรียมสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับ pH ต่าง ๆ

ขั้นตอนการเตรียมสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับ pH เท่ากับ 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8 ในสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ที่เตรียมไว้จากข้อ 4.1.1.1 นำมาวัดค่า pH โดยใช้ pH meter ซึ่งในแต่ละถังจะมีค่า pH เท่ากับ 6.3 แล้วก็ทำการปรับค่า pH แต่ละถังให้เท่ากับ 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8 โดยการเติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 10 % เพื่อปรับค่า pH ของสารละลายธาตุอาหารให้ pH ลดลงและเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 M เพื่อปรับค่า pH ของสารละลายธาตุอาหารเพิ่มขึ้น

4.1.2 การเพาะปลูกต้นถั่วเหลืองในสารละลายธาตุอาหาร

1. นำเมล็ดถั่วเหลืองมาประมาณ 100 เมล็ด มาทำการเพาะปลูกต้นอ่อนถั่วเหลือง

2. นำกระถางต้นไม้ขนาด 3 ลิตร ใส่น้ำเกือบครึ่งกระถางแล้วก็นำกระดาษอุ้มน้ำที่มีเมล็ดถั่วเหลืองมาวางไว้ในกระถางโดยให้กระดาษด้านที่ไม่มีถั่วเหลืองวางบนผิวน้ำ โดยจะใช้เวลาเพาะปลูกต้นอ่อนถั่วเหลืองประมาณ 2 - 4 วัน

3. เมื่อทำการเพาะปลูกต้นถั่วเหลืองมีอายุได้ 2 - 4 วัน ก็ทำการคัดต้นถั่วเหลืองที่มีความสมบูรณ์ของระดับความสูง ลักษณะใบ และจำนวนใบใกล้เคียงกันจำนวน 20 ต้น จากนั้นแบ่งถั่วเหลืองกลุ่มละ 5 ต้น ทำการเพาะปลูกลงในกระถางที่มีสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับ pH เท่ากับ 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8 ในสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ที่เตรียมไว้พร้อมกับให้อากาศในน้ำ

4. ทุกๆ วันวัดความสูงของถั่วเหลือง และตรวจวัดค่า pH ของสารละลายในกระถางแต่ละกระถางแล้วก็ตรวจดูปริมาตรสารละลายในกระถางเพื่อทำการเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรเท่าเดิมแล้วก็ทำการวัดค่า pH ของสารละลายในกระถาง ปรับค่า pH ที่เปลี่ยนไปของแต่ละกระถางให้คงที่เท่ากับ 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8 ของแต่ละกระถาง ถ้าค่า pH มีค่ามากกว่าเดิมก็ทำการปรับค่าโดยการเติมกรดไฮโดรคลอริกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่า pH เท่ากับค่าเริ่มต้นและถ้าค่า pH มีค่าน้อยกว่าเดิมก็ทำการปรับค่าโดยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่า pH เท่ากับค่าเริ่มต้น

5. ทุก ๆ สัปดาห์ทำการเปลี่ยนสารละลายธาตุอาหารและปรับค่า pH ของสารละลายให้มี pH เท่ากับ 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8 เป็นระยะเวลาจนสิ้นสุดการทดลองหรือจนถั่วเหลืองมีอายุ 75 วัน

4.1.3 การวัดส่วนสูงของถั่วเหลืองและการชั่งน้ำหนักของผลผลิตของถั่วเหลือง

ทุก ๆ วันจะทำการวัดความสูงของถั่วเหลือง โดยวัดจากจุดเริ่มต้นที่โคนต้นจนถึงยอดของถั่วเหลือง และหลังจากถั่วเหลืองทุก ๆ ต้นมีอายุครบ 75 วัน ก็ทำการการเก็บเกี่ยวผลผลิตของถั่วเหลืองของแต่ละต้นแล้วนำผลผลิตของถั่วเหลืองนำไปตากแดดจนแห้งแล้วก็นำไปชั่งน้ำหนัก

4.2 การเก็บข้อมูล (Data Collection)

ข้อมูลที่ทำการเก็บรวบรวมเพื่อใช้ในขั้นตอนการหาแบบจำลองของงานวิจัยชิ้นนี้คือ การเติบโตของถั่วเหลือง ซึ่งสามารถวัดให้อยู่ในรูปความสูงรวมเฉลี่ย โดยมีการปลูกถั่วเหลือง 2 ช่วงเวลาคือ ช่วงแรกตั้งแต่วันที่ 16 สิงหาคม 2548 – วันที่ 29 ตุลาคม 2548 มีการทดลอง 5 ซ้ำ และช่วงที่สองตั้งแต่วันที่ 11 มกราคม 2549 - วันที่ 26 มีนาคม 2549 มีการทดลอง 4 ซ้ำ โดยแต่ละช่วงจะมีการปลูกถั่วเหลืองจำนวน 4 ชุดการทดลอง ๆ ละ 5 ซ้ำและ 4 ซ้ำ ตามลำดับช่วงเวลา และแต่ละชุดได้ควบคุมระดับของ pH ที่ต่างกัน ดังนี้

ชุดการทดลองที่ 1 : ระดับ pH ในสารละลายธาตุอาหารเท่ากับ 4.8

ชุดการทดลองที่ 2 : ระดับ pH ในสารละลายธาตุอาหารเท่ากับ 5.8

ชุดการทดลองที่ 3 : ระดับ pH ในสารละลายธาตุอาหารเท่ากับ 6.8

ชุดการทดลองที่ 4 : ระดับ pH ในสารละลายธาตุอาหารเท่ากับ 7.8

ซึ่งชุดการทดลองทั้ง 4 ชุดการทดลองนี้เมื่ออายุครบ 75 วันก็ทำการเก็บเกี่ยวผลผลิตถั่วเหลืองโดยแยกเก็บออกเป็นชุดการทดลองและแยกต้นถั่วเหลืองด้วยแล้วนำ เมล็ดไปตากแดดให้แห้งแล้วก็นำไปชั่งน้ำหนักเพื่อต้องการหาน้ำหนักผลผลิต

4.3 การจำลองแบบ

การจำลองแบบเป็นวิธีการหนึ่งในกระบวนการแก้ปัญหาในด้านต่าง ๆ ซึ่งคำจำกัดความของการจำลองแบบก็คือ กระบวนการสร้างแบบจำลองของปัญหา แล้วดำเนินการทดลองโดยใช้แบบจำลองนั้นเพื่อการเรียนรู้พฤติกรรมของปัญหานั้นๆ ภายใต้ข้อกำหนดที่วางไว้

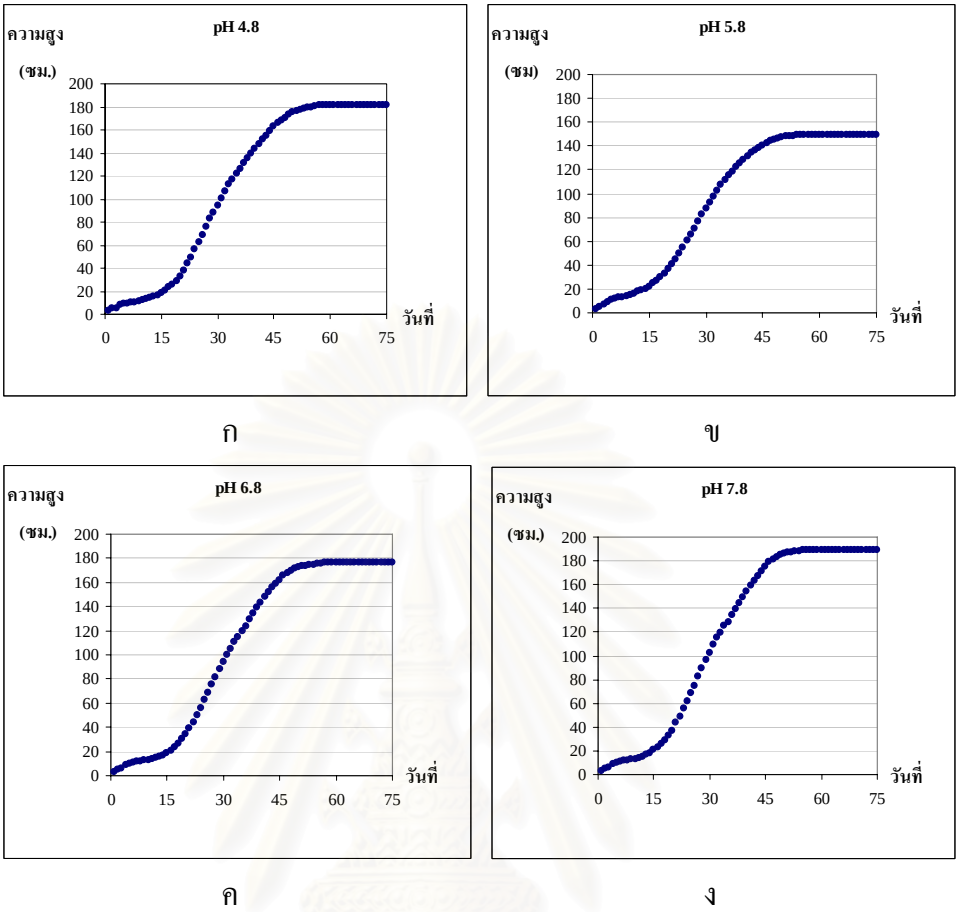
สำหรับการจำลองแบบในงานวิจัยนี้คือ การจำลองแบบการเติบโตของถั่วเหลืองที่มีระดับ pH ต่าง ๆ หรือจะกล่าวอีกอย่างว่าถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับ pH ต่างกันจะมีการเติบโตแตกต่างกัน ซึ่งจะหาการจำลองแบบแรกนี้คือ แบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ใช้ข้อมูลจากการปลูกในสารละลายธาตุอาหารในระดับ pH เท่ากับ 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8 ซึ่งหาได้จากการนำข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างการเติบโตของถั่วเหลือง กับระดับของ pH ในสารละลายธาตุอาหาร

สำหรับการหาแบบจำลองในงานวิจัยนี้ในแบบต่อไปเป็น การหาแบบจำลองการเจริญเติบโตของถั่วเหลือง กับแบบจำลองน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลือง

แบบจำลองทั้งสองแบบนี้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังที่จะกล่าวในส่วนต่อไป

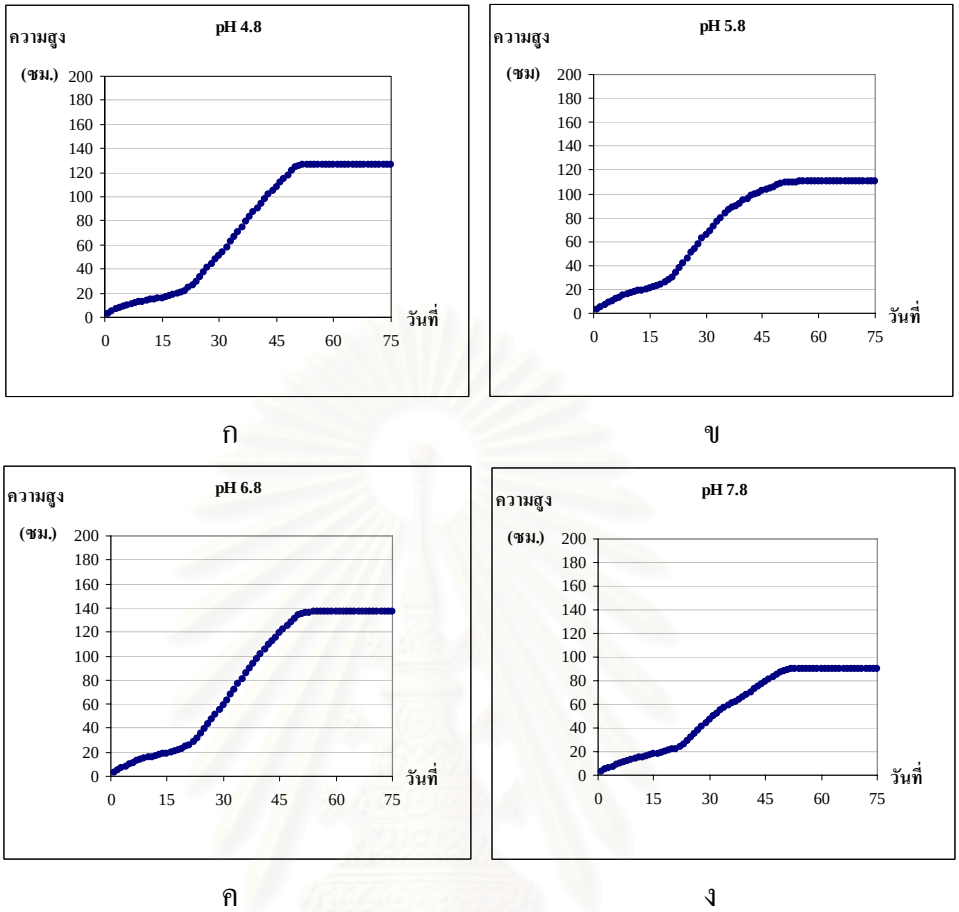
4.3.1 แบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารในระดับ pH เท่ากับ 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8

ก่อนที่จะหาแบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารในระดับ pH เท่ากับ 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8 ต้องเข้าใจกระบวนการเติบโตของถั่วเหลือง จากข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จากการทดลองซึ่งแสดงในภาคผนวก จะมีการทดลองปลูก 2 ช่วงเวลาคือช่วงแรกตั้งแต่วันที่ 16 สิงหาคม 2548 - วันที่ 29 ตุลาคม 2548 เมื่อนำข้อมูลการเติบโตของถั่วเหลืองที่ระดับ pH เท่ากับ 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8 มาวาดกราฟแล้วพบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นโค้งรูปตัวเอส ดังรูปที่ 4.1 และช่วงที่สองตั้งแต่วันที่ 11 มกราคม 2549 - วันที่ 26 มีนาคม 2549 เมื่อนำข้อมูลการเติบโตของถั่วเหลืองที่ระดับ pH เท่ากับ 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8 มาวาดกราฟแล้ว พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นโค้งรูปตัวเอส ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 กราฟข้อมูลการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ในการทดลองช่วงที่ 1 ตั้งแต่วันที่ 16 สิงหาคม 2548 - วันที่ 29 ตุลาคม 2548 (ก) pH 4.8 (ข) pH 5.8 (ค) pH 6.8 (ง) pH 7.8

เมื่อพิจารณากราฟข้อมูลการเติบโตของถั่วเหลืองจากรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 โดยละเอียด พบว่าลักษณะข้อมูลเป็นเส้นโค้งรูปเอสและกราฟข้อมูลมีลักษณะการเติบโตแบ่งออกเป็นช่วงๆ โดยมีการเติบโตเป็น 3 ระยะการเติบโตคือ ระยะแรก คือระยะที่เริ่มตั้งแต่ Cotyledon ของถั่วเหลืองเริ่มโผล่พ้นพื้นดิน เรียกระยะนี้ว่า Emergence Stage ระยะที่สอง คือระยะที่เริ่มตั้งแต่ Cotyledon ร่วงจนกระทั่งออกดอก เรียกระยะนี้ว่า Vegetative Stage ส่วนระยะที่สามคือ ระยะเริ่มตั้งแต่ถั่วเหลืองออกดอกจนกระทั่งออกฝักและตายในที่สุด เรียกระยะนี้ว่า Reproduction Stage ซึ่งสามารถอธิบายการเติบโตของถั่วเหลืองในรูปที่ 4.3 [8]

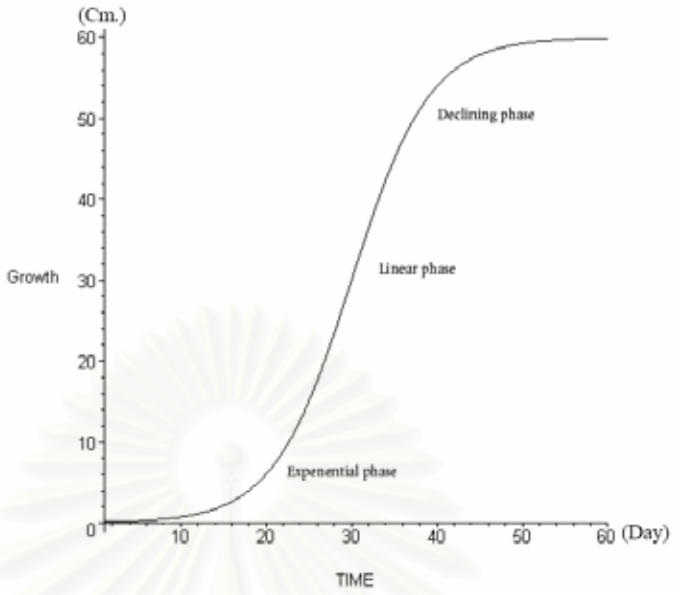


รูปที่ 4.2 กราฟข้อมูลการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ในการทดลองช่วงที่ 2 ตั้งแต่วันที่ 11 มกราคม 2549 - วันที่ 26 มีนาคม 2549 (ก) pH 4.8 (ข) pH 5.8 (ค) pH 6.8 (ง) pH 7.8

ระยะที่ 1 : Emergence Stage เป็นระยะที่มีอัตราการเติบโตช้ามาก เมื่อพิจารณาจากกราฟในรูปที่ 4.3 ระยะนี้จึงเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Exponential phase

ระยะที่ 2 : Vegetative Stage เป็นระยะที่มีอัตราการเติบโตสูงค่อนข้างคงที่ เมื่อพิจารณาจากกราฟในรูปที่ 4.3 ระยะนี้จึงเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Linear phase

ระยะที่ 3 : Reproduction Stage เป็นระยะที่มีอัตราการเติบโตลดลง เมื่อพิจารณาจากกราฟในรูปที่ 4.3 ระยะนี้จึงเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Declining phase [8]



รูปที่ 4.3 ระยะการเติบโตของถั่วเหลือง [8]

จากข้อมูลการเติบโตของถั่วเหลือง จะเห็นว่าแบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่เหมาะสมคือ แบบจำลองการเติบโตแบบมัลติลอจิสติก เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่สามารถอธิบายลักษณะการเติบโตที่ซับซ้อน ตลอดระยะเวลาการเติบโตของถั่วเหลืองได้ ซึ่งแบบจำลองการเติบโตแบบแบบมัลติลอจิสติกมีรูปแบบดังนี้

$$G_i(t) = \sum_{i=1}^{n} \frac{K_i}{1+\exp\left(-\frac{\ln(81)}{\Delta t_i}(t-t_{mi})\right)}$$

และด้วยเหตุผลที่ว่าการเติบโตแบ่งออกเป็น 3 ระยะ จะได้ว่า n = 3 ซึ่งแบบจำลองการเติบโตแบบมัลติลอจิสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ

$$\begin{aligned} G(t) &= \frac{K_1}{1+\exp\left(-\frac{\ln(81)}{\Delta t_1}(t-t_{m1})\right)} \\ &+ \frac{K_2}{1+\exp\left(-\frac{\ln(81)}{\Delta t_2}(t-t_{m2})\right)} \\ &+ \frac{K_3}{1+\exp\left(-\frac{\ln(81)}{\Delta t_3}(t-t_{m3})\right)} \end{aligned} \qquad (4.1)$$

โดยที่

$G(t)$ คือ การเติบโตของถั่วเหลืองที่เวลา t ในที่นี้หมายถึงความสูงของถั่วเหลือง

t คือ เวลาการเติบโตของถั่วเหลือง

K_1 คือ ขอบจำกัดบนของความสูงของถั่วเหลืองในระยะที่ 1

Δt_1 คือ ระยะเวลาการเติบโตของถั่งเหลืองในระยะที่ 1

t_{m1} คือ เวลาที่ถั่วเหลืองมีอัตราการเติบโตมากที่สุดในระยะที่ 1

K_2 คือ ขอบจำกัดบนของความสูงของถั่วเหลืองในระยะที่ 2

Δt_2 คือ ระยะเวลาการเติบโตของถั่งเหลืองในระยะที่ 2

t_{m2} คือ เวลาที่ถั่วเหลืองมีอัตราการเติบโตมากที่สุดในระยะที่ 2

K_3 คือ ขอบจำกัดบนของความสูงของถั่วเหลืองในระยะที่ 3

Δt_3 คือ ระยะเวลาการเติบโตของถั่งเหลืองในระยะที่ 3

t_{m3} คือ เวลาที่ถั่วเหลืองมีอัตราการเติบโตมากที่สุดในระยะที่ 3

4.3.2 การหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการเติบโตแบบมัลติลอจิสติก

แบบจำลองการเติบโตแบบมัลติลอจิสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (สมการ 4.1) มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 9 ตัว คือ $K_1, \Delta t_1, t_{m1}, K_2, \Delta t_2, t_{m2}, K_3, \Delta t_3$ และ t_{m3} การหาค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ทำได้โดยการวิเคราะห์การถดถอย โดยวิธี Levenberg-Marquardt ที่กล่าวมาในหัวข้อ 3.3.4 ซึ่งพารามิเตอร์ของแบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองแต่ละช่วงเวลาทำการทดลองและแต่ละชุดการทดลองหาได้โดยการกำหนดให้ G_i แทนข้อมูลการเติบโตของถั่วเหลืองวันที่ i และกำหนดให้ $G(t_i, pH)$ แทนแบบจำลองที่แทนความสัมพันธ์ระหว่างการเติบโตกับเวลาการเติบโต t_i และระดับ pH ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$
\begin{aligned}
G(t_i; pH) &= \frac{K_1}{1+\exp\left(-\frac{\ln(81)}{\Delta t_1}(t-t_{m1})\right)} \\
&+ \frac{K_2}{1+\exp\left(-\frac{\ln(81)}{\Delta t_2}(t-t_{m2})\right)} \\
&+ \frac{K_3}{1+\exp\left(-\frac{\ln(81)}{\Delta t_3}(t-t_{m3})\right)}
\end{aligned}
\qquad (4.2)
$$

และจะได้ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองในระดับ pH เท่ากับ 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8 ในแต่ละช่วงเวลาทำการทดลองและแต่ละชุดการทดลองได้ดังนี้

ช่วงที่ 1 ปลูกตั้งแต่วันที่ 16 สิงหาคม 2548 ถึง วันที่ 29 ตุลาคม 2548

ชุดทดลองที่ 1 : ระดับ pH เท่ากับ 4.8

แบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ระดับ pH เท่ากับ 4.8 ของการทดลองช่วงที่ 1 คือ

$$G_R(t,4.8) = \frac{8.73054}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{6.21376}\cdot(t-2.22221)\right]} + \frac{118.97732}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{19.80457}\cdot(t-26.04761)\right]} + \frac{54.41813}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{17.97540}\cdot(t-41.99926)\right]} \quad (4.3)$$

ชุดทดลองที่ 2 : ระดับ pH เท่ากับ 5.8

แบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ระดับ pH เท่ากับ 5.8 ของการทดลองช่วงที่ 1 คือ

$$G_R(t,5.8) = \frac{9.58376}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{5.59463}\cdot(t-2.72254)\right]} + \frac{123.63465}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{24.39749}\cdot(t-27.03727)\right]} + \frac{16.51081}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{13.35487}\cdot(t-41.63743)\right]} \quad (4.4)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชุดทดลองที่ 3 : ระดับ pH เท่ากับ 6.8

แบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ระดับ pH เท่ากับ 6.8 ของการทดลองช่วงที่ 1 คือ

$$G_R(t,6.8) = \frac{9.64134}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{5.15989}\cdot(t-2.30809)\right]} + \frac{110.88886}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{19.46549}\cdot(t-25.57712)\right]} + \frac{55.91011}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{16.52543}\cdot(t-40.34936)\right]} \quad (4.5)$$

ชุดทดลองที่ 4 : ระดับ pH เท่ากับ 7.8

แบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ระดับ pH เท่ากับ 7.8 ของการทดลองช่วงที่ 1 คือ

$$G_R(t,7.8) = \frac{9.24053}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{5.51555}\cdot(t-2.39103)\right]} + \frac{130.83241}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{20.40520}\cdot(t-25.91002)\right]} + \frac{49.34488}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{13.85131}\cdot(t-41.31388)\right]} \quad (4.6)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ช่วงที่ 2 ปลูกตั้งแต่วันที่ 11 มกราคม 2549 ถึง วันที่ 26 มีนาคม 2549

ชุดทดลองที่ 1 : ระดับ pH เท่ากับ 4.8

แบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ระดับ pH เท่ากับ 4.8 ของการทดลองช่วงที่ 2 คือ

$$G_S(t,4.8) = \frac{12.14189}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{9.35169}\cdot(t-3.06414)\right]} + \frac{82.12562}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{22.29339}\cdot(t-30.57444)\right]} + \frac{33.00207}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{12.05101}\cdot(t-43.77132)\right]} \quad (4.7)$$

ชุดทดลองที่ 2 : ระดับ pH เท่ากับ 5.8

แบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ระดับ pH เท่ากับ 5.8 ของการทดลองช่วงที่ 2 คือ

$$G_S(t,5.8) = \frac{16.02950}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{9.36939}\cdot(t-4.00086)\right]} + \frac{76.02041}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{19.87589}\cdot(t-27.22108)\right]} + \frac{18.17818}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{16.20001}\cdot(t-42.45041)\right]} \quad (4.8)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชุดทดลองที่ 3 : ระดับ pH เท่ากับ 6.8

แบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ระดับ pH เท่ากับ 6.8 ของการทดลองช่วงที่ 2 คือ

$$G_S(t,6.8) = \frac{14.58855}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{9.64433}\cdot(t-3.84834)\right]} + \frac{90.10794}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{22.05802}\cdot(t-30.13670)\right]} + \frac{32.51958}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{12.79067}\cdot(t-43.65925)\right]} \quad (4.9)$$

ชุดทดลองที่ 4 : ระดับ pH เท่ากับ 7.8

แบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ระดับ pH เท่ากับ 7.8 ของการทดลองช่วงที่ 2 คือ

$$G_S(t,7.8) = \frac{16.11066}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{13.23435}\cdot(t-4.70685)\right]} + \frac{49.81373}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{17.40120}\cdot(t-28.11456)\right]} + \frac{24.25575}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{11.54733}\cdot(t-44.16872)\right]} \quad (4.10)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.3 แบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายระดับ pH ต่างๆ

แบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายระดับ pH ต่างๆ เป็นแบบจำลองส่วนหนึ่งในงานวิจัยนี้ แบบจำลองที่ได้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเติบโตของถั่วเหลืองกับระดับของ pH ในสารละลาย

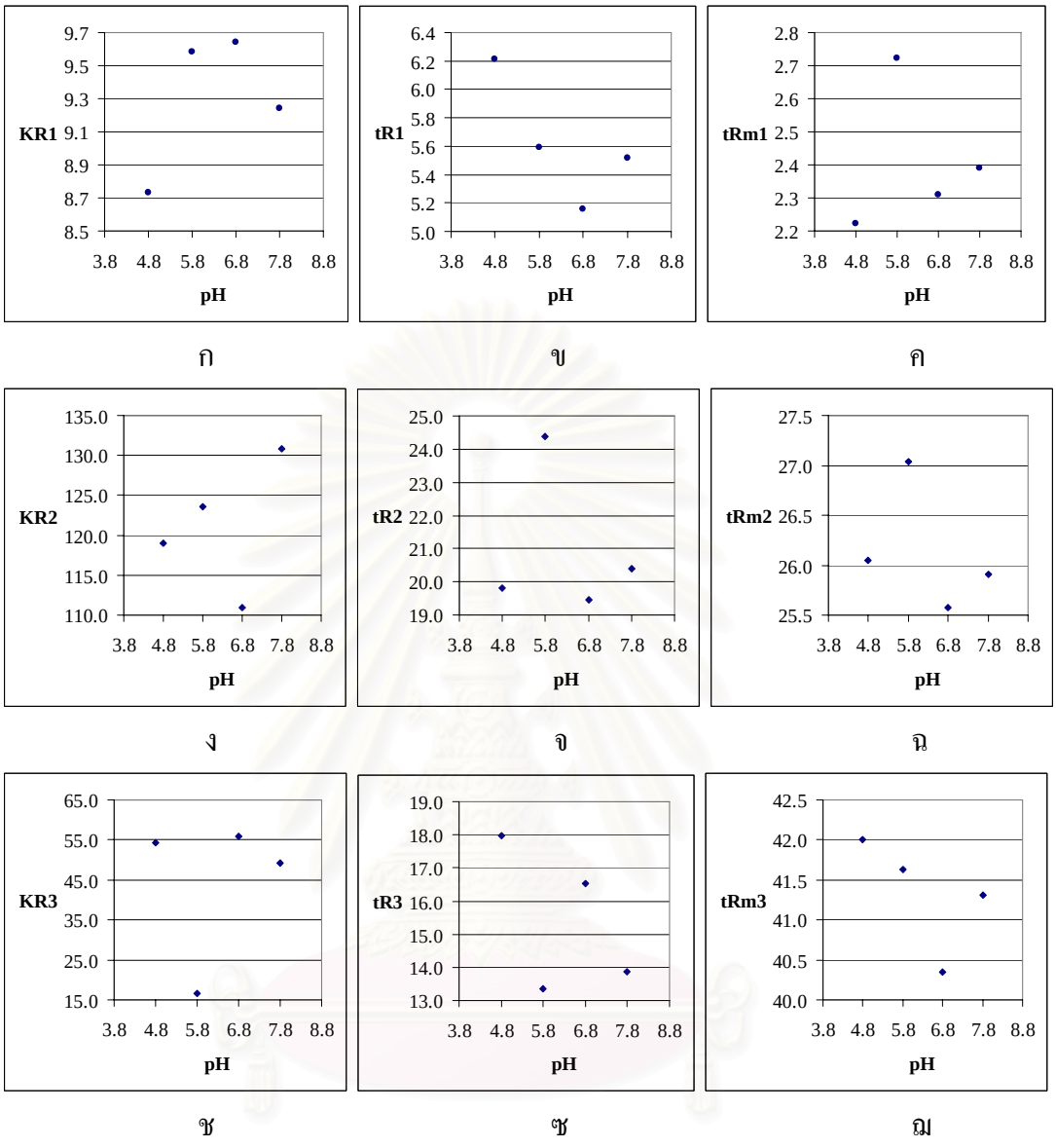
4.3.3.1 แบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 1

สำหรับวิธีการหาแบบจำลองนี้ เมื่อพิจารณาจากแบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่มีระดับ pH ของสารละลายธาตุอาหารแตกต่างกันทั้ง 4 แบบจำลองของการทดลองช่วงที่ 1 พบว่ามีค่าพารามิเตอร์ $K_{R1}, \Delta t_{R1}, t_{Rm1}$, $K_{R2}, \Delta t_{R2}, t_{Rm2}, K_{R3}, \Delta t_{R3}$ และ t_{Rm3} ของแบบทดลองในช่วงที่ 1 แตกต่างกันตามระดับ pH ของสารละลายธาตุอาหารที่ต่างกัน ซึ่งแสดงในตาราง 4.3 ดังนั้นขั้นตอนต่อไป จึงเป็นการหาฟังก์ชันของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ขึ้นอยู่กับระดับ pH ของสารละลายธาตุอาหาร

pH	K_{R1}	Δt_{R1}	t_{Rm1}	K_{R2}	Δt_{R2}	t_{Rm2}	K_{R3}	Δt_{R3}	t_{Rm3}
4.8	8.73054	6.21376	2.22221	118.97732	19.80457	26.04761	54.41813	17.97540	41.99926
5.8	9.58376	5.59463	2.72254	123.63465	24.39749	27.03727	16.51081	13.35487	41.63743
6.8	9.64134	5.15989	2.30809	110.88886	19.46549	25.57712	55.91011	16.52543	40.34936
7.8	9.24053	5.51555	2.39103	130.83241	20.40520	25.91002	49.34488	13.85131	41.31388

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองการเติบโตของการทดลองช่วงที่ 1

จากพารามิเตอร์มิเตอร์ของแบบจำลองการเติบโตที่ปลูกในสารละลายระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 1 ทั้ง 4 แบบจำลองในตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาพบว่า K_{R1}, Δt_{R1}, t_{Rm1}, K_{R2}, Δt_{R2}, t_{Rm2}, K_{R3}, Δt_{R3} และ t_{Rm3} มีค่าแตกต่างกันตามระดับ pH จึงต้องหาฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับระดับ pH และเมื่อนำค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มาวาดกราฟจะได้กราฟดังนี้



รูปที่ 4.4 พารามิเตอร์ของแบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 1 (ก) K_{R1} (ข) Δt_{R1} (ค) t_{Rm1} (ง) K_{R2} (จ) Δt_{R2} (ฉ) t_{Rm2} (ช) K_{R3} (ซ) Δt_{R3} (ฌ) t_{Rm3}

เมื่อพิจารณากราฟจะได้ว่า กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นกราฟเส้นโค้ง polynomial การหาฟังก์ชันทำได้โดยการแก้สมการ polynomial ดีกรี 3 ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้เขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันได้ดังนี้

ฟังก์ชันของขอบจำกัดบนของความสูงของถั่วเหลืองในระยะที่ 1 สำหรับถั่วเหลืองที่ระดับ pH 4.8 - 7.8 ของการทดลองช่วงที่ 1 คือ

$$K_{R1}(pH) = 0.05621pH^3 - 1.37582pH^2 + 10.68629pH - 17.08080 \quad (4.11)$$

ฟังก์ชันของระยะเวลาการเติบโตของถั่งเหลืองในระยะที่ 1 สำหรับถั่วเหลืองที่ระดับ pH 4.8 - 7.8 ของการทดลองช่วงที่ 1 คือ

$$\Delta t_{R1}(pH) = 0.10100pH^3 - 1.66525pH^2 + 8.49579pH - 7.36872 \quad (4.12)$$

ฟังก์ชันของเวลาที่ถั่วเหลืองมีอัตราการเติบโตมากที่สุดในระยะที่ 1 สำหรับถั่วเหลืองที่ระดับ pH 4.8 - 7.8 ของการทดลองช่วงที่ 1 คือ

$$t_{Rm1}(pH) = 0.23536pH^3 - 4.55270pH^2 + 28.86608pH - 57.47007 \quad (4.13)$$

ฟังก์ชันของขอบจำกัดบนของความสูงของถั่วเหลืองในระยะที่ 2 สำหรับถั่วเหลืองที่ระดับ pH 4.8 - 7.8 ของการทดลองช่วงที่ 1 คือ

$$K_{R2}(pH) = 8.34874pH^3 - 153.96971pH^2 + 931.10037pH - 1726.14674 \quad (4.14)$$

ฟังก์ชันของระยะเวลาการเติบโตของถั่งเหลืองในระยะที่ 2 สำหรับถั่วเหลืองที่ระดับ pH 4.8 - 7.8 ของการทดลองช่วงที่ 1 คือ

$$\Delta t_{R2}(pH) = 2.56611pH^3 - 49.41271pH^2 + 311.48036pH - 620.62313 \quad (4.15)$$

ฟังก์ชันของเวลาที่ถั่วเหลืองมีอัตราการเติบโตมากที่สุดในระยะที่ 2 สำหรับถั่วเหลืองที่ระดับ pH 4.8 - 7.8 ของการทดลองช่วงที่ 1 คือ

$$t_{Rm2}(pH) = 0.70715pH^3 - 13.52925pH^2 + 84.63170pH - 146.67538 \quad (4.16)$$

ฟังก์ชันของขอบจำกัดบนของความสูงของถั่วเหลืองในระยะที่ 3 สำหรับถั่วเหลืองที่ระดับ pH 4.8 - 7.8 ของการทดลองช่วงที่ 1 คือ

$$K_{R3}(pH) = -20.54519\,pH^3 + 396.13965\,pH^2 - 2500.50798\,pH + 5201.93280 \quad (4.17)$$

ฟังก์ชันของระยะเวลาการเติบโตของถั่งเหลืองในระยะที่ 3 สำหรับถั่วเหลืองที่ระดับ pH 4.8 - 7.8 ของการทดลองช่วงที่ 1 คือ

$$\Delta t_{R3}(pH) = -2.27263\,pH^3 + 43.43929\,pH^2 - 272.99443\,pH + 578.84195 \quad (4.18)$$

ฟังก์ชันของเวลาที่ถั่วเหลืองมีอัตราการเติบโตมากที่สุดในระยะที่ 3 สำหรับถั่วเหลืองที่ระดับ pH 4.8 - 7.8 ของการทดลองช่วงที่ 1 คือ

$$t_{Rm3}(pH) = 0.52980\,pH^3 - 9.68170\,pH^2 + 57.48521\,pH - 69.45538 \quad (4.19)$$

เมื่อนำฟังก์ชันต่างๆ ของพารามิเตอร์ต่างๆ ไปแทนในสมการที่ 4.2 จะได้แบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 1 ดังนี้

$$G_R(t, pH) = \frac{K_{R1}(pH)}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{\Delta t_{R1}(pH)}\cdot\left(t - t_{Rm1}(pH)\right)\right]} + \frac{K_{R2}(pH)}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{\Delta t_{R2}(pH)}\cdot\left(t - t_{Rm2}(pH)\right)\right]} + \frac{K_{R3}(pH)}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{\Delta t_{R3}(pH)}\cdot\left(t - t_{Rm3}(pH)\right)\right]} \quad (4.20)$$

โดยที่

G คือ การเติบโตของถั่วเหลืองที่เวลา t สำหรับถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายที่มีระดับ pH ของการทดลองในช่วงที่ 1

t คือ เวลาการเติบโตของถั่วเหลือง

pH คือ ระดับความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายธาตุอาหาร

K_{R1} คือ ขอบจำกัดบนของความสูงของถั่วเหลืองในระยะที่ 1 สำหรับถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายที่มีระดับ pH ของการทดลองในช่วงที่ 1

Δt_{R1} คือ ระยะเวลาการเติบโตของถั่งเหลืองในระยะที่ 1 สำหรับถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายที่มีระดับ pH ของการทดลองในช่วงที่ 1

t_{Rm1} คือ เวลาที่ถั่วเหลืองมีอัตราการเติบโตมากที่สุดในระยะที่ 1 สำหรับถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายที่มีระดับ pH ของการทดลองในช่วงที่ 1

K_{R2} คือ ขอบจำกัดบนของความสูงของถั่วเหลืองในระยะที่ 2สำหรับถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายที่มีระดับ pH ของการทดลองในช่วงที่ 1

Δt_{R2} คือ ระยะเวลาการเติบโตของถั่งเหลืองในระยะที่ 2 สำหรับถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายที่มีระดับ pH ของการทดลองในช่วงที่ 1

t_{Rm2} คือ เวลาที่ถั่วเหลืองมีอัตราการเติบโตมากที่สุดในระยะที่ 2 สำหรับถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายที่มีระดับ pH ของการทดลองในช่วงที่ 1

K_{R3} คือ ขอบจำกัดบนของความสูงของถั่วเหลืองในระยะที่ 3 สำหรับถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายที่มีระดับ pH ของการทดลองในช่วงที่ 1

Δt_{R3} คือ ระยะเวลาการเติบโตของถั่งเหลืองในระยะที่ 3 สำหรับถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายที่มีระดับ pH ของการทดลองในช่วงที่ 1

t_{Rm3} คือ เวลาที่ถั่วเหลืองมีอัตราการเติบโตมากที่สุดในระยะที่ 3 สำหรับถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายที่มีระดับ pH ของการทดลองในช่วงที่ 1

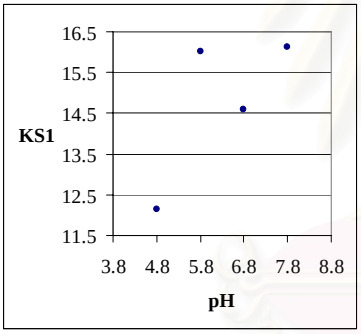
4.3.3.2 แบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 2

สำหรับวิธีการหาแบบจำลองนี้ เมื่อพิจารณาจากแบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่มีระดับ pH ของสารละลายธาตุอาหารแตกต่างกันทั้ง 4 แบบจำลองของการทดลองช่วงที่ 2 พบว่ามีค่าพารามิเตอร์ $K_{S1}, \Delta t_{S1}, t_{Sm1}$, $K_{S2}, \Delta t_{S2}, t_{Sm2}, K_{S3}, \Delta t_{S3}$ และ t_{Sm3} ของแบบทดลองช่วงที่ 2 มีค่าแตกต่างกันตามระดับ pH ของสารละลายธาตุอาหารที่ต่างกัน ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.4 ดังนั้นขั้นตอนต่อไป จึงเป็นการหาฟังก์ชันของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ขึ้นอยู่กับระดับ pH ของสารละลายธาตุอาหาร

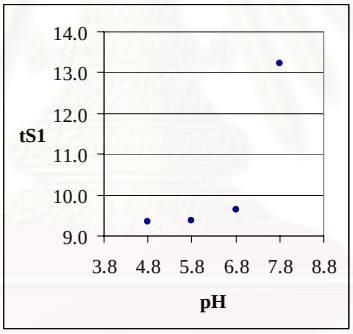
pH	K_{S1}	Δt_{S1}	t_{Sm1}	K_{S2}	Δt_{S2}	t_{Sm2}	K_{S3}	Δt_{S3}	t_{Sm3}
4.8	12.14189	9.35169	3.06414	82.12562	22.29339	30.57444	33.00207	12.05101	43.77132
5.8	16.02950	9.36939	4.00086	76.02041	19.87589	27.22108	18.17818	16.20001	42.45041
6.8	14.58855	9.64433	3.84834	90.10794	22.05802	30.13670	32.51958	12.79067	43.65925
7.8	16.11066	13.23435	4.70685	49.81373	17.40120	28.11456	24.25575	11.54733	44.16872

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองการเติบโตของการทดลองช่วงที่ 2

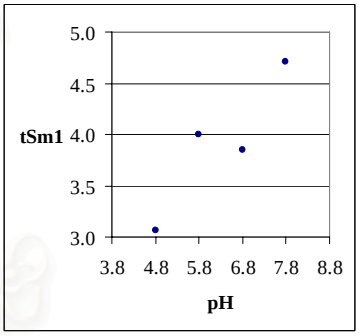
จากพารามิเตอร์มิเตอร์ของแบบจำลองการเติบโตที่ปลูกในสารละลายระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 2 ทั้ง 4 แบบจำลองในตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาพบว่า K_{S1}, Δt_{S1}, t_{Sm1}, K_{S2}, Δt_{S2}, t_{Sm2}, K_{S3}, Δt_{S3} และ t_{Sm3} มีค่าแตกต่างกันตามระดับ pH จึงต้องหาฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับระดับ pH และเมื่อนำค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มาวาดกราฟจะได้กราฟดังนี้



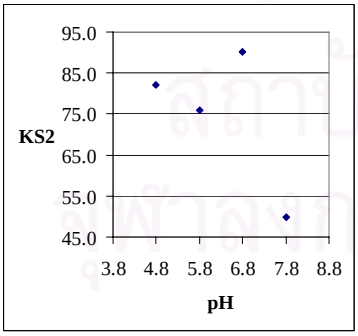
ก



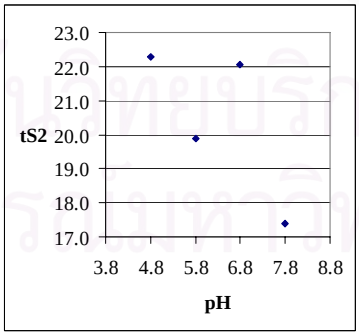
ข



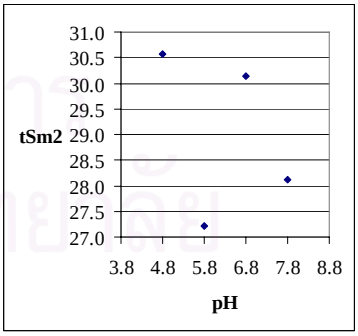
ค



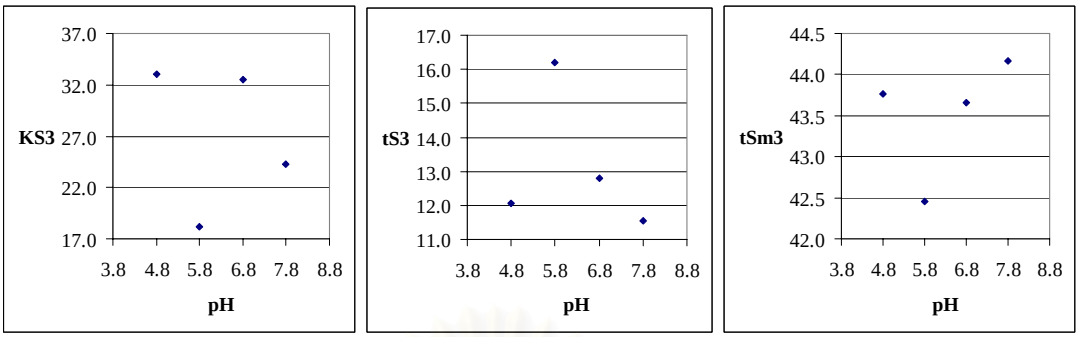
ง



จ



ฉ



ช ซ ฌ

รูปที่ 4.5 พารามิเตอร์ของแบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 2 (ก) K_{S1} (ข) Δt_{S1} (ค) t_{Sm1} (ง) K_{S2} (จ) Δt_{S2} (ฉ) t_{Sm2} (ช) K_{S3} (ซ) Δt_{S3} (ฌ) t_{Sm3}

เมื่อพิจารณากราฟจะได้ว่า กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นกราฟเส้นโค้ง polynomial การหาฟังก์ชันทำได้โดยการแก้สมการ polynomial ดีกรี 3 ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้เขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันได้ดังนี้

ฟังก์ชันของขอบจำกัดบนของความสูงของถั่วเหลืองในระยะที่ 1 สำหรับถั่วเหลืองที่ระดับ pH 4.8 - 7.8 ของการทดลองช่วงที่ 2 คือ

$$K_{S1}(pH) = 1.38194\,pH^3 - 26.71004\,pH^2 + 170.21249\,pH - 342.31016 \quad (4.21)$$

ฟังก์ชันของระยะเวลาการเติบโตของถั่งเหลืองในระยะที่ 1 สำหรับถั่วเหลืองที่ระดับ pH 4.8 - 7.8 ของการทดลองช่วงที่ 2 คือ

$$\Delta t_{S1}(pH) = 0.50964\,pH^3 - 8.73908\,pH^2 + 49.57737\,pH - 83.63310 \quad (4.22)$$

ฟังก์ชันของเวลาที่ถั่วเหลืองมีอัตราการเติบโตมากที่สุดในระยะที่ 1 สำหรับถั่วเหลืองที่ระดับ pH 4.8 - 7.8 คือ

$$t_{Sm1}(pH) = 0.35005\,pH^3 - 6.63541\,pH^2 + 41.68624\,pH - 82.86218 \quad (4.23)$$

ฟังก์ชันของขอบจำกัดบนของความสูงของถั่วเหลืองในระยะที่ 2 สำหรับถั่วเหลืองที่ระดับ pH 4.8 - 7.8 ของการทดลองช่วงที่ 2 คือ

$$K_{S2}(pH) = -12.42908\,pH^3 + 226.36238\,pH^2 - 1355.0451\,pH + 2745.48775 \quad (4.24)$$

ฟังก์ชันของระยะเวลาการเติบโตของถั่งเหลืองในระยะที่ 2 สำหรับถั่วเหลืองที่ระดับ pH 4.8 - 7.8 ของการทดลองช่วงที่ 2 คือ

$$\Delta t_{S2}(pH) = -1.90642\,pH^3 + 35.47160\,pH^2 - 217.28540\,pH + 458.83306 \quad (4.25)$$

ฟังก์ชันของเวลาที่ถั่วเหลืองมีอัตราการเติบโตมากที่สุดในระยะที่ 2 สำหรับถั่วเหลืองที่ระดับ pH 4.8 - 7.8 ของการทดลองช่วงที่ 2 คือ

$$t_{Sm2}(pH) = -1.86779\,pH^3 + 35.63397\,pH^2 - 223.20813\,pH + 487.52900 \quad (4.26)$$

ฟังก์ชันของขอบจำกัดบนของความสูงของถั่วเหลืองในระยะที่ 3 สำหรับถั่วเหลืองที่ระดับ pH 4.8 - 7.8 ของการทดลองช่วงที่ 2 คือ

$$K_{S3}(pH) = -8.62842\,pH^3 + 164.71712\,pH^2 - 1031.55147\,pH + 2143.60070 \quad (4.27)$$

ฟังก์ชันของระยะเวลาการเติบโตของถั่งเหลืองในระยะที่ 3 สำหรับถั่วเหลืองที่ระดับ pH 4.8 - 7.8 ของการทดลองช่วงที่ 2 คือ

$$\Delta t_{S3}(pH) = 1.62072\,pH^3 - 31.97979\,pH^2 + 206.15108\,pH - 419.89910 \quad (4.28)$$

ฟังก์ชันของเวลาที่ถั่วเหลืองมีอัตราการเติบโตมากที่สุดในระยะที่ 3 สำหรับถั่วเหลืองที่ระดับ pH 4.8 - 7.8 ของการทดลองช่วงที่ 2 คือ

$$t_{Sm3}(pH) = -0.53818\,pH^3 + 10.62926\,pH^2 - 68.50378\,pH + 187.21017 \quad (4.29)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อนำฟังก์ชันต่างๆ ของพารามิเตอร์ต่างๆ ไปแทนในสมการที่ 4.2 จะได้แบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 2 ดังนี้

$$G_S(t, pH) = \frac{K_{S1}(pH)}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{\Delta t_{S1}(pH)}\cdot\left(t - t_{Sm1}(pH)\right)\right]} + \frac{K_{S2}(pH)}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{\Delta t_{S2}(pH)}\cdot\left(t - t_{Sm2}(pH)\right)\right]} + \frac{K_{S3}(pH)}{1+\exp\left[-\frac{\ln(81)}{\Delta t_{S3}(pH)}\cdot\left(t - t_{Sm3}(pH)\right)\right]} \quad (4.30)$$

โดยที่

G คือ การเติบโตของถั่วเหลืองที่เวลา t สำหรับถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายที่มีระดับ pH ของการทดลองในช่วงที่ 2

t คือ เวลาการเติบโตของถั่วเหลือง

pH คือ ระดับความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายธาตุอาหาร

K_{S1} คือ ขอบจำกัดบนของความสูงของถั่วเหลืองในระยะที่ 1 สำหรับถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายที่มีระดับ pH ของการทดลองในช่วงที่ 2

Δt_{S1} คือ ระยะเวลาการเติบโตของถั่งเหลืองในระยะที่ 1 สำหรับถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายที่มีระดับ pH ของการทดลองในช่วงที่ 2

t_{Sm1} คือ เวลาที่ถั่วเหลืองมีอัตราการเติบโตมากที่สุดในระยะที่ 1 สำหรับถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายที่มีระดับ pH ของการทดลองในช่วงที่ 2

K_{S2} คือ ขอบจำกัดบนของความสูงของถั่วเหลืองในระยะที่ 2สำหรับถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายที่มีระดับ pH ของการทดลองในช่วงที่ 2

Δt_{S2} คือ ระยะเวลาการเติบโตของถั่งเหลืองในระยะที่ 2 สำหรับถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายที่มีระดับ pH ของการทดลองในช่วงที่ 2

t_{Sm2} คือ เวลาที่ถั่วเหลืองมีอัตราการเติบโตมากที่สุดในระยะที่ 2 สำหรับถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายที่มีระดับ pH ของการทดลองในช่วงที่ 2

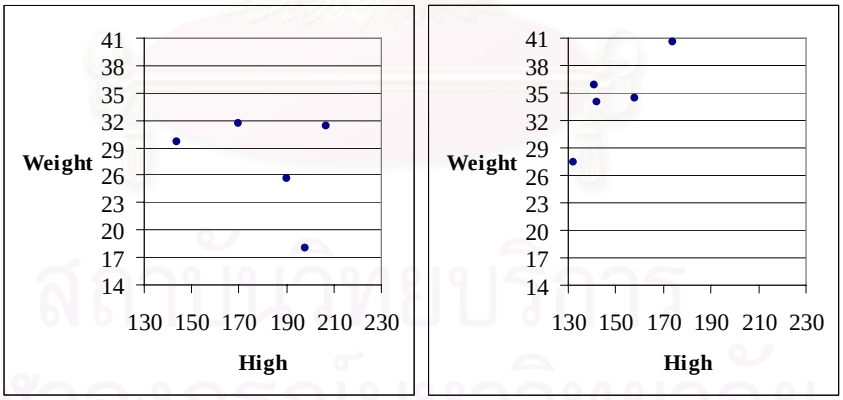
K_{S3} คือ ขอบจำกัดบนของความสูงของถั่วเหลืองในระยะที่ 3 สำหรับถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายที่มีระดับ pH ของการทดลองในช่วงที่ 2

Δt_{S3} คือ ระยะเวลาการเติบโตของถั่งเหลืองในระยะที่ 3 สำหรับถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายที่มีระดับ pH ของการทดลองในช่วงที่ 2

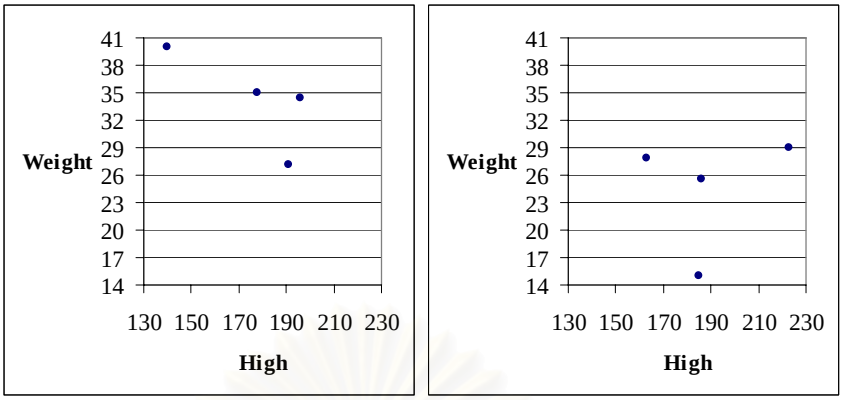
t_{Sm3} คือ เวลาที่ถั่วเหลืองมีอัตราการเติบโตมากที่สุดในระยะที่ 3 สำหรับถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายที่มีระดับ pH ของการทดลองในช่วงที่ 2

4.3.4 แบบจำลองน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารในระดับ pH ต่างๆ

ก่อนที่จะหาแบบจำลองน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารในระดับ pH ต่างๆ ต้องเข้าใจกระบวนการเติบโตของถั่วเหลืองที่มีผลต่อน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลือง จากข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จากการทดลองซึ่งแสดงในภาคผนวก จะมีการทดลองปลูก 2 ช่วงเวลาคือช่วงแรกตั้งแต่วันที่ 16 สิงหาคม 2548 - วันที่ 29 ตุลาคม 2548 เมื่อนำข้อมูลความสูงของถั่วเหลือง กับน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองมาวาดกราฟ ดังรูปที่ 4.6 และช่วงที่สองตั้งแต่วันที่ 11 มกราคม 2549 - วันที่ 26 มีนาคม 2549 เมื่อนำข้อมูลความสูงของถั่วเหลือง กับน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองหลังเก็บเกี่ยวมาวาดกราฟแล้ว ดังรูปที่ 4.7

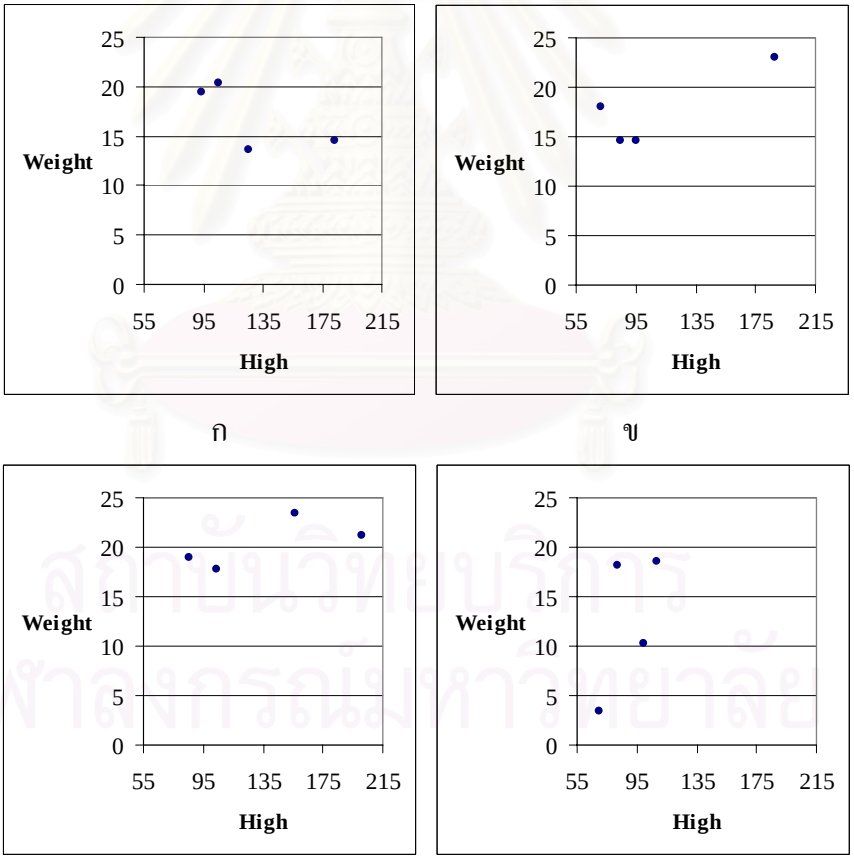


ก ข



ค ง

รูปที่ 4.6 กราฟข้อมูลการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายระดับ pH ต่างๆ กับน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองหลังเก็บเกี่ยวของการทดลองช่วงที่ 1 ตั้งแต่วันที่ 16 สิงหาคม 2548 - วันที่ 29 ตุลาคม 2548 (ก) pH 4.8 (ข) pH 5.8 (ค) pH 6.8 (ง) pH 7.8



ก ข

ค ง

รูปที่ 4.7 กราฟข้อมูลการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายระดับ pH ต่างๆ กับน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองหลังเก็บเกี่ยวของการทดลองช่วงที่ 2 ตั้งแต่วันที่ 11 มกราคม 2549 - วันที่ 26 มีนาคม 2549 (ก) pH 4.8 (ข) pH 5.8 (ค) pH 6.8 (ง) pH 7.8

4.3.4.1 แบบจำลองน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 1

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.6 จะไม่สามารถหาบทสรุปในรูปแบบฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ได้ ดังนั้นจะวิเคราะห์หาน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองโดยการนำข้อมูล pH ของสารละลายธาตุอาหารและความสูงของถั่วเหลืองที่ได้จากการทดลองช่วงที่ 1 นำไปหาแบบจำลองน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 1 โดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นจะได้แบบจำลองดังนี้

$$y_k = 40.60\, f^{(2)}\left(\sum_{j=0}^{m} w_{jk}^{(2)} h_{jk}\right) \quad \text{สำหรับทุกๆ } k = 1,2,...,r$$

$$h_j = f^{(1)}\left(\sum_{i=0}^{2} w_{ij}^{(1)} x_i\right) \quad \text{สำหรับทุกๆ } j = 1,2,...,m$$

โดยที่

h_j คือ hidden layer

x_0, h_0 คือ bias มีค่าเท่ากับ 1 เสมอ

x_1 คือ pH ของสารละลายธาตุอาหารที่ใช้สำหรับปลูกถั่วเหลือง

x_2 คือ ความสูงของถั่วเหลือง

y_k คือ น้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลือง

m คือ จำนวน hidden layer เท่ากับ 25 hidden layer

$f^{(1)}$ คือ activate function ซึ่งมีรูปแบบ $f^{(1)}(a) = \dfrac{1}{1+e^{-a}}$

$f^{(2)}$ คือ activate function ซึ่งมีรูปแบบ $f^{(2)}(a) = a$

เมื่อพิจารณา x_2 คือ ความสูงของถั่วเหลืองหรือแบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 1 จะได้ค่า $x_2 = G_R(t, pH)$

สำหรับค่า 40.60 คือ ค่าน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองที่มีน้ำหนักมากสุดจากการทดลอง

หลังจากนั้นให้โครงข่ายประสาทเทียมทำการเรียนรู้แบบ Back-Propagation กับข้อมูลของการเรียนรู้ซึ่งประกอบด้วยชุดข้อมูลนำเข้าและชุดข้อมูลนำออก

$$w_{ij}^{(1)} = \begin{bmatrix} 4.883 & -0.221 \\ -27.573 & 0.893 \\ 7.091 & -0.356 \\ 8.172 & 0.049 \\ 8.366 & -0.130 \\ 4.169 & 0.229 \\ 0.560 & 0.125 \\ 13.199 & -0.019 \\ -8.456 & -0.174 \\ 7.966 & -0.467 \\ 2.449 & -0.525 \\ -6.144 & 0.094 \\ 8.409 & 0.384 \\ 9.722 & 0.004 \\ -6.234 & -0.110 \\ -8.000 & 0.347 \\ 7.853 & -0.229 \\ -8.833 & -0.141 \\ -3.948 & -0.328 \\ 18.523 & -0.569 \\ -6.938 & -0.339 \\ -0.730 & -0.003 \\ -2.490 & -0.246 \\ 8.190 & 0.369 \\ 1.689 & 0.064 \end{bmatrix} \qquad w_j^{(2)} = \begin{bmatrix} 7.859 \\ 5.913 \\ -0.018 \\ 0.050 \\ -3.571 \\ -3.222 \\ 0.152 \\ 0.313 \\ 0.552 \\ -0.351 \\ 0.240 \\ 0.508 \\ 0.140 \\ 0.343 \\ 2.533 \\ -0.638 \\ 2.548 \\ 0.262 \\ -2.029 \\ -0.169 \\ 0.270 \\ 0.252 \\ -3.331 \\ -0.029 \\ -0.754 \end{bmatrix}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.4.2 แบบจำลองน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 2

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.7 จะไม่สามารถหาบทสรุปในรูปแบบฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ได้ ดังนั้นจะวิเคราะห์หาน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองโดยการนำข้อมูล pH ของสารละลายธาตุอาหารและความสูงของถั่วเหลืองที่ได้จากการทดลองช่วงที่ 2 นำไปหาแบบจำลองน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 2 โดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นจะได้แบบจำลองดังนี้

$$y_k = 40.60\, f^{(2)}\left(\sum_{j=0}^{m} w_{jk}^{(2)} h_{jk}\right) \quad \text{สำหรับทุกๆ } k = 1,2,...,r$$

$$h_j = f^{(1)}\left(\sum_{i=0}^{2} w_{ij}^{(1)} x_i\right) \quad \text{สำหรับทุกๆ } j = 1,2,...,m$$

โดยที่

h_j คือ hidden layer

x_0, h_0 คือ bias มีค่าเท่ากับ 1 เสมอ

x_1 คือ pH ของสารละลายธาตุอาหารที่ใช้สำหรับปลูกถั่วเหลือง

x_2 คือ ความสูงของถั่วเหลือง

y_k คือ น้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลือง

m คือ จำนวน hidden layer เท่ากับ 30 hidden layer

$f^{(1)}$ คือ activate function ซึ่งมีรูปแบบ $f^{(1)}(a) = \dfrac{1}{1+e^{-a}}$

$f^{(2)}$ คือ activate function ซึ่งมีรูปแบบ $f^{(2)}(a) = a$

เมื่อพิจารณา x_2 คือ ความสูงของถั่วเหลืองหรือแบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 2 จะได้ค่า $x_2 = G_S(t, pH)$

สำหรับค่า 40.60 คือ ค่าน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองที่มีน้ำหนักมากสุดจากการทดลอง

หลังจากนั้นให้โครงข่ายประสาทเทียมทำการเรียนรู้แบบ Back-Propagation กับข้อมูลของการเรียนรู้ซึ่งประกอบด้วยชุดข้อมูลนำเข้าและชุดข้อมูลนำออก

$$w_{ij}^{(1)} = \begin{bmatrix} 8.303 & -0.198 \\ -8.035 & -0.065 \\ -9.318 & 0.101 \\ 9.580 & -0.118 \\ 10.263 & -0.330 \\ -6.491 & 0.267 \\ 7.950 & -0.092 \\ 6.784 & -0.078 \\ -7.136 & -0.072 \\ -6.366 & -0.021 \\ -8.602 & -0.105 \\ -10.586 & 0.101 \\ -1.033 & 0.044 \\ -10.071 & 0.401 \\ -3.962 & -0.973 \\ 10.136 & -0.378 \\ 8.390 & -0.616 \\ 7.524 & 0.664 \\ 5.771 & -0.159 \\ -6.065 & 0.026 \\ -8.538 & 0.020 \\ 6.005 & -0.112 \\ -3.174 & -0.055 \\ 5.480 & 0.209 \\ -9.232 & 0.184 \\ 4.157 & -0.046 \\ -7.028 & -0.170 \\ -8.225 & 0.060 \\ 8.049 & -1.084 \\ 10.163 & 0.209 \end{bmatrix} \qquad w_{j}^{(2)} = \begin{bmatrix} -0.064 \\ 0.652 \\ 1.758 \\ 0.877 \\ -0.352 \\ -0.814 \\ 0.137 \\ 0.274 \\ -0.608 \\ 0.336 \\ -0.956 \\ -0.768 \\ 0.002 \\ 0.628 \\ -0.111 \\ 0.195 \\ 0.101 \\ 1.096 \\ -0.560 \\ -0.375 \\ 0.182 \\ 0.815 \\ -0.097 \\ -1.135 \\ 0.229 \\ 0.720 \\ -1.199 \\ 0.006 \\ -0.093 \\ 0.339 \end{bmatrix}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
ผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการวิจัยคือ แบบจำลองการเติบโต และแบบจำลองน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2

5.1 ผลการทดลองช่วงที่ 1

เมื่อนำแบบจำลองการเจริญเติบโต $G_R(t, pH)$ ที่ได้มาใช้เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของถั่วเหลืองในระดับ pH 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8 กับค่าจริงที่ได้จากการทดลองได้ผลตามตารางที่ 5.1

pH	ความสูงเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง	ความสูงจากแบบจำลอง	ความคลาดเคลื่อน (%)
4.80	181.80	182.10666	-0.16868
5.80	149.40	149.70705	-0.20552
6.80	176.25	176.43316	-0.10392
7.80	189.25	189.41334	-0.08631

ตารางที่ 5.1 แสดงผลของความสูงเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองของการทดลองช่วงที่ 1

แบบจำลองน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 1 หรือ $G_R(t, pH)$ สามารถมาทำนายความสูงของถั่วเหลืองที่ปลูกในระดับ pH 4.8 – 7.8 ตามตารางที่ 5.2

pH	ความสูง
4.80	182.10666
4.90	174.13767
5.00	167.40923
5.10	161.85161
5.20	157.39387
5.30	153.96441
5.40	151.49115
5.50	149.90165
5.60	149.12316
5.70	149.08268
5.80	149.70705

pH	ความสูง
5.90	150.92305
6.00	152.65746
6.10	154.83712
6.20	157.38895
6.30	160.23997
6.40	163.31726
6.50	166.54799
6.60	169.85937
6.70	173.17866
6.80	176.43316

pH	ความสูง
6.90	179.55018
7.00	182.45707
7.10	185.08116
7.20	187.34976
7.30	189.19011
7.40	190.52934
7.50	191.29447
7.60	191.41238
7.70	190.80981
7.80	189.41334

ตารางที่ 5.2 แสดงผลความสูงของถั่วเหลืองที่ปลูกในระดับ pH 4.8-7.8 ของการทดลองช่วงที่ 1

เมื่อนำข้อมูล pH และความสูงของแต่ละต้นที่ได้มาจากการทดลองช่วงที่ 1 นำมาเป็นข้อมูลเข้า (input) ของแบบจำลองน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 1 จะได้น้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองซึ่งแสดงในตารางที่ 5.3 และจะมีค่าความคลาดเคลื่อนของชุดข้อมูลน้อยกว่า 4 เปอร์เซ็นต์

pH	ความสูง	น้ำหนักผลผลิตจากข้อมูลการทดลอง	น้ำหนักผลผลิตจากแบบจำลอง	ความคลาดเคลื่อน (%)
4.80	144.00	29.60000	29.58590	0.04765
4.80	170.00	31.60000	31.60819	-0.02592
4.80	190.00	25.60000	25.60935	-0.03654
4.80	198.00	18.00000	18.00404	-0.02244
4.80	207.00	31.40000	31.48691	-0.27677
5.80	132.00	27.40000	27.41393	-0.05084
5.80	141.00	35.80000	34.88947	2.54337
5.80	142.00	34.00000	35.17233	-3.44803
5.80	158.00	34.40000	34.44180	-0.12150
5.80	174.00	40.60000	40.60264	-0.00650
6.80	140.00	40.00000	39.96856	0.07861
6.80	178.00	35.00000	34.24679	2.15202
6.80	191.00	27.20000	27.34668	-0.53926
6.80	196.00	34.40000	34.39092	0.02638
7.80	163.00	27.80000	27.83475	-0.12499
7.80	185.00	15.00000	15.45467	-3.03113
7.80	186.00	25.60000	24.63318	3.77664
7.80	223.00	29.00000	29.01013	-0.03494

ตารางที่ 5.3 แสดงผลของแบบจำลองเปรียบเทียบผลของข้อมูลการทดลองของการทดลองช่วงที่ 1

เมื่อนำค่า pH และค่าความสูงแต่ละ pH ที่ได้จากแบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 1 ในช่วง pH 4.8 – 7.8 นำมาเป็นข้อมูลเข้า (input) ของแบบจำลองน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 1 จะได้ค่าน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองซึ่งแสดงในตารางที่ 5.4

pH	ความสูง	น้ำหนัก
4.80	127.25629	27.36269
4.90	120.21143	27.07247
5.00	114.66664	29.17951
5.10	110.50525	30.26397
5.20	107.60989	30.88793
5.30	105.86284	31.97993
5.40	105.14620	32.36939
5.50	105.34197	32.13459
5.60	106.33214	33.35444
5.70	107.99866	34.18569
5.80	110.22347	34.76927
5.90	112.88851	35.16501
6.00	115.87570	35.37005
6.10	119.06698	35.40580
6.20	122.34425	35.31734
6.30	125.58943	35.15736
6.40	128.68448	34.97272
6.50	131.51137	34.79666
6.60	133.95212	34.64713
6.70	135.88881	34.52703
6.80	137.20355	34.41444
6.90	137.77846	34.21593
7.00	137.49568	33.67681
7.10	136.23723	32.50588
7.20	133.88505	31.05979
7.30	130.32093	30.15138
7.40	125.42654	29.67548
7.50	119.08349	28.76818
7.60	111.17343	26.98612
7.70	101.57814	25.08227
7.80	90.17959	24.53055

ตารางที่ 5.4 แสดงผลความสูงและน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองแต่ละ pH ของการทดลองช่วงที่ 1

5.2 ผลการทดลองช่วงที่ 2

เมื่อนำแบบจำลองการเจริญเติบโต $G_S(t, pH)$ ที่ได้มาใช้เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของถั่วเหลืองในระดับ pH 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8 กับค่าจริงที่ได้จากการทดลองได้ผลตามตารางที่ 5.5

pH	ความสูงเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง	ความสูงจากแบบจำลอง	ความคลาดเคลื่อน (%)
4.80	126.75	127.25629	-0.39944
5.80	110.00	110.22347	-0.20315
6.80	136.75	137.20355	-0.33166
7.80	90.00	90.17959	-0.19954

ตารางที่ 5.5 แสดงผลของความสูงเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองของการทดลองช่วงที่ 2

แบบจำลองน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 2 หรือ $G_S(t, pH)$ สามารถมาทำนายความสูงของถั่วเหลืองที่ปลูกในระดับ pH 4.8 – 7.8 ตามตารางที่ 5.6

pH	ความสูง	pH	ความสูง	pH	ความสูง
4.80	127.25629	5.90	112.88851	6.90	137.77846
4.90	120.21143	6.00	115.87570	7.00	137.49568
5.00	114.66664	6.10	119.06698	7.10	136.23723
5.10	110.50525	6.20	122.34425	7.20	133.88505
5.20	107.60989	6.30	125.58943	7.30	130.32093
5.30	105.86284	6.40	128.68448	7.40	125.42654
5.40	105.14620	6.50	131.51137	7.50	119.08349
5.50	105.34197	6.60	133.95212	7.60	111.17343
5.60	106.33214	6.70	135.88881	7.70	101.57814
5.70	107.99866	6.80	137.20355	7.80	90.17959
5.80	110.22347				

ตารางที่ 5.6 แสดงผลความสูงของถั่วเหลืองที่ปลูกในระดับ pH 4.8-7.8 ของการทดลองช่วงที่ 2

เมื่อนำข้อมูล pH และความสูงของแต่ละต้นที่ได้มาจากการทดลองช่วงที่ 2 นำมาเป็นข้อมูลเข้า (input) ของแบบจำลองน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 2 จะได้น้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองซึ่งแสดงในตารางที่ 5.7 และจะมีค่าความคลาดเคลื่อนของชุดข้อมูลไม่เกิน 7 เปอร์เซ็นต์

pH	ความสูง	น้ำหนักผลผลิตจากข้อมูลการทดลอง	น้ำหนักผลผลิตจากแบบจำลอง	ความคลาดเคลื่อน (%)
4.80	94.00	19.40	19.39984	0.00081
4.80	105.00	20.40	20.25519	0.70984
4.80	125.00	13.60	14.09472	-3.63762
4.80	183.00	14.60	14.42384	1.20657
5.80	72.00	18.00	18.06698	-0.37211
5.80	85.00	14.60	14.67000	-0.47945
5.80	95.00	14.60	14.65749	-0.39380
5.80	188.00	23.00	22.93143	0.29812
6.80	86.00	19.00	18.96540	0.18212
6.80	104.00	17.80	19.02243	-6.86758
6.80	156.00	23.40	23.29339	0.45562
6.80	201.00	21.20	21.20367	-0.01729
7.80	70.00	3.40	3.42545	-0.74867
7.80	82.00	18.20	18.20403	-0.02212
7.80	100.00	10.20	10.21921	-0.18831
7.80	108.00	18.60	18.61126	-0.06055

ตารางที่ 5.7 แสดงผลของแบบจำลองเปรียบเทียบผลของข้อมูลการทดลองของการทดลองช่วงที่ 2

เมื่อนำค่า pH และค่าความสูงแต่ละ pH ที่ได้จากแบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 2 ในช่วง pH 4.8 – 7.8 นำมาเป็นข้อมูลเข้า (input) ของแบบจำลองน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองช่วงที่ 2 จะได้ค่าน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองซึ่งแสดงในตารางที่ 5.8

แบบจำลองน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองเกิดจากการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้ง 2 ช่วงเวลาคือช่วงแรกตั้งแต่วันที่ 16 สิงหาคม 2548 - วันที่ 29 ตุลาคม 2548 มีการทดลอง 4 ชุดการทดลองๆ ละ 5 ซ้ำ และช่วงที่สองตั้งแต่วันที่ 11 มกราคม 2549 - วันที่ 26 มีนาคม มีการทดลอง 4 ชุดการทดลองๆ ละ 4 ซ้ำ โดยแต่ละชุดการทดลองจะปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับ pH เท่ากับ 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8 ซึ่งช่วงของ pH 4.8 - 7.8 เป็นช่วงที่สามารถปลูกถั่วเหลืองให้ได้ผลผลิตได้ ดังนั้นแบบจำลองนี้จะสามารถประมาณผลผลิตได้ในช่วงของ pH 4.8 - 7.8 เท่านั้น

pH	ความสูง	น้ำหนัก
4.80	127.25629	17.36178
4.90	120.21143	16.22582
5.00	114.66664	16.08083
5.10	110.50525	16.46044
5.20	107.60989	16.51683
5.30	105.86284	16.15898
5.40	105.14620	16.04364
5.50	105.34197	16.51262
5.60	106.33214	17.11913
5.70	107.99866	17.48736
5.80	110.22347	17.67262
5.90	112.88851	17.83687
6.00	115.87570	18.07690
6.10	119.06698	18.43157
6.20	122.34425	18.90518
6.30	125.58943	19.46816
6.40	128.68448	20.04407
6.50	131.51137	20.50109
6.60	133.95212	20.67833
6.70	135.88881	20.47909
6.80	137.20355	19.99552
6.90	137.77846	19.49212
7.00	137.49568	19.17119
7.10	136.23723	19.01720
7.20	133.88505	18.88516
7.30	130.32093	18.59594
7.40	125.42654	17.92369
7.50	119.08349	16.69992
7.60	111.17343	15.59723
7.70	101.57814	14.04151
7.80	90.17959	12.32689

ตารางที่ 5.8 แสดงผลความสูงและน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองแต่ละ pH ของการทดลองช่วงที่ 2

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

จากการหาแบบจำลองการเติบโตและน้ำหนักของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับ pH เท่ากับ 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8 สามารถสรุปผลงานวิจัยได้ดังนี้

1. จากการทำการทดลองปลูกถั่วเหลืองและเก็บข้อมูลการเติบโตและน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองเพื่อนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้ทำการปลูกถั่วเหลืองในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองในช่วงการทดลองช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 พบว่าน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองในช่วง pH ตั้งแต่ 5.5 - 7.0 เป็นช่วงที่ถั่วเหลืองให้น้ำหนักผลผลิตดี

2. แบบจำลองการเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารระดับ pH ต่างๆ ของการทดลองในช่วงการทดลองช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 ที่ได้จากงานวิจัยนี้ เมื่อนำมาทดสอบเปรียบเทียบกับข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองในแต่ละช่วงเวลา โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อน พบว่าในการทดลองช่วงที่ 1 จะมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ และในการทดลองช่วงที่ 2 จะมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 7 เปอร์เซ็นต์แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้นี้มีความเหมาะสมเพียงพอที่จะนำไปใช้พยากรณ์การเติบโตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับ pH ระหว่าง 4.8 - 7.8 ได้

3. ข้อจำกัดของแบบทดลองนี้คือ ใช้ได้สำหรับถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารในระดับ pH ระหว่าง 4.8 - 7.8 เนื่องจากแบบจำลองสร้างมาจากข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จากการทดลองปลูกถั่วเหลืองในสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับ pH เท่ากับ 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8 จากการทดสอบพบว่าไม่สามารถใช้กับถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับ pH น้อยกว่า 4.8 และระดับ pH มากกว่า 7.8 เนื่องจากค่าพารามิเตอร์แบบจำลองการเติบโตถั่วเหลืองเป็นพหุนามอินเทอร์โพเลชัน ทำให้เมื่อแทนค่า pH ที่น้อยกว่า 4.8 และ pH ที่มากกว่า 7.8 จะทำให้ค่าประมาณการเติบโตของถั่วเหลืองอาจคลาดเคลื่อนมากเกินไปซึ่งจะส่งผลให้การประมาณน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองคลาดเคลื่อนตามไปด้วย

4. ผลที่ได้จากการทำนายผลผลิตสามารถนำไปใช้ทำนายผลผลิตจริงก่อนที่จะทำการเพาะปลูกจริงๆ ซึ่งจะสามารถลดต้นทุนในการเพาะปลูกได้

5. ความผันผวนของข้อมูลที่เก็บจากการทดลองมีสูง เนื่องจากไม่ได้มีการควบคุมปัจจัยอื่นที่เป็นผลกระทบกับการเจริญเติบโตเช่น ความเข้มของแสงแดด อุณหภูมิเป็นต้น ทำให้แบบจำลองมีข้อจำกัดคือ ใช้สำหรับทำนายผลผลิตถั่วเหลืองที่ปลูกในช่วงเวลาปลายฤดูฝนและฤดูร้อน

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าสามารถพัฒนางานต่อไปได้อีก คือ ศึกษาผลกระทบจากการปลูกพืชต่างๆ ในดินหรือสารละลายธาตุอาหารในระดับ pH ต่างๆ และสารละลายธาตุอาหารควรจะใช้สูตรอาหารที่เหมาะสมกับพืชที่ปลูกในเมืองไทยและมีระดับ pH ถี่มากขึ้น เพื่อที่จะปรับปรุงแบบจำลองการเติบโตและน้ำหนักผลผลิตของพืชให้ดีขึ้น และผู้ที่ทำงานวิจัยภายหลังสามารถทำวิจัยโดยเพิ่มปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเติบโตของถั่วเหลืองให้มากขึ้น เพราะโดยธรรมชาติการเติบโตและการให้ผลผลิตของพืชต่าง ๆ ต้องใช้ปัจจัยในการเติบโตและให้ผลผลิตเข้ามาเกี่ยวข้องเป็นจำนวนมาก อาทิเช่น สารอาหารต่าง ๆ, ปริมาณแสงที่ได้รับแต่ละวัน, ความเข้มของแสง , อุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นต้น เมื่อทำการทดลองในแต่ละปัจจัยที่กล่าวมานั้นได้ครบหมดแล้วก็ควรนำปัจจัยต่างๆ ทำควบคู่กันเช่น ปลูกพืชในดินหรือสารละลายที่มีระดับ pH แตกต่างกันกับความเข้มข้นของธาตุอาหารต่างๆ เป็นต้น แต่การที่จะหาแบบจำลองการเติบโตและน้ำหนักผลผลิตของพืชที่ใช้ปัจจัยดังกล่าวมานั้นต้องได้รับความร่วมมือจากหลายๆ ด้าน เช่นด้านคณิตศาสตร์ เกษตรศาสตร์ และพฤกษศาสตร์ ซึ่งจะทำให้แบบจำลองที่ได้จะมีความสมบูรณ์และสามารถอธิบายผลได้ตามหลักเกณฑ์ทางพฤกษศาสตร์ซึ่งจะเป็นประโยชน์ทั้งในด้านเกษตรและวิทยาศาสตร์มากเลยทีเดียว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] Koca, N., Karadeniz, F., and Burdurlu, H. S. Effect of pH on Chlorophyll Degradatio and Colour Loss in Blanched Green Peas. Food Engineering Department, Faculty of Engineering, Ankara University, 2003.

[2] Symonds, W.L., Campbell, L.C., and Clemens, J. Respond of Ornamental Eucalyptus from Acidic and Alkaline Habitats to Potting Medium pH. Department of Crop Sciences, University of Sydney, 2000.

[3] Gudrupa, I., Kruzmane, D., and Ievinsh, G. Effect of CCC and pH on Shoot Elongation in Sedum Rubrotinctum R.T. Clausen. Department of Plant Physiology, Institute of Biology, University of Latvia, 2002.

[4] Batty, L. C., and Younger P. L. The Effect of pH on Plant Litter Decomposition and Metal Cycling in Wetland Mesocosms Supplied with Mine Drainage. University of Newcastle, 2006.

[5] Prusinkiewicz, P., and Lindenmayer, A. The Algorithm Beauty of Plants. New York:Springer-Verlag, 1990.

[6] Meyer, P.S., and Ausubel, J.H. Carring Capacity: A Model with Logistically Varying Limits The Journal Technological Forecasting and Social Change 61, 3 (1999): 209-214.

[7] Chuai-Aree, S. An Algorithm for Simulation and Visualization of Plant Shoots Growth. Master's thesis,Department of Mathematics, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 2000.

[8] Jitpttanakul, A. Simulation and Visualization of Water Famine Effects on Soybean Growth. Master's Thesis, Department of Mathematics, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 2003.

[9] Meyer, P.S., Yung, J.W., and Ausubel, J.H. A Primer on Logistic Growth and SubStitution: The Mathematics of the Loglet Lab Software The Journal Technological Forecasting and Social Change 61, 3 (1999): 247-271.

[10] Suratgar, A. A., Tavakoli, M. B., and Hoseinabadi, A. Modified Levenberg-Marquardt Method for Neural Networks Training. Enformatika, 2005.

[11] นันทนา อังกินันท์ และศุภจิตรา ชัชวาลย์. ปฏิบัติการสรีรวิทยาของพืช. ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2000.

[12] Simon Haykin. Neural Networks. 2 nd ed. New Jersey: Prentice-Hall,1999.

[13] Madsen, K., Neilsen, H.B., and Tingleff, O. Method for Non-Linear Least Squares Problem. 2 nd ed. Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, 2004.

[14] Grosjean, Ph. Growth model of the reared Sea Urchin *Paracentrotus lividus* (Lamarck,1816) Degree of Doctor in Agronomic Sciences and Biological Engineering Marine Biology Laboratory Faculty of Science University of Bruxelles, 2001.

[15] คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่8. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2541.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ภาคผนวกนี้ แสดงตารางที่เก็บข้อมูลจากการทดลองการเจริญเติบโตของต้นถั่วเหลืองที่ระดับ pH เท่ากับ 4.8, 5.8, 6.8 และ 7.8 ในแต่ละช่วงเวลาที่ทำการทดลอง โดยแสดงอยู่ในรูปแบบตารางความสูงเฉลี่ยและเก็บข้อมูลน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองของแต่ละต้นและแต่ละ pH และจะอธิบายวิธีการใช้ pH meter

ข้อมูลการเจริญเติบโตของถั่วเหลืองในช่วงเวลาที่ทำการทดลองในช่วงที่ 1 ปลูกตั้งแต่วันที่ 16 สิงหาคม 2548 ถึง วันที่ 29 ตุลาคม 2548

อายุ (วัน)	ความสูงเฉลี่ยของถั่วเหลือง (เซนติเมตร)			
	pH 4.8	pH 5.8	pH 6.8	pH 7.8
1	3.000	3.000	3.000	3.000
2	5.000	5.000	5.000	5.000
3	5.600	6.800	6.125	6.000
4	7.900	8.900	8.875	8.500
5	9.000	10.500	10.000	9.750
6	9.600	11.800	10.875	10.875
7	10.100	12.500	11.375	11.500
8	10.600	13.300	11.875	11.875
9	11.300	14.100	12.375	12.500
10	12.000	14.800	12.875	13.250
11	13.000	15.900	13.625	14.250
12	13.900	17.500	14.375	15.125
13	15.200	18.900	15.500	16.625
14	16.600	20.200	16.750	18.250
15	18.300	22.100	18.625	21.000
16	20.400	24.500	20.875	23.125
17	23.100	27.100	23.750	26.250
18	25.400	29.800	26.750	29.250
19	29.100	33.200	30.625	33.125
20	32.900	36.700	34.375	37.250
21	38.100	41.200	39.500	43.750
22	43.800	45.200	44.000	49.250
23	49.400	50.000	50.250	55.250
24	56.400	55.100	56.125	61.875
25	62.900	60.500	63.000	68.375
26	69.100	65.900	68.750	75.000
27	75.800	71.000	75.500	82.375
28	83.000	76.600	81.250	90.000
29	88.700	82.200	87.750	96.625

อายุ (วัน)	ความสูงเฉลี่ยของถั่วเหลือง (เซนติเมตร)			
	pH 4.8	pH 5.8	pH 6.8	pH 7.8
30	94.700	87.800	94.000	102.875
31	101.000	92.800	99.750	109.500
32	106.800	97.800	104.750	115.500
33	112.400	102.500	110.500	119.750
34	117.300	107.300	115.000	125.250
35	121.600	111.300	119.375	128.750
36	126.200	115.200	124.000	134.000
37	130.800	118.600	129.000	139.125
38	135.000	122.000	134.000	144.250
39	139.000	125.400	138.750	149.125
40	143.300	128.500	143.250	154.000
41	147.600	131.500	147.625	159.000
42	151.800	134.000	151.750	163.500
43	155.200	136.600	155.500	167.375
44	159.000	138.600	158.875	171.250
45	162.600	140.700	162.125	175.125
46	165.800	142.400	165.250	179.000
47	168.300	143.900	167.375	181.125
48	170.600	145.100	169.250	183.250
49	173.000	146.200	171.125	184.875
50	175.400	147.100	172.625	186.125
51	176.400	147.800	173.250	186.750
52	177.300	148.400	173.750	187.375
53	178.300	148.700	174.250	187.875
54	179.000	149.000	174.750	188.375
55	179.800	149.200	175.250	188.750
56	180.500	149.400	175.625	189.000
57	181.300	149.400	176.000	189.250
58	181.800	149.400	176.250	189.250
59	181.800	149.400	176.250	189.250
60	181.800	149.400	176.250	189.250
61	181.800	149.400	176.250	189.250
62	181.800	149.400	176.250	189.250
63	181.800	149.400	176.250	189.250
64	181.800	149.400	176.250	189.250
65	181.800	149.400	176.250	189.250
66	181.800	149.400	176.250	189.250
67	181.800	149.400	176.250	189.250
68	181.800	149.400	176.250	189.250
69	181.800	149.400	176.250	189.250
70	181.800	149.400	176.250	189.250
71	181.800	149.400	176.250	189.250

อายุ (วัน)	ความสูงเฉลี่ยของถั่วเหลือง (เซนติเมตร)			
	pH 4.8	pH 5.8	pH 6.8	pH 7.8
72	181.800	149.400	176.250	189.250
73	181.800	149.400	176.250	189.250
74	181.800	149.400	176.250	189.250
75	181.800	149.400	176.250	189.250

ข้อมูลการเจริญเติบโตของถั่วเหลืองในช่วงเวลาที่ทำการทดลองในช่วงที่ 2 ปลูกตั้งแต่วันที่ 11 มกราคม 2549 ถึง วันที่ 26 มีนาคม 2549

อายุ (วัน)	ความสูงเฉลี่ยของถั่วเหลือง (เซนติเมตร)			
	pH 4.8	pH 5.8	pH 6.8	pH 7.8
1	3.000	3.000	3.000	3.000
2	5.000	5.000	5.000	5.000
3	6.625	7.000	6.625	5.875
4	8.250	8.500	8.125	7.125
5	9.125	10.125	9.625	8.875
6	10.250	12.125	11.000	10.500
7	11.000	13.375	12.500	11.500
8	11.625	14.875	13.875	12.250
9	12.375	16.125	14.625	13.000
10	13.125	17.000	15.375	13.750
11	13.625	17.750	16.125	14.750
12	14.250	18.500	16.875	15.375
13	14.875	19.375	17.750	16.125
14	15.500	20.250	18.375	17.000
15	16.125	21.125	19.125	17.625
16	16.750	21.875	19.750	18.125
17	17.250	22.875	20.375	19.125
18	18.250	24.250	21.625	20.000
19	19.500	26.000	22.875	20.875
20	20.625	27.750	24.250	21.750
21	21.625	30.000	25.625	22.375
22	24.500	34.125	28.750	24.375
23	26.750	38.250	32.000	26.250
24	29.875	41.875	35.375	28.875
25	33.500	46.000	39.750	31.875
26	37.000	50.250	43.500	35.000
27	40.875	54.125	47.500	38.000
28	44.250	57.750	51.125	40.750
29	47.875	62.250	55.375	44.000
30	51.000	65.250	58.875	47.000

อายุ (วัน)	ความสูงเฉลี่ยของถั่วเหลือง (เซนติเมตร)			
	pH 4.8	pH 5.8	pH 6.8	pH 7.8
31	54.250	68.250	62.625	49.625
32	58.250	72.250	67.500	52.375
33	62.375	76.250	72.250	55.125
34	66.250	79.750	76.750	57.125
35	70.375	83.125	80.750	59.000
36	74.875	86.250	85.250	61.125
37	79.000	88.125	89.500	62.500
38	83.250	90.000	93.750	63.875
39	86.875	92.000	97.750	65.625
40	90.625	94.125	101.750	67.875
41	94.250	96.000	105.750	70.000
42	98.500	98.250	109.500	72.750
43	101.750	99.500	112.625	74.750
44	105.000	100.750	115.750	76.750
45	108.250	102.000	119.000	78.750
46	111.500	103.250	122.125	80.750
47	114.750	104.500	125.125	82.750
48	118.000	105.750	128.125	84.750
49	121.250	107.000	131.125	86.750
50	124.625	108.750	134.000	88.500
51	125.375	109.000	135.000	89.375
52	126.000	109.250	135.625	89.750
53	126.625	109.500	136.250	89.875
54	126.750	109.750	136.500	90.000
55	126.750	110.000	136.750	90.000
56	126.750	110.000	136.750	90.000
57	126.750	110.000	136.750	90.000
58	126.750	110.000	136.750	90.000
59	126.750	110.000	136.750	90.000
60	126.750	110.000	136.750	90.000
61	126.750	110.000	136.750	90.000
62	126.750	110.000	136.750	90.000
63	126.750	110.000	136.750	90.000
64	126.750	110.000	136.750	90.000
65	126.750	110.000	136.750	90.000
66	126.750	110.000	136.750	90.000
67	126.750	110.000	136.750	90.000
68	126.750	110.000	136.750	90.000
69	126.750	110.000	136.750	90.000
70	126.750	110.000	136.750	90.000
71	126.750	110.000	136.750	90.000
72	126.750	110.000	136.750	90.000

อายุ (วัน)	ความสูงเฉลี่ยของถั่วเหลือง (เซนติเมตร)			
	pH 4.8	pH 5.8	pH 6.8	pH 7.8
73	126.750	110.000	136.750	90.000
74	126.750	110.000	136.750	90.000
75	126.750	110.000	136.750	90.000

ข้อมูลน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองของแต่ละต้นและแต่ละ pH ในช่วงเวลาที่ทำการทดลองในช่วงที่ 1 ปลูกตั้งแต่วันที่ 16 สิงหาคม 2548 ถึง วันที่ 29 ตุลาคม 2548

ระดับ pH และต้นที่	ส่วนสูง (เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)
pH 4.8 ต้นที่ 1	144.00	29.60
pH 4.8 ต้นที่ 2	170.00	31.60
pH 4.8 ต้นที่ 3	190.00	25.60
pH 4.8 ต้นที่ 4	198.00	18.00
pH 4.8 ต้นที่5	207.00	31.40
ค่าเฉลี่ย	181.80	27.24
pH 5.8 ต้นที่ 1	132.00	27.40
pH 5.8 ต้นที่ 2	141.00	35.80
pH 5.8 ต้นที่ 3	142.00	34.00
pH 5.8 ต้นที่ 4	158.00	34.40
pH 5.8 ต้นที่ 5	174.00	40.60
ค่าเฉลี่ย	149.40	34.44
pH 6.8 ต้นที่ 1	140.00	40.00
pH 6.8 ต้นที่ 2	178.00	35.00
pH 6.8 ต้นที่ 3	191.00	27.20
pH 6.8 ต้นที่ 4	196.00	34.40
ค่าเฉลี่ย	176.25	34.15
pH 7.8 ต้นที่ 1	163.00	27.80
pH 7.8 ต้นที่ 2	185.00	15.00
pH 7.8 ต้นที่ 3	186.00	25.60
pH 7.8 ต้นที่ 4	223.00	29.00
ค่าเฉลี่ย	223.00	24.35

ข้อมูลน้ำหนักผลผลิตของถั่วเหลืองของแต่ละต้นและแต่ละ pH ในช่วงเวลาที่ทำการทดลองในช่วงที่ 2 ปลูกตั้งแต่วันที่ 11 มกราคม 2549 ถึง วันที่ 26 มีนาคม 2549

ระดับ pH และต้นที่	ส่วนสูง (เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)
pH 4.8 ต้นที่ 1	94.00	19.40
pH 4.8 ต้นที่ 2	105.00	20.40
pH 4.8 ต้นที่ 3	125.00	13.60
pH 4.8 ต้นที่ 4	183.00	14.60
ค่าเฉลี่ย	126.75	17.00
pH 5.8 ต้นที่ 1	72.00	18.00
pH 5.8 ต้นที่ 2	85.00	14.60
pH 5.8 ต้นที่ 3	95.00	14.60
pH 5.8 ต้นที่ 4	188.00	23.00
ค่าเฉลี่ย	110.00	17.55
pH 6.8 ต้นที่ 1	86.00	19.00
pH 6.8 ต้นที่ 2	104.00	17.80
pH 6.8 ต้นที่ 3	156.00	23.40
pH 6.8 ต้นที่ 4	201.00	21.20
ค่าเฉลี่ย	136.75	20.35
pH 7.8 ต้นที่ 1	70.00	3.40
pH 7.8 ต้นที่ 2	82.00	18.20
pH 7.8 ต้นที่ 3	100.00	10.20
pH 7.8 ต้นที่ 4	108.00	18.60
ค่าเฉลี่ย	90.00	12.60

วิธีการใช้ pH meterแบบกันน้ำรุ่น Waterproof pHScan 2

1. ถอดฝาครอบและกดปุ่ม ON/OFF เพื่อเปิดเครื่อง
2. ล้างอิเลคโทรดด้วยน้ำสะอาด และซับด้วยผ้าสะอาดหรือกระดาษ
3. สำหรับการตั้งค่ามาตรฐานให้จุ่มอิเลคโทรดลงในบัฟเฟอร์ pH 7 แล้วคนเบาๆ เพื่อไล่ฟองอากาศ
4. กดปุ่ม CAL หน้าจอจะกระพริบ รอสักครู่แล้วกดปุ่ม HOLD/CON เพื่อทำการยืนยันค่าและหน้าจอจะกลับสู่โหมดการวัดโดยอัตโนมัติ

5. ล้างอิเลคโทรดด้วยน้ำสะอาด และซับด้วยผ้าสะอาด หรือกระดาษ

6. ถ้าต้องการตั้งค่ามาตรฐานที่จุดอื่น (เช่น pH 4 หรือ pH 10) ให้ทำซ้ำตามขั้นตอนที่3,4 และ 5 โดยเปลี่ยนน้ำยามาตรฐาน เพื่อการวัดค่าที่ดีขึ้น ควรจะทำการตั้งค่ามาตรฐานน้ำยาบัฟเฟอร์ทั้ง 3 ค่า (pH7 , pH 4 และ pH 10)

7. จุ่มอิเลคโทรดลงในสารละลายที่ต้องการวัด คนเบา ๆรอจนค่าที่หน้าจอคงที่แล้วอ่านค่า

ข้อควรระวัง

หลังจากการใช้งานให้ทำความสะอาดอิเลคโทรดให้สะอาดทุกครั้ง ควรปิดฝาหลังจากการใช้งาน และควรเก็บอิเลคโทรดให้มีความชุ่มชื้นอยู่เสมอ โดยใส่กระดาษแล้วหยดสารละลายโปแตสเซียมคลอไรท์หรือน้ำสะอาดลงในกระดาษก่อนปิดฝาทุกครั้ง

E1 - แบตเตอรี่อ่อน

E2 - น้ำยามาตรฐานเสื่อม

การทำความสะอาดและเก็บรักษาหัวอิเลคโทรดเมื่อเลิกใช้งาน

1. ไม่ควรนำหัววัดอิเลคโทรดไปกวนในสารละลาย หรือวางหัวอิเลคโทรดกระแทกกับภาชนะที่วัดค่าเพราะจะทำให้หัววัดชำรุด

2. ควรใช้น้ำกลั่นฉีดล้างหัววัดอิเลคโทรดเท่านั้น และใช้กระดาษชำระซับน้ำที่ปลายหัวอิเลคโทรดเบา ๆ หลังจากการใช้งานทุกครั้ง (ห้ามสัมผัสกระเปาะแก้ว)

3. เมื่อค่าที่ได้เปลี่ยนไปจากเดิมมาก เนื่องจากอาจจะมีคราบน้ำมันหรือไขมัน ให้เตรียมผงซักฟอกผสมน้ำแล้วแช่หัววัดอิเลคโทรดประมาณ 20 - 30 นาที แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น

4. เมื่ออิเลคโทรดเกิดการอุดตัน อุ่นสารละลาย KCl หรือต้มน้ำแล้วใช้น้ำอุ่นอุณหภูมิประมาณ 40 - 60 $^{\circ}C$ จุ่มหัววัดอิเลคโทรดลงไปประมาณ 10 นาที หลังจากนั้นปล่อยให้อิเลคโทรดเย็นลง โดยยังคงแช่อยู่ในสารละลาย KCl หรือน้ำอุ่นนั้น

5. หากมีการสะสมของผลึกเกลือ ให้จุ่มหัววัดอิเลคโทรดลงในน้ำประปาประมาณ 10 – 15 นาที แล้วฉีดด้วยน้ำกลั่น

6. ควรเก็บปลายกระเปาะอิเลคโทรดให้เปียกอยู่เสมอ โดยเติม KCl หรอน้ำประปาลงในฝาอิเลคโทรดก่อนปิด

7. เมื่อใช้อิเลคโทรดใหม่ หรืออิเลคโทรดแห้งให้แช่อิเลคโทรดลงใน KCl หรือบัฟเฟอร์ 4 ประมาณ 1 – 2 ชั่วโมงก่อนนำมาใช้งาน

8. ห้ามเก็บอิเลคโทรดในน้ำกลั่นเพราะจะทำให้อ่านค่าไม่นิ่งและมีอายุการใช้งานสั้นลง

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายประเทือง เชื้อสอาด เกิดวันอาทิตย์ที่ 8 ตุลาคม พ.ศ. 2521 ที่อำเภอเชียงของ จังหวัดเชียงราย สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาคณิตศาสตร์ประยุกต์ ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา พ.ศ. 2544 และเข้ารับการศึกษาต่อในระดับปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิทยาการคณนา ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2546

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย