บทที่ 4
การสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดลอง การเก็บข้อมูลการเติบโตและการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าว จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการสะสมไนโตรเจนและการเติบโตของต้นข้าวและในส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลอง

4.1 การออกแบบการทดลองและเก็บข้อมูล

การศึกษาพฤติกรรมการเติบโตของข้าวเมื่อได้รับปริมาณไนโตรเจนที่แตกต่างกันนี้ จะใช้ข้าวเจ้าหอมพันธุ์ปทุมธานี 1 ซึ่งเป็นข้าวพันธุ์ไม่ไวแสง สามารถปลูกได้ตลอดทั้งปี มีคุณภาพคล้ายข้าวขาวดอกมะลิ 105 และยังให้ผลผลิตค่อนข้างสูง [8] มาใช้ในการศึกษาโดยทำการปลูกข้าวพันธุ์นี้ในชุดดินสระบุรี (Saraburi series: Sb) ซึ่งมีลักษณะเป็นดินเหนียวที่ใช้ในการทำนาทั่วไป และทำการปลูกที่โรงเรือนปลูกพืชของภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสนตั้งแต่วันที่ 12 เมษายน 2556 ถึงวันที่ 19 สิงหาคม 2556 ซึ่งปุ๋ยไนโตรเจนที่ใช้ในการทดลองนี้คือ ปุ๋ยยูเรีย โดยใส่ปุ๋ยแตกต่างกัน 5 ระดับ คือ $N_0 = 0, N_1 = 4, N_2 = 8, N_3 = 12$ และ $N_4 = 16$ กิโลกรัมไนโตรเจนต่อไร่ แต่เนื่องจากปุ๋ยยูเรียเป็นปุ๋ยที่สูญเสียได้ง่ายจึงแบ่งใส่ปุ๋ย 2 ครั้ง ในปริมาณที่เท่าๆกัน โดยครั้งแรก ให้เมื่อต้นข้าวมีอายุประมาณ 24 วัน และครั้งที่ 2 ให้เมื่อต้นข้าวอายุ 42 วัน

4.1.1 การเตรียมดินในการทดลอง

ก่อนการทดลองเราจำเป็นต้องนำตัวอย่างดินที่จะใช้ในการปลูกข้าว มาวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี เพื่อดูระดับความอุดมสมบูรณ์ของดิน ความเหมาะสมของดินที่จะใช้ในการทดลองผลการวิเคราะห์ดินพบว่าเป็นดินเค็มเล็กน้อย มีปฏิกิริยาของดิน (pH) เป็นกลาง มีอินทรียวัตถุ (OM) ในระดับต่ำ มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total N) ในระดับปานกลาง มีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (available P) ในระดับที่ค่อนข้างต่ำ และมีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable K) ในระดับสูง ดังตารางที่ 4.1

522155760

ลขหมู่ QW- 2556
เลขทะเบียน 7114
วันเดือนปี 16 ส.ค. 2556

สมบัติ	ค่าที่วัดได้
ปฏิกิริยาของดิน	6.93
ปริมาณอินทรียวัตถุ	1.28%
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	0.0869%
ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์	8.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกที่เปลี่ยนได้	222.547 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติทางเคมีของชุดดินสระบุรีก่อนทำการทดลอง

จากค่าวิเคราะห์ดินดังกล่าว พบว่าดินที่จะนำมาใช้ในการทดลองมีความอุดมสมบูรณ์ในระดับปานกลางและมีปริมาณของไนโตรเจนไม่เพียงพอที่ต้นข้าวจะใช้ในการเจริญเติบโต ดังนั้นดินชุดนี้จึงเหมาะสมที่จะใช้ในการทดลอง เพื่อที่จะได้เห็นผลกระทบและพฤติกรรมต่างๆของต้นข้าวเมื่อได้รับปริมาณของปุ๋ยไนโตรเจนที่แตกต่างกัน

522155760

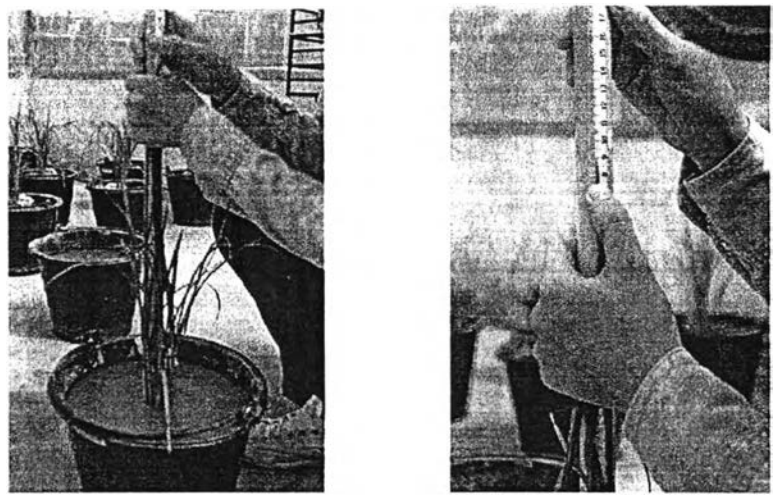
4.1.2 ขั้นตอนการทดลอง

การเตรียมดินที่ใช้ในการปลูก ทำโดยนำดินไปผึ่งแห้ง จากนั้นนำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 1 เซนติเมตร เพื่อให้ดินมีสภาพเสมอกันทุกจุดทั้งกระถาง แล้วนำดินที่ได้มาชั่งน้ำหนักใส่กระถางพลาสติกสีดำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร สูง 18 เซนติเมตร โดยใส่กระถางละ 4.8 กิโลกรัม จากนั้นจึงเติมน้ำจนดินอิ่มตัว

การปลูกข้าวและการวางแผนการทดลอง เริ่มโดยนำเมล็ดข้าวไปแช่น้ำ 1 คืน จากนั้นนำขึ้นมาผึ่งบนกระดาษทิชชูประมาณ 2 วัน จนเห็นมีตุ่มสีขาวงอกออกมา จึงนำไปโปรยในถาดเพาะเมล็ด จนต้นข้าวมีอายุ 14 วัน จึงทำการคัดต้นกล้ามาปักดำในกระถางปลูกที่เตรียมไว้ โดยปักดำต้นข้าวกระถางละ 3 ต้น จากนั้นเมื่อต้นข้าวอายุ 24 วัน และ 42 วันให้ปุ๋ยไนโตรเจนในอัตราที่กำหนดไว้การทดลองนี้ได้ วางแผนการทดลองแบบ การออกแบบบล็อกการสุ่มสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design) โดยมี 3 บล็อก และแต่ละบล็อกประกอบด้วยปริมาณปุ๋ย 5 อัตราที่แตกต่างกันข้างต้น

4.1.3 การเก็บข้อมูล

จากการทดลองได้เก็บรวบรวมข้อมูล ได้แก่ ความสูง จำนวนกอต่อกระถาง จำนวนใบต่อกระถาง ความเข้มของสีใบข้าว น้ำหนักแห้งและปริมาณการสะสมไนโตรเจน ซึ่งจะเก็บข้อมูลทุกๆ 6 วัน ทั้งหมด 8 ครั้ง โดยเริ่มเก็บเมื่อต้นข้าวอายุ 18 วัน จนถึงอายุ 72 วัน แต่เนื่องจากต้นข้าวมีความสูงที่ไม่แตกต่างกันในแต่ละอัตราปุ๋ยที่ให้ จึงใช้ข้อมูลของน้ำหนักแห้งในการสร้างแบบจำลองการเติบโตของข้าว



รูปที่ 4.1 การเก็บข้อมูลความสูงของต้นข้าว

522155760

รูปที่ 4.2 การเก็บข้อมูลความเข้มของสีใบข้าว โดยใช้แผ่นเทียบสีใบข้าวของ IRRI

รูปที่ 4.3 การเก็บข้อมูลความเข้มของสีใบข้าว โดยใช้เครื่องคลอโรฟิลล์มิเตอร์

การชั่งน้ำหนักแห้งของต้นข้าว หลังจากชั่งน้ำหนักสดของต้นข้าวที่เก็บมาแล้ว นำต้นข้าวไปอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 วัน จากนั้นนำต้นข้าวมาชั่งน้ำหนักแห้งเพื่อบันทึกข้อมูลมาสร้างแบบจำลอง

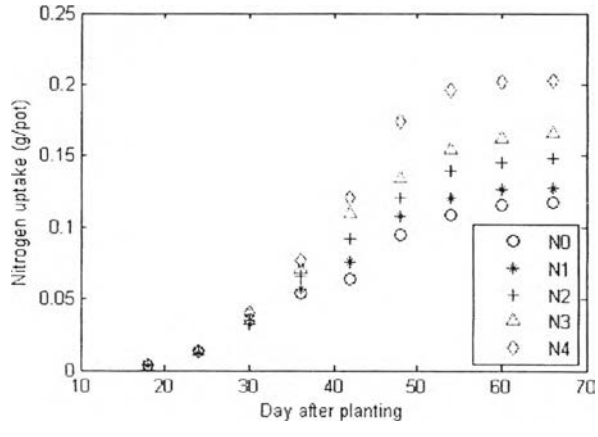
การเก็บข้อมูลการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าว ทำโดยการนำต้นข้าวที่อบแห้งแล้วมาบดและย่อยด้วย สารประกอบการย่อย (Digestion mixture: H_2SO_4-Na_2SO_4-Se mixture) จนได้สารละลายใส จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนในต้นข้าวโดยวิธีของไมโคร-จีดาล (Micro-Kjeldahl method) [6] และนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างแบบจำลองการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าว

4.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์

การจำลองแบบในงานวิจัยนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือแบบจำลองการเติบโตของต้นข้าว และแบบจำลองการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าว ซึ่งได้จากความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

4.2.1 แบบจำลองการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าว

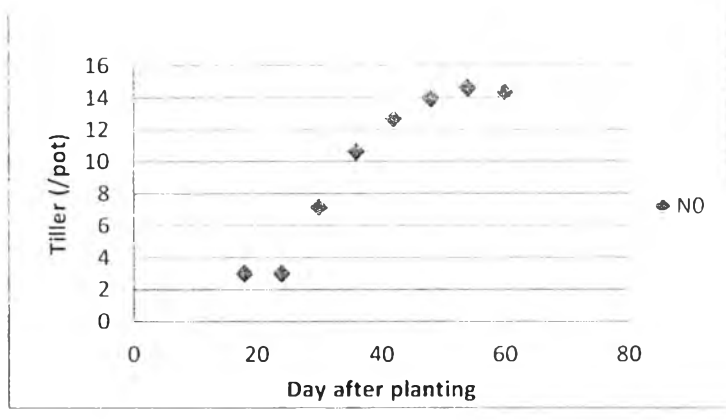
การดูดและสะสมไนโตรเจนของต้นข้าว ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไนโตรเจนและน้ำหนักแห้งของต้นข้าว ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนที่ต้นข้าวได้รับ จากการศึกษาพบว่าปุ๋ยไนโตรเจนเป็นปุ๋ยที่สูญเสียได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องมีการแบ่งใส่ปุ๋ยหลายๆ ครั้ง ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งใส่ปุ๋ย 2 ครั้งเท่าๆ กัน เมื่อนำข้อมูลการสะสมไนโตรเจนมาวาดกราฟหาความสัมพันธ์กับอายุและปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนที่ให้ ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าวในแต่ละช่วงอายุที่ได้รับปุ๋ยไนโตรเจนในอัตราต่างๆ

จากกราฟจะเห็นว่า ต้นข้าวมีพฤติกรรมในการดูดและสะสมไนโตรเจนคล้ายแบบจำลองโลจิสติกส์ โดยมีการสะสมเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับปุ๋ยไนโตรเจนเพิ่มขึ้น แต่ในการทดลองได้มีการแบ่งใส่ปุ๋ย 2 ครั้ง ส่งผลให้ต้นข้าวมีอัตราการสะสมไนโตรเจนเปลี่ยนไปเมื่อใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาข้อมูลจำนวนต้นข้าวต่อกระถางร่วมด้วย พบว่าในช่วงที่ต้นข้าวมีอายุ $18 \leq t \leq 42$ วัน มีจำนวนต้นข้าวต่อกระถางไม่มากนักเมื่อเทียบกับช่วงที่ต้นข้าวมีอายุ $42 \leq t \leq 66$ วัน ซึ่งเป็นช่วงที่ต้นข้าวมีการแตกกอมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากพิจารณาในชุดข้อมูลที่ต้นข้าวไม่ได้รับปุ๋ยไนโตรเจนเลย จะเห็นว่าจำนวนต้นต่อกระถางมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนเกือบถึงจำนวนกอสูงสุด ดังรูปที่ 4.5

522155760



รูปที่ 4.5 แสดงจำนวนต้นข้าวต่อกระถางในชุดข้อมูลที่ต้นข้าวไม่ได้รับปุ๋ยไนโตรเจน

ซึ่งอยู่ในช่วงที่ต้นข้าวมีอายุประมาณ 42 วัน โดยในช่วงอายุดังกล่าวได้มีการให้ปุ๋ยแก่ต้นข้าวในชุดข้อมูลอื่นๆ จะเห็นว่าปริมาณของต้นข้าวที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อปริมาณการดูดและการสะสมไนโตรเจนในแต่ละกระถางด้วย ดังนั้นจึงสร้างแบบจำลองการดูดและการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าวโดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วงเวลา ดังรูปแบบต่อไปนี้

5221557 60

$$Nup_i(N,t) = \begin{cases} \dfrac{\max Nup_i(N)}{1+\left(\frac{\max Nup_i(N)}{Nup_{18}}-1\right)e^{-r_i(N)(t-18)}}; & 18 \le t \le 42, i = 0,1,2,3,4 \\ \dfrac{\max Nup_i(N)}{1+\left(\frac{\max Nup_i(N)}{Nup_{42}}-1\right)e^{-r_i(N)(t-42)}}; & 42 \le t \le 66, i = 0,1,2,3,4 \end{cases} \quad (4.1)$$

โดยที่ $Nup_i(N,t)$ คือ การสะสมไนโตรเจนของต้นข้าว ณ เวลาใดๆ (กรัมต่อกระถาง)

$\max Nup_i(N)$ คือ การสะสมไนโตรเจนของต้นข้าวที่มากที่สุดในช่วงที่ศึกษา (กรัมต่อกระถาง)

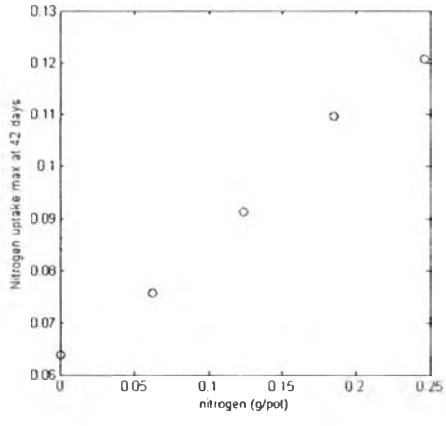
Nup_{18} และ Nup_{42} คือ การสะสมไนโตรเจนของต้นข้าวจากวันที่ 18 และ 42 ตามลำดับ (กรัมต่อกระถาง)

$r_i(N)$ คือ อัตราการเพิ่มขึ้นของการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าว

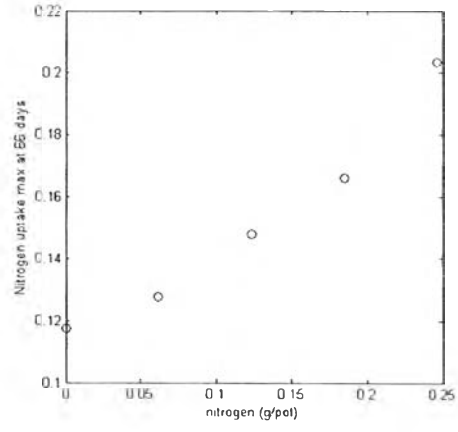
t คือ อายุของต้นข้าว (วัน)

เนื่องจากปริมาณของปุ๋ยไนโตรเจนที่ให้เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความเข้มข้นของไนโตรเจนในต้นข้าวเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีการสะสมไนโตรเจนเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ $\max Nup_i(N)$ จึงไม่ใช่ค่าคงตัว แต่เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับปริมาณไนโตรเจนที่ต้นข้าวได้รับตามการให้ปุ๋ยในปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งในการทดลองได้มีการแบ่งการให้ปุ๋ยไนโตรเจนทั้งหมด 2 ครั้ง เมื่อพิจารณาปริมาณการสะสมไนโตรเจนที่มากที่สุดในแต่ละช่วง พบว่าในช่วงที่ต้นข้าวมีอายุ $18 \le t \le 42$ วัน ต้นข้าวมีค่า $\max Nup_i(N)$ ที่อายุ 42 วัน และในช่วงที่ต้น

ข้าวมีอายุ $42 \leq t \leq 66$ วัน ต้นข้าวมีค่า $\max Nup_i\,(N)$ ที่อายุ 66 วัน ดังนั้นจึงพิจารณาค่าพารามิเตอร์ $\max Nup_i\,(N)$ เมื่อต้นข้าวอายุ 42 วัน และ 66 วัน นำข้อมูลการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าวทั้งสองวันมาวาดกราฟหาความสัมพันธ์กับปริมาณไนโตรเจนที่ให้กับต้นข้าวได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ก.



รูปที่ 4.6 ข.

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าว กับปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนในอัตราต่างๆ ก. เมื่อต้นข้าวอายุ 42 วัน ข. เมื่อต้นข้าวอายุ 66 วัน

จากกราฟ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของ $\max Nup_i\,(N)$ กับปริมาณไนโตรเจนที่ให้พบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นต่อกันในช่วง $18 \leq t \leq 42$ และมีความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลในช่วง $42 \leq t \leq 66$ ดังสมการ

$$\max Nup_i\,(N) = \begin{cases} m_i(N - N_i) + c_i; 18 \leq t \leq 42, i = 0,1,2,3,4 \\ k_i(N)e^{4.0625N};\ 42 \leq t \leq 66, i = 0,1,2,3,4 \end{cases} \quad (4.2)$$

โดยที่ m_i, c_i คือ ค่าพารามิเตอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณไนโตรเจนที่ให้กับต้นข้าว ที่ใช้ในช่วง $[N_i, N_{i+1}]$ สำหรับ $i = 0,1,2,3$

522155760

i	อัตราการเปลี่ยนแปลงของ $\max Nup_i(N)$ ต่อปริมาณไนโตรเจนที่ต้นข้าวได้รับ (m_i)	ค่า $\max Nup_i(N)$ เริ่มต้นในแต่ละช่วง $[N_i, N_{i+1}]$ (c_i)
0	0.1923	0.0639
1	0.2544	0.0758
2	0.2978	0.0914
3	0.1777	0.1097

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ m_i และ C_i ในแต่ละอัตราปุ๋ยไนโตรเจนที่ต้นข้าวได้รับ

และพารามิเตอร์ $k_i(N)$ คือ ค่า $\max Nup_i(N)$ เริ่มต้นในแต่ละช่วง $[N_i, N_{i+1}]$ สำหรับ $i = 0, 1, 2, 3$ เมื่อพิจารณาค่า $k_i(N)$ กับปริมาณไนโตรเจนที่ต้นข้าวได้รับพบว่า มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$k_i(N) = M_i(N - N_i) + C_i \qquad (4.3)$$

โดยที่ M_i. C_i คือ ค่าพารามิเตอร์ในแต่ละอัตราปุ๋ยไนโตรเจนที่ต้นข้าวได้รับ ดังตารางที่ 4.3

i	อัตราการเปลี่ยนแปลงของ $k_i(N)$ ต่อปริมาณไนโตรเจนที่ต้นข้าวได้รับ (M_i)	ค่า $k_i(N)$ เริ่มต้นในแต่ละช่วง$[N_i, N_{i+1}]$ (C_i)
0	-0.2893	0.1174
1	-0.1601	0.0995
2	-0.1844	0.0897
3	-0.0577	0.0783

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ M_i และ C_i ในแต่ละอัตราปุ๋ยไนโตรเจนที่ต้นข้าวได้รับ

ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ $r_i(N)$ สามารถหาได้จากวิธีการวิเคราะห์การถดถอย โดยวิธี Levenberg-Marquart ซึ่งกำหนดค่า y_j เป็นปริมาณการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าวที่อายุ j วัน และ $y(x_j; a)$ เป็นค่าประมาณของปริมาณการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าวจากแบบจำลอง โดยในที่นี้สำหรับแต่ละ $i = 0, 1, 2, 3, 4$ กำหนดให้ a คือ $r_i(N)$ ต่อมาจากสมการ (4.1)

522155760

$$y(x) = \begin{cases} \dfrac{\max Nup_i\,(N)}{1+\left(\dfrac{\max Nup_i\,(N)}{Nup_{18}}-1\right)e^{-r_i(N)(x-18)}}; & 18 \le t \le 42, i = 0,1,2,3,4 \\ \dfrac{\max Nup_i\,(N)}{1+\left(\dfrac{\max Nup_i\,(N)}{Nup_{42}}-1\right)e^{-r_i(N)(x-42)}}; & 42 \le t \le 66, i = 0,1,2,3,4 \end{cases}$$

วิธี Levenberg-Marquart จะเริ่มด้วยการหาความคลาดเคลื่อนกำลังสองที่น้อยที่สุด จากข้อมูล m จุดที่ได้จากการทดลอง ตามสมการ (3.4)

$$E(a) = \sum_{j=1}^{m}\left[y_j - y(x_j, a)\right]^2$$

จากนั้นหาค่าพารามิเตอร์ a ที่เหมาะสม โดยใช้สมการ (3.9)

$$a^{k+1} = a^k - \frac{1}{H+\lambda}g$$

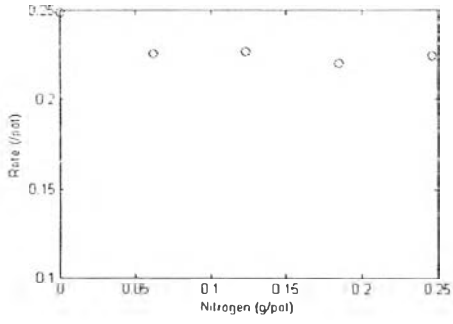
สมการข้างต้นทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ $r_i(N)$ ของแต่ละอัตราปุ๋ยไนโตรเจนที่ต้นข้าวได้รับ ดังตารางที่ 4.4

N_i	$r_i(N)$ $(18 \le t \le 42)$	$r_i(N)$ $(42 \le t \le 66)$
0	0.2490	0.2070
1	0.2257	0.2014
2	0.2268	0.1782
3	0.2248	0.2348

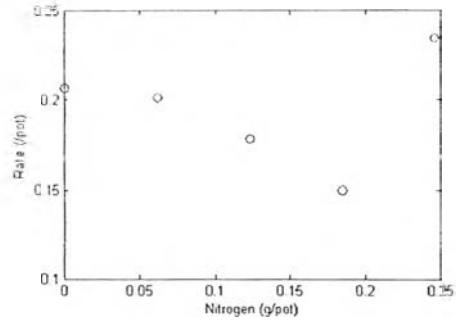
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ $r_i(N)$ ในแต่ละอัตราปุ๋ยไนโตรเจนที่ต้นข้าวได้รับในแต่ละช่วงอายุตามการให้ปุ๋ย

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ $r_i(N)$ มาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์กับปริมาณไนโตรเจนที่ต้นข้าวได้รับ ดังรูปที่ 4.7

522155760



รูปที่ 4.7 ก.



รูปที่ 4.7 ข.

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ $r_i(N)$ กับปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนในอัตราต่างๆ ก. เมื่อต้นข้าวอยู่ในช่วงอายุ 18 ถึง 42 วัน ข. เมื่อต้นข้าวอยู่ในช่วงอายุ 42 ถึง 66 วัน

522155760

จากกราฟในรูปที่ 4.7 สามารถสร้างฟังก์ชันประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสาม (Cubic spline) ระหว่างค่าพารามิเตอร์ $r_i(N)$ กับปริมาณไนโตรเจนที่ต้นข้าวได้รับ โดยใช้วิธีเชิงตัวเลขและเงื่อนไขดังต่อไปนี้ [13]

ก. $r_i(N)$ เป็นพหุนามกำลังสามบนช่วง $[N_i, N_{i+1}]$ สำหรับ $i = 0, 1, 2, 3$

ข. $r_0(N_0) = \begin{cases} 0.2490 \\ 0.2070 \end{cases}$; $r_3(N_4) = \begin{cases} 0.2248 \\ 0.2348 \end{cases}$

ค. $r_{i+1}(N_{i+1}) = r_i(N_{i+1})$ สำหรับ $i = 0, 1, 2$

ง. $r'_{i+1}(N_{i+1}) = r'_i(N_{i+1})$ สำหรับ $i = 0, 1, 2$

จ. $r''_{i+1}(N_{i+1}) = r''_i(N_{i+1})$ สำหรับ $i = 0, 1, 2$

ฉ. $r_0''(N_0) = r_3''(N_4) = 0$

ซึ่งจะได้ฟังก์ชันประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสามดังสมการ

$$r_i(N) = \alpha_i + \beta_i(N - N_i) + \gamma_i(N - N_i)^2 + \delta_i(N - N_i)^3;$$

$$N_i \leq N \leq N_{i+1}, i = 0, 1, 2, 3 \qquad (4.4)$$

เมื่อ $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ และ δ_i คือ ค่าพารามิเตอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณไนโตรเจนที่ใส่ให้กับต้นข้าว ดังตารางที่ 4.5

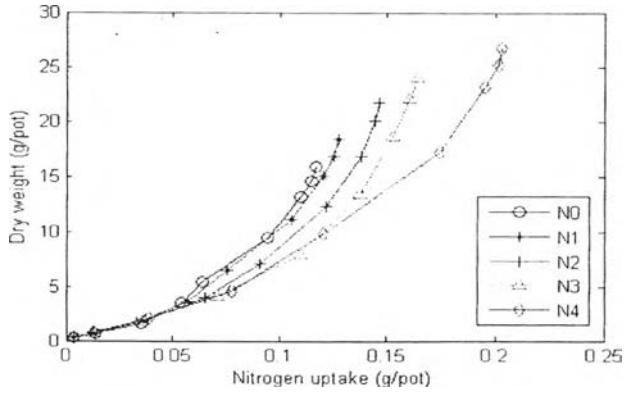
จำนวนวันหลังปลูก (วัน)	i	α_i	β_i	γ_i	δ_i
18 - 42	0	0.2490	-0.4964	0	31.1123
	1	0.2257	-0.1428	5.7438	-50.8966
	2	0.2268	-0.0143	-3.6525	36.0967
	3	0.2205	-0.0537	3.0115	-16.3123
42 - 66	0	0.2070	-0.0531	0	-0.0379
	1	0.2014	-0.1667	-1.8472	-0.0966
	2	0.1782	-0.6843	-6.5566	0.6279
	3	0.1499	0.3929	24.0525	-0.4934

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ และ δ_i ในสมการความสัมพันธ์ระหว่าง $r_i(N)$ กับปริมาณไนโตรเจนที่ต้นข้าวได้รับ

522155760

4.2.2 แบบจำลองการเติบโตของต้นข้าว

จากการทดลองจะเห็นว่าปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ต้นข้าวมีการดูดและสะสมไนโตรเจนในต้นข้าวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งต้นข้าวนำไนโตรเจนที่สะสมนี้ไปสร้างส่วนต่างของต้น เช่น ใบ ลำต้น หน่อใหม่ เป็นต้น ทำให้ต้นข้าวมีการเติบโตที่เพิ่มขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำหนักแห้งของต้นข้าวที่เพิ่มขึ้นกับปริมาณการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าว เมื่อนำข้อมูลการเติบโตของต้นข้าวมาวาดกราฟหาความสัมพันธ์กับปริมาณการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าว ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเติบโตของต้นข้าวกับปริมาณการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าวที่ได้รับปุ๋ยไนโตรเจนในอัตราต่างๆ

จากกราฟพบว่าน้ำหนักของต้นข้าวเพิ่มขึ้นเมื่อต้นข้าวมีการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าวเพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล แต่เนื่องจากการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าวนั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับปริมาณไนโตรเจนที่ให้กับต้นข้าวแล้ว อายุของต้นข้าวก็มีผลต่อการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าวเช่นกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งของต้นข้าวในแต่ละช่วงอายุ พบว่าน้ำหนักแห้งของต้นข้าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างการเติบโตของต้นข้าวกับการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าวเป็นผลรวมของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลกับเส้นตรงดังนี้

$$(Nup_i(N,t)) = Dw_0 e^{a_N(Nup_i(N,T)-0.0037)} + b_t(Nup_i(\bar{N},t) - 0.0037) \quad (4.4)$$

โดยที่ Dw คือ น้ำหนักแห้งของต้นข้าว (กรัมต่อกระถาง)

Dw_0 คือ น้ำหนักแห้งของต้นข้าว ณ วันที่ t_0 (กรัมต่อกระถาง)

$Nup_i(N,T)$ คือ ปริมาณการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าว โดยพิจารณาปริมาณไนโตรเจนที่ต้นข้าวได้รับในระดับต่างๆ ที่ต้นข้าวอายุ T วันเท่ากัน (กรัมต่อกระถาง)

$Nup_i(\bar{N},t)$ คือ ปริมาณการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าว โดยพิจารณาที่อายุต่างๆ ของต้นข้าว เมื่อต้นข้าวได้รับปริมาณไนโตรเจนในระดับ $\bar{N}$ เดียวกัน (กรัมต่อกระถาง)

a_N และ b_t คือ ค่าพารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับ $Nup_i(N,T)$ และ $Nup_i(\bar{N},t)$ ตามลำดับ

T และ t คือ อายุของต้นข้าว (วัน) โดยที่ $18 \leq T, t \leq 66$

ค่า 0.0037 คือ ปริมาณการสะสมไนโตรเจน ณ วันที่เริ่มเก็บข้อมูล

เนื่องจากการสะสมไนโตรเจนจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไนโตรเจนในต้นข้าวและอายุของต้นข้าว ณ เวลาที่พิจารณา ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ a_N จะขึ้นอยู่กับการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าว เมื่อพิจารณาจากปริมาณไนโตรเจนที่ต้นข้าวได้รับ และค่าพารามิเตอร์ b_t จะขึ้นอยู่กับการสะสมไนโตรเจนในต้นข้าว เมื่อพิจารณาจากอายุของต้นข้าว ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทั้งสอง สามารถหาได้จากวิธีการวิเคราะห์การถดถอย โดยวิธี Levenberg-Marquart ที่ได้กล่าวไปในบทที่ 3 หัวข้อ 3.5.3 ดังตารางที่ 4.6

522155760

จำนวนวันหลังปลูก (วัน)	i	อัตราการเปลี่ยนแปลงของ Dw ต่อ $Nup_i(N,T)$ (a_N)	อัตราการเปลี่ยนแปลงของ Dw ต่อ $Nup_i(\bar{N},t)$ (b_t)
18 - 42	0	43.7613	7.050
	1	36.2243	23.030
	2	28.7705	30.123
	3	23.0488	36.5543
	4	23.8909	33.927
42 - 66	0	29.3024	50.695
	1	28.5489	46.555
	2	26.8349	33.575
	3	25.1333	25.272
	4	19.1264	50.301

522155760

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ a_N และ b_t ในแต่ละอัตราปุ๋ยไนโตรเจนที่ต้นข้าวได้รับในแต่ละช่วงอายุตามการให้ปุ๋ย