โครงการวิจัยที่ 3

การประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุต่อคุณภาพเมล็ดพันธุ์ และการควบคุมเชื้อรา *Aspergillus flavus* และการสร้างสารอฟราทอกซินที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน

The Application of Radio Frequency Heat Treatment on Seed Quality and to Eradicate *Aspergillus flavus* in *Perilla frutescens* (L.) *Britton*

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาเพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของคลื่นความถี่วิทยุในการกำเนิดแหล่งพลังงานความร้อนเ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการใช้เทคนิคคลื่นความถี่วิทยุกับการอบเมล็ดด้วยลมร้อนพื่อควบคุมเชื้อรา และสารพิษอะฟราท๊อกซินที่ปนเปื้อนบนเมล็ดงาขี้ม้อน และผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเมล็ดงาขี้ม้อน โดยวางแผนการทดลองแบบ Factorial in CRD จำนวน 5 ซ้ำ โดยกรรมวิธีการทดลอง คือ ระดับความชื้นของเมล็ดเบื้องต้น (10, 14 และ 18%-wb), ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70, 80, และ 90 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุ (1, 3, 5, 7, และ 10 นาที) โดยผลการศึกษา พบว่า คลื่นความถี่วิทยุมีประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อราในกลุ่ม *Aspergillus* sp. ทั้ง *Aspergillus flavus* และ *Aspergillus niger* ได้ดีกว่าเชื้อรา *Fusarium moniliforme* และ *Penicillium* sp.โดยเฉพาะที่สภาวะอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที ในเมล็ดงาขี้ม้อนที่มีความชื้นเบื่องต้น 18% wb. ซึ่งมีประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อราทุกสายพันธุ์ที่ปนเปื้อนบน/ในเมล็ดงาขี้ม้อนได้ดีที่สุด ซึ่งสภาะการใช้คลื่นความถี่วิทยุดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการควบคุมสารพิษอะฟราท๊อกซินได้ดีที่สุดเช่นกัน เมื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุ และการอบด้วยลมร้อนในการควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อราบน/ในเมล็ดงาขี้ม้อน พบว่า การประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุมีประสิทธิภาพในการควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อราในกลุ่ม *Aspergillus flavus* และ *Aspergillus niger* ได้ดี ในขณะที่การอบเมล็ดงาขี้ม้อนด้วยลมร้อนจะมีประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อราในกลุ่ม *Fusarium moniliforme* และ *Penicillium* sp. ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุภายใต้สภาวะอุณหภูมิตั้งแต่ 70 – 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 – 10 นาที (T1 –T9) เป็นสภาวะที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อรา *Aspergillus flavus* และ *Aspergillus niger* สูงสุด ในขณะที่เมื่อ

ประยุกต์ใช้ความถี่วิทยุเพื่อกำเนิดพลังงานความร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสขึ้นไป (T7 – T9) จึงจะสามารถควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อรา *Fusarium moniliforme* และ *Penicillium* sp. ได้ ในขณะที่เมื่อมีการประยุกต์ใช้การอบเมล็ดงาขี้ม้อนด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 10 – 30 นาที (T14 และ T15) จะมีประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อรา *Fusarium moniliforme* และ *Penicillium* sp. ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามภายใต้สภาพวะของการอบเมล็ดงาขี้ม้อนด้วยลมร้อนดังกล่าวจะสามารถควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อรา *Aspergillus flavus* และ *Aspergillus niger* ได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้นพบว่า การประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนในทุก ๆ สภาวะมีประสิทธิภาพในการควบคุม – ป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท๊อกซินในเมล็ดงาขี้มอ้นสูงสุด โดยเฉพาะเมื่อการใช้คลื่นความถี่วิทยุกำเนิดพลังงานความร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 70 – 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 5 – 10 นาที จะสามารถควบคุมการปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท๊อกซินให้มีระดับการปนเปื้อนที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานขององค์กรอาหาร และยาที่ยินยอมให้มีการปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท๊อกซินในผลผลิตทางการเกษตร โดยเฉพาะในกลุ่มของธัญพืชได้เพียง 20 ppb โดยเฉพาะเมื่อมีการใช้คลื่นความถี่วิทยุกำเนิดพลังงานความร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ซึ่งมีการปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท๊อกซินต่ำกว่า 10 ppb ในขณะที่การประยุกต์ใช้การอบเมล็ดงาขี้ม้อนด้วยลมร้อนทุกกรรมวิธีนั้นไม่สามารถควบคุม - ป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท๊อกซินที่ปนเปื้อนในเมล็ดงาขี้ม้อน โดยจากการศึกษายังพบระดับการปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท๊อกซินอยู่ในระดับที่สูงกว่าค่ายอมรับได้มาตรฐาน (20 ppb) นอกจากนี้การประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อรา และสารพิษอะฟราท๊อกซินน้อยกว่าการอบเมล็ดด้วยลมร้อนถึงประมาณ 55 เท่า โดยการใช้คลื่นความถี่วิทยุใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 68.20 – 88.00 kJ ในขณะที่การอบด้วยลมร้อนใช้พลังงานถึง 3,780 – 4,860 kJ ในการดำเนินการ แต่อย่างไรก็ถามจากผลการศึกษา พบว่า หากทำการเลือกสภาวะของการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุที่ไม่เหมาะสมมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดงาขี้ม้อนเช่นกัน

คำสำคัญ: คลื่นความถี่วิทยุ, การอบเมล็ดด้วยลมร้อน, การใช้พลังงาน, งาขี้ม้อน, คุณภาพเมล็ดพันธุ์, การอบลมร้อน

Abstract

The experiment was aimed to evaluate – comparative the efficiency of radio frequency (RF) heat treatment and convectional heat treatment (oven method) on storage fungai and aflatoxin decontamination and its affected on perilla grain quality. The experiment was done under Factorial in CRD with 5 replications. Treatments were initial grain moisture content (10, 14, and 18%-wb), RF – treated temperatures (50, 60, 70, 80 and 90 ^{O}C) and RF-treated duration (1, 3, 5, 7, and 10 min). The experiment found that RF-heart treatment had the higher efficiency of *Aspergillus flavus,* and *Aspergillus niger* decontamination than *Fusarium moniliforme* and *Penicillium* sp. decontamination. The best condition of RF-heat treatment to control those fungi was 90 ^{O}C for 10 min in the grain that had 18%-wb of initial moisture content. Moreover, RF-heat treatment and convectional drying comparison, found that RF-heat treatment provided the higher efficiency of *Aspergillus flavus,* and *Aspergillus niger* decontamination than convectional drying. However, convectional drying could control *Fusarium moniliforme* and *Penicillium* sp. better than RF-heat treatment.. Additionally, the RF-heat treatment also had the high efficiency on aflatoxin decontamination. Aflatoxin could decontaminated when applied RF-heat treatment under conditions; 70 – 90 ^{O}C for 5 – 10 min. Under this condition, aflatoxin contamination found lower than the limitation (20 ppb). On the other hand, the convectional drying could not decontaminated alfatoxin that still higher than the limitation. Additionally, RF-heat treatment consumed lower energy than convectional drying about 55 times. RF-heat treatment used energy for 68.20 – 88.00 kJ, while 3,780 – 4,860 kJ for convectional drying. However, RF-heat treatment also had the negative effect on seed/grain quality and biochemical degradation when applied un-suitable conditions.

Keywords: Radio frequency, heat treatment, perilla, grain quality, convectional drying, energy consume

3.1 รายนามคณะผู้วิจัยตามโครงการวิจัยที่ 3

ผู้รับผิดชอบ ประกอบด้วย

3.1.1 หัวหน้าโครงการ

อาจารย์ ดร. สุชาดา เวียรศิลป์

หน่วยงานสังกัด: สถาบันวิจัยวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50000

หมายเลขโทรศัพท์: 0-5394-4050

หมายเลขโทรศัพท์ (มือถือ): 0-81716-2280

E-mail address: karei88@yahoo.com

3.1.2 ผู้ร่วมงานวิจัย

3.1.2.1 ดร. ปิติพงษ์ โตบันลือภพ

หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน: 3 5299 00050 03 7

หน่วยงานสังกัด: ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44000

หมายเลขโทรศัพท์: 0-4372-1728, **โทรสาร** 0-4374-3135,

หมายเลขโทรศัพท์ (มือถือ): 0-8700-93646

E-mail address: pitipongtho@yahoo.com

ที่อยู่ (ที่บ้าน): 256/13 หมู่บ้าน ถ. ปราจีนธาณี ต.ดงพระราม อ.เมือง จ.ปราจีนบุรี 25000

3.1.2.2 นายกรกิตติ์ เฉลยถ้อย

หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน: 3 5201 01485 27 1

หน่วยงานสังกัด:บริษัท เอฟ แอนด์ ที อินเตอร์เนชั่นมัล อะโกร บัสซิเนส จำกัด (F&T International Agro-Business Co. Ltd.) 70/52 ซอย 11 หมู่ 5 ต. บึงคำพร้อย อ. ลำลูกกา จ. ปทุนธานี 12150

หมายเลขโทรศัพท์: 0-2532-6411

หมายเลขโทรศัพท์ (มือถือ): 0-8766-17057

E-mail address: italianbuffalo@hotmail.com

3.1.2.3 ดร.วิลาสินี จิตต์บรรจง

หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน: 3 8601 00266 52 2

หน่วยงานสังกัด: กองคุ้มครองพันธุ์พืช กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

หมายเลขโทรศัพท์: 0-2940-5628

หมายเลขโทรศัพท์ (มือถือ): 0-8175-06423

E-mail address: wilas111@yahoo.com

3.1.2.4 นายสมคิด พันโนราช

เลขประจำตัวประชาชน 1 4305 000 74 54 7

ภาควิชาเทคโนโลยีเกษตร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม หมายเลขโทรศัพท์ 087 – 5663968

E – mail : pannorat@gmail.com

3.1.2.5. นายสาวปวีณา ฤาชา

เลขประจำตัวประชาชน 1 3604 00083 51 1

ภาควิชาเทคโนโลยีเกษตร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม หมายเลขโทรศัพท์ 087 – 5663968

3.1.2.6 นางสาวสุภาวดี พลทัดสะ

ภาควิชาเทคโนโลยีเกษตร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม หมายเลขโทรศัพท์ 087 – 5663968

3.1.3 ที่ปรึกษาโครงการวิจัย

3.1.3.1 Prof. Dr. Elke Pawelzik

ตำแหน่ง: Full Professor (C3)

หน่วยงานสังกัด: Institute for Agricultural Chemistry, Department Quality of Plant Products, Georg-August University of Goettingen, Carl-Sprengel-Weg 1, D-37075 Goettingen, Germany

หมายเลขโทรศัพท์:+49-551-395545, **โทรสาร**: +49-551-395570

E-Mail: epawelz@gwdg.de

3.1.3.2 Dr. sc. agr. Dieter von Hörsten

หน่วยงานสังกัด: Department für Nutzpflanzenwissenschaften Abteilung Agrartechnik Gutenbergstraße 33, 37075 Göttingen, Germany

หมายเลขโทรศัพท์: +49 (0) 551 / 39 55 89, **โทรสาร**: +49 (0) 551 / 39 55 95

E-Mail:dhoerst@uni-goettingen.de

3.1.3.3 Prof. Dr. Wolfgang Lücke

หน่วยงานสังกัด: Department für Nutzpflanzenwissenschaften Abteilung Agrartechnik Gutenbergstraße 33, 37075 Göttingen, Germany

หมายเลขโทรศัพท์: +49 (0) 551 / 39 55 89, **โทรสาร**: +49 (0) 551 / 39 55 95

E-Mail: wolfgang.luecke@zvw.uni-goettingen.de

3.1.3.4 ศาสตราจารย์ ดร.วาสนา วงษ์ใหญ่

หน่วยงานสังกัด: ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถ. พหลโยธิน จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์: 0-2579-0588, 0-2579-6131

3.1.3.5 อาจารย์ สุขุมาลย์ เลิศมงคล

ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถ.พหลโยธิน จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์: 0-2579-0588, 0-2579-6131

3.2 หน่วยงานวิจัย

3.2.1 หน่วยงานหลัก

3.2.1.1 สถาบันวิจัยวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50000

หมายเลขโทรศัพท์: 0-5394-4050

3.2.1.2 ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44000

หมายเลขโทรศัพท์: 0-4372-1728, **โทรสาร** 0-4374-3135,

3.2.2 หน่วยงานสนับสนุน

3.2.2.1 บริษัท เอฟ แอนด์ ที อินเตอร์เนชั่นมัล อะโกร บัสซิเนส จำกัด (F&T International Agro-Business Co. Ltd.) 70/52 ซอย 11 หมู่ 5 ต. บึงคำพร้อย อ.ลำลูกกา จ. ปทุนธานี 12150

3.2.2.2 กองคุ้มครองพันธุ์พืช กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
หมายเลขโทรศัพท์: 0-2940-5628

3.2.2.3 Institute for Agricultural Chemistry, Department Quality of Plant Products, Georg-August University of Goettingen, Carl-Sprengel-Weg 1, D-37075 Goettingen, Germany
หมายเลขโทรศัพท์:+49-551-395545, **โทรสาร**: +49-551-395570

3.2.2.4 Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agricultural Science, Department für Nutzpflanzenwissenschaften Abteilung Agrartechnik Gutenbergstraße 33, 37075 Göttingen, Germany
หมายเลขโทรศัพท์: +49 (0) 551 / 39 55 89, **โทรสาร**: +49 (0) 551 / 39 55 95

3.3 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา

Perilla frutescens (L) Britton หรือ ต้นงาขี้ม้อน จัดเป็นพืชสมุนไพร ในวงศ์ Lamiaceae เป็นพืชที่มีประวัติการใช้เป็นทั้งอาหารและยาในประเทศทางแถบ เอเชียมาเป็นเวลานานแล้ว พืชชนิดนี้พบมากในหลายประเทศแถบเอเชียตะวันออก เป็นพืชตระกูลมิ้นท์ ใช้ประกอบอาหารหลากหลายในหลายประเทศ โดยเฉพาะประเทศญี่ปุ่น(ชื่อญี่ปุ่น:shiso) เกาหลี และจีน (กรมวิชาการเกษตร. 2540) สารสกัดจากเมล็ดเป็นแหล่งของกรดไขมันจำเป็นโอเมก้า-3 (omega-3 fatty acid), อัลฟ่าไลโนเลนิก แอซิด (Alfa-linolenic acid) สารสกัดสำคัญในกลุ่ม polyphenols พบได้ทั้งจากส่วนใบและเมล็ด (Makino T, et.al. 2003) ที่ได้รับความสนใจอย่างมากคือ โรสมารินิก แอซิด (Rosmarinic acid) มีการวิจัยจำนวนมากยืนยันผลว่า โรสมารินิก แอซิด มีฤทธิ์ต้านการแพ้ (H.Takano, et.al. 2004) และต้านการอักเสบได้ดี การศึกษาที่น่าสนใจ เช่น การให้สารสกัด perilla ซึ่งมีสาร rosmarinic acid ในปริมาณสูงโดยวิธีรับประทานช่วยลดอาการหอบเหนื่อยจากอาการแพ้ (Allergic asthma) (Sanbongi C, et.al. 2004)ลดอาการแพ้อากาศจากการเปลี่ยนฤดู(Seasonal Allergic Rhinoconjunctivitis) โดยออกฤทธิ์ยับยั้งปฏิกิริยาการตอบสนองต่ออาการแพ้และต้าน

อาการอักเสบ การวิจัยโดยการทาโรสมารินิก แอซิดที่ผิวหนังพบว่าสามารถยับยั้งการเจริญของเซลล์มะเร็งได้ โดยออกฤทธิ์ต้านการอักเสบและต้านอนุมูลอิสระ (Osakabe N, et.al. 2002) โรสมารินิก แอซิด จาก perilla ช่วยปกป้องตับจากการถูกทำลาย โดยการลดปฏิกิริยา superoxide หรือ peroxynitirite (Lin CS, et.al. 2007) และยับยั้งการเจริญของมะเร็งตับ (Ueda H, Yamazaki C, Yamazaki M. 2003) นอกจากนี้ยังพบสาร Luteolin ซึ่งสกัดได้จากใบ Perilla แสดงฤทธิ์ต้านการอักเสบ และยับยั้งเซลล์มะเร็ง (Ueda H, Yamazaki C, Yamazaki M. 2002) และการวิจัยล่าสุดในปี 2007 มีรายงานหนึ่งพบว่าสารสกัดจาก Perilla แสดงฤทธิ์ในการทำให้ผิวขาวขึ้น โดยยับยั้งการทำงานของ tyrosinase, ยับยั้งการสร้างเม็ดสีเมลานิน (Hwang JH, Lee BM. 2007) น้ำมันงาขี้ม้อนสามารถป้องกันการเกิดความแข็งตัวของเลือด ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดภาวะหัวใจวายและสมองขาดเลือก (heart attack and strokes) ได้โดยมีฤทธิ์ลดการสร้างสารที่ช่วยในการเกาะตัวของเกร็ดเลือด (plalelet-activating factor) (PAF) (T Horii, *et.al*., 1991) น้ำมันงาขี้ม้อนสามารถป้องกันการเกิดโรคมะเร็งได้หลายชนิด โดยเฉพาะการเกิดมะเร็งในลำไส้ใหญ่ ซึ่งได้ทำการทดลองในสัตว์ทดลองว่าดีกว่าอาหารเสริมชนิดอื่น และทำให้มีความไวของเนื้อเยื่อลำไส้ใหญ่ต่อการกระตุ้นสารก่อมะเร็งลดลง มีปริมาณสารบ่งชี้การเกิดมะเร็งลดลง (tomor marker) ลดลง น้ำมันงาขี้ม้อนสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์มะเร็งต่อน้ำนมได้ โดยการทดลองพบว่าน้ำมันงาขี้ม้อนสามารถลดจำนวนของก้อนมะเร็งต่อมน้ำนมในสัตว์ทดลองได้มากกว่าที่เคยให้อาหารเสริมชนิดอื่น (Tomio Narisawa, *et.al*., 1994) การรับประทานน้ำมันงาขี้ม้อน จะทำให้มีการเพิ่มน้ำหนักและระดับน้ำตาลกลูโคสในเลือดต่ำกว่าการรับประทานอาหารไขมันสูง เช่น ถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม น้ำมันหมู และ rapeseed oil (Metabolism: Clinical and Experimental, 1996) น้ำมันงาขี้ม้อนสามารถกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันและลดความรุนแรงของการเกิดภูมิแพ้ชนิดเฉียบพลัน (allergic hypersensitivity) จากการกระตุ้นของสารก่อภูมิแพ้ (antigen) (Hirohisa Takano, *et.al.* , 2004)

ด้วยคุณสมบัติเด่นหลายประการของ Perilla ,สารสกัดจากพืชชนิดนี้จึงเริ่มมีบทบาทในแวดวงเครื่องสำอางมากขึ้น นอกเหนือจากบทบาทในการรับประทานเพื่อประกอบอาหาร, บำรุงสุขภาพและต้านทาน-รักษาโรคต่างๆ

ปัจจุบันมีการตื่นตัวในเรื่องของการดูแลและเอาใจใส่ด้านความปลอดภัยด้านอาหาร (Food Safety) และคุณค่าทางโภชนาการมากขึ้น งาขี้ม้อน (*Perilla frutescens* L.) จัดเป็นพืชน้ำมันที่มีความสำคัญทางโภชนาการอีกพืชหนึ่ง น้ำมันงาขี้ม้อนเป็นน้ำมันที่มีคุณภาพ และคุณค่าทางอาหารสูง เนื่องจากมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง พบว่าน้ำมันงาม้อนมี โอเมก้า-3 (ALA) อยู่มากถึง 50-60% ซึ่งปกติจะพบ โอเมก้า-3 ในน้ำมันปลา (Fish oil) เพราะฉะนั้นจึงเหมาะกับคนที่ไม่บริโภคปลา แพ้อาหารทะเล หรือมังสวิรัติ และโอเมก้า-3 นี้จะถูกเอ็นไซม์ delta-6 desaturase เปลี่ยนในร่างกายเป็นสาร EPA, DHA and series-3 prostaglandins, series-5 leukotrienes and serie-3 thromboxanes (คมสัน และกำพล, 2546) นอกจากผู้บริโภคจะนิยมบริโภคงาโดยตรงแล้วยังมีการนำเมล็ดงาและ

น้ำมันงาไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท (ศักดา, 2544) นอกจากหลายประเทศแถบเอเชียที่นิยมบริโภคงาแล้วยังมีประเทศตะวันออกกลาง สหภาพยุโรป และสหรัฐอเมริกา ก็มีแนวโน้มสูงขึ้น ดังนั้น เกษตรกรจึงจำเป็นต้องให้ความสำคัญในการผลิตงาเพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพ แต่ในบางพื้นของแหล่งปลูกงายังคงมีการบ่มงาขี้ม้อนหลังเก็บเกี่ยว เพื่อให้ใบร่วงเร็วขึ้น การบ่มงาเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเจริญของเชื้อรา โดยเฉพาะเชื้อรากลุ่ม *Aspergillus* sp. ซึ่งเป็นกลุ่มเชื้อราระหว่างการเก็บรักษาที่สามารถสังเคราะห์สารพิษ Alfa toxin ปนเปื้อนในกองบ่มเนื่องจากมีสภาพอุณหภูมิและความชื้นเพิ่มขึ้น ซึ่ง บุญเกื้อ และคณะ (2531) พบว่าการบ่มงาทำให้มีเชื้อรา *Macrophomina sp.* ติดมากับเมล็ดมากกว่าที่ไม่มีการบ่มงาประมาณ 2 เท่า และยังพบเชื้อราที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งคือ *Aspergillus sp.* ซึ่งเป็นเชื้อราที่ผลิตสารพิษ Alfatoxin ตัวการที่ก่อให้เกิดโรงมะเร็งตับ (วีรวัฒน์ และคณะ, 2542)

สำหรับในประเทศไทย มีการบริโภคงาขี้ม้อน ในเขตุพื้นที่ภาคเหนือตอนบน โดยรู้จักในชื่อของ งาขี้ม้อน งามน งาดอย ซึ่งจะนิยมปลูกตามไร่นา หรือสวนหลังบ้านเพื่อเก็บเมล็ดไว้ใช้ในการทำขนมภายในครัวเรือน หรือเรียกได้ว่าเป็นพืชวัฒนธรรมของชนกลุ่มน้อยในเขตพื้นที่ภาคเหนือตอนบน งาขี้ม้อนปัจจุบันไม่มีการเพาะปลูกในเชิงการค้า หรือแม้กระทั้งการนำไปใช้ประโยชน์แปรรูปให้เหมาะสมตามคุณสมบัติที่หลากหลายดังได้กล่าวมาข้างต้น

เมล็ดพันธุ์ที่มีคุณภาพคือ เมล็ดพันธุ์ที่สะอาด ปราศจากสิ่งเจือปนมีความบริสุทธิ์ และตรงตามสายพันธุ์ โดยไม่มีเมล็ดพืชอื่นปะปน มีความชื้นต่ำ เปอร์เซ็นต์ความงอกสูง งอกได้เร็ว ให้ต้นสมบูรณ์ มีขนาดใหญ่ มีน้ำหนักและสีสม่ำเสมอ ไม่มีเมล็ดวัชพืช โรคและแมลงศัตรูพืชติดปะปน (วัลลภ, 2538) เมล็ดพันธุ์ที่มีคุณภาพดีนับเป็นปัจจัยที่ทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำ (นงลักษณ์, 2528) จากการทดลองของจวงจันทร์ (2533) พบว่าการใช้เมล็ดพันธุ์ที่มีคุณภาพดีสามารถทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น 5 – 20 %ด้วยเหตุนี้นับว่าคุณภาพของเมล็ดพันธุ์เป็นปัจจัย ที่สำคัญในการผลิต

ความชื้นเมล็ดพันธุ์เป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพเมล็ดพันธุ์มาก เนื่องจากความชื้นเป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลให้เมล็ดเกิดการเสื่อมสภาพ ในเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนที่เก็บเกี่ยวจากแปลงยังคงมีความชื้นสูง ณ ระดับความชื้นนี้เมล็ดจะมีอัตราการหายใจสูง เกิดการสะสมความร้อนในกองเมล็ดพันธุ์ ชักนำให้เกิดการแพร่ระบาดของเชื้อสาเหตุโรคที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์ หรือแม้กระทั้งเชื้อราระหว่างการเก็บรักษาเมล็ด ซึ่งเมื่อนำเมล็ดพันธุ์ดังกล่าวไปทำการปลูกเชื้อราสาเหตุโรคพืชก็จะอาศัยเมล็ดพันธุ์เป็นแหล่งพักตัวก่อนจะขยายพันธุ์ไปกับกระบวนการปลูกงาขี้ม้อนต่อไป

นอกจากนั้น *Aspergilus flavus* เป็นเชื้อราสาเหตุโรคพืช และเชื้อราที่สำคัญระหว่างการเก็บรักษาเมล็ดธัญพืชที่สำคัญชนิดหนึ่ง โดยเชื้อรากลุ่มนี้สามารถสร้างสารพิษ Aflatoxin ที่เป็นสารสำคัญสามารถก่อมะเร็ง และเมื่อเมล็ดมีการปนเปื้อนของเชื้อรา *A. flavus* แล้วจะทำให้เมล็ดถูกทำลายระหว่างการเก็บรักษาเมล็ดในโรงเก็บได้ โดยเชื้อรา *A. flavus* จะถูกยับยั้งการเจริญเมื่ออุณหภูมิเกินกว่า 46 $^{\circ}$C และ ถูกกำจัดอย่างถาวรที่อุณหภูมิ 55 $^{\circ}$C (สมบัติ, 2536)

ในการป้องกันกำจัดเชื้อราที่ติดมากับเมล็ดงาขี้ม้อนนั้นสามารถดำเนินการได้หลายวิธี เช่น วิธีการใช้ความร้อนจากการอบเพื่อกำจัดเชื้อราในเมล็ด และการใช้ความร้อนจากแสงแดด วิธีการใช้ความร้อนเพื่อการกำจัดเชื้อราที่ติดมากับเมล็ดเป็นวิธีที่กำจัดเชื้อราได้อย่างมีประสิทธิภาพส่งผลกระทบต่อคุณภาพของเมล็ดงาขี้ม้อนน้อย แต่ทั้งนี้วิธีการใช้ความร้อนในปัจจุบันมีข้อจำกัดด้านขนาดของโรงอบเมล็ดที่ทำให้เมล็ดงาขี้ม้อนได้รับความร้อนไม่สม่ำเสมอ และการใช้พลังงานที่มากต้นทุนการผลผลิตสูง รวมทั้งการใช้ความร้อนจะต้องใช้เวลานาน เนื่องจากเมล็ดมีความนำความร้อนที่ไม่ดี และปัญหาที่สำคัญเนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้สำหรับแหล่งพลังงานความร้อนมีอยู่อย่างจำกัด อีกทั้งเมล็ดงาขี้ม้อนมีองค์ประกอบของสารในกลุ่มไขมันอยู่มาก และสารที่มีคุณประโยชน์จะละลายอยู่ในไขมันนั้นๆ การใช้ความร้อนที่ระยะเวลานานมากเกินไปมีผลทำให้สารกลุ่มไขมันเกิดการสลายตัวเป็นสารอนุพันธ์ต่าง ๆ ในกลุ้มของกรดไขมันที่อิ่มตัว (saturated free fatty acid) ซึ่งจะทำให้สารที่เป็นประโยชน์ดังกล่างมีการเสื่อมสภาพ และคุณภาพในเชิงสมุนไพรต่าง ๆ ลดลงตามลำดับ ส่งผลทำให้คุณสมบัติการออกฤทธิ์ในการเป็นสารเสริมสุขภาพ ยา และผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางสูญเสียไป

เชื้อราในโรงเก็บ (Storage fungi)

เมล็ดพันธุ์เมื่อเก็บเกี่ยวจากแปลงแล้ว เมื่อนำมาเก็บไว้เพื่อรอราคาหรือแจกจ่ายแก่เกษตรกรก็ตาม มักจะพบว่ามีปัญหาเกี่ยวกับเชื้อราในโรงเก็บ ซึ่งจะทำให้เมล็ดพันธุ์มีคุณภาพต่ำและความงอกลดลง (สมบัติ, 2536) ความสูญเสียที่เกิดกับเมล็ดพันธุ์หลังเก็บเกี่ยวนับว่าสูงมาก ทั้งนี้เพราะว่าส่วนใหญ่แล้ว คนมักจะมองข้ามความสำคัญของเชื้อราในโรงเก็บแต่ไปเน้นที่แมลงมากกว่า ทั้งนี้เพราะว่าแมลงสามารถมองเห็นได้ชัดเจนด้วยตาเปล่า แต่เชื้อรานั้นเนื่องจากมีขนาดเล็กจึงมองไม่ค่อยเห็น ยกเว้นแต่ว่าเมื่อเข้าทำลายเมล็ดมากๆ จะพบเส้นใยขึ้นปกคลุมเมล็ดอยู่จะมีสีขาวจนถึงสีน้ำตาลดำแล้วแต่ชนิดของเชื้อราที่เข้าทำลาย ในประเทศออสเตรเลีย พบว่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากเชื้อราหลังการเก็บเกี่ยวมีมูลค่าถึงปีละประมาณ 200 กว่าล้านบาททุกปี และจากการรายงานองค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ พบว่าความสูญเสียหลังเก็บเกี่ยวนั้นมีมากถึง 20% ของผลผลิตที่ได้ในแต่ละปี

เชื้อราในโรงเก็บนั้นสามารถพบได้โดยทั่วไปในอากาศ ไม่ว่าจะเป็นในรูปของเส้นใยหรือสปอร์ โดยเฉพาะในโรงเก็บรักษาเมล็ดจะเป็นแหล่งที่พบเชื้อราในโรงเก็บมากที่สุด ดังนั้นเมล็ดพืชทุกชนิดจึงมีโอกาสติดเชื้อโรคได้ง่าย ไม่ว่าเมล็ดนั้นจะอยู่ในช่วงขณะเก็บเกี่ยว ขณะอยู่ในลานตากเมล็ด ขณะทำการสี นวด คัดแยก บรรจุ ขนส่ง หรือเก็บไว้ในยุ้งฉางก็ตาม เชื้อราเหล่านี้อาจติดอยู่ตามฝัก ในเมล็ดหรือแทรกอยู่ตามรอยแตกของเปลือกเมล็ด ซึ่งอาจฟักตัวอยู่ในรูปของเส้นใยหรือสปอร์ หรือในรูปของโครงสร้างอื่นๆก็ได้ เมื่อสภาพแวดล้อมต่างๆเหมาะสม เชื้อราเหล่านี้ก็เจริญงอกเข้าทำงายเมล็ดให้เสียหายต่อไป

เชื้อราในโรงเก็บที่รู้จักและพบกันมากมีอยู่ 2 ชนิด คือ เชื้อราพวก *Aspergillus* sp. และ *Penicillium* sp. นอกจากนี้ยังมีพวก *Rhizopus* sp. และ Yeast เป็นต้น การแพร่กระจายของเชื้อราในโรงเก็บนี้อาจจะอยู่ในรูปของเส้นใยหรือสปอร์ ซึ่งจะสามารถเข้าทำงายได้อย่างรวดเร็ว ถ้าสภาพแวดล้อมเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อรา ในเมล็ดพันธุ์คุณภาพต่ำมักจะพบว่ามีทั้งเชื้อรา *Aspergillus* sp. และ *Penicillium* sp. เข้าทำลายอยู่ เชื้อราเหล่านี้สามารถอาศัยอยู่ได้ในเมล็ดเป็นระยะเวลานานๆนอกจากนี้ในไซโลใหญ่ๆแล้วแหล่งสะสมของเชื้อราในโรงเก็บที่สำคัญคือสายพานที่ใช้ปล่อยเมล็ดไปในตัวไซโล

เชื้อราในโรงเก็บที่ตรวจพบเข้าทำลายเมล็ดพืช จนทำให้เกิดผลเสียหายทางเศรษฐกิจนั้นมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน แต่เชื้อราที่สำคัญๆซึ่งพบเห็นอยู่เสมอและก่อให้เกิดผลเสียหายในหลายๆด้านนั้น ได้แก่ *Aspergillus restrictus, A. amstelodami, A. cheralieri, A. rubber, A. candicus, A. ochraceus, A. flavus* และ *Penicillium spp.* นอกจากนั้นยังพบเชื้อราอีกหลายชนิด เช่น *A. niger, Wallemia sebi* และ *Chrysosorium fastidium* เป็นต้น ซึ่งเป็นเชื้อราที่มักพบปะปนมาเสมอแต่ไม่มีความสำคัญหรือก่อให้เกิดความเสียหายต่อเมล็ดพืชในโรงเก็บแต่อย่างไร

A. restrictus เป็นเชื้อราที่เจริญเติบโตได้เมื่อความชื้นของเมล็ดพืชต่ำสุดในข้าวโพดและข้าวสาลี 13.5-14.5% ข้าวฟ่าง 12-12.5% เชื้อรานี้จะเข้าทำลายคัพภะหรือทำให้สีของคัพภะเปลี่ยนไป โดยทำให้เกิด “sick” หรือ “germ damage” ในข้าวสาลี ทำให้เกิด blue eye ในข้าวโพดที่มีความชื้นเมล็ด 14-14.5% เมื่อเก็บเมล็ดไว้นานหลายเดือนแต่ไม่ทำให้เกิดความร้อนในกองเมล็ด เนื่องจากเป็นเชื้อราที่เจริญเติบโตได้ช้ามาก แต่เป็นเชื้อราที่ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นอับได้ด้วย นอกจากนั้นยังมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับแมลงพวก granary weevil (*Sitophilus granarius*) และ rice weevil (*S. oryzae*) โดยถ้าพบแมลงเหล่านี้ทำลายเมล็ดพืชแล้วมักจะพบ *A. restrictus* เจริญบนเมล็ดนั้นเสมอ และเชื้อรานี้สามารถเจริญต่อไปได้อีก แม้ว่าแมลงจะถูกทำลายให้ตายไปแล้วก็ตาม (สมบัติ, 2536)

A. amstelodami, A. cheralieri และ *A. rubber* เชื้อรา *Aspergillus* ทั้ง 3 ชนิดนี้จัดอยู่ในกลุ่มของ *A. glaucus* ซึ่งเจริญได้เมื่อความชื้นของเมล็ดพืชต่ำสุดในข้าวโพดและข้าวสาลี 14-14.5% ข้าวฟ่าง 14.5-15% ถั่วเหลือง 12.5-13% เชื้อราเหล่านี้มักพบเสมอในเมล็ดพืชที่เก็บไว้ในระดับความชื้นของเมล็ดค่อนข้างต่ำ โดยทำให้คัพภะตายหรือเปลี่ยนสี เกิดลักษณะ blue eye ในข้าวโพดที่มีความชื้นในเมล็ด 14.5-45% และเป็นสาเหตุใหญ่ที่ทำให้เมล็ดเกิดกลิ่นเหม็นอับและจับกันเป็นก้อน การตรวจพบเชื้อราในกลุ่มนี้เพิ่มขึ้นจากเมล็ดที่สุ่มออกมาตรวจสอบ จะเป็นเครื่องชี้แสดงอย่างว่าเมล็ดพืชที่เก็บไว้เสียหายมากน้อยแค่ไหน เช่น ถ้าตรวจพบเชื้อราเพียง 10-20% อาจไม่มีปัญหามากนักในการเก็บรักษาเมล็ด แต่ถ้าพบเชื้อราในปริมาณสูงกว่า 40% แสดงว่าเมล็ดพืชเหล่านั้นเสื่อมคุณภาพหรือเสียหายมากจะต้องรีบทำการแก้ไขอย่างเร่งด่วน

A. candidus เจริญได้เมื่อความชื้นของเมล็ดพืชต่ำสุดในข้าวโพดและข้าวสาลี 15-15.5% ข้าวฟ่าง 14.5-15% ถั่วเหลือง 14.5-15% *A .candidus* ทำลายคัพภะทำให้สีของคัพภะเปลี่ยนไปอย่างรวดเร็ว ทำให้เปลือกนอกของเมล็ดเปลี่ยนไปได้ด้วย และบางครั้งทำให้เมล็ดเกิดการเน่าเปื่อยขึ้น รวมทั้งทำให้เกิดความร้อนสะสมขึ้นในกองเมล็ดที่เก็บสะสมไว้ ซึ่งอาจวัดได้สูงถึง 55 °C ในกองเมล็ดที่ตรวจพบว่ามีเชื้อรานี้เจริญอยู่มาก แสดงให้เห็นว่าสภาพการเก็บรักษาเมล็ดในโรงเก็บนั้นอยู่ในสภาพเลว จะต้องมีการแก้ไขปรับปรุงโดยรวดเร็ว มิฉะนั้นเมล็ดที่เก็บไว้อาจเกิดการเน่าเปื่อยเสียหายหมดก็ได้

A. ochraceaus ซึ่งเจริญได้เมื่อความชื้นของเมล็ดพืชต่ำสุดในข้าวโพดและข้าวสาลี 15-15.5% ข้าวฟ่าง 16-16.5% ถั่วเหลือง 14.5-15% ทำลายคัพภะทำให้สีของคัพภะเปลี่ยนไป เชื้อรานี้เคยมีรายงานในประเทศเม็กซิโกว่าเข้าทำลายข้าวโพดในโรงเก็บเสียหายมาก และพบเชื้อราเข้าทำลายสูงถึง 20-40% แต่ตามปกติแล้วการพบเชื้อรา *A .ochraceaus* แม้เพียง 25% ก็ถือได้ว่าเมล็ดที่เก็บไว้เริ่มเกิดการเสื่อมคุณภาพแล้ว โดยทำให้เมล็ดเสียหายในด้านต่างๆรวมทั้งเมล็ดเกิดกลิ่นเหม็นอับด้วย

A. flavus เชื้อรานี้จัดอยู่ในกลุ่มของ *A. candidus* ซึ่งเจริญได้เมื่อความชื้นของเมล็ดพืชต่ำสุดในข้าวโพดและข้าวสาลี 18-18.5% ข้าวฟ่าง 16-16.5% ถั่วเหลือง 17-17.5% ทำลายคัพภะทำให้สีของคัพภะเปลี่ยนไป ทำให้เปลือกนอกของเมล็ดเปลี่ยนสีและเมล็ดเน่า ถ้าเจริญมากจะทำให้กองเมล็ดนั้นเกิดการสะสมความร้อนอย่างรวดเร็วและอุณหภูมิอาจสูงถึง 55 °C เช่นเดียวกับ *A. candidus* และ *A. flavus* บาง isolate มีการสร้างสารพิษ aflatoxin ในเมล็ดพวกข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ฝ้าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเมล็ดถั่วลิสงและผลิตภัณฑ์จากถั่วลิสงเกือบทุกชนิด

Penicillium spp. เชื้อรา *Penicillium* หลาย species สามารถเข้าทำลายเมล็ดพืชในโรงเก็บได้เมื่อความชื้นของเมล็ดต่ำสุดในข้าวโพดและข้าวสาลี 16.5-19% ข้าวฟ่าง 17-19.5% ถั่ว 16-18.5% ทำลายและทำให้สีของคัพภะเปลี่ยนไปเช่นเดียวกับ *Aspergillus* ทำให้เกิดลักษณะ blue eye ในข้าวโพดที่มีความชื้นในเมล็ดสูงกว่า 18.5% บาง species เมื่อเข้าทำลายเมล็ดจะทำให้เกิดการเน่าเปื่อยเสียหายอย่างรวดเร็วที่ความชื้นของเมล็ดสูง เมื่อเก็บเมล็ดนั้นไว้ในสภาพที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 90% และอุณหภูมิต่ำ (-2 – 5 °C) (สมบัติ, 2536)

เชื้อราสาเหตุการเกิดโรคพืช

เชื้อราเป็นกลุ่มหลักของแหล่งเกิดโรคพืช ซึ่งสามารถเป็นแหล่งของโรคพืชหรือการแพร่กระจายให้เกิดการติดต่อกัน มีลักษณะเป็น Nonvascular Heterotrophic ไม่มีคลอโรฟิลล์ หรือส่วนที่สามารถสังเคราะห์แสงได้ มีการสืบพันธุ์ด้วยสปอร์ ซึ่งมีทั้งแบบ อาศัยเพศและไม่อาศัยเพศ รับสารอาหารด้วยวิธีการดูดซึม มีทั้งแบบเซลล์เดี่ยว และ หลายเซลล์ แต่โดยส่วนใหญ่มักมีหลายเซลล์ แตกกิ่งก้านสาขาเรียกว่า Hyphae ซึ่งจะมีขนาดตั้งแต่ 100 นาโนเมตร และ แตกกิ่งก้านสาขา

เพื่อสร้าง Mycelium ซึ่งอาจมีลักษณะเป็นกลุ่มของ Hyphe ที่พันกัน เป็นกลุ่ม เป็นปุย หรือกลุ่มที่อัดตัวกันแน่น โดยทั่วไป ราจะดำรงชีวิตอยู่บน Saprobes ที่ตายแล้ว หรืออยู่เป็นปรสิตในสิ่งมีชีวิต อยู่ใน Kingdom Myceliae โรคพืช ส่วนใหญ่มักเกิดจากเชื้อรา ซึ่งมีจำนวนมากกว่า 100,000 สปีชีส์ และเป็นเชื้อราสาเหตุโรคพืชมากกว่า 8,000 สปีชีส์ รา สามารถปรับตัวให้อาศัยอยู่ในเมล็ดพืช ได้ดีพอ ๆ กับที่อยู่ในอากาศ ดิน หรือในน้ำ หรือแม้กระทั่งในตัวของสิ่งมีชิตทั้งแบบยังมีชีวิตอยู่ และไม่มีชีวิตแล้ว สามารถกินอาหารได้หลายทาง ส่วนใหญ่ เชื้อราที่เป็นราสาเหตุโรคพืช จะเป็น Necrotrophs-saprophyte รับสารอาหารจากเนื้อเยื่อพืชที่กำลังย่อยสลาย หรือมีการติดเชื้อ อีกชนิดหนึ่งคือ ทำตัวเป็นปรสิต เติบโต และแพร่พันธุ์อยู่ในพืชที่ยังมีชีวิตอยู่ ซึ่งเชื้อราทั้งสองประเภทนี้สามารถอาศัยอยู่ในเมล็ดพันธุ์ได้ (สมบัติ.2536)

ผลของเชื้อราในโรงเก็บที่มีผลต่อเมล็ดพืช และเมล็ดพันธุ์ (Effect of storage fungi on grains and seeds) (สมบัติ.2536)

ความงอกของเมล็ดลดลง (Decrease in germination)

เนื่องจากเชื้อราจะเจริญเข้าไปในเมล็ด และทำลายส่วนที่เจริญ ต้นอ่อน หรือคัพภะ อาจทำเป็นสีน้ำตาลหรือสีดำแล้วแต่ชนิดของเมล็ดพืช เช่น ในเมล็ดข้าวสาลี หรือข้าวโพด เป็นต้น ความงอกของเมล็ดที่เก็บรักษาไว้จะลดลงอย่างรวดเร็วและมากน้อยแค่ไหน นอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อราแล้ว ยังขึ้นกับความชื้นของเมล็ดและอุณหภูมิในขณะเก็บรักษาเมล็ดนั้นๆด้วย โดยทั่วไปแล้วเมล็ดที่เก็บไว้ที่ความชื้นสูง และอุณหภูมิสูงจะสูญเสียความงอกรวดเร็วกว่าเมล็ดซึ่งเก็บที่ความชื้นและอุณหภูมิต่ำ

เชื้อราในโรงเก็บที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับความงอกของเมล็ดนั้นได้แก่ *Aspergillus* กลุ่มต่างๆ เช่น *A. candidus, A. flavus, A. glaucus, A. ocharaceau* และเชื้อราเหล่านี้สามารถทำลายความงอกของเมล็ดได้มากและรุนแรงที่สุด

สีของเมล็ดเปลี่ยนไป (Seed / germ discoloration)

เชื้อราในโรงเก็บหลายชนิดสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของเมล็ดขึ้นได้เมื่อมันเข้าทำลายเมล็ด สีของเมล็ดที่เปลี่ยวไปนี้อาจพบทั้งเมล็ดหรือเป็นบางส่วนเท่านั้น ในกรณีที่พบทั้งเมล็ดนั้นอาจเห็นไม่ชัดเจนนัก เพียงแต่สีของเมล็ดจะจางลงไม่สดใสเหมือนเมล็ดทั่วๆไป ส่วนความเสียหายที่เกิดเฉพาะแห่งนั้น จะพบที่บริเวณส่วนจะเจริญเป็นต้นอ่อนหรือคัพภะของเมล็ด ซึ่งอาจจะเห็นบริเวณนี้เป็นสีน้ำตาล-ดำหรือสีอื่นๆ เช่น ลักษณะที่เรียกว่า sick wheat หรือ germ damage wheat ในข้าวสาลี ปรือ blue eye ในข้าวโพดเป็นต้น และผลที่เกิดขึ้นตามมาคือ ความงอกของเมล็ดจะลดลงด้วย

เชื้อราในโรงเก็บกลุ่มที่พบเข้าทำลายเมล็ดพืชแล้วทำให้เกิดอาการ germ discoloration ขึ้นเสมอได้แก่ *A. restrictus, A. glaucus, A. ochraceus, A. flavus* และ *Penicillium spp.* ส่วนเชื้อราที่ทำลายเมล็ดข้าวโพดแล้วทำให้เกิดอาการ blue eye ในเมล็ดข้าวโพด ได้แก่ *A. glaucus*, *A. restrictus* และ *Penicillium spp.*

โดยปกติเชื้อราที่ติดมาจากในไร่ (field fungi) ก็สามารถทำให้สีของเมล็ดเปลี่ยนไปได้เช่นกัน แต่อาการดังกล่าวจะเกิดขึ้นกับเมล็ดก่อนการเก็บเกี่ยวเท่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพวกเมล็ดธัญพืชขนาดเล็ก มักเกิด discoloration อยู่ตาม glume หรือ pericarp มากกว่าบริเวณ embryo หรือ endosperm ของเมล็ด ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะไม่พบในเมล็ดธัญพืชที่เก็บเกี่ยวมาแล้ว และเก็บรักษาไว้ในโรงเก็บ ทั้งนี้เนื่องจากโรงเก็บเมล็ดทั่วไปนั้นเมล็ดที่เก็บไว้มีความชื้นของเมล็ดต่ำ ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการเจริญของเชื้อราที่ติดมาจากในไร่

เกิดความร้อนสะสมขึ้น (Heating)

ในกองเมล็ดอาจพบว่ามีความร้อนสะสมเกิดขึ้นได้ ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติของเมล็ด 2 ลักษณะคือ เมล็ดเป็นตัวนำความร้อนเองทำให้เกิดความร้อนสะสมเป็นจุดๆ เรียกว่า hot spot กับอีกลักษณะหนึ่งคือ เกิดจากการหายใจของสิ่งมีชีวิตที่อยู่ภายในโรงเก็บเมล็ดพืช เช่น แมลง ไร หรือ เชื้อราที่ไปทำลายเมล็ด สิ่งมีชีวิตเหล่านี้เมื่อหายใจจะปลดปล่อย CO_2 และความร้อนออกมา และเนื่องจากเมล็ดเป็นตัวนำความร้อนที่เลว จึงเกิดการสะสมขึ้นในบริเวณหรือจุดนั้น ซึ่งในโกดังเก็บเมล็ดบางแห่ง อาจวัดอุณหภูมิได้สูงถึง 45-62 °C

การเกิดความร้อนขึ้นในโกดังเก็บเมล็ดแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ dry grain heating ในกรณีนี้จะพบในกองเมล็ดพืชที่มีความชื้นของเมล็ดต่ำ (11-15%) และมีอุณหภูมิสูง (42-48%) ตัวการที่ทำให้เกิดความร้อนแบบนี้ขึ้นมาคือ แมลงชนิดต่างๆที่เข้าทำลายเมล็ด ส่วนความร้อนอีกลักษณะหนึ่งเรียกว่า damp grain heating กรณีนี้มักพบในกองเมล็ดพืชที่เก็บรักษาไว้ที่ความชื้นของเมล็ดค่อนข้างสูง (15-17%) และอุณหภูมิสูง (45-62°C) ตัวการที่ทำให้เกิดความร้อนแบบนี้ขึ้นมาคือ เชื้อราในโรงเก็บที่เข้าทำลายพืชนั่นเอง

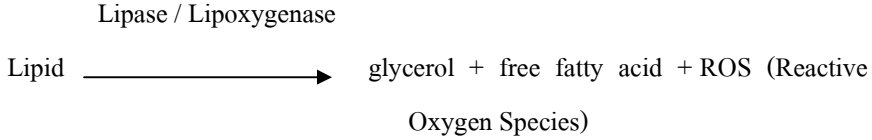
เชื้อราในโรงเก็บที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดความร้อนสะสมขึ้นในโรงเก็บเมล็ดที่มักพบเสมอคือ *A. flavus* และ *A. candidus* โดยพบในกองเมล็ดถั่วเหลืองที่มีเชื้อราทั้งสองชนิดเจริญอยู่มาก และวัดอุณหภูมิได้สูงถึง 50-55 °C ในประเทศไทยมีรายวานการเกิดสันดาปขึ้นในโกดังเก็บรักษาเมล็ดฝ้ายที่อำเภอคลองหลวง จังหวัดประทุมธานี เมื่อมีการสุ่มเมล็ดฝ้ายเหล่านั้นไปตรวจสอบพบว่ามีเชื้อราในโรงเก็บอยู่ 2 พวกคือ *Aspergillus* และ *Penicillium* ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวเชื้อราทั้งสองชนิดนี้ทีส่วนร่วมด้วย

การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี (Biochemical changes)

เมล็ดที่เชื้อราในโรงเก็บเข้าทำลาย นอกจากความงอกของเมล็ดจะลดลง และเกิดการ germ discoloration แล้ว จะเกิดการเสื่อมอย่างรวดเร็วจนทำให้คุณภาพสารประกอบภายในเมล็ดพืชลดลงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเมล็ดเกิดการเสื่อมจะมีการเปลี่ยนแปลงภายในเมล็ดหลายอย่าง เช่น แป้ง หรือคาร์โบไฮเดรตเปลี่ยนเป็นกรดหรือก๊าซ โปรตีนถูกทำลาย ปริมารน้ำตาลลดลง รวมทั้งเกิดกลิ่นเหม็นหืนขึ้น เนื่องจากไขมันเปลี่ยนเป็นกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) ซึ่งมักพบมากในเมล็ดพืชน้ำมันทั่วๆไป เช่น ถั่วลิสง ฝ้าย ถั่วเหลือง และข้าวโพด เป็นต้น

การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีโดยการวัดปริมาณของกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นมีการศึกษาในเรื่องนี้กันมาก โดยวัดออกมาเป็นหน่วยของ Fat Acid Value (FAV) เชื้อราในโรงเก็บที่มีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระขึ้นในเมล็ด ได้แก่ *A. amslelodami,A. flavus, A.candidus* และ *Penicillium solitum* ค่า FAV ที่วัดได้นั้นจะมีค่ามากหรือน้อยแค่ไหนขึ้นอยู่กับสิ่งเกี่ยวข้อง 2 ประการ คือ การเกิดกรดไขมันอิสระขึ้นนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามสปีชี่ส์และสายพันธุ์ของเชื้อราและกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้น อาจจะเป็นแหล่งอาหารของเชื้อราที่เจริญอยู่ในบริเวณนั้นต่อไป ดังนั้นการใช้ค่า FAV ที่วัดได้เพื่อแสดงถึงการเสื่อมคุณภาพของเมล็ดจึงไม่สามารถบอกได้แน่นอนเสมอไป อย่างไรก็ตามถ้าเมล็ดพืชใดมีกรดไขมันอิสระเกิดขึ้นถึง 2% ขึ้นไป ก็แสดงว่าการเสื่อมคุณภาพของเมล็ดนั้นๆค่อนข้างสูง

โดยปกติปริมาตรของกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นเมื่อเมล็ดที่เก็บไว้มีการเสื่อมคุณภาพมากขึ้น เนื่องจากกิจกรรมของเอนไซม์ lipase และ lipoxygenase ไปย่อยสลายไขมันซึ่งอยู่ในรูปของ triglyceride ของกรดไขมันให้เป็น glycerol และ free fatty acid ดังสมการ



การเกิดสารพิษขึ้น (Phyto-toxin production)

เกิดขึ้นในกระบวนการเมตาโบลิซึม (Secondary metabolism) ของเชื้อรา โดยเชื้อราสำคัญที่มีการสร้างสารพิษ ได้แก่

Aspergillus flavus (aflatoxin complex)

A. candidus, A. fumigatus, A. ochraceus (ochratoxin complex)

Penicillium islandicum (islandtoxin)

P. citrium (citrinin)

P. rubrum (rubratoxin)

P. viridicatum (hepatotoxin)

โดยเชื้อราที่สำคัญระหว่างการเก็บรักษาสามารถสร้างสารพิษในกลุ่มต่าง ๆ โดยเฉพาะสาร Aflatoxin ที่ถูกสร้างโดยเชื้อรากลุ่ม *Aspergillus* sp. ซึ่งเป็นสารพิษที่สำคัญในการเก็บรักษาเมล็ดกลุ่มธัญพืช โดยสาร Afatoxin ดังกล่าวเป็นสารสำคัญที่ชักนำให้เกิดการสร้างเซลล์มะเร็งของผู้บริโภค ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพของผู้บริโภค

ความชื้นของเมล็ดเพิ่มขึ้น (increase in moisture content)

เนื่องจาก การหายใจที่เกิดขึ้นจากทั้งในเมล็ดและเชื้อราจะมีการคายน้ำออกมา ดังนั้นจึงทำให้เมล็ดดูดรับเอาความชื้นเข้าไป และมีการดูดซับจนกว่าจะถึงจุดสมดุล ความชื้นของเมล็ดจึงเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม เมื่อความชื้นของเมล็ดสูงขึ้นจะทำให้เชื้อราเจริญได้มากขึ้น คายน้ำแกมากขึ้น เมล็ดจะดูดความชื้นเข้าไปอีกเป็นแบบนี้เรื่อยๆ ความชื้นของเมล็ดที่ถูกเชื้อราเข้าทำลายจึงค่อยๆเพิ่มสูงขึ้น

เมล็ดเกิดการเหม็นอับหรือจับกันเป็นแผ่นและเน่าเสีย (Mustiness, caking and total decay)

เมล็ดพืชที่ได้รับความเสียหายจากการเข้าทำลายของเชื้อราในโรงเก็บ เมื่อเก็บไว้นานขึ้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในทางเลวลงเรื่อยๆ จนในที่สุดเมื่อเมล็ดเสื่อมมากเข้าก็จะเกิดกลิ่นเหม็นอับเหม็นหืน ในบริเวณที่มีเชื้อราเจริญอยู่มาก อาจทำให้เมล็ดมีการจับกันเป็นแผ่นหรือเป็นก้อนคล้ายเค้ก และเกิดการเน่าเสียในที่สุด

ความเสียหายอื่นๆ

ในโรงเก็บหรือยุ้งฉางใหญ่ๆ ที่มีการเก็บเมล็ดพืช เชื้อราที่เข้าทำลายเมล็ดอยู่อาจทำให้เกิดความเสียหายด้านอื่นๆได้อีก เช่น ในยุ้งฉางที่อับทึบมีการระบายอากาศไม่ดี สปอร์ของเชื้อราที่ฟุ้งกระจายในบริเวณนั้นอาจเป็นอันตรายต่อคนที่เดินผ่านไปมา แล้วสูดเอาสปอร์เชื้อราเข้าไปในร่างกาย อาจทำให้เกิดอาการแพ้ คันตามผิวหนัง หรือเกิดอาการทางปอดได้ ในกรณีที่มีเชื้อราอยู่บนเมล็ดอาจทำให้วัสดุบรรจุเมล็ดนั้นเปื่อยฉีกขาดได้ นอกจากนี้เชื้อราที่เจริญติดอยู่ตามยุ้งฉางอาจทำลายยุ้งฉางส่วนที่เป็นไม้ให้เกิดการผุเปื่อย และโครงสร้างเสื่อมโทรมเร็วขึ้น

สารพิษจากเชื้อรา (Mycotoxin)

เชื้อราเป็นจุลินทรีย์ชนิดหนึ่งที่ชอบขึ้นทำลายพืช หรือขึ้นบนอาหารของคนและสัตว์ เชื้อราบางชนิดจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นบนสิ่งที่มันขึ้นอยู่ จนทำให้คุณสมบัติทางด้าน รส สี และรูป ร่างเปลี่ยนไป นอกจากนี้ยังมีเชื้อราอีกหลายชนิดที่สามารถสร้างสารเคมีต่างๆแล้วปลดปล่อยออกมาเจือปนอยู่ สารเคมีเหล่านี้ทั้งก่อให้เกิดประโยชน์และโทษแก่คนและสัตว์ สารเคมีที่เชื้อราสร้างขึ้นที่มีประโยชน์ทางการแพทย์มากได้แก่สารปฏิชีวนะ (antibotic) ต่างๆซึ่งถูกนำมาสกัดและนำมาใช้ในการรักษาโรคติดเชื้อได้อย่างกว้างขวาง เช่น streptomycin, auriomycin และ penicillin เป็นต้น แต่สารเคมีบางชนิดที่เชื้อราสร้างขึ้นซึ่งเป็นพิษอย่างรุนแรงแก่คนและสัตว์ สารพิษเหล่านี้

เรียกรวมๆกันว่า “mycotoxin” เมื่อคนหรือสัตว์ได้รับอาหารที่มีสารพิษนี้เจือปนอยู่ก็อาจทำให้เกิดอาการเป็นพิษขึ้นได้ เรียกอาการเป็นพิษเนื่องจากสารพิษของเชื้อรานี้ว่า “mycotoxicosis” ฉะนั้นจะเห็นได้ว่าเชื้อราเหล่านี้จะทำให้เกิดอาการเป็นพิษได้ก็ต่อเมื่อเชื้อราชนิดนั้นได้สร้างสารพิษขึ้นมาก่อนแล้วบนอาหารที่มันเจริญอยู่เมื่อคนหรือสัตว์กินอาหารนั้นเข้าไปจึงเกิดอาการเป็นพิษขึ้น เรียกเชื้อรานี้ว่า “mycotoxicgenic” (เชื้อราที่ทำให้เกิดพิษ) แตกต่างไปจากเชื้อราที่สามารถดำรงชีวิตอยู่อวัยวะต่างๆของสิ่งมีชีวิต และทำให้เกิดโรคขึ้น จะเรียกเชื้อราพวกนี้ว่า “mycopathogenic fungi” (เชื้อราที่ทำให้เกิดโรค)

สารพิษอาจสร้างขึ้นโดยเชื้อราที่เป็น Field fungi หรือ storage fungi ก็ได้ เชื้อราพวก field fungi ที่สร้างสารพิษ ได้แก่ *Fusarium* spp., *Alternaria* spp., *Bipolaris* spp., *Cercospora* spp., *Curvularia* spp., *Drechslera* spp. เป็นต้น

ปัจจุบันนี้การศึกษาและค้นพบสารพิษชนิดใหม่ๆ ที่สร้างจากเชื้อราได้รับความสนใจมากขึ้น เพราะสารพิษบางชนิดมีผลกระทบต่อเศรษฐกิจของโลกอย่างมากมาย รวมทั้งมีส่วนกระทบต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตด้วย อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะมีสารพิษที่เกิดจากเชื้อรามากมาย แต่มีสารพิษบางชนิดเท่านั้นที่ถือว่ามีความสำคัญและมักพบเป็นปัญหาอยู่บ่อยๆที่เกิดขึ้นกับเมล็ดพันธุ์ที่เมล็ดอาหารต่างๆสารพิษเหล่านี้ได้แก่ alflatoxin,ochratoxins, zearalenone, trichothecences, patulin, penicillic acid, ergot alkaloids, sterigmatocystin และ citrin เป็นต้น (ธรรมศักดิ์, 2533)

ลักษณะทั่วไปของโรคเชื้อรา *A. flavus*

เชื้อรา *A. flavus* จัดเป็นเชื้อราที่สามารถผลิตสารพิษอะฟลาทอกซิน (aflatoxin) จัดเป็นชนิดที่สำคัญที่สุดในสกุลแอสเพอจิลลัส (*Aspergillus* spp.) สามารถเจริญเติบโตได้ดีในเมล็ดและดินที่ปลูกถั่วลิสง และถูกจัดเป็น storage fungi คือสามารถเข้าทำลายในโรงเก็บ มักเข้าไปทำลายเมล็ดพืชหลังการเก็บเกี่ยวเป็นต้นไป และเจริญเติบโตได้ดีในโรงเก็บ (ธรรมศักดิ์, 2533) การสังเกตเชื้อราด้วยตาเปล่าจะพบว่ามีสีเหลืองจนถึงสีเขียวเข้มบนเมล็ดถั่วลิสง และมีลักษณะชัดเจนเมื่อขึ้นบนอาหารเลี้ยงเชื้อซึ่งสีเขียวดังกล่าวเป็นสีของ conidial head ที่เจริญเส้นใย (hyphae) ส่วนของก้านชูสปอร์จะโป่งออกรูปร่างค่อนข้างกลม (vesicle) เป็นส่วนที่จะให้กำเนิดสปอร์(sterigme หรือ pialide) ซึ่งอาจมีชั้นเดียว หรือสองชั้น ในกรณีที่มี 2 ชั้น ชั้นในส่วนที่ติดกับ vesicle เรียกว่า metulae) ส่วนชั้นนอก ซึ่งเป็น phailide ตรงส่วนปลายเป็นที่เกิดของสปอร์ (conidia) ซึ่งส่วนมากมีรูปร่างกลมผนังขรุขระเล็กน้อย และเกิดต่อกันเป็นลูกโซ่ (Kenneth and Derothy, 1965 ; Alexophus and Mims, 1979) เป็นเซลล์ที่ฟุ้งกระจายได้ดีในอากาศ (Diener , 1987) และบางไอโซเลท (isolate) สามารถคงอยู่ในดินได้นาน (ประสงค์, 2530) ถือเป็นแหล่งของเชื้อราในชั้นปฐมภูมิที่มีศักยภาพมากที่สุดเป็นที่อาศัยของสปอร์ ถือเป็นแหล่งผลิตโคนีเดียให้กระจายอยู่ในอากาศและแพร่กระจายไปอย่างรวดเร็ว โดยการพัดพาของอากาศ และกระแสลม (Diener , 987) *A. flavus* เจริญเติบโตได้

น้อยเมื่ออากาศมีความชื้นสัมพันธ์ต่ำกว่า 85 % และมีช่วงอุณหภูมิที่สามารถเจริญได้ค่อนข้างกว้าง ถ้าความชื้นพอเพียง ตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 6–46 °C (Shanta and Sreenivasmurthy, 1981 อ้างโดย ธรรมศักดิ์, 2533) แต่อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตดีในสภาวะที่มีความชื้นสูงกล่าวคือ เมื่ออากาศมีความชื้นสัมพันธ์เป็น 86 – 87 % เชื้อราสามารถเจริญและสร้างสารพิษอะฟลาทอกซิน (aflatoxin) ซึ่งจัดเป็น secondary metabolite ซึ่งถูกสร้างขึ้นโดยพวก mycotoxin storage fungi สารพิษอะฟลาทอกซินเป็นกลุ่มของสารเคมีพวก difranocoumarin ซึ่งแยกออกมาจากเชื้อราพวก *A.flavus* และ *A.parasiticus* ที่พบอยู่ทั่วไปจะเป็นอะฟลาทอกซินชนิดบี1 (AFB1), บี2 (AFB2), จี1 (AFG1), จี2 (AFG2) และอีกหลายชนิดในปริมาณเล็กน้อย มีคุณสมบัติประจำตัวที่สำคัญประการหนึ่งคือ อะฟลาทอกซินชนิด บี1 และ บี2 สามารถเรืองแสงสีน้ำเงิน (Blue-florescent) ภายใต้แสงอุลตราไวโอเลต (green-fluorescent) (WHO, 1979 อ้างโดย ดุษณี, 2530) อะฟลาทอกซินสามารถทำให้เกิดมะเร็งในคนและสัตว์ โดยจะทำให้เกิดทั้งอาการเฉียบพลันถ้ารับในปริมาณสูง และอาการเรื้อรัง เมื่อมีการสะสมในร่างกาย ทำให้เกิดมีการคั่งของไขมันตับ โรคตับแข็ง โรคตับพิการ และโรคมะเร็งตับ (ไมตรี, 2528 อ้างโดย ประสงค์, 2530) เมื่อบริโภคอาหารที่มีการสะสมสารพิษ โดยเฉพาะ *A.flavus* สามารถเจริญเติบโตบนอาหารที่มีความชื้น เช่น ข้าวเหนียว หรือข้าวเจ้าที่สุกแล้วรวมทั้งอาหารสัตว์ ข้าวโพด เป็นต้น โดยเฉพาะ ถั่วลิสง จัดเป็นแหล่งอาหารที่ถูกเจือปนด้วยสารพิษอะฟลาทอกซินในระดับสูงที่สุด (ธรรมศักดิ์, 2533)

กระบวนการเข้าทำลายของเชื้อรา *A. flavus*

โดยทั่วไปเชื้อราในโรงเก็บเช่น *A.flavus* จะเข้าทำลายเมล็ดหากมีสภาพแสดล้อมหรืออุณหภูมิ และความชื้นเหมาะสม แหล่งของเชื้อราในชั้นปฐมภูมิที่มีศักยภาพมากที่สุดอยู่ในรูปสปอร์ของเชื้อรา (conidia) จะเกิดการปนเปื้อนไปกับเมล็ดตั้งแต่ก่อนการเก็บเกี่ยว ขณะเก็บเกี่ยว รวมถึงการปนเปื้อนจากเชื้อราที่แพร่กระจายทั่วไปในอากาศ ติดไปกับภาชนะเคลื่อนตัวไปสู่ต่อที่ที่เหมาะสมต่อการเจริญ ขบวนการเข้าทำลายเริ่มต้นเมื่อสปอร์ตกลงไปหรือติดไปกับส่วนของพืช หากสภาพแวดล้อมเหมาะสมก็จะก่อให้เกิดขบวนการทางชีวเคมีขึ้นมีผลทำให้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเชื้อราเปลี่ยนแปลงไป และต้องการพลังงานเพิ่มขึ้นเพราะฉะนั้นจุดที่รับเชื้อจึงกลายเป็นจุดที่ติดเชื้อขึ้นมาเป็น infection unit และมีขบวนการต่าง ๆ ต่อมาดังนี้

- germ tube germination
- appessorium
- penetration hyphae หรือ stomatal penetration
- colonization

ขั้นแรกสปอร์จะงอกออกมาเป็น Germ tubes และงอกผ่าน cuticle ของพืชเข้าไปจะมีโครงสร้างชนิดหนึ่งเกิดขึ้น คือ มีการพองตัวเล็กน้อยของ germ tube และมีสารเหนียวเคลือบอยู่รอบนอกเป็นชั้นบางๆ โครงสร้างนี้เรียกว่า infection structure หรือ appressoria ซึ่งอาจแตกสาขาได้ตรงจุดที่เข้าทำลาย ซึ่งโดยทั่วไปสามารถสร้างโครงสร้างดังกล่าวได้ถ้า hyphae สัมผัสพื้นผิวที่มีลักษณะแข็ง

สปอร์ของ *A. flavus* ที่ปนเปื้อนจะเจริญเติบโตได้ดีบนเมล็ดถั่วลิสง (ประสงค์, 2530) ตั้งแต่ช่วงเวลาก่อนการเก็บเกี่ยวในดินที่อยู่รอบๆ ที่เกิดฝักจะเริ่มทำลายฝักถั่วลิสงโดยตรง และเป็นสาเหตุของการเข้าทำลายเมล็ดและเป็นสาเหตุของการสะสมสารพิษในเวลาต่อมา เชื้อราที่ปนเปื้อนอาจอยู่ในรูปสปอร์ที่พักตัวติดมากับส่วนนอกของเมล็ด เมื่อเก็บในสภาพที่เหมาะสมต่อการเจริญและลุกลามได้อย่างรวดเร็ว (Mycock and Berjak, 1995) เชื้อราที่อยู่นอกเมล็ดจะเกิดขบวนการย่อยและลุกลามเข้าทำลายเนื้อเยื่อเมล็ดได้ โดยอาจใช้วิธีผ่านผิวของชั้นนอกเมล็ดที่ชำรุดเสียหาย แต่หากสภาพสมบูรณ์ดี เชื้อก็สามารถเจริญผ่านขั้วเมล็ด และแทงผ่านรูเปิดทางธรรมชาติหรือ micorpyle เข้าสู่เมล็ด (Mycock *et al.* 1988) ซึ่งเชื้อราจะลุกลามเข้าไปทีละเล็กละน้อยเจริญไปที่ส่วน micro Pyle end โดยเฉพาะส่วนเนื้อเยื่อ peduncle ที่เสียหายชำรุดจะทำให้เชื้อเจริญเข้าสู่แหล่งสะสมอาหารของเมล็ดได้อย่างรวดเร็ว (Mycock and Berjak,1995) *A. flavus* columnaris มีรายงานว่าเข้าทำลายเมล็ดทางบาดแผลได้ดี นอกจากนี้เส้นใยยังแทงผ่านรูทางธรรมชาติของเมล็ดได้ดี (Mycocik *et al.* 1985) หลังจากนั้น Mycock *et al.* (1990) ยังสังเกตว่า *A. flavus* สายพันธุ์ต่างๆ ที่ทำการศึกษาทั้งหมดสามารถย่อยสลาย cellulose และ polygalacturonicacid ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์ของพืชได้ (Mclean *et al.* 1985 อ้างโดย Mycock and Berjak, 1995) จึงถือเป็นความสามารถเฉพาะเชื้อที่จะเข้าทำลายพืชได้อย่างง่ายดายมีหลักฐานยืนยันว่าเมล็ดของพันธุ์ Florunner มีการผลิตสาร phytoalexinb ซึ่งยับยั้งการสร้างอะฟลาทอกซิน และเป็นกลไกของเมล็ดถั่วลิสงในการต่อการเข้าทำลายของเชื้อรา

การควบคุมเชื้อราระหว่างการเก็บรักษา และเชื้อราสาเหตุโรคเมล็ดพันธุ์

การใช้ความร้อนในการกำจัดเชื้อรา (Seed treatment by heating)

Thermotherapy หรือ heat treatment เป็นการใช้ความร้อนในหลายๆรูปแบบ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ ในการควบคุมการติดเชื้อใน เครื่องมือปลูก รวมทั้งเมล็ดพันธุ์ ด้วย (Baker, 1962) การใช้ความร้อน (heat treatment) กับเมล็ดเป็นวิธีง่ายๆที่ใช้ในการควบคุมโรคและแมลงที่ติดมากับเมล็ด heat treatment เป็นวิธีที่เก่าแก่ในการควบคุมโรคและแมลงที่ติดมากับเมล็ดจะใช้เมื่อไม่สามารถหาสารเคมีชนิดที่จะนำมาใช้ได้ ซึ่งโดยหลักการของการใช้ความร้อน ในการควบคุมโรคและแมลงที่ติดมากับเมล็ดนั้นจะใช้ความร้อนในการทำลายเชื้อที่ติดมากับเมล็ดโดยที่อุณหภูมิที่ใช้นั้นจะต้องไม่ทำลายหรือทำให้เกิดความเสียหายต่อเมล็ด (จินตนา, 2531) ซึ่งมีหลายวิธีที่ใช้ความ

ร้อนในการควบคุมโรคและแมลงที่ติดมากับเมล็ด มีทั้งรูปแบบการใช้ความร้อนเปียก (wet form) เช่น การใช้น้ำร้อน (hot water) การใช้ไอน้ำผสมอากาศ (arrested steam) คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (carbon tetrachloride) น้ำมันปิโตรเลียม (petroleum oil) และการใช้ความร้อนแห้ง (dry form) เช่น ลมร้อนหรืออากาศแห้ง (hot air or dry air) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (microwave radiation) การใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ (solar heat) (Baker, 1962)

วิธีการในการใช้ความร้อนมาประยุกต์ใช้ กับเมล็ดพันธุ์มีดังนี้

การฆ่าเชื้อโรคที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์โดยการแช่เมล็ดพันธุ์โดยใช้น้ำร้อน (Hot water treatment)

หลักการง่ายๆในการใช้น้ำร้อนเพื่อควบคุมโรคและแมลง เป็นการใช้น้ำร้อนโดยที่อุณหภูมิความร้อนของน้ำจะไปมีผลต่อการกำจัดโรคและแมลง โดยที่ความร้อนนั้นจะต้องไม่ทำลายเนื้อเยื่อของเมล็ดให้เกิดความเสียหาย (Cohen, 1972) การใช้น้ำร้อนจะนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางมากในการควบคุมโรคที่ติดมากับเมล็ด ซึ่งโดยเฉพาะโรคที่ติดเชื้อมากับแบคทีเรียและจากไวรัส (Baker, 1962) และจะมีขั้นตอนในการปฏิบัติดังนี้

Selection of seeds วิธีใช้น้ำร้อนนี้จำเป็นจะต้องคำนึงถึงลักษณะของเมล็ดที่จะนำมาใช้ด้วย ในการเลือกเมล็ดที่มาใช้นั้นจะต้องมีความสามารถในการทนความร้อนที่ใช้ในการ treat ได้ดี พวกเมล็ดถั่ว เช่น ถั่วเหลือง นั้นไม่สามารถที่จะนำมาใช้กับวิธีการนี้ได้ เพราะถั่วเหลืองจะมีเปลือกหุ้มเมล็ดบางมาก ถ้านำมาแช่น้ำร้อนจะทำให้เปลือกหุ้มเมล็ดนั้นบวมและหลุดออกมา และวิธีการนี้ไม่สามารถที่จะควบคุมเชื้อสาเหตุของโรคได้ทุกชนิด เช่นเดียวกับการใช้สารเคมี และจะมีข้อด้อยตรงที่ว่าไม่สามารถกำจัดเชื้อที่เข้าทำลายเมล็ดถึงในระดับเนื้อด้านในของเมล็ด แต่วิธีนี้จะสามารถควบคุมเชื้อโรคได้ดีในระดับผิวนอกของเมล็ด

Presoaking the seed ก่อนที่จะมีการแช่เมล็ดในน้ำร้อนบางครั้งอาจจะต้องปรับสภาพของตัวเมล็ดก่อนที่จะใช้น้ำร้อนที่อุณหภูมิโดยการนำเมล็ดไปแช่น้ำ (presoak) ก่อน แต่เมล็ดบางครั้งอาจจะไม่ต้องการทำ presoak ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของพืชที่จะใช้และโรคที่เป็นหรือโรคที่ต้องการกำจัด การทำ presoak นั้นจะเป็นการทำให้น้ำนั้นเข้าไปอยู่แทนที่อากาศที่อยู่ระหว่าง ต้นอ่อน และเปลือกหุ้มเมล็ด เพราะน้ำจะเป็นที่นำความร้อนได้ดีกว่า ซึ่งจะทำให้ลดอุณหภูมิและเวลาในการใช้ และเพื่อเป็นการป้องกันเมล็ดไม่ให้ได้รับความเสียหายจากความร้อนอีกทางหนึ่ง ส่วนเวลาที่ใช้ในการ soak นั้นอาจจะไม่แน่นอน แต่โดยปกติแล้วจะอยู่ในช่วงประมาณ 4 -12 ชั่วโมง ซึ่งก็จะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของเนื้อเยื่อที่มีความสามารถในการดูดซึมน้ำและเชื้อที่เข้าทำลายเมล็ดว่าเจริญอยู่ในระดับใด

Preheating หลังจากที่มีการแช่เมล็ดในน้ำเย็นแล้ว เมล็ดจะถูกนำไปผ่านความร้อนเป็นเวลา 1- 2 นาที ที่อุณหภูมิ 90- 100 °C

Hot water soak การแช่เมล็ดในน้ำที่มีอุณหภูมิและช่วงเวลาที่จะใช้ฆ่าเชื้อโรคบนเมล็ดได้ โดยปกติทั่วไป อุณหภูมิที่ใช้ประมาณ 50 °C ระยะเวลาอาจลดลงถ้าน้ำเมล็ดมาแช่น้ำ (presoak) ก่อน treat อุณหภูมิและเวลาสำหรับการ treat เมล็ดและขึ้นอยู่กับ

- แบบการเข้าทำลาย (type of infection)
- ชนิดและขนาดของเมล็ด (kind and size of seed)

อุณหภูมิและเวลาที่ต้องการแตกต่างกันนั้น ซึ่งบางทีเวลาที่ใช้อาจจะทำให้เมล็ดสูญเสียความมีชีวิตได้ น้ำที่ใช้นั้นควรจะมีตัวควบคุมอุณหภูมิ และปริมาตรน้ำที่มากพอ ก็จะช่วยทำให้อุณหภูมิคงที่ด้วย

Cooling หลังจากการ treat เมล็ดแล้วรีบนำเมล็ดมาแผ่เพื่อให้เมล็ดเย็นลงและทำให้แห้งอย่างรวดเร็ว

Drying จะต้องทำให้เมล็ดแห้งอย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันการงอกของเมล็ด

Post-treatment อาจจะมีการป้องกันเมล็ดด้วยการคลุกสารฆ่าเชื้อราเพื่อรักษาความมีชีวิตของเมล็ดและเป็นการเลี่ยงการเสียหายจาก seed borne fungi

Hot water treatment นี้จะไม่นำมาใช้กับเมล็ดที่มี seed coat ที่จะแตกหรือร้าวง่ายในช่วงที่มีการดูดน้ำ อย่างเช่นเมล็ดถั่ว หรือเมล็ดที่จะมียางเหนียวๆไหลออกมาในช่วงที่มีการลดความชื้นอย่างเช่นเมล็ดป่าน ส่วนการใช้ carbon tetrachloride และ oil ก็จะคล้ายกับการใช้ hot water treatment เช่นกัน นอกจากนี้น้ำร้อนสามารถใช้กำจัดพวกเชื้อที่มาจากเมล็ดและวัสดุปลูกเช่น พลั่วปลูก ถุงบรรจุเมล็ดพันธุ์ได้ กรรมวิธีนี้มีประสิทธิภาพกับพวกเมล็ดพันธุ์หอมหัวใหญ่ มะเขือเทศ และเมล็ดพันธุ์บางชนิด

การฆ่าเชื้อโรคที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์โดยใช้ลมร้อน (Hot air treatment or Dry heat treatment)

วิธีนี้นำมาใช้น้อยมากถึงแม้ว่าการใช้อุณหภูมิหลายๆระดับร่วมกัน Hot air treatment เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมโรคที่ติดมากับเมล็ดน้อยกว่า Hot water treatment และมีการใช้เวลาในการปรับสภาพเมล็ด มากกว่าการใช้น้ำร้อนถึง 5 เท่า แต่การให้ความสนใจในวิธี Hot air treatment นี้ เพราะเป็นวิธีที่ง่ายและเมล็ดมีการสูญเสียที่น้อยกว่า วิธี Dry heat นี้ ซึ่งโดยปกติจะใช้เตาอบลมร้อนในการ ปรับสภาพเมล็ด ซึ่งจะสามารถฆ่า spore ของเชื้อราที่อยู่บนผิวของเมล็ดได้ เช่นในการกำจัด uredospore ของ *Puccinia antirrbini* ใน snapdragon seed (Baker, 1962)

ในการใช้ความร้อนด้วยวิธีนี้สามารถนำมาประยุกต์เพื่อใช้ในการควบคุมเชื้อราที่ติดมากับเมล็ดโดยที่เกิดความเสียหายให้กับเมล็ดน้อยกว่าการใช้ความร้อนในรูปของความร้อนเปียก เมื่อมีการใช้ในอุณหภูมิเดียวกัน (ตารางที่ 2.2) ในการ Dry heat นี้จะสามารถกำจัดหรือทำให้เชื้อแบคทีเรียนั้นลดลงได้ ซึ่งบางครั้งอาจจะทำให้การงอกของเมล็ดได้รับความเสียหายได้ก็เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

The use of hot water in the treatment of seed borne disease (Maude, 1966)

Crop, disease and pathogen	treatment	Reference
Brassica canker *(Leptosphaeria maculans)*	30 min at 50 °C	Walker,1969
Brassica canker (*Leptosphaeria maculans*)	25 min at 50 °C	Milard,1945
Brassica dark leaf spot (*Alternaria brassica*)	20 min at 50 °C	Randawa andAulakh,1984
Brassica dark leaf spot (*Alternaria brassica*)	18 min at 50 °C	Schimmer,1993
Celery leaf blight (*Septoria apiicola*)	30 min at 48-49°C	Krout,1921
Celery leaf blight (*Septoria apiicola*)	25 min at 50 °C	Bant and Storey,1952
Cereal loose smut (*Ustilago segetum var. tritici*)	5 min at 50 °C	Jenes,1988
Cereal loose smut (*Ustilago segetum var. tritici*)	1.5-2 h at 49 °C or 5-6 h at 41°C	Doling,1965
Cereal loose smut (*Ustilago segetum var. tritici*)	5 h at 21 °C presoak +1 min at 49°C +11 min at 52°C	Walker,1969
Millet downy mildew (*Sclerospora graminicola*)	30 min at 50 °C	Thakur and Kanwar,1977
Nasturtium leaf spot (*Acroconidiella tropaeoli*)	1 h in water+30 min at 51.7 °C	Baker and Davis ,1950
Rice blast (*Magnaporthe grisea*)	6-12 h in cool water +1-2min at 50 °C	Nakamura,1986
Rice Bakanae disease (*gibberella fujikuroi*)	7 min at 57 °C	Zaaaerini et al.,1985
Rice leaf spot (*Cochliobolus miyabeanus*)	7 min at 51°C	Gries,1946
Safflower leaf spot (*Alternaria alternate, A.chrthami)*	30 min at 50 °C	Walker,1923

ACA, 0.25% or 0.5% acetate acidified with acetic acid: AZS, 0.1 M acidified zinc sulphate

The comparative of wet and dry heat* upon germination and *Mycospherella pinodes* infection of pea seeds (Maude, 1966)

Pea type	Temperature (ºC) use	Wet heat method		Dry heat method	
		Peas Germination (%)	Peas Infected (%)	Peas Infected (%)	Peas Infected (%)
Round seed	Control	94	14	97	41
	55	95	7	97	34
	65	0	0	93	19
	75	0	0	98	38
Wrinkle seed	Control	82	19	83	26
	55	78	6	86	20
	65	41	0	76	15
	75	0	0	73	17

***All heat treatment applied for 20 min.**

การฆ่าเชื้อโรคที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์โดยการแช่เมล็ดในน้ำภายใต้สภาพที่ไม่มีออกซิเจน (Anaerobic water treatment)

โดยการแช่เมล็ดในน้ำในสภาพอากาศปกติหลังจากนั้นเก็บในที่ๆเป็น Anaerobic ในระยะเวลาหนึ่ง ใช้ได้ดีกับโรค loose smut ของข้าวบาร์เลย์ โดยการแช่เมล็ดที่ 24 ºC หรือ 28 ºC เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นเทน้ำออกแล้วเก็บในภาชนะที่อากาศไม่สามารถเข้าได้เป็นเวลา 31- 42 ชั่วโมง โดยบรรจุเมล็ดพันธุ์ลงในภาชนะเพียงครึ่งหนึ่ง (Hebert, 1955) วิธีการนี้จะลดความเสียหายในเรื่องความงอกของเมล็ดเมื่อได้รับความร้อนสูงเกินไป

การฆ่าเชื้อโรคที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์โดยผ่านไอน้ำร้อน (Aerated steam treatment)

หลักการที่เกี่ยวข้องของ Aerated stream treatment จะนำมาประยุกต์ใช้กับ ดิน วัสดุเพาะ ซึ่งรวมทั้งเมล็ดพันธุ์ด้วย (Maude, 1966) หลักการของการฆ่าเชื้อโดยวิธีนี้คือปรับสภาพเมล็ดที่แห้งด้วยไอน้ำร้อนผสมอากาศ โดยใช้ความดันต่ำผ่านเข้าไปในกองเมล็ดพันธุ์จากนั้นนำเมล็ดออกมาทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว เพื่อไม่ให้เมล็ดเสียความงอก ปกติวิธีการนี้จะใช้ความร้อนประมาณ 56-57 ºC โดยใช้เวลาประมาณ 30 นาทีที่มีความเหมาะสมกับเมล็ดพันธุ์ วิธีนี้มีความปลอดภัยและประสิทธิภาพดีกว่า hot water treatment คือเมล็ดที่ถูก treat ด้วยไอน้ำร้อนจะแห้งกว่า ผลเสียหายต่อความงอกน้อยกว่า ควบคุมอุณหภูมิได้ง่ายกว่าและถูกต้องมากกว่า อย่างไรก็ตามเมล็ดที่จะปรับ

สภาพเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนจะต้องสด แข็งแรง และไม่มีรอยแตกหัก เนื่องจาก mechanical injuries วิธีนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมเชื้อราและแบคทีเรีย **(ตารางที่ 2.3)**

ความชื้นของเมล็ดมีผลต่อการควบคุมโรคของเชื้อราที่ติดมากับเมล็ดจากวิธี Aerated steam เพราะว่าทั้งโรคและเมล็ดนั้นมีความรู้สึกไวต่อความชื้น เป็นการยากที่จะกำจัดโรคในเมล็ดที่มีความชื้นต่ำ เมล็ดที่จะทำการ treat ครั้งแรกนั้นจะต้องได้รับอุณหภูมิต่ำเป็นเวลา 60 นาที แล้วตามด้วยอุณหภูมิสูงเป็นเวลา 30 นาที

ความจุจำเพาะของไอน้ำจะมีประมาณครึ่งหนึ่งของน้ำและใช้เวลาเป็น 2.5 เท่า ของอากาศ ดังนั้นความร้อนและเวลาที่ใช้ของ Aerated steam จะมากกว่าการใช้น้ำร้อน แต่จะใช้เวลาและความร้อนน้อยกว่าการใช้ลมร้อน (Baker, 1962) เป็นการกำจัดเชื้อที่ง่าย มีการสูญเสียความงอกในระดับที่ต่ำ การควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ก็ง่าย และ เยื่อหุ้มเมล็ดจะคงยังไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ในการปรับสภาพเมล็ดเพื่อควบคุมหรือกำจัดเชื้อราที่ติดมากับเมล็ด หรือแบคทีเรียนั้น การใช้ไอน้ำร้อน นั้นจะมีข้อได้เปรียบกว่าการใช้น้ำร้อน เพราะว่าไม่ต้องนำเมล็ดมาแช่น้ำก่อนทำการ treat ซึ่งเป็นการหลีกเลี่ยงการเกิดความเสียหายให้กับเมล็ดโดยเฉพาะในพืชตระกูลถั่ว และการลดความชื้นอย่างรวดเร็ว และการลดอุณหภูมิเมล็ด

การฆ่าเชื้อโรคที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์โดยใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ (Solar heat treatment)

คือการตากแห้งธรรมดา ในประเทศที่มีความร้อนสูงหรืออากาศร้อนจะทำโดยการแช่เมล็ดในน้ำ 4 -5 ชั่วโมงในร่มหรือในห้อง จากนั้นทำให้แห้งโดยเกลี่ยบนพื้นให้บางๆแล้วนำไปตากแดดทิ้งไว้1 ชั่วโมง (เวลาประมาณ 12.00 น.) วิธีนี้พิสูจน์ให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดโรค Loose smut ของข้าวสาลีและข้าวบาร์เลย์ (Bedi, 1957) แต่ใช้เล็กน้อยในทางปฏิบัติในประเทศอินเดีย โดยเฉพาะทางตอนเหนือ เช่น แคว้นปัญจาบ และในประเทศปากีสถานในช่วงแสงอาทิตย์สุดท้ายของเดือนพฤษภาคม หรือ ช่วงอาทิตย์แรกของเดือนมิถุนายน ซึ่งในช่วงนี้จะมีอุณหภูมิประมาณ 35 ºC (Luthra, 1953) โดยวิธีดังกล่าวใช้เฉพาะเดือนพฤษภาคมหรือเดือนมิถุนายน

วิธีนี้ใช้ฆ่าเชื้อรา Smut ของข้าวฟ่างในประเทศพม่า อินเดีย และแทนซาเนีย (Tarr, 1972) แต่สำหรับ smut พวกนี้ ฆ่าเชื้อด้วยสารเคมีจะนิยมมากกว่า

สำหรับการใช้ ความร้อนจากแสงแดดนี้ กับ Cowpea seeds จะแช่เมล็ดก่อนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในน้ำที่อุณหภูมิ 38 ºC ในช่วงเช้าเวลา 08.00 - 12.00 น. หลังจากนั้นนำเมล็ดไปตากแดดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อควบคุมเชื้อ X. *vignicola* ซึ่งวิธีนี้จะเหมาะสำหรับใช้ในบริเวณที่อุณหภูมิ 45 ºC หรือสูงกว่านี้ตลอดทั้งวัน (Jindal, 1989)

การฆ่าเชื้อโรคที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์โดยการใช้รังสี (Radiation)

มีการศึกษาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อควบคุมโรคที่ติดมากับเมล็ดในเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง การฆ่าเชื้อด้วยรังสี ,ไฟฟ้าความต่างศักย์สูง, คลื่นเสียงความถี่สูง และ คลื่นความถี่วิทยุความถี่สูง (VHF)

radio waves จะมีประสิทธิภาพอย่างมาก การใช้กระแสไฟฟ้าที่ 4 kW/g เป็นเวลา 30 วินาที กับเมล็ดจะสามารถลดการเข้าทำลายของแบคทีเรียจาก 2 ถึง 5.9 % และ degree ของการปราศจากเชื้อนั้นขึ้นอยู่กับ แรงดันไฟฟ้า และ ระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า การเข้าทำลายของแบคทีเรียในพืชที่มีการเจริญเติบโตจากเมล็ดที่ผ่าน ultrasonic radiation 21.3 kc/sec เป็นเวลา 15 นาที จะทำให้หารเข้าทำลายของแบคทีเรียในเมล็ดพืชลดลง

The use of aerated steam for the control of seed borne disease (Maude, 1966)

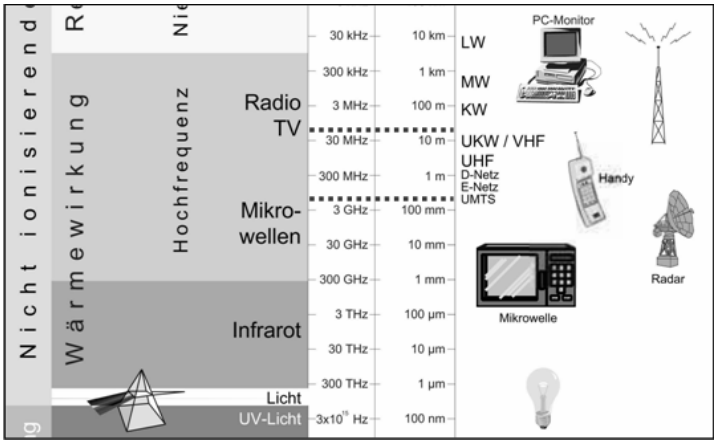
Crop and Pathogen	Treatment	Reference
Celery (*Septoria apiicola*)	56 ºC for 30 min	Navaratnam et al.,1980
Clover (*Fusarium avenaceum*)	49-60 ºC for 5-30 min	McGee and Kellock,1974
Corn (*Drechslera maydis*)	54-55 ºC for 17 min	Prichard,1974
Crucifers (*Leptosphaeria maculans*)	56 ºC for 30 min (H)	Baker,1969
Crucifers (*Alternaria brasscicae*)	56 ºC for 30 min (±H)	Baker,1969
Lenti (*Ascochyta lentis*)	45-75 ºC for 30 min	Kaiser and Hannan,1978
Lettuce (*Septoria lactucae*)	54.4ºC for 20-25 min	Bertus,1972
Lobelia (*Alternaria tenuis*)	50-51 ºC for 15-20 min	Hall and Taylor,1983
Parsnip (*Itersonilis pastinacae*)	45.5 ºC for 30 min	Smith,1966
Pea (*Ascochyta pisi*)	55-75ºC for 20-80 min	Maude,1966
Pea (*Mycosphaerella pinodes*)	55-75 ºC for 20-80 min	Maude,1966
Red beet (*Pleospora betae*)	56 ºC for 30 min	Baker,1969
Red beet (*Pleospora betae*)	52.7 ºC for 20min	Miller and Hannan ,1987
Sweet corn (*Fusarium moniliformae*)	60-64 ºC for 30 min	Navaratnam et al.,1980
Wheat (*Septoria nodorum*)	52-62 ºC for 30 min	Navaratnam et al.,1980
Zinnia (*Ascochyta Zinniae*)	57 for 30 min	Baker,1969

H, moisture level of seeds raised before treatment

คลื่นความถี่วิทยุ (Radio-Frequency, RF)

คลื่นความถี่วิทยุถูกนำมาประยุกต์ใช้กับกิจการด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ด้านการสื่อสารทางไกล โดยแต่ละคลื่นความถี่จะมีความเหมาะสมกับกิจการแต่ละชนิด เช่น คลื่นความถี่ 88-108 MHz สำหรับวิทยุกระจายเสียงระบบ FM คลื่นความถี่ 800, 900, 1800 MHz สำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น สำหรับการประยุกต์ใช้ คลื่นความถี่วิทยุ กับผลิตผลทางการเกษตรนั้นได้

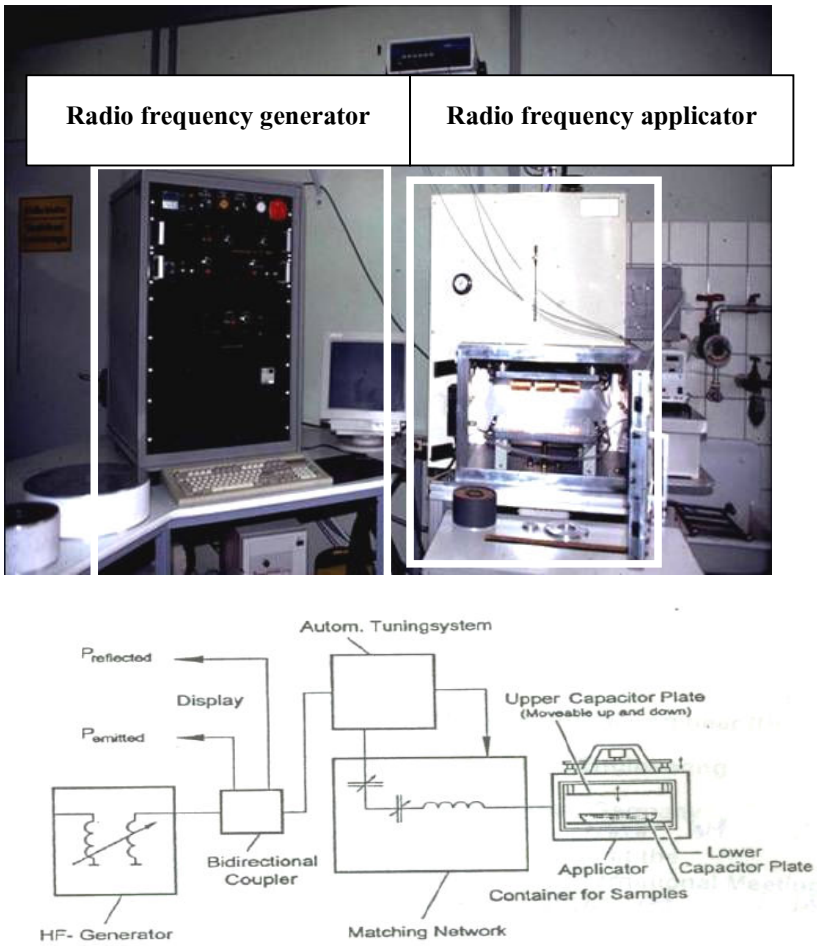
เริ่มมีการศึกษามาประมาณ 40 ปีมาแล้ว ราวปี ค.ศ.1965 โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุในย่านความถี่ 27.12 MHz ในการใช้ประโยชน์



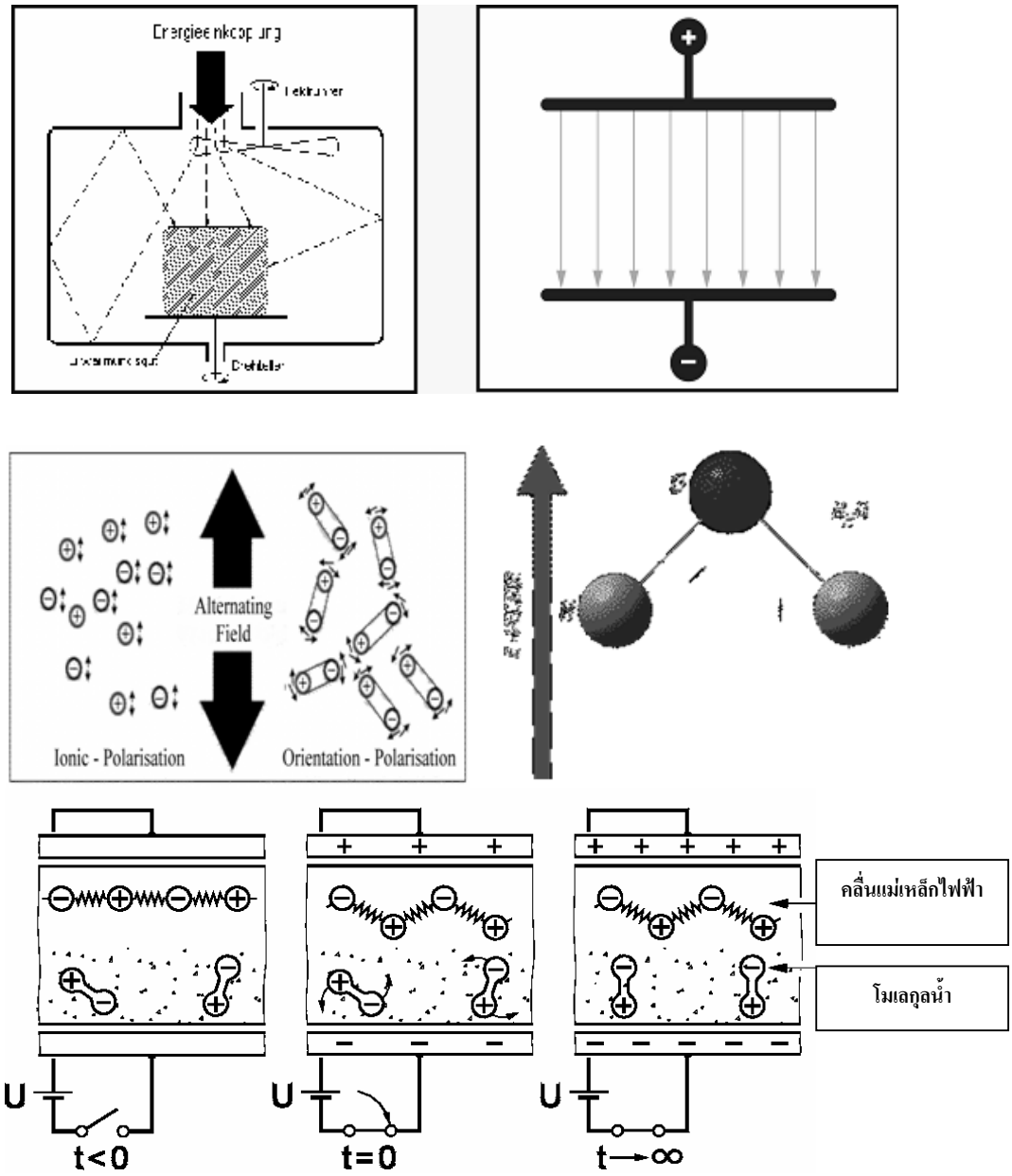
รูปที่ 54: แสดงย่านความถี่ของคลื่นความถี่วิทยุที่มีการใช้ประโยชน์ โดยคลื่นความถี่วิทยุที่มีการใช้ประโยชน์ในทางเกษตรกรรมได้มีการใช้ความถี่ย่าน 20 MHz – 1 GHz โดยคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ความถี่วิทยุในย่านความถี่ 27.12 MHz

การเกิดความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุ

เมื่อคลื่นความถี่วิทยุ มีหลักการในการสร้างความร้อนโดยการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ 27.12 MHz ในระดับความถี่คลื่นวิทยุ ดังกล่าวถูกปล่อยผ่านไปยังวัตถุที่ประกอบด้วยสารที่มีพันธะโมเลกุล 2 ขั้ว เช่น น้ำ ที่มีพันธะไฮโดรเจน 2 พันธะ เมื่อโมเลกุลขวางทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะเกิดการสั่นสะเทือน ความถี่ในการสั่นจะขึ้นอยู่กับ ความถี่ของคลื่นวิทยุที่ใช้ การสั่นสะเทือนจะทำให้เกิดการสะสมพลังงาน เป็นความร้อนจากการเสียดทานภายในโมเลกุล เรียกว่า Intermolecular friction และ กระบวนการ Hysteresis



รูปที่ 55: แสดงองค์ประกอบของเครื่องกำเนิดความถี่วิทยุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ โดยประกอบด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency generator) และเครื่องเปลี่ยนคลื่นความถี่วิทยุเป็นพลังงานความร้อน (Radio frequency applicator)



รูปที่ 56: แสดงหลักการกระจายตัวของคลื่นความถี่วิทยุ (B) เปรียบเทียบกับการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟ (A) ซึ่งคลื่นความถี่วิทยุจะมีการกระจายตัวที่สม่ำเสอ และมีทิศทางที่แน่นอนจากขั้วบวก (Electrode +) ไปยังขั้วลบ (Electrode -) ซึ่งทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของวัตถุสองขั้ว โดยเฉพาะโมเลกุลของน้ำที่มีพันธะไฮโดรเจน 2 พันธะ โดยมีความถี่ธรรมชาติอยู่ที่ 27.12 MHz ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนของโมเลกุลน้ำจะมีความถี่ในการสั่น 27.12 ล้านครั้งต่อวินาที ซึ่งการสั่นสะเทือนจะทำให้เกิดการสะสมพลังงานเป็นความร้อนจากการเสียดทานภายในโมเลกุล เรียกว่า Intermolecular friction และ กระบวนการ Hysteresis

แรงเสียดทานภายในระหว่างโมเลกุลของน้ำที่อยู่ระหว่างช่องว่างภายในเมล็ด ทำให้เกิดความฝืดระหว่างอนุภาค ผลที่ได้คือ ความร้อนจะเกิดขึ้นตรงโมเลกุลของน้ำ ความร้อนที่สูงกว่าจุดอื่นภายในเมล็ดนี้ จะเกิดการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) ในระบบของเครื่อง Radio Frequency ความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีการถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อน ซึ่งเป็นการถ่ายเทพลังงานในรูปของอนุภาค ผ่านตัวกลางที่ไม่มีการเคลื่อนที่ เช่นของแข็ง หรือของเหลวที่มีความหนืดสูง โดยที่ความร้อนจะเริ่มเกิดขึ้นที่น้ำในเมล็ดก่อน หลังจากนั้นความร้อนจากน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะมีการถ่ายความร้อนไปสู่จุดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเพื่อรักษาสมดุลของอุณหภูมิ (Equilibrium Temperature) จนถึงระดับความร้อนที่ต้องการ (Target Temperature)

การวัดอุณหภูมิ

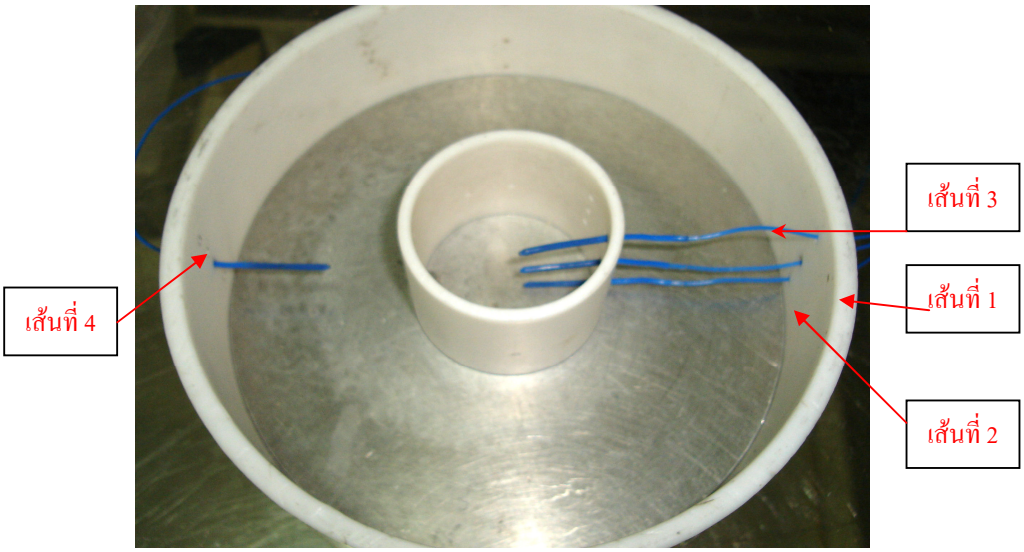
การวัดอุณหภูมิภายในภาชนะบรรจุเมล็ดโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสง Fiber Optic ของ FISO Technology รุ่น UMI Signal Conditioner ขนาด 0.8 มิลลิเมตร ผ่าน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ FISO Commander ที่มีการแสดงผลด้วยจอแสดงผล แบบ 4 ช่องสัญญาณ Model 750 ซึ่งจะสามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -40 ^{o}C ถึง 250 ^{o}C มีความละเอียดในการวัด ทศนิยม 2 ตำแหน่ง หรือ 0.01 เคลวิน (K) ทำการวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงทุกๆ 0.05 เคลวิน ความถี่ในการวัดอุณหภูมิ 4 ครั้งต่อวินาที และมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ $\pm$ 0.1เคลวิน ซึ่งในระหว่างการปล่อยพลังงานสู่เมล็ดพืช ก็จะทำการวัดอุณหภูมิในขณะนั้นไปด้วย ในการแสดงผลจะมีการแสดงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม Panel 1 ซึ่งจะเป็นอุณหภูมิที่วัดได้จาก Fiber Optic เส้นที่ 3 ที่มีการวางไว้ที่จุดกึ่งกลางภายในภาชนะบรรจุเมล็ด ซึ่งอุณหภูมิภายในจะมีความเสถียรมากที่สุด (Homogenous Temperature) ในการวัดอุณหภูมิภายในภาชนะบรรจุเมล็ดแต่ละครั้ง จะใช้เส้นใยแก้วนำแสง Fiber Optic ทั้งหมด 4 เส้น วัดแต่ละจุด กระจายตามจุดต่างๆ เพื่อให้ครอบคลุมทุกๆตำแหน่งที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิมากที่สุด โดยตำแหน่งต่างๆของเส้นใยแก้วนำแสง Fiber Optic จะมีการวางตำแหน่งดังนี้

เส้นที่ 1 ตรงกลางด้านบนห่างจากฝาภาชนะ 0.5 เซนติเมตร

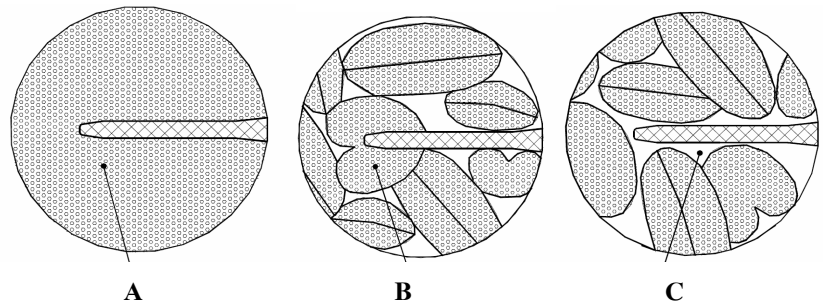
เส้นที่ 2 ตรงกลางด้านล่างห่างจากก้นภาชนะ 0.5 เซนติเมตร

เส้นที่ 3 ตรงกลางของภาชนะ อุณหภูมิจะมีความเสถียรมากที่สุด

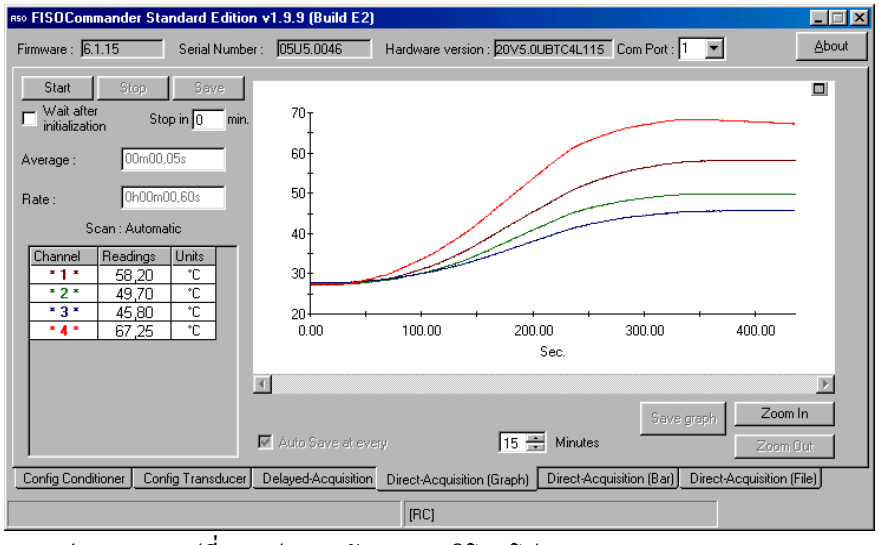
เส้นที่ 4 ส่วนติดขอบภาชนะบรรจุเมล็ดห่างจากผิวด้านข้าง 0.5 เซนติเมตร



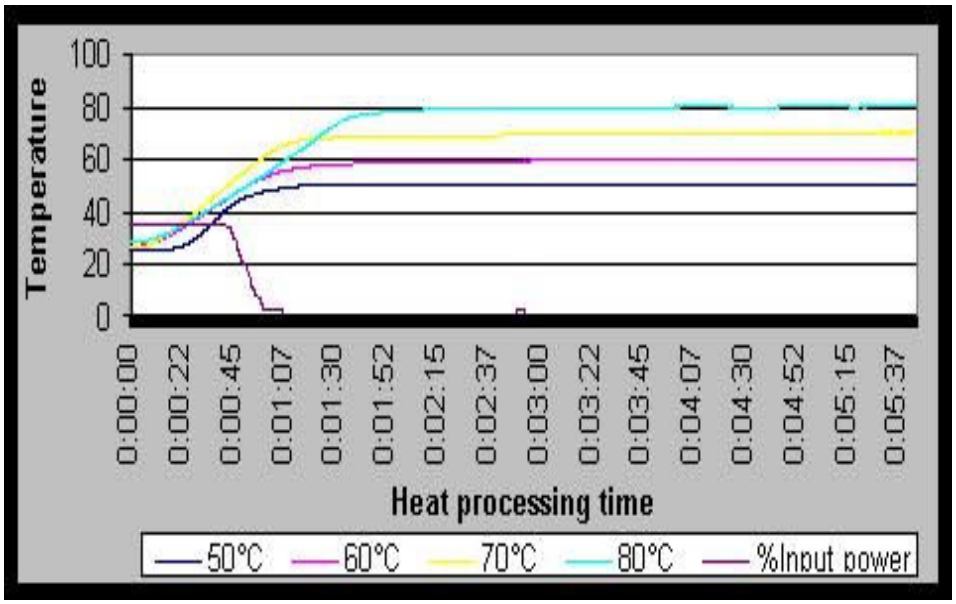
รูปที่ 57: ภาพการภาชนะบรรจุตัวอย่างเมล็ดงาขี้ม้อน และสารไฟเบอร์ออพติคที่ใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิภายในภาชนะบรรจุในเครื่อง คลื่นความถี่วิทยุ



รูปที่ 58: ตำแหน่งของปลายสาย Fiber Optic ที่ใช้วัดอุณหภูมิของเมล็ดภายในภาชนะ



รูปที่ 59: กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิโดยโปรแกรม FISO Commander Standard Editionversion1.9.9



รูปที่ 60: การเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิที่กำเนิดโดยคลื่นความถี่วิทยุจากระดับอุณหภูมิห้องสู่ระดับอุณหภูมิเป้าหมาย (Target temperatures) โดยใช้เวลาประมาณ 1.30 วินาที

ความคลาดเคลื่อน (Error) ของการวัดอุณหภูมิ

สามารถตรวจสอบความคลาดเคลื่อนโดยใช้โปรแกรม FISO Commander Standard Editionversion1.9. ที่มีความแม่นยำสูงในการตรวจสอบซึ่งเป็นการอ่านค่าได้แล้วรายงานออกมาเป็นกราฟอุณหภูมิได้การวัดอุณหภูมิด้วย Fiber optic มีความคลาดเคลื่อนได้จากการสัมผัสกับผิว

เมล็ด ดังนั้น ในระหว่างการทดลองจึงต้องพยายามให้มีช่องว่างระหว่างปลาย fiber optic กับเมล็ดข้าวโพดให้เกิดช่องว่างน้อยที่สุด

A ปลายสาย Fiber Optic สัมผัสเมล็ดทั้งหมด อุณหภูมิที่วัดได้จะเป็นอุณหภูมิของเมล็ดที่แท้จริงมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ $\pm$ 1.00 เคลวิน

B ปลายสาย Fiber Opticสัมผัสเมล็ดบางส่วน อุณหภูมิที่วัดได้จะเป็นอุณหภูมิต่ำกว่าเป็นจริงเล็กน้อยมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ $\pm$ 2.30 เคลวิน

C ปลายสาย Fiber Opticไม่สัมผัสกับเมล็ด อุณหภูมิที่วัดได้จะเป็นอุณหภูมิจะต่ำกว่าเป็นจริงมากมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ $\pm$ 3.70 เคลวิน

ศักยภาพของคลื่นความถี่วิทยุสำหรับผลิตผลทางการเกษตร (Radio-Frequency Potential for Agricultural Application)

มีการใช้ คลื่นความถี่วิทยุ เพื่อปรับสภาพเมล็ดพันธุ์ แทนวิธีกล และการใช้สารเคมีที่ใช้คลุกเมล็ดพันธุ์ เพราะใช้เวลาน้อยและไม่มีสารเคมีตกค้างในเมล็ด เมล็ดพันธุ์พืชบางชนิดที่มีการพักตัวแบบที่เปลือกหุ้มเมล็ดไม่ยอมให้น้ำซึมผ่าน (hard seed) เช่น เมล็ดพันธุ์ถั่ว alfalfa สามารถใช้ คลื่นความถี่วิทยุ ทดแทนการใช้ heat treatment ในการแก้การพักตัวได้ และสำหรับพืชปลูกโดยทั่วไป เช่น ข้าวโพด, ฝ้าย (*Gossypium hirisutum*) และข้าวสาลี (*Triticum aestivum*) การใช้ RF treatment จะทำให้เพิ่มอัตราความงอกของเมล็ดพันธุ์ได้ (Nelson,1985) สำหรับ การใช้ คลื่นความถี่วิทยุ เพื่อทำลายเชื้อรา และแบคทีเรีย ที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์ (seed decontamination) ได้มีการศึกษาวิจัยและประสบผลสำเร็จในการทำลายเชื้อราบางชนิดที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์ ทดแทนการใช้สารเคมีที่เป็นอันตรายได้ เช่น เชื้อรา *Phoma betae* ในเมล็ดพันธุ์ ผักกาดหวาน (sugar-beet ; *Beta vulgaris*) และเชื้อรา *Fusarium culmorrum* ในเมล็ดพันธุ์ข้าวสาลี (Cwikilinski M. and K. von Hörsten, 1999) ซึ่งสามารถทำลายเชื้อราที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์ได้โดยไม่ทำให้เมล็ดพันธุ์สูญเสียความงอก

การใช้ คลื่นความถี่วิทยุ กระบวนการผลิต (product processing) เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตผล เช่น ถั่วเหลือง (*Glycine max* L.) ซึ่งมักจะพบว่ามี trypsin inhibitor เป็นองค์ประกอบซึ่งถ้าจะนำมาเป็นอาหารคนหรือสัตว์ต้องกำจัดออกให้หมดเพื่อให้ได้คุณค่าทางอาหารอย่างเต็มที่ สามารถการทำลาย tripsin inhibitor โดยใช้ คลื่นความถี่วิทยุ การใช้ คลื่นความถี่วิทยุ ยังทำให้เอนไซม์ lipoxygenase ที่ทำให้รสชาติของอาหารไม่ดี (off-flavors) หายไปด้วย แต่ยังคงพบเอนไซม์ peroxidase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่มีประโยชน์อยู่ในตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองอีกด้วย (Borchers, *et al*., 1972; Nelson, *et al.,* 1981)

การใช้คลื่นความถี่วิทยุ และไมโครเวฟประสบความสำเร็จอย่างดีในพืชหลายชนิด ในการควบคุมเชื้อรา แบคทีเรียและเชื้อไวรัสที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์ ในการศึกษาการใช้แม่เหล็กไฟฟ้าใน

การกำจัดเชื้อที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์จำเป็นต้องพิจารณาความสัมพันธ์ของค่า AMP (absorbed microwave power), DC (duty cycle) และ IMC (initial moisture content)ที่จะมีผลต่อความงอกและความแข็งแรงของเมล็ด ที่อุณหภูมิระดับหนึ่งสามารถจะกำจัดเชื้อที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์ได้แต่กลับมีผลให้ความงอกและความมีชีวิตของเมล็ดลดลงได้ในส่วนของระยะเวลาหากใช้ระยะเวลาในการให้คลื่นความร้อนมากไปก็จะส่งผลทางด้านลบแก่เมล็ดพันธุ์เช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่าความสำเร็จในการทำจะมีความสัมพันธ์กับชนิดและความชื้นในเมล็ดซึ่งจะมีความสัมพันธ์ต่อความสามารถในการดูดซับพลังงานที่ให้ไปและระดับของอุณหภูมิในส่วนของเมล็ด(Seaman and Wallen, 1966 ; Joliceur *et al*., 1982; Lozano *et al*., 1985; Cavalcante and Muchovej, 1993)

แนวทางการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุทางการเกษตร

การปรับสภาพเมล็ดพันธุ์ (Seed Treatment) มีการใช้ คลื่นความถี่วิทยุ เพื่อทดแทนกรรมวิธีดั้งเดิม และทดแทนการใช้สารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้คลุกเมล็ดพันธุ์ ได้และมีข้อได้เปรียบที่ใช้เวลาน้อย และไม่มีสารเคมีตกค้างในเมล็ด เช่น เมล็ดพันธุ์พืชบางชนิดที่มีการพักตัวแบบที่เปลือกหุ้มเมล็ดไม่ยอมให้น้ำซึมผ่าน (impermeability seed coat) เช่นเมล็ดพันธุ์ถั่ว alfalfa สามารถใช้ คลื่นความถี่วิทยุ ทดแทนการใช้ Heat Treatment ในการแก้การพักตัวได้ และสำหรับพืชปลูกโดยทั่วไป เช่น ข้าวโพด, ฝ้าย และข้าวสาลี การใช้ RF treatment จะทำให้เพิ่มอัตราความงอกของเมล็ดพันธุ์ได้ (Nelson,1985) สำหรับ การใช้ คลื่นความถี่วิทยุ เพื่อทำลายเชื้อรา และแบคทีเรียที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์ ได้มีการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวางและประสบผลสำเร็จในการทำลายเชื้อราบางชนิดที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์ ทดแทนการใช้สารเคมีที่เป็นอันตรายได้ เช่น เชื้อรา *Phoma betae* ในเมล็ดพันธุ์ ผักกาดหวาน (Cwiklinski, 1999) และ เชื้อรา *Fusarium culmorrum* ในเมล็ดพันธุ์ข้าวสาลี (Hoersten, 1995) ซึ่งสามารถทำลายเชื้อราที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์ได้โดยไม่ทำให้เมล็ดพันธุ์สูญเสียความงอก

การควบคุมแมลงในขณะเก็บรักษา (Stored-Grain Insect Control) Nelson and Charity (1972) รายงานว่า การใช้คลื่นความถี่ 39 MH_z 3 วินาที และ 2,450 MH_z 13 วินาทีสามารถทำลายตัวเต็มวัยของ Rice weevils ในเมล็ดข้าวสาลีได้ 100% ซึ่งเรียกความถี่ดังกล่าวว่าเป็น Selective condition สำหรับ Rice weevils ซึ่งสามารถใช้ทดแทนการรมด้วยสารเคมี (fumigation) ได้และไม่ทำให้มีสารพิษตกค้างในผลิตผลอีกต่อไป อย่างไรก็ตาม ต้นทุนในการ ใช้ คลื่นความถี่วิทยุ ที่ความถี่ดังกล่าว นั้นสูงกว่าการใช้การรมสารเคมีหลายเท่าตัว ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องศึกษาวิจัยหา Selective condition ที่ประหยัดและเหมาะสมสำหรับแมลงแต่ละชนิดและชนิดผลิตผลต่าง ๆ ต่อไป (Nelson and Stetson, 1974)

กระบวนการผลิต (Product Processing) มีความพยายามหาวิธีในการใช้ คลื่นความถี่วิทยุ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตผล ตัวอย่างเช่นถั่วเหลือง (*Glycine max L.*) ซึ่งมักจะ

พบว่ามี trypsin inhibitor เป็นองค์ประกอบซึ่งถ้าจะนำมาเป็นอาหารคนหรือสัตว์จำเป็นจะต้องกำจัดออกให้หมดเพื่อให้ได้คุณค่าทางอาหารอย่างเต็มที่ Borchers *et al*. 1972; Pour–El *et al*., 1981; Nelson, *et al. 1981* ประสบความสำเร็จในการทำลาย Trypsin inhibitor โดยใช้ คลื่นความถี่วิทยุ การใช้ คลื่นความถี่วิทยุ ยังทำให้ Lipoxygenase ซึ่งเป็นเอนไซม์ ที่ทำให้รสชาติของอาหารไม่ดี (off-flavors) หายไปด้วย แต่ยังคงพบ peroxidase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่มีประโยชน์อยู่ในสิ่งทดลองอีกด้วย

ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในเมล็ดพันธุ์กับการใช้ คลื่นความถี่วิทยุ ในการทำลายเชื้อสาเหตุของโรคที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์และคุณภาพเมล็ดพันธุ์

เชื้อราหรือเชื้อแบคทีเรียตลอดจนแมลงที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์สามารถทำลายได้ด้วยการใช้ความร้อนจาก คลื่นความถี่วิทยุ ถึงระดับหนึ่งทำให้ได้ค่าระดับอุณหภูมิที่สามารถทำลายเชื้อและแมลงที่ติดมาได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเมล็ดพันธุ์ แต่ทั้งนี้จะมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ให้คลื่นความร้อนแก่เมล็ดด้วย หากใช้ระยะเวลา ที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ความงอกและความแข็งแรงของเมล็ดลดลงได้ (Robert and Nelson, 2003)

การใช้คลื่น Radio Frequency และไมโครเวฟประสบความสำเร็จอย่างดีในการควบคุมเชื้อรา แบคทีเรีย และเชื้อไวรัสที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์พืชหลายชนิด (Seaman and Wallen, 1966; Joliceur *et al.,*1982; Lozano *et al.,* 1985: Cavalcante and Muchovej, 1993) การศึกษาถึงการใช้คลื่นความร้อนในการกำจัดเชื้อที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์จำเป็นต้องพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของค่า Absorbed Microwave Power (AMP), Duty Cycle (DC) และ Initial Moisture Content (IMC) ที่มีผลต่อความงอกและความแข็งแรงของเมล็ดพันธุ์ ที่ระดับอุณหภูมิหนึ่งสามารถกำจัดเชื้อที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์ได้แต่กลับมีผลให้ความงอกและความชีวิตของเมล็ดลดลงได้ และระยะเวลาในการให้คลื่นความร้อนที่นานเกินไปส่งผลทางด้านลบแก่เมล็ดพันธุ์เช่นกัน นอกจากนี้พบว่าความสำเร็จ มีความสัมพันธ์กับชนิดและความชื้นในเมล็ดซึ่งมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับพลังงานและระดับอุณหภูมิในเมล็ด Nelson (1961) ศึกษาถึงผลของการใช้คลื่น คลื่นความถี่วิทยุ ต่อคุณภาพเมล็ดพันธุ์ข้าวสาลี ข้าวโพด และพืชตระกูลถั่ว พบว่า ค่าความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดระดับอุณหภูมิสูงสุดที่เมล็ดสามารถทนได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่เมล็ดในขณะเดียวกันมีผลลดการเกิดเมล็ดแข็งทำให้ความงอกของเมล็ดอัลฟาฟ่า และ red clover เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Lambert *et al.,* (1950); Iritani *et al.* (1954); Jonas, (1953) ที่พบว่า การให้ คลื่นความถี่วิทยุ แก่เมล็ดวัชพืช อัลฟาฟ่า และ red clover ช่วยให้เมล็ดมีความงอกสูงขึ้นโดยในเมล็ดพันธุ์ผักต้องใช้ คลื่นความถี่วิทยุ ที่ระดับ 43-44 megacycles (mc) ต่อนาทีจึงมีผลให้ความงอกเพิ่มขึ้น Nelson (1968) พบว่า การให้ คลื่นความถี่วิทยุ และอินฟาเรดแก่เมล็ดอัลฟาฟ่า 27 ชนิด สามารถลดการเกิดเมล็ดแข็ง ทำให้เปอร์เซ็นต์ความงอกเพิ่มขึ้นจาก 40-60 % เป็น 80-90 % จึงกล่าว

ได้ว่าระยะเวลาในการให้คลื่นความร้อนแก่เมล็ดมีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นในเมล็ด Stuart *et al*, (1985) ให้ คลื่นความถี่วิทยุ ที่ระดับ 10 และ 40 MH_Z และคลื่นไมโครเวฟที่ระดับ 2.45 MH_Z แก่เมล็ดพันธุ์พืช 80 ชนิดพบว่าในเมล็ดขนาดเล็กเช่น legumes alfalfa (*Medicao sativa* L) red clover (*Trifolium pratense* L.) arrowleaf clover (*Trifolium vesicullosum Savi*) ทำให้ได้ต้นอ่อนปกติมากขึ้นและช่วยลดการเกิดเมล็ดแข็งได้เช่นกัน

Joliceur *et al.,* (1982) พบว่า การให้คลื่นไมโครเวฟ 675 วัตต์ต่อ 100 เมล็ด นาน 160 วินาที แก่เมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองที่ความชื้นเมล็ดพันธุ์เริ่มต้น 8.5 % สามารถช่วยลดการปนเปื้อนของเชื้อ *mosaic virus* จากที่เคยปนเปื้อนสูงถึง 45-70 % ลงได้ ในขณะเดียวกัน Stephenson*et et al.* (1994) ทำการทดลองในข้าวบาร์เลย์ พบว่า สามารถทำลายโรค loose smut ได้โดยไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความงอกของเมล็ด

Lozano *et al.,* (1986) ศึกษาผลของการใช้คลื่นไมโครเวฟในการกำจัดเชื้อสาเหตุโรคที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์ Cassava true seed ที่พลังงาน 1400 วัตต์, 2.45 MH_Z นาน 120 นาทีพบว่า ที่ระดับอุณหภูมิ 77 องศาเซลเซียสเหมาะสมต่อการทำลายเชื้อที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์โดยเมล็ดพันธุ์ยังคงมีความงอกสูงถึง 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในการใช้ความร้อนโดยวิธีปกติไม่สามารถลดการปนเปื้อนของเชื้อ *Fusalium* sp. และ *Collectotricum* sp. ได้ Cavalcante and Muchovej (1993) ศึกษาถึงการให้ความร้อนแก่เมล็ดเพื่อควบคุมเชื้อที่ติดมากับเมล็ดถั่วเหลือง, ถั่วลิสง, ถั่ว (*Phaseolus vugaris* L.), ข้าวสาลี และข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยให้คลื่นความร้อนที่ 1420 วัตต์ 2.45 MH_Z นาน 0-7 นาที พบว่าระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ปริมาณเชื้อที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์และเปอร์เซ็นต์ความงอกลดลงและปรากฏลักษณะจุดด่าง (chlorotic spot) เกิดขึ้นที่ส่วนของใบเลี้ยงแต่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเอมบริโอ การให้คลื่นความร้อนมีผลให้ความมีชีวิตของสปอร์เชื้อราที่อยู่แบบเดี่ยวลดลง ในขณะที่สปอร์ที่อยู่รวมกันเป็นกลุ่มมีการตอบสนองที่ช้ากว่าและใน dark spore จะได้รับผลกระทบน้อยกว่า hyaline spore ต่อมา Bhaskara *et al.,* (1995) ใช้คลื่นไมโครเวฟในการกำจัดเชื้อ *Diaporthe Phasrolorum* ในเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองโดยให้พลังงานที่ระดับ 750 วัตต์ 2.45 MH_Z พบว่าปริมาณความชื้นในเมล็ดมีผลต่อการดูดซับพลังงานของเมล็ด ที่ความชื้นเมล็ดพันธุ์สูงเมล็ดสามารถดูดซับคลื่นความร้อนได้ดี และโมเลกุลของน้ำมีส่วนช่วยป้องกันการสูญเสียความงอกและความแข็งแรงของเมล็ดได้ ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งของเชื้อในเมล็ดหากเชื้อปนเปื้อนอยู่บริเวณส่วนนอกสามารถกำจัดได้ดีกว่าเชื้อที่อาศัยอยู่ในเมล็ด ต่อมา Bhaskara*et al.,* (1998) พบว่า การให้คลื่นไมโครเวฟแก่เมล็ดพันธุ์ข้าวที่ความชื้นเมล็ดพันธุ์เริ่มต้น 8 14 และ20 % โดยให้ AMP ที่ระดับ 0.3 0.4 0.5 0.6 w/g ในระยะเวลา Duty Cycle ที่ 20 30 40 และ 50 s/m สามารถลดการปนเปื้อนของเชื้อ *Fusarium graminearum* ได้ 4-7 % โดยที่เมล็ดพันธุ์ยังคงมีเปอร์เซ็นต์ความงอกสูงถึง 85 % และที่ระดับความชื้นเมล็ดพันธุ์เริ่มต้น 14 %เหมาะสมที่สุด ณัฐศักดิ์ (2544) พบว่า การให้คลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 800 วัตต์ นาน 40 วินาทีแก่เมล็ดพันธุ์ถั่ว

ลิสงสามารถลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ จาก 6.0 % เหลือ 5.27 % โดยที่สามารถรักษาความมีชีวิตของเมล็ดพันธุ์ไว้ได้

ผลของการใช้คลื่นความถี่วิทยุต่อลักษณะโครงสร้างภายในเซลล์ของเมล็ดพันธุ์

John (1970) ศึกษาถึงผลของการให้คลื่น Radio Frequency ต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งมีชีวิต พบว่า การให้คลื่น Radio Frequency ที่ระดับพลังงานสูงๆ มีผลยับยั้งกระบวนการแบ่งเซลล์ อย่างชั่วคราวในเซลล์ที่ทำการเพาะเลี้ยงในหลอดทดลอง ชักนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านพันธุกรรม เช่น การกลายพันธุ์ของโครโมโซม เกิดลักษณะผิดปรกติในเซลล์ที่มีชีวิตทั้งเซลล์พืชและเซลล์สัตว์ ชักนำให้เกิดการแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนของสารพันธุกรรม (crossing over) ในเซลล์สืบพันธุ์เพศผู้ (male germ cell) แต่การให้พลังงานในระดับที่เหมาะสมสามารถช่วยทำลายการพักตัวของหัวพันธุ์แกลดิโอลัส ส่วนผลต่ออวัยวะภายในเซลล์ (intracellular organelles) พบว่า มีผลต่อการแบ่งเซลล์แบบ mitosis เกิดโครโมโซมผิดปรกติเป็นจำนวนมาก เกิดลักษณะ bridging fragmentation และ micronuclei ในเซลล์ส่วนปลายราก (root tip) ของกระเทียม

การให้คลื่น Radio Frequency แก่พืชในกลุ่มปอ ป่าน สามารถชักนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงชนิดของเซลล์สืบพันธุ์ โดยทำให้เกิดต้นตัวเมียได้สูงขึ้น 20-25 % และช่วยลด oxidative processes ในเนื้อเยื่อพืช นอกจากนี้ Pittman (1963) พบว่า การให้คลื่น Radio Frequency มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของการเกิดเพศในพืชใบเลี้ยงเดี่ยว เช่น ข้าวโพด แตงกวา กระตุ้นให้เกิดเพศผู้ (masculinity)

ผลของการใช้คลื่นความถี่วิทยุต่อการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบทางเคมีและการเกิดกิจกรรมของเอมไซม์ในเมล็ดพันธุ์

การใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยเฉพาะ คลื่น Microwave และ คลื่นความถี่วิทยุ เป็นที่นิยมอย่างสูงในกระบวนการผลิตอาหารของผลิตภัณฑ์จากพืชและสัตว์ เพื่อใช้ในการยับยั้งการเกิดกิจกรรมของเอมไซม์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ เช่น ในเมล็ดฝ้ายและข้าว (Tao and Liuzzo, 1993; Conkerton *et al.,* 1994) Lazarenko and Gorbatovskaya (1966) รายงานว่าการให้คลื่นความร้อนแก่เมล็ดพันธุ์พืชสามารถทำลายการพักตัวของเมล็ดได้ โดยเฉพาะในพืชที่มีอัตราการงอกต่ำการเกิดกระบวนการทางเคมีภายในต้นกล้าเกิดได้ดีขึ้น โดยเมล็ดมีอัตราการหายใจและการเกิดกิจกรรมของเอนไซม์ไฮโดรไลติกสูงขึ้น ในเมล็ดที่ผ่านการให้คลื่นความร้อนที่ 2-4 KV/cm และ 8 KV/cm นาน 30 วินาที ถึง 1 นาที ภายหลังจากเก็บรักษาไว้ 10-17 วัน ส่งผลให้ต้นกล้าที่ได้มีปริมาณคลอโลฟิลล์สูงขึ้นถึง 86 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณคาโรทีนอยด์สูงขึ้นถึง 50 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับต้นกล้าปรกติที่เกิดจากเมล็ดที่ไม่ได้รับคลื่นความร้อน (Kozhevnikova and Stank, 1966) นอกจากนี้พบว่าใน

เมล็ดเก่าการให้คลื่นความร้อนสามารถทำให้เมล็ดมีความงอกสูงขึ้น ปริมาณแป้ง invert sugar อัตราการแตกหน่อต่อพื้นที่ และปริมาณอัลบูมินเพิ่มขึ้น การให้คลื่น high-frequency สามารถยับยั้งการเกิดกิจกรรมของเอนไซม์บางชนิดในผักและผลไม้ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการกำหนดช่วงของการเก็บเกี่ยวผลผลิต (Robert and Nelson, 1996) และพบการเพิ่มขึ้นของสารเร่งการเจริญเติบโตที่คล้ายกับ Phenylalanine Ammonia-lypase (PAL) ในถั่วฝักสด และมันฝรั่ง (Jones *et al.,* 1986)

Irfan (1999) รายงานการให้คลื่น Radio Frequency ที่ระดับพลังงาน 140 วัตต์ และคลื่น Microwave ที่ระดับพลังงาน 1200 วัตต์ ความถี่ 2.45 MH_z แก่เมล็ด Rape seed พบว่าการให้คลื่น Radio Frequency ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันและการไหม้ของสารหอมระเหย (aroma) ในขณะที่ Pour *et al.,* (1981) กลับพบว่า การให้คลื่นไมโครเวฟแก่ถั่วเหลืองที่ระดับพลังงาน250-300 cal/g. มีผลให้การเกิดกิจกรรมของ trypsin inhibitor urease และ lypoxyenase ในถั่วเหลืองและถั่วฝักสด ลดลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์โดยตรงจากการดูดซับพลังงานและระยะเวลาที่ให้แก่เมล็ด

Heat Shock Proteins (HSPs)

Heat Shock Proteins คือ โปรตีนที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นในสิ่งมีชีวิตบางชนิดเพื่อตอบสนองต่อสภาวะเครียดที่เกิดขึ้น (Heikkila *et al*., 1984) การสังเคราะห์ HSPs ถือเป็นการตอบสนองที่เกิดขึ้นชั่วคราวในระดับเซลล์ที่แสดงออกเมื่อสิ่งมีชีวิตได้รับสภาพเครียด (Perdrizet, 1997) หรือความร้อนในระดับที่ไม่เกิดอันตรายถึงระดับเสียชีวิต การได้รับสารเคมีหรือโลหะหนัก การมีอนุมูลอิสระจำนวนมาก ความเครียดจากค่าออสโมติกของน้ำ การได้รับแสงมากเกิน การขาดอาหารและขาดออกซิเจน (Novel, 1991) การเจ็บป่วยและการติดเชื้อไวรัสเป็นต้น (Perdrizet, 1997) ซึ่งการสังเคราะห์ HSPs เป็นอีกกลไกหนึ่งในการรักษาตัวเองของเซลล์ให้สามารถมีชีวิตรอดจากสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม (ดนัย, 2540) ในสัตว์ที่มีกระดูกสันหลังและแบคทีเรียนั้น พบว่า HSPs ถูกสังเคราะห์ขึ้นเมื่ออุณหภูมิของสภาพแวดล้อมเพิ่มสูงขึ้น 5-10 องศาเซลเซียสจากอุณหภูมิปรกติ (Novel, 1991)

ชนิดของ Heat Shock Proteins (HSPs) ในพืช

HSPs ในพืชตรวจพบครั้งแรกในถั่วเหลือง (Barnett *et al*., 1980) HSPs ที่พบในพืชตระกูลสูงและพืชทั่วไปโดยมากเป็น HSPs ที่มีมวลโมเลกุลต่ำหรือเป็น Small Heat Shock Proteins (smHSPs) ในพืชบางชนิดอาจพบ smHSPs ที่ต่างกันได้ถึง 40 ชนิด (Viering, 1991) ซึ่ง smHSPs นี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่มตามอวัยวะที่เกิดการสังเคราะห์ คือ

กลุ่มที่ 1 Cytosolic *I* สังเคราะห์ที่ไซโตซอล

กลุ่มที่ 2 Cytosolic *II* สังเคราะห์ที่ไซโตซอล

กลุ่มที่ 3 สังเคราะห์ที่คลอโลพลาสต์

กลุ่มที่ 4 สังเคราะห์ที่ไมโตคอนเดรีย

กลุ่มที่ 5 สังเคราะห์ที่เอนโดพลาสมิคเรติคิวลัม

หน้าที่และบทบาทของ Heat Shock Proteins (HSPs)

การตอบสนองต่อสภาพเครียดเป็นปฏิกิริยาตอบสนองของเซลล์และอวัยวะต่างๆ เมื่อได้รับสภาพเครียดจากอุณหภูมิที่ระดับต่างๆ ซึ่งสภาพเครียดเนื่องจากการได้รับความร้อนส่งผลให้เซลล์ตาย ในขณะเดียวกันเกิดการชักนำให้เซลล์ตอบสนองต่อความเครียดจากความร้อนที่เกิดขึ้นเรียกว่า The Heat-Shock Response ซึ่งมีผลดังนี้

1. เกิดกระบวนการปกป้องและป้องกันความเสียหายที่จะเกิดแก่เซลล์และอวัยวะต่างๆ
2. เกิดกระบวนการเริ่มต้นใหม่ (resumption) ของการกลับมาเป็นเซลล์ปกติ และการเกิดกิจกรรมทางด้านสรีรวิทยาของเซลล์
3. นำไปสู่การทนทานความร้อนที่สูงขึ้น ระดับความสามารถในการทนความร้อนของเซลล์สูงขึ้น

ความสัมพันธ์ของการแสดงออกของ HSPs ในสิ่งมีชีวิตต่อการต้านทานต่ออุณหภูมิสูง นำไปสู่การตั้งสมมุติฐานที่ว่า HSPs เป็นปัจจัยหลักในการป้องกันหรือต้านทานต่อความเสียหายของเซลล์เมื่อได้รับอุณหภูมิสูง (Lavoie *et al.,* 1995) การตอบสนองต่อความร้อน (Heat shock response) เมื่อเซลล์ได้รับอุณหภูมิที่สูงเกิน HSPs ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นจะทำหน้าที่ซ่อมแซมโปรตีนที่เกิดการเสื่อมสภาพ นอกจากนี้พบว่าเซลล์หลายชนิดมีความสามารถสังเคราะห์ DNA repair enzyme ได้ (ดนัย และ อังสนา, 2540) กระบวนการในการปรับตัวต่อการตอบสนองต่อความร้อนเพื่อสามารถมีชีวิตอยู่ได้ของเซลล์ โดยเกิดการป้องกันเซลล์จากผลของสภาวะเป็นพิษของโปรตีน (protein toxic effect) จากสภาพเครียดจากความร้อน ความสามารถในการทนทานต่อสภาวะเครียดจากสิ่งแวดล้อมในระดับที่สูงขึ้น การตอบสนองของเซลล์ในระดับโมเลกุลต่อสภาพ heat shockทำให้เกิดกระบวนการตอบสนองชั่วคราวของเซลล์ (transition reprogramming) เกิดการสังเคราะห์ HSPs ขึ้น ในขณะเดียวกันการสังเคราะห์โปรตีนปรกติจะหยุดลงชั่วคราว การสะสมของปริมาณ HSPs ที่พบได้ขึ้นกับจำนวน HSPs ที่เพียงพอสำหรับป้องกันเซลล์และสามารถกระตุ้นให้เซลล์มีระดับความทนทานความร้อนที่สูงขึ้น (Bostonet *et al.,* 1996; Schoffl *et al.,* 1998a, 1998b, 1998c) ในการศึกษาในหลอดแก้ว (*in vitro*) พบว่า HSPs บางชนิดสามารถทำหน้าที่ได้เช่นเดียวกับ molecular chaperone (Jinn *et al.,* 1989) ซึ่งในสภาพปรกติ molecular chaperone ทำหน้าที่จับกับโปรตีนที่เพิ่งสังเคราะห์เสร็จ แล้วเกิดการรวมตัวกันเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ก่อให้เกิดเป็น conformation ของโปรตีนได้อย่างปกติ (ดนัย และ อังสนา, 2540; วีรพล, 2546) ส่วนของ HSPs chaperone ทำหน้าที่จับกับโปรตีนที่เสียสภาพเนื่องจากสภาวะเครียดต่างๆ แล้วทำให้เกิดการรวมตัว

เป็นโปรตีนที่สมบูรณ์แบบอีกครั้ง ตลอดจนป้องกันไม่ให้เกิดการรวมตัวกันของโปรตีนอย่างผิดระเบียบ (Landy and Gierash, 1994; Forrieter *e., al* 1997)

Nadja *et al.,* (1996) ศึกษาถึงการชักนำและสะสม HSPs ในเมล็ดพันธุ์ *Arabidopsis thaliana* ในระยะการสุกแก่ภายใต้สภาพเครียดเนื่องจากการสูญเสียน้ำ พบว่า เกิดการสะสมของ HSPs class I ยีน Athsp 17.4 ซึ่งเป็น HSPs หลักที่มีการสะสมในระยะการสุกแก่ของเมล็ดขึ้น และพบว่า ตลอดระยะเวลาการพัฒนาของเมล็ดและระยะเวลาที่เมล็ดงอกเกิดการสังเคราะห์ และสะสม HSPs ทั้งชนิด class I และ class II ในส่วนของ mRNA และโปรตีนในเมล็ดถั่ว pea (Vierling and Sun, 1989; DeRocher and Vierling, 1994) ข้าวสาลี (Helm and Aber-anthy, 1990) ทานตะวัน (Almonguera and Jordono, 1993; Coca *et al.,*1994) อัลฟาฟ่า (Howarth, 1990)

อย่างไรก็ตามการใช้ คลื่นความถี่วิทยุ กับผลิตผลทางการเกษตรต่าง ๆ ยังมีปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพผลิตผล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความชื้นของผลิตผล (moisture content) ,อุณหภูมิสูงสุดที่ไม่ทำให้ผลิตผลสูญเสียคุณภาพ (Lethal temperature), ความถี่ของคลื่น คลื่นความถี่วิทยุ ที่ใช้, กำลังไฟฟ้า (electric power ; Watt), ระยะเวลา (processing time) ,ปริมาณของตัวอย่าง (sample size) ดังนั้นการประยุกต์ใช้ คลื่นความถี่วิทยุ เพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ จึงยังจำเป็นจะต้องศึกษาวิจัย โดยละเอียดต่อไป

คุณสมบัติทางกายภาพของเมล็ดที่เกี่ยวเนื่องกับการใช้คลื่นความถี่วิทยุแก่เมล็ด

ผลของอุณหภูมิต่อเมล็ด (Thermo sensitivity)

ความสามารถในการงอกของเมล็ด บางครั้งอาจสูญเสียไปได้โดยง่าย ถ้าหากไม่ทำให้เมล็ดแห้งก่อนจะนำไปทำการเก็บรักษา โดยเมล็ดที่ได้จากการเก็บเกี่ยวใหม่ๆจะมีความชื้นสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเก็บเกี่ยวมาทั้งต้นแล้วนำไปผ่านเครื่องนวดเพื่อแยกเมล็ดออก เศษต่างๆได้แก่ ใบ ลำต้น และวัชพืชที่ติดมา สามารถผลิตความร้อนในปริมาณที่มากพอในเวลาไม่กี่ชั่วโมง ซึ่งความร้อนดังกล่าวจะมีผลในกาทำลายความมีชีวิตของเมล็ด ทำให้เมล็ดมีคุณภาพไม่ดี ดังนั้น การอบเมล็ดให้แห้งก่อนการเก็บรักษาจึงเป็นวิธีที่จะช่วยลดระดับการสูญเสียความงอกของเมล็ดได้เป็นอย่างดี

เมล็ดที่มีความชื้น ก่อนจะนำไปอบแห้งเพื่อลดความชื้น ก่อนการเก็บรักษา ควรจะนำไปบ่มที่อุณหภูมิต่ำก่อนเพื่อทำให้เมล็ดแห้งไปบางส่วน เนื่องจากเอนไซม์ต่างๆที่มีอยู่ภายในเมล็ดนั้นง่ายต่อการถูกทำลายมาก ถ้าหากนำเมล็ดไปผ่านความร้อนโดยทันที อาจทำให้เอนไซม์ต่างๆเสียสภาพได้ และความร้อนในระหว่างทำการอบเมล็ดอาจทำให้เมล็ดเสียความมีชีวิตได้

การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

โดยธรรมชาตินั้น ความร้อนจะมีการถ่ายเทระหว่างสสาร 2 ชนิด หรือ ระหว่างบริเวณ 2 บริเวณ ที่มีความแตกต่างกันของอุณหภูมิ ความร้อน จะมีการถ่ายเทจากจุดที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องผลต่างของอุณหภูมิ และความร้อนจะมีการถ่ายเทผ่านตัวกลางเสมอ ซึ่งเป็นได้

ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งการถ่ายเทความร้อนในวัสดุที่เป็นของแข็งนี้ จะเป็นแบบ การนำความร้อน (Conduction) ซึ่งจะเกิดขึ้นโดยที่อนุภาคของสาร เป็นตัวถ่ายเทความร้อนให้กับอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียงกัน หรือให้กับอนุภาคที่วิ่งเข้ามาชนกันโดยบังเอิญ โดยทั่วไปเราไม่สามารถมองเห็นการเคลื่อนไหวของอนุภาคเหล่านี้ด้วยตาเปล่า แต่เราก็สามารถพิสูจน์ได้ว่ามีการถ่ายเทด้วยกลไกแบบนี้ การถ่ายเทลักษณะนี้เกิดขึ้นได้ดีในสสารที่เป็นของแข็ง ทั้งนี้เพราะอนุภาคของแข็งอยู่ใกล้ชิดกันมากกว่า ของเหลว หรือก๊าซ

ในความเป็นจริง การถ่ายเทความร้อนจะเป็นลักษณะแบบไม่คงตัว (Unsteady state heat transfer) นั่นคือในการถ่ายเทความร้อนให้กับสสาร หรือถ่ายเทออกจากสสารใดๆก็ตาม อย่างน้อยในระยะเริ่มต้นของกระบวนการ ความร้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงแบบที่ละน้อยแปรผันกับเวลาที่ผ่านไป อุณหภูมิจะค่อยๆเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งผ่านไปได้ระยะเวลาหนึ่ง จึงจะได้อุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิที่เป็นเป้าหมาย (Target Temperature) ความสัมพันธ์ระหว่าอุณหภูมิ กับเวลานี้ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนของระบบ ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับวัสดุทางการเกษตร ซึ่งเป็นวัสดุที่มีการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ดี จะใช้เวลาที่นาน อุณหภูมิที่จุดต่างๆภายในระบบจะไม่สม่ำเสมอ อุณหภูมิจะมีความแตกต่างกันมาก ซึ่งกว่าที่ความร้อนภายในแต่ละจุดจะมีการถ่ายเทความร้อน จนกระทั่งทุกๆจุด มีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน และเท่ากันในที่สุด (Equilibrium Temperature)

ในการให้ คลื่นความถี่วิทยุ แก่เมล็ดจนเกิดความร้อนนั้น ความร้อนจะเกิดขึ้นตรงส่วนที่มีความชื้น และตรงจุดที่มีความชื้นสูง จะเกิดความร้อนได้มากกว่าจุดที่มีความชื้นต่ำ หลังจากนั้น ก็จะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากจุดที่มีความชื้นสูงกว่าไปยังส่วนที่มีความชื้นต่ำกว่าเพื่อรักษาสมดุล ในการเตรียมเมล็ดเพื่อทำการให้ คลื่นความถี่วิทยุ จึงต้องมีการปรับความชื้นให้มีความสม่ำเสมอเท่ากัน เพื่อที่ในขณะที่ให้ คลื่นความถี่วิทยุ เมล็ดจะมีการเพิ่มอุณหภูมิในอัตราที่สม่ำเสมอทั่วทั้งภาชนะบรรจุเมล็ด (Container) ถ้าหาก เมล็ดมีความชื้นที่ไม่เท่ากันแล้ว ในขณะที่ให้ คลื่นความถี่วิทยุ เมล็ดบางจุดที่มีความชื้นต่ำก็จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าความเป็นจริง การใช้ คลื่นความถี่วิทยุ ตามการทดลองอาจผิดพลาดได้ แต่ถ้าเกิดความชื้นเมล็ดบางจุดสูงก็จะมีอุณหภูมิสูงกว่าความเป็นจริงอาจทำให้เมล็ดบริเวณนั้นเกิดความเสียหายจากความร้อนได้

ความชื้น (Moisture content)

เป็นการอธิบายปริมาณความชื้น (น้ำ) ที่สามารถออกจากเมล็ดโดยการลดความชื้น แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเริ่มต้น ในการคิดคำนวณเพื่อใช้ในการให้ คลื่นความถี่วิทยุ จะใช้ความชื้นฐานแห้ง (dry basis) เพราะ ต้องการทราบถึงปริมาณน้ำทั้งหมดที่มีในเมล็ด เนื่องจาก น้ำคือสารที่จะเกิดความร้อนจากการให้ คลื่นความถี่วิทยุ แก่เมล็ดนั้นๆ ระดับความร้อนที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับ ปริมาณน้ำที่มีในเมล็ด

ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น (Moisture relationships)

เป็นที่ทราบกันมานานแล้วว่า ถ้าเมล็ดถูกเก็บไว้ในสภาพบรรยากาศคงที่ระยะเวลาหนึ่ง ปริมาณความชื้นจะเข้าสู่สมดุลภายในสภาพนั้นๆ ความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิจะเป็นปัจจัยที่สำคัญเนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ จะเห็นได้ว่าทั้งความชื้นของเมล็ด ความชื้นสัมพัทธ์ และความชื้นสมดุล ต่างก็มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน

ความชื้นสมดุลของเมล็ดจะแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของเมล็ดพันธุ์ และที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ องค์ประกอบทางเคมีภายในเมล็ดที่แตกต่างกันไปตามชนิดของเมล็ดพันธุ์ก็จะไปมีผลต่อการดูดซับน้ำ น้ำมันและไขมันจะไม่ดูดซับน้ำ โปรตีนและการดูดซับน้ำมากที่สุดต่อ 1 หน่วยน้ำหนัก ส่วนแป้งจะดูดซับน้ำน้อยกว่าโปรตีนแต่มากกว่าไขมัน ดังนั้น เมล็ดพืชที่มีปริมาณไขมันต่ำ เช่น ข้าวสาลี จะมีความชื้นสมดุลสูงกว่าเมล็ดพืชที่มีไขมันสูง เช่น กะล่ำปลี ที่มีความชื้นเดียวกัน คือ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60% ข้าวสาลี (ไขมัน 2%) จะมีความชื้นสมดุลเท่ากับ 12% สวนกะหล่ำปลี (ไขมัน 35%) จะมีความชื้นสมดุลเท่ากับ 7%

ขนาดของเมล็ด ความหนาบางของ Seed coat ก็จะส่งผลให้เกิดความแตกต่างของปริมาณสารประกอบทางเคมีภายในเมล็ด เมล็ดพืชชนิดเดียวกันแต่มาจากคนละแหล่งกัน จึงมีความชื้นสมดุลที่แตกต่างกันที่ความชื้นสัมพัทธ์เดียวกัน

ปริมาณความชื้นของเมล็ดที่จุดสมดุลที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆจะขึ้นอยู่กับการดูดซับความชื้น (Adsorption) และการคายความชื้น (Desorption) ของเมล็ด ความแตกต่างของปริมาณความชื้นระหว่างการดูดซับความชื้น และการคายความชื้นนี้ เรียกว่า hysteresis

ความชื้นสมดุลของเมล็ดชนิดต่างๆอาจจะมีความแตกต่างกันประมาณ ± 2 % ขึ้นอยู่กับความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมี hysteresis และอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาเมล็ด รวมทั้งความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก็จะมีผลต่อปริมาณความชื้นของเมล็ด

ในการเตรียมเมล็ดก่อนการให้ คลื่นความถี่วิทยุ จะต้องมีการปรับสภาพเมล็ดต่างๆซึ่งรวมทั้งความชื้นด้วย โดยในการหาความชื้นที่ได้จากการคำนวณนั้น จะเป็นความชื้นรวมทั้งหมด แต่ ในแต่ละเมล็ด ความชื้นอาจจะยังไม่มีความสม่ำเสมอ เราจึงต้องเก็บเมล็ดไว้ในภาชนะปิด มีช่องว่างน้อยที่สุด และเก็บไว้ในที่เย็น เพื่อให้ความชื้นในเมล็ดทั้งหมดมีการแลกเปลี่ยน ถ่ายเทความชื้นกันภายในเมล็ดทั้งชุด โดยใช้เวลาระยะหนึ่ง เมื่อเมล็ดมีความสมดุลความชื้นแล้ว เมล็ดทุกเมล็ดจะมีความชื้นเท่ากันทั้งหมด เมื่อนำเมล็ดที่มีความชื้นสม่ำเสมอไปทำการให้ RF จะทำให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นระหว่างการทดลองเพิ่มขึ้นเท่าๆกันสม่ำเสมอทุกเมล็ด

จุดสมดุลความชื้น (Hygroscopic equilibrium)

คือการดูดน้ำและคายความชื้นระหว่าเมล็ดกับบรรยากาศรอบๆจนถึงจุดสมดุล ณ อุณหภูมิหนึ่ง เมล็ดจะมีความชื้นคงที่

หลังการให้ RF กับเมล็ด ภายในเมล็ดจะยังคงมีความร้อนสูงอยู่ระยะหนึ่ง และน้ำในเมล็ดจะมีการเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบอันเนื่องจากแรงดันไอของน้ำในเมล็ดมีสูง เมล็ดจะมีการคลายพลังงานพร้อมกับรักษาสภาพสมดุลความชื้นจนกระทั่งถึงจุดๆหนึ่งที่เมล็ดมีอุณหภูมิลดต่ำลงจนไม่มีการคายพลังงานอีก แรงดันไอภายในและภายนอกเมล็ดจะเท่ากัน ทำให้ปริมาณน้ำในเมล็ดคงที่หลังจากที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความชื้นแล้ว เราจึงจะสามารถนำเมล็ดไปตรวจผลการทดลองได้

รูปร่างของเมล็ด

ปริมาตร และความหนาแน่น (Volume and density)

ในภาชนะที่เก็บรักษาเมล็ดจะมีทั้งส่วนของเมล็ดและอากาศรวมอยู่ ความหนาแน่นของเมล็ดจะแสดงออกมาเป็นกิโลกรัมต่อเฮกโตลิตร (kg/hl) ปริมาตรของเมล็ดก็จะเพิ่มขึ้นประมาณ 1.4% ต่อความชื้นของเมล็ดที่เพิ่มขึ้น 1% อันเนื่องจากการอวบน้ำ

ปริมาตร และความหนาแน่น เป็นปัจจัยสำคัญในการถ่ายเทพลังงาน โดยเกี่ยวข้องกับจุดสัมผัสระหว่างกันของเมล็ดในการให้ RF เพราะ พลังงานที่ให้จะไหลไปตามการสัมผัสตั้งแต่ผิว aluminum plate ผ่าน เมล็ดข้าวโพด ไปจนถึง aluminum plate อีกด้านหนึ่ง ซึ่งหากเมล็ดมีการสัมผัสกันมาก การไหลของพลังงานดี การเกิดความร้อนก็จะเป็นไปได้ดีเช่นกัน ความร้อนที่เกิดขึ้นก็จะเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่วทุกเมล็ด แต่ถ้าเมล็ดมีการสัมผัสกันน้อย การไหลของพลังงานเป็นไปได้อย่างไม่สะดวก พลังงานจะมีทางไหลผ่านน้อยด้วยเช่นกัน หากให้ RF ไปในเมล็ด พลังงานจะไหลรวมไปยังจุดสัมผัสที่น้อยอาจทำให้เกิดการไหม้ตามจุดสัมผัสได้ หรือไม่ก็พลังงานไม่สามารถไหลผ่านจนไม่เกิดความร้อนขึ้นมาได้

ปริมาณช่องว่างระหว่างเมล็ด (Porosity)

เกิดจากอิทธิพลของความชื้นและลักษณะการบรรจุ สำคัญต่อการให้ RF โดยเฉพาะ หลังการให้ RF ช่องว่างระหว่างเมล็ดจะเป็นที่อยู่ของไอน้ำที่ออกมาจากเมล็ด ซึ่งเมื่อเมล็ดมีการคายพลังงานจนหมดจะมีการกลับเข้าสู่จุดสมดุลความชื้น หากช่องว่างในเมล็ดเล็กเกินไป ความชื้นที่ออกมาจากเมล็ดจะไม่มีที่พอที่จะอยู่รอบๆเมล็ดได้ เมื่อเมล็ดเริ่มเย็นตัวลง จะมีการควบแน่นเข้าด้วยกันจนกลายเป็นหยดน้ำรอบๆเมล็ด ทำให้เมล็ดมีความชื้นสูงบริเวณผิวจากการดูดเอาหยดน้ำเข้าไปได้ แต่ถ้าหากช่องว่างในเมล็ดใหญ่เกินไป เมื่อความชื้นในเมล็ดออกมาแล้วจะแทรกเข้าไปในอากาศที่มีอยู่มากพอรอบๆเมล็ด เมื่อเมล็ดเย็นลง จะไม่สามารถดูดกลับความชื้นได้ ทำให้เมล็ดสูญเสียความชื้นไป

คลื่นความถี่วิทยุ Radio frequency (RF) เป็นการประยุกต์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระดับความถี่คลื่นวิทยุเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนภายในเมล็ด โดยนหลักการการสั่นสะเทือนของโมเลกุลน้ำที่มีอยู่ภายในเมล็ด ซึ่งวัสดุใด ๆ ที่มีองค์ประกอบของน้ำจะสามารถชักนำให้เกิดพลังงานความร้อนเกิดขึ้นภายในตัวเอง จากหลักการดังกล่าวโดยปกติเชื้อราจะมีองค์ประกอบของ

น้ำภายในมากกว่าเมล็ดพืช ส่งผลให้คลื่น คลื่นความถี่วิทยุ สามารถชักนำให้เกิดความร้อนภายในเชื้อราขึ้นมากกว่า และรวดเร็วกว่าเมล็ด ทำให้เกิดความเสียหาย และถูกกำจัดด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นโดยไม่ทำให้เมล็ดพืชได้รับความเสียหาย (ณัฐศักดิ์, 2543)

การใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุจึงมีการนำมาใช้ประโยชน์เพื่อการกำจัดเชื้อราที่ติดมากับเมล็ดงาขี้ม้อน ซึ่งคลื่นความถี่วิทยุเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นมาก มีความสามารถในการทะลุทะลวงสามารถผ่านเข้าไปไปในชั้นวัสดุได้ลึก (ประมาณ 11 เมตร) และการถ่ายทอดพลังงานในวัสดุเป็นไปได้มาก และสม่ำเสมอ ดังนั้น การทำให้เกิดความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุจึงทำให้วัสดุทั้งหมดที่ได้รับพลังงาน โดยสามารถเพิ่มอุณหภูมิได้อย่างทั่วถึง และสม่ำเสมอในทุก ๆ จุดของตัวอย่างเมล็ดงาขี้ม้อน โดยตัวอย่างที่ได้รับพลังงานมีความร้อนที่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อชักนำให้เกิดความร้อนจนสามารถกำจัดเชื้อราที่ติดมากับเมล็ดงาขี้ม้อนได้ ซึ่งจะเป็นวิธีการให้ความร้อนที่ใช้ระยะเวลาที่สั้นมาก จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการเพียง 1-2 นาทีเท่านั้น ระยะเวลาที่สั้น จะเป็นการลดความเสียหายต่อคุณภาพของเมล็ดงาขี้ม้อน และการลดลงของต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้จำเนิดพลังงาน หรือแม้กระทั้งการลดการใช้พลังงานในการอบลดความชื้น – ควบคุมกำจัดศัตรูเมล็ดพันธุ์ หรือวัตถุดิบทางการเกษตร

จากงานวิจัยต่อเนื่องถึงความเป็นไปได้เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อเป็นทางเลือกในการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตทางการเกษตร เช่น เชื้อรา *Trichoconis padwickii* ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 (Janhang *et al.,* 2005) เชื้อรา *Fusarium semitectum* ในเมล็ดข้าวโพด (Vassanacharoen *et. al.,* 2006) เชื้อรา *Aspergillus flavus, Alternaria* sp., *Penicillium* sp. และ *Rhizopus* sp. ในเมล็ดข้าวบาร์เลย์ (Akaranuchat *et a*l., 2007) รายงานดังกล่าวทำให้ทราบถึงระดับพลังงานที่ใช้ อุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมในการใช้คลื่นความถี่วิทยุ อีกทั้งอิทธิพลของคลื่นความถี่ที่มีต่อคุณภาพเบื้องต้นทางกายภาพ คุณภาพทางเคมี และคุณค่าทางโภชนาการของข้าวสาร แต่จะพบว่าผลงานวิจัยดังกล่าวเป็นไปได้ในห้องปฏิบัติการ แต่การทดลองยังขาดงานวิจัยทางด้านการนำไปประยุกต์ใช้จริงกับผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่ในท้องตลาดซึ่งมีความละเอียดอ่อนความสม่ำเสมอของผลผลิตที่ได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำงานวิจัยต่อเนื่องให้ได้คำตอบถึงการเปลี่ยนแปลงของวัตถุดิบ (dynamic changes) ภายใต้สภาพแวดล้อมของการเก็บรักษาในการจัดการผลผลิตประเภทต่างๆ ตลอดจนถึงอายุของการเก็บรักษา และหาสหสัมพันธ์กับคุณภาพของผลผลิต เพื่อเป็นแนวทางการนำไปใช้ประโยชน์ในระดับการจัดการผลิตเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

3.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาอิทธิพลของความชื้นของเมล็ด และระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุ ต่อการควบคุมเชื้อรา *Aspergillus flavus* ในเมล็ดงาขี้ม้อน

2. ศึกษาผลของคลื่นความถี่วิทยุต่อความมีชีวิต และความแข็งแรงของเมล็ด/เมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน ที่ระดับอุณหภูมิ และระยะเวลาการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน

3. ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีภายในเมล็ดงาขี้ม้อนที่ผ่านการให้คลื่นความถี่วิทยุ ที่ระดับอุณหภูมิ และระยะเวลาการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน

4. ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุ และการอบลมร้อนต่อการควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อรา และสารพิษอะฟราท๊อกซินในเมล็ดงาขี้ม้อน

5. ศึกษาเปรียบเทียบการใช้พลังงานจากการใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุ และการอบลมร้อนในการควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อรา และสารพิษอะฟราท๊อกซินในเมล็ดงาขี้ม้อน

หมายเหตุ: วัตถุประสงค์ข้อ 4 และ 5 เพิ่มเติมจากแบบข้อเสนอแผนการวิจัย เนื่องจากเพื่อความสมบูรณ์ และบูรณาการของงานวิจัย ให้สามารถเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพ และต้นทุนระหว่างการใช้คลื่นความถี่วิทยุ และการอบลมร้อนในการป้องกันการปนเปื้อนของเชื้อรา และสารพิษอะฟราท๊อกซิน ทั้งนี้เพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจเลือกใช้วิธีการจัดการ

3.5 ขอบเขตของการวิจัย

นำความรู้เดิมที่ได้จากเทคนิคการกำจัดเชื้อราที่มีอยู่มาประยุกต์ใช้ในการกำจัดเชื้อราที่ปนเปื้อนมากับเมล็ด/เมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน โดยไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพผลผลิต

3.6 วิธีการดำเนินการวิจัย สถานที่ทำการทดลอง และการบันทึกผลการทดลอง

3.6.1 วิธีดำเนินการวิจัยการศึกษาการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency – RF heat treatment) ต่อคุณภาพเมล็ดงาขี้ม้อน และการควบคุมเชื้อรา และการสร้าง - สะสมสารอะฟราท๊อกซิน

1. เมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน *Perilla frutescens* (L.) *Britton* เก็บรักษาที่ห้องเย็นภาควิชาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

2. เชื้อรา *Aspergillus flavus* ทำการเพาะเลี้ยงเชื้อที่ห้องปฏิบัติการ Micrology สถานวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

3. เครื่อง Radio Frequency สร้าง และปรับปรุงพัฒนาโดย Institute of Agriculture Engineering, University of Göttingen ห้อง Radio Frequency สถานวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

การศึกษาการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุต่อคุณภาพเมล็ดพันธุ์ และการควบคุมเชื้อรา *Aspergillus flavus* และการสร้างสารอฟราทอกซินที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน ดำเนินการโดยนำเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนที่มีการปลูกถ่ายเชื้อรา ปรับความชื้น และให้คลื่นความถี่วิทยุ (Radio

Frequency) โดยใช้กำลังเครื่องที่ ความถี่ 27.12 MH_Z มีการวางแผนการทดลองแบบ 3 x 5 x 5 Factorial in CRD จำนวน 5 ซ้ำ โดยมีกรรมวิธีในการทดลอง ดังนี้

ปัจจัยที่ 1 ระดับความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อน มี 3 ระดับ คือ 10, 14 และ 18 %-dry basis

ปัจจัยที่ 2 ระดับอุณหภูมิที่ชักนำจากการใช้คลื่นความถี่วิทยุ โดยมี 5 ระดับอุณหภูมิ คือ 50,60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส และ

ปัจจัยที่ 3 ระยะเวลาในการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อน โดยมีเวลาในการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุ 5 ระยะเวลา ได้แก่ 1, 3, 5, 7 และ 10 นาที

3.6.2 วิธีดำเนินการวิจัยการศึกษาการการใช้การอบลมร้อน (Convectional drying /heat treatment) ต่อการควบคุมเชื้อรา และการสร้าง - สะสมสารอะฟราท๊อกซิน

การศึกษาการประยุกต์ใช้การอบลมร้อน (Convectional drying/heat treatment) ต่อการควบคุมเชื้อรา *Aspergillus flavus* และการสร้างสารอฟราทอกซินที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน ดำเนินการโดยมีการวางแผนการทดลองแบบ 3 x 5 Factorial in CRD จำนวน 5 ซ้ำ โดยมีกรรมวิธีในการทดลอง ดังนี้

ปัจจัยที่ 1 ระดับอุณหภูมิที่ชักนำจากการใช้คลื่นความถี่วิทยุ โดยมี 5 ระดับอุณหภูมิ คือ 50,60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส และ

ปัจจัยที่ 2 ระยะเวลาในการอบลมร้อน มี 3 ระดับ คือ 3, 10 และ 30 นาที

3.6.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุและการอบลมร้อนต่อการควบคุมเชื้อรา การสร้าง – สะสมสารอะฟราท๊อกซิน และการใช้พลังงานไฟฟ้า

การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุและการอบลมร้อนต่อการควบคุมเชื้อรา *Aspergillus flavus* การสร้าง – สะสมสารอะฟราท๊อกซิน และการใช้พลังงานไฟฟ้า ดำเนินการโดยมีการวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) จำนวน 5 ซ้ำ โดยทำการคัดเลือกกรรมวิธีที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อรา *Aspergillus flavus* และการสร้าง – สะสมสารพิษอะฟราท๊อกซินในเมล็ดงาขี้ม้อนจากกรรมวิธีการใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุ และการอบลมร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อรา และการสร้างสารพิษอะฟราท๊อกซิน รวมถึงการบริโภคพลังงานที่ใช้ในการปฏิบัติการ

การบันทึกผลการทดลอง

1.องค์ประกอบคุณภาพทางด้านเมล็ดพันธุ์ (ISTA, 2006)

1.1 Moisture content (ทดสอบความชื้นเมล็ด)

การวัดความชื้นของเมล็ดพันธุ์ ใส่เมล็ดงาขี้ม้อนประมาณ 3-5 กรัม ชั่งน้ำหนักแล้วอบด้วยความร้อน (Hot air – Oven method) ที่อุณหภูมิ 105˚C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง นำเมล็ดชั่งน้ำหนักอีกครั้งแล้วทำการคำนวณหาความชื้นฐานเปียกในเมล็ด (ISTA. 1999)

$$\text{ความชื้นฐานเปียก \% MC. wet basis} = \frac{(\text{น้ำหนักเมล็ดก่อนอบ} - \text{น้ำหนักเมล็ดหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักเมล็ด}}$$

1.2 Water activity (การวัดอัตราส่วนของความดันไอของน้ำ)

1.3 Standard Germination (ทดสอบความงอก)

1.4 Shoot and Root (ความยาวยอดและราก)

1.5 Germination index (ดัชนีการงอก)

1.6 Seeding dry weight (น้ำหนักเมล็ดแห้ง)

1.7 Seeding growth rate (อัตราการเจริญเติบโต)

1.8 Electrical conductivity test (การนำไฟฟ้า)

1.9 Field emergence (ความสามารถของการงอกในแปลง

2.องค์ประกอบคุณทางชีวะเคมี

2.1 ปริมาณโปรตีนทั้งหมดในเมล็ด (Total protein content; AOAC, 2000)

2.2 ปริมาณไขมันทั้งหมดในเมล็ด (Total lipid content; Lam and Proctor, 2000)

2.3 ค่ากิจกรรมกาต้านอนุมูลอิสระทั้งหมดภายในเมล็f (Total antioxidant activity; Kim *et al*., 2002)

2.4 ปริมาณ และองค์ประกอบของกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid composition; GC-MS method – Xiu *et al*., 2005) ได้แก่ α – Linolenic acid (18:3, Ω – 3), Linoleic acid (18:2, Ω – 6), Oleic aicd (18:1, Ω – 9), Steric acid (18:0) และ Palmatic acid (16:0)

2.5 กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ Superoxide dismutase (SOD; Oberley and Spitz, 1985)

2.6 กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ Ascorbate peroxidase (APX; Nakano and Asada, 1981)

2.7 กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ Lipoxygenase (LOX; Mechehdani, 1990)

2.8 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด (Total carbohydrate; Merrill and Watt, 1973)

2.9 ปริมาณน้ำตาล D-glucose, Sucrose, Lactose, และ Maltose (Luff – Schoorl method; Alexander *et al*., 1985)

3. การวิเคราะห์การปนเปื้อนของสารอะฟราท๊อกซินในเมล็ดงาขี้ม้อน (Afaltoxin contamination; ELISA test)

4. ปริมาณพลังงานไฟฟ้า / ต้นทุนไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมสารอะฟราท๊อกซินในเมล็ดงาขี้ม้อน (Electricity power input / cost)

5. ความสามารถในการควบคุมเชื้อราสาเหตุโรค / เชื้อราระหว่างการเก็บรักษาเมล็ดงาขี้ม้อน

ทำการทดสอบหาการปนเปื้อนของเชื้อสาเหตุโรค / เชื้อราระห่างการเก็บรักษาที่ปนเปื้อนมากับเมล็ดพันธุ์ / ถูกควบคุมโดยการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุ โดยวิธีเพาะเลี้ยงบนกระดาษกรองชื้น (Blotter method) โดยทำการสุ่มเมล็ดพันธุ์มาจำนวน 400 เมล็ด โดยทำการวางตัวอย่างเมล็ดงาขี้ม้อนที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างดังกล่าวบนจานเลี้ยงเชื้อที่มีกระดาษกรองชื้น จำนวนจานละ 10 เมล็ด หลังจากนั้นนำไปเลี้ยงเชื้อภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 25^{o}C ในตู้ Incubator นาน 7 วัน บันทึกภาพ ตรวจวัดผลการทดลอง และใช้วิธี Czapex agar method ในการตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อรา *Aspergillus flavus*

$$\textbf{\% การปนเปื้อนเชื้อ} = \frac{\textbf{จำนวนเมล็ดที่เกิดเชื้อรา}}{\textbf{จำนวนเมล็ดทั้งหมด}} \times \textbf{100}$$

โดยทำการตรวจผลการเจริญของเชื้อราที่ 7 วัน และ 14 วัน แสดงผลในรูปของ fungal infection percentage

3.6.2 สถานที่ทำการทดลอง

ได้ดำเนินการศึกษาการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุต่อคุณภาพเมล็ดพันธุ์ และการควบคุมเชื้อรา *Aspergillus flavus* ณ สถาบันวิจัยวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดงาขี้ม้อน และการสร้างสารอฟราทอกซินที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน ณ ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีการเกษตร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, และศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

3.7 ผลการดำเนินการ

3.7.1 ศึกษาการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency – RF heat treatment) ต่อคุณภาพเมล็ดงาขี้ม้อน และการควบคุมเชื้อรา *Aspergillus flavus* และการสร้าง - สะสมสารอะฟราท๊อกซิน

3.7.1.1 ศึกษาการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency – RF heat treatment) การควบคุมเชื้อราบน/ในเมล็ดงาขี้ม้อน

ในเมล็ดชุดควบคุมพบการเจริญของเชื้อรากลุ่ม *Fusarium moniliforme* มากที่สุด ตามด้วย *Aspergillus niger, Pennicilium sp,.* และ *A.flavus* ซึ่งอยู่ในกลุ่ม seed borne fungi และstorage fungi ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในเมล็ดงาขี้ม้อนตามธรรมชาติ มีการปนเปื้อนของเชื้อราค่อนข้างมาก *Fusarium moniliforme* ซึ่งเป็น seed borne fungi จะเห็นได้ว่าเมล็ดงาขี้ม้อนมีการปนเปื้อนเชื้อราจากการคัดเลือกเมล็ดพันธุ์ที่ไม่ดีพอทำให้มีการแพร่ระบาดของเชื้อราไปเรื่อยๆ ในขณะที่ storage fungi ของงาขี้ม้อนอาจจะดูมีการปนเปื้อนที่ไม่สูงมาก แต่ก็มีการปนเปื้อนของ *A. niger และ A.flavus* ซึ่งเป็นเชื้อราที่สามารถสร้างสารพิษได้ทั้งสิ้น หากเก็บรักษาเมล็ดงาขี้ม้อนไว้ระยะหนึ่ง ก็จะมีการเพิ่มปริมาณของเชื้อราจนสร้างสารพิษในปริมาณมากได้

จากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of varience; ANOVA) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทุยในการควบคุมเชื้อราที่ปนเปื้อนในเมล็ดงาขี้ม้อน พบว่า ทั้งปัจจัยความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อน อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้คลื่นความถี่วิทยุเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้คลื่นความถี่วิทยุสามารถทำการควบคุมการเจริญของเชื้อราทั้ง 4 กลุ่มได้ โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาถึงปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิ – ระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุ และอุณหภูมิ – ความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปัจจัยร่วมดังกล่าวเป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบบคุมการเจริญเติบโต – การปนเปื้อนของเชื้อราบนเมล็ดงาขี้ม้อน (ตารางที่ 33)

ตารางที่ 34 แสดงการวิเคราะห์ปัจจัยทั้งความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อน ระดับอุณหภูมิ และระยะเวลาในการให้ความร้อนโดยคลื่นความถี่วิทยุ พบว่า เมื่อระดับความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อนสูงขึ้นมีผลทำให้คลื่นความถี่วิทยุมีประสิทธิภาพในการควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อราทั้ง 4 กลุ่มสูงขึ้น โดยเชื้อรา *A. flavus* และ *A. niger* จะสามารถควบคุมได้ดีที่สุดเมื่อความชื้อของเมล็ดงาขี้ม้อนอยู่ที่ระดับ 14%-wb ในขณะที่เชื้อ *Fusarium moniliforme* และ *Penicillium* sp. จะถูกยับยั้งการเจริญเติบโต - ควบคุมได้ดีเมื่อเมล็ดงาขี้ม้อนมีระดับความชื้นของเมล็ด 18 %-wb

ตารางที่ 33 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of varience; ANOVA) อิทธิพลของระดับอุณหภูม ระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุ และระดับความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อนต่อการควบคุมเชื้อรา 4 สายพันธุ์ ได้แก่ *Aspergillus flavus, Aspergillus niger, Fusarium* sp., และ *Penicillium* sp.

Source of variation	parameters			
	A. flavus	***A. niger***	***Fusarium moniliform.***	***Penicillium* sp.**
Temp	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Time	<0.001	ns	<0.001	0.022
MC	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Temp x Time	<0.001	ns	<0.001	<0.001
Temp x MC	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Time x MC	ns	ns	ns	ns
Temp x Time x MC	ns	ns	<0.001	<0.001
cv.	14.96	6.80	23.84	28.55

หมายเหตุ: ตัวเลขที่แสดงเป็นค่าการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95%

Ns: no significant different

เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยของระดับอุณหภูมิในการใช้คลื่นความถี่วิทยุในการควบคุมเชื้อราต่าง ๆ พบว่า เชื้อราแต่ละสายพันธุ์จะตอบสนองต่อระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยเชื้อ *A. flavus* จะถูกควบคุมโดยสมบูรณ์เมื่อใช้คลื่นความถี่วิทยุที่ระดับอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เชื้อ *A. niger* จะถูกควบคุมได้ดีที่สุดเมื่อใช้คลื่นความถี่วิทยุที่ระดับอุณหภูมิตั้งแต่ 60 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป ในขณะที่เชื้อ *Fusarium moniliforme* และ *Penicillium* sp. จะสามารถควบคุมได้ดีที่สุดเมื่อมีการใช้คลื่นความถี่วิทยุที่ระดับอุณหภูมิตั้งแต่ 80 องศาเซลเซียส เป็นต้นไป

จากการตอบสนองของเชื้อราต่อระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกันนั้น มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับการตอบสนองต่อระดับช่วงระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุเช่นเดียวกัน กล่าวคือ เชื้อราแต่ละสายพันธุ์จะสามารถควบคุมได้ดีต่างกันขึ้นกับระยะเวลาในการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุ โดยเชื้อ *A. niger* เป็นเชื้อราที่ตอบสนองต่อการใช้คลื่นความถี่วิทยุเร็วที่สุด โดยจะถูกควบคุมตั้งแต่เมื่อมีการใช้คลื่นความถี่วิทยุตั้งแต่ 1 นาที เชื้อ *Fusarium moniliforme*

และ *Penicillium* sp. จะถูกควบคุมได้ดีที่สุดเมื่อมีการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุตั้งแต่ 5 นาทีเป็นต้นไป ในขณะที่เชื้อ *A. flavus* เป็นเชื้อราที่มีการตอบสนองต่อการใช้คลื่นความถี่วิทยุต่ำสุด โดยจากการศึกษา พบว่า เชื้อ *A. flavus* จะถูกควบคุมได้ดีที่สุดเมื่อมีการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุเป็นเวลา 10 นาที

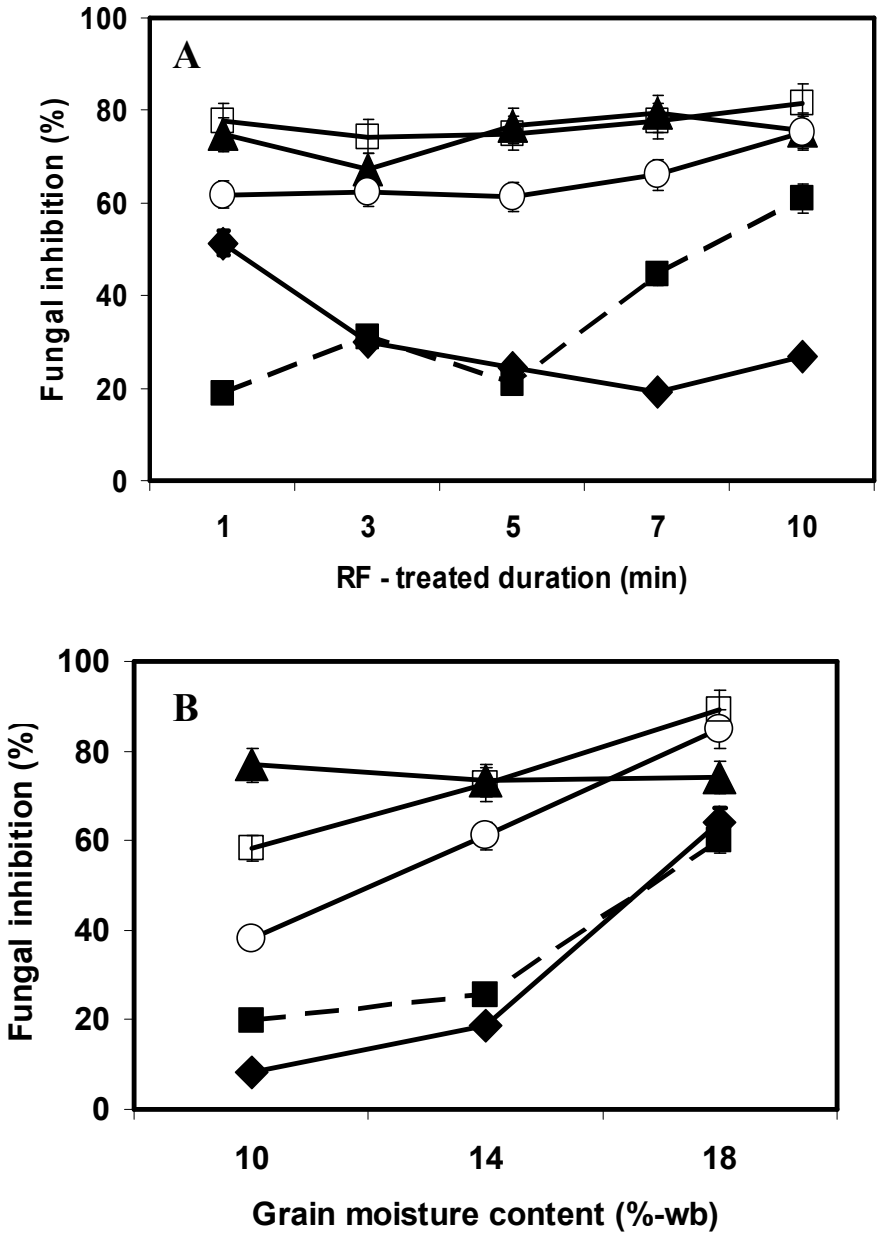
ซึ่งจากการศึกษาจะพบการตอบสนองของเชื้อราแต่ละสายพันธุ์ต่อการใช้คลื่นความถี่วิทยุที่แตกต่างกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเชื้อราแต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างในลักษณะโครงสร้างของเซลล์ ปริมาณความชื้นภายในเซลล์ และองค์ประกอบทางชีวเคมีต่าง ๆ ภายในเซลล์ / กลุ่มเชื้อรา ซึ่งส่งผลให้เชื้อราแต่ละชนิดมีความไวต่อการตอบสนองต่อคลื่นความถี่วิทยุที่แตกต่างกัน ซึ่งคุณสมบัติในการตอบสนองต่อคลื่นความถี่วิทยุ หรือ Dielectric properties เป็นคุณสมบัติที่จำเพาะขึ้นกับชนิดของวัตถุ ดังนั้น หากทำการศึกษาเพิ่มเติมในด้านคุณสมบัติการตอบสนองของวัตถุทดลอง หรือเชื้อรา / เมล็ดพันธุ์ของพืชแต่ละชนิดต่อคลื่นความถี่วิทยุจะทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้คลื่นความถี่วิทยุได้อย่างสมบูรณ์ และสามารถเลือกทำลายเฉพาะศัตรูพืชโดยไม่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของวัตถุทดลอง ซึ่งเป็นประเด็นที่น่าสนใจในการศึกษาเร่งด่วนต่อไป

จากผลการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างระดับอุณหภูมิจากคลื่นความถี่วิทยุที่ระดับต่าง ๆ (RF – treated temperatures) ต่อระยะเวลาในการใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุ (RF – treated duration; min) และระดับอุณหภูมิจากคลื่นความถี่วิทยุที่ระดับต่าง ๆ (RF – treated temperatures) ต่อความชื้นภายในเมล็ดงาขี้ม้อน (grain moisture content; %-wb) พบว่า การใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อกำเนิดความร้อนที่ระดับอุณหภูมิตั้งแต่ 70 – 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาตั้งแต่ 5 นาทีเป็นต้นไปสามารถควบคุมเชื้อรา *Fusarium moniliforme* ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด (รูปที่ 61A) ในขณะที่ประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อ *Fusarium moniliforme* จะสูงขึ้น เมื่อเมล็ดงาขี้ม้อนมีความชื้นภายในเมล็ดสูงขึ้น โดยการใช้คลื่นความถี่วิทยุในการกำเนิดความร้อนที่ระดับอุณหภูมิตั้งแต่ 80 – 90 องศาเซลเซียส จะมีประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อ *Fusarium moniliforme* ได้ดีที่สุดเมื่อเมล็ดงาขี้ม้อนมีความชื้นภายใน 18 %-wb (รูปที่ 61B)

ตารางที่ 34 อิทธิพลของความชื้นเมล็ดงาขี้ม้อน ระดับอุณหภูมิ (RF – treated temperatures) และระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุ (RF – treated duration) ในการควบคุมเชื้อราชนิดต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนในตัวอย่างเมล็ดงาขี้ม้อน

Treatment	Fungal inhibition (%)			
	A. flavus	***A. niger***	***Fusarium moniliform***	***Penicillium* sp.**
Grain moisture content (%-wb)				
10	75.10±31.85c	92.31±1.10b	40.12±28.74c	12.4223.74±c
14	93.33±15.19a	99.40±15.51a	50.30±32.53b	26.00±39.73b
18	87.20±20.17b	99.60±1.44a	74.50±20.35a	47.33±42.43a
RF treated temperature (oC)				
50	68.44±27.50d	89.58±b	30.38±33.70c	4.44±39.15c
60	78.67±28.09c	98.24±a	35.19±29.90c	28.90±14.39b
70	90.50±15.14b	98.94±a	61.37±9.85b	17.40±32.34b
80	88.44±26.45b	99.29±a	73.29±25.70a	43.33±41.08a
90	100±0.00a	99.45±a	74.55±18.26a	48.90±42.95a
RF treated duration (min)				
1	61.61±35.37c	96.52±13.49a	47.70±32.24b	18.33±41.50b
3	87.11±17.66b	97.18±9.91a	53.01±29.48ab	27.80±42.85ab
5	88.44±20.67b	97.64±7.05a	56.70±31.71a	32.22±32.46a
7	92.89±14.24ab	97.04±6.08a	59.39±31.10a	32.22±37.55a
10	96.00±10.95a	97.13±10.03a	58.02±30.81a	32.36±39.25a

หมายเหตุ: ค่าที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



รูปที่ 61: อิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างระดับอุณหภูมิ – ระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุ (A) และระดับอุณหภูมิ – ระดับความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อน (B) ต่อการควบคุมเชื้อรา *Fusarium moniliforme* —◆—: 50 องศาเซลเซียส, —■ - -■-: 60 องศาเซลเซียส, —▲—: 70 องศาเซลเซียส, —○—: 80 องศาเซลเซียส, และ —□—: 90 องศาเซลเซียส

จากการตรวจสอบประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อ *Penicillium* sp. ที่ปนเปื้อนในเมล็ดงาขี้ม้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ พบว่า การใช้คลื่นความถี่วิทยุในการกำเนิดความร้อนที่ระดับต่าง ๆ จะมีประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อ *Penicillium* sp. ได้สูงขึ้น เมื่อระดับความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อนสูง

ขึ้น โดยที่สภาวะอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสจะสามารถควบคุมเชื้อ *Penicillium* sp. ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อนประมาณ 18%-wb. (รูปที่ 62B) ในขณะเดียวกันพบว่า มีแนวโน้มของการปนเปื้อนของเชื้อรา *Penicillium* sp. ลดลงตามระดับอุณหภูมิจากคลื่นความถี่วิทยุที่สูงขึ้น (treated temperature) และ ระยะเวลาในการให้ความร้อนที่นานขึ้น (treated duration) โดยจะมีประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อ *Penicillium* sp. สูงสุดเมื่อใช้คลื่นความถี่วิทยุที่ระดับอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 นาทีเป็นต้นไป หรือ ที่ระดับอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที (รูปที่ 62A)

ในขณะที่ประสิทธิภาพของคลื่นความถี่วิทยุในการควบคุมเชื้อ *A. flavus* พบว่า การใช้คลื่นความถี่วิทยุในการกำเนิดพลังงานความร้อนที่ 90 องศาเซลเซียสสามารถควบคุมเชื้อ *A. flavus* ได้อย่างมีประสิทธิภาพตั้งแต่มีการใช้คลื่นความถี่วิทยุกำเนิดพลังงานความร้อน 1 นาที ในขณะที่เมื่อใช้คลื่นความถี่วิทยุกำเนิดความร้อนที่ 80 องศาเซลเซียส จะสามารถควบคุมเชื้อ *A. flavus* ได้อย่างสมบูรณ์เมื่อใช้เป็นเวลาตั้งแต่ 7 นาทีเป็นต้นไป (รูปที่ 63A) ในขณะที่ระดับอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสสามารถควบคุมเชื้อ *A. flavus* ได้อย่างสมบูรณ์ทั้งในตัวอย่างเมล็ดที่มีความชื้นในทุกระดับ ในขณะที่เมื่อระดับอุณหภูมิลดลง จะสามารถควบคุมเชื้อ *A. flavus* ได้ก็ต่อเมื่อเมล็ดงาขี้ม้อนมีความชื้นภายในเมล็ด 18 %-wb (รูปที่ 63B)

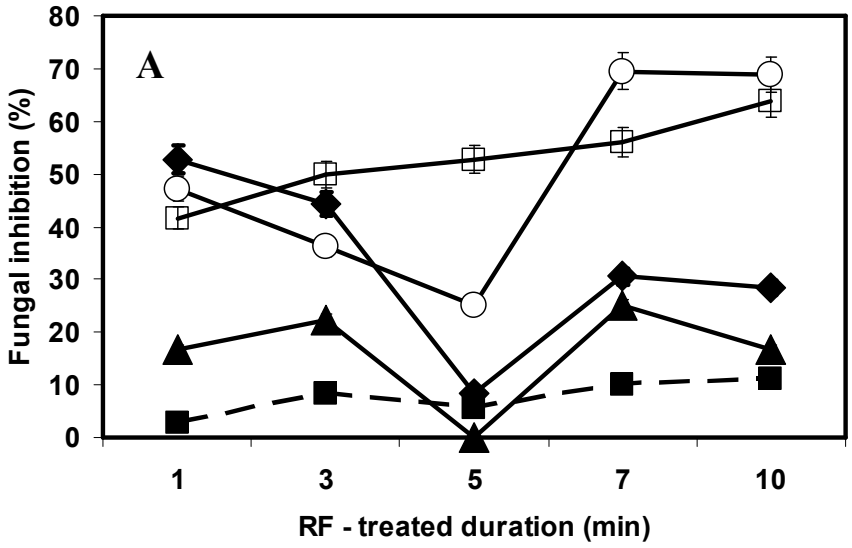
ในกรณีการควบคุมเชื้อ *A. niger* พบว่า การใช้คลื่นความถี่วิทยุในการกำเนิดพลังงานความร้อนที่ระดับตั้งแต่ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป มีประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อ *A. niger* ได้อย่างมีประสิทธิภาพในทุก ๆ ช่วงเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุ (รูปที่ 64A) แต่ทั้งนี้เมื่อมีการใช้คลื่นความถี่วิทยุในการกำเนิดพลังงานความร้อนที่ระดับ 50 องศาเซลเซียสจะมีประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อ *A. niger* ได้ก็ต่อเมื่อเมล็ดงาขี้ม้อนมีความชื้นภายในเมล็ดตั้งแต่ 14 %-wb. เป็นต้นไป (รูปที่ 64B)

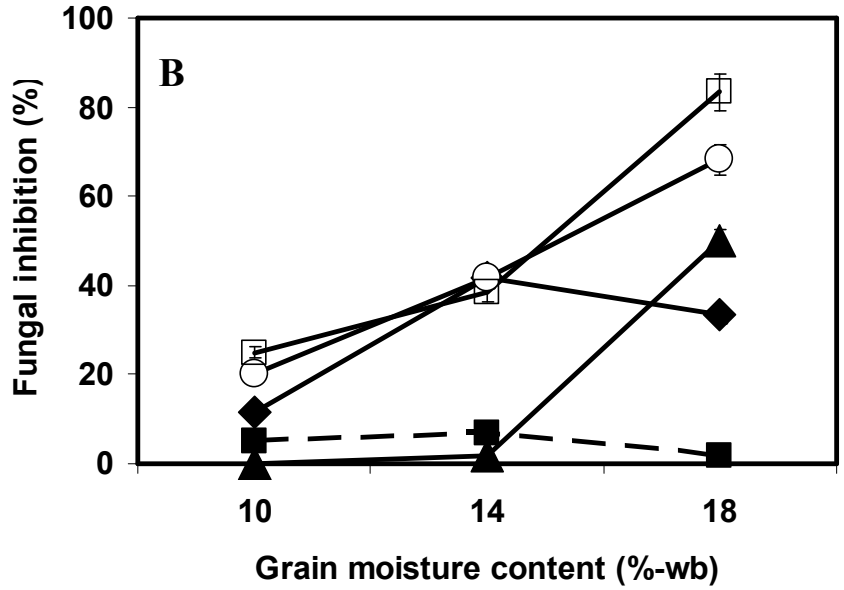
จากการตรวจสอบการปนเปื้อนเชื้อราที่ติดมาในเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน ที่ผ่านการให้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุที่ระดับต่าง ๆ พบว่า ในเมล็ดงาขี้ม้อนที่ทุกระดับความชื้น ได้แก่ 10, 14 และ 18 % w.b. โดยที่ระดับความชื้น 18 % w.b.จะมีแนวโน้มของการกำจัดเชื้อราในเมล็ดพันธุ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด รองลงมาคือ ที่ ความชื้นเมล็ด 14 % w.b. และ 10 % w.b. ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากที่ระดับความชื้น18 %w.b. คลื่นความถี่วิทยุสามารถชักนำให้เกิดความร้อนที่อยู่ในสภาวะร้อนชื้นที่เหมาะสม และ มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่เร็วกว่าเมล็ดที่มีความชื้นต่ำรองลงมา คือ 10 และ14 % w.b. ทั่งนี้ ในการให้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุเพื่อสร้างความร้อนนั้น น้ำ/ความชื้นภายในเมล็ดจะเป็นปัจจัยสำคัญ ในกระบวนการเพิ่มขึ้นของระดับความร้อน/อุณหภูมิ เมื่อน้ำในเมล็ดเกิดการสั่นสะเทือนจากพลังงานของคลื่นความถี่วิทยุกระทั่งเกิดความร้อน เมล็ดงาขี้ม้อนที่มีความชื้นในเมล็ดสูงกว่าก็จะมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่เร็วมากกว่าเช่นกัน การเปลี่ยนแปลงระดับของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วนี้ จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อโครงสร้างทางสรีระ การ

เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางชีวะเคมีภายในเซลล์ต่าง ๆ ของเชื้อราต่างๆที่ปนเปื้อนอยู่กับเมล็ดงาขี้ม้อน รวมกระทั้งการสูญเสียความชื้นภายในเซลล์ของเชื้อรา ซึ่งส่งผลให้เชื้อราต่าง ๆ ถูกควบคุมนั้นเอง

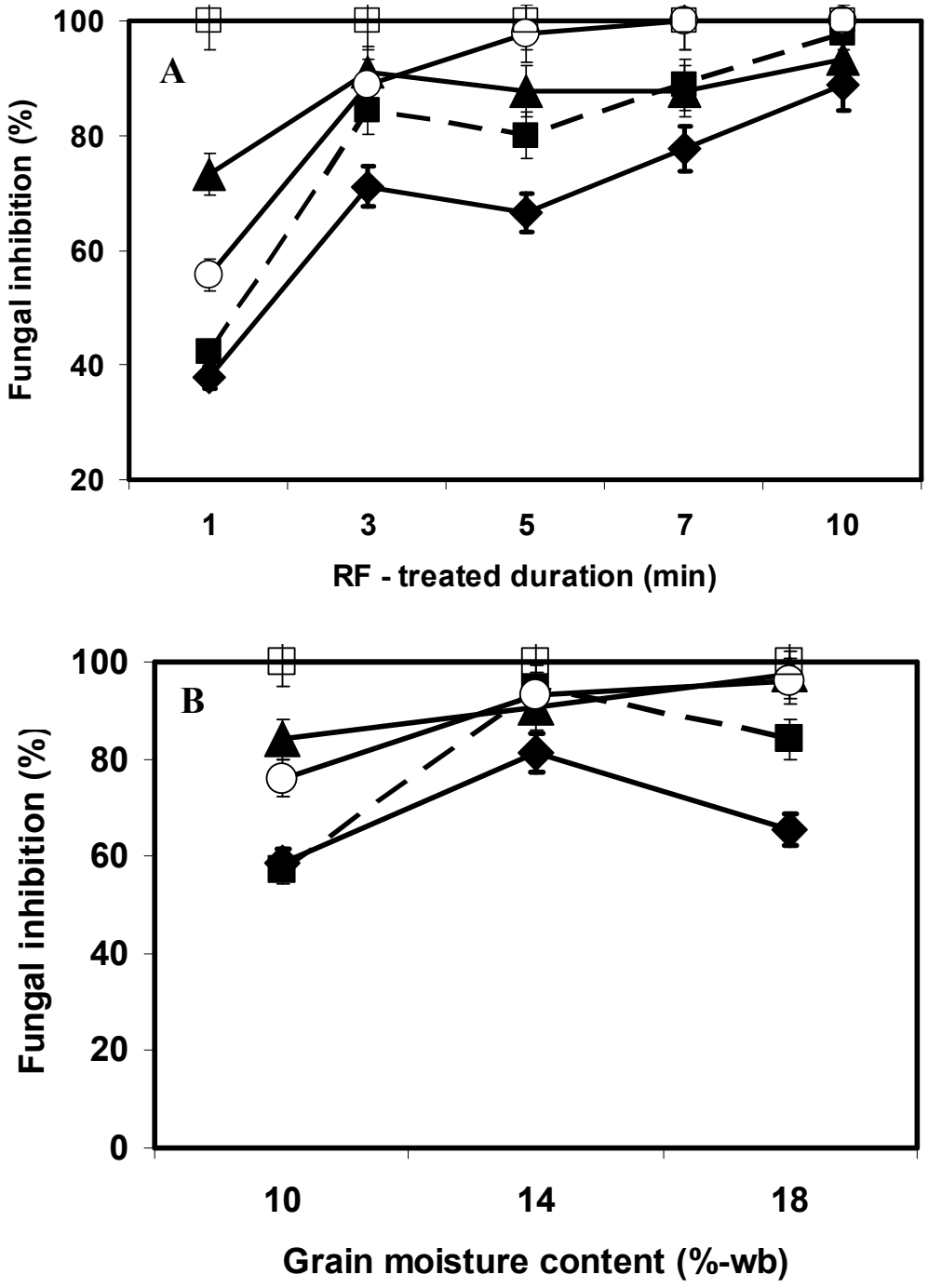
ทั้งนี้เนื่องจากเชื้อรา *F. Moniliforme* และ *Pennicilium spp.*ต่างก็เป็นเชื้อราในกลุ่มราชั้นสูงที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่มาก เมื่อโครงสร้างเส้นใยของเชื้อราได้รับความร้อนที่สูงขึ้นเรื่อยๆในระดับหนึ่ง จะมีการสร้างความเสียหายแก่องค์ประกอบของเซลล์ต่างๆที่มีน้ำอยู่ ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นจากความร้อนได้ และ เมื่อความร้อน เพิ่มขึ้นสูงจนถึงระดับ 70°C จะทำให้ โครงสร้างของเส้นใยเชื้อรา และ ในส่วนของ Conidia head ของเชื้อรา ถูกทำลายลงได้ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงตั้งแต่ 80°C ขึ้นไป โครงสร้างเหล่านั้นจะถูกทำลายอย่างสิ้นเชิง โดยที่ *Pennicilium spp.*จะเริ่มถูกทำลายไปมากที่อุณหภูมิเพียง 50°C เท่านั้น ส่วน *F. Moniliforme* จะเริ่มถูกทำลายโดยความร้อนจาก คลื่นความถี่วิทยุ ตั้งแต่80°C เกินครึ่งหนึ่ง โดยที่เชื้อราในกลุ่มนี้จะเป็น Seed borne fungi ที่มีการปนเปื้อน ตรงตำแหน่งที่อยู่ภายในเมล็ด บริเวณช่องว่างระหว่าง endosperm และ embryo ณ ตำแหน่งนั้น จะเป็นจุดที่มีความชื้นของเมล็ดสูงสุดเมื่อเทียบกับส่วนอื่นๆภายในเมล็ด เมื่อมีการให้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ แก่เมล็ดเพื่อสร้างความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้น ณ จุดๆนั้น จะมีอุณหภูมิสูงมากกกว่าที่แสดงผล เชื้อราจะถูกความร้อนสูงกำจัดไป

นอกจากนั้นที่ระดับความชื้นเมล็ดงาขี้ม้อน 18%w.b. จะมีปริมาณน้ำในเมล็ดที่สูงกว่า การเพิ่มระดับอุณหภูมิจะเป็นไปได้อย่างรวดเร็วกว่า ทำให้เชื้อราในกลุ่มนี้ซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบในเซลล์มาก มีความเสียหายจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นอย่างฉับพลันนั้นกำจัดเชื้อราได้ อีกทั้งจากปริมาณน้ำที่ในเมล็ดที่มีความชื้นสูงกว่า การเกิดความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุ จะทำให้เกิดการสร้างไอน้ำร้อนขึ้นบริเวณรอบๆผิวเมล็ด เกิดเป็นไอน้ำร้อนบริเวณช่องว่างระหว่างเมล็ดงาขี้ม้อนนั้น การเกิดสภาวะไอน้ำร้อนนี้ จะทำให้เกิดกระบวนการกำจัดเชื้อราโดยความร้อนแบบไอน้ำร้อน (Hot steam seed treatment) ซึ่งจะมีศักยภาพมากพอที่จะกำจัดเชื้อราในกลุ่ม *Aspergillus.spp* ซึ่งมี spore ปนเปื้อนเมล็ดบริเวณผิวของเมล็ดงาขี้ม้อน เมื่อความร้อนจากเมล็ดเกิดขึ้นบวกกับมีไอน้ำร้อนบริเวณช่องว่างระหว่างเมล็ด จะทำให้ spore ของเชื้อรา *Aspergillus.spp* ถูกทำลายลงไปได้บางส่วน ยิ่งมีความชื้นในเมล็ดสูงเท่าไร ความเร็วในการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิ และปริมาณไอน้ำร้อนในอากาศตรงช่องว่างเมล็ดก็จะมีมากเท่านั้น *Aspergillus.spp* ก็จะถูกกำจัดลงไปได้มากเช่นกัน

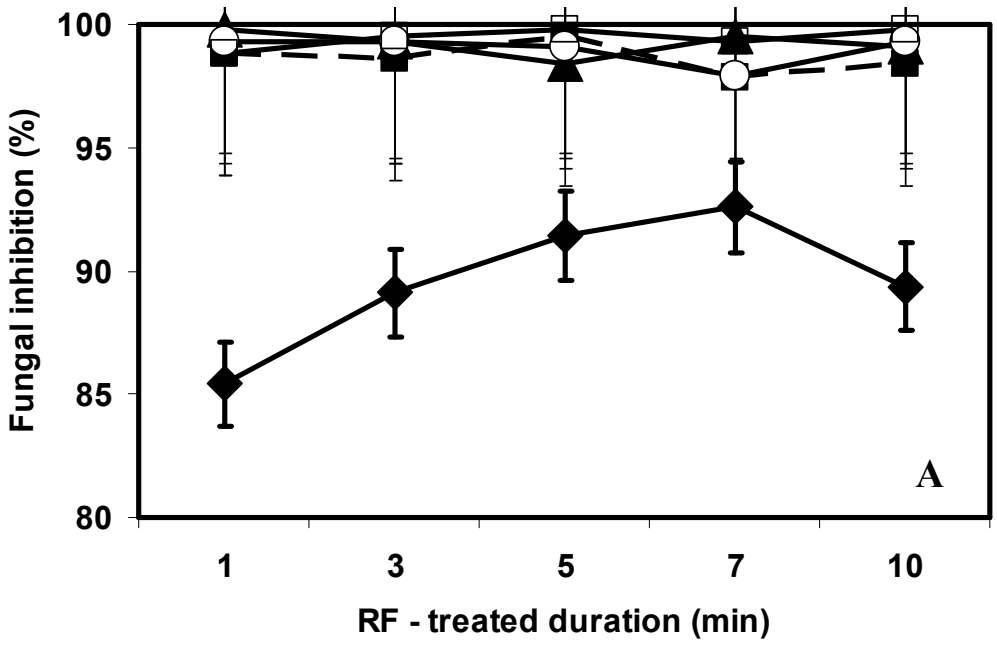


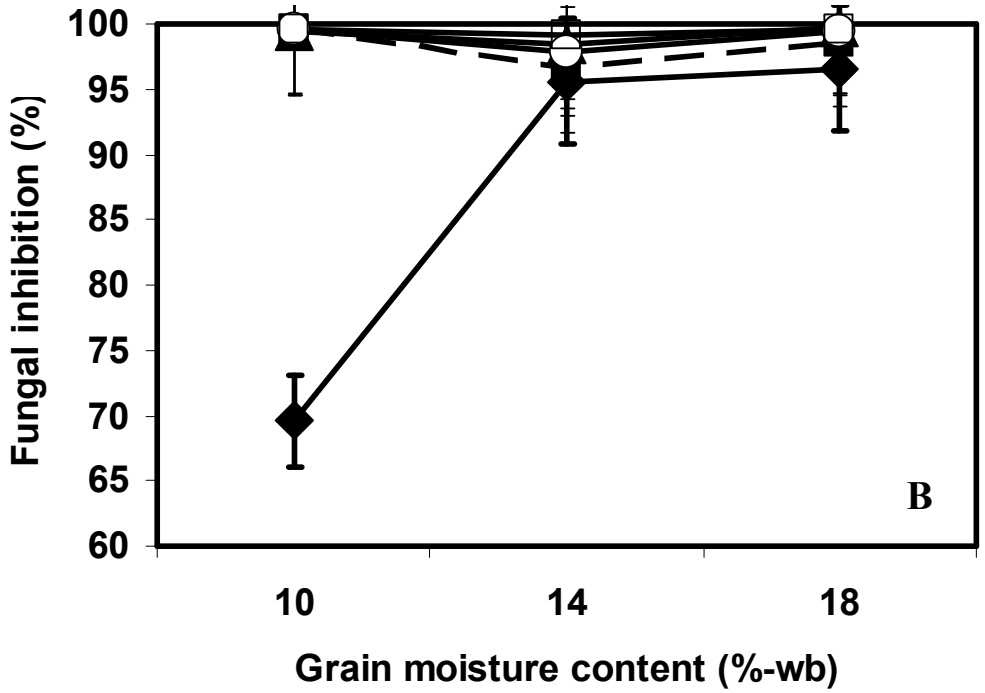


รูปที่ 62: อิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างระดับอุณหภูมิ – ระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุ (A) และระดับอุณหภูมิ – ระดับความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อน (B) ต่อการควบคุมเชื้อรา *Penicillium* sp. —◆—: 50 องศาเซลเซียส, —■ - -: 60 องศาเซลเซียส, —▲—: 70 องศาเซลเซียส, —○—: 80 องศาเซลเซียส, และ —□—: 90 องศาเซลเซียส



รูปที่ 63: อิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างระดับอุณหภูมิ – ระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุ (A) และระดับอุณหภูมิ – ระดับความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อน (B) ต่อการควบคุมเชื้อรา *Aspergillius flavus* —◆—: 50 องศาเซลเซียส, —■—: 60 องศาเซลเซียส, —▲—: 70 องศาเซลเซียส,—○—: 80 องศาเซลเซียส, และ —⊟—: 90 องศาเซลเซียส





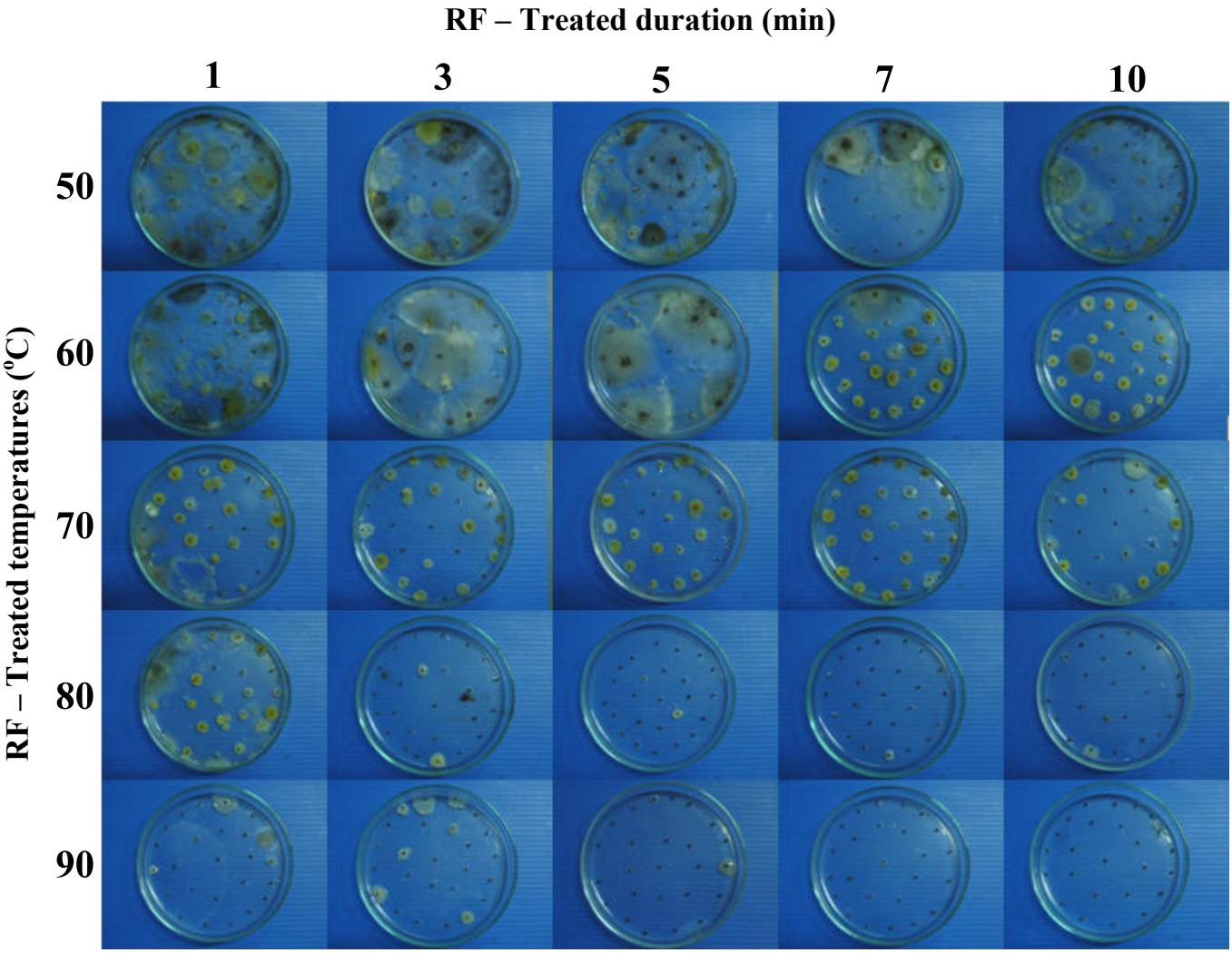
รูปที่ 64: อิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างระดับอุณหภูมิ – ระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุ (A) และระดับอุณหภูมิ – ระดับความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อน (B) ต่อการควบคุมเชื้อรา *Aspergillius niger* —◆—: 50 องศาเซลเซียส, —■—: 60 องศาเซลเซียส, —▲—: 70 องศาเซลเซียส,—○—: 80 องศาเซลเซียส, และ —□—: 90 องศาเซลเซียส

ประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุในการควบคุมเชื้อ *Aspergillus flavus*

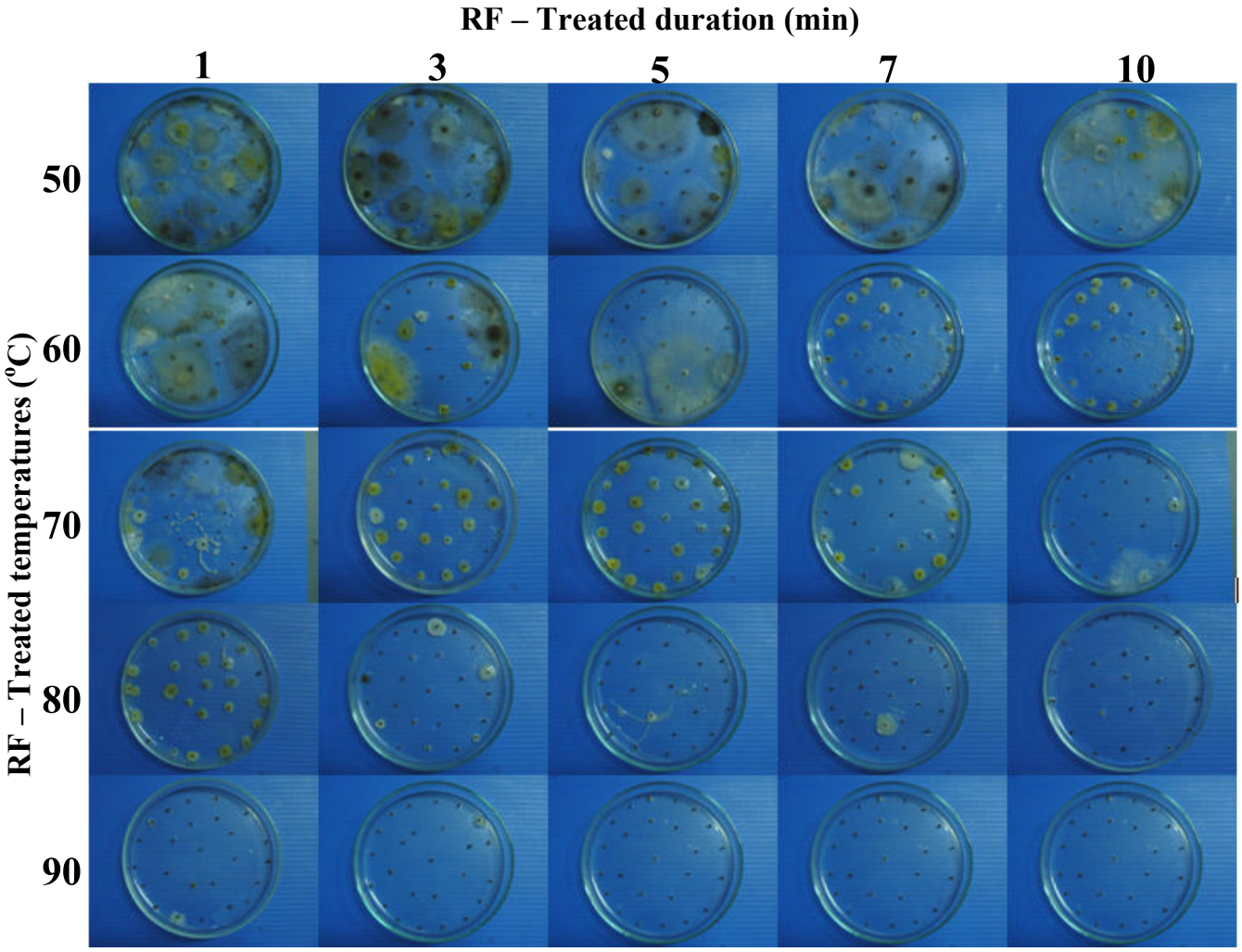
การใช้คลื่นความถี่วิทยุที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C ไม่สามารถกำจัด *A.flavus* ได้เลย ไม่ว่าจะเป็นระดับความชื้นเมล็ดเท่าไรก็ตาม แต่ที่อุณหภูมิ 70°C พบว่าสามารถกำจัดเชื้อราได้บางส่วน และเมื่อเพิ่มความร้อนเป็นที่อุณหภูมิ 80 และ 90°C จะมีการกำจัดเชื้อราไปได้เกือบทั้งหมด โดยที่ระยะเวลาในการให้ความร้อนที่ 1 นาที จะยังคงมีการปนเปื้อนของเชื้อราอยู่บ้างเล็กน้อย เนื่องจากถึงแม้จะเป็นระดับอุณหภูมิที่สูงมากพอจะทำให้เกิดการกำจัดเชื้อราโดยความร้อนได้ แต่ เนื่องจาก *A.flavus* เป็นเชื้อราชั้นสูง ที่ spore ของเชื้อรามีความสามารถทนความร้อนในระดับหนึ่ง จึงจะต้องมีการให้พลังงาน คลื่นความถี่วิทยุ สร้างความร้อนที่นานระยะ 3 นาทีขึ้นไป สภาวะการเกิดความร้อนจะสร้างไอน้ำขึ้นบริเวณช่องว่างระหว่างเมล็ด ที่เกิดจากน้ำในเมล็ดได้รับความร้อนจะเกิดเป็นแรงดันไอออกมาจากภายในเมล็ดงาขี้ม้อน ในทุกๆระดับอุณหภูมิ ก็มีการเกิดไอน้ำ แต่ถ้าอุณหภูมิไม่สูงมากพอก็จะมีปริมาณไอน้ำที่ต่ำเนื่องจากเกิดแรงดันจากภายในเมล็ดน้อยจนไอน้ำไม่สามารถดันตัวเองผ่านออกมาจากเมล็ดได้ แต่ที่ อุณหภูมิ 80°C เป็นต้นไป ความร้อนสูงจะทำให้ไอน้ำมีแรงดันสูงมากจนดันตัวเองผ่านออกมาจากเมล็ดได้ และจะมีการสะสมไอน้ำร้อนตรงช่องว่างระหว่างเมล็ดมากขึ้นๆ จะทำให้เกิดกระบวนการกำจัดเชื้อราโดยความร้อนแบบไอน้ำร้อน (Hot steam seed treatment)โดยที่ความร้อนชื้นจะเข้าสัมผัสกับ spore ของเชื้อราตรงผิวเมล็ดโดยตรง ยิ่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็นที่ 90°C ก็จะสามารถกำจัดเชื้อรา *A.flavus* ได้มากขึ้นไปด้วย

เมื่อศึกษาในส่วนของการเกิดเส้นใยขอองเชื้อรา *A.flavus* ซึ่งเป็นเส้นใยสีเขียวอมเหลือง มีโครงสร้างแบบราชั้นสูง มีน้ำเป็นองค์ประกอบ มีโครงสร้างของ conidial head ที่เจริญเส้นใย (hyphae) ส่วนของก้านชูสปอร์จะโป่งออกรูปร่างค่อนข้างกลม (vesicle) เป็นส่วนที่จะให้กำเนิดสปอร์ (sterigme หรือ pialide) ซึ่งอาจมีชั้นเดียว (uniseruate) หรือ สองชั้น (diseratiate) ในกรณีที่มี 2 ชั้น ชั้นในส่วนที่ติดกับ vesicle เรียกว่า metulae (primary stseratiate) ส่วนชั้นนอก ซึ่งเป็น phailide (secondary sterigma) ตรงส่วนปลายเป็นที่เกิดของสปอร์ (conidia) ซึ่งส่วนมากมีรูปร่างกลมผนังขรุขระเล็กน้อย และเกิดต่อกันเป็นลูกโซ่ (Kenneth and Derothy, 1965 ; Alexophus and Mims, 1979) แต่โครงสร้างในส่วนของเส้นใย มีความทนทานต่ออุณหภูมิสูงได้ไม่มากเท่ากับส่วน spor เมื่อมีการให้พลังงาน คลื่นความถี่วิทยุ เพื่อสร้างความร้อน ส่วนของ spore จะยังคงอยู่ได้ แต่เส้นใยของเชื้อรา จะถูกความร้อนทำลายไปทำให้ ในช่วงอุณหภูมิต่ำ 50 และ 60 °C จะมีเส้นใยสีขาวและ spore สีเขียวเจริญจนเต็มทั่วทั้งเมล็ดเห็นได้อย่างชัดเจน แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 70°C เส้นใยเชื้อราจะถูกทำลายไปบางส่วน ในขณะที่ spore ยังคงสภาพอยู่ ทำให้ การปนเปื้อนของเชื้อราที่ทดสอบในอาหารเลี้ยงเชื้อ Czapex agar จะมีการพบเพียงส่วนของ spore ราสีเขียวอมเหลือง ไม่ปรากฏในส่วนของเส้นใย สีขาว ทำให้ การเจริญของเชื้อรา *A.flavus* ในอาหารเลี้ยงเชื้อเจริญเพียงแค่รอบๆผิวเมล็ดรัศมีสั้นๆ เพราะไม่มีเส้นใยหรือส่วนของก้านชูสปอร์(hyphae) แต่เมื่อเพิ่มความร้อนไปที่ 80 และ 90 °C ทั้งเส้นใยและ spore จะถูกทำลายไปจนเกือบหมด ไม่พบการเจริญ

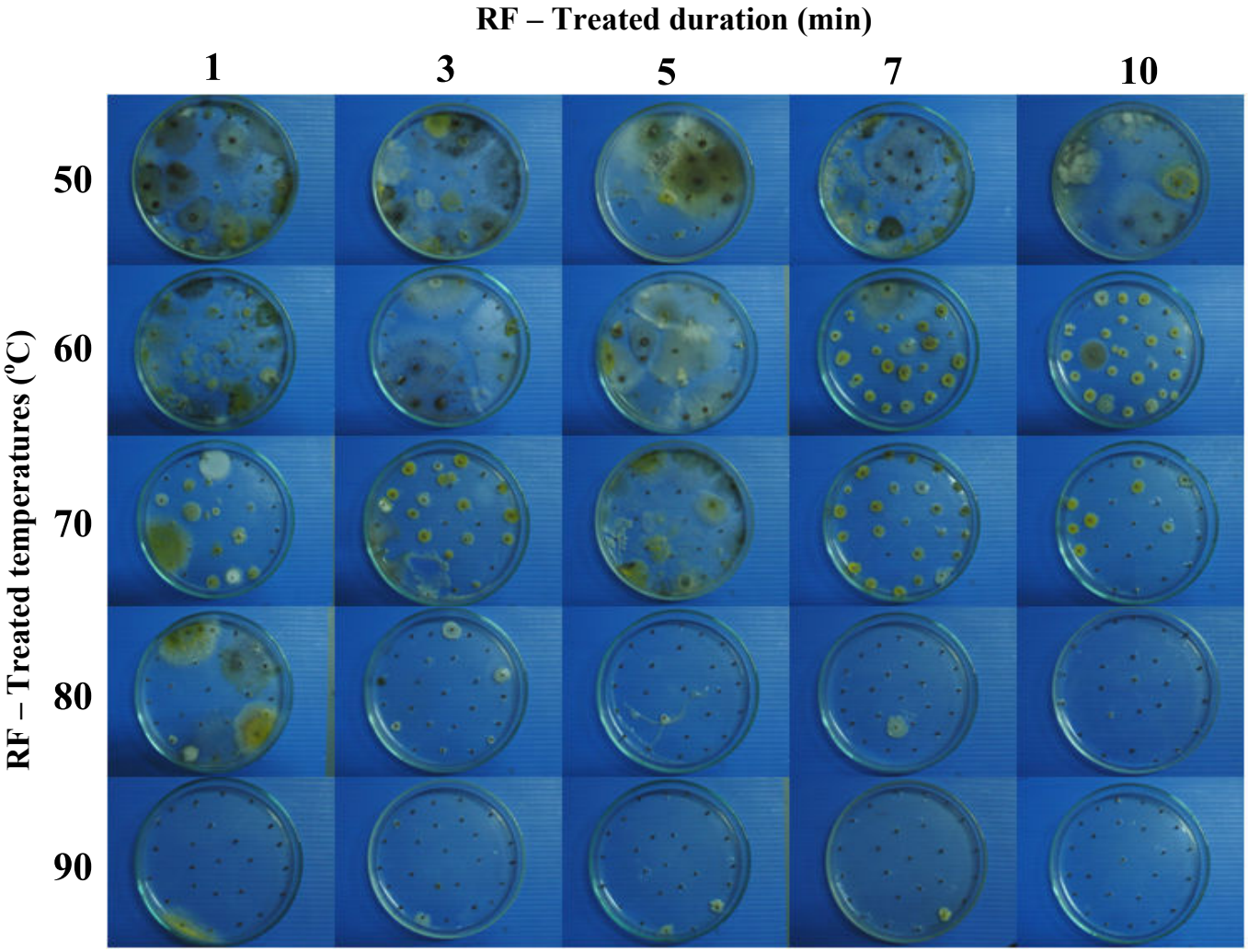
ของเชื้อราที่เมล็ดงาขี้ม้อนมากนัก แต่จะมีบางส่วนที่เกิดการเจริญของแบคทีเรียขึ้นมาบ้างทั้งนี้ เป็นเพราะในเมล็ดงาขี้ม้อนอาจจะมีการปนเปื้อนของแบคทีเรียอยู่บ้าง ซึ่งปกติแล้ว แบคทีเรียไม่สามารถเจริญขึ้นมาบนเมล็ดได้ เพราะมีเชื้อราเจริญขึ้นก่อน แต่เมื่อเมล็ดงาขี้ม้อนผ่านการให้พลังงาน คลื่นความถี่วิทยุ แล้ว จะเป็นการกำจัดเชื้อราในเมล็ดงาขี้ม้อนไป ทำให้แบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตขึ้นมาได้เพราะมีทั้งอาหารสะสมในเมล็ด สารอาหารในอาหารเลี้ยงเชื้อ น้ำจากเมล็ดและจากอาหารเลี้ยงเชื้อ (รูปที่ 65 – 67)



รูปที่ 65: อิทธิพลของระดับอุณหภูมิ (treated temperatures) และระยะเวลา (treated duration) ในการใช้คลื่นความถี่วิทยุต่อการควบคุมเชื้อราระหว่างการเก็บรักษาเมล็ดงาขี้ม้อน ที่ระดับความชื้นของเมล็ด 18% - DB



รูปที่ 66: อิทธิพลของระดับอุณหภูมิ (treated temperatures) และระยะเวลา (treated duration) ในการใช้คลื่นความถี่วิทยุต่อการควบคุมเชื้อราระหว่างการเก็บรักษาเมล็ดงาขี้ม้อน ที่ระดับความชื้นของเมล็ด 14% - DB



รูปที่ 67: อิทธิพลของระดับอุณหภูมิ (treated temperatures) และระยะเวลา (treated duration) ในการใช้คลื่นความถี่วิทยุในการควบคุมเชื้อราระหว่างการเก็บรักษาเมล็ดงาขี้ม้อน ที่ระดับความชื้นของเมล็ด 10% - DB

3.7.1.2 ศึกษาการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency – RF heat treatment) ต่อลดการสร้าง/สะสมสารพิษอะฟราท๊อกซินบน/ในเมล็ดงาขี้ม้อน

ในการศึกษาประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุต่อการควบคุมการสร้าง/สะสมสาร Aflatoxin ในเมล็ดงาขี้ม้อน พบว่า การปนเปื้อนสารอะฟราท๊อกซินมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับการปนเปื้อนเชื้อรา *A.flavus* โดยเมื่อมีการให้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุ พบว่า ปริมาณสารพิษ Aflatoxin จะเริ่มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตามระดับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ที่ระดับอุณหภูมิ 50 °C (26.01 ppb) และที่อุณหภูมิ 60 (19.08 ppb) 70 (14.86 ppb) และ 80 (12.02 ppb) องศาเซลเซียส และมีปริมาณของสารพิษ Aflatoxin ลดลงอีกตามลำดับ จนที่อุณหภูมิสูงสุด 90 องศาเซลเซียสมีปริมาณของสารพิษอะฟราท๊อกซินปนเปื้อนต่ำสุด (9.28 ppb) ทั้งนี้เกี่ยวข้องกับปริมาณการปนเปื้อนของเชื้อรา *A. flavus* ในเมล็ดงาขี้ม้อน โดนที่อุณหภูมิ 50 °C เชื้อรา *A. flavus* ในเมล็ดจะยังคงสภาพเดิมไม่ถูกทำลายไปเพราะความร้อน การเกิดสารพิษจากเชื้อรา *A. flavus* จึงเกิดขึ้นตามปกติ แต่ที่อุณหภูมิ 60 และ70 องศาเซลเซียส เชื้อรา *A. flavus* จะยังคงอยู่ก็จริง แต่สภาพโครงสร้างต่าง ๆ ของเส้นใย และส่วนอื่น ๆ เริ่มถูกทำลายลงไปทำให้ การสร้างสารพิษอะฟราท๊อกซินเกิดได้น้อยลง และที่อุณหภูมิ 80องศาเซลเซียส ทั้ง spore และเส้นใย ถูกทำลายด้วยความร้อนไปมากจนเกือบหมด แต่ก็ยังคงมีการปนเปื้อนสารพิษที่จากเชื้อราที่ยังหลงเหลืออยู่ และที่อุณหภูมิสูงสุด 90องศาเซลเซียส ซึ่งการกำจัดเชื้อรา *A. flavus* ทำไปได้จนเกือบทั้งหมด แต่เชื้อราที่ยังคงหลงเหลืออยู่ ก็จะยังสามารถสร้างสารพิษ Aflatoxin ได้ จึงยังสามารถตรวจพบสารพิษได้อยู่บ้างเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาในการให้พลังงานคลื่นความถี่วิทยุเพื่อสร้างความร้อน พบว่า การปนเปื้อนสารพิษอะฟราท๊อกซินลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อมีการใช้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุในเวลาที่นานขึ้น โดยลดลงเหลือประมาณ 14.60 ppb เมื่อใช้คลื่นความถี่วิทยุเป็นเวลา 10 นาที ขณะที่เมื่อใช้คลื่นความถี่วิทยุเพียง 1 นาทีจะมีการปนเปื้อนสารพิษอะฟราท๊อกซินถึง 18.65 ppb ดังนั้น จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุเป็นแหล่งพลังงานเพื่อสร้างความร้อนนั้นมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญต่อการควบคุมการปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท๊อกซิน

ซึ่งการปนเปื้อนสารพิษอะฟราท๊อกซินลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตามระดับของความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อน กล่าวคือเมื่อเมล็ดงาขี้ม้อนที่มีความชื้นสูง และนำไปผ่านการใช้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ มีประสิทธิภาพในการควบคุมการปนเปื้อนสารพิษอะฟราท๊อกซินได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างเมล็ดงาขี้ม้อนที่มีความชื้นของเมล็ดต่ำ โดยเมล็ดงาขี้ม้อนที่มีความชื้น 10 %-wb จะมีการปนเปื้อนสารพิษอะฟราท๊อกซินในเมล็ดงาขี้ม้อนหลังผ่านคลื่นความถี่

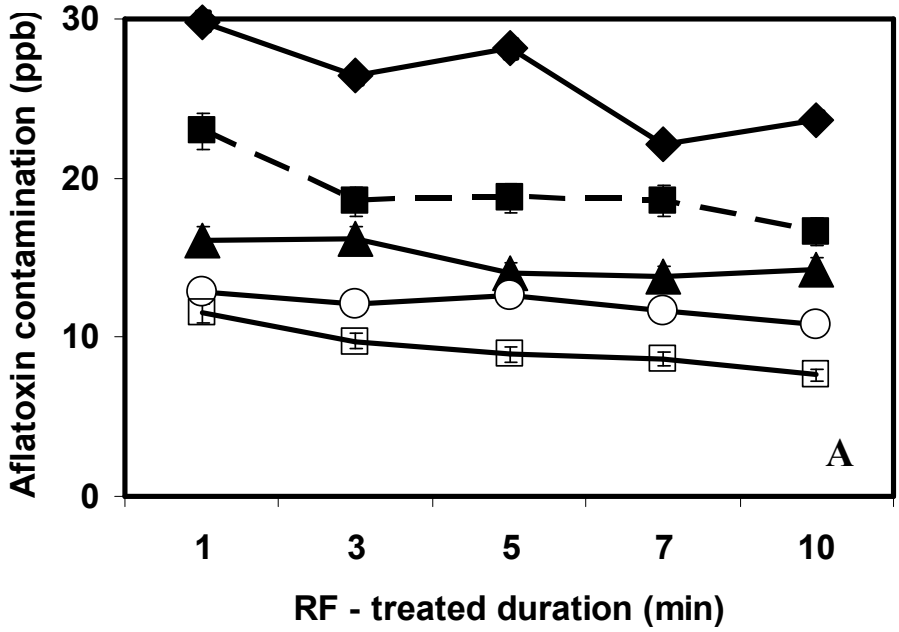
วิทยุถึง 19.40 ppb ในขณะที่เมล็ดงาขี้ม้อนที่มีความชื้นภายในเมล็ด 18 %-wb จะมีการปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท๊อกซินเพียง 13.74 ppb ตามลำดับ (ตารางที่ 35)

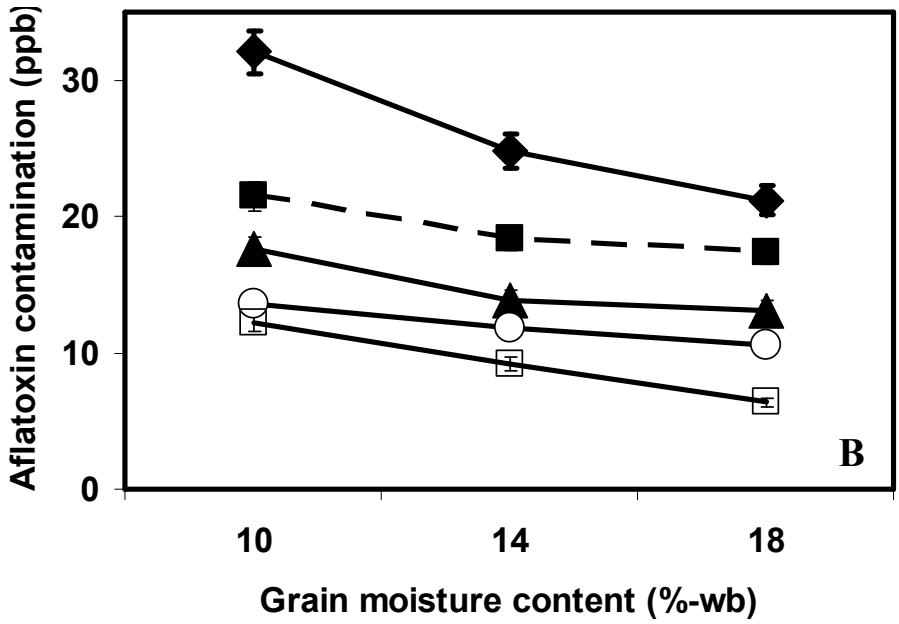
ทั้งนี้เนื่องจากที่ระดับความชื้นต่ำเชื้อรา *A. flavus* ถูกกำจัดได้น้อยอันเนื่องจากปริมาณน้ำในเมล็ดที่มีไม่มาก ทำให้การชักนำให้เกิดความร้อนจากอุณหภูมิห้องเป็นอุณหภูมิเป้าหมาย (Target temperature) โดยคลื่นความถี่วิทยุเปลี่ยนไปโดยใช้เวลาที่มากกว่า เมื่อเทียบกับที่เมล็ดงาขี้ม้อนความชื้นสูง (14 และ 18 % w.b.) ซึ่งเมล็ดงาขี้ม้อนที่มีปริมาณน้ำในเมล็ดสูงกว่า ก็จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้เวลาที่สั้นกว่า โดยเฉพาะที่ ความชื้นเมล็ด 18 %w.b. จะมีการเกิดสารพิษ Aflatoxin ต่ำที่สุด ทั้งจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และการเกิดไอน้ำร้อนตรงช่องว่างระหว่างเมล็ดที่จะทำลาย spor ของ *A. flavus* ทำให้มีการเจริญของ *A. flavus* บนผิวเมล็ดงาขี้ม้อนลดลง และการลดลงของเชื้อ *A. flavus* ส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของการสร้างสารพิษอะฟราท๊อกซินอันเนื่องมาจากกิจกรรมขอเชื้อรา *A.flavus* ก็จะมีน้อยลง (รูปที่ 68A และB)

ตารางที่ 35: อิทธิพลของความชื้นเมล็ดงาขี้ม้อน ระดับอุณหภูมิ (RF – treated temperatures) และระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุ (RF – treated duration) ในการควบคุมการสร้าง/สะสมสารอะฟราท๊อกซินที่ปนเปื้อนในตัวอย่างเมล็ดงาขี้ม้อน

Treatment	Aflatoxin contamination (ppb; mean±SD)
Grain moisture content (%-wb)	
10	19.40±7.875a
14	15.619±5.874b
18	13.735±5.455c
RF treated temperature (oC)	
50	26.012±6.059a
60	19.086±2.925b
70	14.862±2.3293
80	12.016±1.664d
90	9.280±2.937e
RF treated duration (min)	
1	18.648±7.966a
3	16.574±6.564b
5	16.491±7.855b
7	14.938±5.378c
10	14.604±6.153c

หมายเหตุ: ค่าที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%





รูปที่ 68: อิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างระดับอุณหภูมิ – ระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุ (A) และระดับอุณหภูมิ – ระดับความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อน (B) ต่อการควบคุมการปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท๊อกซินภายในเมล็ดงาขี้ม้อน

—◆—: 50 องศาเซลเซียส, —■ ‒: 60 องศาเซลเซียส, —▲—: 70 องศาเซลเซียส,—○—: 80 องศาเซลเซียส, และ —□—: 90 องศาเซลเซียส

3.7.2 วิธีดำเนินการวิจัยการศึกษาการการใช้การอบลมร้อน (Convectional drying /heat treatment) ต่อการควบคุมเชื้อรา และการสร้าง - สะสมสารอะฟราท๊อกซิน

3.7.2.1 ประสิทธิภาพของการใช้การอบลมร้อน (Convectional drying/heat treatment) ต่อการควบคุมเชื้อราในตัวอย่างเมล็ดงาขี้ม้อน

จากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of varience; ANOVA) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้การอบลมร้อนในการควบคุมเชื้อราที่ปนเปื้อนในเมล็ดงาขี้ม้อน พบว่า ทั้งปัจจัยอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้การอบลมร้อนเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้สามารถทำการควบคุมการเจริญของเชื้อราทั้ง 4 กลุ่มได้ โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาถึงปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิ – ระยะเวลาในการอบลมร้อน แสดงให้เห็นว่าปัจจัยร่วมดังกล่าวเป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบบคุมการเจริญเติบโต – การปนเปื้อนของเชื้อราบนเมล็ดงาขี้ม้อน (ตารางที่ 36)

ตารางที่ 36: การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of varience; ANOVA) อิทธิพลของระดับอุณหภูมิ ระยะเวลาในการอบลมร้อน ต่อการควบคุมเชื้อรา 4 สายพันธุ์ ได้แก่ *Aspergillus flavus, Aspergillus niger, Fusarium* sp., และ *Penicillium* sp.

หมายเหตุ: ตัวเลขที่แสดงเป็นค่าการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95%

Source of variation	parameters			
	A. flavus	***A. niger***	***Fusarium moniliform.***	***Penicillium* sp.**
Temp	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Time	0.002	0.011	0.701	0.004
Temp x Time	<0.001	0.202	0.222	0.045
cv.	9.11	9.14	6.34	12.65

Ns: no significant different

ตารางที่ 37 แสดงการวิเคราะห์ปัจจัยระดับอุณหภูมิ และระยะเวลาในการอบลมร้อนต่อการควบคุมเชื้อราที่เจริญบน/ในเมล็ดงาขี้ม้อน พบว่า เมื่อระดับอุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อราทั้ง 4 กลุ่มสูงขึ้น และจะสามารถควบคุมได้ดีที่สุดเมื่ออุณหภูมิสูงสุดที่ 90°C และระยะเวลา ที่ให้เมล็ดงาขี้ม้อนได้รับลมร้อนนานที่สุดคือ 30 นาที

เมื่อเปรียบเทียบเชื้อรา 2 กลุ่ม คือ Seed borne fungi ซึ่งได้แก่ *Fusarium moniliforme* และ *Penicillium* sp. และ Storage fungi เชื้อราในกลุ่ม ได้แก่ *A. niger* และ *A. flavus* จะสามารถแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างทางด้านความทนทานต่ออุณหภูมิสูง ได้ไม่เท่ากัน *Fusarium moniliforme*จะถูกกำจัดได้ง่ายที่สุด โดยที่อุณหภูมิ 50°C ก็จะสามารถกำจัดได้ ในขณะที่อุณหภูมิเดียวกันนี้ *A.*

niger และ *Penicillium* sp สามารถถูกกำจัดไปได้บางส่วน แต่ในขณะที่ *A. flavus* จะสามารถทนต่ออุณหภูมิระดับนี้ได้ซึ่งทำให้สามารถกำจัดเชื้อรา *A. flavus* ด้วยวิธีการอบลมร้อนได้ต่ำ

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบลมร้อนที่ 60องศาเซลเซียส เชื้อราทุกตัวจะสามารถกำจัดได้ โดยที่ *Fusarium moniliforme*จะถูกกำจัดได้มากที่สุด *A. niger* และ *Penicillium* sp ก็สามารถกำจัดไปได้มากขึ้นตามลำดับเช่นกัน ในขณะที่ *A. flavus* เริ่มที่จะสามารถกำจัดได้เล็กน้อย ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เชื้อรา *Fusarium moniliforme*จะถูกกำจัดได้ไม่แตกต่างจากที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในขณะที่เชื้อรา *A. niger* และ *Penicillium* sp. สามารถกำจัดได้ดีขึ้นในระดับที่เท่า ๆ กัน และ *A. flavus* ก็จะเริ่มที่จะสามารถกำจัดได้มากขึ้น ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเชื้อ *Fusarium moniliforme* จะถูกกำจัดไปได้จนเกือบหมด โดยที่ *Penicillium* sp. และ *A. niger* จะถูกกำจัดได้เท่ากับที่ 70 องศาเซลเซียส แต่ *A. flavus* สามารถกำจัดได้มากขึ้นมาก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงสุดที่ 90 องศาเซลเซียส ทั้ง *Fusarium moniliforme, Penicillium* sp. และ *A. niger* ก็จะถูกกำจัดได้จนเกือบสิ้นเชิง (97.35, 92.50, และ 90.20%, ตามลำดับ) และในขณะที่ *A. flavus* ก็ถูกกำจัดได้ดีที่สุดเพียง 61.14%

ตารางที่ 37: อิทธิพลของระดับอุณหภูมิ ระยะเวลาในการอบลมร้อน ต่อการควบคุมเชื้อรา 4 สายพันธุ์ ได้แก่ *Aspergillus flavus, Aspergillus niger, Fusarium* sp., และ *Penicillium* sp. ที่ปนเปื้อนในตัวอย่างเมล็ดงาขี้ม้อน

Treatment	Fungal inhibition (%)			
	A. flavus	***A. niger***	***Fusarium moniliform***	***Penicillium* sp.**
Convectionaltreated treated temperature (°C)				
50	0±0.00e	32.25±12.758e	72.25±5.781c	14.50±10.075d
60	15.74±1.890d	43.05±9.485d	83.09±5.318b	31.67±15.384c
70	27.73±8.394c	65.23±9.418c	84.00±4.091b	79.17±9.704b
80	40.76±6.598b	76.17±6.736b	94.43±2.843a	82.50±14.405b
90	61.14±7.719a	90.20±6.384a	97.35±2.346a	92.50±8.216a
Convectionaltreated treated duration (min)				
3	26.10±21.091b	56.22±23.809b	85.57±9.958a	53.00±28.402b
10	30.08±23.468a	63.95±22.952a	86.74±9.868a	60.20±40.762ab
30	31.04±23.395a	63.97±24.464a	86.40±11.003a	67.00±31.903a

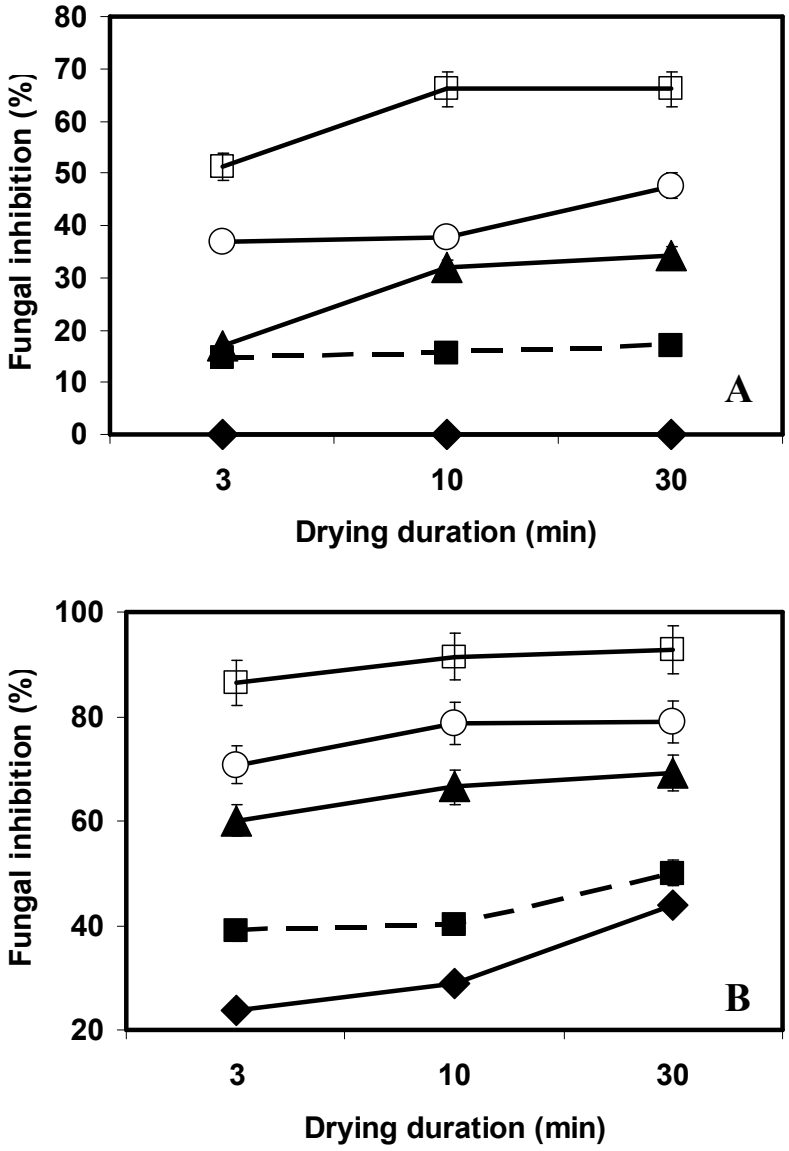
หมายเหตุ: ค่าที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยของระยะเวลาในการอบลมร้อน พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการอบลมร้อน จาก 3 นาที เป็น 10 นาที ที่ทุกระดับอุณหภูมิ จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อราเกือบทุกชนิด แต่หลังจาก 10 นาทีขึ้นไป จน 30 นาทีที่ให้ลมร้อน การกำจัดเชื้อราจะยังคงที่เสมอ ยกเว้นเพียงแค่ *Fusarium moniliforme* ที่การอบด้วยลมร้อนสามารถกำจัดเชื้อราได้มากตั้งแต่ 3 นาทีแรก และเมื่อเพิ่มระยะเวลานานมากขึ้นไม่ว่าเท่าไรก็ตาม การกำจัดเชื้อราจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง

เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิ และระยะเวลาในการอบลมร้อน พบว่า *Fusarium moniliforme, Penicillium* sp. และ *A. niger* ก็จะถูกกำจัดได้มากขึ้นเมื่อมีการใช้ปัจจัยร่วมกัน แต่ *A. flavus* จะไม่มีผลต่อศักยภาพในการกำจัดเชื้อราต่างไปจากการอบด้วยลมร้อนปัจจัยเดียวมากนัก โดยสามารถกำจัดเชื้อ *A. flavus* ได้เพียงประมาณ 70 % เมื่อมีการใช้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (รูปที่ 69 และ 70)

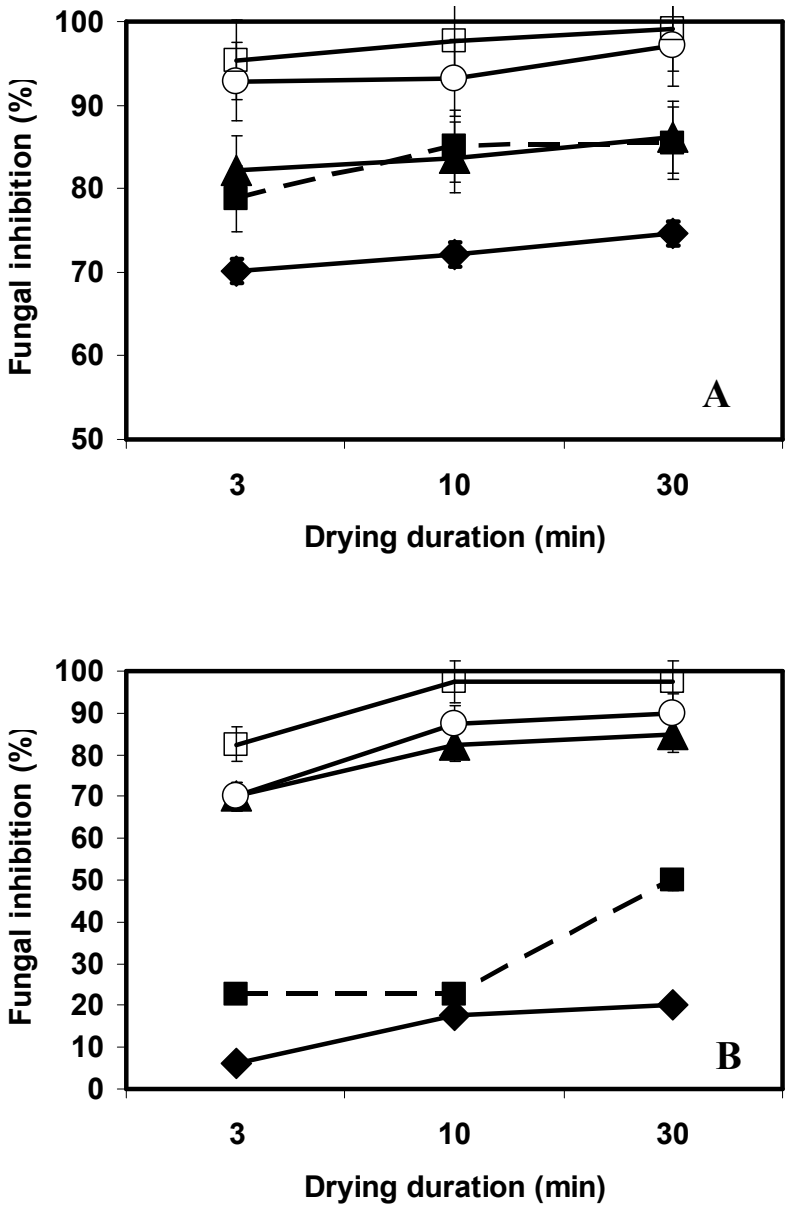
ในการใช้ลมร้อนกำจัดเชื้อรานั้น เมล็ดงาขี้ม้อน เมื่อได้สัมผัสลมร้อนจะมีการเคลื่อนที่แบบการนำความร้อนจากบริเวณผิวสัมผัสลมร้อนไปตามเมล็ด ทำให้ ในช่วงแรก การกำจัดเชื้อราที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 3 นาทียังมีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อราต่ำ ยกเว้นแต่เพียงเชื้อรา *Fusarium moniliforme* ที่มีความทนทานต่ออุณหภูมิสูงได้น้อย ส่งผลให้เชื้อรา *Fusarium moniliforme* ถูกกำจัดไปได้อย่างรวดเร็ว เมื่อมีการให้ลมร้อนในระยะเวลาที่ยาวนานขึ้นเป็น 10 นาทีการนำความร้อนจากผิวเมล็ดไปยังส่วนต่าง ๆ ของเมล็ดจะเป็นไปได้อย่างทั่วถึง เนื่องจากเมล็ดงาขี้ม้อนมีขนาดเล็กทำให้การแพร่ของความร้อน (heat transfer) ใช้เวลาไม่นานนักก็มีการกระจายตัวของความร้อน (Thermal distribution) ไปได้อย่างสม่ำเสมอ และเมื่อให้ความร้อนนานขึ้นเป็น 30 นาที ก็จะไม่มีความแตกต่างกันในด้านของอุณหภูมิภายในเมล็ด ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อราจึงเท่าๆกัน

ทั้งนี้ มีความแตกต่างในการใช้การอบลมร้อนต่อการกำจัดเชื้อราชนิดต่าง ๆ เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของเชื้อราแต่ละชนิดซึ่งมีโครงสร้างที่มีความทนทานต่อความร้อนแตกต่างกัน เช่น ใน *A. flavus* ซึ่งโครงสร้าง spore จะมีความทนทานต่อความร้อนเนื่องจากผนังส่วนของ conidia head เป็นโครงสร้างจำพวกไคติน มีความแข็งแกร่งทนทานต่ออุณหภูมิสูงได้ ในขณะที่ *Fusarium moniliforme* โครงสร้างเส้นใยมีน้ำเป็นองค์ประกอบมาก และผนังเซลล์มีชั้นที่บาง เมื่อได้รับความร้อนที่ไม่สูงมากนัก ก็เพียงพอที่จะสร้างความเสียหายต่อโครงสร้างเส้นใยเชื้อรานั้นๆทำให้สามารถกำจัดเชื้อราได้



รูปที่ 69: อิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างระดับอุณหภูมิ – ระยะเวลาในการอบลมร้อนต่อการควบคุมเชื้อรา *Aspergillius flavus* (A), และ *Aspergillus niger* (B)

: 50 องศาเซลเซียส, : 60 องศาเซลเซียส, : 70 องศาเซลเซียส, : 80 องศาเซลเซียส, และ : 90 องศาเซลเซียส



รูปที่ 70: อิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างระดับอุณหภูมิ – ระยะเวลาในการอบลมร้อนต่อการควบคุมเชื้อรา *Fusarium moniliforme* (A), และ *Penicillium* sp. (B)

—◆—: 50 องศาเซลเซียส, —■—: 60 องศาเซลเซียส, —▲—: 70 องศาเซลเซียส,—○—: 80 องศาเซลเซียส, และ —□—: 90 องศาเซลเซียส

3.7.2.2 ประสิทธิภาพของการใช้การอบลมร้อน (Convectional drying/heat treatment) ต่อการควบคุมการปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท๊อกซินในเมล็ดงาขี้ม้อน

สารพิษ Aflatoxin ซึ่งเป็นสารพาที่ผลิตขึ้นโดยเชื้อราในกลุ่มของ *A. flavus* จะมีการตรวจพบได้ในปริมาณที่สอดคล้องกับปริมาณเชื้อราที่หลงเหลือจากการกำจัด จะเห็นได้ชัดว่า ใน ปริมาณเชื้อราที่กำจัดไปได้จะแปรผันตามกับปริมาณสารพิษ Aflatoxin ที่ตรวจสอบพบ เนื่องจาก เชื้อรา *A. Flavus* ที่ยังคงอยู่ ก็จะยังสามารถผลิตสารพิษขึ้นมาได้ โดยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เชื้อรา *A. Flavus* จะยังคงไม่ถูกกำจัดไป การสร้างสารพิษก็จะมีมาก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 60 องศาเซลเซียส เชื้อ *A. flavus* จะเริ่มที่จะสามารถกำจัดได้เล็กน้อยทำให้การสร้างสารพิษอะฟราท๊อกซินลดลง ที่อุณหภูมิ 70, 80 และ90 องศาเซลเซียส เชื้อรา *A. flavus* เริ่มถูกจำกัดมากขึ้น ส่งผลให้สารพิษอะฟราท๊อกซินที่สร้างขึ้นมาได้มีปริมาณลดต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (31.22, 30.70, และ 24.40 ppb, ตามลำดับ) (ตารางที่ 38)

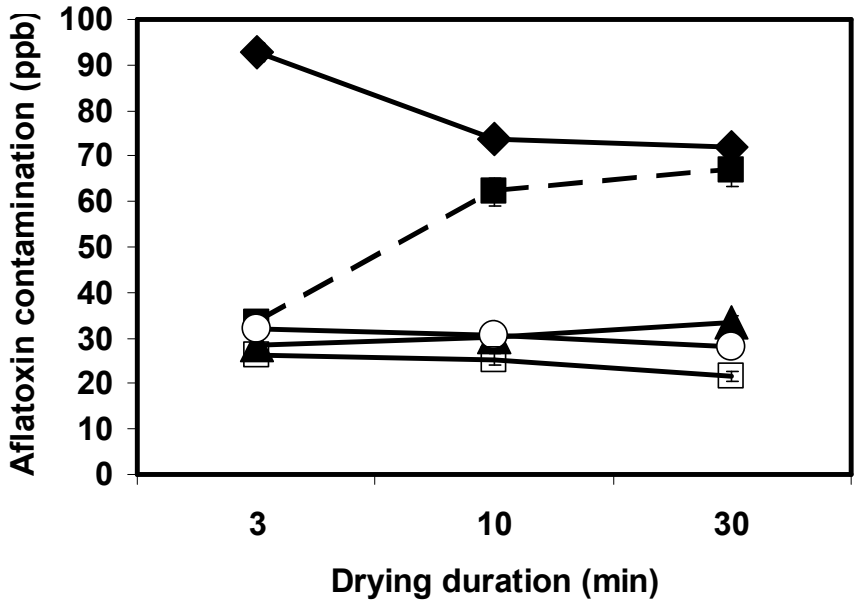
เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาในการอบลมร้อน พบว่า ระยะเวลาในการอบลมร้อนไม่มีผลต่อการลดลงของสารพิษอะฟราท๊อกซินที่ปนเปื้อนในเมล็ดงาขี้ม้อน โดยปริมาณสารพิษอะฟราท๊อกซิน มีการสร้างที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากการปนเปื้อนของเชื้อรา *A. flavus* บริเวณผิวนอกของเมล็ดงาขี้ม้อน เมื่อมีการให้ลมร้อนเพื่อกำขจัดเชื้อราในเมล็ด ความร้อนที่ให้จะเข้าสัมผัสกับ spore ของเชื้อราในทันที และส่งผลกระทบต่อเชื้อรานั้นทันทีเช่นกัน ไม่ว่าจะให้ลมร้อนไปนานเท่าไร แต่การกำจัดเชื้อราก็จะมีผลไปตั้งแต่การให้ลมร้อนตั้งแต่ระยะเวลา 3 นาทีไปแล้ว การกำจัดเชื้อราจึงไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ปริมาณเชื้อราที่ยังคงเหลืออยู่ก็จะไม่แตกต่างกัน ดังนั้น การสร้าง และสะสมสารพิษอะฟราท๊อกซินในเมล็ดงาขี้ม้อนจึงไม่เปลี่ยนแปลงไป

ซึ่งจากผลการศึกษาดังกล่าว มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิ และระยะเวลาในการอบลมร้อนเพื่อควบคุมการสร้าง - สะสมสารพิษอะฟราท๊อกซินในเมล็ดงาขี้ม้อน โดยจากผลการศึกษา พบว่า การอบด้วยลมร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 70, 80, และ 90 องศาเซลเซียส สามารถควบคุมการปนเปื้อนสารพิษอะฟราท๊อกซินในเมล็ดงาขี้ม้อนได้ไม่แตกต่างกันทั้งที่เวลา 3, 10 และ 30 นาทีตามลำดับ (รูปที่ 71)

ตารางที่ 38 อิทธิพลของระดับอุณหภูมิ ระยะเวลาในการใช้ลมร้อน ต่อการเกิดสารพิษ Aflatoxin

Treatment	Aflatoxin contamination (ppb; mean±SD)
Convectionaltreated treated temperature (°C)	
50	79.85±12.862a
60	54.07±16.369b
70	31.22±3.681c
80	30.70±6.041c
90	24.40±2.921c
Convectionaltreated treated duration (min)	
3	43.00±26.768a
10	44.24±20.571a
30	44.68±22.846a

หมายเหตุ: ค่าที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



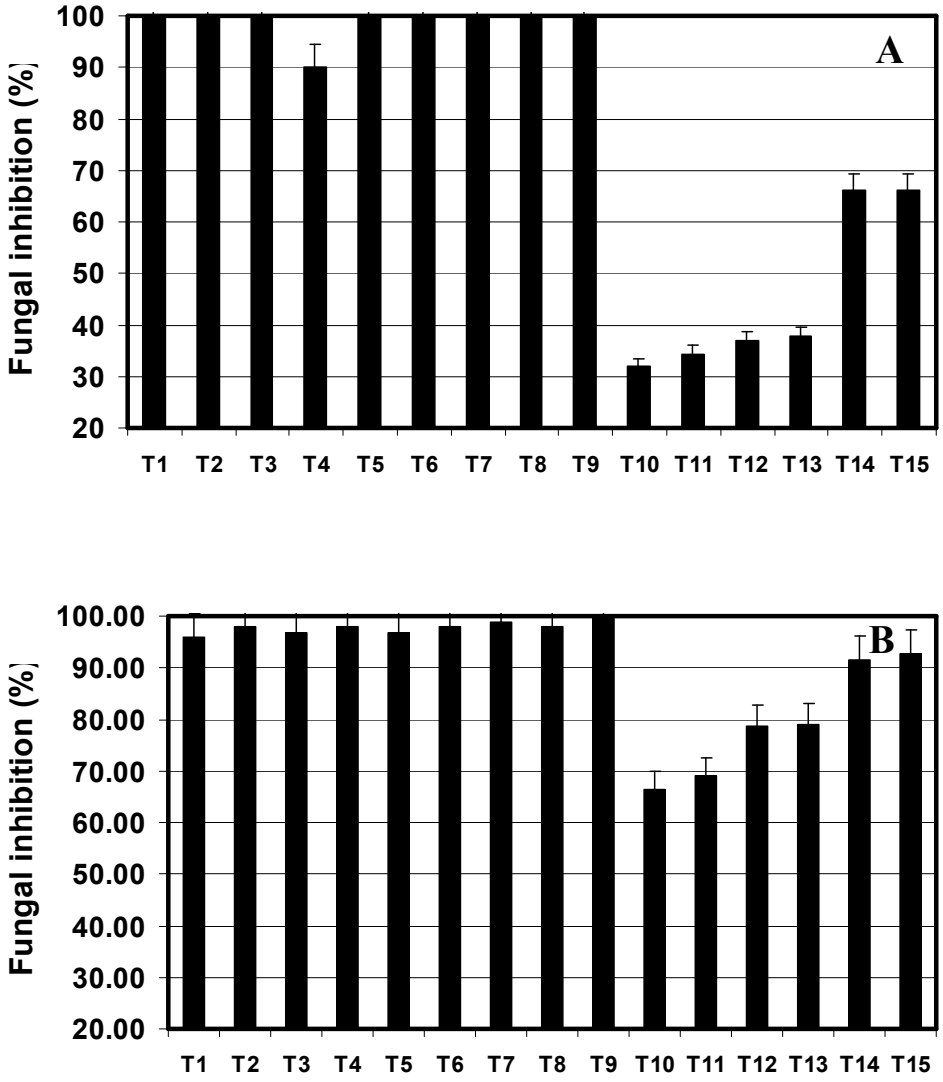
รูปที่ 71: อิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างระดับอุณหภูมิ – ระยะเวลาในการอบลมร้อนต่อการควบคุมการสร้าง - สะสมสารพิษอะฟราท๊อกซินในเมล็ดงาขี้ม้อน

: 50 องศาเซลเซียส, : 60 องศาเซลเซียส, : 70 องศาเซลเซียส, : 80 องศาเซลเซียส, และ : 90 องศาเซลเซียส

3.7.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency – RF heat treatment) และการอบลมร้อน (Oven method – Convectional Drying) ต่อการควบคุมเชื้อรา และการสร้าง/สะสมสารอะฟราท๊อกซินในเมล็ดงาขี้ม้อน และการใช้พลังงานไฟฟ้าในการจัดการ

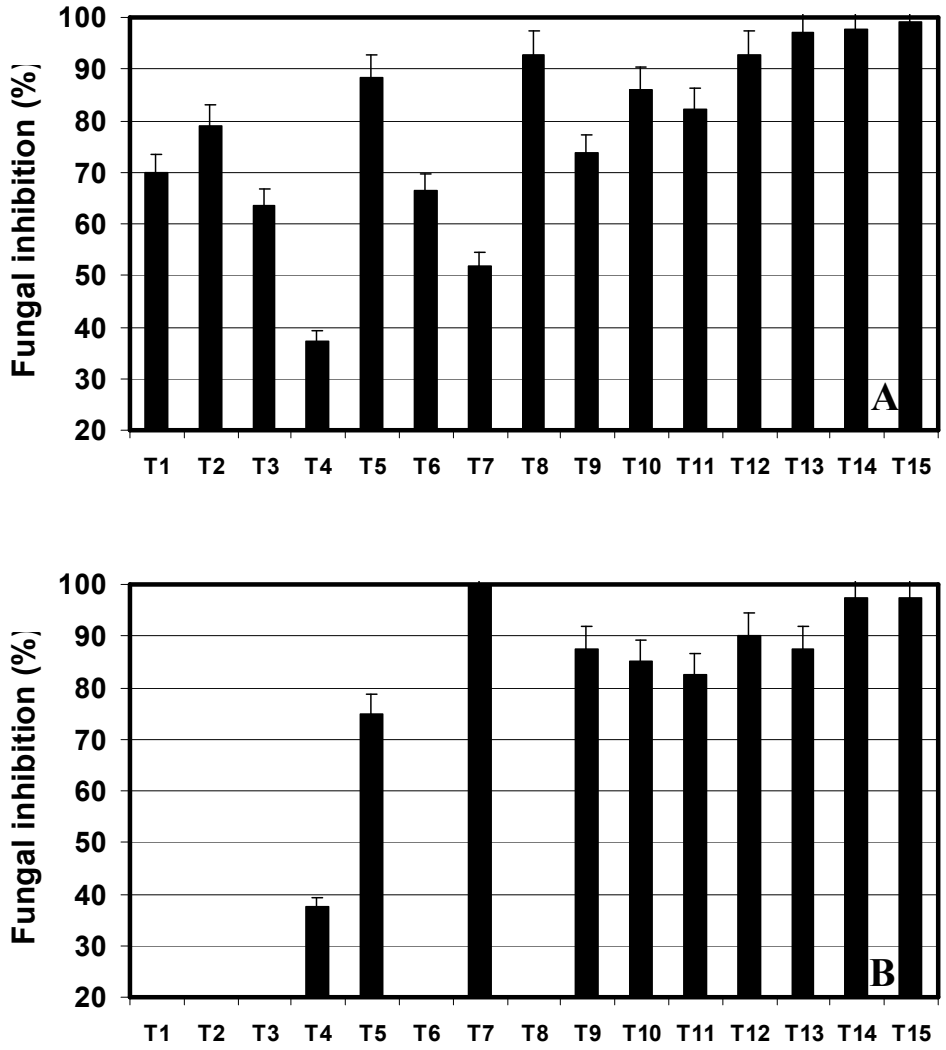
เมื่อเปรียบเทียบศักยภาพในการกำจัดเชื้อราที่ปนเปื้อนกับเมล็ดงาขี้ม้อนที่ระดับความชื้นของเมล็ด14 %-w.b. โดยทำการคัดเลือกกรรมวิธีที่ใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency – RF heat treatment) และการอบลมร้อน (Oven method – Convectional Drying) ที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อราที่ปนเปื้อนบนเมล็ดงาขี้ม้อนที่ดีที่สุดจากการศึกษาที่ 7.1 และ 7.2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาระหว่างทั้งสองกรรมวิธี พบว่า การใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุ (RF method – Radio frequency heat treatment) มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อรา *A. flavus,* และ *A niger* ได้ดีกว่าการใช้อบลมร้อน (Oven method – convectional heat treatment) ในทุกๆระยะเวลาการให้ความร้อน (รูปที่ 72A และ 72B) แต่ทั้งนี้ การใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุ (RF method – Radio frequency heat treatment) มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อรา *Fusarium moniliforme* และ *Penicillium* sp. ด้อยกว่าวิธีการอบลมร้อน (Oven method – convectional heat treatment) ในทุกช่วงระยะเวลาในการให้ความร้อนแต่ละกรรมวิธี (รูปที่ 73A และ 73B)

การสร้าง-สะสมสารพิษอะฟราท๊อกซินบน/ในเมล็ดงาขี้ม้อนจะมีปริมาณการสร้าง/สะสมสอดคล้องกับปริมาณปนเปื้อนของเชื้อรา *A. flavus* ที่หลงเหลืออยู่ ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของใช้ความร้อนจากกรรมวิธีต่างๆ ทั้งการใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุ (RF method – Radio frequency heat treatment) และ วิธีการอบลมร้อน (Oven method – convectional heat treatment) ต่อการควบคุมการปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท๊อกซิน พบว่า ปริมาณสารพิษ อะฟราท๊อกซินที่ตรวจสอบจากเมล็ดงาขี้ม้อนที่ให้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุมีการปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท๊อกซินน้อยกว่าที่ตรวจสอบพบในเมล็ดงาขี้ม้อนที่ผ่านการให้ความร้อนจากการอบลมร้อนถึงสองเท่า ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุมีศักยภาพในการกำจัดเชื้อรา *A. flavus* ได้ดีกว่าการอบลมร้อนที่อุณหภูมิเดียวกัน ระยะเวลาการให้ความร้อนที่นานที่สุด ส่งผลทำให้การใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุสามารถกำจัดเชื้อรา *Aspergillus flavus* จนมีจำนวนเหลือน้อยกว่า และมีการสร้าง/สะสมสารพิษอะฟราท๊อกซินบนเมล็ดงาขี้ม้อนได้น้อยกว่าการอบลมร้อนที่ยังคงมีการปนเปื้อนของเชื้อรา *A. flavus* ในปริมาณสูง ซึ่งส่งผลให้เชื้อราดังกล่าวสามารถสร้าง และสะสมสารพิษอะฟราท๊อกซินบนเมล็ดงาขี้ม้อนได้ในปริมาณ (รูปที่ 74)



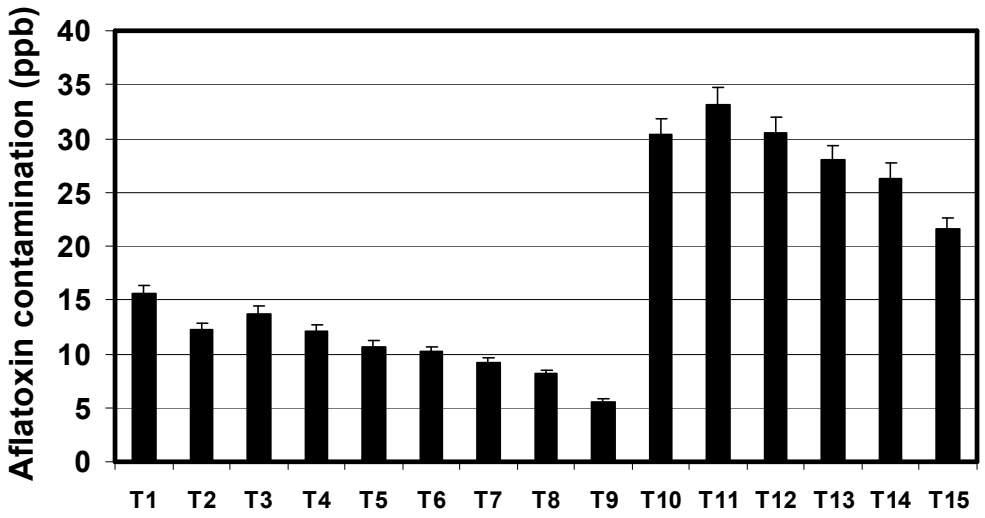
รูปที่ 72: เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency – RF heat treatment) (T1 – T9) และการอบลมร้อน (Oven method – Convectional Drying) (T10 – T15) ต่อการควบคุมเชื้อ *Aspergillus flavus* (A) และ *Aspergillus niger* (B)

T1: RF-70°C 5 min, T2: RF-70°C 7 min, T3: RF-70°C 10 min, T4: RF-80°C 5 min, T5: RF-80°C 7 min, T6: RF-80°C 10 min, T7: RF-90°C 5 min, T8: RF-90°C 7 min, T9: RF-90°C 10 min, T10: CD-70°C 10 min, T11: CD-70°C 30 min, T12: CD-80°C 10 min, T13: CD-80°C 30 min, T14: CD-90°C 10 min, T15: CD-90°C 30 min,



รูปที่ 73: เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency – RF heat treatment) (T1 – T9) และการอบลมร้อน (Oven method – Convectional Drying) (T10 – T15) ต่อการควบคุมเชื้อ *Fusarium moniliforme* (A) และ *Penicillium* sp. (B)

T1: RF-70°C 5 min, T2: RF-70°C 7 min, T3: RF-70°C 10 min, T4: RF-80°C 5 min, T5: RF-80°C 7 min, T6: RF-80°C 10 min, T7: RF-90°C 5 min, T8: RF-90°C 7 min, T9: RF-90°C 10 min, T10: CD-70°C 10 min, T11: CD-70°C 30 min, T12: CD-80°C 10 min, T13: CD-80°C 30 min, T14: CD-90°C 10 min, T15: CD-90°C 30 min,



รูปที่ 74: เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency – RF heat treatment) (T1 – T9) และการอบลมร้อน (Oven method – Convectional Drying) (T10 – T15) ต่อการควบคุมการปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท๊อกซินในเมล็ดงาขี้ม้อน

T1: RF-70°C 5 min, T2: RF-70°C 7 min, T3: RF-70°C 10 min, T4: RF-80°C 5 min, T5: RF-80°C 7 min, T6: RF-80°C 10 min, T7: RF-90°C 5 min, T8: RF-90°C 7 min, T9: RF-90°C 10 min, T10: CD-70°C 10 min, T11: CD-70°C 30 min, T12: CD-80°C 10 min, T13: CD-80°C 30 min, T14: CD-90°C 10 min, T15: CD-90°C 30 min,

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการใช้พลังงานเพื่อกำเนิดความร้อนในแต่ละกรรมวิธีของการใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency – RF heat treatment) และการอบลมร้อน (Oven method – Convectional Drying) พบว่า การใช้พลังงานความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการกำเนิดพลังงานความร้อนน้อยกว่าการใช้ความร้อนจากการอบลมร้อนอย่างมาก โดยการใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุมีการใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 68.20 – 88.00 *1,000 kJ ในขณะที่เมื่อใช้การอบลมร้อนมีการใช้พลังงานไฟฟ้าถึง 3,780 – 4,860 *1000 kJ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อกำเนิดพลังงานความร้อนที่ใช้กำจัดการปนเปื้อนเชื้อรา และสารพิษอะฟราท๊อกซินนั้นใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าการอบลมร้อนปกติมากกว่าถึง 55 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากการใช้คลื่นความถี่วิทยุในการสร้างความร้อนแก่เมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนมีการใช้พลังงานในการสร้างความร้อนน้อยกว่าการอบลมร้อนจากตู้อบไฟฟ้า รวมทั้งระยะเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้อง (Room temperature) ให้มีระดับความร้อนซึ่งเป็นอุณหภูมิเป้าหมาย (Target temperature) เพื่อการกำจัดเชื้อรา และสารพิษอะฟราท๊อกซินนั้น การใช้คลื่นความถี่วิทยุมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่รวดเร็วกว่าการอบลมร้อนจากตู้อบไฟฟ้าอีกด้วย (ตารางที่ 39)

ตารางที่ 39 เปรียบเทียบการใช้พลังงาน (Power consumed; *1,000 kJ) ระหว่างการใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุ และการอบลมร้อนในการควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อรา และสารพิษอะฟราท๊อกซินบนเมล็ดงาขี้ม้อน

Treatments	Power consumed (kJ)
T1	68.20±0.503g
T2	69.80±0.273g
T3	70.20±0.024g
T4	80.90±1.491f
T5	79.60±0.802f
T6	82.20±1.433f
T7	85.20±0.829e
T8	85.60±0.506de
T9	88.00±4.442d
T10	3,780±0.000c
T11	3,780±0.000c
T12	4,320±0.000b
T13	4,320±0.000b
T14	4,860±0.000a
T15	4,860±0.000a

หมายเหตุ: T1: RF-70^{o}C 5 min, T2: RF-70^{o}C 7 min, T3: RF-70^{o}C 10 min, T4: RF-80^{o}C 5 min, T5: RF-80^{o}C 7 min, T6: RF-80^{o}C 10 min, T7: RF-90^{o}C 5 min, T8: RF-90^{o}C 7 min, T9: RF-90^{o}C 10 min, T10: CD-70^{o}C 10 min, T11: CD-70^{o}C 30 min, T12: CD-80^{o}C 10 min, T13: CD-80^{o}C 30 min, T14: CD-90^{o}C 10 min, T15: CD-90^{o}C 30 min,

- ค่าที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3.7.4 การศึกษาการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency – RF heat treatment) ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพเมล็ดงาขี้ม้อน

3.7.4.1 อิทธิพลของการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency – RF heat treatment) ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ – คุณภาพเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน (ตารางที่ 5)

จากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of varience; ANOVA) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน พบว่า ทั้งปัจจัยความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อน อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้คลื่นความถี่วิทยุเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้คลื่นความถี่วิทยุมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน โดยเฉพาะปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิ – ความชื้นเบื่องต้นของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนซึ่งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความมีชีวิต และความแข็งแรงของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน (ตารางที่ 40)

ตารางที่ 40 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of varience; ANOVA) ของอิทธิพลจากระดับอุณหภูม ระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุ และระดับความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อนต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน

Source	Parameters									
	Aw	MC	Germ	SGR	Shoot	Root	GI	DW	Field	EC
MC	*	*	*	ns	ns	ns	*	ns	*	*
Temp	ns	*	*	*	*	*	ns	*	*	*
Time	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
Temp x MC	*	*	*	ns	*	*	*	ns	*	*
Temp x Time	ns	ns	*	ns	*	*	*	ns	*	*
cv	6.03	14.86	43.26	5.67	4.81	4.18	48.17	5.86	32.18	25.14

หมายเหตุ: - *: มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

- Ns: ไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

- MC: ปัจจัยเนื่องจากระดับความชื้นเบื่องต้นของเมล็ดงาขี้ม้อน, Temp: ปัจจัยเนื่องจากระดับอุณหภูมิ และ Time: ปัจจัยเนื่องจากระยะเวลาในการให้ความร้อน

Aw: Seed water activity, MC: Seed moisture content, Germ: Seed germination, SGR: Seedling growth rate, Shoot: Shoot length, Root: Root length, GI: Germination index, DW: Seedling dry weight, Field: Field emergence, EC: Seed electrical conductivity

3.7.4.1.1 ค่ากิจกรรมของน้ำภายในเมล็ด (Aw) Water activity การวัดอัตราส่วนของความดันไอของน้ำ วัดโดยการใช้เครื่องวัดค่า Water Activity Testo 650

จากการศึกษาการใช้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุเพื่อสร้างความร้อนแก่เมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน พบว่า ทุกระดับของอุณหภูมิ 50, 60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียสไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ากิจกรรมของน้ำภายในเมล็ด (Aw) ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ทั้งนี้เป็นเพราะกิจกรรมของน้ำในเมล็ดจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่เมื่อมีการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกใด ๆ ซึ่งในกระบวนการให้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุเพื่อสร้างความร้อนขึ้นจากการสั่นของโมเลกุลน้ำนั้น น้ำในส่วนของน้ำอิสระ (free water) และน้ำที่เป็นองค์ประกอบของโมเลกุล จะมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วยเนื่องจากพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุสามารถผ่านเข้าไปยังโมเลกุลของน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในเมล็ดทั้งส่วนที่เป็นน้ำหมด และในเมล็ดพืชชนิดเดียวกันโมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายในเมล็ดจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่ต้น ดังนั้น ไม่ว่าจะเพิ่มอุณหภูมิไปเท่าไรก็จะมีการเปลี่ยนแปลงกิจกรรมของน้ำในเมล็ดไปในระดับที่เท่ากัน

ในขณะที่เมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาในการให้คลื่นความถี่วิทยุ พบว่า ทุก ๆ ระยะเวลาในการให้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุแก่เมล็ดงาขี้ม้อนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ากิจกรรมของน้ำภายในเมล็ด (Aw) ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ทั้งนี้เนื่องจากในการให้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุจะเป็นการให้พลังงานที่เป็นการสั่นสะเทือนโมเลกุลน้ำภายในเมล็ดโดยจะมีค่าคงที่ตั้งแต่ต้น ทุก ๆ โมเลกุลของน้ำที่ได้รับพลังงานจะมีการเปลี่ยนแปลงไปในทันทีตั้งแต่เริ่มแรกที่ได้รับพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ของโมเลกุลน้ำจึงเกิดขึ้นแล้ว ดังนั้นค่ากิจกรรมของน้ำในเมล็ดจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทันทีทั้งหมด เพราะโมเลกุลน้ำทั้งหมดได้รับพลังงานพร้อม ๆ กันในระดับที่เท่า ๆ กันไม่ว่าจะระยะเวลาผ่านไปนานเท่าไรกิจกรรมของน้ำในเมล็ดก็จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ

เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยความชื้นเบื้องต้นของเมล็ดงาขี้ม้อนก่อนได้รับพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ พบว่า ที่ระดับความชื้น 10 และ 14 % w.b. ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากิจกรรมของน้ำภายในเมล็ดภายหลังจากได้รับพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ แต่ที่ระดับความชื้นเบื้องต้น 18 % w.b. ทีผลทำให้กิจกรรมของน้ำภายในเมล็ดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เนื่องจากเมล็ดที่มีระดับความชื้น 10 และ 14 % w.b. กิจกรรมของน้ำภายในเมล็ดจะเกิดขึ้นได้มากกว่าเมล็ดที่มีระดับความชื้น 18 % w.b. เนื่องจาก เมื่อมีการให้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุในระดับที่เท่ากัน พลังงานจะมีการดูดซับโดยโมเลกุลของน้ำในเมล็ด และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน และไปเปลี่ยนกิจกรรมของน้ำภายในเมล็ดซึ่งเมล็ด ที่มีระดับความชื้น 10 และ 14 % w.b.จะมีน้ำในเมล็ดที่เหมาะสมพอดี แต่ ที่เมล็ดที่มีระดับความชื้น 18 % w.b.ปริมาณน้ำที่มากเกิน จะทำให้ พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุที่ให้กับเมล็ดถูกโมเลกุลของน้ำดูดซับไปใช้ในกระบวนการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำเสียเป็นส่วนใหญ่ และเนื่องจากปริมาณน้ำที่มากนี้จะทำให้พลังงานที่เท่า ๆ กันกับทีให้ในเมล็ดที่มี

ระดับความชื้น 10 และ 14 % w.b. ไปเปลี่ยนแปลงกิจกรรมของน้ำในเมล็ดได้น้อยกว่าทำให้ การวัดค่ากิจกรรมของน้ำในเมล็ดที่เมล็ดที่มีระดับความชื้น 18 % w.b มีค่าต่ำกว่าเมล็ดที่มีระดับอื่น ๆ

3.7.4.1.2 การทดสอบความงอกมาตรฐานของเมล็ดงาขี้ม้อน (Standard Germination)

จากการศึกษาอิทธิพลของคลื่นความถี่วิทยุต่อการเปลี่ยนแปลงความงอกของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน พบว่า ในการเพิ่มระดับอุณหภูมิแก่เมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนจะทำให้ความงอกของเมล็ดลดลงในทุก ๆ ระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 50°C เมล็ดจะยังมีความงอกอยู่สูงที่สุด และเมื่อเพิ่มระดับความร้อนไปเป็น 60 และ70 °C ความงอกของเมล็ดก็จะลดต่ำลง จนเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 และ90 °C จะทำให้เมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนสูญเสียความงอกโดยสิ้นเชิง

ทั้งนี้ ในการให้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุแก่เมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนนั้นเมื่อการเกิดความร้อนต้องอาศัยน้ำในเมล็ดเป็นตัวดูดซับพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุมาเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งในเมล็ดพืชใด ๆ ส่วนที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบมากที่สุดคือส่วนของต้นอ่อน (embryo) ซึ่งยังมีชีวิตอยู่ เพราะเป็นส่วนที่มีองค์ประกอบของอวัยวะต้นอ่อนต่าง ๆ มีสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่มาก เมื่อเทียบกับส่วนที่เป็นอาหารสะสม (endosperm) ซึ่งเมื่อมีการให้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งจะทำให้โมเลกุลน้ำเกิดการสั่นสะเทือนเป็นความร้อนเกิดขึ้น ส่วนใดที่มีความชื้น หรือปริมาณน้ำที่สูงกว่าก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มากกว่าและรวดเร็วกว่า ดังนั้น ในการแสดงผลการวัดอุณหภูมิที่วัดได้จะเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของเมล็ดทั้งหมด ซึ่งในความเป็นจริงแล้วในส่วนของต้นอ่อนจะมีอุณหภูมิที่สูงกว่า รวมทั้งต้นอ่อนจะมีองค์ประกอบทางโปรตีนอยู่ ซึ่งจะมีขีดจำกัดในการทนอุณหภูมิได้ไม่สูงมากนัก ซึ่งหากอุณหภูมิที่สูงมีผลทำให้โครงสร้างโปรตีนต่าง ๆ เสียไป คุณภาพของต้นอ่อนก็จะสูญเสียไปด้วยเช่นกัน ดังนั้น ในการเพิ่มอุณหภูมิทุก ๆ ระดับก็จะเป็นการสร้างความเสียหายโดยตรงต่อต้นอ่อนในเมล็ดงาขี้ม้อน และเมื่อเพิ่มระดับอุณหภูมิสูงขึ้นไป นถึงจุด ๆ หนึ่งที่เกิดความร้อนในต้นอ่อนเมล็ดมากเกินพอต้นอ่อนก็จะตายทำให้ความงอกของเมล็ดหมดไปในที่สุด

เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยของระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อสร้างความร้อนแก่เมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน พบว่า ในทุก ๆ ระยะเวลาในการให้พลังงานคลื่นความถี่วิทยุแก่เมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความงอกของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน ทั้งนี้เป็นเพราะในการให้พลังงานคลื่นความถี่วิทยุไม่ว่าจะที่ระดับความร้อนเท่าไรก็ตาม ณ จุดเริ่มต้นของการให้พลังงานคลื่นความถี่วิทยุจะมีการเพิ่มของอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้อง ไปเป็นอุณหภูมิเป้าหมาย (Target temperature) และเมื่อถึงจุด ๆ นั้นแล้วระดับอุณหภูมิจะคงที่ โดยการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ภายในเมล็ดในส่วนของต้นอ่อนนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลง และหยุดการเปลี่ยนแปลงนั้น ๆ ทันทีที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินั้นจบลง และเมื่ออุณหภูมิมีความคงที่แล้วจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ อีก ดังนั้น ค่าความงอกของเมล็ดพันธุ์ มื่อเริ่มมีการให้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุจะเริ่มมีความเสียหายจากความร้อนที่

เกิดขึ้นนั้น ๆ ตามระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้น และค่าความงอกจะไม่เปลี่ยนแปลงเพิ่มอีกตามระยะเวลาที่มีการให้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุที่นานขึ้น

เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยความชื้นเบื้องต้นของเมล็ดงาขี้ม้อนก่อนได้รับพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ พบว่า ที่ระดับความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อนที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความงอกของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เป็นเพราะความชื้นเป็นปัจจัยหลักในกระบวนการสร้างความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุ โดยในวัสดุใด ๆ ที่มีปริมาณโมเลกุลของน้ำที่มากกว่า การเกิดความร้อนขึ้นจากคลื่นความถี่วิทยุก็จะเกิดขึ้นได้มากกว่า และส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับของอุณหภูมิที่ใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่าในระดับพลังงานที่เท่ากัน ในเมล็ดงาขี้ม้อนที่ระดับความชื้น 18 % w.b. จะมีปริมาณน้ำที่มากกว่าเมล็ดงาขี้ม้อนที่ 10 และ 14 % w.b. ดังนั้น ในระดับพลังงานที่เท่ากัน การเปลี่ยนแปลงของระดับอุณหภูมิจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วกว่า การเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันจะส่งผลเสียหายต่อองค์ประกอบภายในเซลล์พืชที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ ซึ่งในเมล็ดพันธุ์องค์ประกอบที่มีน้ำอยู่มากที่สุดก็คือต้นอ่อนนั่นเอง ดังนั้น ที่ระดับพลังงานเท่ากัน ความชื้นในเมล็ดที่สูงกว่า ก็จะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อต้นอ่อนที่มากกว่าความงอกของเมล็ดก็จะลดลงมากกว่าด้วย

3.7.4.1.3 การเปลี่ยนแปลงความยาวยอด (Shoot length) และความยาวราก (Root length) ของต้นอ่อนงาขี้ม้อน

จากการศึกษาคลื่นความถี่วิทยุที่เกิดเนิดความร้อนที่ระดับอุณหภูมิสูงขึ้นมีผลทำให้ความยาวยอด และความยาวรากของต้นอ่อนงาขี้ม้อนลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เนื่องจากในการให้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุเพื่อการสร้างความร้อนแก่เมล็ดงาขี้ม้อน ความร้อนที่เกิดขึ้น ณ บริเวณส่วนที่เป็นต้นอ่อนซึ่งมีความชื้นอยู่สูง จะไปสร้างความเสียหายให้แก่บริเวณยอด และรากของต้นอ่อนซึ่งเป็นส่วนที่มีความชื้นเป็นองค์ประกอบอยู่มาก เมื่อยอด และรากต้นอ่อนได้รับความร้อนจากจากคลื่นความถี่วิทยุจะทำให้ส่วนที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบเกิดความร้อนขึ้นจนทำให้เกิดความผิดปกติในระดับเซลล์พืช และเซลล์พืชเหล่านั้น ก็จะเป็นเซลล์ที่ผิดปกติ จะมีการเจริญเติบโตที่ไม่สมบูรณ์ทำให้การเพิ่มขนาดของยอด และรากเป็นไปในแนวโน้มที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 80 และ 90 °C ความร้อนในระดับนี้ จะสร้างความเสียหายทั้งต่อเซลล์พืช สารเคมีภายในเมล็ดที่จำเป็นต่อกระบวนการสร้างเนื้อเยื่อต่าง ๆ เมื่อองค์ประกอบที่จำเป็นในกระบวนการงอกถูกทำลายไป การสร้างเนื้อเยื่อและเซลล์ต่าง ๆ ก็จะลดน้อยลง

เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยของระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อสร้างความร้อนแก่เมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน พบว่า ทุก ๆ ระยะเวลาในการให้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุแก่เมล็ดงาขี้ม้อน พบว่าความยาวยอด และรากของต้นอ่อนลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อมีการให้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุในระยะเวลาที่นานขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อเริ่มให้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุใน

ระยะแรกความร้อนจะเกิดขึ้นจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิเป้าหมาย (Target temperature) เมื่อถึงอุณหภูมิเป้าหมายไม่ว่าระยะเวลาผ่านไปนานเท่าไรก็จะมีอุณหภูมิคงที่เสมอ ความเสียหายจากการที่เซลล์บริเวณยอด และรากของต้นอ่อนงาขี้ม้อนที่ได้รับจากคลื่นความถี่วิทยุจะเกิดขึ้นไปแล้วในระดับหนึ่งแต่เมื่อเวลาผ่านไปเซลล์พืชจะมีการสูญเสียน้ำมีผลทำให้เซลล์จะสูญเสียสภาพ เกิดการเสียหายต่อผนังโครงสร้างเซลล์พืชในส่วนที่มีน้ำคอยสร้างแรงดันให้เซลล์มีสภาพเซลล์คงรูป อีกทั้งความเสียหายจะยังเกิดขึ้นกับสารประกอบที่เป็นสารเคมีในเซลล์พืช เมื่อเซลล์ยอด และราเสียหายความสามารถในการสร้างยอด และรากก็ลดลงตามลำดับ

เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยความชื้นเบื้องต้นของเมล็ดงาขี้ม้อนก่อนได้รับพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ พบว่าการให้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุแก่เมล็ดงาขี้ม้อนมีผลทำให้ความยาวยอดและรากของต้นอ่อนงาขี้ม้อนลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุก ๆ ระดับของความชื้นเบื้องต้นของเมล็ดพันธุ์ ทั้งนี้เป็นเพราะในการให้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุที่เท่าๆกันนั้น ความเร็วในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะแปรผันตามปริมาณน้ำในเมล็ด โดยที่การเปลี่ยนแปลงระดับของอุณหภูมินั้นยิ่งเปลี่ยนแปลงเร็วเท่าไรเซลล์พืชก็จะไม่สามารถปรับตัวรับกับความเปลี่ยนแปลงนั้น ๆ ได้ อีกทั้งความร้อนที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดการเสียหายบริเวณเนื้อเยื่อเจริญ โดยเฉพาะบริเวณของส่วนยอดอ่อน และรากได้ ทำให้ เมื่อเกิดกระบวนการงอกยอดอ่อน และรากที่ได้รับความเสียหายนั้น จะไม่สามารถขยายขนาดให้มีความยาวยอดมากพอที่จะเจริญเติบโตเป็นต้นได้

3.7.4.1.5 อัตราการเจริญเติบโต (Seeding growth rate)

จากการศึกษาคลื่นความถี่วิทยุที่เกิดเนิดความร้อนที่ระดับอุณหภูมิสูงขึ้นมีผลทำให้เมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนมีอัตราการเจริญเติบโตลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อมีระดับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะในการเจริญเติบโตของต้นอ่อนนั้น ส่วนประกอบของต้นอ่อนแต่ละส่วน จะมีความสัมพันธ์ซึ่งกัน และกันต่อการเจริญเติบโตของต้นอ่อน ถ้าส่วนหนึ่งส่วนใดมีความบกพร่องไป อันเนื่องจากในที่นี้ ยอดและรากจะเสียหายจากความร้อนโดยความถี่วิทยุ จึงส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตก็จะมีค่าลดลงตามนั้น

อัตราการเจริญเติบโตในทุก ๆ ช่วงระยะเวลา และระดับความชื้นของเมล็ดพันธุ์ในการให้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุ พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการให้คลื่นความถี่วิทยุนานขึ้น และระดับความชื้นของเมล็ดพันธุ์เบื่องต้นสูง

3.7.4.1.6 ดัชนีการงอก (Germination index) การสะสมน้ำหนักแห้งของต้นอ่อน (Seedling dry weight)

จากการทดลองให้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุแก่เมล็ดงาขี้ม้อน พบว่า ดัชนีความงอกของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน และการสะสมน้ำหนักแห้งของต้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตามระดับ

อุณหภูมิ ระยะเวลาในการให้พลังงานความถี่วิทยุ และระดับความชื้นเบื้องต้นของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนที่เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากคลื่นความถี่วิทยุมีผลทำให้เกิดความเสียหายในระดับเซลล์ และมีผลทำให้องค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆภายในของเมล็ดพันธุ์เสื่อมสภาพ หรือสูญเสียกิจกรรมไป โดยเฉพาะองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญต่อกระบวนการงอกของเมล็ดพันธุ์ เช่น การทำงานของเอนไซม์ หรือฮอร์โมนพืชต่าง ๆ ซึ่งทำให้เมล็ดพันธุ์สามารถงอกได้ช้าลง และเนื่องจากการสูญเสียของผนังเซลล์ จึงส่งผลทำให้การสะสมน้ำหนักแห้งของต้นอ่อนลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

3.7.4.1.7 การวัดค่านำไฟฟ้า (Electrical conductivity test)

จากการศึกษาอิทธิพลของระดับอุณหภูมิ ระยะเวลา และความชื้นเบื้องต้นของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน พบว่า ปัจจัยทั้งสามมีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้าของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เนื่องจากคลื่นความถี่วิทยุมีผลทำให้เกิดความสูญเสียสภาพของผนังเซลล์ต่าง ๆ ภายในเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน ส่งผลทำให้การซ่อมแซนผนังเซลล์หลังจากได้รับความชื้นเป็นไปอย่างไม่สมบูรณ์ ส่งผลทำให้เกิดช่องว่าง – ปริแตกออกบริเวณผนังเซลล์ทำให้เกิดการรั่วไหลของประจุต่าง ๆ จากภายในเซลล์สู่สารละลายภายนอก ทำให้เมื่อทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าจะพบเมล็ดพันธุ์ดังกล่าวมีค่าการนำไฟฟ้าในระดับที่สูง

3.7.4.1.8 การทดสอบความงอกของเมล็ดงาขี้ม้อนภายใต้สภาพแปลงปลูก (Field emergence)

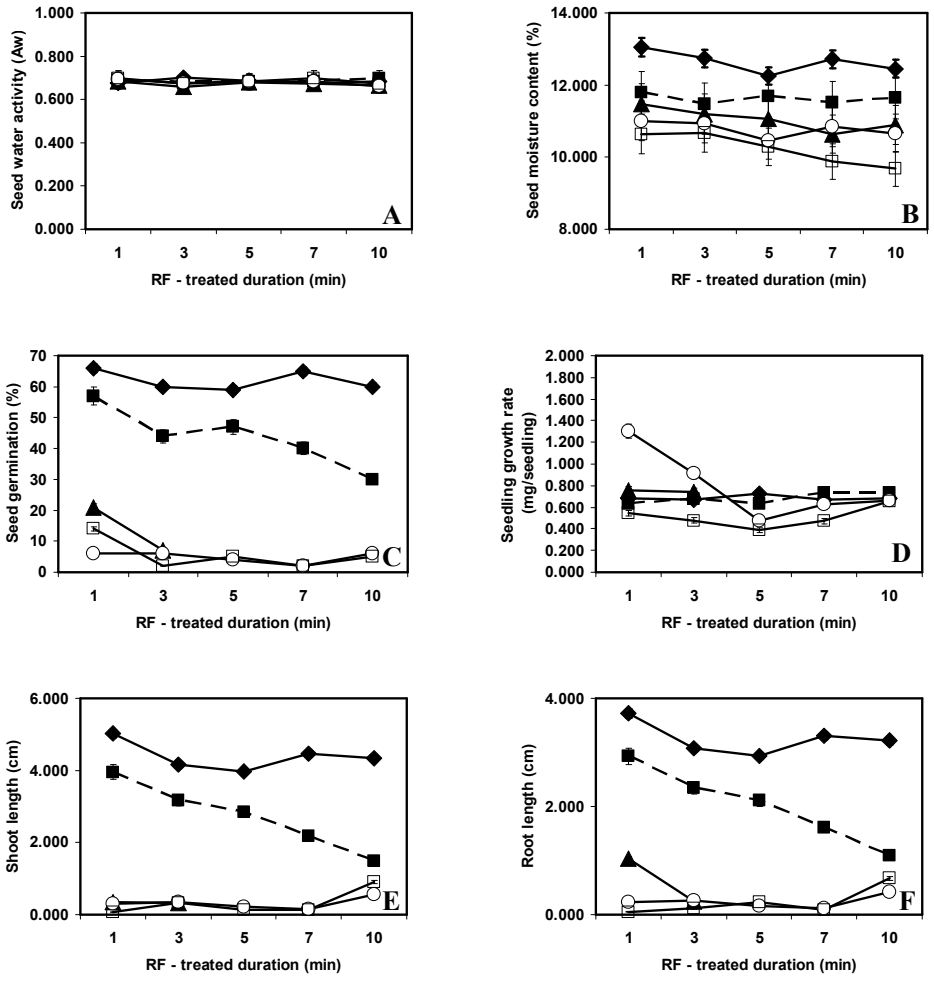
จากการศึกษาอิทธิพลของระดับอุณหภูมิ ระยะเวลา และความชื้นเบื้องต้นของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน พบว่า ในการเพิ่มระดับของอุณหภูมิแก่งาขี้ม้อน จะทำให้ความงอกของเมล็ดภายใต้สภาพแปลงปลูกลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ระยะเวลาในการให้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุมีผลทำให้ความสามารถในการงอกภายใต้สภาพแปลงปลูกมีแนวโน้วลดลงเช่นกัน ในขณะที่เมล็ดพันธุ์ที่มีความชื้นเบื้องต้นอยู่ในระดับสูงจะสามารถรักษาความสามารถในการงอกภายใต้สภาพแปลงปลูกได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดพันธุ์ที่มีความชื้นต่ำ

โดยอิทธิพลร่วมระหว่างระดับอุณหภูมิในการใช้คลื่นความถี่วิทยุ – ระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนแสดงดังรูปที่ 20 และรูปที่ 21 และระดับอุณหภูมิในการใช้คลื่นความถี่วิทยุ – ระดับความชื้นเบื้องต้นของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนแสดงดังรูปที่ 75 - รูปที่ 78 และตารางที่ 41

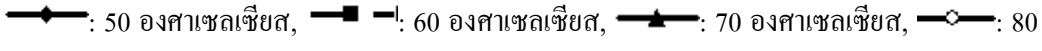
ตารางที่ 41: อิทธิพลของระดับความชื้นเบื้องต้นของเมล็ดพันธุ์ ระดับอุณหภูมิ และระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุต่อการเปลี่ยนคุณภาพเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน

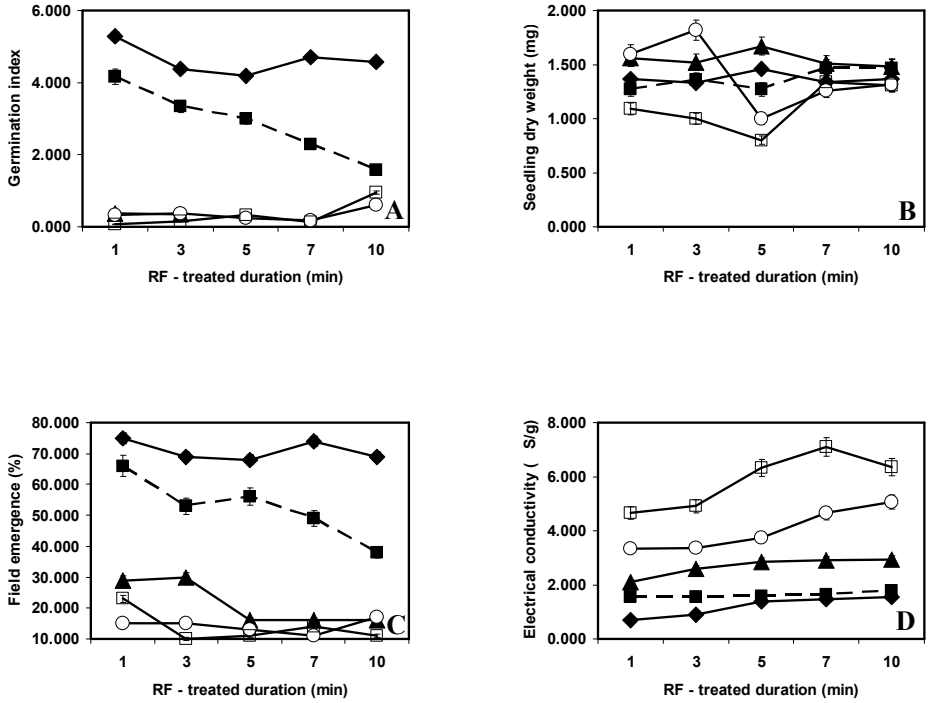
Treatment	Aw	MC	DW	EC	Field	GI	Root	SGR	Shoot	germ
Grain moisture content (%-db)										
10	0.6513±0.037b	8.63±1.098c	1.2547±0.861b	2.773±1.695b	33.264±26.947b	1.8071±2.206ab	1.272±1.552ab	0.6538±0.448ab	1.7169±2.096ab	30.253±25.041a
14	0.7008±0.048a	11.52±1.576b	1.3076±0.895ab	3.2392±2.130a	32.907±27.916b	1.6789±2.097b	1.1819±2.095b	0.6273±0.430b	1.5949±1.990b	24.264±26.947b
18	0.6948±0.055a	13.53±2.821a	1.5093±0.743a	3.1459±1.965a	39.253±25.041a	2.0091±1.708a	1.4136±1.708a	0.7547±0.371a	1.9084±1.622a	23.907±27.916b
RF treated temperature (oC)										
50	0.6848±0.041a	12.64±3.801a	1.3667±0.199ab	1.152±0.374e	71.133±12.172a	4.6489±1.106a	3.2722±0.779a	0.6833±0.099ab	4.4164±1.051a	62.133±12.172a
60	0.6851±0.056a	11.42±2.809b	1.3533±0.187b	1.5947±0.090d	54.822±15.863b	3.0071±1.402b	2.116±0.986b	0.6767±0.093b	2.8567±1.332b	45.822±15.863b
70	0.6767±0.052a	11.05±2.051b	1.5549±0.322ab	2.6036±0.394c	24.152±17.115c	1.002±1.286c	0.7053±0.904c	0.7775±0.161ab	0.9511±1.222c	15.152±17.115c
80	0.68±0.057a	10.79±2.333bc	1.6911±1.153a	3.9162±1.065b	14.333±5.681d	0.3556±0.434d	0.2502±0.305d	0.8456±0.576a	0.3382±0.412d	5.333±5.681d
90	0.6767±0.054a	10.23±2.208c	0.82±1.270c	5.9969±1.403a	11.267±5.441d	0.1449±0.339d	0.102±0.238d	0.41±0.635c	0.138±0.322e	2.267±5.441d
RF treated duration (min)										
1	0.6862±0.044a	11.39±3.017a	1.5194±1.198a	2.389±1.421e	36.263±29.532a	2.034±2.349a	1.4313±1.652a	0.7597±0.599a	1.932±2.231a	27.263±29.532a
3	0.6758±0.066a	11.29±2.850a	1.4133±0.693ab	2.6358±1.540d	36.889±26.571a	2.0018±2.002a	1.4087±1.409a	0.7067±0.347ab	1.9018±1.903a	27.889±26.571a
5	0.6912±0.050a	11.25±2.982a	1.3067±0.745ab	3.0107±1.701c	34.2±23.760a	1.7093±1.648ab	1.2033±1.160ab	0.7044±0.372ab	1.6242±1.566ab	25.2±23.760a
7	0.6763±0.045a	11.20±2.553a	1.1378±0.725b	3.4436±2.107b	35.311±28.949a	1.7529±2.108ab	1.234±1.484ab	0.5689±0.363b	1.6653±2.003ab	26.311±28.949a
10	0.682±0.052a	11.03±2.757a	1.4089±0.720ab	3.7844±2.469a	33.044±25.297a	1.6604±1.937c	1.1684±1.366b	0.7044±0.360ab	1.5771±1.840b	24.044±25.297a

Aw: Seed water activity, MC: Seed moisture content, DW: Seedling dry weight, EC: Seed electrical conductivity, Field: Field emergence, GI: Germination index, Root: Root length, SGR: Seedling growth rate, Shoot: Shoot length, Germ: Seed germination, - ค่าที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

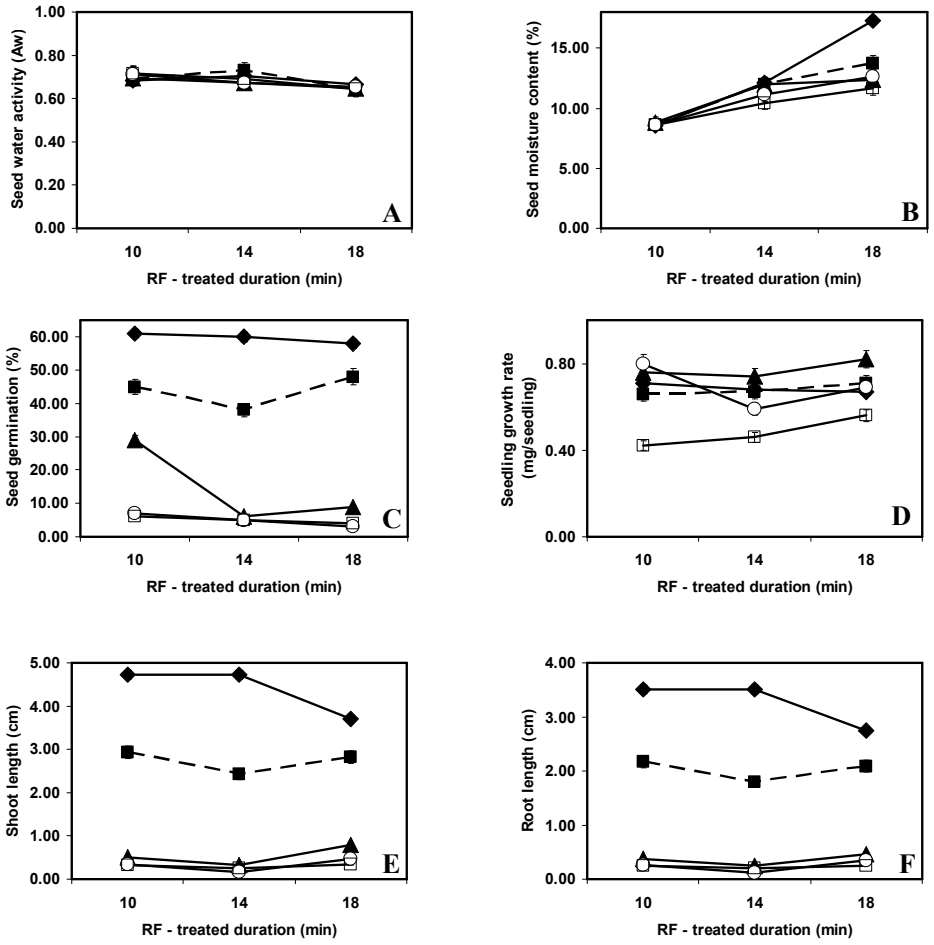


รูปที่ 75: อิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างระดับอุณหภูมิ – ระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุต่อการเปลี่ยนแปลงกิจกรรมของน้ำภายใน (Seed water activity) (A), ความชื้นของเมล็ดพันธุ์ (B), ความงอกของเมล็ดพันธุ์ (Seed germination) (C), อัตราการเจริญเติบโตของต้นอ่อน (Seedling growth rate) (D), ความยาวยอด (Shoot length) (E), และความยาวราก (Root length) (F)



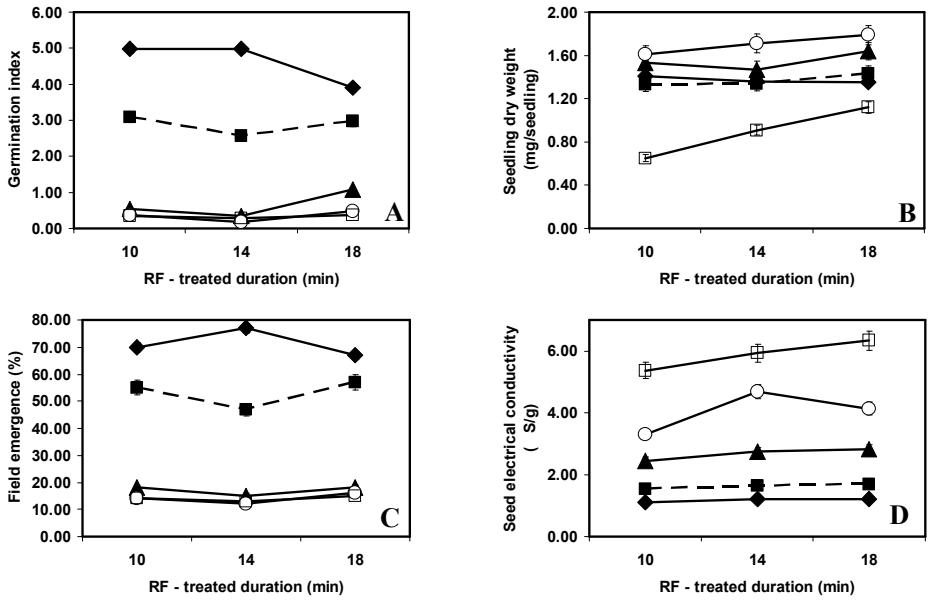


รูปที่ 76: อิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างระดับอุณหภูมิ – ระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุต่อการเปลี่ยนแปลงการเปลี่ยนแปลงดัชนีการงอกของเมล็ดพันธุ์ (Germination index) (A), น้ำหนักแห้งของต้นอ่อน (Seedling dry weight) (B), ความสามารถในการงอกภายใต้สภาพแปลงปลูก (Field emergence) (C), และ ค่าการนำไฟฟ้าของเมล็ดพันธุ์ (Seed electrical conductivity) (D)
: 50 องศาเซลเซียส, : 60 องศาเซลเซียส, : 70 องศาเซลเซียส, : 80 องศาเซลเซียส, และ : 90 องศาเซลเซียส



รูปที่ 77: อิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างระดับอุณหภูมิ – ระดับความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อนต่อการเปลี่ยนแปลงกิจกรรมของน้ำภายใน (Seed water activity) (A), ความชื้นของเมล็ดพันธุ์ (B), ความงอกของเมล็ดพันธุ์ (Seed germination) (C), อัตราการเจริญเติบโตของต้นอ่อน (Seedling growth rate) (D), ความยาวยอด (Shoot length) (E), และความยาวราก (Root length) (F)

—◆—: 50 องศาเซลเซียส, —■ - -■—: 60 องศาเซลเซียส, —▲—: 70 องศาเซลเซียส, —○—: 80 องศาเซลเซียส, และ —□—: 90 องศาเซลเซียส



รูปที่ 78: อิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างระดับอุณหภูมิ – ระดับความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อนต่อการเปลี่ยนแปลงการเปลี่ยนแปลงดัชนีการงอกของเมล็ดพันธุ์ (Germination index) (A), น้ำหนักแห้งของต้นอ่อน (Seedling dry weight) (B), ความสามารถในการงอกภายใต้สภาพแปลงปลูก (Field emergence) (C), และ ค่าการนำไฟฟ้าของเมล็ดพันธุ์ (Seed electrical conductivity) (D)

: 50 องศาเซลเซียส, : 60 องศาเซลเซียส, : 70 องศาเซลเซียส, : 80 องศาเซลเซียส, และ : 90 องศาเซลเซียส

3.7.4.2 อิทธิพลของการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency – RF heat treatment) ต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดงาขี้ม้อน

จากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of varience; ANOVA) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทุยต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีที่สะสมภายในเมล็ดงาขี้ม้อน พบว่า ทั้งปัจจัยความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อน อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้คลื่นความถี่วิทยุเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้คลื่นความถี่วิทยุมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีภายในเมล็ดงาขี้ม้อน โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาถึงปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิในการใช้คลื่นความถี่วิทยุ – ความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปัจจัยร่วมดังกล่าวเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณองค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ ที่สะสมในเมล็ดงาขี้ม้อน (ตารางที่ 42)

ตารางที่ 42 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of varience; ANOVA) ของอิทธิพลจากระดับอุณหภูม ระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุ และระดับความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อนต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ ที่สะสมในเมล็ดงาขี้ม้อน

Source	Parameters															
	Protein	Antiox	APX	SOD	LOX	Lipid	Linolenic	Linoleic	Oleic	Palmatic	Steric	Carbo	Glu	Su	Lac	Mal
MC	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Ns	Ns	Ns
Temp	*	Ns	Ns	*	*	*	*	*	*	*	*	Ns	Ns	*	*	*
Time	Ns	Ns	Ns	Ns	*	Ns	*	*	*	*	*	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns
Temp x MC	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Temp x Time	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns
CV	16.01	17.52	17.51	14.88	8.11	8.11	7.46	7.00	7.17	7.96	7.38	13.26	12.98	13.84	13.41	11.78

หมายเหตุ: - *: มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

- Ns: ไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

- MC: ปัจจัยเนื่องจากระดับความชื้นเบื้องต้นของเมล็ดงาขี้ม้อน, Temp: ปัจจัยเนื่องจากระดับอุณหภูมิ และ Time: ปัจจัยเนื่องจากระยะเวลาในการให้ความร้อน

- Protein: Total protein content, Antiox: Total antioxidant activity, APX: Ascorbate peroxidase enzymatic activity, SOD: Superoxide dismutase enzymatic activity, LOX: Lipoxygenase enzymatic activity, Lipid: Total lipid content, Linolenic: α - Linolenic acid (w-3), Linoleic: Linoleic acid (w-6), Oleic: Oleic acid (w-9), Steric: Steric acid, Palmatic: Palmatic acid, Carbo: Carbohydrate content, Glu: Glucose, Su: Sucrose, Lac: Lactose, Mal: Maltose

จากตารางที่ 43 การศึกษาอิทธิพลของการใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนทั้งหมด (Total protein), กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระรวม (Total antioxidant activity), กิจกกรมการทำงานของเอนไซม์ Ascorbate peroxidase, Superoxide dismutase, และ Lipoxygenase ของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน พบว่า เมื่อมีการให้พลังงานคลื่นความถี่วิทยุเพื่อสร้างความร้อนขึ้นในเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนมีผลทำให้ปริมาณโปรตีนทั้งหมด (Total Protein) ที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียสไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึงระดับ 80 และ 90 องศาเซลเซียสมีผลทำให้ปริมาณโปรตีนรวมลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันเมื่อพิจารณาถึงกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระรวม (Total antioxidant activity) โดยกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระรวมสูงที่ระดับอุณหภูมิ 50 – 70 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นตั้งแต่ 80°C ขึ้นไปส่งผลให้ลดกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระรวมภายในเมล็ดงาขี้ม้อนลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ Ascorbate peroxidase (APX) และ Superoxide dismutase (SOD) พบว่ามีแนวโน้มการทำงานของเอนไซม์ทั้งสองลดลงตามระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้น แต่ทั้งนี้กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ Lipoxygenase (LOX) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเท่าไรก็ตาม

เมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาเริ่มต้นในการใช้พลังงานคลื่นความถี่วิทยุในการกำเนิดพลังงานความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนทั้งหมด (Total protein), กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระรวม (Total antioxidant activity), กิจกกรมการทำงานของเอนไซม์ Ascorbate peroxidase, Superoxide dismutase, และ Lipoxygenase ของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน พบว่า ปริมาณโปรตีนทั้งหมด (Total Protein) กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระรวม(Total antioxidant activity) และกิจกกรมการทำงานของเอนไซม์ Ascorbate peroxidase (APX) มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการใช้ระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุในการกำเนิดพลังงานความร้อนนานขึ้น โดยเฉพาะเมื่อระยะเวลาผ่านไปที่ 7 และ 10 นาที ปริมาณโปรตีนรวม กิจกรรมการต้านอุนมูลอิสระ และกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ APX ลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ Lipoxygenase (LOX) และเอนไซม์ Superoxide dismutase (SOD) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆเมื่อระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุในการกำเนิดพลังงานความร้อนแก่เมล็ดงาขี้ม้อน

เมื่อพิจารณาถึงระดับความชื้นของเมล็ดงาที่ผ่านการใช้คลื่นความถี่วิทยุต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนทั้งหมด (Total protein), กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระรวม (Total antioxidant activity), กิจกกรมการทำงานของเอนไซม์ Ascorbate peroxidase, Superoxide dismutase, และ Lipoxygenase ของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน พบว่า ความชื้นของเมล็ดขี้ม้อนที่ระดับตั้งแต่ 14 - 18 % w.b เมื่อผ่านการใช้คลื่นความถี่วิทยุมีผลทำให้ปริมาณโปรตีนทั้งหมด (Total Protein) และกิจกรรมการ

ต้านอนุมูลอิสระรวม (Total antioxidant activity) และกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ทั้งสามชนิดภายในเมล็ดงาขี้ม้อนลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 43 อิทธิพลของอุณหภูมิจากคลื่นความถี่วิทยุต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนทั้งหมด (Total protein), กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระรวม (Total antioxidant activity), กิจกกรมการทำงานของเอนไซม์ Ascorbate peroxidase, Superoxide dismutase, และ Lipoxygenase ของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน

Treatment	Total Protein	Total antioxidant activity	APX	LOX	SOD
Grain moisture content (%-db)					
10	21.100±2.6519a	2.658±0.6165b	0.390±0.0854a	6.546±1.0449a	0.945±0.0991a
14	21.072±4.0720a	3.312±0.4103a	0.390±0.0483a	6.624±0.8206a	0.839±0.0685b
18	16.760±3.0699b	3.319±0.7262a	0.313±0.0725b	5.316±1.2330b	0.835±0.0642b
RF treated temperature (oC)					
50	2.686±0.295a	68.035±7.250b	19.410±2.165a	20.167±0.665a	10.340±1.401a
60	2.611±0.253a	67.402±6.549b	18.44±01.561bc	19.350±5.973a	10.215±1.276a
70	2.615±0.245a	66.562±6.797b	18.2921.619bc	18.968±3.951a	10.164±0.977ab
80	2.483±0.252b	72.390±8.605a	18.632±1.830b	19.780±3.067a	9.690±1.1933b
90	2.482±0.253b	71.594±6.162a	17.930±1.830c	19.957±2.536a	9.090±1.2475c
RF treated duration (min)					
1	2.628±0.311a	65.598±7.356b	18.799±2.059a	19.752±3.568a	9.924±1.3179a
3	2.629±0.249a	69.136±7.18a	18.945±1.804a	19.424±5.426a	9.927±1.201a
5	2.597±0.220ab	69.792±7.151a	18.928±1.480a	19.860±3.264a	9.760±1.388a
7	2.500±0.245c	70.211±6.870a	18.415±1.917a	19.674±3.454a	10.120±1.363a
10	2.522±0.291bc	71.247±7.668a	17.618±1.742b	19.511±3.455a	9.768±1.249a

Total protein content (g $100g^{-1}$DM), Total antioxidant activity (IC_{50}), APX: Ascorbate peroxidase enzymatic activity (μmol min^{-1} 100 mg^{-1} protein), LOX: Lipoxygenase enzymatic activity (Δ activity mg^{-1} protein), SOD: Superoxide dismutase enzymatic activity (Δ activity mg^{-1} protein)

จากตารางที่ 44 การศึกษาอิทธิพลของการใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไขมันทั้งหมด (Total lipid content), กรดไขมัน α - Linolenic acid, Linoleic acid, Oleic acid, Palmatic acid และ Steric acid ของเมล็ดงาขี้ม้อน พบว่า เมื่อมีการใช้คลื่นความถี่วิทยุในการกำเนิดพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการลดลงของปริมาณไขมันทั้งหมด (Total lipid content), กรดไขมัน α - Linolenic acid, Linoleic acid, Oleic acid, Palmatic acid และ Steric acidในเมล็ดงาขี้ม้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุในการกำเนิดพลังงานความร้อนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไขมันทั้งหมด (Total lipid content), กรดไขมัน α - Linolenic acid, Linoleic acid, Oleic acid, และ Steric acid ภายในเมล็ดงาขี้ม้อน แต่ในขณะที่กรดไขมัน Palmatic acid ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อมีการใช้ระยะเวลาในการให้คลื่นความถี่วิทยุในการกำเนิดพลังงานความร้อนนานขึ้น ในขณะที่ความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อนก็เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไขมันรวม และปริมาณ และองค์ประกอบของกรดไขมันภายในเมล็ดงาขี้ม้อน โดยจากาการศึกษา พบว่า เมื่อมีการใช้เมล็ดงาขี้ม้อนที่มีความชื้นเมล็ดสูงตั้งแต่ 14% wb. ขึ้นไป จะมีผลทำให้ปริมาณไขมันทั้งหมด (Total lipid content), และกรดไขมัน α - Linolenic acid, Linoleic acid, Oleic acid, Palmatic acid และ Steric acid ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติภายหลังจากการให้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อกำเนิดพลังงานความร้อน

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของการใช้คลื่นความถี่วิทยุในการกำเนิดพลังงานความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate), น้ำตาลกลูโคส (Glucose), น้ำตาลซูโครส (Sucrose), น้ำตาลแลคโทส (Lactose) และน้ำตาลมัลโทส (Maltose) พบว่า ปริมาณคาร์โบไฮเดรตและองค์ประกอบของน้ำตาลทุกชนิดลดลงอย่างมีนัยสำคัยทางสถิติ เมื่อมีการใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อกำเนิดพลังงานความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อกำเนิดพลังงานความร้อนนั้นมีผลทำให้ปริมาณน้ำตาล Glucose, Lactose, และ Maltose มีแนวโน้มลดลงหลังจาการใช้เป็นเวลาตั้งแต่ 7 นาทีเป็นต้นไป ในขณะที่ความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดงาขี้ม้อนก่อนนำไปประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์โบไฮเดรต และปริมาณน้ำตาลทุกชนิดที่สะสมภายในเมล็ดงาขี้ม้อน (ตารางที่ 45)

ตารางที่ 44 อิทธิพลของอุณหภูมิจากคลื่นความถี่วิทยุต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไขมันทั้งหมด (Total lipid content), กรดไขมัน α - Linolenic acid, Linoleic acid, Oleic acid, Palmatic acid และ Steric acid ของเมล็ดงาขี้ม้อน

ปริมาณไขมันรวม (Total lipid content)

Treatment	Lipid	α - Linolenic acid	Linoleic acid	Oleic acid	Palmatic acid	Steric acid
Grain moisture content (%-db)						
10	45.436±4.7554a	6.360±0.6659a	2.781±0.085a	19.901±1.9187a	10.562±1.0582a	74.969±7.8464a
14	40.275±3.2871b	5.634±0.4595b	2.478±0.2020b	17.900±1.4614b	9.563±0.7500b	66.454±1.4637b
18	40.101±3.0814b	5.569±0.4493b	2.467±0.1892c	17.822±1.3689b	9.548±0.7342b	66.167±5.0841b
RF treated temperature (oC)						
50	48.90±0.653a	10.486±1.345a	0.383±0.054a	3.253±0.054a	0.914±0.109a	38.404±0.653a
60	44.12±0.761bc	9.996±1.764ab	0.366±0.118ab	3.114±1.001ab	0.8780.086b	36.081±6.49a
70	46.30±0.452b	10.486±0.931ab	0.366±0.046ab	3.108±0.390ab	0.882±0.096b	37.905±3.727ab
80	44.249±0.571bc	9.911±1.245bc	0.361±0.058ab	3.070±0.495ab	0.854±0.077bc	35.397±4.568c
90	41.82±0.629c	9.410±01.416c	0.345±0.094b	2.937±0.798b	0.840±0.085c	31.804±3.714d
RF treated duration (min)						
1	45.34±5.234a	10.105±1.381a	0.357±0.073a	3.030±0.622a	0.901±0.099a	35.927a
3	44.76±0.766a	9.970±1.718a	0.356±0.107a	3.026±0.909a	0.878±0.079ab	35.450±6.105a
5	43.96±0.681a	9.780±1.322a	0.370±0.059a	3.144±0.508a	0.863±0.099b	35.169±5.444a
7	45.88±0.578a	10.172±1.261a	0.371±0.072a	3.153±0.609a	0.853±0.093b	36.880±4.942a
10	45.42±0.641a	10.105±1.327a	0.368±0.078a	3.128±0.664a	0.871±0.096b	36.166±4.948a

Lipid (g $100g^{-1}$DM **),** α - Linolenic acid (mg g^{-1} - DM), Linoleic acid (mg g^{-1} - DM), Oleic acid (mg g^{-1} - DM), Palmatic acid (mg g^{-1} - DM), Steric acid (mg g^{-1} - DM)

ตารางที่ 45 อิทธิพลของอุณหภูมิจากคลื่นความถี่วิทยุต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) และปริมาณน้ำตาลกลูโคส (Glucose), ซูโครส (Sucrose), แลคโทส (Lactose), และ มัลโทส (Maltose) ของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน

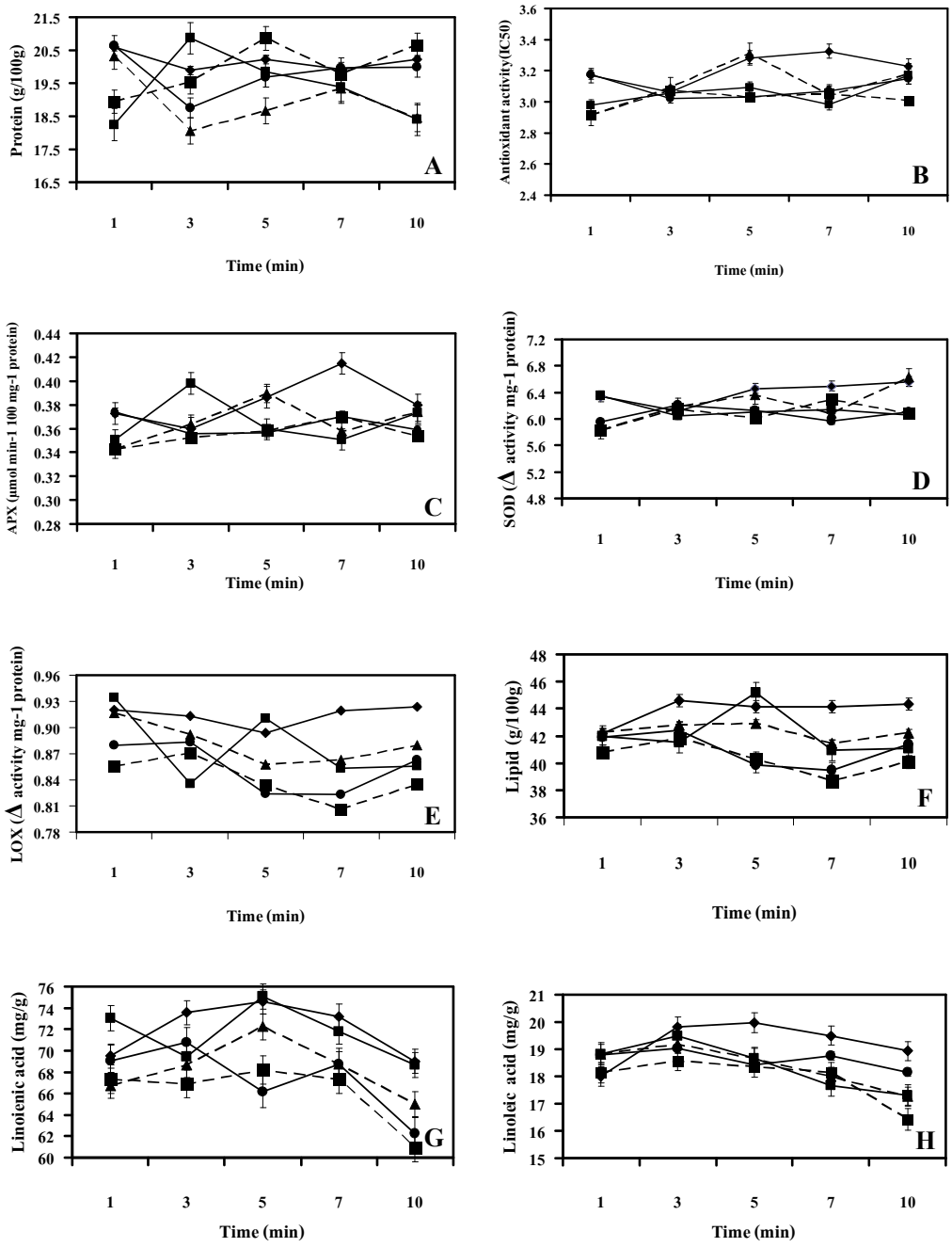
Treatment	Carbohydrate	Glucose	Sucrose	Lactose	Maltose
Grain moisture content (%-db)					
10	35.304±6.4362a	4.479±0.8314a	2.206±0.4024a	9.783±1.6324a	9.828±1.7211a
14	36.085±4.4038a	4.502±0.4835a	2.258±0.2727a	10.080±1.1058a	9.961±1.1808a
18	36.366±4.9784a	4.540±0.6273a	2.271±0.3135a	10.217±1.4120a	9.909±0.8693a
RF treated temperature (oC)					
50	2.3450.338a	43.873±5.215a	6.507±0.920a	10.357±1.183a	6.218±0.665a
60	2.25±0.409ab	42.136±4.113b	6.141±0.991ab	9.8490.801bc	5.822±0.614b
70	2.325±0.250ab	42.324±4.609b	6.216±0.779ab	9.705±0.753bc	5.736±0.517bc
80	2.213±0.315bc	41.014±3.696bc	6.072±1.597b	9.988±1.018b	5.920±0.645b
90	2.091±0.3153c	40.341±4.119c	5.875±1.597b	9.605±0.981c	5.575±0.595c
RF treated duration (min)					
1	2.246±0.327a	41.820±4.441ab	6.061±1.245a	9.980±1.084a	5.883±0.588a
3	2.216±0.381a	42.627±4.058a	5.941±1.329a	10.130±0.948a	5.979±0.582a
5	2.199±0.341a	42.471±4.945a	6.212±1.196a	10.103±0.954a	5.896±0.710a
7	2.305±0.309a	40.946±4.441b	6.307±1.217a	9.894±0.939a	5.686±0.658ab
10	2.260±0.3095a	41.823±4.616ab	6.289±1.016a	9.398±0.854b	5.828±0.6485b

Carbohydrate content (g $100g^{-1}$DM), Glucose (g $100g^{-1}$DM), Sucrose (g $100g^{-1}$DM), Lactose (g $100g^{-1}$DM), Maltose (g $100g^{-1}$DM), (SOD)

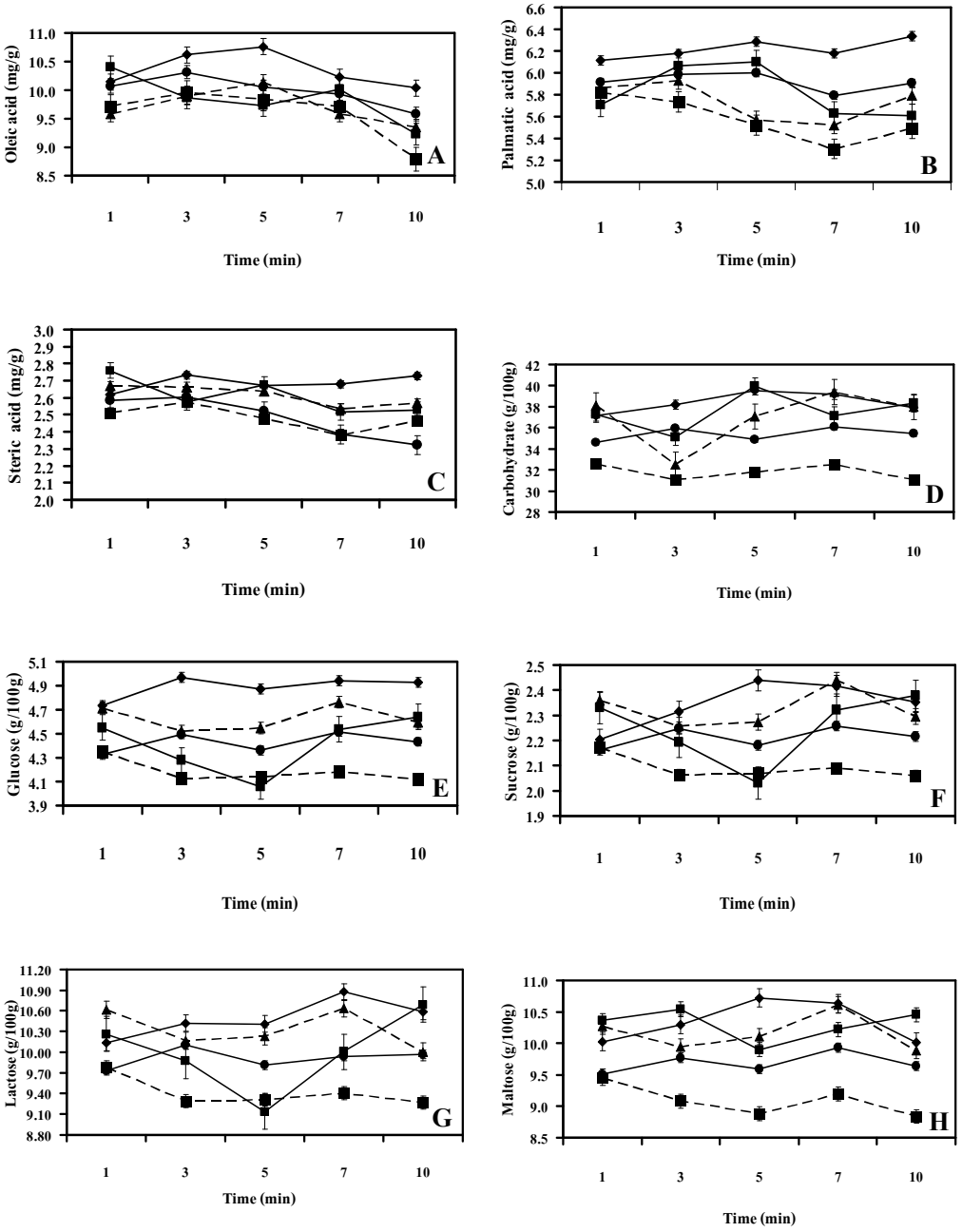
จากการศึกษาถึงอิทธิพลร่วมระหว่างระยะเวลาในการให้พลังงานคลื่นความถี่วิทยุเริ่มต้นเพื่อสร้างพลังงานความร้อน และระดับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ ของเมล็ดงาขี้ม้อน พบว่า อิทธิพลร่วมของระดับอุณหภูมิ และระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อกำเนิดความร้อนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีใด ๆ ที่สะสมอยู่ภายในเมล็ดงาขี้ม้อน แต่อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาพบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดงาขี้ม้อนทุกชนิดลดลงเมื่อมีการใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อกำเนิดพลังงานความร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และมีระยะเวลาที่นานขึ้น

แต่ทั้งนี้จากผลการศึกษา พบว่า ปัจจัยร่วมระหว่างระดับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อกำเนิดพลังงานความร้อน และระดับความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดงาขี้ม้อนเป็นปัจจัยที่สำคัญซึ่งมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ ที่สะสมอยู่ภายในเมล็ดงาขี้ม้อน โดยพบว่าเมื่อมีการใช้เมล็ดงาขี้ม้อนที่มีความชื้นของเมล็ดอยู่ในระดับสูง (14 และ 18% wb) ผ่านคลื่นความถี่วิทยุเพื่อเป็นแหล่งพลังงานในการสร้างความร้อนที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ มีผลทำให้เกิดการลดลงขององค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระรวม (Total antioxidant activity), กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต่าง ๆ เช่น Ascorbate peroxidase (APX), Superoxide dismutase (SOD), และ Lipoxygenase (LOX), ปริมาณไขมัน (Lipid content), α - Linolenic acid, Linoleic acid, Oleic acid, Palmatic acid และ Steric acid และปริมาณคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate content) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ทั้งนี้กลับพบว่าปริมาณโปรตีนทั้งหมด (Total protein content), และปริมาณน้ำตาลทุกชนิด ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส (Glucose), น้ำตาลซูโครส (Sucrose), น้ำตาลแลคโทส (Lactose) และน้ำตาลมัลโทส (Maltose) เพิ่มขึ้น

ทั้งนี้เนื่องจากที่ระดับความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อนที่สูงมีผลตอบสนองต่อการเพิ่มระดับอุณหภูมิโดยคลื่นความถี่วิทยุได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งที่ระดับอุณหภูมิสูงมีผลทำให้องค์ประกอบทางเคมีที่ง่ายต่อการเปลี่ยนรูป หรือเสื่อมสภาพ โดยเฉพาะกลุ่มโปรตีน สารอนุพันธ์ของโปรตีน เช่น เอนไซม์ และกลุ่มไขมัน โดยเฉพาะกลุ่มของกรดไขมันซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่สะสมอยู่ภายในเมล็ดงาขี้ม้อนเกิดการเปลี่ยน - เสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อปริมาณสารองค์ประกอบเหล่านั้นที่สามารถวิเคราะห์ได้ลดลง นอกจากนั้นที่สภาวะความชื้น และอุณหภูมิสูงดังกล่าวเป็นสภาวะที่ชักนำให้เมล็ดมีกระบวนการหายใจ (Respiration) ในอัตราที่สูง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของคาร์โบไฮเดรต และปริมาณน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ที่สะสมอยู่ภายในเมล็ด เนื่องจากเมล็ดจะมีการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรต และน้ำตาลเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานในกระบวนการหายใจดังกล่าว ดังนั้นจึงส่งผลให้ปริมาณของคาร์โบไฮเดรต และน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ภายในเมล็ดงาขี้ม้อนลดลง อีกทั้งเมล็ดงาขี้ม้อนมีการสะสมคาร์โบไฮเดรต และน้ำตาลชนิดต่างๆ อยู่ในปริมาณน้อย ดังนั้นจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว (รูปที่ 79 – รูปที่ 82)

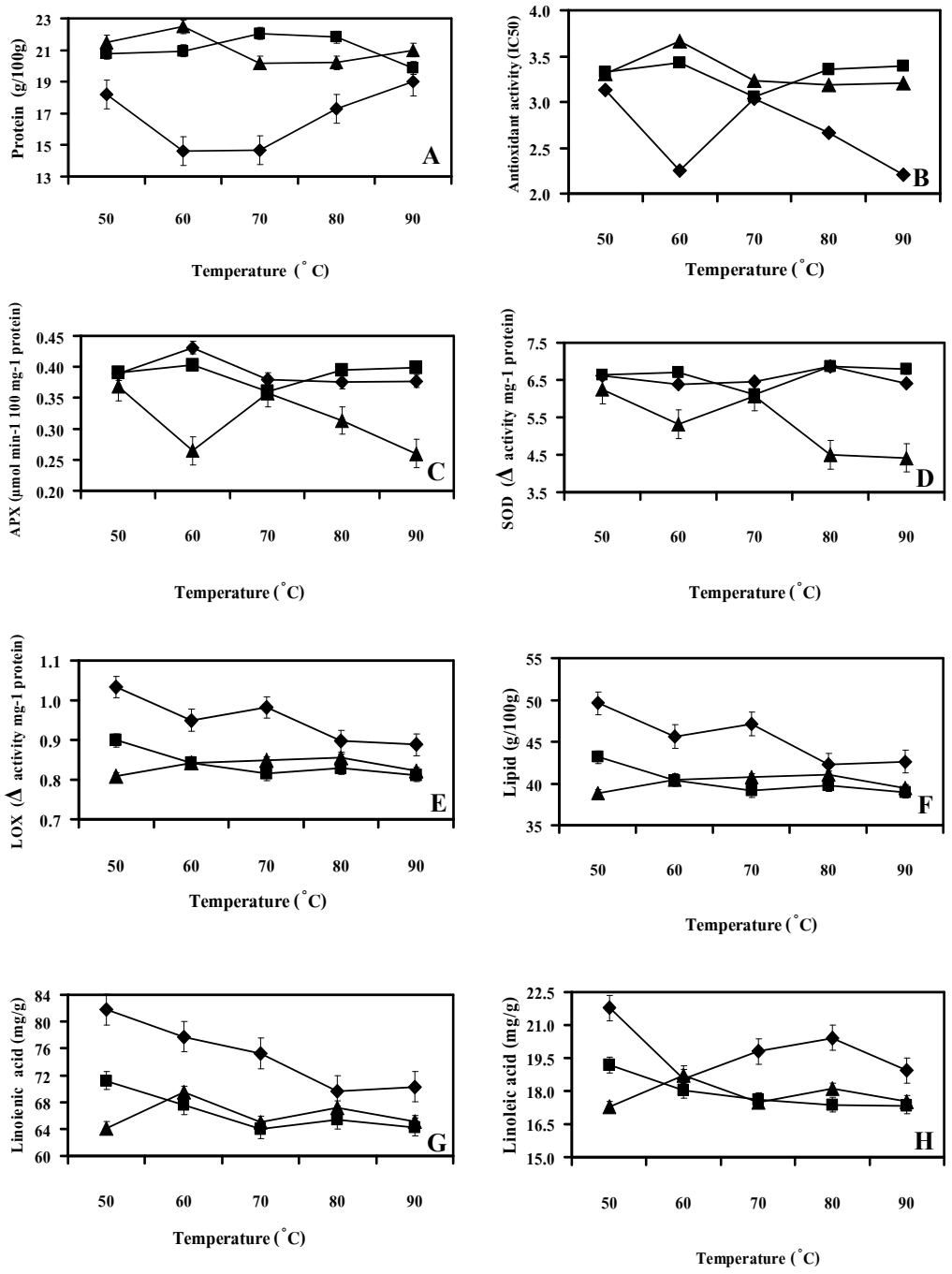


รูปที่ 79: อิทธิพลของอุณหภูมิ และระยะเวลาของการใช้คลื่นความถี่วิทยุในการกำเนิดพลังงานความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนทั้งหมด (Total Protein) (A), กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ (Total antioxidant activity) (B), กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ Ascorbate peroxidase activity (APX) (C), Superoxide dismutase (SOD) (D), Lipoxygenase activity (LOX) (E), ปริมาณไขมัน(Total lipid content) (F), และกรดไขมัน α - Linolenic acid (G), Linoleic acid (H) ในเมล็ดดาขี้ม้อน —♦— 50°c —■— 60°c —▲— 70°c —●— 80°c —■— 90°c

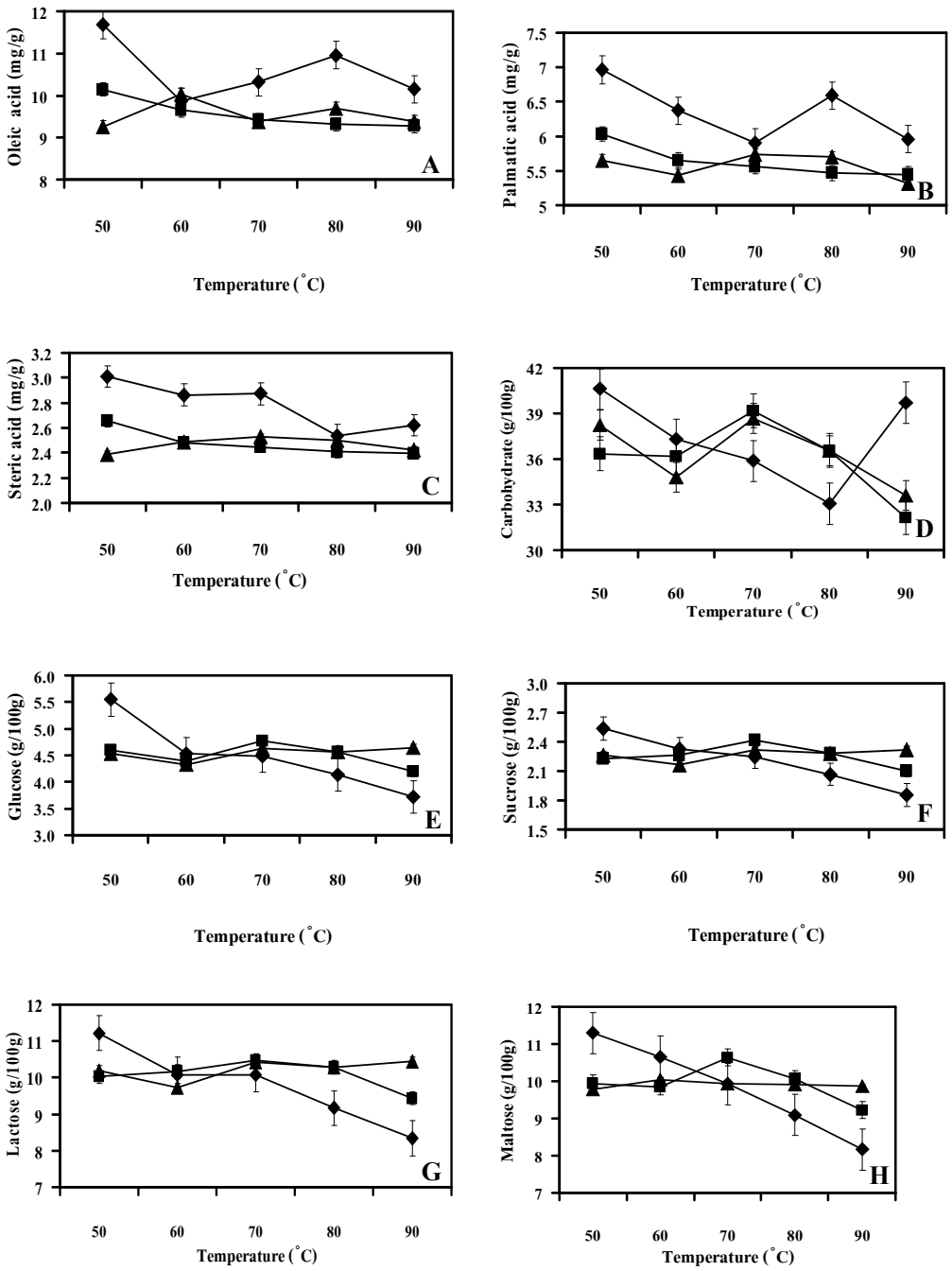


รูปที่ 80: อิทธิพลของอุณหภูมิ และระยะเวลาของการใช้คลื่นความถี่วิทยุในการกำเนิดพลังงานความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมัน Oleic acid (A), Palmatic acid (B) และ Steric acid (C), ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (D) และปริมาณน้ำตาล Glucose (E), Sucrose (F), Lactose (G), และ Maltose (H) ในเมล็ดคาขี้ม้อน

50°c 60°c 70°c 80°c 90°c



รูปที่ 81: ความสัมพันธุ์ของความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อน และอุณหภูมิของการใช้คลื่นความถี่วิทยุในการกำเนิดพลังงานความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนทั้งหมด (Total Protein) (A), กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ (Total antioxidant activity) (B), กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ Ascorbate peroxidase activity (APX) (C), Superoxide dismutase (SOD) (D), Lipoxygenase activity (LOX) (E), ปริมาณไขมัน(Total lipid content) (F), และกรดไขมัน α - Linolenic acid (G), Linoleic acid (H) ในเมล็ดาขี้ม้อน —◆—: MC-10%wb, —■—MC-14% wb, —▲—MC-18% wb



รูปที่ 82: ความสัมพันธุ์ของความชื้นของเมล็ดงาขี้ม้อน และอุณหภูมิของการใช้คลื่นความถี่วิทยุในการกำเนิดพลังงานความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมัน Oleic acid (A), Palmatic acid (B) และ Steric acid (C), ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (D) และปริมาณน้ำตาล Glucose (E), Sucrose (F), Lactose (G), และ Maltose (H) ในเมล็ดาขี้ม้อน

—◆— : MC-10%wb, —■— MC-14% wb, —▲—: MC-18% wb

3.7.5 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยแปลงคุณภาพของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนเนื่องจากการใช้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ

3.7.5.1 ความสัมพันธ์ (Pearson correlation) ของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนเนื่องจากปัจจัยของระดับความชื้นเบื่องต้นของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนหลังผ่านการให้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทั้งทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดพันธุ์เนื่องจากปัจจัยของความชื้นเบื่องต้นของเมล็ดพันธุ์ พบว่า ระดับความชื้นของเมล็ดพันธุ์มีความสัมพันธ์เชิงบวก (positive correlation) กับความชื้น และค่ากิจกรรมของน้ำภายในเมล็ดพันธุ์ ซึ่งเมื่อระดับความชื้น และกิจกรรมของน้ำภายในเมล็ดเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้คลื่นความถี่วิทยุมีอิทธิพลต่อการเสื่อมสภาพขององค์ประกอบทางเคมีภายในเมล็ดงาขี้ม้อน (negative correlation) โดยพบว่าค่าองค์ประกอบทางเคมี เช่น กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ทั้ง APX, SOD, และ LOX ประมาณของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ ลดลง หรือเสื่อมสภาพ และลดกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระภายในเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน ซึ่งจากการเสื่อมสภาพ/สูญเสียองค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ ภายในเมล็ดงาขี้ม้อนนั้นมีผลทำให้ชักนำให้เกิดการเสื่อมสภาพของผนังเซลล์ต่าง ๆ ภายในเมล็ดงาขี้ม้อน ซึ่งแสดงดังความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่าการนำไฟฟ้าของเมล็ด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลทำให้เมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนเกิดการสูญเสียความมีชีวิต ความงอก และความแข็งแรงในที่สุด (ตารางที่ 46)

3.7.5.2 ความสัมพันธ์ (Pearson correlation) ของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนเนื่องจากปัจจัยของระดับอุณหภูมิที่เกิดจากการใช้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทั้งทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดพันธุ์เนื่องจากปัจจัยของระดับอุณหภูมิที่เกิดจากการใช้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ พบว่า ระดับอุณหภูมิมีความสัมพันธ์เชิงลบ (negative correlation) กับองค์ประกอบด้านคุณภาพเมล็ดพันธุ์ และองค์ประกอบทางเคมีภายในเมล็ดพันธุ์ทุกองค์ประกอบ ยกเว้นค่าการนำไฟฟ้าของเมล็ดพันธุ์ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงบวก (positive correlation) กับระดับอุณหภูมิ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลของการใช้คลื่นความถี่วิทยุนั้นมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีภายในเมล็ดพันธุ์ ซึ่งมีผลต่อการเสื่อมสภาพของผนังเซลล์ต่าง ๆ ภายในเมล็ดพันธุ์ และส่งเสริมทำให้เมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนเกิดการเสื่อมคุณภาพทั้งความมีชีวิต ความแข็งแรง และความสามารถในการงอกภายใต้สภาพแปลงปลูกในที่สุด (ตารางที่ 47)

ตารางที่ 46: ความสัมพันธ์ (Pearson correlation) ของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนเนื่องจากปัจจัยของระดับความชื้นเบื่องต้นของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนหลังผ่านการให้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ

	APX	Antioxidant	Aw	DW	EC	Field	GI	Glucose	LOX	Lctose	Linoleic	Linolenic	Lipid	Maltose	Olelic	Palmatic	SGR	SOD	Steric	Sucrose
Antiox	ns																			
Aw	0.293	ns																		
DW	ns	ns	ns																	
EC	ns	ns	ns	-0.182																
Field	ns	0.141	ns	ns	-0.699															
GI	ns	ns	ns	ns	-0.672	0.968														
Glucrose	ns	-0.304	ns	0.145	ns	ns	ns													
LOX	ns	-0.142	ns	ns	-0.234	0.144	0.186	ns												
Lactose	ns	-0.279	ns	0.144	ns	ns	ns	0.931	ns											
Linoleic	ns	ns	ns	ns	-0.178	0.162	0.184	ns	0.424	-0.141										
Linolenic	ns	ns	0.157	ns	-0.21	0.96	0.204	ns	0.49	ns	0.803									
Lipid	0.139	ns	ns	ns	-0.221	0.134	0.159	ns	0.8646	ns	0.458	0.567								
Maltose	ns	ns	ns	0.14	-0.23	0.144	0.153	0.756	ns	0.753	ns	ns	0.031							
Oleic	ns	ns	ns	ns	-1658	0.142	0.161	ns	0.4066	ns	0.924	0.817	0.443	ns						
Palmatic	0.2045	ns	ns	ns	-0.2956	0.194	0.23	ns	0.4676	ns	0.501	0.446	0.509	ns	0.469					
SGR	ns	ns	ns	1	-0.181	ns	ns	0.145	ns	0.144	ns	ns	ns	0.141	ns	ns				
SOD	0.525	ns	0.3	ns	-0.175	0.152	0.175	-0.14	ns	-0.167	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns			
Steric	0.155	ns	ns	ns	-0.234	0.176	0.213	ns	0.701	ns	0.591	0.62	0.708	ns	0.588	0.669	ns	ns		
Sucrose	ns	-0.308	ns	0.148	ns	ns	ns	0.935	ns	961	ns	ns	ns	0.818	ns	ns	0.148	-0.155	ns	
MC	-0.134	-0.204	0.169	ns	0.254	-0.291	-0.249	ns	-0.306	ns	-0.254	-0.281	-0.3	ns	-0.248	-0.261	ns	-0.137	-0.296	ns

ตารางที่ 47: ความสัมพันธ์ (Pearson correlation) ของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนเนื่องจากปัจจัยของระดับอุณหภูมิที่เกิดการให้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ

	APX	Antioxidant	Aw	DW	EC	Field	GI	Glucose	LOX	Lctose	Linoleic	Linolenlc	Lipid	Maltose	Olelic	Palmatic	SGR	SOD	Steric	Sucrose
Antioix	ns																			
Aw	0.293	ns																		
DW	ns	ns	ns																	
EC	ns	ns	ns	-0.181																
Field	ns	0.142	ns	ns	-0.699															
GI	ns	ns	ns	ns	-0.672	0.969														
Glucrose	ns	-0.304	ns	0.145	ns	ns	ns													
LOX	ns	-0.143	ns	ns	-0.234	0.144	0.186	ns												
Lactose	ns	-0.279	ns	0.144	ns	ns	ns	0.931	ns											
Linoleic	ns	ns	ns	ns	-0.178	0.162	0.184	ns	0.424	-0.142										
Linolenic	ns	ns	0.157	ns	-0.21	0.96	0.204	ns	0.491	ns	0.804									
Lipid	0.139	ns	ns	ns	-0.221	0.135	0.159	ns	0.864	ns	0.458	0.567								
Maltose	ns	ns	ns	0.141	-0.23	0.144	0.153	0.756	ns	0.784	ns	ns	ns							
Oleic	ns	ns	ns	ns	-0.166	0.142	0.162	ns	0.406	ns	0.9243	0.817	0.443	ns						
Palmatic	0.205	ns	ns	ns	-0.295	0.194	0.23	ns	0.468	ns	0.502	0.446	ns	ns	0.469					
SGR	ns	ns	ns	1	-0.182	ns	ns	0.145	ns	0.144	ns	ns	ns	0.14	ns	ns				
SOD	0.526	ns	0.3	ns	-0.175	0.153	0.175	-0.142	ns	-0.167	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns			
Steric	0.155	ns	0.049	ns	-0.234	0.177	0.214	ns	0.702	ns	0.591	0.62	0.708	ns	0.589	0.669	ns	ns		
Sucrose	ns	-0.309	ns	0.148	ns	ns	ns	0.935	ns	0.961	ns	ns	ns	0.818	ns	ns	0.148	-0.155	ns	
MC	-0.134	0.205	-0.169	ns	0.254	-0.292	-0.249	ns	-0.306	ns	-0.254	-0.281	-0.3	ns	-249	-0.261	ns	-0.137	-0.296	ns

ตารางที่ 48: ความสัมพันธ์ (Pearson correlation) ของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนเนื่องจากปัจจัยของระยะเวลาในการให้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ

	APX	Antioxidant	Aw	DW	EC	Field	GI	Glucose	LOX	Lctose	Linoleic	Linolenlc	Lipid	Maltose	Olelic	Palmatic	SGR	SOD	Steric	Sucrose
Antiox	ns																			
Aw	0.167	ns																		
DW	ns	-0.14	ns																	
EC	ns	ns	ns	-0.235																
Field	ns	ns	ns	ns	-0.681															
GI	ns	0.177	ns	ns	-0.641	0.962														
Glucrose	ns	ns	ns	0.201	-0.252	0.203	0.228													
LOX	0.164	-0.134	ns	ns	0.317	0.288	0.28	0.159												
Lactose	ns	ns	-0.145	0.198	-0.2078	0.144	0.155	0.903	ns											
Linoleic	ns	ns	0.148	ns	-0.189	0.173	0.226	ns	0.379	ns										
Linolenic	0.138	ns	ns	ns	-0.28	0.239	0.259	0.155	0.489	ns	0.726									
Lipid	0.191	ns	ns	ns	0.33	0.238	0.275	0.154	0.912	ns	0.407	0.566								
Maltose	ns	ns	ns	ns	0.313	0.196	0.198	0.824	ns	0.814	ns	0.156	ns							
Oleic	ns	ns	0.122	0.209	-0.183	0.139	0.184	0.141	0.372	ns	0.882	0.748	0.399	ns						
Palmatic	0.207	-0.165	0.164	ns	-0.361	0.268	0.304	ns	0.561	ns	0.479	0.427	0.604	ns	0.443					
SGR	ns	ns	ns	1	-0.235	ns	ns	0.201	ns	0.198	ns	ns	ns	0.209	ns	ns				
SOD	0.357	ns	0.263	-0.138	ns	ns	ns	ns	ns	-0.144	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0.138			
Steric	0.174	ns	ns	ns	-0.341	0.293	0.34	ns	0.717	ns	0.438	0.587	0.732	ns	0.46	0.654	ns	ns		
Sucrose	ns	-0.144	ns	0.21	-0.221	0.132	0.139	0.92	ns	0.936	ns	ns	ns	0.899	ns	ns	0.21	-0.135	ns	
MC	0.165	0.295	0.197	ns	0.141	-0.2218	-0.177	ns	0.352	0.1322	-0.2748	-0.314	-0.355	ns	-0.292	-0.354	ns	0.1758	-0.297	ns

3.7.5.2 ความสัมพันธ์ (Pearson correlation) ของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนเนื่องจากปัจจัยของระยะเวลาในการใช้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทั้งทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดพันธุ์เนื่องจากปัจจัยของระยะเวลาในการใช้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ พบว่าระยะเวลามีความสัมพันธ์เชิงบวก (positive correlation) กับระดับความชื้น และค่ากิจกรรมของน้ำภายในเมล็ด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุเป็นการให้พลังงานโดยตรงสู่โมเลกุลของน้ำเพื่อชักนำให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้น เมื่อถึงอุณหภูมิเป้าหมาย (Target temperature) ซึ่งเมื่อน้ำได้รับอุณหภูมิสูงจะเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซ หรือเกิดลักษณะของไอน้ำ และเมื่อระดับอุณหภูมิลดลงสู่ระดับอุณหภูมิห้อง จะเกิดการควบแน่นของไอน้ำเป็นของเหลว ซึ่งเนื่องจากคุณสมบัติ Hydroscopic property ของเมล็ดพันธุ์ซึ่งทำให้เมล็ดพันธุ์สามารถดูดซับน้ำส่วนเกินดังกล่าวกลับเข้าสู่ภายในเมล็ดได้ ซึ่งจากการได้รับอุณหภูมิสูงดังกล่าวเกิดการคาย – ดูดความชื้นส่งผลทำให้องค์ประกอบทางเคมีภายในเมล็ดงาขี้ม้อนเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากการเปิดปฏิกิริยา Hydrolysis และ Oxidation ขององค์ประกอบทางเคมีภายในเมล็ด ดังแสดงความสัมพันธ์เชิงลบ (negative correlation) ระหว่างค่าความชื้นที่เพิ่มขึ้น และการลดลงขององค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ ทั้งกรดไขมัน และน้ำตาลชนิดต่าง ๆ (ตารางที่ 48)

แต่ทั้งนี้จากการศึกษาความสัมพันธ์เนื่องจากอิทธิพลของระยะเวลาในการให้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ พบว่า มีความสัมพันธ์เชิงบวก (positive correlation) กับกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระรวม และกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ APX, SOD, และ LOX ซึ่งจากความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการใช้พลังงานคลื่นความถี่วิทยุมีผลต่อการเสื่อมสภาพขององค์ประกอบทางเคมีภายในเมล็ด โดยเฉพาะการเสื่อมสภาพขององค์ประกอบของไขมัน ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีหลักที่สะสมภายในเมล็ดงาขี้ม้อน โดยการเกิดกระบวนการ Hysdrolysis และ Oxidation ของไขมันหรือกรดไขมันจะเกิดการสังเคราะห์สารอนุมูลอิสระ (Frre radical compounds) โดยเฉพาะเมื่อเกิดโดยเอนไซม์ LOX โดยสารอนุมูลอิสระที่สำคัญอยู่ในกลุ่ม Reactive oxygen species (ROS) ได้แก่ super oxide, hydrogenperoxide เป็นต้น ซึ่งสารกลุ่ม ROS มีคุณสมบัติที่สามารถเกิดการ oxidation ต่อไปได้อย่างรวดเร็ว และรุนแรง ซึ่งส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ตามมา และที่สำคัญมีผลทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของผนังเซลล์ และการทำงานของอวัยวะต่าง ๆ ภายในเซลล์ เป็นต้น ซึ่งภายใต้สภาวะ Oxidative stress ในเมล็ดพันธุ์ดังกล่าว เมล็ดพันธุ์จะมีกลไกในการรักษาสมดุลเพื่อรักษา หรือคงความมีชีวิตไว้ โดยกระบวนการที่รักษาสมดุลของ Oxidative stress ดังกล่าวจะเกิดผ่านกระบวนการต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidative process) โดยเฉพาะโดยการทำงานของเอนไซม์ SOD และ APX โดยเอนไซม์ SOD จะทำหน้าที่เปลี่ยน ROS ที่อยู่ในรูปของ Superoxide ให้เป็น Hydrogen peroxide และเอนไซส์ APX จะเข้ามาทำปฏิกิริยาต่าเนื่อง โดยเปลี่ยน Hydrogen peroxide ไปเป็นน้ำ และออกซิเจน ตามลำดับ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถ

ตรวจสอบผ่านกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ (Total antioxidant activity) รวมที่เกิดขึ้นภายในเมล็ดงาขี้ม้อน จากเหตุผลดังกล่าวจึงมีผลทำให้เมื่อมีการใช้คลื่นความถี่วิทยุนานขึ้นแล้วมีผลทำให้เกิดความสัมพันธ์เชิงบวก (positive correlation) กับกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ และการทำงานของเอนไซม์ต่าง ๆ

3.8 สรุปผลการดำเนินการวิจัย

จากการศึกษาการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุต่อคุณภาพเมล็ดพันธุ์ และการควบคุมเชื้อรา *Aspergillus flavus* และการสร้างสารอฟราทอกซินที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของความชื้นของเมล็ด และระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่วิทยุ ต่อการควบคุมเชื้อรา *Aspergillus flavus* ในเมล็ดงาขี้ม้อน ศึกษาผลของคลื่นความถี่วิทยุต่อความมีชีวิตและความแข็งแรงของเมล็ด/เมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อน ที่ระดับอุณหภูมิ และระยะเวลาการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีภายในเมล็ดงาขี้ม้อนที่ผ่านการให้คลื่นความถี่วิทยุ ที่ระดับอุณหภูมิ และระยะเวลาการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุ และการอบลมร้อนต่อการควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อรา และสารพิษอะฟราท็อกซินในเมล็ดงาขี้ม้อน และศึกษาเปรียบเทียบการใช้พลังงานจากการใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุ และการอบลมร้อนในการควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อรา และสารพิษอะฟราท็อกซินในเมล็ดงาขี้ม้อน ทั้งนี้เพื่อคงไว้ซึ่งวัตถุดิบที่มีคุณภาพ มีความสะอาด และปลอดภัยจากสารพิษตกค้าง ตอบสนองต่อความต้องการของตลาด และเป็นวัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับรองรับอุตสาหกรรมการแปรรูปผลิตภัณฑ์งาขี้ม้อนต่อไปในอนาคต สามารถสรุปผลการดำเนินการ ดังนี้

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนเพื่อใช้ในการควบคุมเชื้อราที่ปนเปื้อนบน/ในเมล็ดงาขี้ม้อนนั้นขึ้นกับปัจจัยหลัก ๆ คือ ระดับอุณหภูมิ ระยะเวลาในการรักษาระดับอุณหภูมิ ความชื้นเบื่องต้นของเมล็ดงาขี้ม้อน และชนิดสายพันธุ์ของเชื้อราที่ต้องการควบคุม โดยคลื่นความถี่วิทยุมีประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อราในกลุ่ม *Aspergillus* sp. ทั้ง *Aspergillus flavus* และ *Aspergillus niger* ได้ดีกว่าเชื้อรา *Fusarium moniliforme* และ *Penicillium* sp. ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และปริมาณความชื้นภายในเชื้อแต่ละสายพันธุ์ที่แตกต่างกัน โดยจากผลการศึกษา พบว่า การใช้คลื่นความถี่วิทยุที่กำเนิดพลังงานความร้อนที่สูงขึ้น ใช้เป็นระยะเวลานานขึ้น ร่วมกับเมล็ดงาขี้ม้อนที่มีความชื้นเบื่องต้นอยู่ในระดับสูงจะมีประสิทธิภาพในการควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อราบน/ในเมล็ดงาขี้ม้อนได้ดี โดยเฉพาะที่สภาวะอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที ในเมล็ดงาขี้ม้อนที่มีความชื้นเบื่องต้น 18% wb. ซึ่งมีประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อราทุกสายพันธุ์ที่ปนเปื้อนบน/ในเมล็ดงาขี้ม้อนได้ดีที่สุด

จากการศึกษาการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนต่อการควบคุมสารพิษอะฟราท็อกซินทีปนเปื้อนบนเมล็ดงาขี้ม้อนขึ้นกับปัจจัยหลัก ๆ คือ ระดับอุณหภูมิ ระยะเวลาในการรักษาระดับอุณหภูมิ ความชื้นเบื่องต้นของเมล็ดงาขี้ม้อน และความสามารถในการควบคุมการเจริญของเชื้อรา *Aspergillus flavus* โดยมีความสัมพันธ์กับลักษณะการปนเปื้อนของเชื้อรา *Aspergillus flavus* กล่าวคือ เมื่อมีการควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อรา *Aspergillus flavus* ได้ดีจะส่งผลทำให้สามารถควบคุมการปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท็อกซินได้ดีเช่นกัน ดังนั้นการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุในสภาพวะที่มีอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที ในเมล็ดงาขี้ม้อนที่มีความชื้นเบื่องต้น 18% wb. เป็นสภาวะที่สามารถควบคุมการปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท็อกซินได้ดีที่สุด

เมื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุ และการอบด้วยลมร้อนในการควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อราบน/ในเมล็ดงาขี้ม้อน พบว่า การจัดการทั้งสองวิธีมีประสิทธิภาพในการควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อราบน/ในเมล็ดงาขี้มอ้นได้แตกต่างกัน กล่าวคือ การประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุมีประสิทธิภาพในการควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อราในกลุ่ม *Aspergillus flavus* และ *Aspergillus niger* ได้ดี ในขณะที่การอบเมล็ดงาขี้ม้อนด้วยลมร้อนจะมีประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อราในกลุ่ม *Fusarium moniliforme* และ *Penicillium* sp. ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุภายใต้สภาวะอุณหภูมิตั้งแต่ 70 – 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 – 10 นาที (T1 –T9) เป็นสภาวะที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อรา *Aspergillus flavus* และ *Aspergillus niger* สูงสุด ในขณะที่เมื่อประยุกต์ใช้ความถี่วิทยุเพื่อกำเนิดพลังงานความร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสขึ้นไป (T7 – T9) จึงจะสามารถควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อรา *Fusarium moniliforme* และ *Penicillium* sp. ได้ ในขณะที่เมื่อมีการประยุกต์ใช้การอบเมล็ดงาขี้ม้อนด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 10 – 30 นาที (T14 และ T15) จะมีประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อรา *Fusarium moniliforme* และ *Penicillium* sp. ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามภายใต้สภาพวะของการอบเมล็ดงาขี้ม้อนด้วยลมร้อนดังกล่าวจะสามารถควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อรา *Aspergillus flavus* และ *Aspergillus niger* ได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เมื่อพิจารณาถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุ และการอบเมล็ดงาขี้ม้อนด้วยลมร้อนในการควบคุม – ป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท็อกซินในเมล็ดงาขี้ม้อน พบว่า การประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนในทุก ๆ สภาวะมีประสิทธิภาพในการควบคุม – ป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท็อกซินในเมล็ดงาขี้มอ้นสูงสุด โดยเฉพาะเมื่อการใช้คลื่นความถี่วิทยุกำเนิดพลังงานความร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 70 – 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 5 – 10 นาที จะสามารถควบคุมการปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท็อกซินให้มีระดับการปนเปื้อนที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานขององค์กรอาหาร และยาที่ยินยอมให้มีการ

ปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท็อกซินในผลผลิตทางการเกษตร โดยเฉพาะในกลุ่มของธัญพืชได้เพียง 20 ppb โดยเฉพาะเมื่อมีการใช้คลื่นความถี่วิทยุกำเนิดพลังงานความร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ซึ่งมีการปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท็อกซินต่ำกว่า 10 ppb

ในขณะที่การประยุกต์ใช้การอบเมล็ดงาขี้ม้อนด้วยลมร้อนทุกกรรมวิธีนั้นไม่สามารถควบคุม - ป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท็อกซินที่ปนเปื้อนในเมล็ดงาขี้ม้อน โดยจากการศึกษายังพบระดับการปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท็อกซินอยู่ในระดับที่สูงกว่าค่ายอมรับได้มาตรฐาน (20 ppb)

เมื่อพิจารณาถึงการใช้พลังงานไฟฟ้า (Power consumed) จากการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุ และการอบเมล็ดงาขี้ม้อนด้วยลมร้อนต่อควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อรา และสารพิษอะฟราท็อกซินในเมล็ดงาขี้ม้อน พบว่า การประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อรา และสารพิษอะฟราท็อกซินน้อยกว่าการอบเมล็ดด้วยลมร้อนถึงประมาณ 55 เท่า โดยการใช้คลื่นความถี่วิทยุใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 68.20 – 88.00 kJ ในขณะที่การอบด้วยลมร้อนใช้พลังงานถึง 3,780 – 4,860 kJ ในการดำเนินการ ดังนั้น จากผลการศึกษาจึงแสดงให้เห็นว่าการใช้คลื่นความถี่วิทยุในการกำเนิดพลังงานความร้อนเพื่อประยุกต์กับการควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อรา และป้องกันสารพิษอะฟราท็อกซินในเมล็ดงาขี้ม้อนเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง และประหยัดพลังงาน

แต่อย่างไรก็ถามจากผลการศึกษา พบว่า หากทำการเลือกสภาวะของการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุที่ไม่เหมาะสมมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดงาขี้ม้อนเช่นกัน โดยจากการศึกษาพบว่าการใช้คลื่นความถี่วิทยุที่สภาวะอุณหภูมิสูงร่วมกับเมล็ดงาขี้ม้อนที่มีความชื้นเบื่องต้นสูง ถึงแม้จะสามารถควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อราและสารพิษอะฟราท็อกซินได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ในทางตรงข้ามภายใต้สภาวะดังกล่าวมีผลทำให้เกิดการสูญเสียคุณภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดงาขี้ม้อนเช่นเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษา พบว่า หากมีการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อกำเนิดอุณหภูมิทุกระดับ 50 – 90 องศาเซลเซียสกับเมล็ดงาขี้ม้อนที่มีความชื้นประมาณ 10 – 14 %wb นั้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดงาขี้ม้อน อีกทั้งที่สภาวะดังกล่าวยังสามารถควบคุม – ป้องกันการปนเปื้อนของทั้งเชื้อรา *Aspergillus flavus* และ *Aspergillus niger* รวมทั้งสารพิษอะฟราท็อกซินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพของเมล็ดงาขี้ม้อน พบว่า การใช้คลื่นความถี่วิทยุมีผลทำให้เมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนสูญเสียคุณภาพทั้งความมีชีวิต ความงอกภายในห้องปฏิบัติการ และสภาพแปลงปลูก และความแข็งแรงลงอย่างรวดเร็ว และมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเฉพาะเมื่อมีการใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อกำเนิดความร้อนที่ระดับอุณหภูมิตั้งแต่ 70 – 90 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป โดยเฉพาะเมื่อมีการใช้คลื่นความถี่วิทยุกับ

เมล็ดพันธุ์งาขี้ม้อนที่มีความชื้นเบื้องต้นอยู่ในระดับสูง ในขณะที่ระยะเวลาของการใช้คลื่นความถี่วิทยุมีผลต่อการลดลงของความแข็งแรงของเมล็ดพันธุ์ และต้นอ่อนของงาขี้ม้อน แต่ไม่มีผลต่อการลดลงของความงอกภายในห้องปฏิบัติการ และสภาพแปลงปลูก

ดังนั้น จากการศึกษาดังกล่าวข้างต้นจึงอาจสรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อควบคุม-ป้องกันการปนเปื้อนของเชื้อรา และสารพิษอะฟราท๊อกซินเป็นเทคโนโลยีที่สามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีการบริโภคพลังงานไฟฟ้าในอัตราที่ต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบเมล็ดด้วยลมร้อน ซึ่งไม่สามารถควบคุมการปนเปื้อนของสารพิษอะฟราท๊อกซินได้ อีกทั้งยังเป็นวิธีที่มีการบริโภคพลังงานไฟฟ้าที่สูง แต่อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีการใช้คลื่นความถี่วิทยุมีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพความเป็นเมล็ดพันธุ์ของงาขี้ม้อนอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นเทคโนโลยีการใช้คลื่นความถี่วิทยุจึงอาจจะเหมาะสมกับอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่มิใช่อุตสาหกรรมเมล็ดพันธุ์ เช่น อุตสาหกรรมอาหารสัตว์ อุตสาหกรรมการผลิตอาหาร เครื่องสำอาง หรือยาที่ผลิตจากพืช สมุนไพร หรือสัตว์

3.9 ข้อเสนอแนะของโครงการ

จากาการศึกษาครั้งนี้ควรมีการนำผลที่ได้ไปใช้เพื่อการส่งเสริมให้แก่กลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกงาขี้ม้อน หรือกลุ่มอุตสาหกรรมที่มีการใช้ผลผลิตงาขี้ม้อน เพื่อให้ตระหนักถึงปัญหาการปนเปื้อนของเชื้อรา และสารพิษอะฟราท๊อกซินในเมล็ดงาขี้ม้อน ซึ่งมีผลโดยตรงต่อผู้บริโภค และเสนอวิธีการป้องกัน-ควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อรา และสารพิษอะฟราท๊อกซินดังกล่าวด้วยเทคโนโลยีการใช้คลื่นความถี่วิทยุซึ่งมีประสิทธิภาพในการควบคุม-ป้องกันการปนเปื้อนของเชื้อราและสารพิษอะฟราท๊อกซินได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง ทดแทนการใช้วิธีการอบเมล็ดด้วยลมร้อนซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพด้อยกว่า อีกทั้งมีการบริโภคพลังงานในการปฏิบัติงานที่มาก

แต่อย่างไรก็ตามปัญหาอุปสรรคของการนำเทคโนโลยีการใช้คลื่นความถี่วิทยุดังกล่าวไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ให้เป็นรูปธรรมนั้นเนื่องจากยังมีการศึกษา และการใช้ประโยชน์จากคลื่นความถี่วิทยุเพื่อเชิงเกษตรในประเทศไทยค่อนข้างจำกัด อีกทั้งเทคโนโลยี และเครื่องมือเป็นเทคโนโลยีที่มีการนำเข้าจากต่างประเทศ (โดยเครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นเทคโนโลยีที่มีการพัฒนา และแก้ไขโดยมหาวิทยาลัย Georg – Augus University of Goettingen, ประเทศเยอรมนี) ส่งผลทำให้เทคโนโลยีการใช้คลื่นความถี่วิทยุในเชิงเกษตร ในประเทศไทยเป็นเทคโนโลยีที่ยังจับต้องได้ยาก เนื่องจากมีราคา-ต้นทุนของอุปกรณ์ปฏิบัติการค่อนข้างสูง และมีอยู่อย่างจำกัด ซึ่งจากผลการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าคลื่นความถี่วิทยุเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับอุตสาหกรรมต่อเนื่องทางการเกษตรอื่น ๆ ได้อีกมากมาย เช่น การประยุกต์ใช้เพื่อป้องกัน – ควบคุมการแพร่ระบาดของแมลงในโรงเก็บผลผลิตทางการเกษตร การป้องกันกำจัดโรค – แมลงในผลผลิตทางการเกษตรอื่น ๆ เพื่อลดการใช้สารเคมี

เพื่อรองรับการผลิตอาหารที่สะอาด และปลอดภัย เป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีคุณภาพจากครัวไทย สู่ครัวโลก

อีกทั้ง ทางคณะวิจัยได้เล็งเห็นถึงแนวทางที่สามารถสร้าง – พัฒนาเครื่องมือ อุปกรณ์เพื่อการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อเป็นเครื่องต้นแบบรองรับการขยายในเชิงอุตสาหกรรมได้ เช่น การสร้างในรูปของสายพานลำเลียงผ่านคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งทำให้วัตถุดิบทางการเกษตรผ่านคลื่นความถี่วิทยุได้อย่างสม่ำเสมอ และทั่วถึง ส่งผลทำให้สามารถควบคุมศัตรูของผลผลิตทางการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นต้น

หากมีการสนับสนุนการทำวิจัย และพัฒนาโดยคณะวิจัยอย่างต่อเนื่องสำหรับการประยุกต์ใช้ - ผลิตเครื่องต้นแบบคลื่นความถี่วิทยุจะสามารถช่วยเพิ่มศักยภาพของภาคอุตสาหกรรมการเกษตรของประเทศไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถลดต้นทุนภาคการผลิต อีกทั้งช่วยเพิ่มมูลค่า – คุณภาพของผลผลิตจากอุตสาหกรรมเกษตรของประเทศไทย และลดการใช้สารเคมีเพื่อผลิตผลผลิตทางการเกษตรที่สะอาด และปลอดภัย

ดังนั้น จากผลการวิจัยครั้งนี้หากสามารถนำผลที่ได้ไปใช้เพื่อการส่งเสริมในด้านการเพิ่มมูลค่าสินค้าเกษตร ซึ่งเป็นพืชพื้นบ้านของเกษตรกรภาคเหนือตอนบนของประเทศ โดยจากการศึกษาคุณสมบัติของงาขี้ม้อน พบว่า เป็นพืชที่สามารถนำไปพัฒนาเพื่อแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรให้เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ช่วยสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับพืชท้องถิ่นชนิดนี้ โดยการพัฒนาเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทั้งการบริโภคโดยตรง และสามารถพัฒนาต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์เข้มข้นเพื่อใช้ประโยชน์ด้านสารเสริมสุขภาพ และป้องกันโรคได้ เนื่องจาก คุณสมบัติของงาขี้ม้อนมีสารที่สามารถช่วยในการพัฒนาสู่อุตสาหกรรมสารเสริมสุขภาพ ยา และผลิตภัณฑ์เสริมความงามต่าง ๆ ดังผลการวิจัยที่ได้เสนอไปแล้วข้างต้น

เนื่องด้วย สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติได้กำหนดวิทัศน์ประเทศสู่ปี 2570 โดยเตรียมการเพื่อวางแผนพัฒนาเศรษฐกิจ และสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 11 (พ.ศ. 2555 - 2559) ได้มองหาพลังขับเคลื่อนทางเศรษฐกิจใหม่ที่เน้นการพัฒนาด้วยการเจริญเติบโตแบบสมดุลและยั่งยืนบนพื้นฐานของความได้เปรียบที่แท้จริงของประเทศ โดยการมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มคุณค่า/สร้างมูลค่าให้กับสินค้าที่ไทยมีความสามารถในการแข่งขันอยู่แล้ว รวมถึงการมุ่งเน้นส่งเสริมความสามารถในการแข่งขันในกลุ่มสินค้าที่ไทยมีศักยภาพ/มีความสามารถหลัก (Core Competency) และสร้างสรรค์มูลค่าให้เป็นปัจจัยขับเคลื่อนใหม่ ซึ่งนำไปสู่จุดเปลี่ยนโครงสร้างสินค้าและบริการที่สำคัญของไทยในอนาคต เป็นการยกระดับสู่เศรษฐกิจยุคใหม่ด้วยการนำความคิดเรื่อง “เศรษฐกิจสร้างสรรค์ (Creative Economy)” มาเป็นแนวทางในการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ ซึ่งงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นประโยชน์ต่อเกษตรกรในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนเป็นอย่างมาก หากสามารถพัฒนาต่อยอดจนนำไปสู่การผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้ เนื่องจากด้วยตัวของ

ผลิตภัณฑ์จากงาขี้ม้อนสามารถที่จะพัฒนาไปสู่การเป็นเศรษฐกิจสร้างสรรค์ได้ โดยสามารถเชื่อมโยงได้ทั้งภาคการศึกษา การพัฒนาระบบการเกษตร อุตสาหกรรม บริการ และการตลาด ซึ่งจะส่งผลต่อการกระจายรายได้ และความยั่งยืนในระยะยาว นั่นคือการขับเคลื่อนเศรษฐกิจที่สมดุลและยั่งยืนอย่างแท้จริงต่อไป

ดังนั้น จากข้อมูลพื้นฐานดังกล่าว จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการวิจัย และพัฒนาการเพิ่มมูลค่าสินค้าเกษตรเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ เช่น การวิจัย และพัฒนาสารสกัดจากผลผติดทางการเกษตรเพื่อเป็นสารเสริมสุขภาพ และความงาม การวิจัย และพัฒนาผลิตภัณฑ์เข้มข้นเพื่อใช้ประโยชน์ด้านสารเสริมสุขภาพ ผลิตภัณฑ์เสริมความงาม และป้องกันโรค ต่อไปในอนาคต