

การศึกษาประสิทธิภาพในการย่อยของ *Bacillus siamensis* ในการย่อยสลายเซลลูโลสจากใบอ้อย
เพื่อลดปริมาณ PM 2.5 ที่เป็นมลพิษจากการเผาอ้อยและการปรับสภาพดินในการส่งเสริมการ
เจริญเติบโตของพืช

Studying the efficiency of *Bacillus siamensis* in cellulose degradation from
sugarcane leaves for PM2.5 reduction and soil amendment to promote plant
growth

ชื่อผู้จัดทำบทความ นายจิรายุ คักดีอรุณชัย นายธีระวุฒิ สมทบ¹
พรพรรณ โฉมวงษ์ และ สิริณภา ช่วงโอภาส²

¹ โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬารามราชวิทยาลัย สุพรรณบุรี , ตำบลทุ่งคอก, อำเภอสองพี่น้อง, จังหวัดสุพรรณบุรี 72110, ประเทศไทย
² ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม
73140 ประเทศไทย

*อีเมลล์: treerawutsomtob@gmail.com

บทคัดย่อ

หมอกควันอันเกิดขึ้นจากฝุ่น PM2.5 ซึ่งมีผลกระทบต่อให้เกิดฝนกรดและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อนส่งผลให้มนุษย์มีความเสี่ยงต่อโรคหัวใจและปอด อันเนื่องมาจากการเผาอ้อยเพราะจากกระบวนการเผาอ้อยปล่อยสารพิษและอนุภาคขนาดเล็กที่อันตรายออกสู่สิ่งแวดล้อม เช่น PM2.5, สารพิษและก๊าซอันตราย หรือแม้แต่วัตถุที่ย่อมได้รับผลกระทบจากเรื่องนี้ซึ่งส่วนมากฝุ่น PM2.5 ได้มีสาเหตุมาจากการกระทำของมนุษย์ ซึ่งการใช้ *B. siamensis* เหมาะสมต่อการย่อยสลายเซลลูโลสในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ใบอ้อย ฟางข้าว และกากพืช เพราะสามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสและมีความทนทานสูง โดยโครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาประสิทธิภาพในการย่อยเซลลูโลสของใบอ้อยด้วย *B. siamensis* เพื่อลดปริมาณฝุ่น PM2.5 ที่เป็นมลพิษจากการเผาอ้อยโดยมีการตรวจสอบการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยเซลลูโลสของ *B. siamensis* ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีแหล่งคาร์บอนต่างกันและศึกษาสมบัติดินหลังจากที่มีการย่อยสลายใบอ้อยและศึกษาผลของการใช้ *B. siamensis* ส่งเสริมการเจริญเติบโตของอ้อยที่อายุ 4 และ 6 เดือน

คำสำคัญ: *Bacillus*; Cellulose; decomposition; Sugarcane leaves บาซิลลัส; เซลลูโลส; การย่อยสลาย; ใบอ้อย

บทนำ

มลพิษทางอากาศจากฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM 2.5) เป็นวิกฤตการณ์ด้านสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุขที่สำคัญระดับโลก อนุภาคเหล่านี้สามารถผ่านเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนลึกและกระแสเลือดก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อโรคหลอดเลือดหัวใจและมะเร็งปอด แหล่งกำเนิดที่สำคัญของ PM 2.5 ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ รวมถึงประเทศไทย คือการเผาชีวมวลในที่โล่ง (Open biomass burning) โดยเฉพาะการเผาใบอ้อยเพื่อความสะดวกในการเก็บเกี่ยว ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกอ้อยมากกว่า 12 ล้านไร่ ก่อให้เกิดใบอ้อยเหลือทิ้งประมาณ 18 ล้านตันต่อปี แม้จะมีมาตรการรณรงค์ให้ตัดอ้อยสด แต่เกษตรกรจำนวนมากยังคงใช้วิธีการเผาเนื่องจากข้อจำกัดด้านต้นทุนเครื่องจักรและปัญหาการขาดแคลนแรงงาน

ใบอ้อยมีองค์ประกอบหลักคือ ลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) ซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) 40-50%, เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) 25-30% และลิกนิน (Lignin) 15-20% โครงสร้างที่ซับซ้อนและแข็งแรงนี้ทำให้ใบอ้อยย่อยสลายตามธรรมชาติได้ช้า การพัฒนากระบวนการทางชีวภาพ (Biological process) อย่างง่ายโดยใช้จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์จำเพาะเพื่อเร่งการย่อยสลาย จึงเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนและปลอดภัยกว่าการใช้สารเคมีหรือการเผา

Bacillus siamensis เป็นแบคทีเรียแกรมบวก (Gram-positive) ที่พบได้ทั่วไปในดินและสภาพแวดล้อมทางการเกษตร จุดเด่นที่สำคัญคือความสามารถในการสร้างเอนโดสปอร์ (Endospore) ซึ่งทนทานต่อความร้อน ความแห้งแล้ง และรังสี UV ทำให้เชื้อสามารถอยู่รอดในสภาพแวดล้อมจริงของแปลงเกษตรได้ดี นอกจากนี้ *B.*

siamensis ยังมีกลไกในการผลิตกลุ่มเอนไซม์เซลลูเลส (Cellulase complex) ซึ่งประกอบด้วย Endoglucanase, Exoglucanase และ β -glucosidase ที่ทำงานร่วมกันเพื่อตัดสายโพลิเมอร์ของเซลลูโลสให้กลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Glucose) ซึ่งพืชและจุลินทรีย์ในดินสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานได้

โครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาประสิทธิภาพของ *B. siamensis* ในการย่อยสลายเซลลูโลสจากใบอ้อย ภายใต้สภาวะที่มีแหล่งคาร์บอนต่างกัน และวิเคราะห์ผลกระทบจากการนำกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพนี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มอินทรีย์วัตถุและปรับปรุงสมบัติของดิน ซึ่งจะช่วยตอบโจทย์ทั้งการลดปัญหาหมอกควัน PM 2.5 และการยกระดับคุณภาพดินเพื่อการเกษตรแบบหมุนเวียน

วิธีการดำเนินงาน

การดำเนินการวิจัยเชิงทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพของแบคทีเรีย *Bacillus siamensis* ในการย่อยสลายใบอ้อย เริ่มต้นจากการเตรียมซบสเตรตโดยนำใบอ้อยที่ปราศจากเชื้อรามาทำความสะอาด อบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ ตัดให้ได้ขนาดสม่ำเสมอ 1x1 เซนติเมตรเพื่อควบคุมพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา และบันทึกน้ำหนักเริ่มต้น ควบคู่ไปกับกระบวนการเพิ่มจำนวนเชื้อ *B. siamensis* ในอาหารเหลว Nutrient Broth (NB) ภายใต้สภาวะเขย่า 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง พร้อมทั้งปรับมาตรฐานความหนาแน่นเซลล์เริ่มต้นให้เท่ากันในทุกชุดการทดลองผ่านการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร (OD600) จากนั้นนำเอนไซม์หยาบที่ได้ไปทดสอบกิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลส โดยให้ทำปฏิกิริยากับ Carboxymethyl cellulose (CMC) เป็นเวลา 30 นาที และวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นด้วยสาร DNS ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตรเพื่อเทียบกับกราฟมาตรฐานกลูโคส พร้อมทั้งวัดปริมาณโปรตีนรวมด้วยวิธี Bradford assay ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตรเทียบกับกราฟมาตรฐาน BSA เพื่อนำข้อมูลมาคำนวณหากิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์ (Specific enzyme activity) ท้ายสุดคือการทดสอบการย่อยสลายในระดับภาชนะควบคุมความชื้น โดยเติมสารแขวนลอยหัวเชื้อลงบนใบอ้อยเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่เติมเฉพาะอาหารเหลวปลอดเชื้อ และดำเนินการสุ่มเก็บตัวอย่างในวันที่ 0, 7, 14 และ 21 เพื่อนำใบอ้อยกลับไปอบแห้งและชั่งน้ำหนักปลายทาง สำหรับนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์

การสูญเสียน้ำหนัก ซึ่งจะใช้เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพการย่อยสลายมวลชีวภาพของแบคทีเรียได้อย่างเป็นรูปธรรม

ผลและอภิปรายผล

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของแบคทีเรีย *Bacillus siamensis* ในการย่อยสลายเซลลูโลสจากใบอ้อย ซึ่งแบ่งการประเมินออกเป็นการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสภายใต้แหล่งคาร์บอนที่ต่างกันและการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติดินหลังการย่อยสลาย พบว่าเมื่อนำเชื้อไปเพาะเลี้ยงและวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี DNS เพื่อคำนวณหาค่ากิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์ (Specific enzyme activity) แหล่งคาร์บอนแต่ละชนิดส่งผลต่อความสามารถในการผลิตเอนไซม์อย่างมีนัยสำคัญ โดยใบอ้อยบดสามารถเหนี่ยวนำการสร้างเอนไซม์เซลลูเลสได้ดีที่สุด ให้ค่ากิจกรรมเอนไซม์สูงสุดที่ 0.8976 U/mg protein รองลงมาคือ ช้างข้าวโพด (0.8847 U/mg protein), รำข้าว (0.6422 U/mg protein) และ CMC (0.6138 U/mg protein) ตามลำดับ ซึ่งตัวเลขดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงกลไกการปรับตัวของ *B. siamensis* ต่อวัสดุกลุ่มลิกโนเซลลูโลสที่มีโครงสร้างซับซ้อน และยืนยันถึงศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้กำจัดวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทใบอ้อยได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ตารางที่ 1 กิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสของ *B. siamensis* ภายใต้แหล่งคาร์บอนต่างชนิด

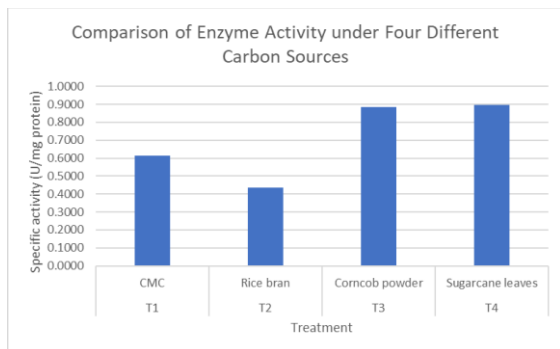
Treatment	Protein content (mg protein)	Glucose concentration (μ mol/mL)	Specific activity (U/mg protein)	statistics
T1(CMC)	4.313	13.240	0.6138	p < 0.01
T2(Rice bran)	28.9375	62.820	0.6422	p < 0.01
T3(Corn cob powder)	5.5625	24.610	0.8847	p < 0.01
T4(Sugarcane leaves)	10.1875	45.720	0.8976	p < 0.01

T1 = อาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้ Carboxymethyl cellulose (CMC) เป็นแหล่งคาร์บอน (ชุดควบคุม)

T2 = อาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้รำข้าวเป็นแหล่งคาร์บอน

T3 = อาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้ช้างข้าวโพดบดเป็นแหล่งคาร์บอน

T4 = อาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้ใบอ้อยเป็นแหล่งคาร์บอน

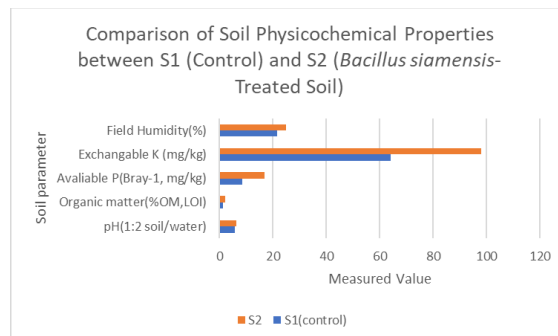


รูปที่ 1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่ากิจกรรมเอนไซม์ภายใต้แหล่งคาร์บอนที่แตกต่างกัน 4 ชนิด จากการประเมินผลของการใส่เชื้อ *B. siamensis* ต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน พบว่ากระบวนการย่อยสลายใบอ้อยช่วยปรับปรุงให้ค่า pH ของดินหลังการทดลองอยู่ในช่วง 6.5–7.0 ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการเพาะปลูก ควบคู่ไปกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณอินทรีย์วัตถุเมื่อเทียบกับก่อนเริ่มทดลอง และยังส่งผลให้ระดับธาตุอาหารหลัก (N-P-K) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นกว่ากลุ่มควบคุมอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งผลลัพธ์เชิงประจักษ์เหล่านี้เป็นการยืนยันว่า *B. siamensis* สามารถเร่งอัตราการย่อยสลายใบอ้อยให้กลายเป็นอินทรีย์วัตถุที่ช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้เกิดขึ้นได้จริง อันเป็นแนวทางทางชีวภาพที่ช่วยลดความจำเป็นของเกษตรกรในการเผาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และนำไปสู่การลดปัญหาการปลดปล่อยมลพิษฝุ่น PM2.5 สู่สิ่งแวดล้อมได้อย่างเป็นรูปธรรม

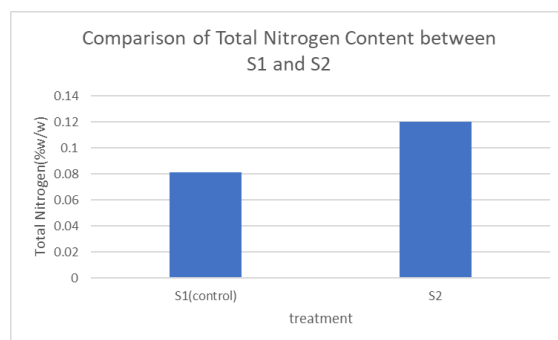
ตารางที่ 2 กิจกรรมเอนไซม์เซลล์ลีสของ *B. siamensis* ภายใต้แหล่งคาร์บอนต่างชนิด

Soil parameters	S1	S2	statistics
pH(1:2 soil/water)	5.90 ± 0.05	6.45 ± 0.04	P<0.001
Organic Matter (%OM, LOI)	1.30 ± 0.08	2.20 ± 0.10	P<0.001
Total N (% w/w)	0.081 ± 0.005	0.120 ± 0.007	P=0.002
Available P (Bray-1, mg/kg)	8.5 ± 0.8	17 ± 0.9	P<0.001
Exchangeable K (mg/kg)	64 ± 5	98 ± 7	P<0.001
Field Humidity (%)	21.5 ± 1.2	24.9 ± 1.5	P=0.003

ชุดควบคุม (Control) ที่ไม่มีการเติม *B. siamensis*
S2 = ชุดทดลอง (Treatment) ที่มีการเติม *B. siamensis*
ลงในดิน



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินระหว่างชุดควบคุม (S1) และดินที่เติมเชื้อ *B. siamensis* (S2)



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนรวม (% โดยน้ำหนัก) ของดินระหว่างชุดควบคุมที่ไม่ใส่ *B. siamensis* (S1) และชุดทดลองที่ใส่ *B. siamensis* (S2)

จากการศึกษาพบว่า *Bacillus siamensis* มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์เซลล์ลีสได้แตกต่างกันตามชนิดของแหล่งอาหาร โดยโครงสร้างตามธรรมชาติของใบอ้อยซึ่งมีความซับซ้อนสูง (ประกอบด้วยเส้นใย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) จะทำหน้าที่เป็นตัวเหนียวน้ำชั้นดีที่กระตุ้นให้จุลินทรีย์ต้องปรับตัวและผลิตเอนไซม์ออกมาในปริมาณที่สูงมากเพื่อย่อยสลายโครงสร้างที่แข็งแรงเหล่านั้น ซึ่งแตกต่างจากสารตัดแปรรูปอย่าง CMC ที่ละลายน้ำและเข้าถึงได้ง่าย จึงไม่กระตุ้นให้เกิดการผลิตเอนไซม์ในระดับเดียวกัน นอกจากนี้ เมื่อนำกระบวนการทางชีวภาพนี้ไปประยุกต์ใช้ย่อยสลายใบอ้อยในดิน ยังพบว่ากิจกรรมทางเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ช่วยเร่งการปลดปล่อยธาตุอาหารหลัก (N-P-K) ที่เคยถูกตรึงไว้ในโครงสร้างพืชให้ออกมาอยู่ในรูปแบบที่เกิดประโยชน์ ทำให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้นและค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินปรับเข้าสู่สภาวะที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูก ผลลัพธ์เชิงประจักษ์นี้เป็นข้อพิสูจน์ทางวิทยาศาสตร์ที่ยืนยันว่า การประยุกต์ใช้จุลินทรีย์เพื่อย่อยสลายเศษวัสดุทางการเกษตร เป็นแนวทางชีวภาพที่มีประสิทธิภาพสูงในการจัดการใบอ้อยโดยไม่ต้องพึ่งพาการ

เผา ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและฝุ่นละออง PM 2.5 สิ่งแวดล้อมได้อย่างยั่งยืน

สรุปผล

การศึกษาประสิทธิภาพของ *B. siamensis* พบว่าไบออยเป็นแหล่งคาร์บอนที่สามารถเหนี่ยวนำการสร้างเอนไซม์เซลลูเลสจำเพาะได้สูงสุดถึง 0.8976 U/mg protein อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.001$) และเมื่อนำเชื้อดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ย่อยสลายไบออยในดินพบว่าสามารถเร่งกระบวนการย่อยสลายและปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดินให้มีความอุดมสมบูรณ์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยช่วยปรับสมดุลค่า pH จาก 5.90 เป็น 6.45 เพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุจาก 1.30% เป็น 2.20% ตลอดจนเพิ่มปริมาณธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ให้สูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างชัดเจน

กิตติกรรมประกาศ

โครงการเรื่อง "การศึกษาประสิทธิภาพของ *B. siamensis* ในการย่อยสลายเซลลูโลสจากไบออยเพื่อลดปัญหา PM2.5 และปรับสภาพดิน" สำเร็จลุล่วงด้วยความสำเร็จจากนางสาวพรพรรณ โหมวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และรองศาสตราจารย์ ดร.สิรินภา ช่วงโอกาส ที่ให้คำปรึกษาและสนับสนุนการดำเนินงาน คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณโรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาภรณราชวิทยาลัย สุพรรณบุรี และโรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาภรณราชวิทยาลัย ปทุมธานี ตลอดจนผู้บริหาร คณะครู เจ้าหน้าที่ และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนจนโครงการสำเร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- ประดิษฐ์ ชาลีเครือ. (2019). ฝุ่นควันจากการเผาอ้อย. *chaiyaphum medical journal*, 39(1), 86-99. <https://thaidj.org/index.php/CMJ/article/download/10489/9263>
- ปรีชา ยอดยิ่ง. ศิริณา ทองดอนน้อย. สิรินภา ช่วงโอกาส. (2562). การคัดแยกแบคทีเรียย่อยสลายเซลลูโลสและประสิทธิภาพของการย่อยสลายซังข้าวโพดและผักตบชวาที่ใช้เป็นซับสเตรต. *แก่นเกษตร*, 47(1), 177-186. https://ag2.kku.ac.th/kaj/PDF.cfm?filename=19_72_611.pdf&id=3677&keeptrack=7

ลัดดาวัลย์ จำปา. (2565).

การพัฒนาเครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กเกิน 2.5 ไมครอนที่ใช้เซนเซอร์วัดปริมาณฝุ่นละอองและแจ้งเตือนผ่านทางแอปพลิเคชัน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, 24(2), 48-55. https://li01.tcithaijo.org/index.php/sci_ubu/article/view/252872/174369

น.ส.ศรัณย์พัคตร์แก้วเพชร.(2564).

การรับรู้และพฤติกรรมการตอบสนองของละอองขนาดเล็ก 2.5 ไมครอน (PM2.5) <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/5317/>

นายวรภพ เทพบุตร.(2563).

การประเมินการใช้ไบออยเป็นแหล่งพลังงานทดแทน(วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).Chula.<https://cuir.car.chula.ac.th/bitstream/123456789/76598/1/6280059320.pdf>

ประดิษฐ์ ชาลีเครือ. (2019).

ฝุ่นควันจากการเผาอ้อย.chaiyaphummedical journal, 39(1), 86-99. <https://thaidj.org/index.php/CMJ/article/download/10489/9263>

ลัดดาวัลย์ จำปา. (2565).

การพัฒนาเครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กเกิน 2.5 ไมครอนที่ใช้เซนเซอร์วัดปริมาณฝุ่นละอองและแจ้งเตือนผ่านทางแอปพลิเคชัน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, 24(2), 48-55. https://li01.tcithaijo.org/index.php/sci_ubu/article/view/252872/174369

นายวรภพ เทพบุตร. (2563).

การประเมินการใช้ไบออยเป็นแหล่งพลังงานทดแทน(วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย). Chula.<https://cuir.car.chula.ac.th/m/123456789/76598/1/6280059320.pdf>



ปรีชา ยอดยิ่ง. ศิริณา ทองดอนน้อย. สิริริภา ช่างโสภาส.
(2562).

การคัดแยกแบคทีเรียย่อยสลายเซลลูโลสและ
ประสิทธิภาพของการย่อยสลายซังข้าวโพดและ
ผักตบชวาที่ใช้เป็นซับสเตรต. แก่นเกษตร, 47(1),
177186. [https://ag2.kku.ac.th/kaj/PDF.cfm
?filename=19_72_611.pdf&id=3677&kee
ptrack=7](https://ag2.kku.ac.th/kaj/PDF.cfm?filename=19_72_611.pdf&id=3677&keeptrack=7)

Li, Y., Chen, X., Sonne, C., Lam, S. S., Yang, Y.,
Ma, N. L., & Peng, W. (2023).

Reduction and control of air pollution:
based on plant-microbe interactions.
*Environmental Pollutants and
Bioavailability*, 35(1), 2173657.
[https://www.tandfonline.com/doi/full/1
0.1080/26395940.2023.2173657#abstract](https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/26395940.2023.2173657#abstract)

Cheng, Y., Fu, Q., Xu, J., Niu, X., Liu, L., Wang, J.,
Quan, J., Yu, Q., Chi, B., Li, H., & Liu, R. (2025).

Possible use in soil bioremediation of
the bacterial strain *Bacillus sphaericus*
NM-1 capable of simultaneously
degrading prometryn and acetochlor.
Microorganisms, 13(7), Article 1698.
[https://doi.org/10.3390/microorganisms1
3071698](https://doi.org/10.3390/microorganisms13071698)

OpenAI. (2024, May).

ChatGPT (GPT-4o, May 2024 version)
[Large language model]. Response to
query made by Suntharee Kritchaisak.
Retrieved September 9, 2025, from
<https://chat.openai.com/chat>