แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการเจริญเติบโตผักกาดหอมเรดโอ๊ค

Mathematical Model for Predicting Red Oak Lettuce Growth

รินรดา พวงอำไพ, อภิชญา บัวตา, สรายุทธ์ พานเทียน*

Rinrada Puangamphai, Apichaya Buata, Sarayut Pantian*

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabhat University

***Corresponding author E-mail: sarayut.p@lawasri.tru.ac.th**

(Received: Oct18, 2022; Revised: Nov15, 2022; Accepted: Dec14, 2022)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หารูปแบบทางคณิตศาสตร์การเจริญเติบโตของผักกาดหอมเรดโอ๊คด้วยการปลูกพืชด้วยระบบ DFT ด้วยแสงสามชนิด ได้แก่ แสงธรรมชาติ แสงขาว แสงสีแดงและแสงสีน้ำเงินจากหลอด LED เพื่อพิสูจน์สมมติฐานทางคณิตศาสตร์ของ Bessonov และ Volpert ผลการทดลองพบว่า กลุ่มตัวอย่างที่ใช้แสงธรรมชาติตายหมดหลังจากทำการวัดความยาวรัศมีของใบครั้งแรกเนื่องจากสภาพอากาศที่ทำให้มีแสงน้อย ในส่วนกลุ่มตัวอย่างอื่น ๆ พบว่า แสงสีขาวมีการเจริญเติบโตเฉลี่ยดีที่สุดที่ 5.08 เซนติเมตร โดยที่แสงสีน้ำเงินมีการเจริญเติบโตเฉลี่ยน้อยที่สุด 2.68 เซนติเมตร ในเวลาที่เท่ากัน ยังพบอีกว่ารูปแบบทางคณิตศาสตร์การเจริญเติบโตของทั้งผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกในโรงเรื่องที่ให้แสงสีขาว แสงสีน้ำเงิน และแสงสีแดง อยู่ในลักษณะเดียวกัน คือ สมการพหุนามกำลังสองหรือรูปแบบพาราโบลา ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของแสงสีขาว แสงสีน้ำเงิน และแสงสีแดง เท่ากับ 0.9972, 0.9844 และ 0.7486 ตามลำดับ

คำสำคัญ: ผักกาดหอมเรดโอ๊ค ระบบไฮโดรโปนิกส์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Abstract

The objective of this research was to find a mathematical model of red oak lettuce growth by DFT with three types of light: natural, white, red and blue light from LEDs and to prove the mathematical hypothesis of Bessonov and Volpert, simultaneously. The results showed that the sample in natural light died out after the first leaf radial length measurement was taken due to low-light conditions. Other samples found that white light had the best growth average of 5.08 cm, while blue light had the lowest mean growth of 2.68 cm over the same time period. It was also found that the growth mathematical patterns of both red-oak lettuce grown in white, blue and red subjects were the same, power polynomial or parabolic form, with the least squares of white light, blue light and red light are 0.9972, 0.9844 and 0.7486, respectively.

Keywords: Red oak lettuce, Hydroponics, Mathematical model

บทนำ

ผักกาดหอมเรดโอ๊ค หรือเรดโอ๊ค ชื่อวิทยาศาสตร์ *Lactuca sativa var.crispa L* มีลักษณะเป็นผักใบสีแดงเข้มและเขียวเข้มใบซ้อนกันเป็นชั้นปลายใบหยิกเป็นแฉกเป็นพุ่มหยัก สีสวยงามนอกจากนี้ยังมีกากใยอาหารมากมาย จึงช่วยเรื่องระบบการย่อย บำรุงสายตา กล้ามเนื้อ ป้องกันโรคปากนกกระจอก ล้างผนังลำไส้ กำจัดพวกไขมัน มีธาตุเหล็กและวิตามินซี ปัจจุบันความต้องการอาหารของทั้งในประเทศและต่างประเทศสูงมากในขณะที่พื้นที่ของการทำเกษตรในบางพื้นที่ยังมีปัญหาดินขาดความอุดมสมบูรณ์ทำให้ต้องใช้ปุ๋ยเคมีและสารเคมีกำจัดศัตรูพืชจำนวนมากซึ่งส่งผลให้เกิดพิษตกค้างในผลผลิตหลังเก็บเกี่ยวโดยเฉพาะในผัก ผักกาดหอมเรดโอ๊คเป็นหนึ่งในผลผลิตที่ผู้บริโภคต้องการความปลอดภัยและต้องการในปริมาณมาก [1-2]

การปลูกพืชไร้ดินเป็นหนึ่งในทางเลือกที่นักวิจัยและเกษตรกรให้ความสนใจเพื่อทดแทนการปลูกพืชแบบใช้ดิน [3] เนื่องจากสามารถความคุมปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตได้ทั้งปริมาณน้ำ อากาศ ธาตุอาหารที่จำเป็นแม้กระทั่งความเป็นกรด-ด่างที่พืชได้รับ ทั้งนี้ การปลูกพืชไร้ดินสามารถทำได้หลายวิธี การปลูกพืชแบบ deep flow technique (DFT) เป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยม [4] โดยวิธีดังกล่าวจะให้รากพืชแช่อยู่ในภาชนะบรรจุสารละลายธาตุอาหาร (ลึก 15 - 20 cm กว้าง 50 - 80 cm และยาว 1 - 10 m) ภาชนะดังกล่าวทำหน้าที่ทั้งภาชนะปลูกและภาชนะใส่สารละลายไปด้วย ทำให้เทคนิคนี้ไม่ต้องมีภาชนะใส่สารละลายแยกต่างหาก ปริมาตรของสารละลายมีมาก ทำให้ความเข้มข้นของธาตุอาหารเปลี่ยนแปลงช้า

การเจริญเติบโตของพืชให้รูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่น่าสนใจซึ่งรูปแบบดังกล่าวอาจเชื่อมโยงกับความสมมาตรของรูปร่างหรือฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์รูปแบบใดรูปแบบหนึ่งที่เป็นผลมากจากอันตรกิริยาที่เกิดภายในอย่างเป็นพลวัตร [5] ด้วยเหตุนี้ การเจริญเติบโตของพืชจึงสามารถแสดงในรูปฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่แน่นอนได้โดย Bessonov และ Volpert [6] ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การเจริญเติบโตของใบพืชไว้อย่างน่าสนใจดังสมการ

$$\frac{dy}{dt} = \alpha y\left(1 - \frac{y}{u}\right) \tag{1}$$

เมื่อ α คือ อัตราการเจริญเติบโต y คือ ความยาวของใบของผักกาดหอมเรดโอ๊ค (เซนติเมตร) u คือ ความยาวสูงสุดของใบของผักกาดหอมเรดโอ๊ค (เซนติเมตร) $\frac{dy}{dt}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวของใบของผักกาดหอมเรดโอ๊คขึ้นอยู่กับเวลา (วัน) เมื่อทำการแก้สมการที่ (1) ทำให้ได้คำตอบว่า

$$y = \frac{u}{1+\beta e^{-\alpha t}} \tag{2}$$

เมื่อ β คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการอินทิเกรต จากสมการที่ (2) จะสังเกตได้ว่าความยาวของใบตามสมมติฐานของ Bessonov และ Volpert ให้คำตอบในรูปแบบฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียล หรือประมาณค่าอันดับสองอนุกรมเทย์เลอร์อยู่ในรูปฟังก์ชันพหุนามได้เช่นเดียวกัน ทั้งนี้ รูปแบบฟังก์ชันดังกล่าวมีความสอดคล้องบางส่วนกับผลของพลวัตรการถ่ายโอนอิเล็กตรอนภายในระบบแสงของพืชตามแบบจำลองโปรตีนของเฟนนา-แมทธิว-โอลสัน (FMO complex) [7-8] ซึ่งเป็นโปรตีนในพืชและแบคทีเรียบางชนิดที่มีหน้าที่สังเคราะห์แสงโดยตรง แต่ทว่ารูปแบบพจน์ในสมการยังไม่สอดกันทุกพจน์ ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะในทางทฤษฎีเราพิจารณาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนของกลุ่มเม็ดสีในความหนาแน่นคงที่ แต่ในความเป็นจริงของธรรมชาติสิ่งมีชีวิตมีการเจริญเติบโต หรืออาจกล่าวได้ว่าความหนาแน่นของเม็ดสีเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับเวลาร่วมด้วย ด้วยเหตุนี้ เราอาจตั้งสมมติฐานเบื้องต้นได้ว่าเราจำเป็นต้องกำหนดนิยามในเชิงทฤษฎีใหม่อาทิเช่น เพิ่มพจน์ที่เกี่ยวข้องกับเวลาเข้ากับการกำหนดความหนาแน่นของระบบเชิงควอนตัมเพื่อทำนายการถ่ายโอนอิเล็กตรอนรวมถึงการเจริญเติบโตของพืช

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หารูปแบบทางคณิตศาสตร์การเจริญเติบโตของผักกาดหอมเรดโอ๊คด้วยการปลูกพืชด้วยระบบ DFT ด้วยแสงสามชนิด ได้แก่ แสงธรรมชาติ แสงขาว แสงสีแดงและแสงสีน้ำเงินจากหลอด LED เพื่อพิสูจน์สมมติฐานทางคณิตศาสตร์ของ Bessonov และ Volpert ทั้งยังเป็นการเก็บข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการพัฒนาสมการการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในระบบสังเคราะห์แสงของพืชทำนายการเจริญเติบโตของพืชด้วยกระบวนการทางกลศาสตร์ควอนตัมต่อไปในอนาคต

วิธีการดำเนินการวิจัย

พืชที่ใช้ปลูก

เตรียมเมล็ดผักกาดหอมเรดโอ๊คมาคัดเลือกเมล็ดที่มีขนาดเท่ากัน สมบูรณ์ แข็งแรง ไม่มีรอยแตกราว เพาะเมล็ดลงในวัสดุปลูกผสมระหว่างเพอร์ไลท์ (perlite) กับเวอร์มิคูไลท์ (vermiculite) อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากต้นกล้ามีอายุได้ 14 วัน จึงย้ายต้นกล้าลงรางไฮโดรโปนิกส์ (EC 1.3 และ pH 6.0)

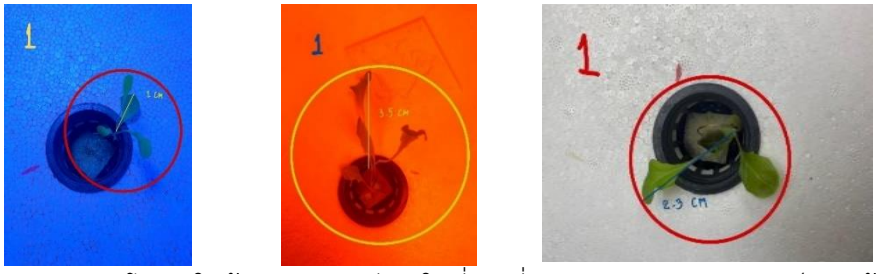
วางแผนการทดลองและออกแบบการบันทึกผลการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบ completely randomized design (CRD) โดยแบ่งกลุ่มผักเรดโอ๊คแต่ละกลุ่ม เป็น 4 ทรีทเมนต์ ทรีทเมนต์ละ 30 ต้น ได้แก่ แสงธรรมชาติ แสงขาว แสงสีน้ำเงิน แสงสีแดง โดยแสงสีขาว แสงสีน้ำเงิน และแสงสีแดงนำไปหาค่าความยาวคลื่นด้วยวิธีการแทรกสอดผ่านสลิต แต่ละกลุ่มจะอยู่ภายใต้โรงเรือนปิดทึบขนาด 0.5 ม. x 2.0 ม. x 1.0 ม. ยกเว้นกลุ่มแสงธรรมชาติที่ไม่ปิดทึบ หลอดไฟจะตั้งอยู่ห่างจากขอบแผ่นโฟมลอยน้ำเป็นระยะ 0.3 เมตร ทำการเปิดแสงไฟ 10 ชั่วโมงต่อวัน (08.00 น. ถึง 18.00 น.) ทำการสุ่มบันทึกผลการทดลองตัวอย่างตามสูตรของ ยามาเนะ (Yamane) โดยความคลาดเคลื่อนที่

ยอมให้เกิดขึ้นในรูปของสัดส่วนเท่ากับ .05 ได้จำนวนตัวอย่าง 14.5 ต้น ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่าง 15 ต้น ต่อโรงเรือน

การบันทึกผลการทดลองจะบันทึกค่าดังต่อไปนี้

1. การเจริญเติบโตวัดการเจริญเติบโตจากความยาวรัศมีของใบที่ยาวที่สุดจากจุดศูนย์กลาง ตามภาพที่ 1 เนื่องจากลักษณะของต้นเรดโอ๊คมีความสมมาตร ผู้วิจัยจึงใช้วิธีเดียวกันกับการวัดดอกทานตะวันที่มีสมมาตรใกล้เคียงกัน [5]



ภาพที่ 1 แสดงวิธีการวัดการเจริญเติบโตของใบด้วยการวัดรัศมีของใบที่ยาวที่สุดของตัวอย่างจากจุดศูนย์กลางต้น

2. บันทึกความเข้มแสงด้วยลักซ์มิเตอร์ในตำแหน่งของตัวอย่างต่ำกว่าหลอด LED 10 เซนติเมตร

3. บันทึกค่าความเป็นกรดด่าง ด้วยเครื่อง OHAUS ; USA รุ่น ST3100 F

4. บันทึกค่าเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC) ด้วยเครื่อง mettler Toledo

ทั้งนี้ ค่าความเข้มแสง ความเป็นกรดด่าง และค่าการหนี่ยวนำไฟฟ้า บันทึกเพื่อควบคุมให้อยู่ในปริมาณที่กำหนด [4] โดยความยาวรัศมีของใบที่ยาวที่สุดจากจุดศูนย์กลางจะนำไปคำนวณเชิงสถิติด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นและสมการถดถอยเชิงพหุนาม จากนั้นหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเพื่อเปรียบเทียบว่าผลการทดลองเข้ากับรูปสมการแบบใดมากที่สุด

ผลการวิจัย

จากการทำการทดลองปลูกผักกาดหอมเรดโอ๊คด้วยการปลูกพืชด้วยระบบ DFT เพื่อหารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของการเจริญเติบโต สำหรับการทดลองนี้ได้ทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าการหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยเริ่มทำการวัดค่าในทุก ๆ 7 วัน ทำการวัดทั้งหมด 4 สัปดาห์ โดยเริ่มทำการวัดครั้งที่ 1 ในวันที่ 24 สิงหาคม 2565 ครั้งที่ 2 ในวันที่ 31 สิงหาคม 2565 ครั้งที่ 3 วันที่ 7 กันยายน 2565 และ ครั้งที่ 4 วันที่ 14 กันยายน 2565 ทั้งนี้ ค่าความยาวคลื่นที่ได้จากการทดลองด้วยการแทรกสอดของแสงผ่านสลิตของแสงขาว แสงสีน้ำเงิน แสงสีแดง ได้แก่ ไม่สามารถตรวจวัดได้, 423.56 นาโนเมตร และ 746.67 นาโนเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้าของผักกาดหอมเรดโอ๊ค 4 กลุ่มตัวอย่างที่ได้รับแสงสีต่างกัน

สีของแสงในกลุ่มตัวอย่าง	ค่าความเป็นกรด-ด่าง				ค่าการหนี่ยวนำไฟฟ้า (μs/cm)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
สีแดง	8.06	3.07	3.34	3.42	690.6	1726	2212	3018
สีน้ำเงิน	8.16	3.30	3.57	3.64	506.3	1116	1154	2653
สีขาว	8.19	3.07	3.25	3.32	516.3	1617	2238	3122
ธรรมชาติ	8.08	2.79	3.01	3.26	684.7	1954	2470	2092

จากตารางที่ 1 แสดงค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้าของกลุ่มตัวอย่าง พบว่า ค่าความเป็นกรดด่างลดลงอย่างชัดเจนด้วยเพราะผลจากการเติมสารอาหารให้แก่กลุ่มตัวอย่าง จากนั้นผู้วิจัยทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยกรดเกลือหรือน้ำให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ (3.00 – 4.00) สำหรับค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้า พบว่าแปรผันตามค่าความเป็นกรดด่าง

ตารางที่ 2 แสดงความยาวของใบผักกาดหอมเรดโอ๊คเฉลี่ยในแต่ละสัปดาห์

สีของแสงในกลุ่มตัวอย่าง	ค่าความยาวใบเฉลี่ย (เซนติเมตร)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
สีแดง	3.36	2.84	4.66	4.92
สีน้ำเงิน	1.72	1.96	2.42	2.68
สีขาว	2.39	3.26	4.00	5.08
ธรรมชาติ	2.53	-	-	-

จากผลการทดลองดังตารางที่ 2 เมื่อนำผลที่ได้ไปคำนวณทางสถิติแบบ One-Way ANOVA เพื่อทดสอบว่าสีของแสงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความยาวของใบผักกาดหอมเรดโอ๊ค พบว่า ได้ค่า P-value เท่ากับ 0.05 ซึ่งมีค่าเท่ากับระดับนัยยะสำคัญ .05 ทั้งนี้สามารถสรุปได้ในเบื้องต้นว่าสีของแสงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความยาวของใบผักกาดหอมเรดโอ๊ค สำหรับความยาวรัศมีผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ใช้แสงธรรมชาติมีค่าเฉลี่ยในวันที่ 25 กันยายน 2565 เท่ากับ 2.53 เซนติเมตร ทว่าหลังจากวันที่ดังกล่าวในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี จังหวัดลพบุรี มีเมฆครึ้มประกอบฝนตกหลายวันติดต่อกัน เป็นเหตุให้ตัวอย่างในกลุ่มนี้ตายหมด

ตารางที่ 3 แสดงผลการคำนวณเชิงสถิติด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นและสมการถดถอยเชิงพหุนาม พร้อมทั้งค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เมื่อตัวแปร x คือ ระยะเวลาในการเจริญเติบโต

สีของแสงในกลุ่มตัวอย่าง	สมการถดถอยเชิงเส้น		สมการถดถอยเชิงพหุนาม	
	รูปแบบสมการ	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ	รูปแบบสมการ	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
สีแดง	0.69x + 2.32	0.698	$0.195x^2 + 0.325x + 3.3$	0.749
สีน้ำเงิน	0.334x + 1.36	0.983	$0.0005x^2 + 0.309x + 1.39$	0.984
สีขาว	0.881x + 1.48	0.994	$0.0525x^2 + 0.619x + 1.74$	0.997

สรุปผลการวิจัยและวิจารณ์

จากผลการทดลอง พบว่า ผักกาดหอมเรดโอ๊ดที่ปลูกในโรงเรือนที่ให้แสงสีขาวมีการเจริญเติบโตเฉลี่ยดีที่สุดที่ 5.08 เซนติเมตร โดยที่แสงสีน้ำเงินมีการเจริญเติบโตเฉลี่ยน้อยที่สุด 2.68 เซนติเมตร ในเวลาที่เท่ากัน สอดคล้องกับการเจริญเติบโตเฉลี่ยที่รายงานโดย สุทธิดา มณีเมือง และคณะ [2] ทั้งนี้ ยังพบอีกว่ารูปแบบทางคณิตศาสตร์การเจริญเติบโตของทั้งผักกาดหอมเรดโอ๊ดที่ปลูกในโรงเรือนที่ให้แสงสีขาว แสงสีน้ำเงิน และแสงสีแดง อยู่ในลักษณะเดียวกัน คือ สมการพหุนามกำลังสองหรือรูปแบบพาราโบลา ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแสงสีขาว แสงสีน้ำเงิน และแสงสีแดง เท่ากับ 0.9972, 0.9844 และ 0.7486 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการเจริญเติบโตผักกาดหอมเรดโอ๊คสามารถเขียนได้ในรูปสมการ

$$y = ax^2 + bx + c \tag{3}$$

โดย a, b และ c คือ ค่างคงที่ใด ๆ ซึ่งขึ้นกับปัจจัยแต่ละชนิดที่มีผลต่อการเจริญเติบโตโดยในงานวิจัยนี้ได้แก่ ชนิดของแสง เมื่อเปรียบเทียบกับสมมติฐานทางคณิตศาสตร์ของ Bessonov และ Volpert ตามสมการที่ (2) แล้ว พบว่ามีรูปแบบสอดคล้องกัน ด้วยเหตุเพราะเมื่อกระจายอนุกรมสมการที่ (2) ประกอบกับประมาณค่าอันดับที่สองจะทำให้ได้สมการพหุนามที่ให้รูปแบบกราฟแบบพาราโบลาเช่นเดียวกัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ที่สนับสนุนสถานที่และเวลารวมถึงผลักดันให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] กษิดิ์เดช อ่อนศรี, ณัฐพงค์ จันจุฬา และจิรภัทร ลดาวัลย์. (2563). อิทธิพลของแสงจากหลอดไดโอดเปล่งแสง (LED) ต่อการเจริญเติบโตของผักสลัด 4 ชนิด. *Thai Journal of Science and-Technology*, 9(4), 529–538.

[2] สุทธิดา มณีเมือง, เนตรนภา อินสลุด, นิติ คำเมืองลือ, ประดิษฐ์ เทิดทูล และพฤทธ์ สกุลช่างสัจจะทัย. (2558). ผลของความเข้มแสงจากชุดหลอดแอลอีดีสำหรับการเพาะปลูกที่มีต่อผักสลัดเรดโอ๊ดในระบบไฮโดรโปนิกส์, *ว.มทร.อีสาน*, *8*(1), 63-72.

[3] Rakesh, M., Gabriela, M., Benjamin, L., & Stephanie, L. (2009). Development of a standardized methodology for quantifying total chlorophyll and carotenoids from foliage of hardwood and conifer tree species. *Can. J. Forest Res*., *39*, 849-861.

[4] พิชญ์สินี เพชรไทย และธรรมศักดิ์ ทองเกตุ. (2560). ผลของความเข้มแสงและระยะเวลารับแสงต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพของผักกาดหอม. *ว.พืชศาสตร์สงขลานครินทร์*, *4*(3), 54-59.

[5] มูฮัมหมัดอาลาวี บูกุ. (2560). *แบบรูปฟีโบนักชี ฟังก์ชันการเจริญเติบโต ปริมาตรของเมล็ดและการจัดเรียงเมล็ด*. สาขาวิชาคณิตศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สืบค้นจาก https://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2016/11756/1/TC1426.pdf

[6] Bessonov, N., & Volpert, V. (2000). *Dynamical Models of Plant Growth.* Retrieved from http://math.univ-lyon1.fr/~volpert/plant.pdf

[7] Blankenship, R. E. (2002). *Molecular mechanisms of photosynthesis.* 2nd Edition. Oxford, UK: Blackwell Science.

[8] Hall, D. O., & Rao, K. K. (1999). *Photosynthesis.* 6th Edition. Cambridge, UK: Cambridge University Press.