

การป้องกันการเกิดแอฟลาทอกซินในข้าวโพด โดยการอบแห้งในฉางเก็บ Preventing Aflatoxin Production in Corn by In-Store Drying

สมเกียรติ ปรัชญาวารากร¹ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์² อติศักดิ์ นาดกรณกุล²
และ สิตธิชัย อินทร์จันทร์²

Somkiat Prachayawarakorn, Somchart Soponronnarit, Adisak Nathakaranakule,
and Sittichai Inchan

ABSTRACT

The objective of this research was to investigate the prevention of aflatoxin production and energy consumption in the prototype system of in-store corn drying. The air was ventilated periodically through the corn bulk. The experimental results showed that the uniform air ventilated through the corn bulk was accomplished. For corn drying using ambient air, the amount of aflatoxin B-1 production at the end of drying in case of 23.4 % wet-basis initial moisture content of corn was higher than that in case of 18.7 % and 18.9 % wet-basis initial moisture content of corn. To preserve the quality of corn by controlling the amount of aflatoxin, the initial moisture content of corn should not be higher than 19 % wet-basis but if initial moisture content of corn was higher than 19 % wet-basis, it should be dried to 18-19 % wet basis within 2 days and continually dried to 14 % wet-basis within 14 days. When corn was dried from 19 % to 12 % - 13 % wet-basis by using ambient air with specific air flow rate of 3.6 - 4.6 m³/min- m³ of corn, energy consumption was 0.46 - 0.9 MJ/kg water evaporated and electricity cost was 16 - 27 baht / ton of corn.

Key words: in-store drying, aflatoxin, corn, energy consumption

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand.

² คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

School of Energy and Materials, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการป้องกัน การเกิดสารแอฟลาทอกซิน และความสิ้นเปลืองพลังงานของการอบแห้งข้าวโพดในที่เก็บระดับต้นแบบ ระบบท่อลมที่ออกแบบให้การกระจายของลม สม่าเสมอตลอดพื้นที่อบแห้ง ในการอบแห้งข้าวโพด โดยใช้อากาศแวดล้อม พบว่าในกรณีที่ความชื้นเริ่มต้นเป็น 23.4 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก หลังสิ้นสุดการอบแห้งมีปริมาณสารแอฟลาทอกซิน B-1 เกิดขึ้นมากกว่าในกรณีที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพดเป็น 18.9 และ 18.7 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งในที่เก็บโดยใช้อากาศแวดล้อม นั้น ความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพดไม่ควรสูงกว่า 19 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ในกรณีที่ความชื้นเริ่มต้นสูงกว่า 19 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ควรลดความชื้นข้าวโพดให้เหลือ 18 - 19 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ภายในเวลา 2 วัน หลังจากนั้นควรลดความชื้นข้าวโพดลงเหลือ 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ภายในเวลา 14 วัน เพื่อป้องกันการเกิดสารแอฟลาทอกซิน ในการลดความชื้นข้าวโพดจากความชื้นข้าวโพดจาก 19 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกเหลือ 12 - 13 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ด้วยการเป่าอากาศแวดล้อม โดยใช้อัตราการไหลอยู่ในช่วง $3.6 - 4.6 \text{ m}^3/\text{min-m}^3$ ข้าวโพด สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า $0.46 - 0.9 \text{ MJ/kg}$ น้ำที่ระเหย หรือคิดเป็นค่าใช้จ่าย 16 - 27 บาท/ตัน ข้าวโพด

คำนำ

โดยทั่วไปเกษตรกรจะเก็บเกี่ยวข้าวโพดที่ความชื้นประมาณ 18 - 30 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก จากนั้นจะนำไปกระเทาะเมล็ดออก และลดความชื้นข้าวโพดลงมาเพื่อให้ปลอดภัยจากเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ

ปกติทั่วไปเกษตรกรหรือสหกรณ์จะลดความชื้นโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ คือการทำให้แห้งโดยใช้ลานตากซึ่งจำเป็นต้องใช้พื้นที่ค่อนข้างมาก เนื่องจากตากในลักษณะเป็นชั้นบาง ๆ หนาประมาณ 2-3 เซนติเมตร จากการที่เกษตรกรต้องอาศัยพลังงานจากธรรมชาติทำให้บางครั้งประสบปัญหาในการลดความชื้น อันเนื่องจากฝนตก หรือท้องฟ้าปิดติดต่อกันเป็นเวลาหลายวัน ทำให้ข้าวโพดที่มีความชื้นสูงถูกกองเก็บไว้ในกระสอบหรือในฉางเก็บ เป็นผลให้ข้าวโพดเกิดการเหม็นเปรี้ยวและมีแอฟลาทอกซินเกิดขึ้น จากรายงานผลการวิจัยของศูนย์การปรับปรุงคุณภาพข้าวโพด (Kositcharoenkul *et al.*, 1992) พบว่าแอฟลาทอกซินที่เกิดขึ้นในข้าวโพดส่วนใหญ่มาจากไซโลฟอสหรือฉางเก็บ

Kalchick *et al.*, (1981) รายงานผลการทดสอบการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดในฟาร์มที่รัฐมิชิแกนซึ่งอยู่ทางตอนเหนือของสหรัฐอเมริกาในช่วงระยะเวลา 3 ปี พบว่า การอบแห้งแบบในถังเก็บด้วยอากาศแวดล้อมและอัตราการไหลอากาศต่ำใช้พลังงานประมาณ 3.2 MJ/kg น้ำที่ระเหย และการอบแห้งแบบเป็นจวดโดยอุ่นอากาศให้ร้อนขึ้นใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 6.6 MJ/kg น้ำที่ระเหย

Brooker and Duggal (1982) ได้ใช้แบบจำลองของ Thompson *et al.*, (1968) ในการจำลองสภาพการเก็บรักษามะล็ดข้าวโพด เพื่อศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งมีผลต่อระยะเวลาการเก็บรักษามะล็ดข้าวโพดอย่างปลอดภัย (การสูญเสียมวลแห้งไม่เกิน 0.5 %) เช่น ความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิเริ่มต้น โดยแบ่งแบบจำลองเป็นสองลักษณะ คือ ไม่มีการระบายอากาศขณะเก็บรักษามะล็ดข้าวโพด และมีการระบายอากาศขณะเก็บรักษามะล็ดข้าวโพดด้วยอัตราการไหลอากาศ 0.111 ลูกบาศก์เมตรต่อนาทีต่อหนึ่งตันข้าวโพด โดยใช้สภาวะอากาศของรัฐมิสซูรีระหว่างปี ค.ศ. 1957 - 1961 พบว่าความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพดมีผลอย่างมากต่อระยะ

เวลาการเก็บรักษาอย่างปลอดภัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ไม่มีการระบายอากาศ จากการจำลองแบบพบว่า ที่อุณหภูมิ 15.6°C และความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพด 16 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกมีระยะเวลาการเก็บรักษาอย่างปลอดภัย 180 วัน และจะเหลือเพียง 25 วันเท่านั้นถ้าความชื้นเริ่มต้นเป็น 18 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ส่วนกรณีที่มีการระบายอากาศพบว่า ที่ความชื้นเริ่มต้น 20 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกและอัตราการไหลอากาศ 0.111 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีต่อหนึ่งตันข้าวโพดมีระยะเวลาการเก็บรักษาอย่างปลอดภัย 60 วัน แต่ถ้าเพิ่มอัตราการไหลอากาศเป็น 2 เท่า จะมีระยะเวลาการเก็บรักษาอย่างปลอดภัยเพิ่มขึ้นเป็น 120 วัน ผลของอุณหภูมิเริ่มต้นของเมล็ดข้าวโพดก็มีผลอย่างมากต่อระยะเวลาการเก็บอย่างปลอดภัย สำหรับกรณีที่ไม่มีการระบายอากาศในถังอบแห้งพบว่า ที่ความชื้นเริ่มต้น 16 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก อุณหภูมิเริ่มต้น 21°C มีระยะเวลาการเก็บรักษาอย่างปลอดภัย 55 วัน แต่ถ้าลดอุณหภูมิเหลือ 15.6°C จะเก็บรักษาข้าวโพดอย่างปลอดภัยได้มากกว่า 180 วัน สำหรับกรณีที่มีการระบายอากาศระหว่างการเก็บรักษาพบว่า อุณหภูมิเริ่มต้นไม่มีผลต่อระยะเวลาการเก็บรักษา

Eckhoff *et al.*, (1984) ศึกษาการใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เพื่อยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ขณะอบแห้งเมล็ดข้าวโพดโดยใช้อากาศแวดล้อมและความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพด 29.8 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก พบว่าการฉีดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ด้านบนของถังอบและใช้พัดลมหมุนกลับทางเพื่อให้อากาศได้ไหลย้อนกลับจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของถังจะมีปริมาณจุลินทรีย์เกิดขึ้นในระหว่างการอบแห้งต่ำมาก สำหรับการฉีดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ผสมกับอากาศหลังพัดลมก่อนเข้าเครื่องอบแห้งจะมีปริมาณจุลินทรีย์ทางด้านบนของชั้นข้าวโพดซึ่งมีปริมาณความชื้นสูง สำหรับการฉีดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ลงไปยังเมล็ดข้าวโพดในระหว่างการบรรจุเมล็ดข้าว

โพดลงในถังอบ มีปริมาณจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในถังอบแห้งค่อนข้างสูง

ไพโรจน์ และคณะ (2536) ศึกษาความเป็นไปได้ในการอบแห้งข้าวโพดในถังเก็บภายใต้สภาวะอากาศร้อนชื้นพบว่า มีความเป็นไปได้ที่จะใช้เทคนิคการอบแห้งแบบถังเก็บสำหรับการอบแห้งข้าวโพดภายใต้สภาวะอากาศร้อนชื้น ปริมาณแอฟลาทอกซิน B-1 ที่เพิ่มขึ้นหลังการอบแห้งต่ำ โดยมีเงื่อนไขของการอบแห้ง คือความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพดไม่ควรเกิน 19 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก และอัตราการไหลอากาศอยู่ระหว่าง 2.0 - 2.5 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีต่อลูกบาศก์เมตรข้าวโพด

El-Gazzar and Marth (1988) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อการผลิตแอฟลาทอกซิน และการเจริญของเชื้อรา *Aspergillus parasiticus* โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.0, 0.03, 0.05, 0.3 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์ และ 10⁶ สปอร์ของ *Aspergillus parasiticus* ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 14°C หรือ 28°C พบว่า ในเวลา 90 วันของการบ่มเชื้อในที่อุณหภูมิ 14°C หรือ 28°C ไม่มีการเจริญของเชื้อรา และไม่มีสารแอฟลาทอกซินเกิดขึ้น เมื่อใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0.3 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์

Wongurai *et al.*, (1992) ได้ศึกษาผลของแอกติวิตีของน้ำสำหรับข้าวโพดที่มีต่อการเจริญของเชื้อรา *Aspergillus flavus* พบว่าในช่วงที่แอกติวิตีของน้ำเป็น 1.0-0.94 ที่อุณหภูมิ 28°C ตรงกับความชื้นสมดุลข้าวโพด 41-22 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก มีการเจริญของเชื้อ *Aspergillus flavus* ค่อนข้างสูง ในช่วงที่แอกติวิตีของน้ำเป็น 0.93 - 0.85 ที่อุณหภูมิเดียวกัน ความชื้นสมดุลข้าวโพด 20-18 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก มีการเจริญของเชื้อ *Aspergillus flavus* ปานกลาง และในช่วงที่แอกติวิตีของน้ำน้อยกว่า 0.85 เป็นช่วง

ที่ความชื้นสมดุลข้าวโพดน้อยกว่า 18 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกไม่มีการเจริญเติบโตของเชื้อ *Aspergillus flavus*

วีรวัฒน์ และ คณะ (2537) ศึกษาหาอัตราที่เหมาะสมในการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อป้องกันสารพิษแอฟลาทอกซินในข้าวโพดที่มีความชื้นสูงโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รมกองข้าวโพดที่คลุมด้วยพลาสติกในอัตรา 0.5, 0.75, 1.0 และ 2.0 กิโลกรัมต่อหนึ่งตันข้าวโพด พบว่าการรมด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอัตราตั้งแต่ 0.5 กิโลกรัมต่อหนึ่งตันข้าวโพดสามารถป้องกันการเจริญของเชื้อรา *Aspergillus flavus* และการสร้างสารแอฟลาทอกซินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากงานวิจัยที่กล่าวมาพบว่าเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคการอบแห้งเมล็ดพืชในที่เก็บในการอบแห้งข้าวโพดเพื่อการเก็บรักษาและลดปัญหาของสารแอฟลาทอกซิน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการป้องกันสารแอฟลาทอกซิน และความสิ้นเปลืองพลังงานของการอบแห้งข้าวโพดในที่เก็บโดยใช้อากาศแวดล้อม ระดับต้นแบบ โดยออกแบบระบบติดตั้ง และทดสอบที่ สหกรณ์การเกษตรนครนิคมสร้างตนเองพระพุทธรบาท จำกัด

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

การสร้างระบบท่อลมสำหรับการอบแห้งในที่เก็บข้าวโพด ระบบท่อลม (Figure 1) ประกอบด้วยท่อลมหลัก (หมายเลข 1, 2, 3, 4, 5 และ 6) ทำด้วยสังกะสีแผ่นเรียบหนา 1.5 มิลลิเมตร มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 40 เซนติเมตร x 40 เซนติเมตร ท่อลมแยก (หมายเลข 7-9, 10-12 และ 13-15) เป็นแผ่นเหล็กเจาะรูหนา 1.5 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกระจายลม 1.5 มิลลิเมตร หน้า

ตัดของท่อแยกได้ออกแบบให้มีลักษณะเป็นครึ่งวงกลมซึ่งทำให้การกระจายของความเค้นมีค่าสม่ำเสมอตลอดความหนาของวัสดุ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 เซนติเมตร และยาวท่อนละ 1.20 เมตร พัดลมที่ใช้เป็นแบบเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง มอเตอร์ขนาด 3.7 kW ราคาจ้างสร้างและติดตั้งระบบรวม 50,000 บาท ซึ่งแยกเป็นพัดลม 16,000 บาท ระบบไฟฟ้า 5,000 บาท ระบบท่อและค่าจ้างติดตั้ง 29,000 บาท

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยดำเนินงานประกอบด้วยเครื่องมือวัดอุณหภูมิ โดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิล type k ต่อกับ data logger มีความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ความดันในระบบอบแห้งวัดโดยใช้มานอมิเตอร์ และเครื่องมือวัดพลังงานไฟฟ้า ตำแหน่งของจุดวัดอุณหภูมิและความดันดูได้จาก Figure 1

วิธีการ

นำข้าวโพดที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 23.4 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกประมาณ 30 ตัน มาใส่ในที่เก็บที่มีขนาดกว้าง 5 เมตร ยาว 5 เมตร (Figure 1) กองข้าวโพดสูงประมาณ 1.5 เมตร และเป่าอากาศแวดล้อมที่มีอุณหภูมิเฉลี่ย 29.2°C และความชื้นสัมพัทธ์ 58 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นทดลองอีกครั้งโดยใช้ปริมาณข้าวโพดขนาดเท่าเดิม ความชื้น 18.9 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกโดยประมาณ เป่าอากาศแวดล้อมที่มีอุณหภูมิโดยเฉลี่ย 31°C ความชื้นสัมพัทธ์ 78 เปอร์เซ็นต์ผ่านกองข้าวโพด โดยเป่าอากาศในช่วงเวลากลางวันและไม่มีฝนตกเท่านั้น เป่าอากาศจนกระทั่งความชื้นข้าวโพดลดลงเหลือ 13-14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก จึงสิ้นสุดการทดลอง ในการทดลองครั้งที่สามได้ทำการขยายขนาดที่เก็บข้าวโพดให้มีขนาดกว้าง 6 เมตร ยาว 6 เมตร และกองข้าวโพดสูง 1.7 เมตร ซึ่งสามารถจุข้าวโพดได้ 40 ตัน ความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพด 18.7 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก และเป่าอากาศแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ 30°C ความ

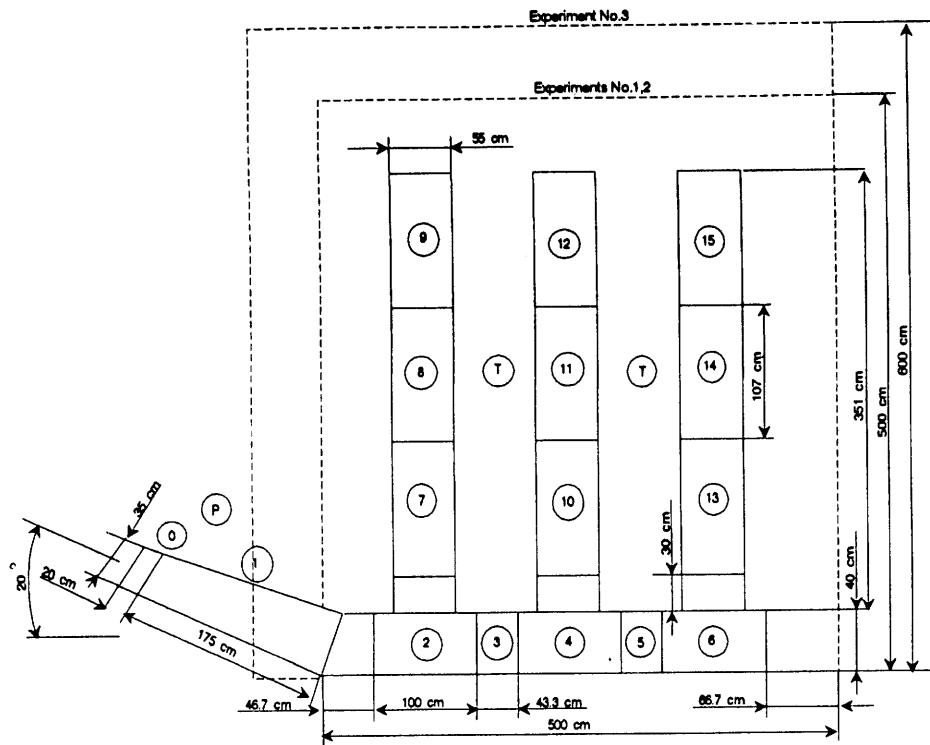


Figure 1 Plan of ducts on floor showing position of temperature and pressure sensors.

O = flexible duct

1,2,3,4,5,6 = main ducts, $\square$ 40 cm $\times$ 40 cm

7,8,9,10,11,12,13,14,15 = perforated branching ducts, $\cap$ 55 cm

T = temperature

P = pressure

ขึ้นสัมพัทธ์ 57.4 เปอร์เซ็นต์ ผ่านกองข้าวโพด

การวิเคราะห์

การเก็บตัวอย่างข้าวโพดเพื่อหาความชื้น ปริมาณแอฟลาทอกซิน B-1 ที่เกิดขึ้น และวิเคราะห์ เปอร์เซ็นต์เมล็ดข้าวโพดที่ติดเชื้อรา *Aspergillus flavus* ในการหาความชื้น ใช้วิธีการอบตัวอย่างในตู้อบที่ อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และในการหา ปริมาณแอฟลาทอกซิน ใช้วิธีการ Thin layer chroma- tography ในการทดลองที่ 1 ใช้ตัวอย่างข้าวโพดที่มี ความชื้น 23.4 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก โดยเก็บ

ตัวอย่างที่ความลึก 30, 60, 90, 120 และ 150 เซนติ เมตร เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการอบแห้ง ในระหว่าง การอบแห้งจะเก็บตัวอย่างที่ตำแหน่งความลึก 50 และ 120 เซนติเมตรจากผิวหน้ากองข้าวโพด โดยที่แต่ละ ระดับความลึกจะเก็บตัวอย่างสามตำแหน่ง ตำแหน่งละ 1 ตัวอย่าง สำหรับการทดลองที่ 2 และ 3 เป็นการ ทดลองที่ใช้ข้าวโพดที่มีความชื้น 18.9 และ 18.7 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ตามลำดับ เก็บตัวอย่างที่ ตำแหน่งความลึก 0, 50, 100 และ 150 เซนติเมตร เมื่อเริ่มต้นและหลังสิ้นสุดการอบแห้ง และในระหว่าง การอบแห้งจะเก็บที่ตำแหน่งความลึก 0 และ 30 เซน

คิมตรจากผิวของข้าวโพด โดยที่แต่ละระดับความลึกจะเก็บตัวอย่างสองตำแหน่ง ตำแหน่งละ 1 ตัวอย่าง ในการวิเคราะห์หาปริมาณแอฟลาทอกซิน B-1 และ เพอร์เซ็นต์เมสส์ข้าวโพดที่ติดเชื้อรา *Aspergillus flavus* ต้องนำเมล็ดข้าวโพดมาอบแห้งให้เหลือ 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกหรือต่ำกว่า และเก็บไว้ในที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10°C เพื่อยับยั้งการเจริญของเชื้อรา

ผลและวิจารณ์

การกระจายของความชื้นข้าวโพดที่แต่ละระดับความลึก

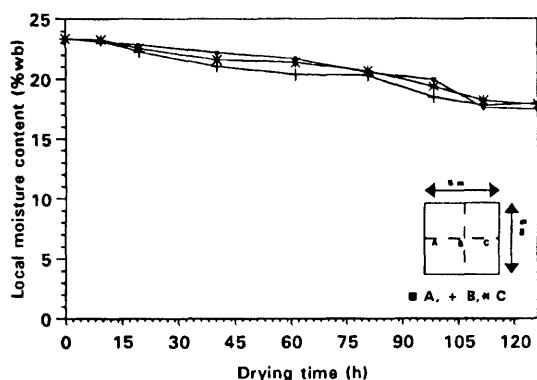


Figure 2 Evolution of local moisture content of corn at 50 cm depth from the surface. [initial moisture content = 23.4 % wb]

ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของข้าวโพดกับเวลาในการอบแห้ง ที่ความลึก 50 เซนติเมตร และ 30 เซนติเมตร ของตัวอย่างข้าวโพด 2 ตัวอย่าง (ความชื้น 23.4 และ 18.9 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก) พบว่า ที่ระดับความลึกเดียวกัน มีความแตกต่างของความชื้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ น้อยมาก (Figure 2,3) แสดงว่ามีการกระจายของลมค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดกองข้าวโพด ดังนั้นจึงได้นำความชื้นของข้าวโพดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ความลึกเดียวกันมาหาค่าเฉลี่ย พบว่าที่ระดับความลึกมากกว่ามีค่าความชื้นข้าวโพดต่ำกว่าที่ระดับความลึกน้อยกว่า (Figure 4,5)

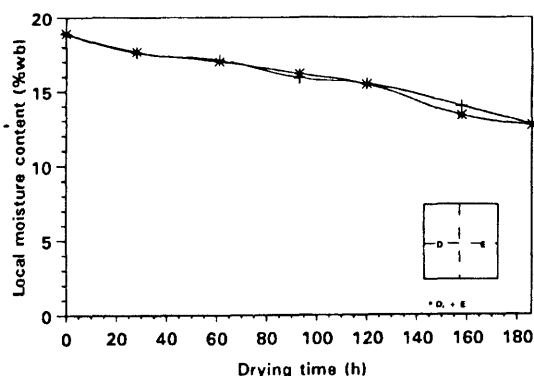


Figure 3 Evolution of local moisture content of corn at 30 cm depth from the surface. [initial moisture content = 18.9 % wb]

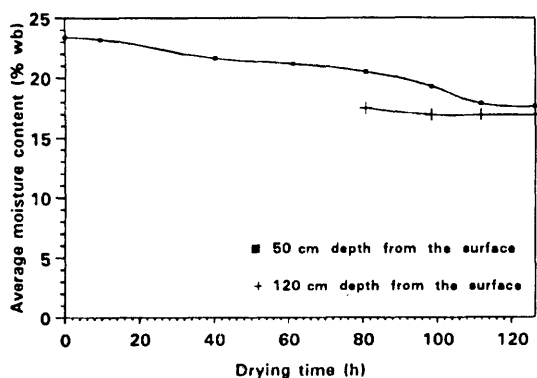


Figure 4 Evolution of average moisture content of corn at different depths. [initial moisture content = 23.4 % wb]

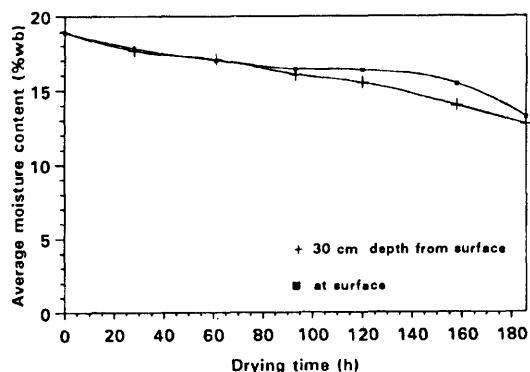


Figure 5 Evolution of average moisture content of corn at different depths. [initial moisture content = 18.9 % wb]

สำหรับผลการทดลองที่ใช้ตัวอย่างข้าวโพดที่มีความชื้น 18.7 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ให้ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นคล้ายคลึงกันกับผลการทดลองที่ความชื้นเริ่มต้น 18.9 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก (Figure 3,5) ดังนั้นจึงไม่ได้แสดงผลของความชื้นในงานวิจัยนี้

ความสิ้นเปลืองพลังงาน

ในการศึกษารูปร่างของความชื้นที่ระดับต่าง ๆ พบว่าในกรณีที่ความชื้นเริ่มต้นเป็น 23.4 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ความชื้นภายในกองข้าวโพดมีค่าสูงกว่าบริเวณผิวกองข้าวโพด แต่สำหรับกรณีที่ความชื้นเริ่มต้นเป็น 18.9 และ 18.7 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก พบว่าความชื้นตลอดกองข้าวโพดค่อนข้างสม่ำเสมอ (Figure 6) เนื่องจากในกรณีที่ความชื้นเริ่มต้นเป็น 23.4 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก อากาศที่ระบายผ่านกองข้าวโพดที่ชั้นความสูงต่าง ๆ มีความชื้นสัมพัทธ์ค่อนข้างสูงทำให้การลดลงของความชื้นค่อนข้างช้ากว่าบริเวณผิวกองข้าวโพดซึ่งสัมผัสกับอากาศแวดล้อมโดยตรง ในการวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้ง ได้สมมุติว่าความชื้นข้าวโพดหลังสิ้นสุดการอบแห้งในแต่ละระดับความลึกมีความแตกต่างของความชื้นน้อย ดังนั้นจึงได้ใช้ค่าความชื้นเฉลี่ยเป็น

ตัวแทนของความชื้นข้าวโพดทั้งหมด จากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี T-test กำหนดช่วงที่ยอมรับได้เป็น 90 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าเฉลี่ยของความชื้นหลังสิ้นสุดการอบแห้ง (Table 1) ทุกการทดลองผ่านการทดสอบในช่วงที่ยอมรับได้ 90 เปอร์เซ็นต์

ผลการวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานดูได้จาก Table 1 พบว่าในการอบแห้งข้าวโพดจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 19 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก เหลือความชื้นในช่วง 12 - 13 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ใช้อัตราการไหลอากาศจำเพาะในช่วง 3.6 - 4.6 m³/min - m³ ข้าวโพด สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 0.46 - 0.9 MJ/kg น้ำที่ระเหย หรือคิดเป็นค่าไฟฟ้า 16 - 27 บาทต่อตันข้าวโพด (ค่าพลังงานไฟฟ้าหน่วยละ 1.65 บาท) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะอากาศแวดล้อมที่ใช้ในการอบแห้ง

อุณหภูมิภายในกองข้าวโพด

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในกองข้าวโพดและอากาศแวดล้อมที่ใช้ในการอบแห้ง พบว่าในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งที่ระดับความลึก 150 เซนติเมตร จะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอากาศแวดล้อมมากกว่าที่ระดับความลึก 80 เซนติเมตร (Figure 7) ซึ่งอาจเนื่องมาจากที่ระดับความลึก 80 เซนติเมตร มี

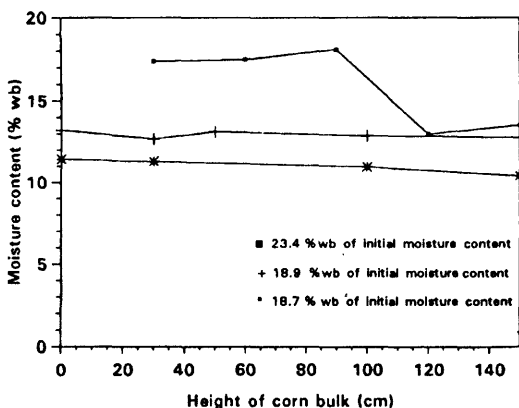


Figure 6 Profile of moisture content of corn after drying.

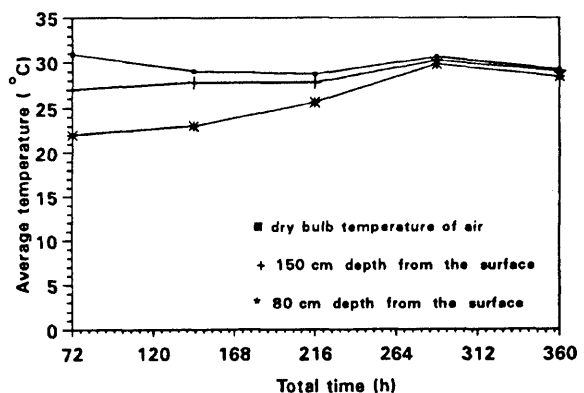


Figure 7 Evolution of temperature in corn bulk and ambient air condition.
[initial moisture content = 18.7 % wb]

ความชื้นสูงกว่า เมื่อเวลาผ่านไปกลับพบว่าอุณหภูมิภายในกองข้าวโพดมีค่าใกล้เคียงกันและเกิดสมดุลทางความร้อนกับอากาศแวดล้อม

คุณภาพข้าวโพด

งานวิจัยนี้ได้พิจารณาคุณภาพข้าวโพด โดยดูจากปริมาณแอฟลาทอกซิน B-1 ที่สร้างและเปอร์เซ็นต์เมล็ดข้าวโพดที่ติดเชื้อ *Aspergillus flavus*

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของปริมาณ แอฟลาทอกซิน B-1 และเปอร์เซ็นต์ข้าวโพดที่ติดเชื้อ *Aspergillus flavus* ตลอดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวความชื้นข้าวโพดลดลงจาก 23.56 เหลือ 17.8

เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก (Figure 8) พบว่าในช่วงเริ่มต้นไม่มีสารแอฟลาทอกซิน B-1 ในขณะที่เมล็ดข้าวโพดมีการติดเชื้อ *Aspergillus flavus* มาก่อน แต่มีในปริมาณน้อย เมื่อเวลาอบแห้งผ่านไป 2 วัน พบว่าเปอร์เซ็นต์เมล็ดข้าวโพดที่ติดเชื้อ *Aspergillus flavus* เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่มีการผลิตสารแอฟลาทอกซิน B-1 น้อยมาก อาจเนื่องมาจาก *Aspergillus flavus* อยู่ในช่วงการเจริญและไม่มีความพร้อมในการสร้างแอฟลาทอกซิน B-1 แต่หลังจากการอบแห้งผ่านไป 2 วัน พบว่าปริมาณแอฟลาทอกซิน B-1 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ขณะที่เปอร์เซ็นต์ข้าวโพดที่ติดเชื้อ *Aspergillus flavus* เริ่มคงที่ แสดงว่า *Aspergillus flavus* มีการเจริญเติบโต

Table 1 Experimental drying results.

Descriptions	Experiments		
	No.1	No.2	No.3
Average drying air conditions			
Temperature (°C)	29.2	31.0	29.7
Specific air flow rate (m ³ /min-m ³ of corn)	4.6	4.5	3.60
Ambient air conditions			
Average temperature (°C)	29.2	31.0	29.7
Average relative humidity (%)	58.0	78.0	57.4
Conditions of corn			
Initial moisture content (%wb)	23.4	18.9	18.7
Initial Aflatoxin B-1 (ppb)	0.0	0.0	53.5
Final moisture content (%wb)	15.2	13.0	11.8
Final Aflatoxin B-1 (ppb)	250	40	32.7
Initial weight (ton)	31	30	40
Energy Consumption			
Total time (h)	360	504	360
Drying time (h)	126	186	134
Electricity (kW-h)	449	498	396
Specific energy consumption (MJ/kg water evap)	0.54	0.88	0.46
Electricity cost (baht/ton)	24	27	16.33

โตเต็มที่และมีสภาวะพร้อมที่สร้างสารแอฟลาทอกซิน B-1

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของปริมาณแอฟลาทอกซิน B-1 และเปอร์เซ็นต์เมล็ดข้าวโพดที่ติดเชื้อ *Aspergillus flavus* ตลอดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวความชื้นข้าวโพดลดลงจาก 18.9

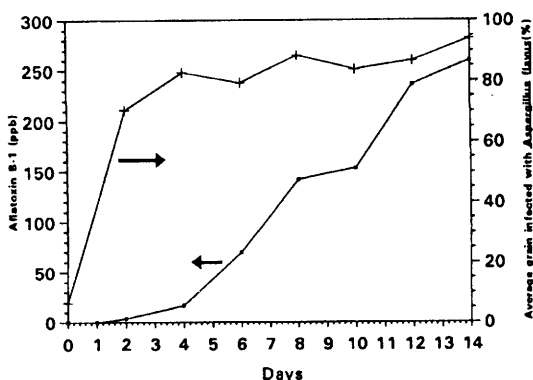


Figure 8 Evolution of aflatoxin B-1 and average grain infected with *Aspergillus flavus* at 50 cm depth from the surface. [moisture content of corn reduced from 23.56 to 17.8 % wb]

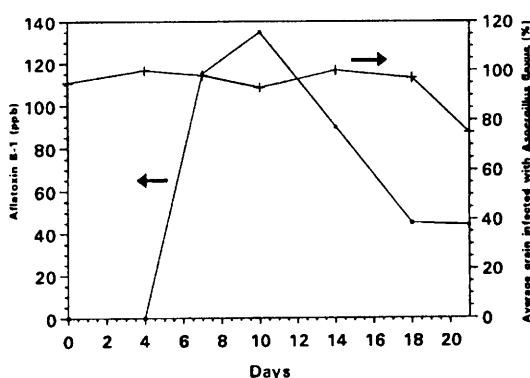


Figure 9 Evolution of aflatoxin B-1 and average grain infected with *Aspergillus flavus* at 30 cm depth from the surface. [moisture content of corn reduced from 18.9 to 13 % wb]

เหลือ 13 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก (Figure 9) พบว่าในช่วงเริ่มต้นไม่มีการผลิตสารแอฟลาทอกซิน B-1 ในขณะที่ข้าวโพดมีการติดเชื้อ *Aspergillus flavus* มาก่อนที่จะมีการรอบแห้ง และการสร้างสารแอฟลาทอกซิน B-1 เกิดขึ้นเมื่อการรอบแห้งผ่านไปแล้วอย่างน้อย 7 วัน หลังจากนั้นสารแอฟลาทอกซิน B-1 เสื่อมสลายลงเกิดเนื่องจากกระบวนการสร้างและสลายสารทุติยภูมิของเซลล์ที่มีการเจริญ (Le Bars, 1988) โดยขณะที่เปอร์เซ็นต์เมล็ดข้าวโพดที่ติดเชื้อ *Aspergillus flavus* มีค่าค่อนข้างคงที่ สำหรับในกรณีที่ความชื้นเริ่มต้นเป็น 18.7 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก (Figure 10) ให้ผลทำนองเดียวกับ Figure 9

จากผลการระบายอากาศผ่านกองข้าวโพดสำหรับในกรณีข้าวโพดมีความชื้นเริ่มต้น 23.5 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก พบว่ามีปริมาณแอฟลาทอกซิน B-1 หลังสิ้นสุดการรอบแห้ง 250 ppb สำหรับในกรณีที่ความชื้นเริ่มต้นเป็น 18.7 และ 18.9 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก พบว่าหลังสิ้นสุดการรอบแห้งมีปริมาณสารแอฟลาทอกซิน B-1 เป็น 32.7 และ 40 ppb ตามลำดับ จากผลดังกล่าวจะเห็นว่าการอบ

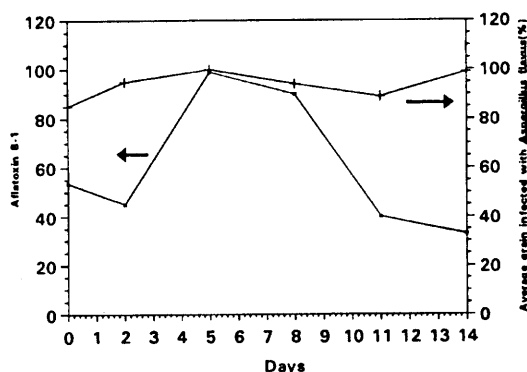


Figure 10 Evolution of aflatoxin B-1 and average grain infected with *Aspergillus flavus* at 30 cm depth from the surface. [moisture content of corn reduced from 18.68 to 11.84 % wb]

แห้งในที่เก็บโดยใช้อากาศแวดล้อม มีความเหมาะสมสำหรับในกรณีที่มีความชื้นเริ่มต้นข้าวโพดไม่สูงกว่า 19 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก

การประเมินราคาของข้าวโพดจากการทดลองที่ขายได้ในท้องตลาด

จากข้อมูลของหลาย ๆ บริษัทที่ทำการรับซื้อผลิตผลทางการเกษตร ในช่วงปี พ.ศ. 2536-2537 พบว่าในปัจจุบันได้แบ่งเกรดข้าวโพดเป็น 2 เกรด คือ เกรดไซโล ราคาข้าวโพดประมาณ 170 บาท/หาบ (1 หาบเท่ากับ 60 กิโลกรัม) และเกรดอาหารสัตว์ แบ่งได้เป็น 3 ระดับ คือ

1 ข้าวโพดในเกรดดีเยี่ยม ราคาประมาณ 190 บาท/หาบ

2 ข้าวโพดในเกรดดีมาก ราคาประมาณ 185 บาท/หาบ

3 ข้าวโพดในเกรดดี ราคาประมาณ 180 บาท/หาบ

เมื่อนำข้าวโพดที่ผ่านการอบแห้งที่แต่ละการทดลองไปขายพบว่าในกรณีที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพดเป็น 23.4 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก สามารถขายข้าวโพดอยู่ในเกรดอาหารสัตว์เบอร์ 3 กรณีที่มีความชื้นเริ่มต้นเป็น 18.9 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก สามารถขายข้าวโพดอยู่ในเกรดอาหารสัตว์เบอร์ 1 และในกรณีที่มีการขายขนาดพื้นที่อบแห้งเป็น 6 เมตร $\times$ 6 เมตร โดยใช้ตัวอย่างข้าวโพดที่มีความชื้นเริ่มต้นเป็น 18.7 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก สามารถขายข้าวโพดอยู่ในเกรดอาหารสัตว์เบอร์ 2 เนื่องจากบริเวณด้านปลายของท่อตะแกรงลม มีการขายความยาวเป็น 6 เมตรดัง Figure 1 ส่งผลให้บริเวณด้านนี้ข้าวโพดมีการจับตัวเป็นก้อน และมีรากเกิดขึ้น ซึ่งเกิดเนื่องจากการกระจายของลมไปไม่ถึง จากผลการทดสอบการอบแห้งพบว่าเทคนิคการอบแห้งแบบใช้อากาศแวดล้อมและอัตราการไหลอากาศต่ำ ไม่สามารถแก้ปัญหาการ

เกิดเชื้อรา หรือ แอฟลาทอกซิน B-1 ที่ช่วงความชื้นข้าวโพดสูง ๆ ได้ อย่างไรก็ตามการอบแห้งแบบนี้ยังคงมีประโยชน์อยู่มาก กล่าวคือในช่วงที่ไม่มีแดดหรือมีฝนตกติดต่อกันเป็นเวลาหลายวัน เมื่อนำข้าวโพดความชื้นสูงที่รับซื้อจากเกษตรกร มาเก็บ 3-4 วัน โดยไม่มีการระบายอากาศ ทำให้ข้าวโพดมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยว ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากในกองข้าวโพดมีจุลินทรีย์หรือแมลงอื่น ๆ และการหายใจของเมล็ดข้าวโพด โดยใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอาหาร ทำให้ปริมาณออกซิเจนในกองข้าวโพดลดลงอย่างรวดเร็ว ขณะที่ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น ผลจากการที่มีออกซิเจนลดต่ำลงทำให้มีสิ่งมีชีวิตบางชนิดไม่สามารถอยู่ได้ในสภาพที่ขาดออกซิเจนแต่มีจุลินทรีย์บางชนิดที่สามารถอยู่ได้ในสภาพที่ขาดออกซิเจนเช่น แบคทีเรียจำพวกที่ไม่ต้องใช้ใช้ออกซิเจนในการหายใจ และ ยีสต์ จะเพิ่มอย่างรวดเร็ว จากสภาวะดังกล่าวส่งผลให้จุลินทรีย์บางชนิดที่ไม่ต้องการออกซิเจนสามารถสร้างสารต่าง ๆ เช่น กรดแลคติก กรดอื่น ๆ และอัลกอฮอล์ จึงทำให้ข้าวโพดมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยว (โครงการศูนย์วิจัยการปรับปรุงคุณภาพข้าวโพด, 2535) เมื่อนำข้าวโพดที่มีกลิ่นเหม็นเปรี้ยวไปขายจะถูกจัดอยู่ในเกรดไซโลทันทีที่ไม่ว่าข้าวโพดจะมีสารแอฟลาทอกซินหรือไม่ก็ตาม แต่ถ้ามีระบบอบแห้งชนิดนี้ก็จะสามารถแปลผลเพื่อเพิ่มออกซิเจนและลดความชื้นในกองข้าวโพด ซึ่งสามารถป้องกันการเกิดเหม็นเปรี้ยวได้

จากผลที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าตัวแปรที่สำคัญที่มีผลกระทบต่อราคาข้าวโพดได้แก่ ปริมาณแอฟลาทอกซิน B-1 การมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยวและการเกิดราบนกองข้าวโพด ดังนั้นการติดตั้งระบบระบายอากาศในที่เก็บโดยใช้อากาศแวดล้อมมีส่วนช่วยในการปรับปรุงคุณภาพข้าวโพดให้ดีขึ้น

สรุป

ระบบอบแห้งในที่เก็บระดับต้นแบบโดยใช้อากาศแวดล้อมที่ออกแบบให้การกระจายของลมสม่ำเสมอตลอดกองข้าวโพด และมีประสิทธิภาพในการอบแห้งค่อนข้างสูงในช่วงที่ความชื้นข้าวโพดไม่สูงกว่า 19 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ในช่วงที่ข้าวโพดมีความชื้นค่อนข้างสูงควรลดความชื้นข้าวโพดให้เหลือ 18-19 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ภายในเวลา 2 วัน เพื่อป้องกันการสร้างสารแอฟลาทอกซิน B-1 หลังจากนั้นควรมีการลดความชื้นข้าวโพดให้เหลือ 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ภายในเวลา 14 วัน ในการอบแห้งข้าวโพดจากความชื้นเริ่มต้น 19 เปอร์เซ็นต์ให้เหลือ 12 - 13 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก โดยใช้อัตราการไหลของอากาศ $3.6 - 4.6 \text{ m}^3/\text{min-m}^3$ ข้าวโพดสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า $0.46 - 0.9 \text{ MJ/kg}$ น้ำที่ระเหยหรือคิดเป็นค่าใช้จ่าย 16 - 27 บาท/ตัน ข้าวโพด

คำขอขอบคุณ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณกองส่งเสริมเทคโนโลยีกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ที่ให้ทุนสนับสนุนในการดำเนินโครงการนี้ ใคร่ขอขอบคุณ Australian Centre for International Agricultural Research ที่มีส่วนร่วมในการสนับสนุนโครงการนี้เช่นกัน และใคร่ขอแสดงความขอบคุณต่อสหกรณ์การเกษตรนิคมสร้างตนเองพระพุทธรบาทจำกัดที่ให้ความร่วมมือด้วยดีตลอดมา

เอกสารอ้างอิง

โครงการศูนย์วิจัยการปรับปรุงคุณภาพข้าวโพด. 2535.
เอกสารทางวิชาการ เรื่อง การป้องกันสารพิษ
แอฟลาทอกซินในข้าวโพดของประเทศไทย,

กรมวิชาการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
ไพโรจน์ วงศ์วิโรจน์ธนา, สมชาติ โสภณภณฤทธิ์, และ
อดิศักดิ์ นาดกรณกุล. 2536. การศึกษาความเป็น
ไปได้ในการอบแห้งข้าวโพดในถังเก็บภายใต้
สภาวะอากาศร้อนชื้น, วารสารสถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าธนบุรี. 15 : 1-24.

วีรวัฒน์ นิลรัตนกุล, วันเพ็ญ ศรีทองชัย, อาคม สุ่ม
มายุ, อำนาจ ชินเชษฐ, และ อำนาจ ทองดี. 2537.
การป้องกันสารพิษแอฟลาทอกซินในข้าวโพด
ความชื้นสูง โดยการรมด้วยก๊าซคาร์บอนไดออก
ไซด์, วิทยาศาสตร์เกษตรศาสตร์. 12 : 58-65.

Brooker, D.B. and A.K.Duggal. 1982. Allowable
storage time of corn affected by heat build up
: natural convection and aeration, Transactions
of the ASAE. 25 : 806 - 810.

Eckhoff, S.R., J.Tutie, G.H.Foster, R.A. Anderson,
and M.R.Okos. 1984. Inhibition of microbial
growth during ambient air corn drying using
sulfur dioxide, Transactions of the ASAE. 27 :
907 - 914.

El - Gazzar, F.E., and E.H. Marth. 1988. Role of
hydrogen peroxide in prevention of growth and
aflatoxin production by *Aspergillus parasiticus*,
Journal of Food Protection. 51 : 263 - 268.

Kalchick, S.L., J.Silva, J.C.Rodrigues, and F.W.Bakker-
Arkema. 1981. On farm corn drying comparison,
pp. 1 - 25. In American Society of Agricultural
Engineers Paper No.81 - 3011. American
Society of Agricultural Engineers, St. Joseph,
Michigan.

Kositcharoenkul, S., K.Bhudhasamai, P.Tanboon-Ek,
O.Tsuruta, and K.Arai. 1992. *Aspergillus flavus*
infection and aflatoxin contamination of maize
in Thailand, pp. 13 - 22. In Research Report on

- Maize Quality Improvement Research Centre Project.
- Le Bars, J. 1988. pp. 347-366. *In* D.L. Multon (ed.), Preservation and Storage of Grains, Seeds and Their By-products, Levoisier Publishing, New York.
- Thompson, T.L., R.M.Pert and G.H.Fosteh. 1968. Mathematical simulation of corn drying-a new model, Transactions of the ASAE. 16 : 1136-1139.
- Wongurai,A., O.Tsuruta and K. Arai. 1992. Water activity of Thai maize and growth of *Aspergillus flavus*, pp.7 - 9. *In* Research Report on Maize Quality Improvement Research Centre Project