ผลงานวิจัยฉบับเต็ม

ของ

นายนิทัศน์ ตั้งพินิจกุล
ตำแหน่ง วิศวกรการเกษตร 6 ว.
ตำแหน่งเลขที่ 390
กลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว
สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม

ขอประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง
วิศวกรการเกษตร 7 วช.
ตำแหน่งเลขที่ 390
กลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว
สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม

ห้องสมุดกรมวิชาการเกษตร
วันที่ 29 เดือน ส.ค. พ.ศ. 2548

ผลงานวิจัยฉบับเต็ม

ของ

นายนิทัศน์ ตั้งพินิจกุล
ตำแหน่ง วิศวกรการเกษตร 6 ว.
ตำแหน่งเลขที่ 390
กลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว
สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม

ขอประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง
วิศวกรการเกษตร 7 วช.
ตำแหน่งเลขที่ 390
กลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว
สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม

สารบัญ

ลำดับที่	ชื่อผลงานวิจัยฉบับเต็ม
1.	ศึกษาอัตราการระบายอากาศในยุ้งโลหะเก็บข้าวเปลือก
2.	วิจัยพัฒนาห้องรมควันกำมะถันสำหรับผลลำไยสด

กรมวิชาการเกษตร

ลำดับที่ 1 ศึกษาอัตราการระบายอากาศในยุ้งโลหะเก็บข้าวเปลือก

ศึกษาอัตราการระบายอากาศในยุ้งโลหะเก็บข้าวเปลือก

Aeration Rates for Deep Bin Storage of Paddy

นิทัศน์ ตั้งพินิจกุล ไมตรี แนวพนิช พิมล วุฒิสินธ์
สุภัทร หนูสวัสดิ์ ยงยุทธ คงช่วน

บทคัดย่อ

ได้ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการระบายอากาศในยุ้งโลหะเก็บข้าวเปลือกโดยการเป่าอากาศแวดล้อมเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 85% จำนวน 3 วิธี คือ 1) ยุ้ง A ระบายอากาศอัตรา 0.22 $ม^3$/นาที-ตัน ในช่วงเวลา 6.00 น. ถึง 18.00 น. 2) ยุ้ง B ระบายอากาศอัตรา 0.22 $ม^3$/นาที-ตัน ในช่วงเวลา 18.00 น. ถึง 6.00 น. และ 3) ยุ้ง C ระบายอากาศอัตรา 0.44 $ม^3$/นาที-ตัน เมื่ออุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกสูงถึง 35°ซ และหยุดระบายอากาศเมื่ออุณหภูมิลดลงเหลือ 33°ซ ยุ้งโลหะที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร สูง 6 เมตร จำนวน 3 ยุ้ง บรรจุข้าวเปลือกยุ้งละ 20 ตัน ข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 13.6% โดยเริ่มเก็บรักษาข้าวเปลือกตั้งแต่ปลายเดือนสิงหาคม 2542 ระยะเวลาเก็บรักษานาน 12 เดือน ผลการทดลองพบว่า ข้าวเปลือกที่เก็บไว้ในยุ้ง B เกิดจับตัวเป็นก้อนแข็งขึ้นและมีเชื้อราเกิดขึ้นบริเวณผนังยุ้ง ซึ่งเป็นผลจากการเกิดการควบแน่นเป็นหยดน้ำที่ผนังและหลังคายุ้งไหลหยดลงบนกองข้าวเปลือก หลังจากเก็บไว้เป็นเวลา 5 เดือน ส่วนข้าวเปลือกที่เก็บไว้ในยุ้ง A และ ยุ้ง C ไม่เกิดปัญหาดังกล่าวจนสิ้นสุดการทดลอง ปริมาณข้าวเมล็ดเหลืองที่ตรวจพบในยุ้งแต่ละยุ้งโดยเฉลี่ยแล้วไม่มีความแตกต่างกัน โดยเริ่มตรวจพบข้าวเมล็ดเหลืองในยุ้งโลหะทุกยุ้งหลังจากเก็บข้าวเปลือกไว้เป็นเวลานาน 5 เดือน เฉลี่ย 0.16% 0.16% และ 0.04% ตามลำดับและเพิ่มสูงขึ้นหลังจากเก็บไว้ 7 เดือน แต่หลังจากนั้นปริมาณข้าวเมล็ดเหลืองค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง โดยตรวจพบข้าวเมล็ดเหลืองในปริมาณ 0.43% 0.45% และ 0.37% ตามลำดับ หลังจากเก็บข้าวเปลือกไว้นาน 12 เดือน

ทะเบียนวิจัยเลขที่ 41 08 002 002

คำนำ

ยุ้งโลหะทรงกระบอก (ไซโล) เป็นเครื่องมือที่ใช้เก็บรักษาเมล็ดพืชในแถบประเทศที่มีภูมิอากาศเย็นและแห้ง เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา ประเทศในทวีปยุโรปและออสเตรเลีย แต่เมื่อนำเอาไซโลมาใช้เก็บรักษาเมล็ดพืชในประเทศในเขตร้อนชื้น เช่นประเทศมาเลเซีย ฟิลิปปินส์ และประเทศไทย จะเกิดปัญหาการเน่าเสียของเมล็ดพืชในไซโลภายเวลาไม่เกิน 4 เดือน สาเหตุที่ทำให้เมล็ดเกิดเสื่อมสภาพระหว่างการเก็บรักษาในไซโลคือ เมล็ดคายความร้อนและความชื้นอันเนื่องจากการหายใจ ทำให้เกิดการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำที่ผนังด้านในและใต้หลังคาของยุ้ง ทำให้เมล็ดที่อยู่รอบ ๆ ผนังค่อย ๆ เปียกชื้นและเน่าเสียในระยะต่อมา (ไมตรี และคณะ 2538) แนวทางการป้องกันการเสื่อมสภาพของเมล็ดระหว่างเก็บรักษาในไซโล สามารถกระทำได้โดยการใช้อากาศเย็น (15°ซ) เป่าจนกระทั่งอุณหภูมิของเมล็ดเหลือเท่ากับอากาศเย็นนั้น เพื่อเป็นการลดอัตราการหายใจและป้องกันไม่ให้เกิดการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำที่ผนังและใต้หลังคา หรือใช้การเป่าลมธรรมชาติผ่านกองเมล็ด เพื่อระบายความร้อนและความชื้นออกจากกองเมล็ด อย่างไรก็ดี อัตราการระบายอากาศและช่วงเวลาที่เหมาะสมโดยใช้อากาศแวดล้อมในสภาวะอากาศในประเทศไทย สำหรับการระบายความร้อนและความชื้นออกจากกองข้าวเปลือกในไซโลโลหะยังไม่เคยมีการศึกษา

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาความเหมาะสมของอัตราและช่วงเวลาการระบายอากาศ สำหรับการเก็บรักษาข้าวเปลือกระยะยาวในยุ้งโลหะ

วิธีดำเนินการ

1. วางแผนการทดลองเปรียบเทียบอัตราและช่วงเวลาการระบายอากาศ
2. จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง ประกอบด้วย ยุ้งโลหะขนาดความจุ 20 ตัน จำนวน 3 ยุ้ง ติดตั้งพัดลมระบายอากาศ หัววัดอุณหภูมิ เครื่องบันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่อง (Data logger) และชุดควบคุมการทำงานของพัดลมระบายอากาศ
3. ปฏิบัติการทดลอง บรรจุข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวใหม่ลงในยุ้งโลหะ ยุ้งละ 20 ตัน เก็บตัวอย่างข้าวเปลือกมาตรวจสอบคุณภาพทุกๆ เดือน
4. รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์ผลการทดลอง
5. สรุปผลการทดลอง

เวลาและสถานที่ดำเนินการ

ตุลาคม 2540 ถึง กันยายน 2543

กลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี

แผนการทดลองเปรียบเทียบอัตราและช่วงเวลาการระบายอากาศ

วางแผนการทดลองเปรียบเทียบอัตราและช่วงเวลาการระบายอากาศในยุ้งโลหะเก็บข้าวเปลือก โดยการเป่าอากาศแวดล้อมขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 85% จำนวน 3 กรรมวิธี คือ

1) ยุ้ง A ระบายอากาศในอัตรา 0.22 $ม^3$/นาที-ตัน ในช่วงเวลา 6.00 น ถึง 18.00 น.

2) ยุ้ง B ระบายอากาศในอัตรา 0.22 $ม^3$/นาที-ตัน ในช่วงเวลา 18.00 น. ถึง 6.00 น.

3) ยุ้ง C ระบายอากาศในอัตรา 0.44 $ม^3$/นาที-ตัน โดยเริ่มระบายอากาศเมื่ออุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกชั้นบนที่ระดับความสูง 4.2 เมตร สูงถึง 35°ซ และหยุดระบายอากาศเมื่ออุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกลดลงเหลือ 33°ซ

การคำนวณอัตราการระบายอากาศที่ใช้ในการทดลองแสดงในภาคผนวก ข และจากผลการศึกษาการเก็บรักษาข้าวเปลือกระยะยาวในไซโลโลหะของกองเกษตรวิศวกรรม โดยไม่มีระบบระบายอากาศ (ไมตรี และคณะ 2538) ซึ่งใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น ร้อยละ 14.5 พบว่า สามารถเก็บรักษาให้ปลอดภัยได้นาน 4 เดือน หลังจากนั้นเมล็ดเริ่มเสื่อมคุณภาพ สาเหตุการเสื่อมสภาพของเมล็ดในไซโลโลหะเกิดจากการหายใจของเมล็ดและแมลง เป็นผลให้บรรยากาศในกองเมล็ดมีอุณหภูมิและความชื้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา อุณหภูมิข้าวเปลือกบริเวณส่วนกลางของยุ้งเพิ่มสูงถึง 35° ซ ซึ่งอุณหภูมิข้าวเปลือกบริเวณนี้สูงกว่าบริเวณอื่น ดังนั้นเพื่อป้องกันการเสื่อมคุณภาพของเมล็ด ในการทดลองนี้จึงใช้อุณหภูมิข้าวเปลือกบริเวณส่วนกลางของยุ้งที่ระดับ 35°ซ เป็นตัวกำหนดเริ่มการทำงานของพัดลมระบายอากาศ สำหรับวิธีปฏิบัติของเกษตรกรโดยทั่วไปกำหนดให้พัดลมระบายอากาศภายในยุ้งโลหะเริ่มทำงานเมื่ออุณหภูมิภายในยุ้งสูงกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม 2°ซ

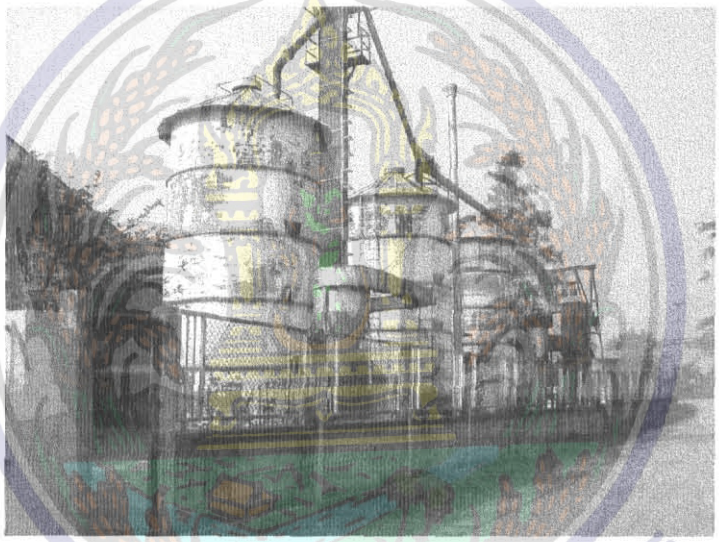
การจัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง

ยุ้งโลหะที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นทรงกระบอก จำนวน 3 ยุ้ง (รูปที่ 1) ผนังทำด้วยเหล็กชุบสังกะสี มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร สูง 6 เมตร ตรงส่วนกลางของหลังคายุ้งมีช่องระบายอากาศ แต่ละยุ้งติดตั้งพัดลมระบายอากาศแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ใบพัดแบบโค้งลู่หลัง ต้นกำลังมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 3 แรงม้า พัดลมระบายอากาศต่อเข้ากับท่อลมซึ่งวางอยู่บนพื้นยุ้ง ท่อลมมีลักษณะเป็นรูปครึ่งวงกลมทำด้วยเหล็กตะแกรงรูกลม จัดวางเป็นรูปตัววาย (Y) (รูปที่ 2)

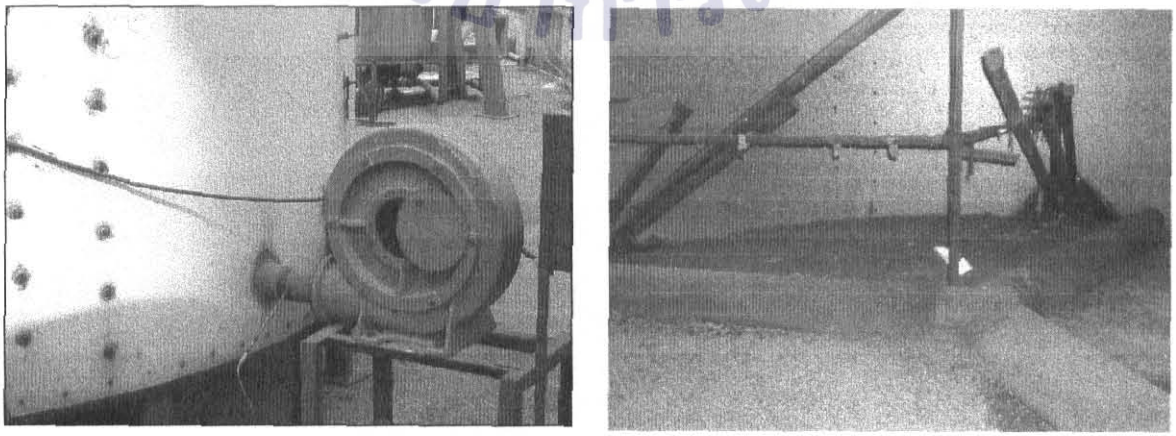
หัววัดอุณหภูมิจำนวน 5 หัว ถูกติดตั้งไว้บริเวณกึ่งกลางยุ้ง โดยมีระยะห่างตามความสูง 1.2 เมตร หัววัดอันล่างสุด (หัวที่ 1) อยู่สูงจากพื้นยุ้ง 0.6 เมตร และหัววัดอันบนสุด (หัวที่ 5) อยู่เหนือกองข้าวเปลือก นอกจากนี้ได้ติดตั้งหัววัดอุณหภูมิลมก่อนเป่าเข้ายุ้ง หัววัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม หัววัดทั้งหมดต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) โดยทำการบันทึกข้อมูลทุกๆ ชั่วโมงต่อเนื่องตลอดการทดลอง นอกจากนี้ได้ออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็น

กระแสตรง และปรับแรงดันไฟฟ้า (Voltage output) ให้คงที่ ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้านี้จะถูกบันทึกด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล เพื่อใช้ตรวจวิเคราะห์เวลาและจำนวนชั่วโมงการทำงานของพัดลมแต่ละตัว

ติดตั้งชุดควบคุมการทำงานของพัดลมระบายอากาศ เพื่อควบคุมให้พัดลมเริ่มทำงานและหยุดทำงานตามเงื่อนไขที่กำหนดตามแผนการทดลอง ชุดควบคุมการทำงานของพัดลมระบายอากาศ มีขั้นตอนดังนี้คือ การทำงานของพัดลมทั้งหมดจะถูกควบคุมด้วยระดับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงเกิน 85% พัดลมจะหยุดการทำงาน และเริ่มทำงานเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำกว่า 80% ทั้งนี้เพื่อป้องกันมิให้ข้าวเปลือกดูดซับความชื้นจากอากาศ จากนั้นพัดลมของยุ้งเก็บข้าวเปลือกยุ้ง A และยุ้ง B ถูกควบคุมการทำงานด้วยเวลา ส่วนยุ้ง C ถูกควบคุมด้วยอุณหภูมิของกองข้าวเปลือกซึ่งติดตั้งหัววัดอุณหภูมิไว้บริเวณกึ่งกลางยุ้งที่ระดับความสูง 4.2 เมตร



รูปที่ 1 ยุ้งโลหะที่ใช้ในการทดลองเปรียบเทียบวิธีการระบายอากาศ



รูปที่ 2 การติดตั้งพัดลมและท่อลมระบายอากาศ

วิธีปฏิบัติการทดลอง

ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลองเป็นข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวใหม่ ไม่ทราบพันธุ์ จากพื้นที่เขตจังหวัดฉะเชิงเทรา มีความชื้นโดยเฉลี่ย 13.6% นำมาผ่านเครื่องทำความสะอาดและบรรจุใส่ในยุ้งโลหะ 3 ยุ้ง ยุ้งละ 20 ตัน ตอนช่วงปลายเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2542 ขณะลำเลียงข้าวเปลือกเข้ายุ้ง สุ่มเก็บตัวอย่างมาหาความชื้นและวิเคราะห์คุณภาพเริ่มต้นของการเก็บรักษา และทุก ๆ เดือนเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์คุณภาพ เป็นเวลา 12 เดือน แต่ละยุ้งเก็บตัวอย่างจากช่องเก็บตัวอย่างที่จัดเตรียมไว้จำนวน 4 จุด โดยแต่ละจุดอยู่ใกล้ตำแหน่งของหัววัดอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือก

การวิเคราะห์คุณภาพตัวอย่างข้าวเปลือกแต่ละจุด ๆ ละ 2 ตัวอย่าง มีขั้นตอนดำเนินการดังนี้

1) ตรวจวัดความชื้น (%) ของข้าวเปลือกตัวอย่างด้วยเครื่องวัดความชื้น Kett (Model: J999)

2) วิเคราะห์คุณภาพการสีด้วยชุดเครื่องสีข้าวห้องปฏิบัติการของ Satake ประกอบด้วยเครื่องกะเทาะแบบลูกยาง เครื่องขัดขาวแบบลูกหิน และเครื่องคัดขนาดข้าว เพื่อหาปริมาณข้าวสารรวม (%) และปริมาณต้นข้าวสาร (%) ที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างเก็บรักษา

3) วัดดัชนีความขาว (%) ของตัวอย่างข้าวสารด้วยเครื่องวัดความขาว Kett (Model: C-3)

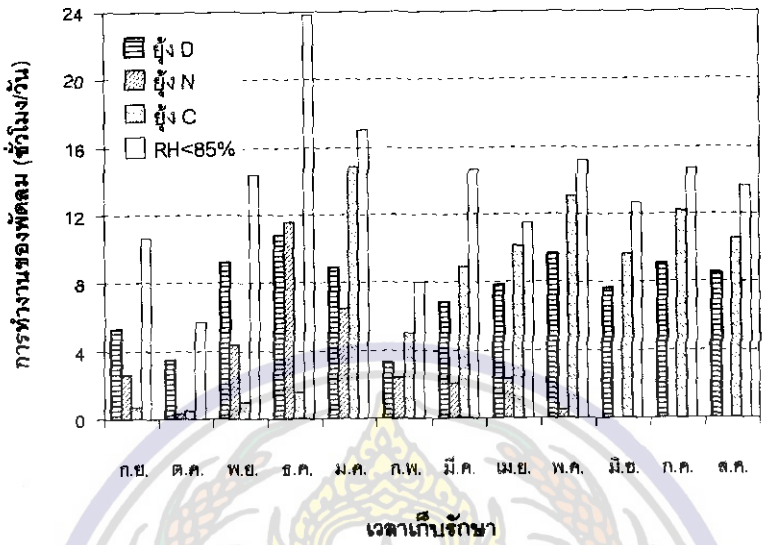
4) ตรวจหาปริมาณข้าวเมล็ดเหลือง (%) จากตัวอย่างต้นข้าวสาร โดยการดูสีด้วยตาเปล่า

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ชั่วโมงการทำงานของพัดลมระบายอากาศ

ตารางผนวก ก1. แสดงชั่วโมงการทำงานของพัดลมระบายอากาศแต่ละยุ้ง เมื่อพิจารณาอายุการเก็บรักษานาน 12 เดือน คิดเป็น 8760 ชั่วโมง แต่เนื่องจากบางช่วงเครื่องบันทึกข้อมูลเกิดขัดข้องทำให้ข้อมูลที่บันทึกได้มีจำนวนเพียง 7888 ชั่วโมง (ประมาณ 90%) จากข้อมูลที่บันทึกได้จำนวนชั่วโมงที่อากาศแวดล้อมมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 85% เท่ากับ 4950 ชั่วโมง (ประมาณ 62.8%) พัดลมระบายอากาศของยุ้ง A ยุ้ง B และ ยุ้ง C ควรมีชั่วโมงการทำงานรวมตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ คือทำงานตามเวลา อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมต่ำกว่า 85% เท่ากับ 3007, 1943 และ 2875 ชั่วโมง แต่จากข้อมูลการทดลองปรากฏว่า พัดลมระบายอากาศของยุ้ง A, ยุ้ง B และ ยุ้ง C ทำงานจริงเพียง 2769, 991 และ 2690 ชั่วโมง คิดเป็น 92.1, 51.0 และ 93.6% เรียงตามลำดับ การที่พัดลมระบายอากาศมีชั่วโมงการทำงานจริงต่างจากชั่วโมงการทำงานตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ มีอยู่ด้วยกันหลายสาเหตุ ประการแรกเนื่องจากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดโดยชุดควบคุมการทำงานของพัดลมกับค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่บันทึกซึ่งใช้หัววัดคนละชุดกัน มีค่าไม่เท่ากันทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน ประการที่สองหัววัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมของชุดควบคุมการทำงานของพัดลมเมื่อใช้ไปนานๆเกิดสกปรกทำให้เกิดความผิดพลาด และประการสุดท้ายสำหรับพัดลมระบายอากาศของยุ้ง B มีชั่วโมงการทำงานน้อยมาก เนื่องจากนาฬิกาตั้งเวลาควบคุมการทำงานของพัดลม

ระบายอากาศของยุ้ง B เกิดชำรุด ทำให้พัดลมไม่ทำงานตั้งแต่ประมาณเดือนที่ 9 ของการทดลอง รูปที่ 3 เปรียบเทียบจำนวนชั่วโมงการทำงานเฉลี่ยต่อวันของพัดลมระบายอากาศของยุ้ง A ยุ้ง B และ ยุ้ง C



รูปที่ 3 ชั่วโมงการทำงานเฉลี่ยต่อวันที่บันทึกของพัดลมระบายอากาศของยุ้ง A ยุ้ง B และ ยุ้ง C

อุณหภูมิบรรยากาศในยุ้งโลหะ

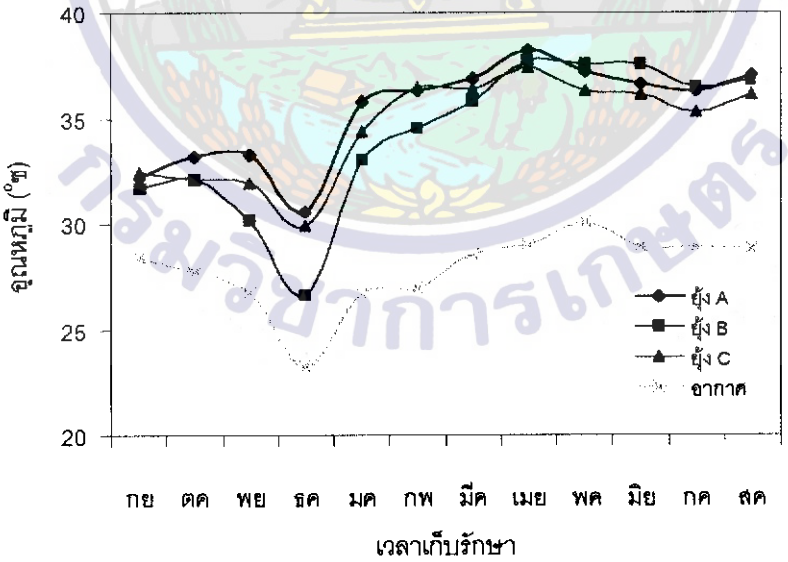
ผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในกองข้าวเปลือกแสดงไว้ในรูปที่ 4 อุณหภูมิในกองข้าวเปลือกมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอากาศแวดล้อม ในช่วงแรกของการเก็บรักษาตั้งแต่เดือนกันยายนถึงเดือนธันวาคม อุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกทุกยุ้งมีแนวโน้มลดลง รวมทั้งยุ้ง C ซึ่งพัดลมทำงานน้อยมากในช่วงนี้ ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิอากาศแวดล้อมโดยเฉลี่ยมีค่าต่ำ ทำให้ความร้อนและความชื้นสะสมที่เป็นผลจากการหายใจของเมล็ดต่ำไปด้วย แต่หลังจากนั้นอุณหภูมิอากาศแวดล้อมโดยเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น ทำให้อัตราการหายใจของเมล็ดสูงขึ้น เกิดความร้อนสะสมภายในกองข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น อุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกของยุ้ง A โดยเฉลี่ยมีค่าสูงกว่ายุ้ง C ตลอดการทดลอง เนื่องจากยุ้ง C ใช้อัตราการระบายอากาศที่สูงกว่าและรวมทั้งมีชั่วโมงการทำงานของพัดลมในช่วง 8 เดือนหลังของการเก็บรักษามากกว่ายุ้ง A สำหรับยุ้ง B ที่ระบายอากาศในช่วงเวลา 18.00 – 6.00 น.ซึ่งอากาศแวดล้อมมีอุณหภูมิต่ำกว่า พบว่าอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกโดยเฉลี่ยมีค่าต่ำกว่าในช่วงแรกของการทดลอง แต่เพิ่มสูงขึ้นในช่วงหลังของการทดลองเนื่องจากพัดลมมีชั่วโมงการทำงานน้อยเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

อุณหภูมิเฉลี่ยภายในกองข้าวเปลือกที่ระดับต่างๆ และอุณหภูมิลมเข้าของยุ้ง A ยุ้ง B และ ยุ้ง C แสดงในรูปที่ 5 พบว่าอุณหภูมิของลมหลังผ่านพัดลมก่อนเป่าเข้ายุ้ง A ยุ้ง B และ ยุ้ง C สูงกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมโดยเฉลี่ย 4.2, 5.0 และ 3.4°ซ เรียงตามลำดับ ยุ้ง A และ ยุ้ง C ซึ่งมีชั่วโมงการ

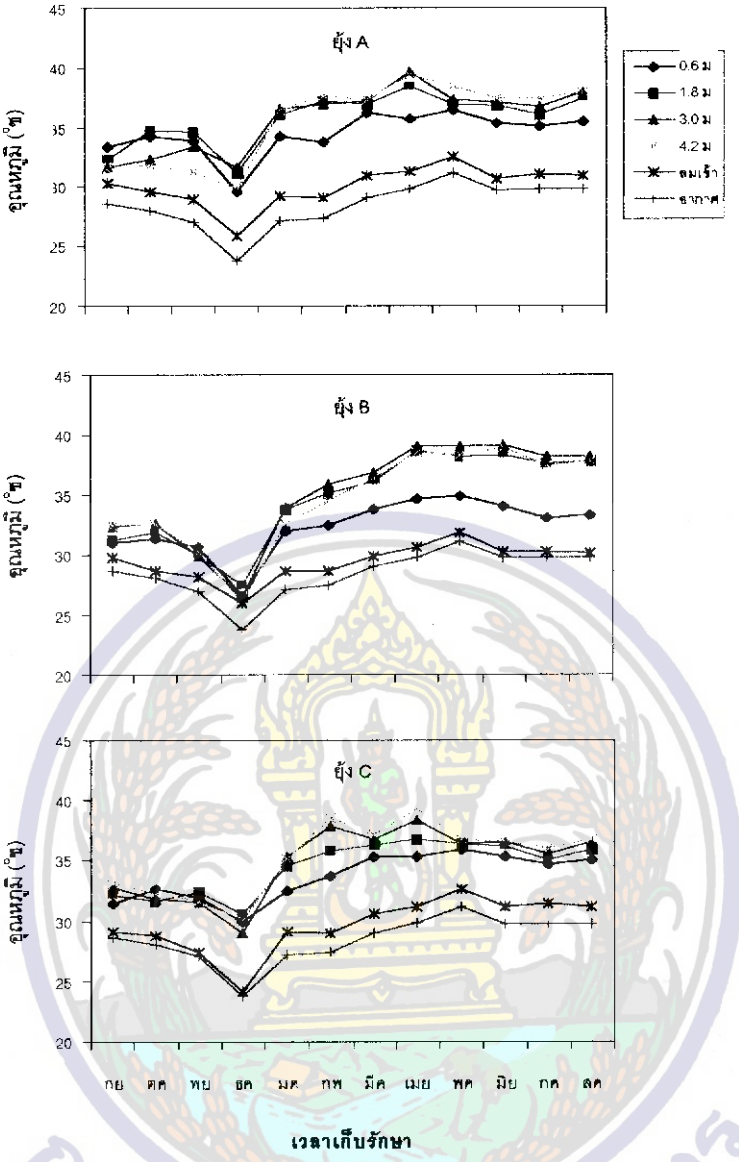
ทำงานของพัดลมระบายอากาศมากกว่าและค่อนข้างสม่ำเสมอ ทำให้ช่วยรักษาระดับอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกทั้งยุ้งให้สม่ำเสมอและโดยเฉลี่ยมีค่าต่ำกว่ายุ้ง B

ปัญหาการควบแน่นเป็นหยดน้ำ

หลังจากเก็บข้าวเปลือกไว้นาน 12 เดือน พบว่า ข้าวเปลือกที่เก็บไว้ในยุ้ง A และ ยุ้ง C ยังคงอยู่ในสภาพค่อนข้างดี ไม่เกิดปัญหาการควบแน่นเป็นหยดน้ำบริเวณใต้หลังคาและผนังยุ้ง เนื่องจากพัดลมระบายอากาศสามารถไล่ความร้อนและความชื้นที่เกิดขึ้นจากการหายใจของเมล็ดและจุลชีพภายในกองข้าวเปลือกได้เพียงพอ ส่วนข้าวเปลือกที่เก็บไว้ในยุ้ง B พบว่าเกิดจับเป็นก้อนแข็งขึ้นและมีเชื้อราเกิดขึ้นบริเวณผนังยุ้ง หลังจากเก็บไว้เป็นเวลา 5 เดือน ซึ่งเป็นผลจากการเกิดการควบแน่นเป็นหยดน้ำที่ผนังและหลังคายุ้งไหลหยดลงบนกองข้าวเปลือก และไม่สามารถระบายอากาศเพื่อไล่ความชื้นได้เพียงพอ ทั้งนี้เป็นเพราะยุ้ง B เป่าลมระบายอากาศในช่วงเวลากลางคืนตั้งแต่เวลา 18.00 น ถึง 6.00 น ซึ่งเป็นช่วงที่อากาศแวดล้อมมีความชื้นสัมพัทธ์โดยเฉลี่ยสูงกว่าช่วงกลางวัน และมีชั่วโมงการทำงานของพัดลมระบายอากาศน้อยกว่า นอกจากนี้ยังเกิดปัญหานาฬิกาตั้งเวลาควบคุมการทำงานของพัดลมระบายอากาศของยุ้ง B เกิดขัดข้อง ทำให้พัดลมไม่ทำงานตั้งแต่ประมาณเดือนที่ 9 ของการทดลองดังได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 4 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในกองข้าวเปลือกของยุ้ง A ยุ้ง B และ ยุ้ง C

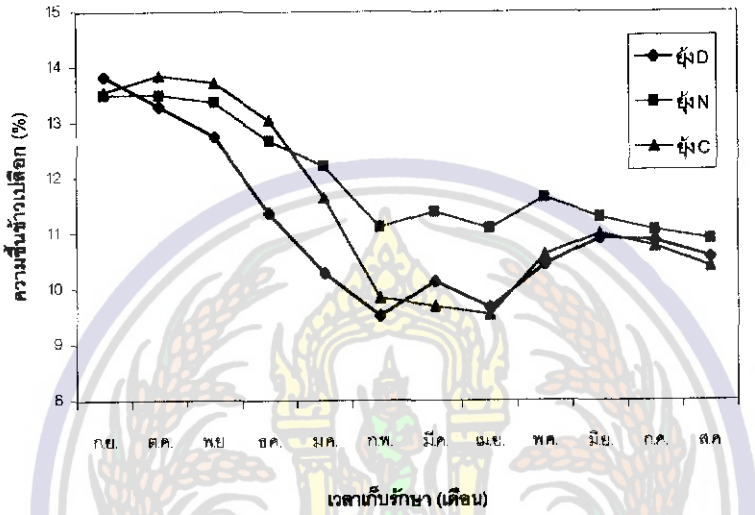


รูปที่ 5 อุณหภูมิเฉลี่ยในกองข้าวเปลือกที่ระดับความสูงต่างๆจากพื้นของยุ้ง A ยุ้ง B และ ยุ้ง C

ความชื้นเมล็ดข้าวเปลือก

ผลการเปลี่ยนแปลงของความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกที่เก็บในยุ้งโลหะแสดงในรูปที่ 6 ปรากฏว่า หลังจากเก็บข้าวเปลือกไว้นาน 12 เดือน ความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกเฉลี่ยในยุ้ง A, B และ C ลดลงจาก 13.84, 13.50 และ 13.56% เหลือ 11.14, 11.98 และ 11.48% เรียงตามลำดับ การที่ความชื้นลดลงเป็นเพราะลมที่เป่าเข้ายุ้งเพื่อระบายอากาศ หลังจากผ่านพัดลมมีอุณหภูมิสูงขึ้นและมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำลง ทำให้เมล็ดถ่ายเทความชื้นให้กับอากาศ โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงของความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกในแต่ละยุ้งแตกต่างกันไป มีความสัมพันธ์กับชั่วโมงการทำงานของพัดลมระบายอากาศ ช่วงเวลาในการเป่าลมและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม ในช่วง 6 เดือนแรกยุ้ง A และ ยุ้ง C มีอัตราการลดลงของความชื้นเมล็ดสูงกว่า โดยความชื้นลดลงเหลือ 9.53% และ 9.85% เนื่องจากพัดลมเป่าลมในช่วง

เวลากลางวันซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมโดยเฉลี่ยต่ำกว่า อย่างไรก็ตามในช่วง 6 เดือนหลัง ข้าวเปลือกมีความชื้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมมีค่าสูงขึ้น ขณะที่ยุ้ง B เป่าลมระบายอากาศในช่วงเวลาเย็นซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศโดยเฉลี่ยสูงกว่า ทำให้ความชื้นลดลงน้อยกว่าเหลือ 11.13% และในช่วง 6 เดือนหลังความชื้นไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากพัดลมทำงานน้อยและเกิดการขัดข้องของชุดควบคุมการทำงานของพัดลมดังได้กล่าวมาแล้ว

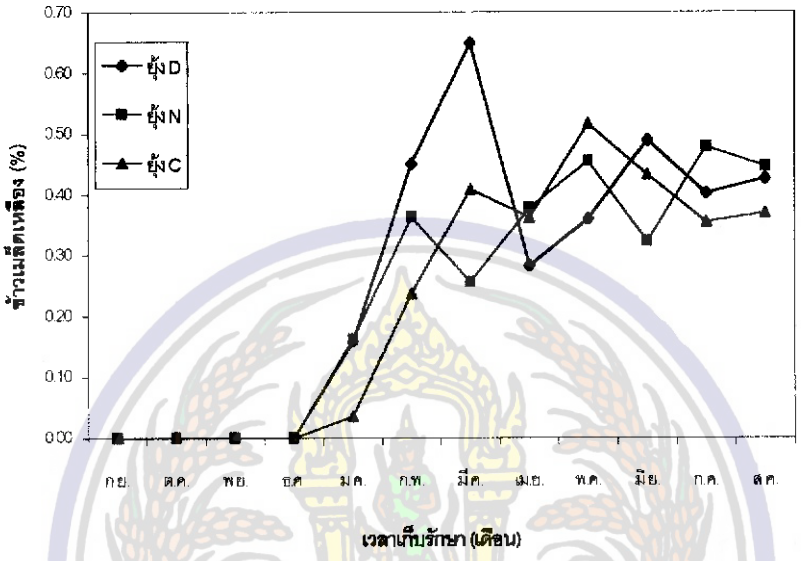


รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นข้าวเปลือกที่เก็บในยุ้งโลหะเป็นเวลา 12 เดือน

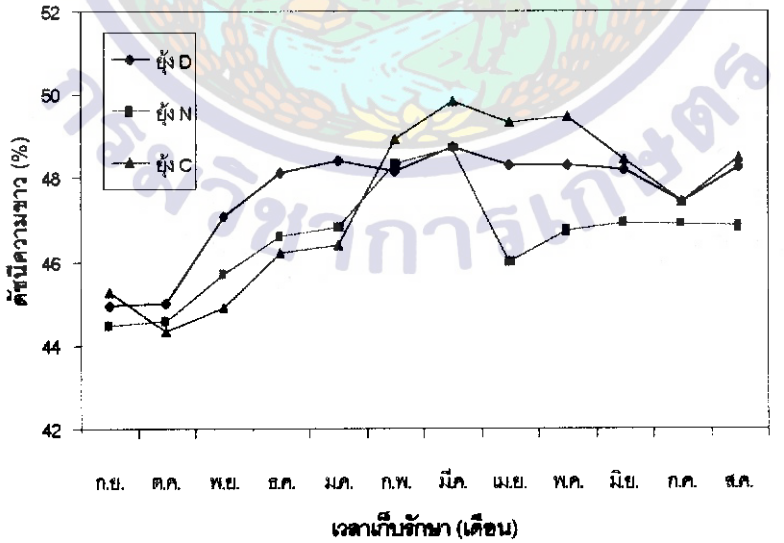
คุณภาพข้าวเปลือก

ผลเปรียบเทียบคุณภาพการสีของข้าวเปลือกที่เก็บไว้ในยุ้งโลหะแสดงในรูปที่ 7 ถึง 9 ปรากฏว่าวิธีการระบายอากาศที่ใช้ในการทดลองนี้ไม่มีผลทำให้คุณภาพข้าวเปลือกแตกต่างกัน แต่คุณภาพข้าวเปลือกเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาการเก็บรักษา ปริมาณข้าวเมล็ดเหลืองที่ตรวจพบในยุ้งแต่ละยุ้งโดยเฉลี่ยแล้วไม่มีความแตกต่างกัน โดยเริ่มตรวจพบข้าวเมล็ดเหลืองในยุ้งโลหะทุกยุ้งหลังจากเก็บข้าวเปลือกไว้เป็นเวลานาน 5 เดือน มีค่าเฉลี่ย 0.16% 0.16% และ 0.04% ในยุ้ง A ยุ้ง B และ ยุ้ง C เรียงตามลำดับ และเพิ่มสูงขึ้นหลังจากเก็บไว้ 7 เดือน แต่หลังจากนั้นปริมาณข้าวเมล็ดเหลืองค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง โดยตรวจพบข้าวเมล็ดเหลืองในปริมาณ 0.43% 0.45% และ 0.37% หลังจากเก็บข้าวเปลือกไว้นาน 12 เดือน ดัชนีความขาวของข้าวสารมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย เปอร์เซ็นต์ข้าวสารรวมเฉลี่ยไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลง ขณะที่เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสารเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามระยะเวลาการเก็บรักษา โดยที่ต้นข้าวของยุ้ง B มีค่าเฉลี่ยสูงกว่ายุ้ง A และยุ้ง C ตั้งแต่เริ่มต้นจนสิ้นสุดการทดลอง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะข้าวเปลือกที่นำมาทดลองไม่ใช่ข้าวเปลือกที่มาจากพื้นที่ปลูกเดียวกัน

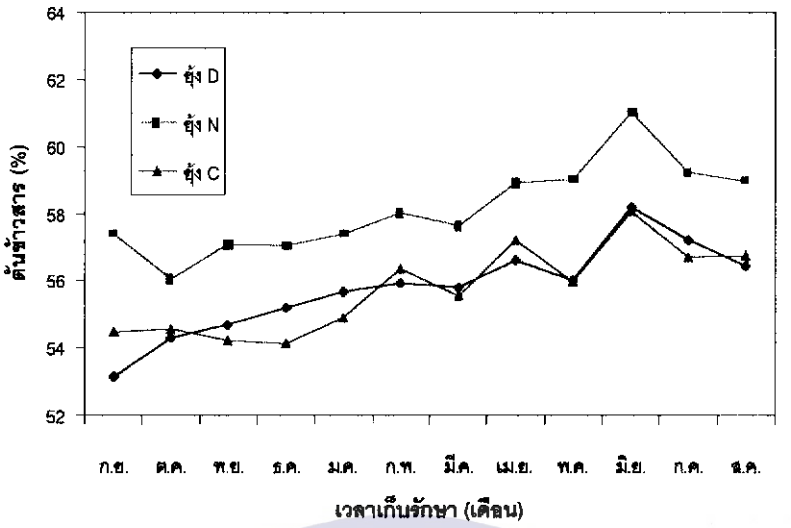
อนึ่งการที่ยุ้ง B ซึ่งพบว่าเกิดปัญหาความชื้นสะสม ข้าวเปลือกจับเป็นก้อนแข็งขึ้นและมีเชื้อรา เกิดขึ้นบริเวณผนังยุ้ง แต่กลับตรวจพบว่ามีปริมาณข้าวเมล็ดเหลืองใกล้เคียงกับยุ้งอื่นๆ นั้น เนื่องจากตัวอย่างที่เก็บมาตรวจวิเคราะห์คุณภาพเก็บจากบริเวณส่วนกลางที่ระดับความสูงต่างๆของยุ้ง ซึ่งมิได้เกิดปัญหาดังกล่าว โดยข้าวเปลือกในส่วนนี้ยังอยู่ในสภาพดี



รูปที่ 7 ปริมาณข้าวเมล็ดเหลืองที่เกิดขึ้นเมื่อเก็บข้าวเปลือกในยุ้งโลหะนาน 12 เดือน



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงของดัชนีความขาวของข้าวสารเมื่อเก็บข้าวเปลือกในยุ้งโลหะนาน 12 เดือน



รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสารเมื่อเก็บข้าวเปลือกในยุ้งโลหะนาน 12 เดือน

สรุปผลการทดลองและคำแนะนำ

วิธีการระบายอากาศในยุ้งโลหะเก็บข้าวเปลือกขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมต่ำกว่า 85% ในช่วงเวลา 18.00 น. ถึง 6.00 น. ด้วยอัตรา 0.22 ลบ.ม./นาที-ตัน ไม่สามารถแก้ปัญหาการควบแน่นเป็นหยดน้ำบริเวณผนังและหลังคายุ้งได้ ข้าวเปลือกที่เก็บรักษาไว้เกิดจับเป็นก้อนแข็งขึ้นและมีเชื้อราเกิดขึ้น

วิธีการระบายอากาศในยุ้งโลหะเก็บข้าวเปลือกขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมต่ำกว่า 85% ด้วยอัตรา 0.22 $ม^3$/นาที-ตัน ในช่วงเวลา 6.00 น ถึง 18.00 น. และวิธีการระบายอากาศด้วยอัตรา 0.44 $ม^3$/นาที-ตัน เมื่ออุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกสูงถึง 35°ซ และหยุดระบายอากาศเมื่ออุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกลดลงเหลือ 33°ซ ได้ผลการทดลองไม่แตกต่างกันมากนัก สามารถใช้เก็บรักษาข้าวเปลือกได้นาน 4 เดือนโดยไม่เกิดข้าวเมล็ดเหลือง และเมื่อเก็บไว้ 12 เดือน เกิดข้าวเมล็ดเหลือง 0.43% และ 0.37% ตามลำดับ โดยไม่เกิดปัญหาการควบแน่นเป็นหยดน้ำบริเวณผนังและหลังคายุ้ง ทั้ง 2 วิธีมีชั่วโมงการทำงานรวมของพัดลมระบายอากาศใกล้เคียงกัน แต่วิธีการระบายอากาศด้วยอัตรา 0.22 $ม^3$/นาที-ตัน จะมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าวิธีการระบายอากาศด้วยอัตรา 0.44 $ม^3$/นาที-ตัน ดังนั้นในการเก็บรักษาข้าวเปลือกในยุ้งโลหะ ควรมีระบบระบายอากาศด้วยอัตราไม่ต่ำกว่า 0.22 $ม^3$/นาที-ตัน ในช่วงเวลา 6.00 น ถึง 18.00 น. ในช่วงที่อากาศแวดล้อมมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 85% และควรมีการถ่ายกลับกองเมล็ดพืชหลังจากเก็บรักษานาน 4 เดือน

เอกสารอ้างอิง

ไมตรี แนวพนิช วิบูลย์ เทเพนทร์ พิมล วุฒิสินธ์ สิริชัย ส่งเสริมพงษ์ นิทัศน์ ตั้งพินิจกุล และ สุภัทร หนูสวัสดิ์. 2538. วิจัยพัฒนายุ้งโลหะเก็บรักษาเมล็ดพืช. รายงานผลการวิจัย ปี 2538 กลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว กองเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร

Brooker, D. B., F. W. Bakker-Arkema, and C. W. Hall. 1992. Drying and Storage of Grains and Oilseeds. AVI, Newyork.

Naewbanij, M., P. A. Seib, D. S. Chung, L. M. Seitz, and C. W. Deyoe. 1986. Ergosterol versus Dry Matter Loss as Quality Indicator for High-Moisture Rough Rice during Holding. *Cereal Chem.* 63: 315-319

Teter, N. C. 1981. Grain Storage. Published by Southeast Asia Cooperative Post-Harvest Research and Development Programme, SEARCA, College, Laguna, Philippines. March,1981.

กรมวิชาการเกษตร

ภาคผนวก ก

ตารางผนวก ก1. ชั่วโมงการทำงานของพัดลมระบายอากาศในยุ้งเก็บข้าวเปลือก

เดือน	อุณหภูมิอากาศ °ซ	RH อากาศ %	อุณหภูมิแตกต่าง (ลมเข้า-อากาศ)			ชั่วโมงทำงานจริงของพัดลม			จำนวนชั่วโมงที่บันทึก RH<85%			1 เดือน	บันทึก	RH<85%
			A	B	C	A	B	C	6-18 น.	18-6 น.	T_4>35°ซ	ชั่วโมง	ชั่วโมง	ชั่วโมง
ก.ย.	28.4	76.8	-	4.9	3.2	161	78	20	206	114	27	720	496	320
ต.ค.	27.7	86.5	4.5	4.5	3.4	107	9	16	141	36	0	744	429	177
พ.ย.	26.7	80.3	4.5	5.1	3.4	276	131	29	275	157	0	720	720	432
ธ.ค.	23.3	64.9	4.5	5.1	3.5	335	359	47	369	370	0	744	744	739
ม.ค.	26.7	75.2	4.6	5.1	3.3	276	201	459	283	244	296	744	744	527
ก.พ.	27.0	76.9	4.6	5.1	3.3	91	67	142	124	101	161	672	339	225
มี.ค.	28.6	75.1	4.5	4.8	3.1	214	63	275	265	188	350	744	744	453
เม.ย.	29.0	82.9	4.0	5.1	3.2	235	69	304	231	115	346	720	720	346
พ.ค.	30.1	77.1	3.8	5.1	3.4	301	14	404	303	169	472	744	744	472
มิ.ย.	28.9	82.3	3.6	-	3.5	228	0	289	247	133	380	720	720	380
ก.ค.	28.9	79.5	3.8	-	3.6	281	0	378	285	172	421	744	744	457
ส.ค.	28.8	80.4	3.9	-	3.6	264	0	327	278	144	422	744	744	422
รวม						2769	991	2690	3007	1943	2875	8760	7888	4950

RH คือความชื้นสัมพัทธ์อากาศ (Relative humidity)

T_4 คืออุณหภูมิกลางกองข้าวเปลือกของยุ้ง C ที่ระดับความสูง 4.2 เมตร

กรมวิชาการเกษตร

ภาคผนวก ข

การออกแบบระบบการระบายอากาศเพื่อการเก็บรักษาข้าวเปลือกระยะยาวในไซโลเหล็ก

ในการศึกษาการเก็บรักษาข้าวเปลือกระยะยาวในไซโลเหล็กของกองเกษตรวิศวกรรมโดยไม่มีระบบระบายอากาศ ซึ่งใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น ร้อยละ 14.5 สามารถเก็บรักษาให้ปลอดภัยได้นานแค่ 4 เดือน หลังจากนั้นเมล็ดเริ่มเสื่อมคุณภาพ สาเหตุการเสื่อมสภาพของเมล็ดในไซโลเหล็กเกิดจากการหายใจของเมล็ดและแมลง เป็นผลให้บรรยากาศในกองเมล็ดมีอุณหภูมิและความชื้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา และก่อให้เกิดการควบแน่นที่ผนังและใต้หลังคาของไซโลเมื่ออุณหภูมิของอากาศภายนอกลดต่ำลงในเวลากลางคืน อัตราการหายใจของข้าวเปลือกที่ความชื้น ร้อยละ 14.5 และอุณหภูมิ 35°ซ มีค่าการสูญเสียมวลแห้งประมาณ 30 กรัม/ตัน-วัน (Naewbanij et al., 1986) หรือคิดเป็นไอน้ำที่เพิ่มให้แก่อากาศในไซโล 18 กรัม/ตัน-วัน (0.6 x 30 กรัม/ตัน-วัน) หรือคิดเป็นไอน้ำในบรรยากาศของกองเมล็ดจะเพิ่มขึ้น 18 - 20 กรัม/$ม^3$-วัน ซึ่งสามารถทำให้บรรยากาศภายในไซโลถึงจุดอิ่มตัวภายในเวลา 1 - 2 วัน ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายนอก แต่เนื่องจากเมล็ดสามารถดูดซับความชื้นจากบรรยากาศจึงทำให้บรรยากาศอยู่ในสภาพสมดุลย์กับความชื้นเมล็ด แต่อาจเกิดการควบแน่นที่พื้นผิวของเมล็ดหรือผนังไซโลซึ่งมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ดังนั้นการระบายอากาศร้อนชื้นออกจากกองเมล็ดในไซโลก่อนที่บรรยากาศภายในไซโลจะเกิดการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำสะสมที่ผนังซึ่งเป็นเหตุให้เมล็ดเสื่อมคุณภาพจึงจะเป็นการแก้ไขที่ถูกวิธี

ส่วนประกอบของระบบระบายอากาศ

ระบบระบายอากาศในไซโลเหล็กจะประกอบด้วยพัดลมสำหรับระบายอากาศและหัววัดอุณหภูมิของกองข้าวเปลือกซึ่งอาจจะต่อติดกับชุดควบคุมการทำงานของพัดลมหรือต่อเข้ากับหน้าปัทม์บอกอุณหภูมิก็ได้ การระบายอากาศอาจจะกำหนดเป็นตารางชั่วโมงต่อวัน ต่ออาทิตย์ หรือต่อเดือน หรือกำหนดให้พัดลมทำงานเมื่ออุณหภูมิของอากาศภายนอกต่ำกว่าอุณหภูมิของกองเมล็ดก็ได้ แล้วแต่ผู้ออกแบบจะพิจารณาตามความเหมะสม ข้อสำคัญของการออกแบบระบบระบายอากาศคือ ปริมาณลมที่นอกจากจะสามารถพัดพาเอาความร้อนและความชื้นออกจากกองข้าวเปลือกแล้ว ยังจะต้องลดอุณหภูมิของเมล็ดลงให้เหลือเท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศก่อนที่เมล็ดจะเกิดการเสื่อมคุณภาพ ปริมาณลมที่ใช้ระบายความร้อนและความชื้นนี้จะต้องไม่ทำให้เมล็ดสูญเสียความชื้นและน้ำหนักเกินความจำเป็น ขณะเดียวกันลมที่เป่าเพื่อลดอุณหภูมิของกองข้าวเปลือกต้องมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์ที่สมดุลย์กับความชื้นของข้าวเปลือกที่เก็บรักษา มิฉะนั้นจะทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นเพิ่มสูงขึ้น ข้าวเปลือกที่เก็บรักษามีความชื้น 14% จะมีความสมดุลย์กับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ 76% นอกจากนี้ในการออกแบบยังต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและการใช้งานเป็นหลักใหญ่

อัตราการระบายอากาศ

การคำนวนปริมาณลมที่จำเป็นสำหรับลดอุณหภูมิเมล็ดคำนวนได้จากสมการความสมดุลย์ของค่าความร้อนที่เมล็ดถ่ายเทให้อากาศคือ

$$W_gC_g(T_g-T_a) = W_aC_a(T_a-T_g) \quad \text{---------- (1)}$$

ซึ่ง W_g, W_a คือ น้ำหนักของเมล็ดและของอากาศ

C_g, C_a คือ ค่าความร้อนจำเพาะของเมล็ดและของอากาศ

T_g, T_a คือ อุณหภูมิของเมล็ดและของอากาศ

ในสมการ (1) จะเห็นว่าอัตราส่วน $W_a/W_g = C_g/C_a$ หรือ อัตราส่วนน้ำหนักของอากาศที่ต้องใช้ลดอุณหภูมิของเมล็ดคืออัตราส่วนของค่าความร้อนจำเพาะของเมล็ดต่อค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ มีค่าประมาณ 1.73 (ค่าความร้อนจำเพาะของข้าวเปลือก 1.73 kJ/kg-°C และของอากาศ 1.0 kJ/kg-°C) ถ้าแปลงเป็นปริมาตรของอากาศต่อน้ำหนักของเมล็ดจะได้ 1,563 $ม^3$/ตัน และจากข้อมูลการเก็บรักษาข้าวเปลือกซึ่งอุณหภูมิของกองข้าวเพิ่มสูงขึ้น ประมาณ 3°ซ หลังเก็บรักษาในไซโลเหล็กนาน 3 เดือนซึ่งเป็นระยะเวลาที่เมล็ดเริ่มเสื่อมคุณภาพ ดังนั้นอัตราการระบายอากาศที่สามารถลดอุณหภูมิข้าวเปลือกคือ 0.012 $ม^3$/นาที-ตัน โดยให้พัดลมทำงานวันละ 24 ชั่วโมงตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา การคำนวณปริมาณลมข้างต้นนี้ยังไม่ได้รวมค่าความร้อนและความชื้น ซึ่งเกิดขึ้นจากขบวนการหายใจของเมล็ด ซึ่งจากการคำนวณปริมาณลมเพื่อการนี้เท่ากับ 0.08 $ม^3$/นาที-ตัน เมื่อรวมกันเข้าแล้วปริมาณลมที่จำเป็นต้องใช้มีค่าเป็น 0.08 + 0.012 = 0.092 $ม^3$/นาที-ตัน และบวกค่าความเสี่ยง (20%) เพื่อชดเชยการรั่วซึมตามรอยต่อของผนังไซโล จึงควรใช้ปริมาณลมไม่น้อยกว่า 0.11 $ม^3$/นาที-ตัน

ในการเก็บรักษาจริงอาจกำหนดให้พัดลมทำงานวันละ 6 - 12 ช.ม. ในช่วงเวลาที่อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าค่าความชื้นสมดุลย์ ดังนั้นปริมาณลมที่จำเป็นต้องใช้คือ 0.44 - 0.22 $ม^3$/นาที-ตัน ตามลำดับ ตัวเลขที่คำนวณได้นี้มีค่าใกล้เคียงกับตัวเลขตามรายงานของประเทศมาเลเซีย ซึ่งสามารถเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ความชื้นร้อยละ 14 ในไซโลคอนกรีตได้โดยไม่เสื่อมคุณภาพ

การกำหนดจำนวนชั่วโมงการทำงานของพัดลม มีผลต่อขนาดแรงม้าของมอเตอร์และค่าใช้จ่ายในการเป่าลม จากการคำนวณเมื่อเก็บข้าวเปลือกจำนวน 100 ตันในไซโลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เมตรสูง 6 เมตร ถ้าเป่าลมวันละ 6 ชั่วโมงในอัตรา 0.44 $ม^3$/นาที-ตัน จะต้องใช้มอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า และเสียค่าไฟฟ้า 11.56 บาท/วัน และถ้าเป่าลมวันละ 12 ชั่วโมงในอัตรา 0.22 $ม^3$/นาที-ตัน จะต้องใช้มอเตอร์ขนาด 1/3 แรงม้าและเสียค่าไฟฟ้าเพียง 5.40 บาท/วันเท่านั้น ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ปริมาณลม 0.22 $ม^3$/นาที-ตัน เป่าลมเป็นเวลา 12 ช.ม./วัน ซึ่งจะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการดำเนินการน้อยกว่า

การคำนวนปริมาณลมระบายความร้อนและความชื้นซึ่งเกิดจากขบวนการหายใจ

จากสมการการหายใจ หรือการใช้น้ำตาลหรือแป้ง

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O + \Delta E$$

1 kg 1.1 kg 1.47 kg 0.6 kg 15.7 MJ

จะเห็นว่าการใช้น้ำตาล หรือการสูญเสียมวลแห้ง (DML) 1 ก.ก. จะได้ ไอน้ำ 0.6 ก.ก. และความร้อน 15.7 MJ ซึ่งในการทดลองของ Naewbanij, M. et.al, 1986 DML ของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 35 °ซ และความชื้น 14.5 % w.b. มีค่าประมาณ 30 กรัม/ตัน-วัน หรือ 0.03 กก/ตัน-วัน

ความร้อนแฝงของน้ำในเมล็ดพืช (h'_{fg}) คำนวณจากสมการของ R. C. Brook และ G. H. Foster (1981) ดังนี้

h'_{fg} = $(2502.2 - 2.39T)[1 + A \exp^{(-BM)}]$ (kJ/kg) ---------- (2)

T = อุณหภูมิ (°C)

M = ความชื้นข้าวเปลือก (decimal d.b.)

A, B = ค่าคงที่ของข้าวเปลือก คือ 2.0692 และ 21.739

h'_{fg} = $(2502.2 - 2.39 \times 35)[1+2.0692 \exp^{(-21.739 \times 0.16)}]$ = 2564 kJ/kg

DML 0.03 กก/ตัน-วัน ได้ไอน้ำ 0.03 x 0.6 kg/1kg = 0.018 กก/ตัน-วัน

ค่าความร้อนแฝงของน้ำ (ΔH) = 0.018 กก/ตัน-วัน x 2564 kJ/kg

= 46.15 kJ/ตัน-วัน

ค่าความร้อนจากการหายใจ (ΔE) = 0.03 กก/ตัน-วัน x 15.7 MJ/kg

= 471 kJ/ตัน-วัน

ผลรวมของค่าความร้อน ($\Delta H+\Delta E$) = 517.15 kJ/ตัน-วัน

จากสมการความสมดุลย์ความร้อนซึ่งต้องใช้อากาศระบายออกไป

$$(\Delta H+\Delta E) = MC_a \Delta T_a$$

ให้ $T_{db}-T_{wb} = \Delta T = 4$°ซ ;ที่ RH=75% ซึ่งเป็นความชื้นสมดุลย์ของข้าวเปลือกที่ ความชื้น 14% (T_{db} คืออุณหภูมิกะเปาะแห้ง และ T_{wb} คืออุณหภูมิกะเปาะเปียก)

M = 517.15 kJ/ตัน-วัน /(1 kJ/kg-°C x 4 °C)

= 129.29 กก./ตัน-วัน

คิดเป็นปริมาตรอากาศ (V)

V = 129.29 กก./ตัน-วัน x 0.9 $ม^3$/กก

= 116.36 $ม^3$/ตัน-วัน

= 116.36 $ม^3$/ตัน-วัน x 1 วัน/(60x24 นาที)

= 0.08 $ม^3$/นาที-ตัน

การคำนวณแรงม้าสำหรับมอเตอร์พัดลมสามารถใช้สูตรของ C.W. Hall คือ:

$$Hp = 0.0004 \times cfm \times sp.gr \quad \text{---------- (3)}$$

ซึ่ง Hp คือ จำนวนแรงม้าของมอเตอร์ไฟฟ้า

cfm คือ ปริมาณลมที่เป่าผ่านเมล็ด, ฟุต^3/นาที

sp.gr คือ แรงดันลมผ่านกองข้าวเปลือก, นิ้ว ของระดับน้ำ

การคำนวณแรงดันลม (sp. gr หรือ ΔP) ใช้สูตรของ Hukill and Shedd (1955) คือ

$$\Delta P = AQ^2/\ln(1+B.Q) \quad \text{---------- (4)}$$

ซึ่ง ΔP = แรงดันลมต่อหน่วยความสูงของกองเมล็ดพืช (นิ้วของระดับน้ำ/ฟุต)

Q = ปริมาณลมต่อหน่วยพื้นที่ (ฟุต^3/นาที-ฟุต^2)

A = ค่าคงที่ของข้าวเปลือก = 8.12×10^{-4}

B = ค่าคงที่ของข้าวเปลือก = 6.71×10^{-2}

<u>ตัวอย่างการคำนวณปริมาณลมและแรงม้าของมอเตอร์พัดลม</u>

กำหนดให้ไซโลเก็บข้าวเปลือกขนาด 100 ตัน (D = H = 6 เมตร หรือ 20 ฟุต)

ก) ถ้าเลือกใช้ปริมาณลม 0.22 ม^3/นาที-ตัน โดยให้พัดลมทำงาน 12 ชั่วโมง/วัน

ปริมาณลมที่ต้องใช้ Q = 0.22 ม^3/นาที-ตัน x 100 ตัน x 35.31 ฟุต^3/ม^3

= 776.8 ฟุต^3/นาที

sp.gr = 0.032 นิ้วของระดับน้ำ/ฟุตความสูงกองข้าว

Hp = 0.0004(776.8 x 0.032 x 20)

= 0.201 แรงม้า (ใช้มอเตอร์ 1/3 แรงม้า)

ค่ากระแสไฟฟ้า (3 บาท/หน่วย) = 0.201 x 0.746 x 3 x 12

= 5.40 บาท/วัน

ข) ถ้าเลือกใช้ปริมาณลม 0.44 ม^3/นาที-ตัน โดยให้พัดลมทำงาน 6 ชั่วโมง/วัน

ปริมาณลมที่ต้องใช้ Q = 0.44 ม^3/นาที-ตัน x 100 ตัน x 35.31 ฟุต^3/ม^3

= 1553.6 ฟุต^3/นาที

sp.gr = 0.069 นิ้วระดับน้ำ/ฟุตความสูงกองข้าว

Hp = 0.0004(1553.6 x 0.069 x 20)

= 0.861 แรงม้า (ใช้มอเตอร์ 1 แรงม้า)

ค่ากระแสไฟฟ้า (3 บาท/หน่วย) = 0.861 x 0.746 x 3 x 6

= 11.56 บาท/วัน

ดังนั้นเลือกใช้ ปริมาณลม 0.22 ม^3/นาที-ตัน เป่าลมเป็นเวลา 12 ช.ม./วัน

ตารางผนวก ข1. ผลการคำนวณหาขนาดของต้นกำลังและค่าไฟฟ้า

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไซโล (ม)	20	20	20
ความสูงไซโล (ม)	20	20	20
ความจุ (ตัน)	100	100	100
พัดลมทำงาน (ชม/วัน)	12	8	6
ปริมาณลม ($ม^3$/นาที-ตัน)	0.22	0.33	0.44
ปริมาณลม ($ฟุต^3$/นาที)	776.8	1165.2	1553.6
พื้นที่ยุ้ง ($ฟุต^3$/นาที-$ฟุต^2$)	314.3	314.3	314.3
ปริมาณลมต่อพื้นที่ ($ฟุต^3$/นาที-$ฟุต^2$)	2.472	3.708	4.943
แรงดันลม sp. gr (นิ้วน้ำ/ฟุต)	0.032	0.050	0.069
แรงดันลม (นิ้วน้ำ)	0.647	1.005	1.385
แรงม้า	0.201	0.468	0.861
กำลัง (kw)	0.150	0.349	0.642
ค่าไฟฟ้า (บาท/วัน)	5.40	8.39	11.56

กรมวิชาการเกษตร

ลำดับที่ 2 วิจัยพัฒนาห้องรมควันกำมะถันสำหรับผลลำไยสด

รายงานผลวิจัยเรื่องเต็ม
วิจัยพัฒนาห้องรมควันกำมะถันสำหรับผลลำไยสด

Design and Development of A SO_2 Fumigation Room for Longan

นิทัศน์ ตั้งพินิจกุล　　สิริชัย ส่งเสริมพงษ์
สุภัทร หนูสวัสดิ์　　มนตรี ศิริสูตร

บทคัดย่อ

ได้ออกแบบสร้างห้องรมควันกำมะถันขนาดเล็กสำหรับผลลำไยสด ขนาดกว้าง 1.2 ม. ยาว 4.8 ม. สูง 1.2 ม. ผนังทำด้วยไม้อัด ด้านในบุด้วยฟอร์ไมก้า บรรจุลำไยสดได้ 120 ตะกร้า (1200 กิโลกรัม) โดยจัดตะกร้าลำไยวางเรียงบนชั้นโครงเหล็ก ส่วนประกอบอื่นที่สำคัญคือ พัดลมแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางสำหรับหมุนเวียนอากาศ ใช้มอเตอร์ขนาด ½ แรงม้าเป็นต้นกำลัง เตาเผากำมะถัน และ ชุดบำบัดก๊าซ SO_2 เป็นระบบหมุนเวียนก๊าซขณะบำบัด โดยใช้น้ำปูนขาวเป็นตัวบำบัด ผลการทดสอบห้องรมเปล่าพบว่า เมื่อใช้เตาก๊าซหุงต้มสามารถเผากำมะถันหนัก 0.5 กิโลกรัม ได้หมดในเวลา 15-20 นาที สามารถบำบัดก๊าซ SO_2 ที่ได้จากการเผากำมะถันหนัก 0.2 กิโลกรัมได้หมด ใช้เวลาในการหมุนเวียนบำบัดก๊าซประมาณ 60 นาที ก่อนระบายก๊าซทิ้ง แต่ทำให้ห้องรมเปียกชื้นและเกิดการคืนรูปของควันกำมะถัน เมื่อทำการทดสอบห้องรมที่บรรจุลำไย ปรากฏว่า ฝาด้านบนของตะกร้าลำไยมีคราบสีเหลืองของกำมะถันและเปียกชื้นไปด้วยน้ำ รวมทั้งมีน้ำจับเกาะที่ผลลำไยด้านบนด้วย และเมื่อทำการแก้ไขชุดบำบัดก๊าซ SO_2 ให้เป็นแบบไม่หมุนเวียนโดยปล่อยก๊าซระบายทิ้งทันทีหลังจากผ่านชุดบำบัดก๊าซ SO_2 ปรากฏว่าสามารถแก้ไขปัญหาความชื้นและการคืนรูปของควันกำมะถันได้ แต่ก๊าซที่ระบายทิ้งยังมีความเข้มข้นของ SO_2 สูงอยู่ ต้องทำการแก้ไขปรับปรุงชุดบำบัดก๊าซ SO_2 ให้มีประสิทธิภาพก่อนที่จะนำไปใช้

ทะเบียนวิจัยเลขที่ 42 08 002 004

คำนำ

ลำไยเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของประเทศไทย แต่ลำไยเป็นผลไม้ที่มีอายุการเก็บรักษาที่สั้นมากและเน่าเสียง่าย วิธีการปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวให้สามารถเก็บรักษาลำไยสดได้นานขึ้นใช้วิธีการรมผลลำไยด้วยควันกำมะถันหรือซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และเชื้อรา นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติในการฟอกสี ทำให้เปลือกของผลลำไยดูสดสวยกว่าลำไยที่ไม่ได้รม ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในลำไยสดที่ส่งออกสูงเกินเกณฑ์ที่ประเทศผู้นำเข้ากำหนด สาเหตุอาจเกิดจากห้องรมควันที่ผู้ประกอบการใช้มีการกระจายของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไม่สม่ำเสมอทั่วห้องรมควัน ทำให้ลำไยบางส่วนมีปริมาณสารตกค้างที่มากเกินไป หรืออาจเกิดจากวิธีการรมควันไม่ถูกต้อง ผู้ประกอบการใช้สารกำมะถันในปริมาณมากเกินไป เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาให้นานขึ้น นอกจากนี้ปัญหาซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เหลือจากการรมซึ่งปล่อยสู่บรรยากาศทำให้เกิดปัญหาสภาพแวดล้อม ดังนั้นจึงได้ทำการวิจัยพัฒนาห้องรมควันกำมะถันสำหรับผลลำไยสด เพื่อศึกษาวิธีการรมควันลำไยที่ถูกต้อง รวมทั้งศึกษาวิธีการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในห้องรมควันหลังเสร็จสิ้นการรม เพื่อเผยแพร่ให้แก่ผู้ประกอบการรมควันกำมะถัน

วัตถุประสงค์

เพื่อวิจัยและพัฒนาห้องรมควันกำมะถันสำหรับผลลำไยสดและศึกษากรรมวิธีการรมควันซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ถูกต้อง

วิธีดำเนินการ

1. ศึกษาสำรวจข้อมูลจากเอกสารและโรงรมควันกำมะถัน
2. ออกแบบและสร้างห้องรมควันกำมะถัน
3. ทดสอบการทำงานของห้องรมเบื้องต้น
4. ทดสอบห้องรมเปล่า
5. ทดสอบห้องรมบรรจุลำไย
6. ปรับปรุงแก้ไขห้องรม
7. วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์
8. สรุปผลการทดลอง

ระยะเวลาและสถานที่ดำเนินการ

ตุลาคม 2541 ถึง กันยายน 2543

กลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี

โรงรมควันกำมะถันในเขตจังหวัดลำพูน เชียงใหม่

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. การศึกษาสำรวจข้อมูลจากเอกสารและโรงรมควันกำมะถัน

ศิริพงษ์ (2542) สรุปบทบาทของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วท.) ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ในอุตสาหกรรมการส่งออกลำไยสดไว้ดังนี้ ในปี พ.ศ. 2525-2528 ได้เริ่มทดลองค้นคว้าวิธีการยืดอายุการเก็บรักษาลำไยสด พ.ศ. 2531-2538 ได้ทำการศึกษาวิจัยวิธีการใช้ควันกำมะถันหรือ SO_2 รมผลลำไยสดเพื่อการส่งออกและพัฒนาสูตรการรม SO_2 ได้เป็นผลสำเร็จ จัดให้มีการถ่ายทอดเทคโนโลยีอย่างกว้างขวาง และได้มีการส่งออกลำไยที่ผ่านกระบวนการรมด้วย SO_2 ไปต่างประเทศเป็นเที่ยวแรกและประสบผลสำเร็จในเวลาต่อมา ในปี พ.ศ. 2542 สถาบันอาหารและกรมวิชาการเกษตรได้ร่วมกันดำเนินการศึกษา ออกแบบและจัดทำแบบแปลนห้องรมควันมาตรฐาน และเครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิต มีขนาดบรรจุลำไยสดได้ประมาณ 9.5 ตัน และศูนย์ผลักดันสินค้าเกษตรเพื่อการส่งออก ได้ดำเนินการจัดสร้างโรงรมควันลำไยขึ้น (รูปที่ 1) จำนวน 5 โรง อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ต่างๆของห้องรมนี้มีราคาค่อนข้างสูงเนื่องจากทำด้วยสแตนเลส โดยเฉพาะระบบบำบัดก๊าซ จากการศึกษาดูงานพบว่าก๊าซที่ระบายออกสู่บรรยากาศหลังผ่านระบบบำบัดก๊าซยังมีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์หลงเหลืออยู่มาก

สดศรี (2542) ได้สรุปผลงานวิจัยเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้ SO_2 กับผลตกค้างของ SO_2 ภายในผลลำไยที่สรุปจากหลายชุดการทดลอง ไว้ในตารางต่อไปนี้

ผลตกค้างของ SO_2 (ppm)			
อัตราการใช้ (ml/100g)	เปลือก	เนื้อ	หมายเหตุ
15	1200	0 – 5	ต่ำเกินไป
20 – 25	1500 – 2200	< 10	อัตราที่แนะนำ
30	2200 – 3200	10 - 30	อัตราสูงสุดที่จะนำไปใช้
35	> 3200	> 30	สูงเกินไป

การรม SO_2 กับลำไยในอัตราที่เหมาะสมสามารถควบคุมการเจริญเติบโตของเชื้อราระหว่างการขนส่งและยืดอายุการเก็บรักษาได้นาน 4 ถึง 6 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิ 0 ถึง 2°ซ หรือ 5 ถึง 10 วัน ที่อุณหภูมิ 22°ซ และที่สำคัญที่สุดสามารถทำให้ลำไยมีอายุการวางจำหน่าย 2 ถึง 3 วัน ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 30°ซ

เนื่องจากก๊าซ SO_2 เป็นพิษทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ สัตว์ พืช และสิ่งมีชีวิตต่างๆ อย่างมาก หากมีความเข้มข้นมาก ๆ จะทำให้เกิดฝนกรดซึ่งมีผลกระทบต่อนิเวศน์อย่างสูง ความเข้มข้น 6 - 10 ppm ทำให้เกิดอาการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ ความเข้มข้นตั้งแต่ 20 ppm ทำให้ตาเกิดอาการระคายเคือง ลักษณะการเป็นพิษจะรุนแรงมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของก๊าซเพิ่มขึ้น (ศิริ

พงษ์ 2542) หลังการรมลำไยด้วย SO_2 ก๊าซที่เหลืออยู่ภายในห้องรมยังมีความเข้มข้นสูงเหลืออยู่ประมาณ 15000 ppm จึงต้องทำการกำจัดก๊าซเสียก่อนที่จะนำลำไยออกจากห้องรม และก่อนที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศ เพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อสุขภาพ และเกิดมลภาวะต่อสภาพแวดล้อม

จากการศึกษาดูงานโรงรมควันกำมะถันและวิธีปฏิบัติของเอกชน พบว่า มีการใช้กำมะถันในปริมาณที่สูงกว่าคำแนะนำตามเอกสารวิชาการของ วท. ทั้งนี้ผู้ประกอบการให้เหตุผลว่าระยะเวลาในการขนส่งแตกต่างกัน อีกสาเหตุหนึ่งผู้ประกอบการอ้างว่าฤดูกาลมีผลต่อการดูดซึมก๊าซ SO_2 เนื่องจากผลผลิตมีคุณภาพและลักษณะเปลือกแตกต่างกัน การจัดวางเรียงตะกร้าลำไยในห้องรมมี 3 ลักษณะคือ วางเรียงบนพื้น วางเรียงบนแพลเล็ทไม้ และวางเรียงบนชั้นโครงเหล็ก (รูปที่ 2) พัดลมกวนอากาศให้หมุนเวียนมีอยู่ 2 แบบคือ แบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางซึ่งจะติดตั้งอยู่ภายนอกห้องรม และแบบไหลตามแกนซึ่งจะติดตั้งอยู่ภายในห้องรม (รูปที่ 3) ห้องเผากำมะถันมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ ห้องเผากำมะถันอยู่ภายในห้องรมควัน และห้องเผากำมะถันอยู่ภายนอกห้องรมควัน (รูปที่ 4) การเผากำมะถันส่วนใหญ่ใช้เตาแก๊สหุงต้ม มีบางโรงใช้เตาไฟฟ้า (รูปที่ 5) นอกจากนี้บางโรงมีการเติมก๊าซออกซิเจนจากถังเพื่อช่วยในการเผาไหม้ (รูปที่ 6) ระยะเวลาการเผากำมะถันประมาณ 30 – 50 นาที รวมระยะเวลาการรมควันประมาณ 1 ชั่วโมง ถึง 1 ชั่วโมง 15 นาที เมื่อสิ้นสุดการรมควันอากาศภายในห้องจะถูกระบายออกด้วยพัดลมซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบบแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ผ่านไปยังหอบำบัดก๊าซโดยมีการฉีดพ่นละอองน้ำหรือน้ำปูนขาวให้ทำปฏิกริยากับ SO_2 ก่อนระบายอากาศทิ้ง (รูปที่ 7) และมีบางโรงระบายอากาศทิ้งโดยไม่มีการบำบัดก๊าซ อย่างไรก็ตามวิธีการบำบัดก๊าซที่ใช้ยังมีประสิทธิภาพต่ำ อากาศที่ระบายทิ้งยังคงมี SO_2 หลงเหลืออยู่ในปริมาณสูง ระยะเวลาในการบำบัดประมาณ 10 – 20 นาที เมื่อสิ้นสุดการบำบัดก๊าซพบว่า ภายในห้องรมควันยังคงมีกลิ่นฉุนค่อนข้างแรงของ SO_2 หลงเหลืออยู่ จากนั้นลำเลียงตะกร้าลำไยออกจากห้องรมมาตั้งไว้และใช้พัดลมเป่าไล่ก๊าซที่ตกค้างอยู่ออก ก่อนจะลำเลียงขึ้นรถห้องเย็น

2. การออกแบบและสร้างห้องรมควันกำมะถัน

ห้องรมควันกำมะถันสำหรับผลลำไยสด ที่ได้ออกแบบและสร้างเป็นห้องขนาดเล็กเพื่อความสะดวกในการศึกษาวิธีการรมควันและเคลื่อนย้ายไปทดสอบในพื้นที่ ซึ่งเมื่อได้ผลแล้วสามารถขยายขนาดได้ตามความเหมาะสม (รูปที่ 8) มีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1) ห้องรมควันกำมะถัน มีขนาดกว้าง 1.2 ม. ยาว 4.8 ม. สูง 1.2 ม. คิดเป็นปริมาตรเท่ากับ 6.91 $ม^3$ และมีอัตราส่วนที่ว่างหรือ อัตราส่วนของปริมาตรลำไยต่อปริมาตรห้องเท่ากับ 1 : 5.8 โดยอัตราส่วนที่ว่างตามคำแนะนำสำหรับห้องรมควันกำมะถันขนาดเล็กประมาณ 1 : 6 (สัมพันธ์ 2535) ผนังห้องทำด้วยไม้อัดยึดติดกับกรอบโครงเหล็ก ด้านในบุด้วยแผ่นฟอร์ไมก้าเพื่อป้องกันการดูดซึมก๊าซ อุดแนวต่อรอยรั่วต่างๆ ภายในด้วยซิลิโคน ด้านหน้าติดตั้งประตู ด้านหลังห้องติดตั้งกระโจมรวมลมต่อเข้ากับ

พัดลม ห้องรมบรรจุลำไยสดได้ 120 ตะกร้า (น้ำหนักบรรจุลำไยสด 10 กก. ต่อตะกร้า) โดยจัดตะกร้าลำไยวางเรียงบนชั้นโครงเหล็กทาสี

2) พัดลมหมุนเวียนอากาศ เป็นแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ใบพัดตรง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด 0.25 ม. กว้าง 0.10 ม.ทำด้วยสเตนเลส ใช้มอเตอร์ขนาด ½ แรงม้าเป็นต้นกำลัง ทำหน้าที่หมุนเวียนอากาศภายในระบบ และระบายอากาศทิ้งหลังการบำบัดก๊าซ

3) ห้องเผากำมะถัน ได้ออกแบบให้ติดตั้งอยู่ภายนอกห้องรม มีลักษณะเป็นถังทรงกระบอกทำด้วยสเตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.18 ม. และสูง 0.24 ม. ด้านบนเป็นฝาปิดเปิดสำหรับใส่กำมะถัน ด้านข้างถังมีท่อ 2 ท่อ ด้านหนึ่งเป็นท่ออากาศเข้าและอีกท่อหนึ่งเป็นท่อก๊าซออก โดยออกแบบให้อากาศที่ผ่านพัดลมเพียงบางส่วนไหลผ่านห้องเผากำมะถัน ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิภายในห้องรมไม่สูงเกินไป ในการเผากำมะถันใช้เตาแก๊สหุงต้ม โดยปริมาณกำมะถันที่ใช้สำหรับรมลำไยสด 120 ตะกร้า เท่ากับ 0.5 กก. (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก.)

4) ชุดบำบัดก๊าซ SO_2 ใช้น้ำปูนขาวเป็นตัวบำบัด ประกอบด้วย ห้องบำบัดก๊าซภายในติดตั้งหัวฉีด ไซโคลนดักละอองน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.24 ม. และสูง 0.70 ม ถังน้ำปูนขาว และปั๊มน้ำขับด้วยมอเตอร์ขนาด ½ แรงม้า

5) ท่อนำก๊าซ เป็นท่อพีวีซี ขนาด 4 นิ้ว ต่อเชื่อมส่วนประกอบต่าง ๆ เข้าด้วยกัน

6) ชั้นโครงเหล็กวางตะกร้าลำไย ทำด้วยเหล็กกล่องทาสีป้องกันสนิม จำนวน 4 ชุด แต่ละชุดวางตะกร้าลำไยได้ 30 ตะกร้า

แผนผังการทำงานของห้องรมควันกำมะถันที่มีระบบบำบัด SO_2 แบบหมุนเวียนอากาศแสดงไว้ในรูปที่ 9 หลังจากจัดเรียงตะกร้าลำไยบนชั้นโครงเหล็กและลำเลียงเข้าห้องรมควัน ปิดประตูให้แน่น จุดเตาแก๊สหุงต้มเพื่อทำการเผากำมะถัน เปิดพัดลมให้ก๊าซหมุนเวียน อากาศจากห้องรมและควันกำมะถันจากห้องเผากำมะถันจะถูกพัดลมดูดผสมกัน และเป่าไปตามท่อ ผ่านชุดบำบัด SO_2 ซึ่งขณะนี้ยังไม่ทำงาน ผ่านไซโคลน ไหลผ่านเข้าไปในห้องรม และหมุนเวียนภายในระบบตลอดเวลา หลังจากกำมะถันเผาไหม้หมดทำการรมต่อไปอีก 30 นาที เมื่อการรมควันเสร็จสิ้น ทำการเปิดปั๊มพื่อบำบัดก๊าซ SO_2 ปั๊มจะดูดน้ำปูนขาวที่มีซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่างจากถังน้ำปูนขาวและพ่นออกทางหัวฉีดเป็นฝอย ทำปฏิกริยากับก๊าซ SO_2 ได้ยิปซั่มซึ่งมีฤทธิ์เป็นกลาง จากนั้นก๊าซจะไหลผ่านเข้าไซโคลนเพื่อดักน้ำและละอองน้ำไหลกลับลงสู่ถังน้ำปูน ส่วนก๊าซที่ออกจากไซโคลนจะไหลกลับเข้าห้องรม และถูกพัดลมหมุนเวียนเข้าชุดบำบัดก๊าซ อีกจนกว่าก๊าซ SO_2 หมดฤทธิ์ความเป็นกรด จากนั้นจึงปิดปั๊มน้ำและลำเลียงลำไยออกจากห้องรม

3. การทดสอบการทำงานของห้องรมเบื้องต้น

เป็นการทดสอบการทำงานของส่วนประกอบต่าง ๆ ของห้องรมเพื่อหาจุดบกพร่องและทำการแก้ไข รวมทั้งหาข้อมูลการใช้งาน

3.1 การทดสอบหาปริมาณลมของพัดลมหมุนเวียนอากาศ

ผลการทดสอบพัดลมเปล่าพบว่าได้ปริมาณลม 6.5 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที และเมื่อติดตั้งพัดลมเข้ากับระบบ วัดปริมาณลมได้ 2.2 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที ซึ่งคำนวณเป็นความเร็วลมในห้องรมได้ 1.53 เมตรต่อนาที หรือ 0.025 เมตรต่อวินาที

3.2 การทดสอบหาระยะเวลาการเผาไหม้กำมะถัน

ระยะเวลาการเผาไหม้กำมะถันให้กลายเป็นก๊าซ SO_2 หมด ขึ้นอยู่กับปริมาณกำมะถัน แหล่งความร้อน ปริมาณความร้อนที่ใช้ และ ปริมาณออกซิเจนในห้องเผา ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณลม หรือความเร็วลมที่ผ่านห้องเผา จากการคำนวณปริมาณออกซิเจนในห้องรม พบว่ามีน้ำหนัก 1.37 กก. ซึ่งมากเพียงพอต่อการเผาไหม้กำมะถัน 0.5 กก. (ภาคผนวก ก.) ขั้นตอนการเผากำมะถันมีดังนี้ คือ เทกำมะถันผงหนัก 0.5 กิโลกรัมลงในห้องเผาเติมแอลกอฮอล์ลงไปเล็กน้อยประมาณ 10 ซีซี เพื่อช่วยในการเผาไหม้ตอนเริ่มต้น ทำการจุดไฟและปิดฝาห้องเผาให้สนิท เปิดพัดลมหมุนเวียนอากาศและติดไฟเตาแก๊ส ผลการทดสอบปรากฏว่า สามารถเผากำมะถันได้ดีและหมด ในเวลาประมาณ 32 นาทีเมื่อใช้เตาไฟฟ้าขนาด 600 วัตต์ และใช้เวลาประมาณ 15 - 20 นาที เมื่อใช้เตาแก๊สหุงต้ม เมื่อเผากำมะถันหมดอุณหภูมิภายในห้องรมสูงขึ้นประมาณ 3 – 5 °ซ เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม เนื่องจากห้องรมเป็นระบบปิดเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความดันภายในห้องรมเพิ่มสูงขึ้นตาม ส่งผลให้ก๊าซ SO_2 สามารถแทรกซึมเข้าไปในตะกร้าลำไยได้ดีขึ้น ในกรณีนี้ปริมาณลมของพัดลมจึงมีความสำคัญไม่มากนัก แต่มีความสำคัญในด้านหมุนเวียนก๊าซ SO_2 ที่พ่นเข้าห้องรมให้กระจายสม่ำเสมอไปทั่วห้อง

3.3 การทดสอบชุดบำบัดก๊าซ SO_2

ในการทดสอบชุดบำบัดก๊าซ SO_2 ได้มีการทดลองใช้หัวฉีดหลายแบบเช่น หัวฉีดพ่นสารเคมีทำด้วยทองเหลืองและพลาสติก ท่อพีวีซีเจาะรูขนาดต่าง ๆ เป็นต้น โดยเบื้องต้นสังเกตจากความละเอียดของละอองน้ำ จากนั้นนำไปติดตั้งในชุดบำบัดก๊าซและทำการทดสอบหาระยะเวลาในการบำบัดก๊าซ SO_2 ที่ได้จากการเผากำมะถัน 0.2 กก. (จากภาคผนวก ก. ปริมาณก๊าซ SO_2 ที่เหลือในห้องรมหลังเสร็จสิ้นการรมควัน 220 กรัม เมื่อคำนวณเป็นปริมาณกำมะถันเท่ากับ 0.11 กก.) และใช้ปูนขาว 1 ถุง น้ำหนักประมาณ 3–3.5 กก. ละลายในน้ำ 35 ลิตร ซึ่งอัตราปูนขาวละลายน้ำตามคำแนะนำประมาณ 5 - 15% (สัมพันธ์ 2535) ผลการทดสอบพบว่าหัวฉีดพ่นสารเคมีทำด้วยทองเหลืองจำนวน 8 หัว ให้ละอองน้ำละเอียดดี ใช้เวลาหมุนเวียนบำบัดก๊าซได้หมดประมาณ 45-60 นาที ขณะที่หัวฉีดที่ทำด้วยท่อพีวีซีขนาด 20 มม. (¾ นิ้ว) เจาะรู 2 มม. จำนวน 16 รู ใช้เวลา 55-75 นาที แต่หัวฉีดพ่นสารเคมีเกิดปัญหาการอุดตันบ่อย จึงเลือกใช้หัวฉีดที่ทำด้วยท่อพีวีซีเจาะรูซึ่งทำได้ง่ายและมีราคาถูกในการทดลอง การ

หมุนเวียนก๊าซสามารถบำบัด SO_2 ได้หมด แต่มีผลทำให้ภายในห้องรมเปียกชื้นและต้องใช้เวลานานในการบำบัดก๊าซ

ในการทดลองได้ใช้ปูนขาวจาก 2 ร้านพบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซ SO_2 แตกต่างกัน ปูนขาว ก จำนวน 1 ถุง น้ำหนักประมาณ 3.5 กก. ละลายในน้ำ 35 ลิตร มีค่า pH ประมาณ 11-12 นำไปใช้บำบัดก๊าซ SO_2 ที่ได้จากการเผากำมะถัน 0.2 กก.ได้หมดใช้เวลา 60 นาที โดยเมื่อการบำบัดก๊าซสิ้นสุด น้ำปูนขาวมีค่า pH ลดลงเหลือ 7 ขณะที่ปูนขาว ข จำนวน 1 ถุง น้ำหนักประมาณ 3 กก. ละลายในน้ำปริมาณเท่ากัน มีค่า pH ประมาณ 13 พบว่า มีประสิทธิภาพดีกว่า ใช้เวลาในการบำบัดก๊าซ 45 นาที และค่า pH ลดลงเหลือ 12 เมื่อการบำบัดก๊าซสิ้นสุด จากการที่น้ำปูนขาว ข. ยังมีฤทธิ์ความเป็นด่างสูงอยู่ จึงได้ลองนำมาใช้บำบัดก๊าซ SO_2 อีกรอบหนึ่ง ปรากฏว่า ค่า pH ลดลงเหลือ 7 หลังจากทำการบำบัดก๊าซไปได้เพียง 10 นาที และเมื่อเวลาการบำบัดก๊าซผ่านไป 25 นาที ค่า pH ลดลงเหลือ 4 น้ำปูนขาวมีกลิ่นเปรี้ยวของกรดและน้ำปูนขาวเปลี่ยนเป็นสีเหลือง

เนื่องจากมีปัญหาการอุดตันของหัวฉีด จึงได้ทำการทดลองปล่อยให้น้ำปูนขาวตกตะกอนและกรองแยกสิ่งเจือปนออกไป จากนั้นนำเฉพาะส่วนน้ำปูนใสไปใช้ทดลองบำบัดก๊าซ SO_2 ปรากฏว่า น้ำปูนขาวมีค่า pH ลดลงจนหมดฤทธิ์ความเป็นด่างกลายเป็นกรดในเวลาอันสั้น ผลจากการทดลองนี้ทำให้ทราบว่าขณะทำการบำบัดก๊าซจำเป็นต้องกวนน้ำปูนขาวในถังตลอดเวลา มิเช่นนั้นแล้วน้ำปูนขาวที่ปั๊มดูดขึ้นไปอาจมีฤทธิ์เป็นกรดทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง

จากการคำนวณปริมาณปูนขาว (CaO) ที่ต้องใช้ในการบำบัดก๊าซ SO_2 ที่ได้จากการเผากำมะถัน 0.2 กก. มีน้ำหนักเพียง 0.35 กก. เท่านั้น (ภาคผนวก ข.) แต่จากผลการทดลอง พบว่า ต้องใช้ปูนขาว 1 ถุง น้ำหนักประมาณ 3 –3.5 กก. จึงจะสามารถใช้บำบัดก๊าซ SO_2 ปริมาณดังกล่าวได้ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปูนขาวที่นำมาใช้มีปริมาณ CaO ที่ค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้ปูนขาวบางส่วนเป็นก้อนแข็งไม่ละลายน้ำและมีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก ในการใช้งานต้องมีการกรองแยกเอาสิ่งเจือปนออกเพื่อป้องกันมิให้หัวฉีดเกิดการอุดตัน

4. การทดสอบห้องรมเปล่า

การทดสอบห้องรมเปล่า เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของก๊าซภายในห้องรม และ %ความคลาดเคลื่อนของก๊าซ SO_2 โดยทำการเก็บตัวอย่างก๊าซภายในห้องรมมาวิเคราะห์หาความเข้มข้น ซึ่งวิธีการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ค.

ความคลาดเคลื่อนของก๊าซ SO_2 คือปริมาณก๊าซ SO_2 สูงสุดที่วัดได้แตกต่างจากปริมาณก๊าซ SO_2 ที่ได้จากการคำนวณ โดย วท. แนะนำว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของก๊าซ SO_2 ไม่ควรเกิน 30% ถ้ามีค่าสูงเกินไป หมายถึงห้องรมมีการรั่วของก๊าซสูง ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพการรมควัน ต้องทำการปรับปรุงแก้ไข

ผลการทดสอบห้องรมเปล่าในเบื้องต้น (ตารางที่ 1) พบว่า เมื่อใช้เตาแก๊สหุงต้มสามารถเผากำมะถัน 0.5 กิโลกรัม ได้หมดในเวลา 15-20 นาที ความคลาดเคลื่อนของก๊าซ SO_2 ในการทดลองครั้งที่ 1 สูงถึง 55.8% สาเหตุเนื่องจากมีการรั่วของก๊าซตรงเพลาพัดลม จึงได้ทำการแก้ไข ในการทดลองครั้งที่ 2 ความคลาดเคลื่อนของก๊าซ SO_2 เท่ากับ 20.8% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (วท. แนะนำไม่ควรเกิน 30%) แต่ในการทดลองครั้งที่ 3 ความคลาดเคลื่อนของก๊าซ SO_2 กลับสูงขึ้นเท่ากับ 46.9% ซึ่งเข้าใจว่าสาเหตุอาจเนื่องมาจากการใช้สารเคมีที่ใช้วิเคราะห์หาปริมาณก๊าซ SO_2 เสื่อมคุณภาพ จึงได้เปลี่ยนสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ใหม่ แต่ผลการวิเคราะห์ยังคงมีค่าความคลาดเคลื่อนของก๊าซ SO_2 สูงอยู่เท่ากับ 50.2% (รูปที่ 10) สำหรับสาเหตุที่แท้จริงที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนของก๊าซ SO_2 มีค่าสูง เกิดจากการคืนรูปของควันกำมะถันเมื่อสัมผัสกับอากาศชื้น ทำให้ความเข้มข้นของ SO_2 ภายในห้องรมลดลง ทั้งนี้เนื่องจากในการบำบัด SO_2 แบบหมุนเวียนก๊าซทำให้อากาศภายในห้องรมชื้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากความเข้มข้นของก๊าซที่เก็บจากตำแหน่งต่างๆภายในห้องรมจำนวน 3 จุด พบว่าการกระจายตัวของก๊าซภายในห้องรมควันยังไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้เกิดจากอุปกรณ์ที่ใช้ดูดตัวอย่างก๊าซ SO_2 ที่ใช้ปั๊มอากาศตู้ปลาขนาดเล็ก เกิดการอุดตันของควันกำมะถันที่คืนรูปเป็นของแข็ง เป็นผลให้การดูดก๊าซไม่สม่ำเสมอ

5. การทดสอบห้องรมบรรจุลำไย

การทดสอบห้องรมควันบรรจุลำไย เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของการรม ปริมาณสารตกค้างในผลลำไย โดยการเก็บตัวอย่างก๊าซภายในห้องมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นขณะทำการรมและเมื่อการรมเสร็จสิ้น เก็บตัวอย่างลำไยมาวิเคราะห์หาปริมาณสารตกค้าง ในการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของก๊าซ SO_2 และปริมาณสาร SO_2 ตกค้างในผลลำไย ได้รับความอนุเคราะห์จากกองวัตถุมีพิษเป็นผู้ดำเนินการให้ โดยวิธีการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ง.

ผลการทดสอบห้องรมควันบรรจุลำไย 120 ตะกร้า โดยได้รับความอนุเคราะห์ตัวอย่างลำไยจากโรงรมควันแห่งหนึ่ง และเผากำมะถันในปริมาณ 0.96 กก. ซึ่งเป็นอัตราการใช้กำมะถันเดียวกับที่ทางโรงรมแห่งนี้ใช้อยู่ ปรากฏว่า เผากำมะถันหมดในเวลา 30 นาที รมต่อไปจนครบ 60 นาที และทำการบำบัดก๊าซโดยให้หมุนเวียนอีก 25 นาที ก่อนระบายก๊าซทิ้ง ลำไยที่ออกมามีสีซีดจัดเนื่องจากใช้กำมะถันมากเกินไป ฝาด้านบนของตะกร้าลำไยมีคราบสีเหลืองของกำมะถันและเปียกชื้นไปด้วยน้ำ รวมทั้งมีน้ำจับเกาะที่ผลลำไยด้านบนด้วย ทั้งนี้เป็นเพราะภายในระบบและห้องรมควันมีความชื้น ทำให้ควันกำมะถันเกิดการคืนรูปกลายเป็นของแข็ง จับอยู่ตามฝาตะกร้า พื้น และส่วนต่าง ๆภายในระบบ ความเข้มข้นของ SO_2 ภายในห้องรมควันแสดงในรูปที่ 11 ปริมาณสาร SO_2 ตกค้างในผลลำไยหลังการรมควัน ในเปลือกมีค่าเฉลี่ย 1518 ppm และลดลงเหลือ 63 ppm หลังเก็บไว้ 1 วัน แต่ไม่พบในเนื้อลำไย (ตารางที่ 2)

6. การปรับปรุงแก้ไขห้องรม

จากผลการทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าการที่เปอร์เซนต์คลาดเคลื่อนของ SO_2 มีค่าสูงในการทดลองก่อนหน้านี้ มีสาเหตุมาจากการคืนรูปของควันกำมะถันเมื่อสัมผัสกับอากาศชื้น ทำให้ความเข้มข้นของ SO_2 ที่วิเคราะห์ได้ต่ำเกินไป จึงได้ทำการปรับปรุงห้องรมควันใหม่ โดยขณะทำการรมควันก๊าซหมุนเวียนจะไม่ผ่านชุดบำบัดก๊าซ SO_2 เพื่อหลีกเลี่ยงอากาศชื้น และเปลี่ยนระบบการบำบัดก๊าซ SO_2 เป็นแบบไม่หมุนเวียนอากาศ โดยอากาศที่ผ่านชุดบำบัดจะถูกระบายทิ้งเลย ไม่เวียนกลับมาบำบัดอีก ดังแสดงในรูปที่ 13 นอกจากนี้ได้เปลี่ยนอุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซ SO_2 จากเดิมใช้ปั๊มอากาศตู้ปลาขนาดเล็ก ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากในการทดสอบที่ผ่านมาพบว่าปั๊มอากาศตู้ปลาขนาดเล็กทำงานไม่ค่อยสม่ำเสมอ ผลการทดสอบห้องรมเปล่าพบว่า สามารถแก้ไขปัญหาความชื้นและการคืนรูปของควันกำมะถันได้ สภาพห้องรมควันแห้งและมีเขม่าเหลืองของกำมะถันจับที่พื้นน้อยมาก ก๊าซมีการกระจายตัวสม่ำเสมอดี และมีความคลาดเคลื่อนของ SO_2 อยู่ในเกณฑ์ โดยตรวจวัดได้ 24.1% (รูปที่ 12) แต่ก๊าซที่ระบายทิ้งยังมีความเข้มข้นสูงอยู่ ต้องทำการแก้ไขปรับปรุงชุดบำบัดก๊าซ SO_2 ให้มีประสิทธิภาพก่อนที่จะนำไปใช้

7. การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์โดยหาจุดคุ้มทุนของการใช้ห้องรมควันกำมะถันสำหรับลำไยสด โดยมีรายได้จากการรับจ้างรม จากการประมาณการต้นทุนการผลิต ค่าวัสดุ ค่าแรงรวมผลกำไร ห้องรมควันกำมะถันมีราคาประมาณ 40,000 บาท วิธีการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนแสดงไว้ในภาคผนวก จ ผลวิเคราะห์จุดคุ้มทุนเท่ากับ 2019 ตะกร้า/ปี หรือ 17 รอบ/ปี ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายในรม 2.13 บาท/ตะกร้า ระยะเวลาการคืนทุนของของห้องรมเมื่อทำการรมลำไยจำนวน 90 รอบต่อปี หรือ 10800 ตะกร้าต่อปี (ความจุห้องรม 120 ตะกร้า) เท่ากับ 1.16 ปี

สรุปผลการทดลองและแนะนำ

ห้องรมควันกำมะถันต้องมีพัดลมหมุนเวียนหรือกวนอากาศติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสมและมีปริมาณลมที่เพียงพอเพื่อให้มีการกระจายของก๊าซทั่วห้องอย่างสม่ำเสมอ จากการศึกษาพบว่าปริมาณลมนี้มีผลน้อยต่อการแทรกซึมของก๊าซ SO_2 เข้าไปในตะกร้าลำไย ทั้งนี้เพราะการเผากำมะถันทำให้อุณหภูมิในห้องรมสูงขึ้น เป็นผลให้ความดันภายในห้องรมเพิ่มสูงขึ้นตาม ส่งผลให้ก๊าซ SO_2 สามารถแทรกซึมเข้าไปในตะกร้าลำไยได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าอุณหภูมิภายในห้องรมสูงขึ้นมากเกินไปจากการเผากำมะถันอาจมีผลต่อคุณภาพของลำไยสด ดังนั้นจึงควรติดตั้งห้องเผากำมะถันให้อยู่ภายนอกห้องรม และให้อากาศเพียงบางส่วนและมีปริมาณเพียงพอต่อการเผาไหม้กำมะถันผ่านเข้าห้องเผากำมะถัน

ปัญหาที่สำคัญในการรมลำไยด้วย SO_2 และควรได้รับการแก้ไขเร่งด่วน คือการบำบัดก๊าซก่อนระบายทิ้งซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำ ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชน ระบบบำบัด SO_2 แบบหมุนเวียนอากาศขณะบำบัดโดยใช้น้ำปูนขาวสามารถกำจัด SO_2 ได้หมด แต่มีผลเสียทำให้ห้องรมและลำไยเปียกชื้น เกิดการคืนรูปของควันกำมะถัน และทำให้ความเข้มข้นของ SO_2 ลดลง การบำบัด SO_2 แบบไม่หมุนเวียนอากาศซึ่งเป็นวิธีปกติที่ใช้อยู่ทั่วไป ควรหมั่นตรวจความเป็นกรด-ด่างของน้ำปูนขาว โดยใช้กระดาษลิตมัสวัดค่า pH หรือใช้วิธีดมกลิ่นหรือสังเกตสีของน้ำปูนขาว ถ้ามีกลิ่นเปรี้ยวของกรดหรือน้ำปูนขาวเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ต้องทำการเปลี่ยนน้ำและเติมปูนขาวใหม่ นอกจากนี้ขณะบำบัดก๊าซจำเป็นต้องกวนน้ำปูนในถังหรือบ่อน้ำปูนเพื่อให้การบำบัดก๊าซมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณบริษัท TCK Food and Fruits บริษัท พ. มงคล และบริษัท เอกซตร้าอโกรคอร์ปอเรชัน ที่อำนวยความสะดวกเอื้อเฟื้อสถานที่และตัวอย่างในการทดลอง รวมทั้งข้อมูลข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

กรมวิชาการเกษตร

เอกสารอ้างอิง

ชิงชิง ทองดี 2535. การปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวและการรมควันซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในลำไยสดเพื่อการส่งออก. เอกสารประกอบการประชุมเรื่องการรมควันซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับลำไยสดหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อการส่งออก. 18 มีนาคม 2538 ณ โรงแรมรามาการ์เด้นส์ กรุงเทพฯ

มานัส แจ่มจำรูญ 2542. การวิเคราะห์ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอากาศ. เอกสารประกอบการฝึกอบรมเรื่องการตรวจและรับรองโรงรมควันลำไยสดด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์. 29 มิถุนายน - 2 กรกฎาคม 2542 ณ โรงแรมเชียงใหม่ออร์คิด เชียงใหม่

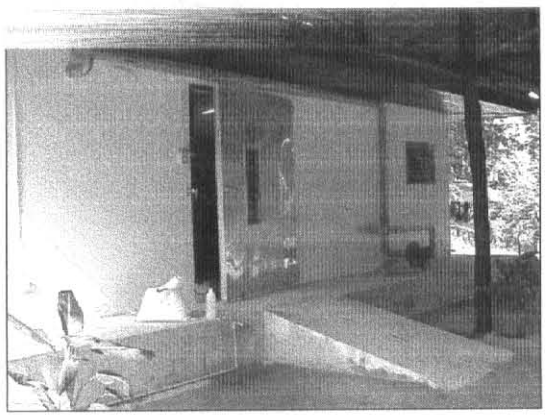
สดใส เนียมเปรม 2542. ขั้นตอนการปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวลำไยเพื่อการส่งออก. เอกสารประกอบการฝึกอบรมเรื่องการตรวจและรับรองโรงรมควันลำไยสดด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์. 29 มิถุนายน - 2 กรกฎาคม 2542 ณ โรงแรมเชียงใหม่ออร์คิด เชียงใหม่

สัมพันธ์ ศรีสุริยวงษ์. 2535. กระบวนการควบคุมการรมควันลำไยด้วย SO_2 และการกำจัดก๊าซ SO_2 ที่เหลือจากห้องอบ. เอกสารประกอบการฝึกอบรมเรื่องการรมควันซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับลำไยสดหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อการส่งออก. 18 มีนาคม 2535 ณ โรงแรมรามาการ์เด้นส์ กรุงเทพฯ

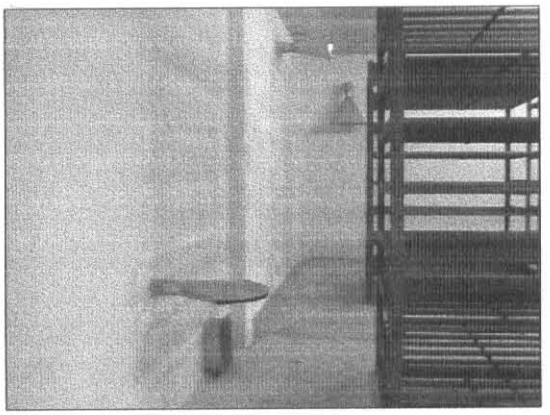
ศิริพงษ์ พัฒนวิบูลย์ 2542. บทบาทของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วท.) ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมการส่งออกลำไยสด. เอกสารประกอบการฝึกอบรมเรื่องการตรวจและรับรองโรงรมควันลำไยสดด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์. 29 มิถุนายน - 2 กรกฎาคม 2542 ณ โรงแรมเชียงใหม่ออร์คิด เชียงใหม่

ศิริพงษ์ พัฒนวิบูลย์. 2542. ผลกระทบของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อสิ่งแวดล้อม. เอกสารประกอบการฝึกอบรมเรื่องการตรวจและรับรองโรงรมควันลำไยสดด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์. 29 มิถุนายน - 2 กรกฎาคม 2542 ณ โรงแรมเชียงใหม่ออร์คิด เชียงใหม่

กรมวิชาการเกษตร



(ก)



(ข)

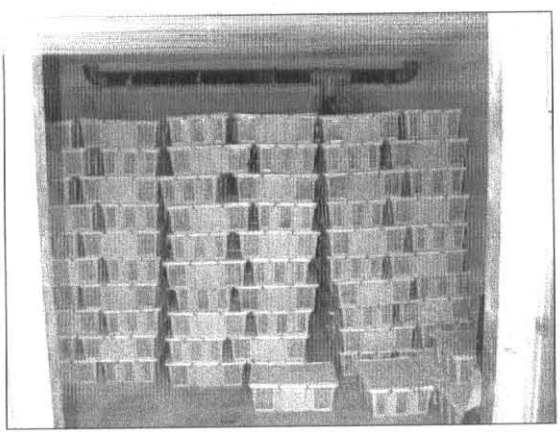
(ค)

(ง)

(จ)

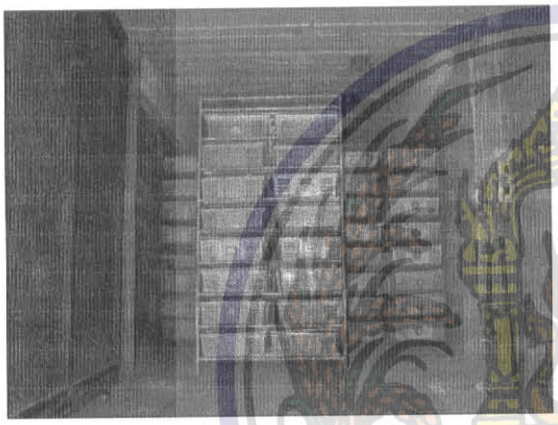
(ฉ)

รูปที่ 1 ห้องรมควันมาตรฐานและส่วนประกอบต่างๆ ของกรมวิชาการเกษตร ก) บริเวณด้านหน้าห้องรม ข) ท่อกระจายก๊าซภายในห้องรม ค) เตาเผากำมะถัน ง) พัดลมหมุนเวียนอากาศ จ) ชุดบำบัดก๊าซ และ (ฉ) พัดลมระบายก๊าซทิ้ง



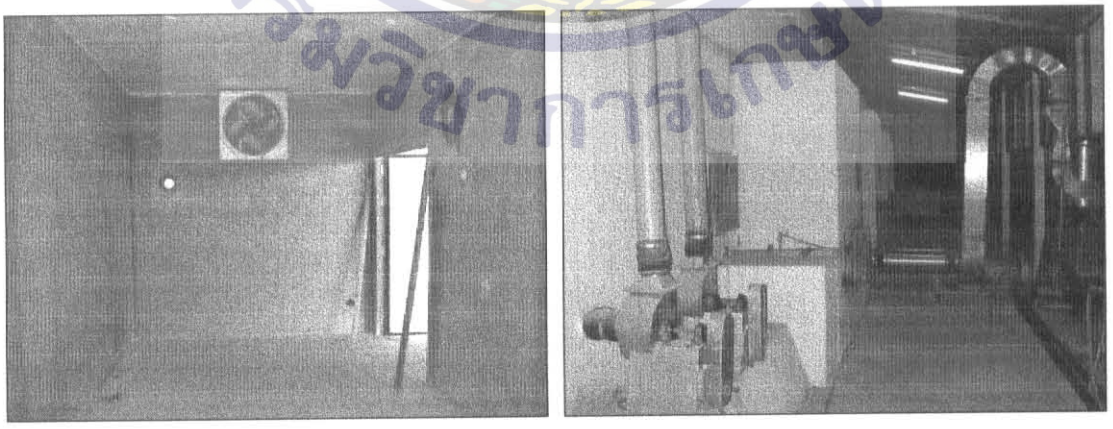
(ก)

(ข)

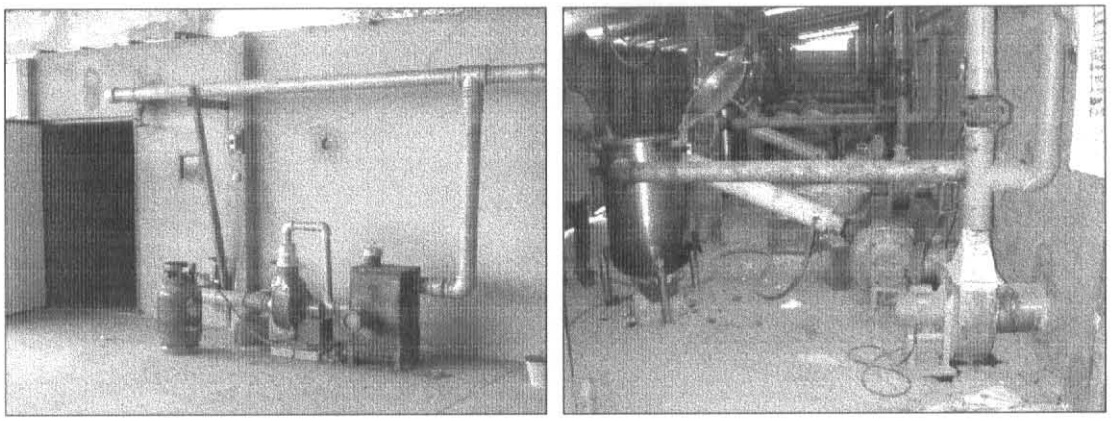


(ค)

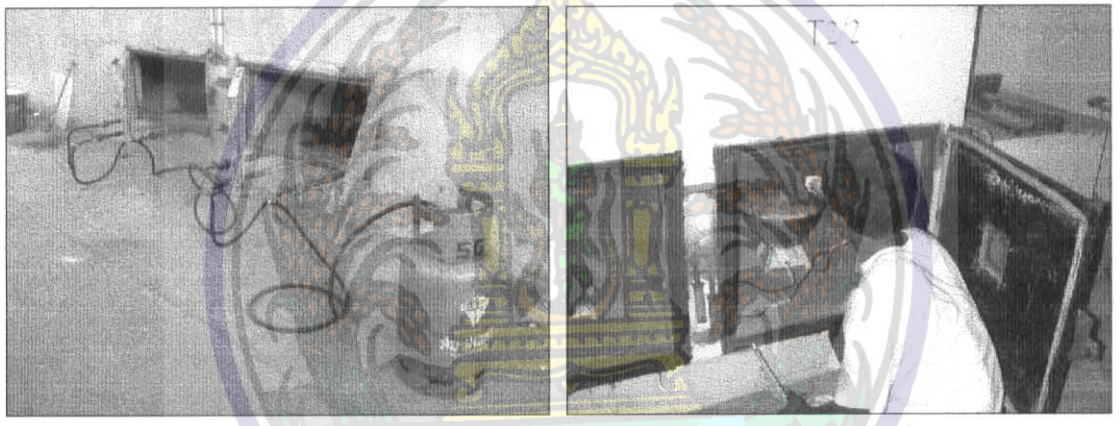
รูปที่ 2 การจัดวางเรียงตะกร้าลำไย ก) วางบนพื้น ข) วางบนแพลเล็ทไม้ และ ค) วางบนชั้นโครงเหล็ก



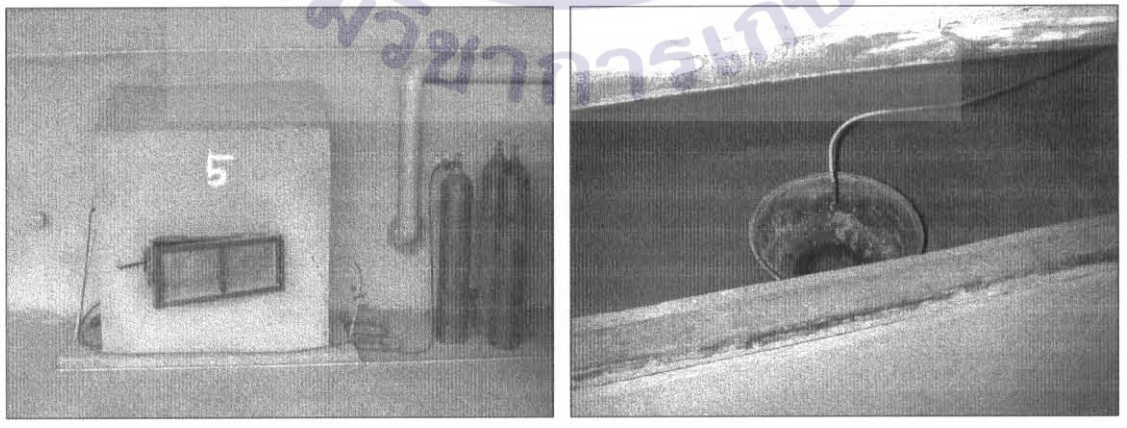
รูปที่ 3 พัดลมหมุนเวียนอากาศแบบไหลตามแนวแกน (ซ้าย) และแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (ขวา)



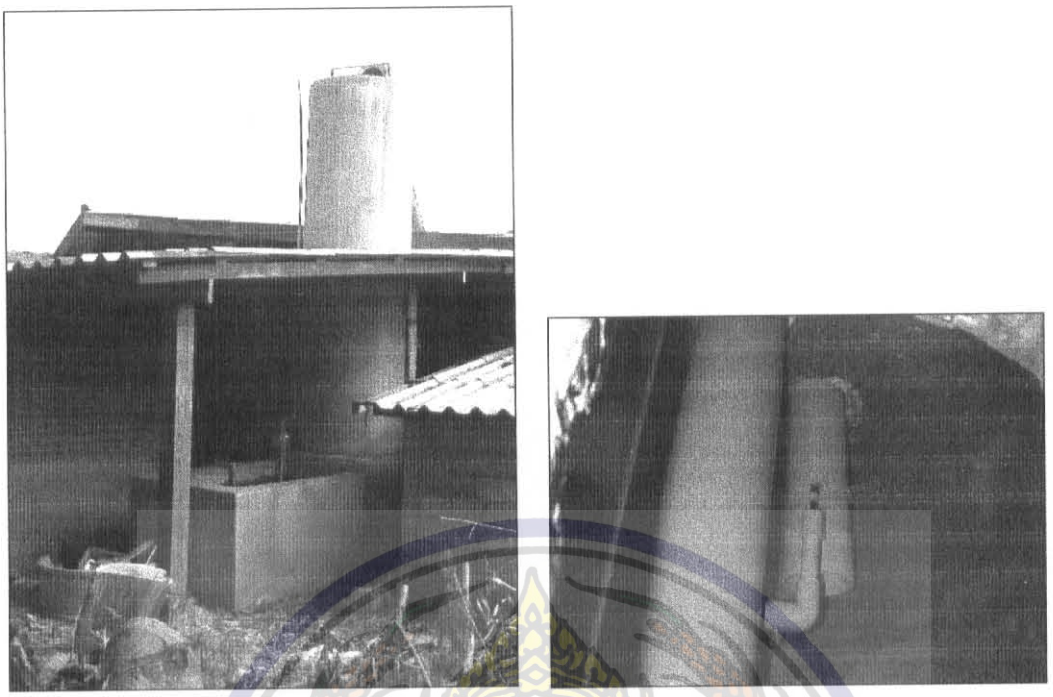
รูปที่ 4 ห้องเผากำมะถันอยู่นอกห้องรมควัน



รูปที่ 5 ห้องเผากำมะถันอยู่ในห้องรมควัน ใช้เตาแก๊ส (ซ้าย) และเตาไฟฟ้า (ขวา)

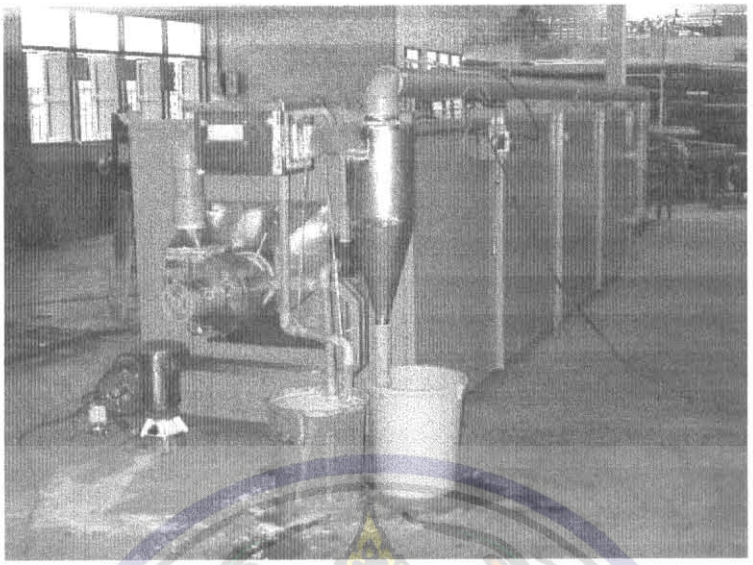


รูปที่ 6 ห้องเผากำมะถันอยู่ในห้องรมควัน ใช้ก๊าซออกซิเจนช่วยในการเผาไหม้

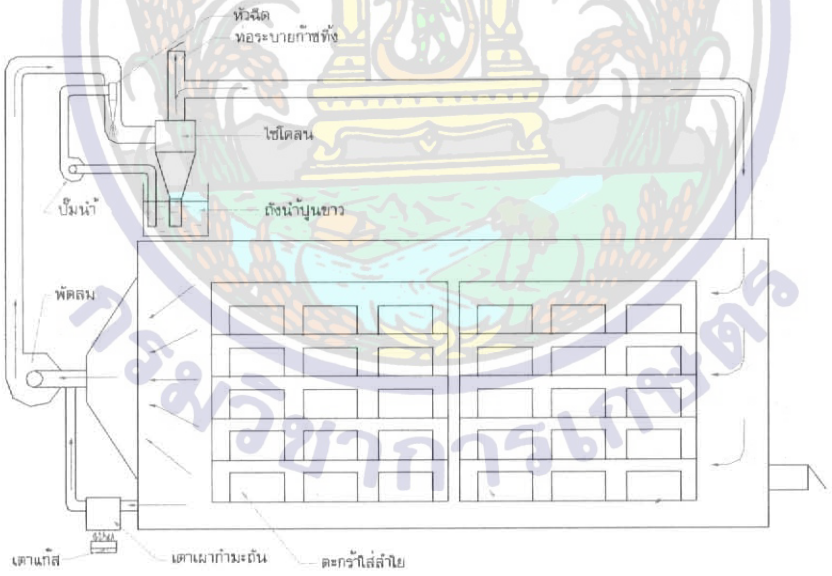


รูปที่ 7 หอบำบัดก๊าซ SO_2 และหัวฉีดภายใน

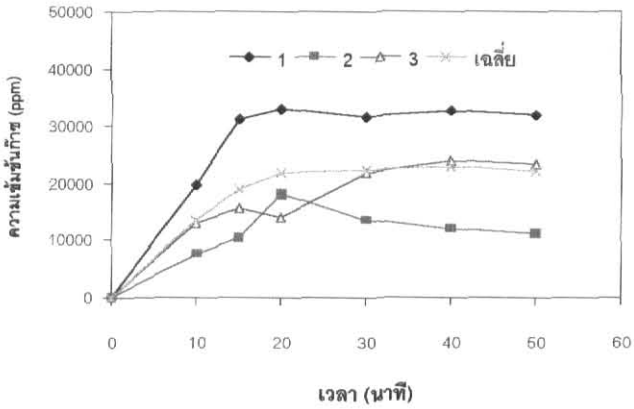
กรมวิชาการเกษตร



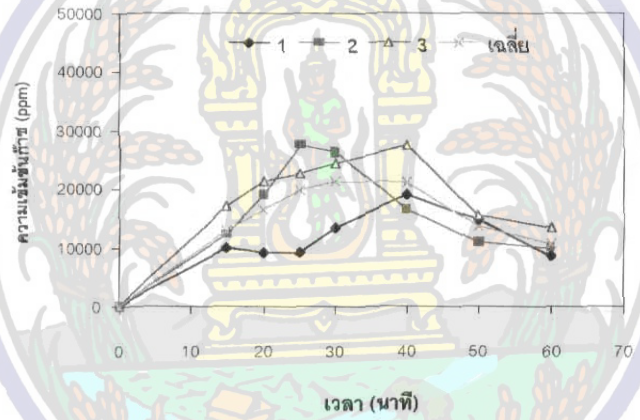
รูปที่ 8 ห้องรมควันกำมะถันต้นแบบ ที่มีระบบบำบัด SO_2 แบบหมุนเวียนอากาศ



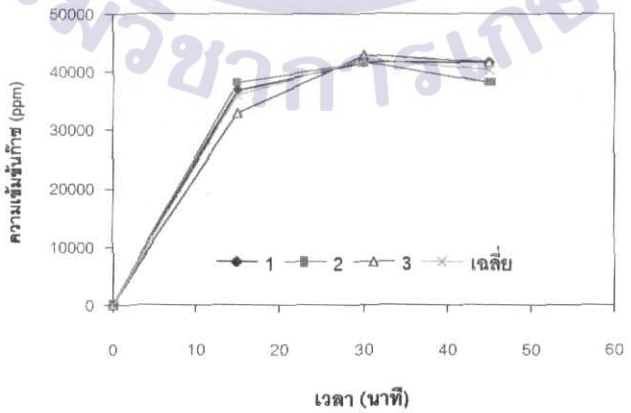
รูปที่ 9 แผนผังการทำงานของห้องรมควันกำมะถัน ที่มีระบบบำบัด SO_2 แบบหมุนเวียนอากาศ



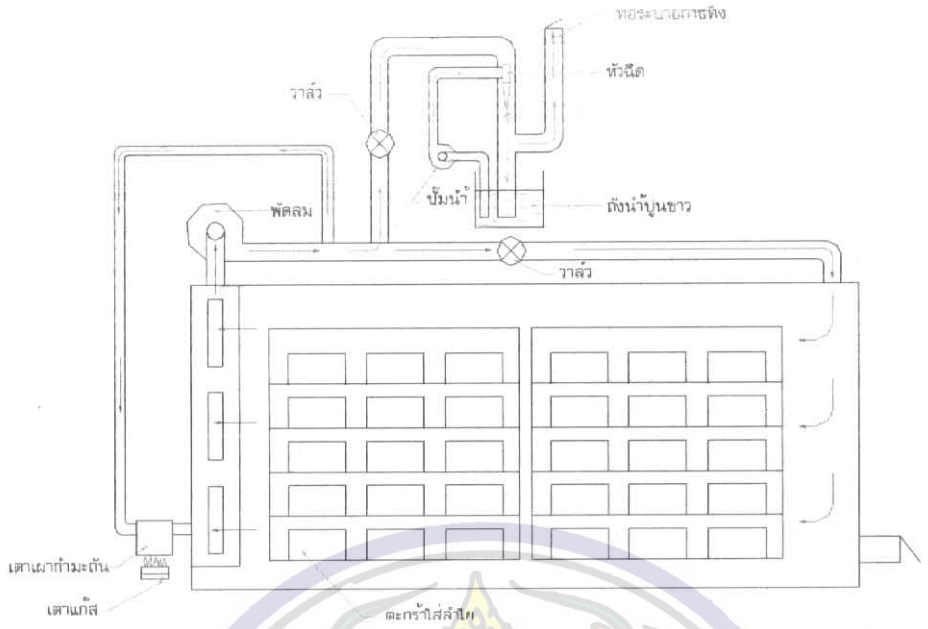
รูปที่ 10 ความเข้มข้น SO_2 ในห้องรมควันกำมะถัน ที่มีระบบบำบัด SO_2 แบบหมุนเวียนอากาศ (เผากำมะถัน 0.42 กก. ความคลาดเคลื่อน SO_2 50.2%)



รูปที่ 11 ความเข้มข้น SO_2 ในห้องรมควันกำมะถันบรรจุลำไย 120 ตะกร้า



รูปที่ 12 ความเข้มข้น SO_2 ในห้องรมควันกำมะถัน ที่มีระบบบำบัด SO_2 แบบไม่หมุนเวียนอากาศ



รูปที่ 13 แผนผังการทำงานของห้องรมควันกำมะถัน ที่มีระบบบำบัด SO_2 แบบไม่หมุนเวียนอากาศ

รูปที่ 14 การลำเลียงชั้นตะกร้าลำไยเข้าห้องรมควันกำมะถัน

ตารางที่ 1 เวลาในการเผาไหม้กำมะถัน 0.5 กก. ความเข้มข้นและความคลาดเคลื่อนของ SO_2

ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
ขั้นตอน	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น SO_2 (ppm)	ขั้นตอน	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น SO_2 (ppm)	ขั้นตอน	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น SO_2 (ppm)
เริ่มเผา	0		เริ่มเผา	0		เริ่มเผา	0	
ดับไฟ	12			10	9778		15	8556
	17	24446	ดับไฟ	15		ดับไฟ	20	20779
	47	14668		20	34225		30	29335
เปิดปั๊ม	54			30	44003		40	26891
	64	18335		40	31780	เปิดปั๊ม	45	
	74	6112		50	36669		55	15890
	84	4889	เปิดปั๊ม	60	34225		65	7334
	94	2445		70	22002		75	3667
	104	2445		80	15890		85	1222
	114	0		95	13445		95	1222
SO_2 สูงสุด		24446	SO_2 สูงสุด		44003	SO_2 สูงสุด		29335
SO_2 คำนวณ		55262	SO_2 คำนวณ		55262	SO_2 คำนวณ		55262
% ความคลาดเคลื่อน		55.8	% ความคลาดเคลื่อน		20.4	% ความคลาดเคลื่อน		46.9

ตารางที่ 2 ปริมาณสาร SO_2 ตกค้างในผลลำไยหลังการรมควัน (ppm)

ตัวอย่าง	0 วัน		1 วัน	
	เปลือก	เนื้อ	เปลือก	เนื้อ
1	1726.5	0	54.2	0
2	2352.6	0	67.7	0
3	1287.2	0	66.1	0
4	704.3	0	63.0	0
เฉลี่ย	1517.7	0	62.8	0

ภาคผนวก ก.
การคำนวณปริมาณกำมะถันและปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการเผากำมะถัน

การคำนวณปริมาณกำมะถัน

ปริมาณก๊าซ SO_2 ที่ใช้ในการรมควัน คำนวณได้จากสมการ

น้ำหนัก SO_2 (กรัม) = S + M

= (A x B x C) + (D x E)

โดย S = ปริมาณ SO_2 ที่เหลือในห้องเมื่อสิ้นสุดการรมควัน (กรัม)

M = ปริมาณ SO_2 ที่ลำไยดูดซับไว้ (กรัม)

A = ความเข้มข้นของ SO_2 ที่เหลือในห้องเมื่อสิ้นสุดการรมควัน (%)

B = ปริมาตรที่ว่างในห้องรมควัน ($ม^3$)

C = ความหนาแน่นของ SO_2 ที่ 30°ซ = 2.574 (กรัม/ลิตร)

D = น้ำหนักของลำไย (กิโลกรัม)

E = อัตราการดูด SO_2 ของลำไย (กรัมต่อกิโลกรัม)

และ น้ำหนักของกำมะถันที่ใช้เผา (กรัม) = น้ำหนัก SO_2 (กรัม) / 2

ตามคำแนะนำของ ชิงชิง ทองดี 2535 ความเข้มข้นของ SO_2 ที่เหลือในห้องเมื่อสิ้นสุดการรมควันเท่ากับ 1.5 % (v/v) และ อัตราการดูด SO_2 ของลำไยประมาณ 0.65 กรัมต่อกิโลกรัมลำไย

ห้องรมควันที่ออกแบบมีปริมาตร	=	(1.2 x 1.2 x 4.8)	($ม^3$)
	=	6.912	($ม^3$)
น้ำหนักของลำไยในห้องรมควัน	=	1200	(กก)
ปริมาตรของลำไยในห้องรมควัน	=	1.200	($ม^3$)
ปริมาตรที่ว่างในห้องรมควัน	=	6.912 - 1.200 = 5.712	($ม^3$)
ดังนั้น SO_2 ที่เหลือในห้องเมื่อสิ้นสุดการรมควัน	=	1.5/100 x 5.712 x 2.574 x 1000	(กรัม)
	=	220	(กรัม)
SO_2 ที่ลำไยดูดซับไว้	=	0.65 x 1200	(กรัม)
	=	780	(กรัม)
น้ำหนัก SO_2 ที่ใช้ในการรมควัน	=	220 + 780	(กรัม)
	=	1000	(กรัม)
น้ำหนักของกำมะถันที่ใช้เผา	=	1000/2	(กรัม)
	=	500	(กรัม)
	=	0.5	(กก.)

การคำนวณปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการเผากำมะถัน

ปริมาตรที่ว่างในห้องรมควัน = 5.712 ($ม^3$)

น้ำหนักจำเพาะของอากาศ = 1.2 ($กก./ม^3$)

น้ำหนักของอากาศในห้องรม = 5.712 x 1.2 = 6.854 ($กก./ม^3$)

อากาศมีออกซิเจนประมาณ 20%

ดังนั้นในห้องรมมีออกซิเจน = 6.854 x 1.2 = 1.371 (กก.)

สมการการเผาไหม้กำมะถัน

$$S + O_2 \longrightarrow SO_2$$

$$32 + 32 \longrightarrow 64$$

ในการเผาไหม้กำมะถัน 0.5 กก. ต้องการออกซิเจน 0.5 กก. ดังนั้นออกซิเจนที่อยู่ในห้องรมควันมีปริมาณมากเพียงพอต่อการเผาไหม้กำมะถัน

กรมวิชาการเกษตร

ภาคผนวก ข.
การคำนวณปริมาณปูนขาวที่ใช้ในการบำบัด SO_2

ก๊าซ SO_2 มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี โดยน้ำ 1 ลิตร ละลาย SO_2 ได้ 45 ลิตร ที่ 15°ซ

การใช้ปูนขาว (CaO) อัตรา 5% - 15% ละลายน้ำจะเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดให้สูงขึ้น โดยน้ำปูนขาวทำปฏิกริยากับ SO_2 กลายเป็นยิบซั่ม ($CaSO_4.2H_2O$) ดังสมการดังนี้

$CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2$ .....สมการ (1)

$(40+16) + (2+16) \longrightarrow (40+17x2)$

$56 + 18 \longrightarrow 74$

$SO_2 + Ca(OH)_2 + H_2O + 0.5O_2 \longrightarrow CaSO_4.2H_2O$.....สมการ (2)

$64 + 74 + 18 + 16 \longrightarrow 172$

ในการบำบัด SO_2 64 กรัม ต้องการ CaO 56 กรัม และ O_2 16 กรัม

จากภาคผนวก ก. SO_2 ที่เหลือในห้องเมื่อสิ้นสุดการรมควันคือ 220 กรัม

ดังนั้นต้องใช้ CaO = 56x220/64 = 193 กรัม

และ O_2 = 16x220/64 = 55 กรัม

ในการทดลองบำบัด SO_2 จากการเผากำมะถัน 200 กรัม ซึ่งจะได้ SO_2 400 กรัม

ดังนั้นต้องใช้ CaO = 56x400/64 = 350 กรัม

และ O_2 = 16x400/64 = 100 กรัม

กรมวิชาการเกษตร

ภาคผนวก ค.
การวิเคราะห์ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอากาศ

ขั้นตอนการวิเคราะห์ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอากาศ (มานัส 2542)

1. เตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้น 3%
2. ใส่สารละลาย H_2O_2 3% ปริมาณ 100 ml ลงในฟลาสขนาด 250 ml
3. ปิดฟลาสให้สนิทโดยใช้จุกยาง
4. ใช้เข็มฉีดยาดูดตัวอย่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 50 ml แล้วค่อย ๆ ฉีดลงในฟลาสที่มีสารละลาย H_2O_2 3% เขย่าฟลาสเล็กน้อยเพื่อให้เกิดปฏิกริยาอย่างทั่วถึง
5. นำไปไตเตรทกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ methyl red เป็น indicator
6. คำนวณปริมาณความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตามสูตรดังนี้

$$ppm\ SO_2 = \frac{mg\ SO_2 \times 10^6}{2.618 \times \text{ปริมาตรอากาศที่ใช้ (ml)}}$$

โดยที่ $ppm\ SO_2$ = ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซ SO_2 ในอากาศ (ppm)

$mg\ SO_2$ = น้ำหนักของก๊าซ SO_2 = N x V x 32 (mg)

N = ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (normal)

V = ปริมาตรของสารละลาย NaOH (ml)

32 = น้ำหนักของกำมะถัน (milliequivalent weight)

2.618 = ค่าคงที่ในการเปลี่ยนแปลง ค่า mg SO_2 เป็น ml SO_2

กรมวิชาการเกษตร

ภาคผนวก ง.
การวิเคราะห์ปริมาณผลตกค้างของ SO_2 ในผลลำไย

ปริมาณผลตกค้างของ SO_2 ในผลลำไย (เปลือก เนื้อ และทั้งผล) ทำโดยวิธีการของ Modified Monior-Williums Method (AOAC, 1984) โดยลำไยที่ผ่านการรมจำนวน 10-12 ผล จะถูกนำมาชั่งน้ำหนักก่อนทำการแยกเปลือกและเนื้อออกจากกันเพื่อนำมาสกัดด้วยความร้อนและสารละลายกรด HCl เป็นเวลา 60 นาที ปริมาณ SO_2 จะถูกจับด้วย H_2O_2 ความเข้มข้น 3% แล้วไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐาน NaOH ความเข้มข้น 0.1 N (สำหรับเปลือก) หรือ 0.01 N (สำหรับเนื้อ) โดยใช้ methyl red เป็น indicator ปริมาณ SO_2 ที่ตกค้างในผลลำไยสามารถคำนวณโดยใช้สูตรดังต่อไปนี้

$$\text{ปริมาณ } SO_2 \text{ ที่ตกค้างในเปลือก หรือเนื้อลำไย (ppm)} = \frac{N \times V \times 32 \times 1000}{Wt}$$

โดย N = ความเข้มข้นของ NaOH (normal)

V = ปริมาตรของ NaOH (ml)

Wt = น้ำหนักตัวอย่าง (g)

32 = น้ำหนักของกำมะถัน (milliequivalent weight)

กรมวิชาการเกษตร

ภาคผนวก จ.
การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การคำนวณหาต้นทุนการใช้ห้องรม

$$Ac = (Fc/A) + (1/Ct)(R\&M + F + O + Lo) \quad \text{สมการที่ 1}$$

$$Fc = D + I \quad \text{สมการที่ 2}$$

$$D = (P - S)/N \quad \text{สมการที่ 3}$$

$$I = [(P + S)/2](r/100) \quad \text{สมการที่ 4}$$

เมื่อ D = ค่าเสื่อมราคา (บาท/ปี)

I = ดอกเบี้ย (บาท/ปี)

P = ราคาซื้อ (บาท/ปี)

S = มูลค่าซาก (บาท)

N = อายุการใช้งาน (ปี)

r = อัตราดอกเบี้ย (เปอร์เซ็นต์/ปี)

Ac = ต้นทุนการใช้เครื่อง (บาท/ปี)

Fc = ต้นทุนคงที่ (บาท/ปี)

A = ปริมาณลำไยที่ทำการรม (ตะกร้า/ปี)

R&M = ค่าซ่อมแซมและบำรุงรักษา (บาท/ตะกร้า)

F = ค่าไฟฟ้า (บาท/ตะกร้า)

O = ค่าใช้จ่ายอื่นๆ (บาท/ตะกร้า)

Lo = ค่าแรงงานคนปฏิบัติงาน (บาท/ตะกร้า)

Ct = ความสามารถในการทำงานของเครื่อง (ตะกร้า/รอบ)

รายละเอียดข้อมูลการคำนวณต้นทุนการใช้ห้องรม

P	= ราคาซื้อ	40000	(บาท/ปี)	
N	= อายุการใช้งาน	10	(ปี)	
S	= มูลค่าซาก (10%)	4000	(บาท)	
r	= อัตราดอกเบี้ยต่อปี	10	(%)	
D	= ค่าเสื่อมราคา	3600	(บาท/ปี)	สมการที่ 3
I	= ดอกเบี้ย (ค่าเสียโอกาส)	2200	(บาท/ปี)	สมการที่ 4
Fc	= ต้นทุนคงที่	5800	(บาท/ปี)	สมการที่ 2
Ct	= ความสามารถในการทำงานของห้องรม	120	(ตะกร้า/รอบ)	
	จำนวนรอบการทำงาน	3	(รอบ/วัน)	
	จำนวนวันทำงาน	30	(วัน/ปี)	
A	= ปริมาณลำไยที่รมกำมะถัน 1 ปี	10800	(ตะกร้า/ปี)	
R&M	= ค่าซ่อมแซมและบำรุงรักษา	0.1991	(บาท/ตะกร้า)	
	ค่าซ่อมแซม 2000 บาท/ปี	0.1852	(บาท/ตะกร้า)	
	ค่าบำรุงรักษา 5 บาท/วัน	0.0139	(บาท/ตะกร้า)	
F	= ค่าไฟฟ้า	0.0300	(บาท/ตะกร้า)	
	ราคาไฟฟ้า	3	(บาท/หน่วย)	
	ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้	1.2	(หน่วย)	
Lo	= ค่าแรงงานคนปฏิบัติงาน	1.1111	(บาท/ตะกร้า)	
	จำนวนแรงงานคนปฏิบัติงาน	2	(คน)	
	อัตราค่าแรงงาน	200	(บาท/วัน)	
O	= ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ	0.25	(บาท/ตะกร้า)	
	ค่ากำมะถัน 0.5 กก/รอบ x 30 บาท/กก	0.125	(บาท/ตะกร้า)	
	ค่าปูนขาว 3 กก/รอบ x 5 บาท/กก	0.125	(บาท/ตะกร้า)	
	ต้นทุนผันแปร (F + Lo + O)	1.5902	(บาท/ตะกร้า)	
Ac	= ต้นทุนการใช้ห้องรมกำมะถัน	2.1272	(บาท/ตะกร้า)	สมการที่ 1

การคำนวณระยะเวลาการคืนทุน

ระยะเวลาคืนทุน = จำนวนเงินลงทุน/ผลประโยชน์สุทธิต่อปี

ต้นทุนผันแปร คือ ผลรวมของค่าซ่อมแซมบำรุงรักษา ค่าไฟฟ้า และค่าจ้างแรงงาน

ต้นทุนรวม คือ ผลรวมของดอกเบี้ยกับต้นทุนผันแปร

ผลประโยชน์ที่ได้รับ คือรายได้จากการรับจ้างรมลำไยสด

ผลประโยชน์สุทธิ คือ ผลต่างของผลประโยชน์ที่ได้รับกับต้นทุนรวม

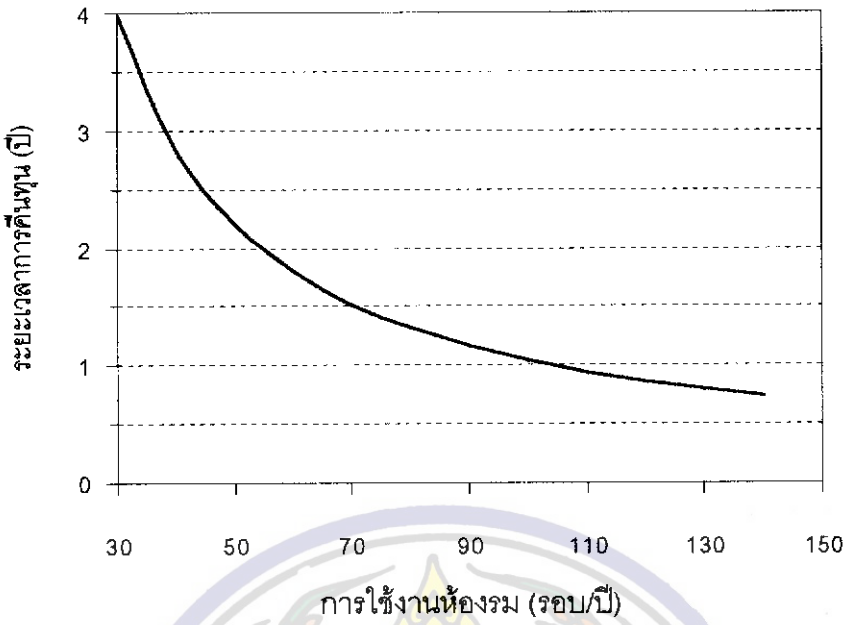
ตารางที่ 1 การคิดระยะเวลาการคืนทุนของ

รมลำไย (รอบ/ปี)	รมลำไย (ตะกร้า/ปี)	ดอกเบี้ย (บาท/ปี)	ต้นทุนผันแปร (บาท/ปี)	ต้นทุนรวม (บาท/ปี)	ผลประโยชน์ที่ได้รับ (บาท/ปี)	ผลประโยชน์สุทธิ (บาท/ปี)	ระยะเวลาคืนทุน (ปี)
30	3600	2200	5725	7925	18000	10075	3.97
40	4800	2200	7633	9833	24000	14167	2.82
50	6000	2200	9541	11741	30000	18259	2.19
60	7200	2200	11449	13649	36000	22351	1.79
70	8400	2200	13358	15558	42000	26442	1.51
80	9600	2200	15266	17466	48000	30534	1.31
90	10800	2200	17174	19374	54000	34626	1.16
100	12000	2200	19082	21282	60000	38718	1.03
110	13200	2200	20990	23190	66000	42810	0.93
120	14400	2200	22899	25099	72000	46901	0.85
130	15600	2200	24807	27007	78000	50993	0.78
140	16800	2200	26715	28915	84000	55085	0.73

การคำนวณหาจุดคุ้มทุน

จุดคุ้มทุน = ค่าใช้จ่ายคงที่/(รายได้จากการใช้เครื่อง – ค่าใช้จ่ายในการทำงาน)

ค่าใช้จ่ายคงที่	5800	บาท/ปี
รายได้จากการรับจ้างรมลำไย	5	บาท/ตะกร้า
ค่าใช้จ่ายในการรมลำไย	2.1272	บาท/ตะกร้า
ความจุของห้องรมลำไย	120	ตะกร้า/รอบ
ดังนั้นจุดคุ้มทุน	2019	ตะกร้า/ปี หรือ 17 รอบ/ปี



รูปผนวกที่ จ1 ระยะเวลาการคืนทุนของการใช้ห้องรมควันกำมะถัน (1 รอบ = 120 ตะกร้า)

กรมวิชาการเกษตร