แบบจำลองอัตราการเปลี่ยนแปลงสำหรับปริมาณน้ำตาลในอ้อย

นาย กฤษฎิ์ บัวเผื่อน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการคณนา ภาควิชาคณิตศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RATE OF CHANGE MODEL FOR SUGAR CONTENT IN SUGARCANE

Mr. Krit Buaphuan

ศูนย์วิทยทรัพยากร
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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองอัตราการเปลี่ยนแปลงสำหรับปริมาณน้ำตาลในอ้อย
โดย	นาย กฤษฎ์ บัวเผื่อน
สาขาวิชา	วิทยาการคณนา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ สุชาดา ศิริพันธุ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทรงเกียรติ สุเมธกิจการ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ สุชาดา ศิริพันธุ์)

..... กรรมการ
(ดร. เพชรอาภา บุญเสริม)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. พูนพิภพ เกษมทรัพย์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กฤษฎิ์ บัวเผื่อน : แบบจำลองอัตราการเปลี่ยนแปลงสำหรับปริมาณน้ำตาลในอ้อย.
(RATE OF CHANGE MODEL FOR SUGAR CONTENT IN SUGARCANE)
อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.สุชาดา ศิริพันธุ์, 49 หน้า.

อ้อย (*Saccharum officinaram L.*) เป็นพืชเศรษฐกิจของไทย ที่มีผลผลิตอ้อยเฉลี่ยประมาณ 8-9 ตัน/ไร่ ซึ่งต่ำกว่าประเทศคู่แข่งมาก ดังนั้นการจัดการในด้านต่างๆที่จะส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพของอ้อยจึงมีความสำคัญ ค่าความหวานของน้ำตาลในต้นอ้อย (Commercial Cane Sugar, C.C.S) เป็นตัวชี้วัดระดับราคาของอ้อยในอุตสาหกรรมน้ำตาล จากการศึกษาข้อมูลพบว่าช่วงระยะข่างปล้องจะเริ่มมีการสะสมน้ำตาลมากขึ้นจนกระทั่งถึงระยะแก่และสุกจากนั้นการสะสมของน้ำตาลจะมีปริมาณลดลงเนื่องจากมีการนำน้ำตาลไปใช้ในการสร้างดอกเพื่อการขยายพันธุ์ งานวิจัยนี้ได้แสดงแบบจำลองการเจริญเติบโตของต้นอ้อยและการสะสมของน้ำตาลที่สามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบความเข้มข้นของน้ำตาลในต้นโดยใช้สมการเชิงอนุพันธุ์ (Differential equation) มีการกำหนดข้อมูลเข้าเป็น วันหลังจากปลูก และตัวแปรเป้าหมายคือ ความเข้มข้นของน้ำตาล (%brix)

ทำการเก็บข้อมูลจากอ้อยพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ปลูกในไร่อ้อย อ.บ้านบึง จ.ชลบุรี นำมาสร้างแบบจำลองการเจริญเติบโตและอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตาลในต้นอ้อย พบว่าสามารถทำนายปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลได้ดี พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่ 0.9684 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยประมาณ 0.5 % สำหรับข้อมูลความเข้มข้นเฉลี่ยทั้งต้น 3 % สำหรับข้อมูลความเข้มข้นเฉลี่ยในแต่ละปล้อง 5.3 % สำหรับความเข้มข้นเฉลี่ยของแต่ละปล้องในแต่ละครั้งที่เก็บข้อมูล และแบบจำลองการเจริญเติบโตของต้นอ้อยที่ได้มีความสามารถในการทำนายความสูงของต้นอ้อยได้ดีเช่นกัน จากการทดสอบพบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่ 0.9987 มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของความสูงน้อยกว่า 3 %

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา คณิตศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต กฤษฎิ์ บัวเผื่อน
สาขาวิชา วิทยาการคณนา ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก สุชาดา ศิริพันธุ์
ปีการศึกษา 2553

5172211423 : MAJOR COMPUTATIONAL SCIENCE
KEYWORDS : MATHEMATICAL MODEL / SUGARCANE / SUGAR CONTENT

KRIT BUAPHUAN : RATE OF CHANGE MODEL FOR SUGAR CONTENT IN SUGARCANE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SUCHADA SIRIPANT, 49 pp.

Sugarcane (*Saccharum officinaram L.*) is one of Thailand's industrial crops. Thailand's sugarcane production volume is at an average of 8-9 tons per rai, which is considerable lower than its competitors. Therefore, management in various areas which will affect the quantity and quality of the sugarcane is important. The commercial cane sugar (C.C.S.) is an indicator of the price of the sugar cane in the sugar industry. Based on research, it has been found that during the stalk-elongation phase, the accumulation of sugar in sugarcane will increase until maturity and ripening, at which time the accumulation of sugar will decrease as the sugar will be used for breeding. This purpose of this research is to create the Growth Model of the sugarcane and Sugar accumulation in sugarcane based on differential equations. The input data is the day after planted and the output is the sugar concentration (%brix).

All data were collected from a Sugarcane field at Chonburi Province, Thailand. Comparisons of Growth model and the Stalk height measured show that R^2 is 0.9987 with mean percentage relative error of under 3% and comparisons of sugar accumulation model and sugar concentration in stalks measured show that R^2 is 0.9684 with mean percentage relative error of around 0.5%, 3%, 5.3% for average sucrose concentration data for each harvest time, average sucrose concentration of stalks and every single stalk, respectively.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Mathematics
Field of Study : Computational Science
Academic Year : 2010

Student's Signature Krit Buaphuan
Advisor's Signature S. Siripant

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากรองศาสตราจารย์ สุชาดา ศิริพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาเพื่อให้คำปรึกษา ให้ความรู้และช่วยเหลืออย่างดียิ่งตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยตลอด จนช่วยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น จึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ผู้วิจัยของกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์ สาขาวิชาวิทยาการคณนา ที่ได้ถ่ายทอดความรู้อย่างเต็มที่ ให้กำลังใจ รวมทั้งเสียสละเวลาให้คำแนะนำแก่ผู้ทำวิจัย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทรงเกียรติ สุเมธกิจการ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. พูนพิภพ เกษมทรัพย์ และ ดร.เพชรอาภา บุญเสริม กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจสอบและให้คำแนะนำแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จด้วยดี

ขอกราบขอบคุณทุกคนในครอบครัว ที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจและสนับสนุนในด้านต่างๆ อย่างดียิ่งตลอดมา

ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ สาขาวิทยาการคณนาและศูนย์วิจัย AVIC สำหรับกำลังใจและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ตลอดการทำงานวิจัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฌ

สารบัญภาพ..... ญ

บทที่

1. บทนำ.....1

    1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

    1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....1

    1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....1

    1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....2

    1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....2

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....4

    2.1. แนวคิดและทฤษฎี.....4

    2.2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....4

3. ทฤษฎีพื้นฐาน.....6

    3.1. ลักษณะทางสัญฐานวิทยาของอ้อย.....6

    3.2. ระยะการเจริญเติบโตของอ้อย.....11

    3.3. ปัจจัยควบคุมการสุกของอ้อย.....14

        3.3.1. อุณหภูมิ.....14

        3.3.2. ความชื้นในดิน.....14

        3.3.3. อายุของอ้อย.....14

        3.3.4. ธาตุอาหารในดินและคุณภาพของน้ำอ้อย.....14

    3.4. การเคลื่อนย้ายน้ำตาลในอ้อย.....16

    3.5. กลไกการเก็บน้ำตาลในลำต้นอ้อย.....16

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

3.6. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 16
3.6.1. แบบจำลองการเจริญเติบโตของต้นอ้อย 16
3.6.2. แบบจำลองการสะสมน้ำตาลของต้นอ้อย 18
3.7. การเปลี่ยนแปลงของไฟเบอร์ 19
4. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 21
4.1. การเก็บข้อมูล 21
4.2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 22
4.2.1. แบบจำลองการเจริญเติบโตของต้นอ้อย 22
4.2.2. แบบจำลองการสะสมน้ำตาลของต้นอ้อย 23
4.3. การเปลี่ยนแปลงของไฟเบอร์ 24
4.4. การวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression Analysis) 25
4.5. การหาค่าความคลาดเคลื่อนและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 27
5. ผลการวิจัย สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ 28
5.1. ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองกับข้อมูล 28
5.1.1. แบบจำลองการเจริญเติบโตของอ้อยและค่าความคลาดเคลื่อน 28
5.1.2. แบบจำลองการสะสมน้ำตาลในอ้อย 30
5.2. สรุปผลการวิจัย 32
5.3. ข้อเสนอแนะ 32
รายการอ้างอิง 33
ภาคผนวก 36
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 39

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ข้อมูลความสูงเฉลี่ยของต้นอ้อยจากแปลงปลูก.....	22
4.2	ข้อมูลความเข้มข้นของน้ำตาลเฉลี่ยในต้นอ้อย.....	23
4.3	ข้อมูลไฟเบอร์รวมจากแปลงปลูก.....	24
5.1	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของความสูง.....	29
5.2	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของความสูงจากทุกข้อมูล.....	30
5.3	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของความเข้มข้นของน้ำตาลเฉลี่ย...	30
5.4	ข้อมูลอายุและความเข้มข้นของน้ำตาลในอ้อยเฉลี่ยจากข้อมูลแต่ละครั้ง.....	31

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
3.1	รูปรากของท่อนพันธุ์และรากของหน่อต้นอ้อย	6
3.2	รูปแสดงลำดับของการเกิดการแตกหน่อ	7
3.3	รูปแสดงส่วนประกอบของ joint	8
3.4	รูปแสดงส่วนประกอบของใบอ้อย	9
3.5	รูปดอกของอ้อย	10
3.6	รูประยะงอกของต้นอ้อย	11
3.7	รูประยะแตกกอของต้นอ้อย	12
3.8	รูประยะย่างปล้องของต้นอ้อย	12
3.9	รูประยะแก่และสุกของอ้อย	13
4.1	กราฟแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนของไฟเบอร์ต่อน้ำหนักสด	25
5.1	กราฟแสดงแบบจำลองอัตราการเจริญเติบโตของต้นอ้อยกับข้อมูลดิบเฉลี่ย	28
5.2	กราฟแสดงแบบจำลองการสะสมน้ำตาลกับข้อมูลความเข้มข้นของน้ำตาลเฉลี่ย	30

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อ้อย (*Saccharum officinaram L.*) เป็นพืชเศรษฐกิจของไทย ที่มีผลผลิตอ้อยเฉลี่ยประมาณ 8 - 9 ตัน/ไร่ ซึ่งต่ำกว่าประเทศคู่แข่งมาก ดังนั้นการจัดการในด้านต่างๆที่จะส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพของอ้อยจึงมีความสำคัญ ค่าความหวานของน้ำตาลในต้นอ้อย (Commercial Cane Sugar, C.C.S) เป็นตัวชี้วัดระดับราคาของอ้อยในอุตสาหกรรมน้ำตาล จากการศึกษาข้อมูลพบว่าช่วงระยะย่างปล้องจะเริ่มมีการสะสมน้ำตาลมากขึ้นจนกระทั่งถึงระยะแก่และสุกจะมีการสะสมของน้ำตาลลดลงเนื่องจากมีการนำน้ำตาลไปใช้ในการสร้างดอกเพื่อที่จะขยายพันธุ์ การเปลี่ยนแปลงระดับความหวานของน้ำตาลในลำต้นอ้อย มีผลมาจากสิ่งแวดล้อมเช่น น้ำ ปุ๋ย และแสงที่อ้อยได้รับ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์สำคัญสำหรับงานวิจัยนี้เพื่อประยุกต์ใช้สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับอธิบายการเจริญเติบโตและการสะสมน้ำตาลของต้นอ้อยในแต่ละช่วงเวลา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาเฉพาะการเจริญเติบโตของอ้อยปลูกพันธุ์ สุพรรณบุรี 60

1.3.2 วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการสร้างแบบจำลองการเจริญเติบโตของต้นอ้อยตั้งแต่ระยะย่างปล้องช่วงปลายจนกระทั่งถึงระยะแก่และสุก

1.3.3 การเจริญเติบโตของอ้อยที่ใช้ในการศึกษาคือ ความสูงของลำต้นอ้อย ซึ่งวัดจากปล้องที่สองที่พ้นดินจนถึงยอดของต้นอ้อย

1.3.4 การสะสมของน้ำตาลในต้นอ้อยที่ใช้ในการศึกษาคือ ความเข้มข้นของน้ำตาลในต้นอ้อย ซึ่งวัดจากความเข้มข้นของน้ำตาลในต้นอ้อยโดยใช้ Refratometer for Sucrose Measurement โดยมีหน่วยในการวัดคือ %brix

1.3.5 ต้นอ้อยที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเริ่มปลูกในช่วงต้นเดือนกรกฎาคม โดยชาวไร่อ้อยเป็นผู้ปลูก มีการให้ปุ๋ยเคมีสูตร 15 – 15 – 15 ในช่วงต้นอ้อยเริ่มงอก โดยให้ปุ๋ยเพียงครั้งเดียวและไม่มีการให้น้ำนอกเหนือจากปริมาณน้ำฝน

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูล ทฤษฎีของการสะสมน้ำตาลของอ้อย ทฤษฎีสรีรวิทยาและการเจริญเติบโตของอ้อย

1.4.2 เก็บข้อมูลเกี่ยวกับการเจริญเติบโต ความสูง รัศมี น้ำหนักสด ไฟเบอร์ ความเข้มข้นของสารละลายของอ้อยแต่ละปล้องจากแปลงปลูกอ้อยเพื่อสร้างแบบจำลอง

1.4.3 สร้างแบบจำลองการสะสมน้ำตาลจากข้อมูลในแปลงปลูก

1.4.3.1 ศึกษาปัจจัยและความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมของน้ำตาลในอ้อย

1.4.3.2 สร้างแบบจำลองการสะสมของน้ำตาลในอ้อย

1.4.4 ทดสอบและปรับปรุงแบบจำลอง

1.4.5 สรุป วิจารณ์ผล เขียนรายงานและจัดทำรูปเล่มเอกสารวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

แบบจำลองการสะสมของน้ำตาลในอ้อยในระยะย่างปล้องจนถึงระยะแก่และสุกที่พิจารณาจากเวลา สามารถนำไปใช้ช่วยประกอบการตัดสินใจสำหรับเกษตรกรและโรงงานน้ำตาลในการเลือกช่วงที่เหมาะสมสำหรับการปลูกและวางแผนในการเก็บเกี่ยวผลผลิต เพื่อให้โรงงานได้ผลผลิตที่มากขึ้นและเกษตกรได้ผลตอบแทนที่สูงขึ้นจากเดิม

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ แบ่งออกเป็น 5 บท โดย บทที่ 2 กล่าวถึงเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย บทที่ 4 กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองการสะสมน้ำตาลของอ้อยและการเจริญเติบโตของต้นอ้อย บทที่ 5 กล่าวถึงผลการวิจัย สรุปผล และข้อเสนอแนะของงานวิจัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. แนวคิดและทฤษฎี

ในอุตสาหกรรมน้ำตาล อ้อยเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำตาล ในช่วงเดือนตุลาคมของทุกปี โรงงานผลิตน้ำตาลจะเริ่มเปิดกิจการจนกระทั่งประมาณเดือนมีนาคมก็เริ่มหยุดการผลิต จากข้อมูลพบว่าการเริ่มดำเนินกิจการในช่วงเดือนตุลาคมนั้นในปริมาณอ้อยที่เท่ากันผลผลิตของน้ำตาลนั้นไม่เท่ากัน แต่ได้มากขึ้นเมื่อเข้าสู่หน้าหนาวซึ่งปริมาณของน้ำฝนลดลงหรือไม่มีฝนตกเลยและจะมีปริมาณของผลผลิตมากจนกระทั่งปิดโรงงาน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเกี่ยวกับระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเก็บเกี่ยวซึ่งมีผลกระทบต่อปริมาณน้ำตาล โดยการสร้างสมการเพื่อทำนายผลผลิตของน้ำตาล

2.2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ได้มีการศึกษาทางพฤกษศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับอ้อย โดย L.M. Mcdonald และ S.N. Lisson ในปี 2001 เสนอว่าเวลาของการปลูก การปลูก และการเก็บเกี่ยวผลผลิตนั้นมีอิทธิพลต่อผลผลิตของอ้อย ซึ่งจากข้อมูลจากแปลงทดลองที่พิจารณาทั้งการปลูกในฤดูการปกติและการปลูกนอกฤดูเพื่อหาค่าที่เหมาะสมเกี่ยวกับรอบของการผลิต และความยาวนานของฤดูการเก็บเกี่ยว การศึกษาผลกระทบจากเวลาของการปลูกถูกทดสอบในแปลงปลูกที่ Burdekin ได้ผลว่า เวลาของการปลูกอ้อยมีผลสำคัญอย่างยิ่งต่ออ้อยและผลผลิตน้ำตาลใกล้เคียงหรือดีกว่า การปลูกในฤดูการปกติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า บางพื้นที่สามารถเลื่อนฤดูการปลูกให้เร็วขึ้นได้ [1]

ในปี 2002 Inman –Bamber, N.G., Muchow, Robertson, M.J. ได้ศึกษาเกี่ยวกับ การแบ่งส่วนของมวลแห้ง (Dry matter) ในอ้อยซึ่งปกติจะครอบคลุมโดยทฤษฎีพื้นฐาน 2 ข้อ คือ 1. การผลิตน้ำตาลขึ้นตรงกับการแบ่งส่วนของน้ำหนักสดไปยังลำต้น และน้ำตาลถูกเก็บไว้ในเนื้อเยื่อบริเวณลำต้น 2. ความแตกต่างของส่วนประกอบของมวลแห้งของลำต้นและโดยเฉพาะความเข้มข้นของน้ำตาลที่ถูกใช้ในการกำหนดมูลค่าของอ้อยในเชิงอุตสาหกรรม

การเปลี่ยนแปลงของการสะสมน้ำตาลขึ้นกับอายุ มวล และฤดูกาล ซึ่งทำการอธิบายโดยแบบจำลองที่สร้างจากทฤษฎีทางสรีระวิทยาของลำต้นอ้อยซึ่งน้ำตาลถูกเพิ่มเมื่อยังไม่เข้าระยะแก่และสุก และ อาจจะถูกใช้เมื่อต้องการคาร์โบไฮเดรต เพื่อการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ฤดูและอายุ

มีผลต่อการสะสมน้ำตาลทั้งลำต้น เนื่องจากความแตกต่างของสัดส่วนของแต่ละปล้องซึ่งมีการสะสมน้ำตาลน้อยและในส่วนที่แก่มีการสะสมน้ำตาลมาก [2]

ในปี 2001 D.L. Liu และ T.A. Bull ได้สร้างแบบจำลองเพื่อใช้อธิบายระบบการเจริญเติบโตของพืชซึ่งสร้างขึ้นมาจากพื้นฐานทฤษฎีทางพฤกษศาสตร์ โดยใช้กระบวนการสังเคราะห์แสงและกระบวนการหายใจของพืช เพื่อนำมาใช้ทำนายการเจริญเติบโตและการสะสมน้ำตาลในต้นของอ้อย [3]

ในปี 2003 D.L. Liu และ K.R. Helyar ได้เสนอผลงานเกี่ยวกับ ปริมาณน้ำจากปล้องบนสุดถึงปล้องล่างสุดมีค่าจากระดับ 7.8 – 11.8 กรัมน้ำ/กรัมมวลแห้งของปล้อง ถึง 1.6 – 2.9 กรัมน้ำ/กรัมมวลแห้ง นอกจากนี้ผู้วิจัยพบว่าปริมาณน้ำส่วนโคนอ้อยจะมีค่าจาก 1.98 กรัมน้ำ/กรัมมวลแห้ง ในฤดูหนาวถึง 2.83 กรัมน้ำ/กรัมมวลแห้ง ในฤดูร้อนปริมาณน้ำในต้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล [4]

ในปี 2005 กุมุท สังขศิลา ได้นำเสนอการพัฒนาและการหาคำตอบของแบบจำลองเพื่อหาตารางการตัดอ้อย สำหรับกำหนดเวลาตัดอ้อยจากแปลงปลูกของชาวไร่ที่เป็นคู่สัญญาเพื่อเข้าหีบโรงงานน้ำตาล แบบจำลองหาตารางตัดอ้อยประกอบด้วยแบบจำลองการคาดการณ์ผลผลิต และการสะสมน้ำตาลในอ้อยที่เป็นฟังก์ชันของสภาพแวดล้อม หาคำตอบของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยประยุกต์ตามวิธี tabu-search และคำตอบที่ได้ยังเสนอแนะว่าปริมาณผลผลิตและการสะสมน้ำตาลอ้อยจะมีผลผลิตที่ดีขึ้นอยู่กับการเลือกวันเปิดหีบอ้อยและความยาวนานในการหีบอ้อย [5]

ในปี 2009 ภิญโญ ยลธรรม์ธรรม ได้สร้างแบบจำลองการเจริญเติบโตของอ้อย โดยใช้กระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการหายใจของพืชและอุณหภูมิของใบเป็นตัวกำหนด จากนั้นนำค่าการสังเคราะห์แสงที่ได้ไปใช้ร่วมกับการแบ่งสารอาหารของพืชเพื่อนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองการเจริญเติบโตโดยได้เสนอแบบจำลองไว้ 2 แบบ คือ แบบจำลองการเจริญเติบโตแบบเส้นตรงและแบบจำลองการเจริญเติบโตแบบเอ็กโปเนนเชียล อีกทั้งยังได้นำตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์การเจริญเติบโตมาแสดงผลเป็นตัวแบบโครงสร้าง 3 มิติของต้นอ้อย [6]

บทที่ 3

ทฤษฎีพื้นฐาน

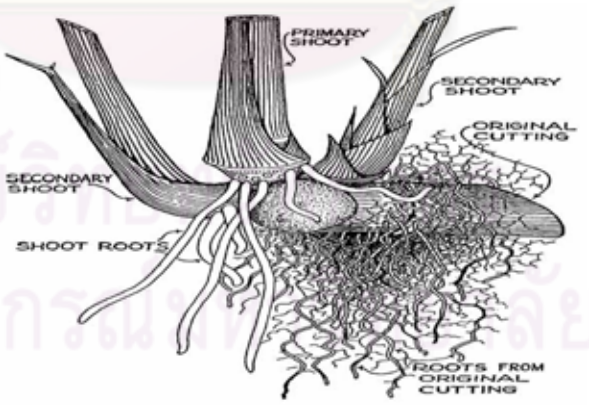
สรีรวิทยาและข้อมูลจำเพาะของต้นอ้อย (Sugarcane Physiology and Specification)

อ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศรองจากข้าว ยางพารา และมันสำปะหลัง ประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกน้ำตาลจากอ้อยเป็นอันดับที่ 5 ของโลกรองจากออสเตรเลีย บราซิล คิวบา และฟิลิปปินส์ ข้อมูลจำเพาะของอ้อยซึ่งมีชื่อที่รู้จักกันทั่วไปคือ sugarcane มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Saccharum officinarum L.*ซึ่งปลูกเพื่อการค้า (cultivated cane) [9,12]

3.1. ลักษณะทางสัญฐานวิทยาของอ้อย

3.1.1. ราก (root)

อ้อยมีระบบรากฝอย (fibrous root system) เช่นเดียวกับพืชวงศ์หญ้าอื่นๆ รากฝอยนี้จะแผ่กระจายออกโดยรอบลำต้นในรัศมี 45-90 เซนติเมตร ลึกประมาณ 1-1.5 เมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และสภาพแวดล้อม เช่น ความชื้นในดิน ความหนาแน่นของดิน ธาตุอาหาร เป็นต้น การขยายพันธุ์อ้อยใช้การตัดลำต้นเป็นท่อนสั้นๆ โดยแต่ละท่อนมีตาอ้อย 3 - 4 ตา เมื่อนำไปปลูกจะปรากฏราก 2 ชุด คือ



รูปที่ 3.1 รูปรากของท่อนพันธุ์และรากของหน่อของต้นอ้อย

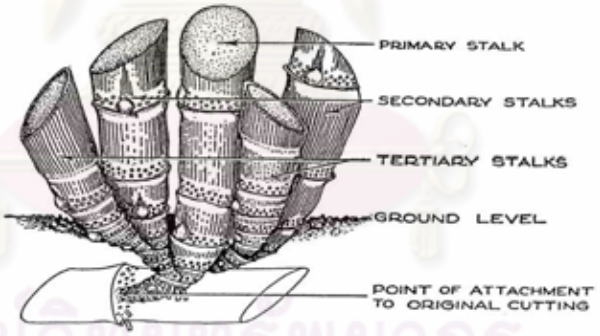
แหล่งที่มา http://travelersinparadise.com/content/2010/09/28/callwood-distillery-arundel-rum/

3.1.1.1. **รากของท่อนพันธุ์** (sett root หรือ cutting root) เกิดจากปุ่มกำเนิดรากของท่อนพันธุ์ แตกแขนงขณะที่ตาของท่อนพันธุ์ยังไม่เจริญเป็นหน่อ (shoot) น้ำและธาตุอาหารจากดินจะถูกลำเลียงเข้าสู่ท่อนพันธุ์นี้ และเมื่อรากของหน่อเจริญขึ้นสามารถดูดน้ำและธาตุอาหารในดินได้แล้วรากของท่อนพันธุ์จะค่อยๆตายไป

3.1.1.2. **รากของหน่อ** (shoot root) เกิดจากปุ่มรากของหน่อที่เจริญเติบโตจากตาของท่อนพันธุ์ มีขนาดใหญ่กว่ารากของท่อนพันธุ์ มีสีขาว และมีสีเข้มขึ้นเมื่ออายุมากขึ้น รากนี้จะเกิดขึ้นแทนที่รากของท่อนพันธุ์และมีจำนวนมากขึ้นโดยกระจายไปรอบๆต้น ถ้าดินบริเวณรอบๆร่วนซุยและหน้าดินลึกรากก็สามารถขยายไปได้ไกลและลึกขึ้น

3.1.2. **ลำต้น** (stalk)

ลำต้นของอ้อยเป็นส่วนที่ใช้สำหรับสะสมน้ำตาลอีกทั้งยังใช้ในการขยายพันธุ์โดยใช้การตัดเป็นท่อน โดยแต่ละท่อนจะมีตา 3 - 4 ตา แต่ละตาจะเจริญเป็นหน่อแรก



รูปที่ 3.2 รูปแสดงลำดับของการเกิดการแตกหน่อ

แหล่งที่มา http://travelersinparadise.com/content/2010/09/28/callwood-distillery-arundel-rum/

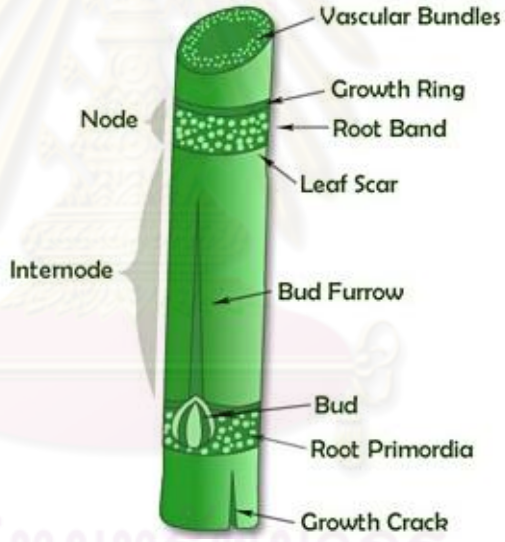
ลำต้นมีสีแตกต่างกันตามพันธุ์และสภาพแวดล้อม สารสี (pigment) ที่สร้างสีมี 2 ชนิด

1. แอนโทไซยานิน (anthocyanin) ทำให้เกิดสีแดง อยู่ใน epidermis
2. คลอโรฟิลล์ (chlorophyll) ทำให้เกิดสีเขียว อยู่ในเนื้อเยื่อ

ต้นที่มีสีแดงเพราะมีคลอโรฟิลล์อยู่ในลำต้นน้อยและมีแอนโทไซยานินอยู่มาก ต้นที่มีสีม่วงแดงเพราะมีคลอโรฟิลล์อยู่ปานกลาง และมีแอนโทไซยานินอยู่น้อย แต่ถ้าต้นที่มีสีเหลืองเป็นเพราะมีคลอโรฟิลล์และแอนโทไซยานินอยู่น้อย

ลำต้นของอ้อยประกอบด้วยข้อ (node) และปล้อง (internode) ส่วนของปล้องที่อยู่ระหว่าง รอยกาบใบ (leaf scar) เรียกว่า joint ลำต้นประกอบด้วยหลาย joint รูปร่างของ joint แต่ละ joint มีรูปร่างแตกต่างกันตามสายพันธุ์ joint ที่โคนจะสั้นและค่อยๆยาวขึ้น joint จะยาวที่สุดในช่วงกลางลำต้น และจะสั้นลงเมื่ออยู่ใกล้ยอด

ส่วนประกอบของ joint มีดังนี้



รูปที่ 3.3 รูปแสดงส่วนประกอบของ joint

แหล่งที่มา http://sugarcanecrops.com/growth_morphology/stalk/

ตา (budหรือeye) คือ ส่วนที่อยู่ในบริเวณที่เกิดรากตรงข้อ มีตาเกิดสลับข้างกัน ขนาดและลักษณะขึ้นอยู่กับสายพันธุ์

บริเวณเกิดราก (root band) คือ ส่วนที่อยู่ระหว่างรอยกาบใบและและวงเจริญ เป็นส่วนที่เกิดปุ่มกำเนิดราก ปกติด้านที่มีตาจะมีขนาดกว้างกว่าด้านตรงข้าม บริเวณที่เกิดรากความกว้างไข (wax) และมีสี แตกต่างกันไปตามสายพันธุ์

วงเจริญ (growth ring) เป็นเนื้อเยื่อเจริญลักษณะคล้ายวงแหวน อยู่เหนือบริเวณที่เกิดราก ไม่มีไขปกคลุม

รอยกาบใบ (leaf scar) คือ ส่วนที่เป็นรอยที่เกิดขึ้นหลังจากกาบใบร่วงหล่น อ้อยบางสายพันธุ์เมื่อกาบใบแห้งก็จะร่วงหล่นไปเอง บางสายพันธุ์ก็แห้งติดอยู่กับลำต้น

วงไข (wax band) คือ ส่วนที่อยู่ใต้รอยกาบใบ ไขมีสีขาว แต่ถ้าเกิดเชื้อราขึ้น ไขจะมีสีเทาหรือดำ

รอยแตกตื้นหรือรอยแตกลายงา (corky crack) คือ รอยแตกตามผิวของลำต้น บางปล้องจะมีลักษณะคล้ายรอยแตกลายงา ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่ออ้อยแต่อย่างใด

รอยแตกลึก (growth crack) เป็นรอยแตกตามยาวของลำต้น บางครั้งก็เกิดขึ้นตลอดปล้อง ลึกเข้าไปถึงเนื้ออ้อย เกิดขึ้นจากการเจริญเติบโตที่รวดเร็ว รอยแตกเช่นนี้เป็นอันตรายต่ออ้อย

ร่องตา (bud groove หรือ bud furrow) คือ ส่วนที่เป็นร่องเกิดขึ้นที่ปล้อง อยู่เหนือร่องตาขึ้นไป ขนาดและความลึกของร่องขึ้นอยู่กับสายพันธุ์

3.1.3. **ใบ** (leaf)

ใบอ้อยประกอบด้วยกาบใบ (leaf sheath) และแผ่นใบ (leaf blade) ใบจะหุ้มตาเอาไว้เกิดสลับข้างกัน กาบใบจะติดอยู่กับลำปล้องตรงข้อและครอบลำปล้องไว้ ใบที่เกิดก่อนในส่วนของโคนต้นมีลักษณะเป็นแผ่นเล็กๆ กาบใบจะมีขนเล็กๆ สีขาวปกคลุมอยู่โดยรอบ และจะร่วงหล่นหรือติดอยู่เมื่อกาบใบแห้ง แผ่นใบที่อยู่สูงจะมีขนาดและความยาวเพิ่มขึ้น ขนาดและลักษณะของใบสามารถบ่งบอกถึงสายพันธุ์ได้ เมื่อใบแก่จะแห้ง ร่วงหล่นหรือติดอยู่กับลำต้นขึ้นอยู่กับสายพันธุ์

รูปที่ 3.4 รูปแสดงส่วนประกอบของใบอ้อย

แหล่งที่มา http://sugarcanecrops.com/growth_morphology/the_leaf/

3.1.4. **ช่อและดอก** (arrow หรือ tassel)

ดอกอ้อยมีลักษณะเป็นพู่ มีรูปแบบเฉพาะของแต่ละสายพันธุ์ ในมุมของอุตสาหกรรมไม่นิยมปลูกอ้อยที่ออกดอก เนื่องจากน้ำตาลที่สะสมอยู่ในลำต้นได้ถูกนำไปใช้สร้างช่อดอกความหวานจึงลดลง และแสดงว่าหยุดการเจริญทางด้านเนื้อเยื่อแล้ว การออกดอกของอ้อยเกี่ยวข้องกับปัจจัยอื่นๆ เช่น ช่วงของแสง อุณหภูมิ ความชื้นในดิน อากาศ และปุ๋ยไนโตรเจน สิ่งต่างๆเหล่านี้ทำให้อ้อยสามารถออกดอกได้

ช่อดอกอ้อยเป็นช่อดอกแบบ panicle มีความยาวระหว่าง 30 – 60 เซนติเมตร ความยาวของแกนกลาง (main axis หรือ rachis) เป็นตัวกำหนดลักษณะของช่อดอกและก้านแขนง (lateral branch) ขณะที่ช่อดอกยังไม่ออกจากกาบของใบธง ก้านแขนงจะฝังอยู่ในร่องเหล่านี้ กลุ่มดอกย่อย (spikelet) ของอ้อยเกิดเป็นคู่ ประกอบด้วยชนิดที่มีก้านดอก (pedicelled หรือ stalked spikelet) และชนิดที่ไม่มีก้านดอก (sessile spikelet) แต่ละกลุ่มดอกย่อยมีขนยาวสีขาว (callus hair หรือ bristle) ล้อมรอบที่ฐาน ขณะที่ดอกยังไม่บานขนเหล่านี้จะแนบอยู่กับดอก

การบานของดอกอ้อย จะใช้เวลา 5 – 12 วัน จะค่อยๆทยอยบานจนหมดทุกดอก พันธุ์อ้อยสามารถแบ่งออกได้เป็น พันธุ์ที่มีทั้งเกสรตัวผู้และตัวเมียมีความสมบูรณ์ (fertile) และพันธุ์ที่มีเกสรตัวผู้ไม่สมบูรณ์แต่มีเกสรตัวเมียสมบูรณ์ (malesterile)

รูปที่ 3.5 รูปดอกของอ้อย

แหล่งที่มา http://www.forestryimages.org/browse/detail.cfm?imgnum=5376775

3.2. ระยะการเจริญเติบโตของอ้อย

การเจริญเติบโตของอ้อย ตั้งแต่การปลูกจนกระทั่งถึงการเก็บเกี่ยวผลผลิต แบ่งเป็น 4 ระยะดังนี้

3.2.1. **ระยะงอก** (germination phase)

ในระยะนี้เริ่มตั้งแต่เริ่มปลูกจนกระทั่งหน่อโผล่พ้นดิน อยู่ในช่วงเวลาประมาณ 2-3 สัปดาห์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ ความลึกของท่อนพันธุ์ ความชื้นในดิน หน่อที่เกิดจากตาของท่อนพันธุ์เรียกว่า หน่อแรก(primary shoot) จำนวนท่อนพันธุ์ที่งอกต่อไร่จะเป็นตัวกำหนดจำนวนกอในพื้นที่นั้น

รูปที่ 3.6 รูประยะงอกของต้นอ้อย

แหล่งที่มา http://sugarcanecrops.com/crop_growth_phases/germination_establishment_phase/

3.2.2. **ระยะแตกกอ** (tillering phase)

ในระยะงอกอ้อยตาแต่ละตาจะมีต้นงอกขึ้นมาเพียงหนึ่งต้น และเมื่อเจริญเติบโตถึงระยะหนึ่งจะมีการแตกกอ การแตกกอเป็นลักษณะสำคัญของพืชตระกูลหญ้า เกิดขึ้นเนื่องจากตาที่ส่วนโคนของลำต้นใต้ดินในหน่อแรก เจริญออกมาเป็นหน่อที่สอง และเกิดต่อเนื่องจนเกิดเป็นกอขึ้น ระยะแตกกอเป็นระยะที่ต่อเนื่องกับระยะงอก เริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 1.5 เดือนขึ้นไป ช่วงที่มีการแตกกอมาที่สุดอยู่ที่ระหว่าง 2.5 – 4 เดือน ปัจจัยที่ส่งผลต่อจำนวนกอคือ แสงแดด น้ำ และธาตุอาหาร เมื่อถึงระยะเก็บเกี่ยวหน่อจะเหลือเพียงครึ่งหนึ่งเนื่องจากการแข่งขันกันเพื่อการเจริญเติบโตอ้อยที่อ่อนแอกว่าก็จะค่อยๆ ตายไป

รูปที่ 3.7 รูประยะแตกกอของต้นอ้อย

แหล่งที่มา http://sugarcanecrops.com/crop_growth_phases/tillering_phase/

3.2.3. **ระยะย่างปล้อง** (stalk elongation phase)

ในระยะย่างปล้องจะเป็นช่วงที่มีการเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของปล้องอย่างรวดเร็ว ทำให้อ้อยมีขนาดใหญ่และมีความสูงมาก เป็นระยะที่เกี่ยวเนื่องกับระยะแตกกอ เริ่มตั้งแต่อายุประมาณ 3 – 4 เดือน จนกระทั่งถึง 7 - 8 เดือน การเจริญเติบโตของอ้อยในช่วงนี้จะเริ่มลดลงและจะเริ่มมีการสะสมน้ำตาลในลำต้นมากขึ้น

รูปที่ 3.8 รูประยะย่างปล้องของอ้อย

แหล่งที่มา http://sugarcanecrops.com/crop_growth_phases/grand_growth_phase/

3.2.4. **ระยะแก่และสุก** (maturity and ripening phase)

ในระยะแก่เป็นระยะที่อ้อยมีอัตราการเจริญเติบโตที่เริ่มลดลง เมื่อเทียบกับการเจริญเติบโตระยะต่างๆ น้ำตาลที่ใบสร้างขึ้นจากการสังเคราะห์แสงก่อนหน้านี้ถูกนำไปใช้ในการสร้างเนื้อเยื่อต่างๆ จะเริ่มนำมาสะสมในลำต้นมากขึ้น เมื่อความหวานของอ้อยในส่วนโคน ส่วนกลาง และส่วนปลาย มีความหวานใกล้เคียงกันจึงจะเรียกว่าอ้อยนั้นสุก

รูปที่ 3.9 รูประยะแก่และสุกของอ้อย

แหล่งที่มา http://www.forestryimages.org/browse/detail.cfm?imgnum=1322054

3.3. **ปัจจัยควบคุมการสุกของอ้อย**

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการสุกของอ้อยแบ่งออกได้ดังนี้

3.3.1. **อุณหภูมิ**

การลดลงของอุณหภูมิช่วยทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำตาลเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเวลากลางคืนที่อุณหภูมิที่ลดลงจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของอ้อย และจะสะสมน้ำตาลมากขึ้น ถึงแม้ว่าจะยังได้รับความชื้นหรือไนโตรเจนบ้างแต่ถ้าอุณหภูมิยังคงลดลง อ้อยก็จะหยุดการเจริญเติบโต

3.3.2. **ความชื้นในดิน**

ความชื้นในดินทำให้อ้อยสามารถดึงไนโตรเจนไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตทางด้านลำต้นและใบได้ ส่งผลให้น้ำตาลที่จะสะสมในต้นถูกดึงกลับไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต ความชื้นในดินเป็นปัจจัยที่สำคัญมาก ถ้าความชื้นในดินต่ำจะทำให้ความเข้มข้นของน้ำตาลสูง แต่ก็ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ด้วยเช่นกัน

3.3.3. **อายุของอ้อย**

อายุของอ้อยเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ เพราะว่าอ้อยที่ยังอายุน้อย ยังสามารถเจริญเติบโตได้เมื่อได้รับแสงแดด ความชื้น และธาตุอาหาร น้ำตาลในต้นจึงถูกใช้เพื่อการสร้างไฟเบอร์ ดังนั้นความเข้มข้นของน้ำตาลจะยังมีไม่มาก

3.3.4. **ธาตุอาหารในดินและคุณภาพของน้ำอ้อย**

การเขตกรรมทำให้ความอุดมสมบูรณ์ในดินลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะอ้อยเป็นพืชที่ดูดธาตุอาหารจากดินในปริมาณที่ค่อนข้างสูง อ้อยแต่ละพันธุ์ดูดธาตุอาหารไปใช้ในปริมาณที่แตกต่างกันออกไป การบำรุงดินช่วยทำให้ผลผลิตทางการเกษตรมีมากขึ้นช่วยเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรเป็นอย่างมาก ถือเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญในการทำการเกษตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งชุดดินชลบุรีที่ทำการปลูกอ้อยชุดนี้ มีความอุดมสมบูรณ์ของดินต่ำ มีอินทรีย์วัตถุต่ำ มีฟอสฟอรัสที่มีประโยชน์ต่ำและมีโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่ำ ในทุกระดับความลึกของดิน ธาตุอาหารจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อให้ได้ผลผลิตที่เพิ่มขึ้น และน้ำตาลที่มีคุณภาพมากขึ้น ธาตุอาหารของพืชแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

3.3.4.1. **ธาตุอาหารหลัก**

ก. **ไนโตรเจน** (N)

การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนที่เพียงพอทำให้อ้อยมีน้ำหนักสูงสุด อ้อยที่ได้รับไนโตรเจนสูงจะมีลำต้นอวบมาก แต่ถ้าลดความชื้นในดินลงจะทำให้ลำเล็กลง อ้อยที่ขาดไนโตรเจน จะมีการเจริญเติบโตที่ลดลง ลำต้นเล็ก การแตกกอน้อย ใบจะมีสีเขียวอมเหลือง ใบอ่อนสีจะจาง อ้อยในระยะแตกกอและระยะย่างปล้องต้องการธาตุไนโตรเจนสูง แต่เมื่อถึงเวลาเก็บเกี่ยวผลผลิตถ้าอ้อยได้รับธาตุไนโตรเจนอ้อยก็จะสามารถเจริญเติบโตต่อไปได้

ข. **ฟอสฟอรัส** (P)

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่สำคัญอย่างยิ่งในการงอกของอ้อย ฟอสฟอรัสในดินที่เพียงพอรากและหน่อจะเจริญอย่างรวดเร็ว รากและลำต้นของอ้อยจะแข็งแรง ถ้าขาดฟอสฟอรัส รากจะเล็ก รากแขนงน้อยและไม่แข็งแรง อีกทั้งธาตุของฟอสฟอรัสส่งผลกระทบโดยตรงต่อการทำให้น้ำอ้อยใส ขณะที่เคี่ยวทำน้ำตาล น้ำอ้อยควรมีฟอสฟอรัสอยู่ 300 ถึง 600 มก. P_2O_5 ต่อลิตร ถ้าหากมีฟอสฟอรัสน้อยกว่ากว่านี้จะส่งผลกระทบให้ การตกตะกอนรวมกับปูนขาวของสิ่งสกปรกในน้ำตาลเป็นไปได้ยาก ดังนั้นก่อนเก็บเกี่ยวควรจะมีปริมาณฟอสฟอรัสในปริมาณที่พอเหมาะด้วย

ค. **โปแตสเซียม** (K)

โปแตสเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกริยา (catalyst) ในขบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) นั่นคือ การช่วยในขบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง การเคลื่อนย้ายน้ำตาล ควบคุมการเคลื่อนที่ของน้ำในต้นอ้อย และเพิ่มน้ำตาล ทำให้น้ำอ้อยมีคุณภาพดี อาการขาดโปแตสเซียม โดยทั่วไป ใบจะแคระแกร็น ลำเล็ก ใบแก่จะมีจุดสีเหลืองส้ม ต่อมาจะกลายเป็นสีน้ำตาล

3.3.4.2. **ธาตุอาหารรอง ธาตุอาหารปริมาณน้อยและธาตุอาหารเสริม**

ก. แคลเซียม (Ca) เป็นธาตุอาหารที่พบมากในส่วนที่กำลังเจริญเติบโต ช่วยให้เซลล์ทำงานเป็นปรกติ อาการของอ้อยที่ขาดแคลเซียม ใบอ่อนจะเป็นจุดเล็กๆ สีเขียวอ่อนหรือขาว จากนั้นจะกลายเป็นสีน้ำตาลบนแดง เปลือกจะนิ่มและเปราะ การเจริญเติบโตลดลง

ข. แมกนีเซียม (Mg) เป็นส่วนประกอบสำคัญที่พบอยู่ในคลอโรฟิลล์ในใบ อาการของอ้อยที่ขาดแมกนีเซียม ใบอ่อนจะเป็นสีเขียวจาง ใบแก่มีจุดเขียวอ่อน และจุดเหล่านี้จะกลายเป็นสีน้ำตาล เมื่อเป็นมากจะดูคล้ายเป็นสนิม

ค. กำมะถัน (S) มักจะพบในบริเวณที่ไม่มีการชลประทาน ดินมีอินทรีย์วัตถุน้อย อาการของอ้อยที่ขาดกำมะถัน ใบอ่อนจะมีสีเหลืองอมเขียว แต่ใบแก่ยังเขียวสด ลำต้นสั้น และเล็ก

3.4. การเคลื่อนย้ายน้ำตาลในอ้อย

กระบวนการสังเคราะห์แสงเป็นกระบวนการที่สร้างน้ำตาลเกิดขึ้นในเวลาที่มีแสงเท่านั้น แต่การเคลื่อนย้ายของน้ำตาลเกิดขึ้นทั้งกลางวันและกลางคืน โดยมีอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญเกี่ยวกับอัตราการเคลื่อนย้าย ถ้าอุณหภูมิต่ำจะช่วยให้การเคลื่อนย้ายเร็วขึ้น

เนื่องจากในใบไม่สามารถเก็บน้ำตาลได้ จึงถูกลำเลียงไปที่ลำต้นซึ่งมีไฟเบอร์ที่สามารถเก็บน้ำตาลไว้ได้ การลำเลียงน้ำตาลจากใบไปยังลำต้นนั้นสันนิษฐานว่า น้ำตาลจะถูกลำเลียงจากท่ออาหาร (phloem) ของใบ โดยที่มีอัตราการเคลื่อนย้ายน้ำตาลจากใบสู่ลำต้นแตกต่างกันตามสายพันธุ์

3.5. กลไกการเก็บน้ำตาลในลำต้นอ้อย

เมื่อน้ำตาลถูกลำเลียงมาถึงลำต้น น้ำตาลจะแพร่เข้าสู่ช่องว่างระหว่างเซลล์และผนังเซลล์ โดยมี แอซิด อินเวอร์เทส (acid invertase) ทำให้ซูโครสแตกตัวเป็น กลูโครส และ ฟรักโทส เพื่อที่จะผ่านผนังเซลล์เข้าไปสะสมในที่ว่างภายในเซลล์ โดยการผ่านผนังเซลล์เข้าไปต้องอาศัยพลังงานภายในเซลล์ และเมื่อเข้าสู่เซลล์แล้วจะถูกเปลี่ยนรูปกลับมาเป็น ซูโครส

3.6. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.6.1. แบบจำลองการเจริญเติบโตของต้นอ้อย

ตัวแบบจำลองการเจริญเติบโตของต้นอ้อย ดูจากเวลาเป็นตัวแปร เนื่องจากข้อมูลสภาพอากาศที่เก็บข้อมูลได้ มีปริมาณน้ำฝนสะสมของแต่ละวันน้อยมาก อีกทั้งประเทศไทยมีอุณหภูมิที่ค่อนข้างคงที่ไม่แตกต่างกันมาก จึงสร้างแบบจำลองการเจริญเติบโตของต้นอ้อยจากสมการเชิงอนุพันธ์พิจารณาจากเวลาเป็นตัวแปรเพียงตัวเดียว โดยพิจารณาจากอัตราการเจริญเติบโตของอ้อยมี

อัตราการเจริญเติบโตที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงในช่วงปลายของระยะย่างปล้อง จึงพิจารณาจากสมการเชิงอนุพันธุ์ ณ เวลาใดๆ ได้ดังนี้ [13]

$$\frac{dG}{dt} = r\big(G_{max} - G(t)\big)G(t) \tag{3.1}$$

โดยที่ r คือ อัตราการเพิ่มขึ้นของความสูง G_{max} คือ ความสูงที่มากที่สุดที่เป็นไปได้ของต้นอ้อยพันธุ์หนึ่งๆ และ $G(t)$ คือ ความสูงเฉลี่ยของต้นอ้อย

หรือ

$$\frac{dG}{G(t)(G_{max}-G(t))} = r\,dt \tag{3.2}$$

ซึ่งจาก (3.2) สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{dG}{G(t)} + \frac{dG}{G_{max}-G(t)} = rG_{max}\,dt \tag{3.3}$$

เมื่อทำการหาปฏิยานุพันธุ์สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ

$$\ln G(t) - \ln|G_{max} - G(t)| = rG_{max}t + c \tag{3.4}$$

ทำการหาค่า c จากค่าเริ่มต้นจะได้

$$c = \ln\frac{G_0}{G_{max} - G_0} - r\,G_{max}\,t_0$$

แทนค่า c ลงในสมการ (3.4) โดยที่ G_0คือ ความสูงเริ่มต้นของข้อมูลที่ได้จากแปลงปลูกและ t_0 คือ จำนวนวันหลังจากการปลูก จะได้สมการ

$$\ln\frac{G(t)}{G_{max} - G(t)} - \ln\frac{G_0}{G_{max} - G_0} = r\,G_{max}\,(t - t_0)$$

หรือ

$$\ln\frac{G(t)(G_{max} - G_0)}{G_0(G_{max} - G(t))} = r\,G_{max}\,(t - t_0)$$

ทำการแก้สมการเอ็กโปแนนเชียลได้เป็น

$$\frac{G(t)(G_{max} - G_0)}{G_0(G_{max} - G(t))} = e^{r\, G_{max}\, (t - t_0)}$$

หรือ

$$G(t)(G_{max} - G_0) = G_0(G_{max} - G(t))e^{r\, G_{max}\, (t - t_0)}$$

จะได้

$$G(t)(G_{max} - G_0) + G_0\, G(t)e^{r\, G_{max}\, (t - t_0)} = G_{max}G_0 e^{r\, G_{max}\, (t - t_0)}$$

นั่นคือ

$$G(t) = \frac{G_{max}G_0\, e^{\,r\, G_{max}\, (t - t_0)}}{(G_{max} - G_0) + G_0 e^{r\, G_{max}\, (t - t_0)}}$$

เมื่อนำพจน์ $e^{r\, G_{max}\, (t - t_0)}$ หารตลอดจะได้สมการ

$$G(t) = \frac{G_0\, G_{max}}{G_0 + (G_{max} - G_0)e^{-r\, G_{max}\, (t - t_0)}} \qquad (3.5)$$

โดยที่ $G(t)$ คือ ความสูงเฉลี่ยของต้นอ้อย

r คือ อัตราการเพิ่มขึ้นของความสูง

G_{max} คือ ความสูงที่มากที่สุดที่เป็นไปได้ของต้นอ้อยพันธุ์หนึ่งๆ

G_0 คือ ความสูงเฉลี่ยของต้นอ้อย ณ วันที่ t_0

t_0 คือ วันแรกที่เก็บข้อมูลหลังวันปลูก

3.6.2. **แบบจำลองการสะสมน้ำตาลของต้นอ้อย**

การสะสมน้ำตาลในต้นอ้อยจะเกิดขึ้นมากหลังจากอ้อยเข้าสู่ระยะแก่และสุก โดยที่แบบ - จำลองการสะสมน้ำตาลในต้นอ้อยคิดจากสมการเชิงอนุพันธ์ ณ เวลาใดๆ ได้ดังนี้

$$\frac{dS}{dt} = r(S_{Max} - S(t))S(t) \qquad (3.6)$$

ในทำนองเดียวกับสมการ (3.1) จะได้สมการการสะสมน้ำตาล ณ เวลา ใดๆได้ดังนี้

$$S(t) = \frac{S_{Max}S_0}{S_0+(S_{Max}-S_0)e^{-rS_{Max}(t-t_0)}} \quad (3.7)$$

โดยที่ $S(t)$ คือ ปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลเฉลี่ย

S_{Max} คือ ปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลเฉลี่ยที่มากที่สุดที่เป็นไปได้ในแต่ละพันธุ์

r คือ อัตราการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของน้ำตาล

S_0 คือ ปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลเฉลี่ย ณ เวลา t_0

t_0 คือ วันแรกที่เก็บข้อมูลหลังวันปลูก

3.7. การเปลี่ยนแปลงของไฟเบอร์

อัตราการเปลี่ยนแปลงของไฟเบอร์มีค่าลดลงเมื่อเข้าระยะแก่และสุก เนื่องจากมีการนำน้ำตาลที่ได้มาจากกระบวนการสังเคราะห์แสงไปใช้ในการสะสมที่ลำต้นเพื่อใช้ขยายพันธุ์แทนที่การนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต โดยที่แบบจำลองอัตราการเปลี่ยนแปลงของไฟเบอร์คิดจากสมการเชิงอนุพันธุ์ ณ เวลาใดๆ ดังนี้

$$\frac{dF}{dt} = -kF(t) \quad (3.8)$$

โดยที่ k คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการเปลี่ยนแปลงของไฟเบอร์

$F(t)$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักไฟเบอร์ต่อน้ำหนักสด

หรือสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dF}{F} = -k\,dt \quad (3.9)$$

จากสมการที่ (3.9) เราสามารถทำการหาปฏิยานุพันธุ์ได้ดังนี้

$$\ln F = -k\,t + c \quad (3.10)$$

ทำการหาค่า c จากค่าเริ่มต้นจะได้

$$c = \ln F_0 + k\, t_0$$

ทำการแทนค่า c ลงในสมการ (3.10) โดยที่ t_0 คือ วันแรกที่เก็บข้อมูลหลังจากวันปลูกและ F_0 คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักไฟเบอร์ต่อน้ำหนักสด ณ เวลา t_0 จะได้สมการ

$$\ln F = -k\, t + \ln F_0 + k\, t_0$$

หรือ

$$\ln \frac{F}{F_0} = -k\, (t - t_0)$$

ทำการแก้สมการเอ็กโปแนนเชียลได้เป็น

$$F(t) = F_0\, e^{-k(t-t_0)} \tag{3.11}$$

โดยที่ $F(t)$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักไฟเบอร์ต่อน้ำหนักสด

k คือ ค่าคงที่ใดๆของอัตราการเปลี่ยนแปลงของไฟเบอร์ต่อน้ำหนักสด

F_0 คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักไฟเบอร์ต่อน้ำหนักสด ณ เวลาเริ่มต้น

t_0 คือ วันแรกที่เก็บข้อมูลหลังจากวันปลูก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงการเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองการสะสมน้ำตาลและการเจริญเติบโตของอ้อย ข้อมูลจากสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯเล่มที่ 5 ได้กล่าวว่าอ้อยที่เริ่มเข้าสู่ระยะแก่และสุก จะมีอัตราการเจริญเติบโตที่ลดลง แล้วจะมีการเริ่มกระบวนการสะสมน้ำตาล และกระบวนการทั้งสองไม่ได้เกิดขึ้นพร้อมกันเนื่องจากน้ำตาลที่อ้อยสร้างได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตเปลี่ยนไปเก็บไว้ที่ลำต้นเพื่อใช้ในการขยายพันธุ์ [9]

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสร้างแบบจำลองเพื่อพิจารณาการเจริญเติบโตของอ้อยและการเปลี่ยนแปลงของไฟเบอร์เพื่อยืนยันว่า อ้อยได้หยุดการเจริญเติบโตและเริ่มสะสมน้ำตาลซึ่งหมายถึงอ้อยได้เข้าสู่ระยะแก่และสุกแล้ว ซึ่งบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองของงานวิจัยทั้งหมด 2 แบบ ได้แก่

- แบบจำลองการเจริญเติบโตของอ้อย
- แบบจำลองการสะสมน้ำตาลในต้นของอ้อย

4.1. การเก็บข้อมูล

ข้อมูลเพื่อนำมาใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองการเจริญเติบโต และการสะสมของน้ำตาล ทำการเก็บจากไร่อ้อยในอำเภอบ้านบึง ชลบุรี โดยทำการเก็บข้อมูล จำนวนปล้อง ความยาวของปล้อง รัศมีของปล้อง น้ำหนักสดของแต่ละปล้อง ค่าความเข้มข้นของน้ำตาลในแต่ละปล้อง และไฟเบอร์ของแต่ละปล้อง ทั้งหมด 7 ครั้ง ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2553 ซึ่งเป็นเป็นช่วงระยะเวลาทั้งสิ้น 4 เดือน ครั้งละ 5 ต้น โดยอ้อยที่ปลูกในแปลงได้รับการปลูกและดูแลแบบที่เกษตรกรในประเทศไทยส่วนใหญ่ปฏิบัติ คือให้ปุ๋ยสูตร 15 – 15 – 15 ในช่วงที่อ้อยเริ่มงอก เพียงครั้งเดียวและไม่มีการให้น้ำเพิ่มเติมนอกฤดูฝน เนื่องจากสภาพความเปลี่ยนแปลงของอากาศในช่วงของการปลูกมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในด้านของปริมาณน้ำฝน จากข้อมูลพบว่าในช่วงการเก็บข้อมูลมีปริมาณน้ำฝนสะสมในแต่ละวันน้อยมากและสภาพความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ไม่สามารถเห็นความแตกต่างที่ส่งผลกับปริมาณน้ำตาลได้ชัดเจนแบบจำลองที่สร้างจึงพิจารณาจากเวลาเพียงปัจจัยเดียว

4.2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4.2.1. แบบจำลองการเจริญเติบโตของต้นอ้อย

จากข้อมูลความสูงของอ้อยในแปลงปลูก อ.บ้านบึง จ.ชลบุรี ซึ่งนำข้อมูลของความสูงเฉลี่ย(ตารางที่ 4.1) มาสร้างแบบจำลองการเจริญเติบโตของอ้อยซึ่งสร้างจากสมการเชิงอนุพันธ์ ณ เวลาใดๆ ดังนี้

ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อายุของต้นอ้อย (วัน)	ความสูงเฉลี่ยของต้นอ้อย (เซ็นติเมตร)
1	9/1/2553	191	293.475
2	16/1/2553	198	297.95
3	30/1/2553	212	301.26
4	13/2/2553	226	301.52

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลความสูงเฉลี่ยของต้นอ้อยจากแปลงปลูกซึ่งมีข้อมูลทั้งหมด 28 ต้น

จากสมการ (3.5)

$$G(t) = \frac{G_0\, G_{max}}{G_0 + (G_{max} - G_0)e^{-r\, G_{max}\,(t - t_0)}}$$

จากข้อมูลจะได้ G_0 = 293.475

G_{max} = 302

t_0 = 191

โดยที่ ค่า r หาได้จากสมการ (3.4)

$$\ln G(t) - \ln|G_{max} - G(t)| = rG_{max}t + c$$

ซึ่งจะได้ค่า r = 0.860967

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตัวแปรทั้งหมดที่ได้กล่าวมานำมาแทนค่าในสมการ (3.5) จึงได้แบบจำลองการเจริญเติบโตของอ้อยพันธุ์สุพรรณบุรี 60 จากระยะการเติบโตช่วงระยะย่างปล้องถึงระยะแก่และสุก เริ่มจากวันที่ 191 หลังจากการปลูกได้ดังนี้

$$G(t) = \frac{88629.5}{293.475 + 8.525e^{-0.0860967\,(t-191)}}$$

4.2.2. แบบจำลองการสะสมน้ำตาลของต้นอ้อย

จากข้อมูลความเข้มข้นของน้ำตาลในอ้อยจากแปลงปลูก อ.บ้านบึง จ.ชลบุรี ซึ่งนำข้อมูลของความเข้มข้นของน้ำตาลเฉลี่ย (ตารางที่ 4.2) มาสร้างแบบจำลองการสะสมน้ำตาลของอ้อยซึ่งสร้างจากสมการเชิงอนุพันธุ์ ณ เวลาใดๆ ดังนี้

ครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	อายุของต้นอ้อย (วัน)	ความเข้มข้นของน้ำตาลเฉลี่ยในต้นอ้อย (%brix)
1	9/1/2553	191	17.5416
2	16/1/2553	198	18.3492
3	30/1/2553	212	19.4642
4	27/2/2553	240	20.6938

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลความเข้มข้นของน้ำตาลเฉลี่ยในต้นอ้อยจากข้อมูลทั้งสิ้น 338 ข้อมูล

จากสมการ (3.7) เราจะได้แบบจำลองการสะสมของน้ำตาลได้ดังนี้

$$S(t) = \frac{S_{Max}S_0}{S_0 + (S_{Max} - S_0)e^{-rS_{Max}(t-t_0)}}$$

จากข้อมูลจะได้ $S_{Max} = 21$

S_0 = 17.5416

t_0 = 191

โดยที่ค่า r หาได้จากสมการ

$$\ln S(t) - \ln|S_{max} - S(t)| = rS_{max}t + c$$

ซึ่งจะได้ค่า r = 0.053127

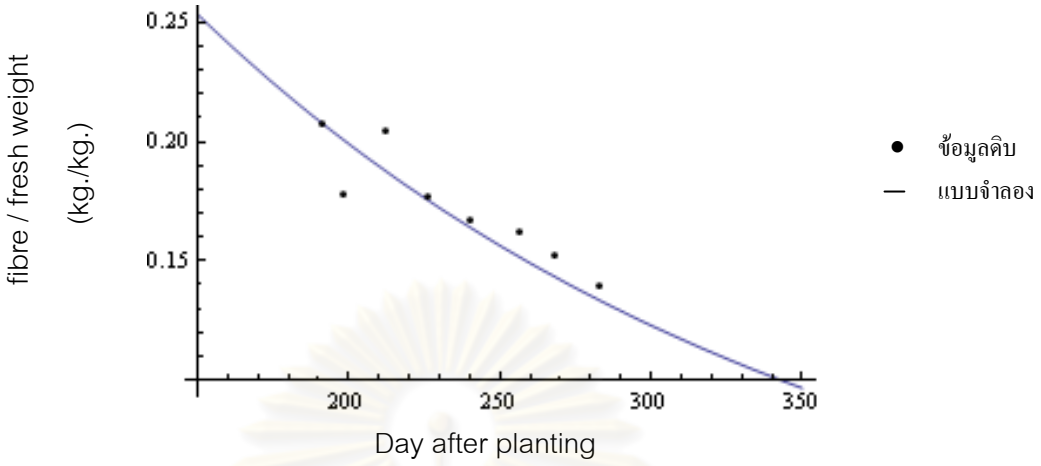
จากตัวแปรทั้งหมดที่ได้กล่าวมานำมาแทนค่าในสมการ (3.7) จึงได้แบบจำลองการสะสมน้ำตาลของอ้อยพันธุ์สุพรรณบุรี 60 จากระยะการเติบโตช่วงระยะย่างปล้องถึงระยะแก่และสุก เริ่มจากวันที่ 191 หลังจากการปลูกได้ดังนี้

$$S(t) = \frac{368.374}{17.5416 + 3.4584e^{-0.053127\,(-191+t)}}$$

4.3. การเปลี่ยนแปลงของไฟเบอร์

วันหลังปลูก(วัน)	น้ำหนักสด(กิโลกรัม)	ไฟเบอร์(กิโลกรัม)	สัดส่วนของไฟเบอร์ต่อน้ำหนักสด (กิโลกรัม)
191	12.207	2.538	0.2079
198	12.299	2.184	0.1775
212	14.356	2.939	0.2047
226	13.845	2.449	0.1768
240	12.843	2.152	0.1675
256	12.419	2.017	0.1624
268	11.881	1.811	0.1524
283	16.483	2.295	0.1392

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลของวันหลังการปลูก น้ำหนักสด และไฟเบอร์จากแปลงปลูก



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนของไฟเบอร์ต่อน้ำหนักสด

ข้อมูลของน้ำหนักรวมของไฟเบอร์ของต้นอ้อยที่เก็บได้ในช่วงของการเก็บข้อมูลนี้ตาม ตารางที่ 4.3 เมื่อวิเคราะห์ร่วมกันกับข้อมูลการเจริญเติบโต และการสะสมของน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำตาลที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสงถูกส่งไปสะสมที่ลำต้นเพิ่มมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนของไฟเบอร์ต่อน้ำหนักสด จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของไฟเบอร์มีอัตราการลดลง แสดงถึงการเจริญเติบโตของลำต้นเริ่มลดลง นั่นคือต้นอ้อยได้เข้าสู่ระยะแก่และสุก

4.4. **การวิเคราะห์สมการถดถอย** (Regression Analysis)

เทคนิคหนึ่งในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรเพื่อใช้สร้างแบบจำลอง คือ การวิเค - ราะห์สมการถดถอย ซึ่งใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป โดยดูจากตัวแปรอิสระ (independent variable: x) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อตัวแปรอื่น ซึ่งถูกเรียกว่าตัวแปรตาม (dependent variable : y) งานวิจัยนี้จะใช้ในรูปสมการเส้นตรงอย่างง่าย [11]

4.4.1. **การวิเคราะห์สมการถดถอยแบบเชิงเส้นอย่างง่าย** (Simple Linear Regress -ions)

เพื่อหาแนวโน้มของความสัมพันธ์จากข้อมูลดิบที่ได้ เราพิจารณาหาสมการเส้นตรงที่ดีที่สุดเพียงเส้นเดียวเพื่อประมาณค่าสมการโดยการคำนวณจากผลรวมของระยะห่างกำลังของ

ข้อมูลกับเส้นตรงที่ประมาณได้ ให้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเรียกวิธีการนี้ว่า วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Method of Least Squares) โดยพิจารณาความสัมพันธ์จากค่าสถิติ 2 ตัว ดังนี้

4.1.1.1. **ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์** (Correlation Coefficient) เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของข้อมูลว่าเป็นไปในทิศทางใด โดยค่าที่ได้จะอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 ซึ่งวิเคราะห์ได้ดังนี้ ค่าบวก หมายถึงตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ค่าลบ หมายถึงตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม ค่าเข้าใกล้ค่า 1 หมายถึงมีความสัมพันธ์กันมาก โดยทำการคำนวณจาก

$$r_{xy} = \frac{N\sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{N(\sum X^2) - (\sum X)^2}\ \sqrt{N(\sum Y^2) - (\sum Y)^2}}$$

โดยที่ r_{xy} คือ ค่าสัมประสิทธ์สหสัมพัทธ์ระหว่างตัวแปร x และ y

$\boldsymbol{X}$ คือ ตัวแปรอิสระจากข้อมูลดิบ

$\boldsymbol{Y}$ คือ ตัวแปรตามจากข้อมูลดิบ

4.1.1.2. **ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ** (The Coefficient of Determination) หาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพัทธ์ยกกำลังสอง ใช้เพื่อดูความเหมาะสมที่จะนำไปใช้หรือไม่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ดีควรมีค่าเข้าใกล้ 1

การวิเคราะห์หาสมการถดถอยอย่างง่ายหาได้จากสมการ

$$\overline{\mathrm{Y}} = a + b\overline{\mathrm{X}}$$

และ

$$\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \mathrm{X}_i \mathrm{Y}_\mathrm{i} = a\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \mathrm{X}_\mathrm{i} + b\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \mathrm{X}_\mathrm{i}{}^2$$

หรือ

$$b = r_{xy}\frac{S_y}{S_x}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ a และ b เป็นค่าคงที่จากข้อมูล

r_{xy} คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

S_x และ S_y คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตราฐานของ x และ y ตามลำดับ

4.2. การหาค่าความคลาดเคลื่อนและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าเปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย (*MPRE*) คำนวณจาก

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (4.9)$$

$$MPRE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right| \times 100 \quad (4.10)$$

โดยที่ y_i คือ ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล

$\hat{y}_i$ คือ ค่าประมาณจากแบบจำลอง

$\bar{y}_i$ คือ ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการเก็บข้อมูล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการวิจัย สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยที่จะกล่าวถึงนี้ประกอบด้วยแบบจำลองการเจริญเติบโตของต้นอ้อย (Growth Model) ฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงของไฟเบอร์ (Ratio of Fibre) และแบบจำลองการสะสมน้ำตาลในต้นอ้อย (Sugar content in Sugarcane Model) แบบจำลองที่ได้ทั้งหมดนี้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้วิเคราะห์อ้อยพันธุ์สุพรรณบุรี 60 และสามารถนำแบบจำลองนี้ไปใช้กับอ้อยพันธุ์อื่นๆได้ โดยแบบจำลองทั้งหมดที่กล่าวมานี้จะนำมาทดสอบกับข้อมูลจริงจากแปลงปลูก สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะเพื่อนำไปปรับปรุงในโอกาสต่อไป

5.1. ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองกับข้อมูล

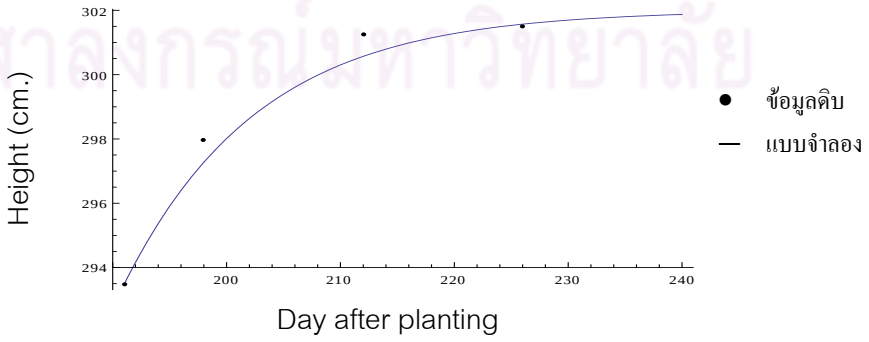
การเปรียบเทียบแบบจำลองประกอบด้วย 2 ส่วนคือ 1. การเปรียบเทียบแบบจำลองการเจริญเติบโตของอ้อยกับข้อมูลความสูงเฉลี่ยของอ้อย 2. การเปรียบเทียบแบบจำลองการสะสมน้ำตาลในอ้อยกับข้อมูลความเข้มข้นของน้ำตาลในอ้อย

5.1.1. แบบจำลองการเจริญเติบโตของอ้อยและค่าความคลาดเคลื่อน

จากแบบจำลองการเจริญเติบโต

$$G(t) = \frac{88629.5}{293.475 + 8.525e^{-0.0860967\,(t-191)}}$$

ซึ่งเมื่อนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลจริงได้ก็ได้ดังกราฟดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงแบบจำลองอัตราการเจริญเติบโตของต้นอ้อยกับข้อมูลดิบเฉลี่ย

วันหลังปลูก (วัน)	ความสูงเฉลี่ยจากข้อมูล (เซ็นติเมตร)	ความสูงจากแบบจำลอง (เซ็นติเมตร)	ค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของความสูง (%)
191	293.475	293.4751	0
198	297.95	297.2736	0.2269
212	301.26	300.5684	0.2295
226	301.52	301.5698	0.0165

ตาราง 5.1 ตารางแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของความสูง

วันหลังการปลูก /ต้น (วัน)	**ความสูงของต้นอ้อย** (เซ็นติเมตร)	**ความสูงจากแบบจำลอง** (เซ็นติเมตร)	ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของความสูง (%)
191	321.3	293.4751	8.66
191	288.3	293.4751	1.7950
191	274.3	293.4751	6.9905
191	290	293.4751	1.1983
198	290.7	297.2736	2.26
198	294.4	297.2736	0.0097
198	299.4	297.2736	0.0071
198	307.3	297.2736	0.0326
212	309.5	300.5684	0.0288
212	296	300.5684	0.0154
212	304	300.5684	0.0112
212	304.2	300.5684	0.0119
212	292.6	300.5684	0.0272
226	296.9	301.5698	0.0157
226	303.1	301.5698	0.0050
226	306.7	301.5698	0.0167
226	303.9	301.5698	0.0076
226	297	301.5698	0.0153

ตาราง 5.2 ตารางแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของความสูงจากข้อมูลความสูงทั้งหมด

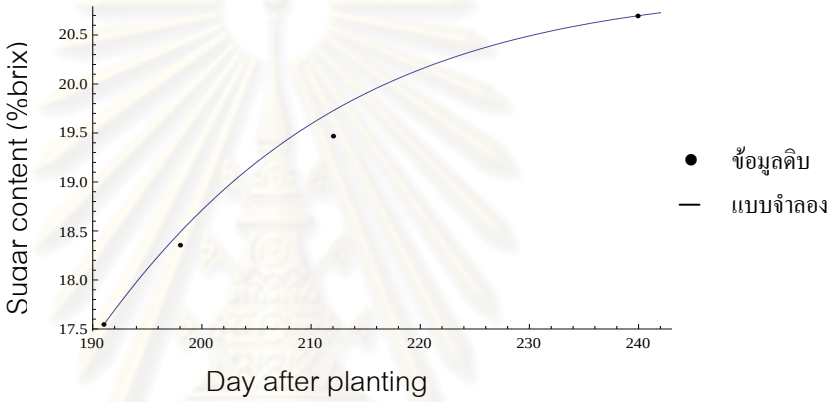
ซึ่งผลการทดลองข้อมูลจริงกับแบบจำลองที่ได้มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของความสูงประมาณ 2.3 % และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่ 0.9987

5.1.2. แบบจำลองการสะสมน้ำตาลในอ้อยและค่าคลาดเคลื่อน

จากแบบจำลองการสะสมน้ำตาลของอ้อย

$$S(t) = \frac{368.374}{17.5416 + 3.4584e^{-0.053127\,(-191+t)}}$$

ซึ่งเมื่อนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลจริง จะได้กราฟดังแสดง



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงแบบจำลองการสะสมน้ำตาลกับข้อมูลความเข้มข้นของน้ำตาลเฉลี่ย

วันหลังการปลูก (วัน)	ค่าความเข้มข้นของน้ำตาลเฉลี่ยจากข้อมูล (%brix)	ค่าความเข้มข้นของน้ำตาลเฉลี่ยจากแบบจำลอง (%brix)	ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของความเข้มข้นน้ำตาล (%)
191	17.5416	17.5416	0
198	18.3492	18.4872	0.7518
212	19.4642	19.7256	1.343
240	20.6938	20.6979	0.0194

ตารางที่ 5.3 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของความเข้มข้นของน้ำตาลเฉลี่ย

วันหลังปลูก(วัน)	191	198	212	240
ปล้องที่(ปล้อง)	ค่าความเข้มข้นของน้ำตาลในแต่ละปล้องเฉลี่ย(%brix)			
2	19.0067	20.48	20.724	22.464
3	18.71	19.93	20.596	22.132
4	18.165	18.81	20.52	21.724
5	18.076	19.41	20.484	20.584
6	18.1	19.4667	20.384	20.88
7	17.96	19.165	20.388	20.224
8	17.852	18.225	20.072	20.128
9	17.652	18.87	19.984	20.528
10	17.736	17.74	19.716	20.516
11	17.664	17.645	19.46	20.548
12	17.4	18.13	19.1	20.384
13	17.412	18.2533	18.896	20.348
14	17.168	18.03	18.664	20.328
15	16.992	17.855	18.352	20.372
16	16.396	17.725	18.4	20.376
17	16.456	17.535	18.316	20.416
18	16.1664	17.195	18.64	20.508
19	17.4733	17.52	18.736	20.428
20	16.905	16.65	18.388	20.296

ตาราง 5.4. ข้อมูลอายุและความเข้มข้นของน้ำตาลในอ้อยเฉลี่ยจากข้อมูลทั้งสิ้น 342 ข้อมูล

ผลจากการทดสอบแบบจำลองการสะสมน้ำตาลในอ้อยกับข้อมูลจากแปลงปลูกพบว่าแบบจำลองมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย (*MPRE*) ที่ประมาณ 5.3 % จากการทดสอบกับข้อมูลความเข้มข้นในแต่ละปล้องของอ้อยทุกต้น 3.61 % จากการทดสอบกับข้อมูลความเข้มข้นของแต่ละปล้องสำหรับข้อมูลเฉลี่ยแต่ละครั้งที่เก็บข้อมูล (ตาราง 5.2) และ 0.5286% สำหรับค่าความเข้นข้นเฉลี่ยในแต่ละครั้งที่เก็บข้อมูล (ตารางที่ 5.3) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เป็น 0.9684

5.2. สรุปผลการวิจัย

การเจริญเติบโตของต้นอ้อยที่เพิ่มขึ้นทำให้มีการสะสมน้ำตาลเพิ่มขึ้น จากระยะย่างปล้องถึงระยะแก่และสุก และในช่วงปลายของระยะแก่และสุก น้ำตาลในต้นอ้อยถูกนำไปใช้ในการขยายพันธุ์จะทำให้น้ำตาลในต้นลดลง แบบจำลองการเจริญเติบโตของต้นอ้อยกับข้อมูลจากไร่อ้อยในแปลงปลูกที่ อำเภอบ้านบึง จังหวัดชลบุรี พบว่าแบบจำลองการเจริญเติบโตมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์ที่ประมาณ 3 % และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ 0.998 ซึ่งสามารถในการทำนายความสูงของต้นอ้อยได้ค่อนข้างแม่นยำ และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการสะสมของน้ำตาลในแต่ละปล้องของอ้อยทุกต้น มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์ประมาณ 5 % และเมื่อพิจารณาการสะสมของน้ำตาลทั้งต้น แบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 0.5 % และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ 0.973 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถประมาณค่าความเข้มข้นของน้ำตาลในต้นอ้อยได้ดีมากสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนการปลูกอ้อยและประกอบการตัดสินใจในการตัดอ้อยเข้าสู่โรงงาน เพื่อให้ได้ราคาที่สูงและปริมาณผลผลิตน้ำตาลของโรงงานที่มากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถนำแบบจำลองไปปรับใช้กับอ้อยพันธุ์อื่นที่ปลูกในประเทศไทยได้โดยใช้ข้อมูลจากการปลูกในแต่ละสถานที่

5.3. ข้อเสนอแนะ

เพื่อที่จะปรับปรุงตัวแบบการสะสมน้ำตาลของอ้อยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น จำเป็นต้องมีการพิจารณาปัจจัยแวดล้อมเช่น น้ำ ความเข้มแสง อุณหภูมิ ธาตุอาหารในดิน ความชื้นในดิน ค่า P.H. ในดิน ปริมาณสารอินทรีย์ในดิน และการจัดการของเกษตรกรเป็นตัวแปร ซึ่งจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อผลผลิตของอ้อย ซึ่งผลผลิตอ้อยโดยเฉลี่ยของประเทศไทยอยู่ที่ 8–12 ตันต่อไร่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ ปริมาณธาตุอาหารในดิน และอื่นๆ

ในส่วนของการจัดการไร่และการเพาะปลูกอ้อยในปัจจุบันของประเทศไทย เกษตรกรมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการบริหารและจัดการน้ำ เพราะในไร่อ้อยส่วนมากใช้น้ำฝนเป็นหลักซึ่งปริมาณฝนในปัจจุบันมีความแปรปรวน ตกไม่ตรงฤดูกาล เป็นเหตุให้เมื่อถึงระยะเวลาในการเจริญเติบโตของอ้อยไม่สามารถเจริญเติบโตได้เต็มที่ อีกทั้งการเตรียมดินก่อนการปลูกเกษตรกรไม่มีการตรวจสอบธาตุอาหารในดินก่อนเพาะปลูกและเน้นใช้ปุ๋ยเคมีซึ่งส่งผลกระทบต่อดินและสิ่งมีชีวิตในระยะยาว ทำให้ผลผลิตตกต่ำ และสูญเสียเงินเป็นจำนวนมาก เกษตรกรควรเปลี่ยนมาใช้ปุ๋ยอินทรีย์ซึ่งสามารถผลิตได้เองซึ่งมีต้นทุนต่ำ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มธาตุอาหารโดยสิ่งมีชีวิตในดินในระยะยาว

รายการอ้างอิง

[1] L.M. McDonald, S.N. Lisson. The effect of planting and harvest time on sugarcane productivity. Proceedings of the 10th Australian Agronomy Conference (ACC2001) 2001 :

[2] Inman-Bamber, N.G, Muchow, R.C. and Robertson, M.J. Dry matter portioning of sugarcane in Australia and Africa. Field Crops Research 76(March 2002):339-350.

[3] D.L. Liu, T.A. Bull. Simulation of biomass and sugar accumulation in sugarcane using a process-based model. Ecological Modeling 144 (2001): 181-211.

[4] D.L. Liu, K.R. Helyar. Simulation of seasonal stalk water content and fresh weight yield of sugarcane. Field Crops Research 82(2003) : 59-73.

[5] กุมุท สังขศิลา. แบบจำลองเพื่อหาตารางการตัดอ้อยของชาวไร่เพื่อเข้าหีบโรงงานน้ำตาล. วิทยาสารกำแพงแสน., 2548(ปีที่ 3 ฉบับที่ 2.), 28-47.

[6] ภิญโญ ยลธรรม์ธรรม, ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการเจริญเติบโตของอ้อย. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, ภาควิชาคณิตศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

[7] พูนพิภพ เกษมทรัพย์. ชีววิทยา 2. พิมพ์ครั้งที่ 2 . โครงการตำราวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์มูลนิธิ สอวน. มูลนิธิ สอวน. กรุงเทพฯ : 2551

[8] Graham Kent, Sabin-Reed Hall. Cell Biology Biology Laboratory. Available from: http://www.science.smith.edu/departments/Biology/Bio231/ltrxn.html, Smith College Massachusetts: Graham Kent, Sabin-Reed Hall, 2004

[9] โครงการสารานุกรมไทยฯ, สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนเล่มที่ 5. http://kanchanapisek.or.th/kp6/New/sub/book/book.php?book=5&chap=3&page=t5-3-infodetail05.html, เกษม สุขสถาน.

[10] ดนัย บุณยเกียรติ, การสังเคราะห์แสง http://web.agri.cmu.ac.th/hort/course/359311/PPHY4_photosyn.htm, ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ : ดนัย บุณยเกียรติ

[11] อรุณ แก้วมั่น, ระเบียบวิธีการทางสถิติ1 http://cyberclass.msu.ac.th/cyberclass/cyberclass-uploads/libs/html/40843/unit7_7.htm, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม : ศูนย์พัฒนาทรัพยากรการศึกษา

[12] คณาจารย์ ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. พฤกษศาสตร์เศรษฐกิจ. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2541

[13] F.R. Giordano, M.D. Weir, W.P. Fox, A First Course in Mathematical Modeling. United States of America : Thomson Brooks/Cole,

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

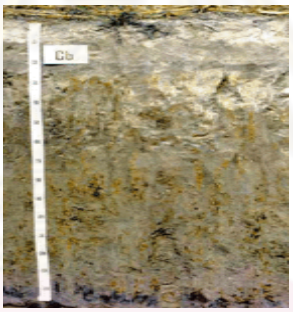
ภาคผนวก

ภาคผนวกนี้แสดงถึงข้อมูลของอ้อยที่ได้จากการเก็บข้อมูลทั้งหมด ชุดดินชลบุรี

คุณสมบัติของชุดดินชลบุรี

ลักษณะและสมบัติดิน เป็นดินร่วนละเอียดลึกมาก มีการซึมผ่านได้ของน้ำได้ปานกลาง การระบายน้ำต่ำ ดินบนมีเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทรายหรือดินร่วนเหนียวปนทราย มีสีน้ำตาลปนเทา ปฏิกิริยาดินเป็นกรดเล็กน้อยถึงเป็นด่างปานกลาง (pH 6.5-8.0) ดินล่างมีเนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย มีสีเทา สีเทาปนน้ำตาลหรือสีเทาปนชมพู และดินชั้นล่างถัดไป อาจมีเนื้อดินเป็นดินเหนียวปนทราย ปฏิกิริยาดินเป็นกลางถึงเป็นด่างจัด (pH 7.0-8.5)

ข้อจำกัดการใช้ประโยชน์ที่ดิน ความอุดมสมบูรณ์ต่ำ เนื้อดินเป็นดินปนทรายและขาดแคลนน้ำ



ภาพแสดงลักษณะของชุดดินชลบุรี

กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช (photosynthesis)

กระบวนการสังเคราะห์แสงเป็นกระบวนการเดียวที่สิ่งมีชีวิตสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเพื่อไปใช้ประโบชน์ได้ ซึ่งกระบวนการนี้เกิดขึ้นในพืชที่มีสารสี (pigment) สีเขียว ซึ่งถูกเรียกว่า คลอโรฟิลล์ (chlorophylls) ทำหน้าที่สังเคราะห์แสงโดยมี คลอโรฟิลล์ เอ เป็นตัวหลักในการสังเคราะห์แสง ซึ่งกระบวนการสั่งเคราะห์แสงของพืชใช้น้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาใชในกระบวนการสังเคราะห์แสงด้วย[7,8,10]

กระบวนสำคัญของการสังเคราะห์แสงของพืช

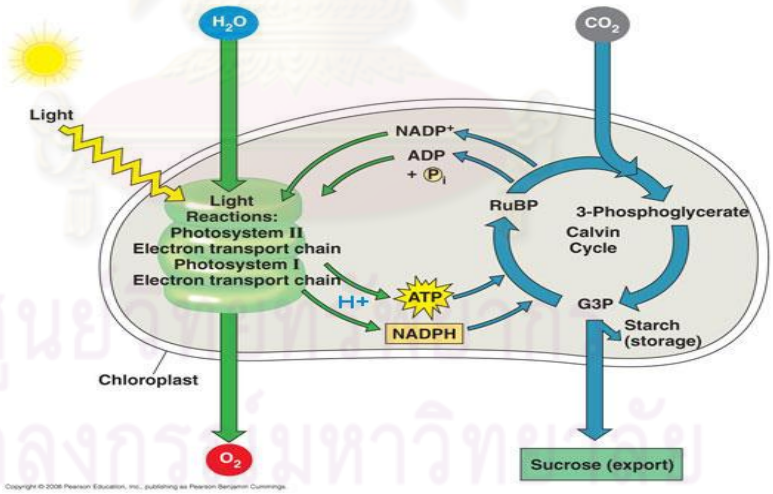
กระบวนการสำคัญของการสังเคราะห์แสงของพืชประกอบด้วย 2 กระบวนการหลักคือ ปฏิกริยาแสง (light reactions) และปฏิกริยาคาร์บอน (carbon reactions)

ปฏิกริยาแสง เป็นกระบวนการสร้าง NADPH และ ATP จากการแตกตัวของน้ำหลังจากได้รับพลังงานแสง และอิเลคตรอนที่ได้ไปรวมตัวกับ $NADP^+$ ซึ่งผลผลิตที่ได้คือ ออกซิเจน (O_2) โปรตอน (protons) และ อิเลคตรอน (electrons) จากนั้นโปรตอนจะเคลื่อนที่มาทำปฏิกริยากับ ADP และ กลุ่มของฟอสเฟต (P)

ปฏิกริยาคาร์บอน เป็นกระบวนการรีดิวส์ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ให้เป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรต โดยการนำ NADPH และ ATP มาใช้โดยรีดิวส์ PGA ให้เป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรต ซึ่งถูกเก็บไว้ภายในเซลล์ซึ่งอยู่ในรูปของแป้ง

กระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้

$$6CO_2 + 12H_2O \xrightarrow[\text{Chlorophyll}]{\text{Light}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O$$



ภาพแสดงกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช

ตารางความเข้มข้นของน้ำตาลจากแปลงปลูก

	9-Jan	16-Jan	30-Jan	13-Feb	27-Feb	15-Mar	27-Mar	11-Apr
ปล้องที่	ค่าความเข้มข้นของน้ำตาลในต้นเฉลี่ย(%brix)							
2	19.00667	20.48	20.724	20.22	22.464	21.205	20.4832	18.676
3	18.71	19.93	20.596	20.028	22.132	20.944	20.12	17.684
4	18.165	18.81	20.52	19.98	21.724	20.564	19.668	17.16
5	18.076	19.41	20.484	19.916	20.584	20.436	19.276	16.704
6	18.1	19.46667	20.384	19.78	20.88	20.452	19.072	16.62
7	17.96	19.165	20.388	19.6	20.224	20.4	18.952	16.832
8	17.852	18.225	20.072	18.936	20.128	20.316	18.984	16.932
9	17.652	18.87	19.984	18.696	20.528	20.2	19.092	16.84
10	17.736	17.74	19.716	18.82	20.516	20.072	19.188	16.596
11	17.664	17.645	19.46	18.556	20.548	20.084	19.356	16.604
12	17.4	18.13	19.1	18.36	20.384	19.792	19.392	16.66
13	17.412	18.25333	18.896	18.16	20.348	20.096	19.604	16.596
14	17.168	18.03	18.664	18.048	20.328	20.148	19.744	16.58
15	16.992	17.855	18.352	17.948	20.372	20.124	19.956	16.468
16	16.396	17.725	18.4	17.892	20.376	20.124	19.956	16.5
17	16.456	17.535	18.316	17.848	20.416	20.04	20.52	16.58
18	16.1664	17.195	18.64	17.988	20.508	20.056	19.548	16.5
19	17.47333	17.52	18.736	17.748	20.428	19.884	19.708	16.572
20	16.905	16.65	18.388	17.716	20.296	20.144	19.628	16.56
21	16.685	15.935	18.184	17.384	20.072	19.832	19.752	16.312
22	16.64	14.97	17.548	17.236	19.84	19.428	19.376	16.14
23	16.21	14.325	16.912	16.424	19.508	18.664	19.4	16.088
24	15.16	16.13	17.14	16.77	18.756	17.92	19.088	15.868
25	13.955	14.96	16.335	15.855	17.512	17.28	18.304	15.396
26	12.835	14.22	15.68	14.905	18.635	16.32	17.36	14.72
27	11.515	12.74	14.4	14.74	18.74	17.26	16.104	13.784
28	9.91	10.9	15.32	14.22	19	17	15.23	12.844
29	9.25		13.82		17.7	15.72	15.1	11.82
30					16.4	15.44	12.92	11.36

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย กฤษฎิ์ บัวเผื่อน เกิดวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2527 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปี พ.ศ. 2548 และได้เข้ารับการศึกษาต่อระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิทยาการคณนา ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี พ.ศ. 2551

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย