บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

ถั่วเขียว

ถั่วเขียว (mungbean, green gram, golden gram) มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Vigna radiata* (L.) Wilezek อยู่ในวงศ์ Leguminosae เป็นพืชตระกูลถั่วที่ปลูกได้ดีในเขตร้อน (Tropical region) และเป็นพืชตระกูลถั่วที่มีความสำคัญของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (South East Asia) เพราะเป็นพืชที่เจริญเติบโตได้ดีในสภาพอากาศร้อนชื้น ไม่ชอบอากาศหนาวเย็น มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทยที่ส่งออกสร้างรายได้เข้าประเทศมูลค่าหลายล้านบาท จากข้อมูลปริมาณและมูลค่าการส่งออกถั่วเขียวในปี พ.ศ. 2552 ที่ผ่านมามีการส่งออกรวม 48,983 ตัน คิดเป็นมูลค่า 1,357.2 ล้านบาท และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2552) สำหรับปริมาณความต้องการบริโภคภายในประเทศประมาณ 230,000 ตัน มีการใช้ประโยชน์ คือ เพาะเป็นถั่วงอก 70,000 ตัน ทำวุ้นเส้น 50,000 ตัน ทำขนม 30,000 ตัน ทำแป้ง 20,000 ตัน ใช้บริโภคโดยตรง 10,000 ตัน และใช้เป็นเมล็ดพันธุ์ 15,000 ตัน

องค์ประกอบทางเคมีของถั่วเขียว

ถั่วเขียวเป็นพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีปริมาณโปรตีนสูงเมื่อเทียบกับถั่วเหลืองหรือถั่วอื่น ๆ คือ มีโปรตีนระหว่าง 19.00-25.98 เปอร์เซ็นต์ คาร์โบไฮเดรต 59-65.7 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 1.04-1.37 เปอร์เซ็นต์ เยื่อใย 0.82-3.24 เปอร์เซ็นต์ เถ้า 3.88-4.71 เปอร์เซ็นต์ และแป้ง 51.80-58 เปอร์เซ็นต์ (อรอนงค์และคณะ, 2531) องค์ประกอบของกรดอะมิโนในเมล็ดถั่วชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับถั่วเขียว โดยถั่วเขียวมีปริมาณของกรดอะมิโน Leucine และกรดอะมิโน Lysine ในปริมาณสูงมาก และจากการศึกษาพบว่าโปรตีนจากพืชตระกูลถั่วจะขาดกรดอะมิโนที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เช่น Methionine แต่จะมีกรดอะมิโน Lysine ในปริมาณที่สูง ซึ่งอาหารพวกธัญพืชจะมีน้อย ปริมาณกรดอะมิโนในเมล็ดถั่วชนิดต่าง ๆ แสดงในตาราง 2.2 นอกจากนี้เมล็ดถั่วชนิดต่าง ๆ เป็นแหล่งอาหารที่มีวิตามินสูง ได้แก่ ไทอามีน(thiamine) ไรโบฟลาวิน (riboflavin) และไนอาซีน (niacin) โดยในถั่วเขียวจะมีปริมาณของแคโรทีน (carotene) ไทอามีน (thiamine)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ไรโบฟลาวิน (riboflavin) และไนอาซีน (niacin) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับถั่วบางชนิดพบว่าถั่วเขียวมีปริมาณวิตามินที่สูงมาก แสดงในตาราง 2.3 (Fordhamn *et al*., 1975)

ตาราง 2.1 คุณค่าทางโภชนาการผลิตภัณฑ์จากถั่วเขียว

ผลิตภัณฑ์จากถั่วเขียว	ความชื้น (%)	ไขมัน (%)	แป้ง (%)	โปรตีน (%)
เมล็ดถั่วเขียว	13.0	2.0	58.0	23.4
แป้งถั่วเขียว	14.0	0.2	85.5	0.2
ถั่วงอก	88.8	0.2	6.6	3.8
วุ้นเส้น	15.7	0.6	82.9	0.13

ที่มา: เพิ่มพูน (2531)

ตาราง 2.2 ปริมาณกรดอะมิโนเมล็ดถั่วชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับโปรตีนจากไข่

ปริมาณกรดอะมิโน	ชนิดของถั่ว				
(กรัม/16 กรัมไนโตรเจน)	ถั่วเลนทิล	ถั่วฝรั่งเศส	ถั่วเขียว	ถั่วเหลือง	โปรตีนจากไข่
Lysine	5.1	6.8	7.3	6.3	7.2
Threonine	3.0	3.3	3.4	4.1	5.2
Valine	5.1	5.4	6.9	4.7	7.4
Leucine	5.5	8.9	7.7	7.1	7.8
Isoleucine	5.8	6.0	6.3	4.3	6.8
Methionine	0.6	1.0	1.5	1.2	3.4
Typtophan	0.6	1.0	0.4	1.2	1.5
Phenylanine	4.0	5.5	5.3	4.9	5.8
Arginine	7.0	9.2	6.9	6.7	6.7
Histidine	2.1	2.8	2.7	3.3	2.4

ที่มา: Meiners *et al*., (1976)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 2.3 ปริมาณวิตามินชนิดต่าง ๆ ในเมล็ดถั่ว

ชนิดของถั่ว	แคโรทีน (μg/100g)	ไทอามีน (mg/100g)	ไรโบฟลาวิน (mg/100g)	ไนอาซีน (mg/100g)
ถั่วเขียว	94	0.47	0.27	2.3
ถั่วเลนทิล	270	0.45	0.2	2.6
ถั่วฝรั่งเศส	30	0.88	0.14	2.2
ถั่วเหลือง	426	0.73	0.39	3.2

ที่มา: Fordhamn *et al.* (1975)

คุณสมบัติของแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ และในส่วนที่เป็นแหล่งสะสมอาหาร เช่น เมล็ดและหัว คำว่า “แป้ง” ในการผลิตนั้น หมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ น้อยมาก โดยทั่วไปแป้งยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ อยู่มาก จะเรียกว่า ฟลาวร์ (flour) เช่น แป้งข้าวโพด แป้งข้าวสาลี และแป้งถั่วเขียว เป็นต้น แต่เมื่อสกัดสิ่งเจือปนออกไปจนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ จึงเรียกว่า สตาร์ช (starch) (กล้าณรงค์และเกื้อกูล, 2546)

1. การเกิดเจลาติไนเซชั่น (gelatinization)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) จำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีสมบัติเป็น hydrophilic แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปร่างแห micelles การจัดเรียงตัวเช่นนี้จะทำให้เม็ดแป้งไม่ละลายน้ำเย็น ในขณะที่เม็ดแป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำแล้วพองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดและใสเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียก การเกิดเจลาติไนเซชั่น ซึ่งกระบวนการเกิดเจลาติไนเซชั่นนี้จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ภายหลังจากถึงอุณหภูมิวิกฤต (critical temperature) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลาติไนซ์ เมื่อตรวจวัดด้วยเครื่องวัดความหนืด จะเรียกว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting time) ซึ่งจะต่างกันขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ชนิดและองค์ประกอบของแป้ง สัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน เป็นต้น แป้งจากพืชหัว (แป้งมันฝรั่ง) หรือราก (แป้งมันสำปะหลัง) จะมีอุณหภูมิเริ่มเจลาติไนซ์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ต่ำกว่าแป้งจากธัญพืช (ข้าวเจ้า ข้าวโพด ข้าวสาลี) ความหนืดสูงสุดของสารละลายน้ำแป้งในระหว่างเจลาติไนซ์ (peak viscosity) จะแปรเปลี่ยนตามชนิดของแป้ง ซึ่งแป้งจากพืชหัว (แป้งมันฝรั่ง) หรือราก (แป้งมันสำปะหลัง) จะมีความหนืดเมื่อแป้งพองตัวสูงสุด (peak viscosity) สูงกว่าแป้งจากธัญพืช เช่น ข้าวเจ้า ข้าวโพด ข้าวสาลี (กล้าณรงค์และเกื้อกูล, 2546)

2. การคืนตัวของแป้ง (retrogradation)

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนเซชั่นแล้วให้ความร้อนต่อไป เม็ดแป้งจะพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่และแตกออก เป็นผลให้ความหนืดลดลง โมเลกุลของแป้งที่อยู่ภายในจะกระจายตัวออกจากเม็ดแป้ง เมื่อปล่อยให้สารละลายเย็นตัวโมเลกุลเหล่านี้จะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นร่างแหสามมิติโครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำได้และกลับมีความหนืดที่คงตัวมากขึ้น และเมื่อลดอุณหภูมิลงไปอีกการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกจากวุ้น (synersis) ทำให้วุ้นมีลักษณะขาวขุ่น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดรีโทรเกรเดชั่น (retrogradation) หรือที่เรียกว่า การคืนตัว (กล้าณรงค์และเกื้อกูล, 2546)

ปัจจัยที่มีผลต่อการคืนตัวได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง อุณหภูมิและความเป็นกรดด่างของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะไมโลส อะไมโลเพคติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ในแป้ง ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของแป้งสูงแป้งจะสามารถคืนตัวได้ดี ในช่วง pH 5 ถึง 7 แป้งสามารถคืนตัวได้เร็วที่สุด แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง แป้งข้าวโพดและแป้งสาลีจะมีอัตราการคืนตัวสูงกว่าแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง (กล้าณรงค์และคณะ, 2541)

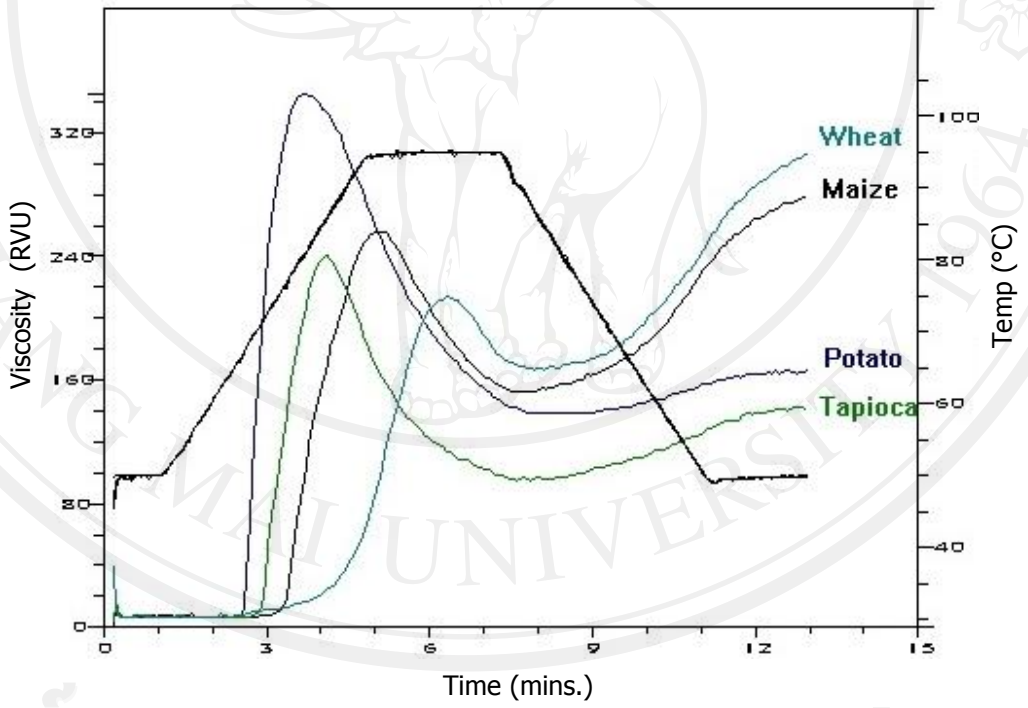
3. การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง

ความหนืดเป็นสมบัติที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายของแป้ง เมื่อแป้งได้รับความร้อนเม็ดแป้งจะดูดซับน้ำและเกิดการพองตัวขึ้นเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลถูกทำลาย ซึ่งการพองตัวของเม็ดแป้ง ทำให้น้ำบริเวณรอบ ๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งจึงเคลื่อนไหวได้ยาก มีผลให้เกิดความหนืดขึ้น อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืด (pasting temperature) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเม็ดแป้งก็จะพองตัวมากขึ้น ความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงจุดที่ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ซึ่งเป็นจุดที่บ่งบอกถึงเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่และเมื่อให้ความร้อนต่อไปอีกรวมทั้งมีการกวนอย่างต่อเนื่อง เม็ดแป้งจะแตกตัวและโมเลกุลอะไมโลสกระจายออกมา ทำให้ความหนืดลดลง เมื่อมีการลดอุณหภูมิลง ทำให้เกิดการจัดเรียงตัว

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

กันใหม่ของโมเลกุลอะไมโลส หรือการเกิดรีโทรเกรเดชัน ส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งเรียกว่า ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) (Zheng and Sosulski, 1998) แสดงผลการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) ซึ่งสามารถตรวจสอบและติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนืดในระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้ง โดยให้ความร้อนกับแป้งที่มีน้ำในปริมาณมากเกิดพอในช่วงอุณหภูมิ 50-95 องศาเซลเซียส และทำให้เย็นลงจาก 95 เป็น 50 องศาเซลเซียส

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งแต่ละชนิดจะแตกต่างกันออกไป (ภาพ 2.1) ขึ้นกับองค์ประกอบภายในของแป้งแต่ละชนิด แป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูงจะมีการพองตัวสูงกว่าแป้งที่มีอะไมโลสสูง เช่น แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันฝรั่ง ซึ่งมีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง จะมีการพองตัวสูงกว่าแป้งจากธัญพืช



ภาพ 2.1 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งชนิดต่าง ๆ
ที่มา: กล้าณรงค์และคณะ (2541)

Chung *et. al.* (2000) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชถั่วเขียวด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) พบว่าอุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ชพองตัวเท่ากับ 71.9 องศาเซลเซียส ความหนืดเมื่อสตาร์ชพองตัวสูงสุดเท่า 249 RVU ความหนืดเมื่อสตาร์ชเย็นตัวเท่ากับ 260 RVU

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Hoover *et. al*., 1997 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ถั่วเขียวความเข้มข้นร้อยละ 6 น้ำหนักโดยปริมาตร pH 5.5 ด้วยเครื่อง brabender viscoamylograph พบว่า อุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ชเริ่มเกิดความหนืดคือ 80 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95 องศาเซลเซียส ความหนืดเท่ากับ 200 BU เมื่อคงอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ความหนืดของ paste เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ชี้ให้เห็นว่า paste ค่อนข้างคงตัว และแกรนูลสตาร์ชไม่แตกระหว่างกวนเมื่อลดอุณหภูมิเป็น 50 องศาเซลเซียส ความหนืดของ paste เพิ่มขึ้นเป็น 360 BU โดยรูปแบบความหนืดของสตาร์ถั่วเขียวเป็นแบบ C คือ ลักษณะความหนืดไม่ปรากฏเป็นยอดสูงสุด

ด้วงถั่วเขียว

ด้วงถั่วเขียวหรือด้วงเจาะเมล็ดถั่ว (cowpea weevil) มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Callosobruchus maculatus* (Fabricius) อยู่ในวงศ์ Bruchidae อันดับ Coleoptera ด้วงถั่วเขียวเป็นแมลงศัตรูในโรงเก็บที่สำคัญของเมล็ดพืชตระกูลถั่วหลายชนิด เช่น ถั่วเขียว ถั่วฝักยาว ถั่วแขก ถั่วหัวช้าง ถั่วแระ ถั่วลันเตา ถั่วแดง ถั่วดำ และถั่วพุ่ม โดยเฉพาะถั่วเขียว (ชุมพล, 2533) ด้วงถั่วเขียวเป็นแมลงที่มีการเจริญเติบโต 4 ระยะ (holometabolous หรือ complete metamorphosis) ได้แก่ ระยะไข่ (egg) ระยะตัวหนอน (larva) ระยะดักแด้ (pupa) และระยะตัวเต็มวัย (adult) การเจริญเติบโตของด้วงถั่วเขียวจะใช้เวลามากหรือน้อยขึ้นกับชนิดของอาหาร อุณหภูมิ ความชื้นสัมพันธ์ของอากาศและความชื้นของเมล็ด อินทวัฒน์ (2537) พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของด้วงถั่วเขียวคือ 32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพันธ์ 90 เปอร์เซ็นต์ จะมีระยะการเจริญเติบโตประมาณ 21-23 วัน สั้นกว่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพันธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ใช้เวลาประมาณ 36 วัน มยุรา (2532) พบว่า วงจรชีวิตของด้วงถั่วเขียวสั้นที่สุด อยู่ในช่วงเดือนมิถุนายน และยาวที่สุดอยู่ในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงกุมภาพันธ์ ซึ่งแต่ละระยะมีการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน

ไข่ (egg) ไข่มีลักษณะยาวรี ปลายข้างหนึ่งแหลมอีกข้างหนึ่งมนยาวประมาณ 0.5-0.6 มิลลิเมตร กว้างประมาณ 0.5 มิลลิเมตร มีสีใสในตอนแรกและต่อมาก็มีสีขุ่นปนเหลือง ระยะไข่ใช้ระยะเวลา 3-6 วัน จึงฟักเป็นตัวหนอน เมื่อหนอนฟักออกจากไข่จะเจาะเข้าสู่เมล็ด ไข่ด้วงถั่วเขียวไม่สามารถฟักเป็นตัวหนอนได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส โดยตัวเมียวางไข่อย่างน้อย 1 ฟองต่อเมล็ด ตัวเมียมักวางไข่บนผิวเมล็ดหรือบนฝักแก่ในไร่ 2-3 ฟองต่อถั่วเขียวหนึ่งเมล็ด ตลอดชีวิตวางไข่ได้ 40-128 ฟอง (เฉลี่ยประมาณ 50 ฟอง) (วิเชียร, 2525; ชุมพล, 2533; Talekar, 1988)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตัวหนอน (larva) หนอนเมื่อออกจากไข่จะเจาะผ่านส่วนเปลือกเมล็ดถั่วเขียวตรงที่ไข่ติดกับเมล็ดเข้าไปอาศัยกัดกินอยู่ภายในเมล็ด ตัวหนอนมีสีขาวขุ่นปนเหลือง ลำตัวค่อนข้างอ้วนและมีลักษณะโค้ง ส่วนหัวมีสีน้ำตาลปนดำขนาดเล็กกว่าลำตัว ลำตัวยาวประมาณ 0.38 มิลลิเมตร กว้างประมาณ 0.17 มิลลิเมตร ตัวหนอนโตเต็มที่ลำตัวมีลักษณะป้อมและผิวหนังย่นมากขึ้น มีความยาวประมาณ 3.0-3.5 มิลลิเมตร กว้างประมาณ 1.8 มิลลิเมตร ระยะหนอนใช้เวลาประมาณ 13-20 วัน และเข้าดักแด้อยู่ภายในเมล็ดที่มันเจาะกินอยู่ (อุดม, 2521)

ดักแด้ (pupa) ก่อนที่หนอนของด้วงถั่วเขียวจะเข้าสู่ระยะดักแด้จะกัดกินส่วนใกล้กับเปลือกเมล็ดถั่ว (seed coat) ให้เยื่อบาง ๆ หรือเรียกว่าหน้าต่าง (window) เพื่อให้ตัวเต็มวัยสามารถผ่านออกมาจากเมล็ดได้ (Talekar, 1988) ดักแด้เป็นแบบ exarate มีความยาวประมาณ 3.2 มิลลิเมตร กว้างประมาณ 1.7 มิลลิเมตร เมื่อเข้าดักแด้ใหม่ ๆ ยังคงมีสีเหลืองอ่อน ๆ แล้วจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อนและเข้มเมื่อใกล้ฟักเป็นตัวเต็มวัย ระยะดักแด้ใช้เวลาประมาณ 3-7 วัน

ตัวเต็มวัย (adult) เมื่อฟักออกจากดักแด้ แล้วจะพักตัวอยู่ในเมล็ดถั่วเขียวประมาณ 3-4 วัน แล้วเอาหัวดันทะลุเยื่อบาง ๆ ที่ปิดรูไว้ออกมา หลังจากออกมาจากเมล็ดถั่วเป็นเวลาประมาณ 3-8 นาที ด้วงถั่วเขียว ก็เริ่มจับคู่ผสมพันธุ์ (Talekar, 1988) และมักวางไข่ในวันเดียวกัน ตัวเต็มวัยมีชีวิตอยู่ได้นาน 3-18 วัน ตัวเต็มวัยมีสีน้ำตาลหรือสีน้ำตาลปนเทา ปล่องท้องส่วนสุดท้ายมีขนาดใหญ่และมองเห็นได้ชัดเพราะปีกสั้นคลุมส่วนท้องไม่มิด มีแถบหรือจุดสีน้ำตาลแก่บนปีกทั้งสองข้าง ลำตัวเรียวแคบไปทางส่วนหน้าทำให้หัวเล็กและงุ้มเขาหาส่วนอก ตามีขนาดใหญ่ หนวดเป็นแบบฟันเลื่อยและปลายปีกมีสีดำ มีขนาดลำตัวยาว 3.0-4.5 มิลลิเมตร (วิเชียร, 2525; ชุมพล, 2533) วงจรชีวิตประมาณ 19-33 วัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพันธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาเฉลี่ยในการพัฒนาจากไข่จนเป็นตัวเต็มวัยประมาณ 24 วัน

ความเสียหายจากการเข้าทำลายของด้วงถั่วเขียว

ด้วงถั่วเขียวสามารถเข้าทำลายถั่วเขียวได้ตั้งแต่ระยะก่อนเก็บเกี่ยว โดยการเข้าไปวางไข่ที่ฝักถั่วเขียวในแปลงปลูก (Sagnia, 1994) ซึ่ง บุษรา (2529) ได้ศึกษาช่วงเวลาที่ด้วงถั่วเขียวเข้าทำลายถั่วเขียวในแปลงปลูก โดยการใช้สวิงโฉบจับตัวเต็มวัย พบว่า ช่วงเวลา 18.00 น. เป็นเวลาที่จับตัวเต็มวัยของด้วงถั่วเขียวได้ปริมาณสูงสุด สำหรับในประเทศไทย มีการเก็บเกี่ยวฝักถั่วเขียวจากแปลงปลูก 2 ครั้ง เนื่องจากฝักถั่วเขียวมีความสุกแก่ไม่พร้อมกัน (พีระศักดิ์, 2542) แล้วจึงตากเมล็ดเพื่อลดความชื้น ก่อนการนวด และกะเทาะเมล็ด (บุษรา, 2529) เพื่อบรรจุกระสอบเตรียมเข้าโรงเก็บซึ่งเมื่อนำเมล็ดถั่วเขียวที่มีไข่ของด้วงเขียวเข้ามาปะปนอยู่ในกระสอบ จะทำให้เมล็ดถั่วเขียวเกิดความเสียหาย และไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เมื่อเก็บไว้เป็นเวลานาน พรทิพย์ (2535)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

พบว่า การทำลายถั่วเขียวของด้วงเขียวพบได้ตลอดปี และประชากรเพิ่มมากขึ้น เมื่อเก็บเมล็ดถั่วเขียวไว้ข้ามปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเก็บเมล็ดถั่วเขียวไว้ในโรงเก็บที่ไม่มีการจัดการที่ดี จะเปิดโอกาสให้ด้วงถั่วเขียวแพร่พันธุ์ และเพิ่มประชากร สามารถทำความเสียหายกับเมล็ดถั่วเขียว และพืชตระกูลถั่วอื่น ๆ ที่เก็บเกี่ยวใหม่ ๆ ได้

ความสูญเสียของผลผลิตทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว แบ่งเป็นความสูญเสียด้านปริมาณและด้านคุณภาพ มีปัจจัยที่สำคัญอยู่ 2 ประการคือ ปัจจัยทางกายภาพ (physical factor) โดยมีอุณหภูมิกับความชื้นเป็นตัวการสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลผลิต และอายุการเก็บรักษา ส่วนปัจจัยทางชีวภาพ (biological factor) เป็นพวกศัตรูที่เข้าทำลายหลังการเก็บเกี่ยว เช่น นก หนู เชื้อรา ไรและแมลง ซึ่งศัตรูเหล่านี้ในแต่ละปีทำความเสียหายให้กับเมล็ดถั่วเขียวเป็นอย่างมาก จากที่กล่าวมาแล้วนั้นนับว่าแมลงเป็นตัวการสำคัญที่ทำความเสียหายให้กับเมล็ดถั่วเขียวได้มากที่สุด (วิเชียร, 2525) ผลเสียหายที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการทำลายของแมลงศัตรูในโรงเก็บกับเมล็ดพืชมีดังนี้ ผลผลิตสูญเสียน้ำหนัก ทำให้สูญเสียคุณค่าทางอาหาร เมล็ดพันธุ์สูญเสียความงอก ทำให้ผลผลิตเสียคุณภาพ ทำให้สูญเสียเงินทอง ทำให้เสียชื่อเสียง และทำให้เกิดปัญหาทางสังคม ในปัจจุบันการรายงานความสูญเสียของผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยวยังมีอยู่น้อยและไม่มีใครสามารถประเมินความเสียหายออกมาเป็นตัวเลข หรือเป็นรูปธรรมให้เห็นได้อย่างชัดเจน (ชุมพล, 2533)

ด้วงถั่วเขียวหรือด้วงเจาะเมล็ดถั่วทำลายเมล็ดถั่วทุกชนิดยกเว้นเมล็ดถั่วเหลือง (สุภารดาและอานัติ, 2538) เมล็ดที่ถูกทำลายจะเห็นมีไข่สีขาวติดอยู่ที่ผิวเมล็ด และมีรูกลม ๆ อย่างน้อย 1 รู ที่เกิดจากการที่ตัวเต็มวัยเจาะออกมาจากเมล็ด (วิเชียร, 2525; ชุมพล, 2533) เนื้อภายในเมล็ดจะถูกตัวอ่อนกัดกินจนเหลือแต่เปลือกหรือเป็นโพรงไม่สามารถนำไปบริโภคหรือใช้ทำพันธุ์ได้ (ไพฑูรย์และสุภารดา, 2538) Sanon *et al.* (1998) พบว่า ด้วงถั่วเขียวจำนวน 750 ตัว ทำลายเมล็ดถั่วหนัก 3 กิโลกรัม สามารถเพิ่มประชากรเป็นจำนวน 66,000 ตัว ภายในระยะเวลาเพียง 6 เดือน ทำให้น้ำหนักเมล็ดถั่วลดลงเหลือเพียง 626 กรัม คิดเป็นความเสียหายถึง 79 เปอร์เซ็นต์ และในประเทศไนจีเรียมีรายงานความเสียหายที่เกิดจากการทำลายของแมลงชนิดนี้ โดยพบว่าภายใน 3-5 เดือน เมล็ดจะถูกทำลายถึง 100 เปอร์เซ็นต์และสูญเสียน้ำหนักมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ หลังจาก 6 เดือน เมล็ดจะเสียคุณภาพถึง 90 เปอร์เซ็นต์ และสร้างความเสียหายแก่ผลผลิต 2,900 ล้านตัน (Keita *et al*., 2000) อีกประการหนึ่ง ด้วงถั่วเขียวเหล่านี้สามารถเจาะถุงพลาสติกที่เรียกว่า โพลีเอทธีลีน (polyethylene) ได้ด้วย (ชุมพล, 2533) ความเสียหายในช่วงการเจริญเติบโตของด้วงถั่วเขียวเท่ากับ 52.1 มิลลิกรัมต่อเมล็ด เมื่อมีจำนวนแมลงที่เจาะเมล็ดออกมาเฉลี่ย 2 ตัว ซึ่งการบริโภครวมของแมลงที่เจาะเมล็ดออกมา 1 ตัวเท่ากับ 35.1 มิลลิกรัม และมีประมาณ 25 มิลลิกรัมในเมล็ดที่มีแมลงเจาะเมล็ดออกมามากกว่าหนึ่งตัว (Adam, 1976)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

นอกจากนี้ยังมีการทดสอบความงอกของเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวที่มีการเข้าทำลายของด้วงถั่วเขียว พบว่า ในระยะหนอนทำให้ความงอกลดลง 93 เปอร์เซ็นต์ (Santos *et al*., 1990) และยังมีการทดสอบการสูญเสียโปรตีนจากการกินของแมลงศัตรูถั่วเขียว พบว่า ด้วงถั่วเขียวเป็นแมลงศัตรูที่สำคัญของถั่วเขียว ทำให้เกิดการสูญปริมาณโปรตีนในเมล็ดที่ถูกทำลายประมาณ 8.76-50.85 มิลลิกรัมต่อเมล็ดถั่วเขียว 1 กรัม ซึ่งความเสียหายโดยเมล็ด 1 หน่วยแปรผันตาม 1.6729 หน่วยของการสูญเสียปริมาณโปรตีน (Khare *et al*., 1976)

การเพิ่มปริมาณและการเข้าทำลายของแมลงภายในกองเมล็ด ส่งผลให้มีการหายใจของเมล็ดและเกิดความร้อนมากขึ้น ขณะที่ความร้อนไม่สามารถระบายออกไปได้จะทำให้เกิด hot spot ขึ้นภายในส่วนใดส่วนหนึ่งของกองเมล็ด และจะขยายวงกว้างขึ้นไปเรื่อย ๆ ความชื้นบริเวณ hot spot จะมีการรวมตัวกันเป็นหยดน้ำ เมื่อมีน้ำหรือความชื้นมากขึ้นเชื้อราก็จะลงทำลาย ทำให้เมล็ดพืชจับกันแข็งเป็นก้อน เมล็ดเริ่มงอกและเน่าเสีย (Howe, 1962; Freeman, 1974)

อุณหภูมิสูงกับการตายของแมลง (lethal influence of high temperature)

แมลงถูกจัดให้เป็นสัตว์เลือดเย็น (poikilothermic or cold-blooded) แมลงจะดำรงอยู่ได้ต้องอยู่ภายใต้ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม เรียกว่า “favorable range of temperature” หากระดับของอุณหภูมิสูง หรือต่ำมากจนเกินไป อาจมีผลให้แมลงตาย หรือชะลอการเจริญเติบโตได้เนื่องจากแมลงไม่มีระบบกลไกที่จะควบคุมการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในร่างกายให้คงที่อุณหภูมิในร่างกายของแมลงจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมโดยรอบอยู่ตลอดเวลา ถึงแม้ว่าแมลงสามารถเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิร่างกายของมันไปตามสภาพแวดล้อมได้ แต่ในบางสภาวะก็ทำได้ในระดับที่ทนทานได้ หรือในช่วงของอุณหภูมิระยะหนึ่งเท่านั้น อุณหภูมิจึงเป็นปัจจัยทางกายภาพมีความสำคัญยิ่งต่อการดำรงชีพของแมลง โดยอุณหภูมิมีผลต่อการดำรงชีพและการอยู่รอดของแมลงใน 2 ลักษณะ คือ มีผลทางตรงต่อการเจริญเติบโต การพัฒนา และการอยู่รอดของแมลง ส่วนผลทางอ้อมนั้น ได้แก่ ความชื้น ปริมาณฝน ลม ความดันบรรยากาศ (David and George, 2007) แมลงเป็นสัตว์ขนาดเล็กมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของร่างกายกับปริมาตรในอัตราส่วนที่สูง ดังนั้นหากมีการสูญเสียน้ำเพียงเล็กน้อยจะมีผลรุนแรงต่อสมดุลของน้ำในร่างกายของแมลง (Chapman, 1998) และเมื่อแมลงได้รับความร้อนในอัตราที่ไม่ต่อเนื่อง เช่น การได้รับความร้อน 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งสภาวะเครียดนี้ทำให้แมลงจะมีการผลิต heat shock protein เพื่อให้ตัวเองอยู่รอด (David and George, 2007)

อุณหภูมิสูงมีผลต่อการตายของแมลง (lethal influence of high temperature) แมลงแต่ละชนิด และแต่ละสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ย่อมมีความทนทานต่ออุณหภูมิสูงได้ไม่เท่ากันรวมทั้ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

มีศักยภาพในการทนทานได้ในช่วงอุณหภูมิระดับหนึ่งเท่านั้น แต่หากอุณหภูมิสูงกว่านี้จะเกิดอันตรายแก่ชีวิตได้ ความทนทานต่ออุณหภูมิสูงของแมลงมีแตกต่างกันไปตามชนิดของแมลงและประสบการณ์ในการเผชิญต่อสภาพอุณหภูมิสูงของแมลงแต่ละชนิด การตายอันเนื่องมาจากอุณหภูมิสูงเกิดขึ้นเนื่องจากการขาดน้ำ และอัตราการเผาผลาญของร่างกายที่เพิ่มมากขึ้นทำให้สูญเสียพลังงานมาก และแมลงจะตายในที่สุด (Mason and Strait, 1998) การควบคุมแมลงโดยการใช้อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส ติดต่อกันทำให้แมลงบางชนิดหยุดการเจริญเติบโต และตายได้หากใช้อุณหภูมิระหว่าง 55-60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หรือ อุณหภูมิระหว่าง 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จะทำให้แมลงทุกชนิดตายหมด (กรมการข้าวกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2551) ที่อุณหภูมิ 25-32 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดำรงชีวิต และแพร่ขยายพันธุ์ของแมลงศัตรูโรงเก็บมากที่สุด อุณหภูมิตั้งแต่ 45 องศาเซลเซียส ขึ้นไป สามารถทำให้แมลงตายได้ภายใน 1 วัน โดยเฉพาะที่อุณหภูมิมากกว่า 62 องศาเซลเซียส ขึ้นไป สามารถทำให้แมลงตายได้ภายใน 1 นาที (ตาราง 2.4) (Banks and Fields, 1995)

ตาราง 2.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อแมลงศัตรูโรงเก็บ

อุณหภูมิ (°C)	ผล
25-32	เหมาะสมสำหรับการพัฒนาของแมลง
33-35	อุณหภูมิสูงสุดที่แมลงสามารถเจริญเติบโตได้
36-42	แมลงบางส่วนตายหรือเคลื่อนย้ายไปหาพื้นที่ที่เย็นกว่า
45-49	ตายภายในวัน
50-60	ตายภายในชั่วโมง
มากกว่า 62	ตายภายในนาที

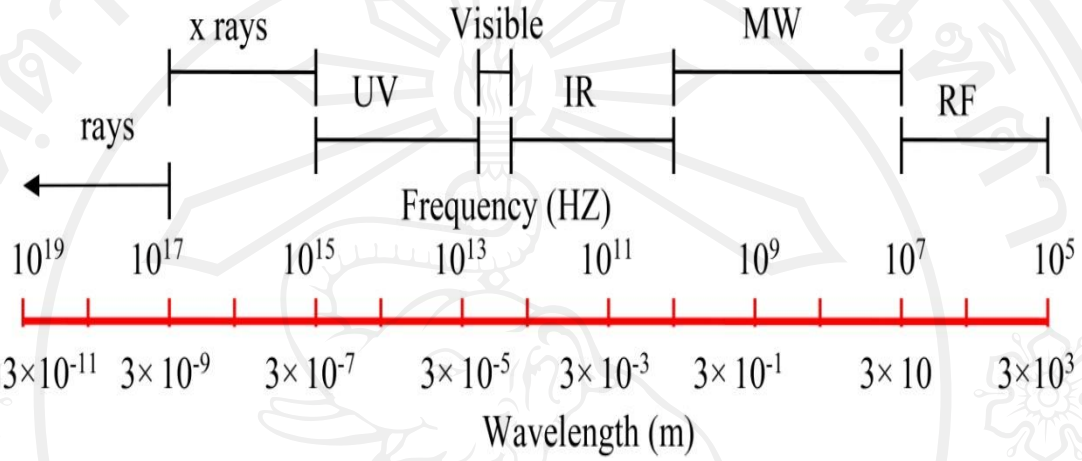
ที่มา: Banks and Fields (1995)

การให้ความร้อนแบบไดอิเลคทริค (dielectric heating)

การให้ความร้อนแบบไดอิเลคทริค (dielectric heating) ทำงานโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ย่านคลื่นวิทยุหรือไมโครเวฟ (ภาพ 2.2) กำลังสูงส่งผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุ สนามของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้โมเลกุลของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบมีขั้ว (dipolar molecules) ซึ่งมีขั้วไฟฟ้า

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

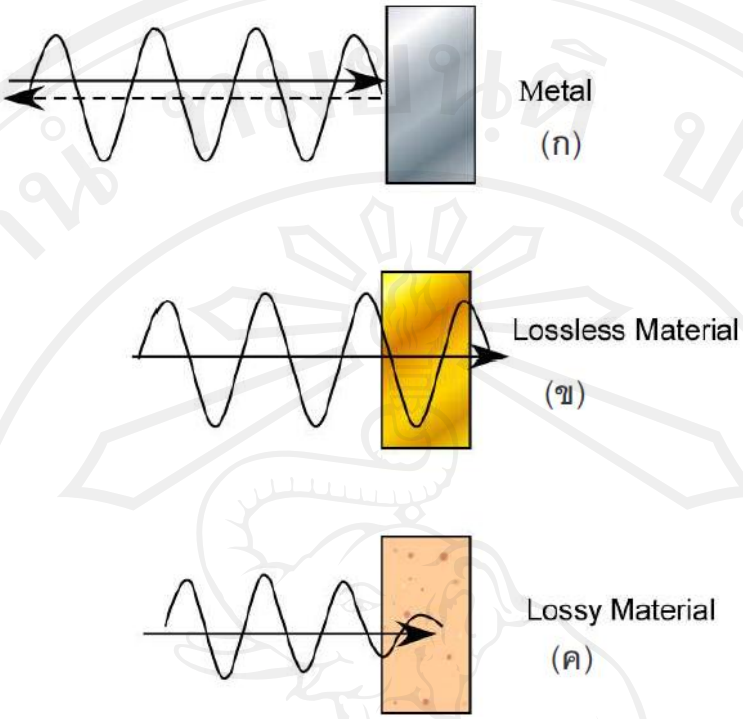
ที่เป็นขั้วบวกและขั้วลบพยายามเรียงตัวตามทิศทางของสนามคลื่นที่ส่งผ่านเข้ามา ทำให้เกิดการเสียดสีกันของโมเลกุล เกิดเป็นความร้อนกระจายทั่วภายในเนื้อวัสดุหรือการถ่ายเทพลังงานจากคลื่นไปยังวัสดุนั่นเอง



ภาพ 2.2 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Marra *et al.,* 2008)

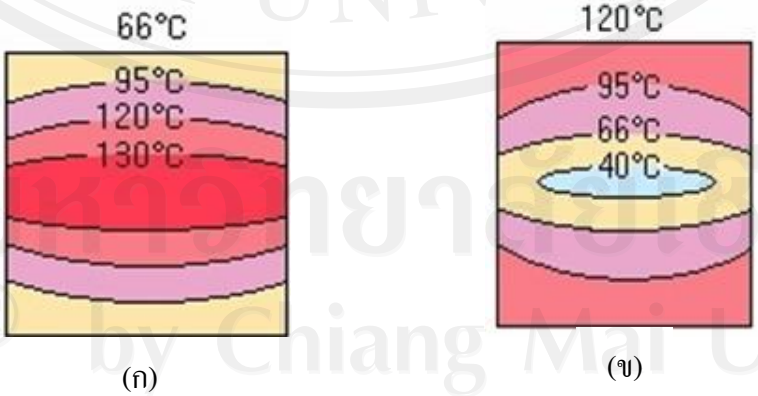
วัสดุที่สามารถใช้การให้ความร้อนแบบไดอิเลคทริคได้จะต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือ เมื่อคลื่นไมโครเวฟหรือคลื่นความถี่วิทยุเคลื่อนที่ไปตกกระทบบนผิวของโลหะ เนื่องจากคุณสมบัติของโลหะที่เต็มไปด้วยอิเล็กตรอนอิสระที่พร้อมจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าอย่างทันที ทำให้สนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟหรือคลื่นความถี่วิทยุไม่สามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อของโลหะได้ จึงเกิดการสะท้อนกลับหมด (reflected) ของคลื่นไมโครเวฟหรือคลื่นความถี่วิทยุ จึงไม่สามารถเกิดความร้อนได้ เหมาะสำหรับทำโครงสร้างเตาและตัวสะท้อนคลื่นดังแสดงในภาพ 2.3 (ก) สำหรับวัสดุที่เป็นฉนวน ระหว่างอะตอมมีการยึดเหนี่ยวกันอย่างแข็งแรงด้วยพันธะโควาเลนต์ อีกทั้งมีการกระจายตัวของประจุอย่างสมมาตร เช่น ควอตซ์ เซรามิก โพลีโพไพลีน และอากาศ เป็นต้น วัสดุดังกล่าวจะไม่ตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟและคลื่นความถี่วิทยุ ทำให้คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน (transmitted) โดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน กล่าวคือ แอมปลิจูดของคลื่นไม่มีการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในภาพ 2.3 (ข) ส่วนวัสดุที่ประกอบด้วยโมเลกุลที่มีคุณสมบัติเป็นไดโพล เช่น น้ำ โพลิเมอร์บางชนิด วัสดุจำพวกอาหาร เป็นต้น ไดโพลจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟหรือคลื่นความถี่วิทยุ และทำให้มีการเคลื่อนที่ของโมเลกุล ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการสลับขั้วด้วยความถี่สูงของสนามไฟฟ้า จนทำให้เกิดการชนระหว่างโมเลกุลและทำให้พลังงานคลื่นถูกดูดกลืน (absorbed) หรือแอมปลิจูดลดลงขณะเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปดังแสดงในภาพ 2.3 (ค) (ดวงเดือน, 2546)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพ 2.3 ลักษณะการตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุชนิดต่าง ๆ (ดวงเดือน, 2546)

การให้ความร้อนแบบไดอิเลคทริคเป็นวิธีการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานเป็นความร้อนเกิดภายในเนื้อวัสดุโดยตรงและรวดเร็ว ในลักษณะภายในออกสู่ภายนอก (ภาพ 2.4 (ก)) ซึ่งแตกต่างจากการให้ความร้อนแบบเดิมซึ่งใช้เชื้อเพลิง คอยล์ร้อนจากไอน้ำ หรือขดลวดไฟฟ้า ซึ่งการถ่ายเทความร้อนจะอาศัยการพาของอากาศร้อนหรือการแผ่รังสีจากแหล่งความร้อนเป็นหลัก ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปที่ผิววัสดุก่อน จากนั้นจึงจะค่อยเกิดการนำความร้อนจากผิวนอกของวัสดุเข้าไปสู่ภายใน (ภาพ 2.4 (ข))



(ก) (ข)

ภาพ 2.4 การให้ความร้อนแบบไดอิเลคทริค (ก) และการให้ความร้อนแบบเดิม (ข)
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

กลไกการเกิดความร้อนภายในวัสดุ

การให้ความร้อนแบบไดอิเลคทริคจะเกิดขึ้นมาจากปฏิกิริยาภายในร่วมกันระหว่างพลังงานของความยาวคลื่น และ dielectric ซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐาน ผลของปฏิกิริยาร่วมดังกล่าวทำให้เกิดปรากฏการณ์ 2 รูปแบบ คือ intermolecule friction ที่เกิดจากแรงดึงดูดกันระหว่างโมเลกุล และ hysteresis เป็นแรงต้านทางประจุไฟฟ้าเนื่องมาจากแรงเฉื่อย ซึ่งขึ้นกับจำนวนประจุ มวล และรูปร่างของโมเลกุล ความร้อนจากการดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความเป็นฉนวน และความสามารถในการเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นค่าของคุณสมบัติของวัสดุทางการเกษตร และชีวภาพ โดยเป็นอิทธิพลมาจากความถี่ อุณหภูมิ ปริมาณเกลือ และปริมาณความชื้น (Ryynänen, 1995) เมื่อวัตถุมีการดูดซับพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก่อให้เกิดความร้อนได้ 2 แบบ ร่วมกัน ได้แก่

1. ionic polarization เป็นการเกิดความร้อนเนื่องจากผลของการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายเมื่อเข้าไปอยู่ในสนามไฟฟ้าโดยแต่ละไอออนที่มีประจุไฟฟ้าถูกกระตุ้นและเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ทำให้เกิดการเสียดสีกันระหว่างไอออน ในขณะเดียวกันเกิดการเปลี่ยนรูปของพลังงานจลน์เป็นพลังงานความร้อนขึ้น แล้วเกิดการกระจายความร้อนไปยังส่วนอื่น ๆ ซึ่งการเกิดความร้อนลักษณะนี้เกิดขึ้นในส่วนของของเหลวภายในเซลล์ที่อยู่ในรูปของสารละลายต่าง ๆ

2. orientation polarization เป็นการเกิดความร้อนกับสารประกอบที่มีขั้ว (polar) ซึ่งได้แก่ น้ำในสภาพปกติการเรียงตัวของประจุบวกและประจุลบของสารประกอบที่มีขั้วนี้เรียงตัวอย่างไม่มีระเบียบ (random oriented) เมื่อเข้าไปอยู่ในสนามไฟฟ้าประจุบวกและประจุลบของสารเกิดการเคลื่อนที่เพื่อเปลี่ยนทิศทางการเรียงตัวที่เป็นระเบียบขึ้น การเคลื่อนที่ด้วยการหมุนตัวกลับไปมาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วตามระดับความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ให้ ซึ่งในคลื่นความถี่วิทยุ การเคลื่อนที่ของประจุ 3-300 ล้านครั้งต่อ 1 วินาที ซึ่งผลของความเร็วในการหมุนตัวและความเสียดสีกันก่อให้เกิดเป็นความร้อนขึ้นมาอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 2-3 วินาทีหรือประมาณ 1 นาที หลังจากได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ต่อจากนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นเกิดการกระจายตัวไปยังส่วนอื่น ๆ (Lücke and Hörsten, 2007)

สมบัติไดอิเลคทริคของอาหาร

คุณสมบัติไดอิเลคทริค คือ คุณสมบัติที่บ่งบอกว่าวัตถุนั้นสามารถทำ ให้เกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ และคลื่นที่อยู่ในช่วงความถี่คลื่นวิทยุได้ เมื่อทำการวิเคราะห์อาหารโดยทั่วไป พบว่า อาหารแทบทุกชนิดมีสมบัติเป็นไดอิเลคทริค แต่จะดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้แตกต่างกัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบทางเคมีของอาหาร ลักษณะทางกายภาพของอาหาร อุณหภูมิของอาหาร และระดับความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (Copson, 1975) สมบัติทางไดอิเลคทริคของอาหารสามารถแสดงเป็นค่าตัวเลขที่มีความเกี่ยวข้องกับค่าต่าง ๆ อยู่ 3 ค่า คือ

1) ค่าคงที่ไดอิเลคทริค (dielectric constant, ε')

ค่าคงที่ไดอิเลคทริค (dielectric constant, ε') คือ ค่าที่แสดงถึงความสามารถของสารประกอบที่กักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ได้เมื่อนำสารประกอบนั้นไปวางไว้ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ สารใดที่มีค่านี้สูงจะสามารถกักเก็บพลังงานได้สูง ค่านี้จะเปลี่ยนไปได้ตามอุณหภูมิ ปริมาณความชื้นของอาหารนั้นๆ จำนวนขั้วและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นโดยสนามไฟฟ้าจะเป็นตัวกำหนดค่า ε' ของอาหารซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความจุไฟฟ้าของอาหารต่อความจุไฟฟ้าของอากาศ ซึ่งบางครั้งอาจเป็นสุญญากาศ นอกจากนี้ค่าความหนืดของอาหารและอุณหภูมิมีผลต่อค่านี้เช่นกัน เช่น เมื่อน้ำเปลี่ยนเป็นน้ำแข็ง ค่า ε' จะลดลงและลดลงอีกเมื่อน้ำแข็งถูกทำให้เย็นลงอีก คลื่นไมโครเวฟและคลื่นความถี่วิทยุจึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านน้ำแข็งได้ดีกว่าน้ำ อาหารแช่เยือกแข็งที่มีความชื้นสูงจึงดูดซับพลังงานได้มากกว่าตอนที่ละลายแล้ว ความถี่ของคลื่นที่ 915 และ 2,450 MHz จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบต่าง ๆ ของโครงสร้างโมเลกุลที่เกิดจากการเรียงตัวใหม่ของขั้วไฟฟ้าจะให้พลังงานในรูปของความร้อนและมีผลต่อค่า ε' และค่า ε'' (วิไล, 2543)

2) แฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเลคทริค (dielectic loss factor, ε'')

แฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเลคทริค (dielectic loss factor, ε'') คือ ค่าของพลังงานที่สูญเสียไปหรือที่แพร่กระจายไปในสารไดอิเลคทริค เมื่อนำไปวางไว้ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ พลังงานไฟฟ้าจะสูญเสียไปเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในอาหารนั้น ๆ ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าจะเกิดความร้อนขึ้นสูง แต่พลังงานจะถูกดูดซับไปอย่างรวดเร็วเมื่อคลื่นไมโครเวฟผ่านเข้าไปในชิ้นอาหารนั้นเพียงระยะสั้น ๆ แล้วความร้อนนั้นจะลดลงโดยกระบวนการของการนำและการพาความร้อนเข้าสู่ภายในชิ้นอาหาร ดังนั้นถ้าอาหารที่มีความหนาและขนาดใหญ่มาก ๆ การดูดซับไมโครเวฟจะเกิดได้เฉพาะผิวหน้าและความร้อนจะเข้าสู่ชิ้นอาหารได้ทั่วถึงจะเป็นไปด้วยการนำและการพาซึ่งต้องใช้เวลานานกว่าอาหารที่มีขนาดเล็กและบาง (สายสนม, 2540) คลื่นไมโครเวฟและคลื่นความถี่วิทยุเดินทางเป็นเส้นตรงเหมือนแสง ถูกสะท้อนกลับเมื่อกระทบกับโลหะ เคลื่อนที่ผ่านอากาศ สามารถทะลุผ่านภาชนะที่ทำด้วยแก้ว พลาสติก กระดาษ หรือไม้ได้หรือถูกดูดซับในส่วนประกอบของอาหารที่มีน้ำเป็นส่วนใหญ่ ถ้าคลื่นไมโครเวฟและคลื่นความถี่วิทยุถูกสะท้อนกลับหมดหรือทะลุผ่านวัตถุได้โดยไม่มีการดูดซับ วัตถุหรืออาหารนั้นจะไม่ร้อน อาหารจะ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ร้อนขึ้นเมื่อมีการดูดซับพลังงานไว้ ในการให้ความร้อนแก่อาหารจะทำให้คลื่นสูญเสียพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าไป เรียกว่า loss factor เป็นตัวชี้บอกการสูญเสียพลังงานคลื่นไมโครเวฟและคลื่นความถี่วิทยุในการเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในอากาศหรือบอกว่าคลื่นถูกดูดซับไว้ทั้งหมด ค่า ε'' ของอาหาร ความยาวคลื่นและความถี่ของคลื่นเป็นตัวกำหนดความลึกของการแทรกผ่าน ทั้งนี้เนื่องจากคลื่นสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนขณะที่แทรกเข้าไปในอาหาร ยิ่งค่า ε'' ของอาหารสูง จะเกิดความร้อนมากขึ้นด้วย หมายความว่าคลื่นจะแทรกเข้าไปอาหารได้สั้นลงก่อนที่พลังงานทั้งหมดจะถูกใช้ไป ถ้าต้องการให้คลื่นแทรกเข้าไปอาหารได้ลึก ๆ ก็ควรเลือกคลื่นความถี่ที่มีค่า ε'' ของอาหารต่ำและพบว่าไมโครเวฟที่ความถี่ 900 MHz จะเกิดการสูญเสียพลังงานมากกว่าที่คลื่นความถี่ 2,450 MHz (วิไล, 2543)

3. ค่าลอสแทนเจน (loss tangent (tan δ) หรือ dissipaton factor)

ค่าลอสแทนเจน หมายถึง ลักษณะของการสูญเสียพลังงานของสารนั้น ซึ่งคิดออกมาในรูปของมุมที่ต่างไป 90 องศา ในสภาพปกติทั่วไปของกระแสไฟฟ้า (สายสนม, 2540) ค่านี้จะสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเลคทริคและแฟตเตอร์การสูญเสียไดอิเลคทริคดังสมการ (Copson, 1975)

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

เมื่อ $\tan\delta$ = loss tangent

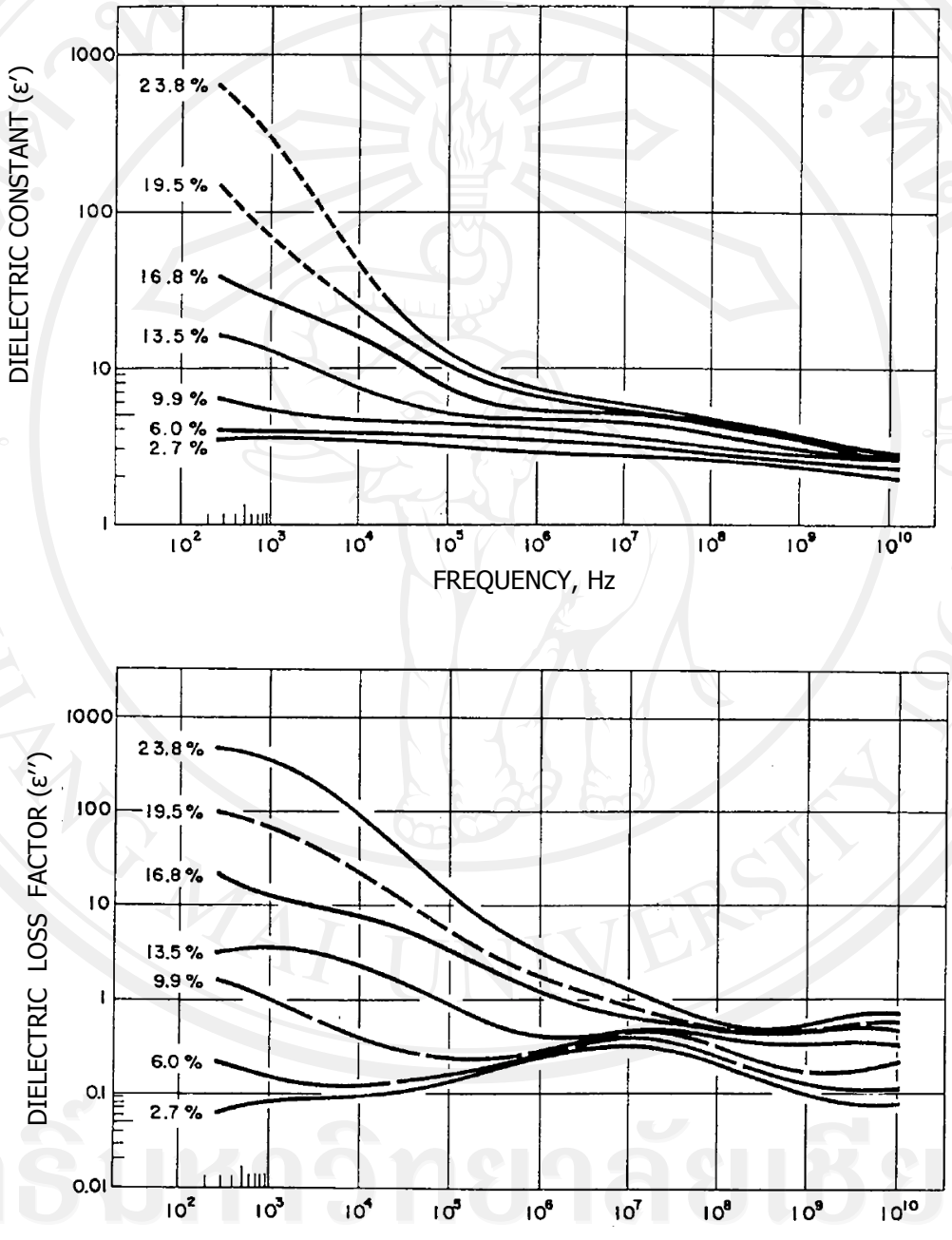
ε' = ค่าคงที่ไดอิเลคทริค

ε'' = แฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเลคทริค

สมบัติไดอิเลคทริคของวัตถุที่เป็นพืชทางการเกษตรซึ่งเป็นชนิด hygroscopic ทั่วไป จะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณความชื้นของวัตถุ นอกจากนั้นสมบัติดังกล่าวยังขึ้นอยู่กับ ความถี่ของสนามไฟฟ้า อุณหภูมิและความหนาแน่นของวัตถุ (Kraszewski, 1991) Nelson *et al.* (2001) ได้แสดงตัวอย่างข้อมูลการผันแปรของค่าคงที่ไดอิเลคทริคและแฟกเตอร์การสูญเสียของข้าวสาลีในย่านความถี่และความชื้นต่างกัน ๆ ไว้ในภาพ 2.5 จะเห็นว่าค่าคงที่ไดอิเลคทริคจะลดลง เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นแต่ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียอาจจะเพิ่มหรือลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น และเมื่อความชื้นสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเลคทริคก็จะสูงขึ้นด้วยในทำนองเดียวกันค่าแฟกเตอร์การสูญเสียก็จะมีลักษณะ

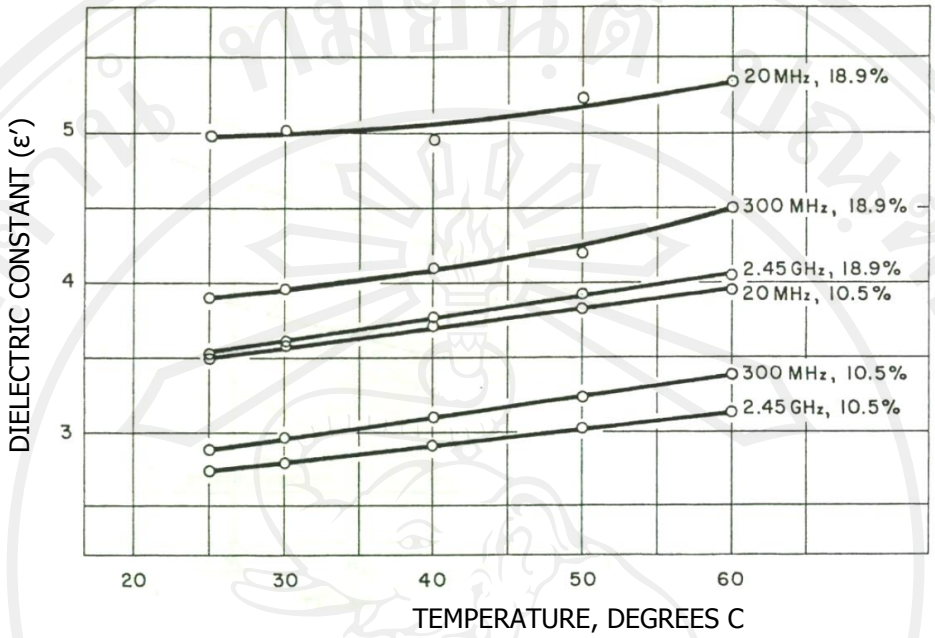
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เช่นเดียวกัน ในภาพ 2.6 และ 2.7 แสดงการผันแปรของค่าคงที่ไดอิเลคทริค และแฟกเตอร์การสูญเสียที่ได้รับอิทธิพลมาจากอุณหภูมิและความหนาแน่นของตัวอย่างเมล็ดข้าวโพดตามลำดับ

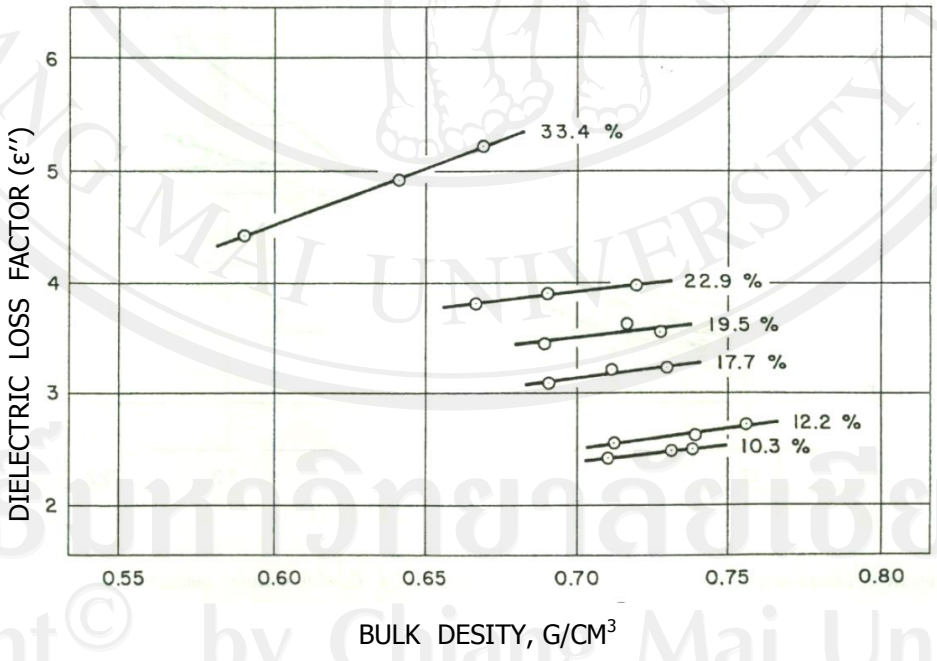


ภาพ 2.5 การผันแปรของค่าคงที่ไดอิเลคทริคและแฟกเตอร์การสูญเสียของข้าวสาลี (*Triticum aestivun* L.) ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส โดยมีอิทธิพลมาจากความถี่และปริมาณความชื้นในช่วง 2.7 เปอร์เซ็นต์ ถึง 23.8 เปอร์เซ็นต์ (Nelson *et al*., 2001)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพ 2.6 ค่าคงที่ไดอิเลคทริคของข้าวโพดผันแปรกับอุณหภูมิ (Nelson *et al*., 2001)



ภาพ 2.7 ค่าคงที่ไดอิเลคทริคของข้าวโพดที่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่น (Nelson *et al*., 2001)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การให้ความร้อนโดยคลื่นวิทยุ (radio frequency dielectric heating)

คลื่นความถี่วิทยุ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประเภทหนึ่งที่มีความถี่อยู่ในช่วงระหว่าง 3 KHz–300 MHz จะอยู่ในรูปของ non-ionizing ของการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และสามารถอธิบายได้ในรูปแบบของเวลาของการเปลี่ยนแปลงของไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ตัดผ่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อคลื่นไมโครเวฟ (MV) หรือ คลื่นความถี่วิทยุ (RF) อยู่ในสภาวะที่เป็นกลางผลเห็นได้ชัดคือการเกิดความร้อน (Francesco *et al*., 2006) สำหรับประเทศไทยช่วงคลื่นความถี่วิทยุที่นำมาประยุกต์ใช้อยู่ที่ระดับ 13.56, 27.12 และ 40.68 MHz (ดังตาราง 2.5) โดยความถี่ที่ใช้งานสำหรับ radio frequency heating และ microwave heating ที่จำแนกโดย FCC (Federal Communications Commission) สามารถกระจายความร้อนผ่านวัตถุที่มีความหนาได้ดีกว่าคลื่นไมโครเวฟ สามารถนำมาใช้ในกระบวนการที่ทำกับวัตถุที่มีขนาดใหญ่หลายชิ้นพร้อม ๆ กัน

ตาราง 2.5 การจำแนกช่วงความถี่สำหรับการใช้งานในทางอุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์การแพทย์

ชนิดของคลื่น	ช่วงความถี่ (Frequency)
Radio	13.56 MHz ± 6.68 kHz
	27.12 MHz ± 160.00 kHz
	40.68 MHz ± 20.00 kHz
Microwave	915 MHz ± 13 MHz industrial
	2450 MHz ± 50 MHz home & ind.
	5800 MHz ± 75 MHz
	24125 MHz ± 125 MHz

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2554)

การให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุทำงานโดยใช้ตัวกำเนิดคลื่น ทำด้วยวงจรหลอดแก้วสุญญากาศหรือสารกึ่งตัวนำ สร้างคลื่นวิทยุกำลังสูงส่งผ่านมายัง electrode plates โดยจะเป็นตัวปล่อยสนามคลื่นวิทยุตามรูปแบบที่กำหนดไปยังวัสดุที่ต้องการให้ความร้อน ขนาดของกำลังคลื่นวิทยุที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนในอุตสาหกรรมจะอยู่ในระดับตั้งแต่ 500 วัตต์ไปจนถึงหลายร้อยกิโลวัตต์ ในย่านความถี่ 13.56, 27.12 และ 40.68 MHz ซึ่งจะสามารถผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุและความถี่คลื่น โดยคลื่นที่ความถี่ต่ำกว่าจะสามารถ

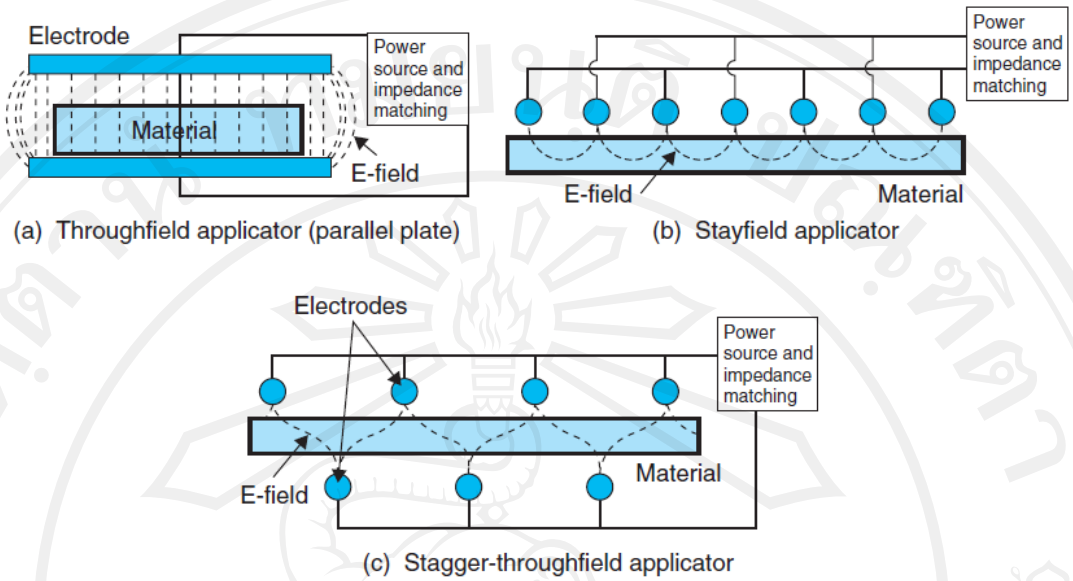
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ลึกกว่า เหมาะสมสำหรับการให้ความร้อนกับวัสดุที่มีขนาดใหญ่ ส่วนคลื่นความถี่สูงจะสามารถผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ตื้นกว่าเหมาะสมสำหรับการให้ความร้อนกับวัสดุที่มีขนาดเล็ก

เทคโนโลยีคลื่นความถี่วิทยุนำไปใช้ในด้านอุตสาหกรรม ประกอบด้วย 2 ระบบ คือ ระบบเครื่องกำเนิดคลื่น RF (RF generator) และระบบไฟฟ้า 50 Ω โดยเครื่องกำเนิดคลื่น RF ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดพลังงาน (power generator) ระบบขั้วไฟฟ้า (electrode systems) และอุปกรณ์เชื่อมต่อ (coupling devices) ระหว่างเครื่องกำเนิดพลังงานกับระบบขั้วไฟฟ้า เครื่องกำเนิดพลังงานเป็นแบบ free running oscillators (เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบฟรีรันนิ่งออสซิเลเตอร์) โดยวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (oscillator circuit) เชื่อมต่อกับ triode valve (อุปกรณ์ควบคุมการปิดเปิดหลอดสุญญากาศที่มีขั้วไฟฟ้า) ซึ่งถูกป้อนจากแหล่งพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงโวลต์สูง oscillator circuit ประกอบด้วยอุปกรณ์เหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้า (inductor) และอุปกรณ์เก็บประจุไฟฟ้า (capacitor) เชื่อมต่อกันเป็นคู่ขนาน เมื่อการสั่นสะเทือนที่จากวงจรของ oscillator ถูกควบคุม oscillator circuit โดยเชื่อมต่อกับ triode valve ซึ่งทำหน้าที่เหมือนสวิทช์ปิดเปิดของพลังงาน triode valve มีระบบหล่อเย็นโดยใช้อากาศหรือน้ำ (เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับเครื่องกำเนิดพลังงาน) ระบบขั้วไฟฟ้าเป็นส่วนสำคัญที่สุดในการออกแบบสำหรับอุปกรณ์ของเครื่อง RF คลื่นความถี่วิทยุโวลต์สูงถูกป้อนจากเครื่องกำเนิดพลังงานส่งไปยังขั้วไฟฟ้าที่เรียกว่า applicators ซึ่งเกิดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างแท่นโลหะ (electrode) ผลิตภัณฑ์ถูกทำให้เกิดความร้อนระหว่างแท่นโลหะภายใต้อำนาจของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนของ electrode plates และผลิตภัณฑ์บรรจุอยู่ภายใต้เพื่อป้องกันการรั่วไหลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Orsat, 1999)

ประเภทของ applicators มี 3 รูปแบบที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม ดังแสดงในภาพ 2.8 คือ ระบบ through field electrodes, stray field electrodes และ staggered through field electrodes ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

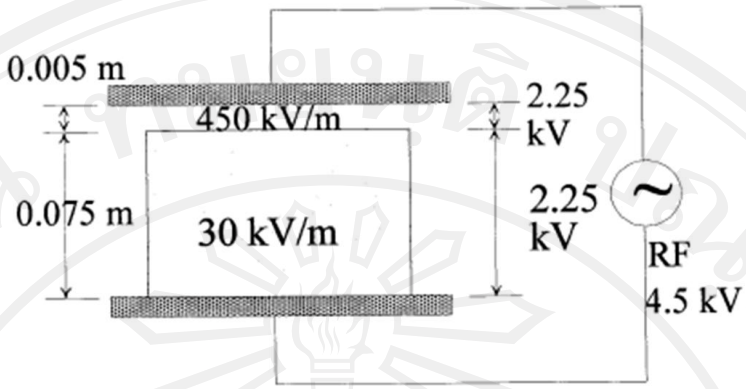


ภาพ 2.8 รูปแบบของ Electrodes ที่ใช้กับคลื่นความถี่วิทยุ (Metaxas, 1988)

ส่วนประกอบของ through field electrodes ประกอบด้วยแท่นโลหะผิวหน้าเรียบ 2 แผ่น และบรรจุผลิตภัณฑ์ระหว่างแผ่นโลหะ ในระบบ stray field electrodes เหมาะสมหรับผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะแนวนอนหรือแนวขวาง และผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีความสม่ำเสมอกัน โดยขั้ว electrodes plates มีรูปร่างเป็นแท่งโลหะกลมยาว แท่งหรือแถบโลหะ มีความเหมาะสมกับกระบวนการแบบไหลต่อเนื่องและผลิตภัณฑ์มีลักษณะบาง และระบบ staggered through field electrodes คล้ายกับระบบ stray field electrode ยกเว้นขั้ว electrodes plates จะจัดเรียงเป็นระเบียบให้สูงกว่าและต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ในการให้ความร้อน ใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะหนา (Orsat, 1999)

แหล่งกำเนิดโวลต์คลื่น RF ถูกส่งไปยังขั้ว electrodes plates ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กระดับ RF สนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงระหว่างแผ่น electrodes plates ส่งผลต่อลักษณะรูปร่างและคุณสมบัติไดอิเลคทริคทำให้เกิดความร้อน เมื่อบรรจุวัสดุเขาไประหว่างช่องว่างของ electrodes plates (ในประเภท through field electrode) การกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอกันยกเว้นบริเวณใกล้กับริมหรือขอบของวัสดุ ขนาดของสนามแม่เหล็กเท่ากับโวลต์ที่ให้กับ electrode plates แบ่งแยกตามระยะทางของ electrode plates 2 แผ่น และเป็นไปได้ว่ามีช่องว่างอากาศระหว่างวัสดุและ electrodes plates ดังแสดงในภาพ 2.9

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



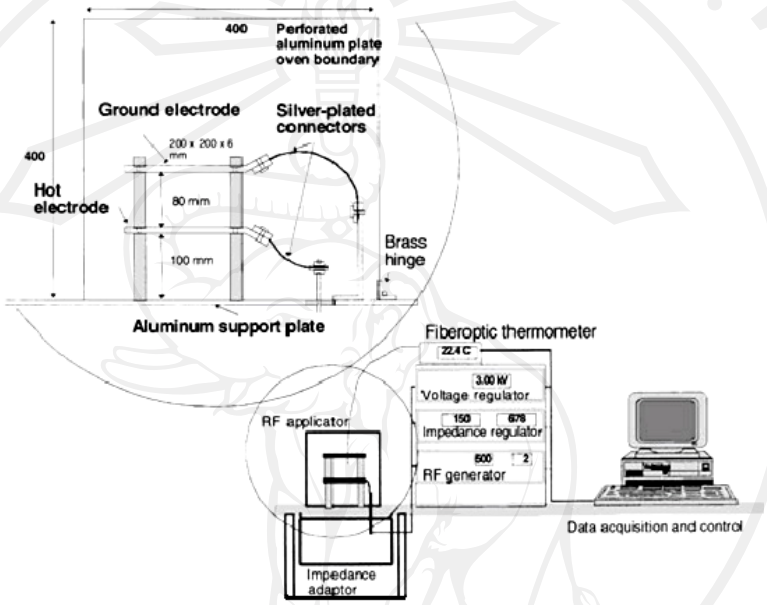
ภาพ 2.9 ผลกระทบของช่องว่างอากาศ (air gap) (Orsat, 1999)

ภาพ 2.9 แสดงถึงการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านวัสดุ 2 ชนิด คือ อากาศและผลิตภัณฑ์ โดยสนามแม่เหล็กภายในอากาศมีค่า dielectric constant เท่ากับหลายเท่าทวีคูณของสนามแม่เหล็กภายในผลิตภัณฑ์ (ค่า dielectric constant อยู่ระหว่าง 2 ถึง 5) โดยโวลต์ที่ให้กับ electrodes plates คือ ผลรวมของโวลต์ที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กผ่านผลิตภัณฑ์และอากาศใน ภาพ 2.16 ค่าโวลต์ของผลิตภัณฑ์ คือ 2.25 kV (30 kV/m × 0.075 m) และค่าโวลต์ของอากาศ คือ 2.25 kV (450 kV/m × 0.005 m) โดยโวลต์รวมทั้งหมดเท่ากับ 4.5 kV ที่ส่งไปยัง electrodes plates แต่ถ้าไม่มีช่องอากาศจะใช้พลังงานโวลต์เพียง 2.25 kV เท่านั้น โดยช่องอากาศจะทำให้สูญเสียพลังงานถึง 2.55 kV ผ่านอากาศเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ ดังนั้นควรกำจัดช่องอากาศให้น้อยที่สุดในการปฏิบัติ (Orsat, 1999)

ประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานและการควบคุมเครื่องกำเนิดพลังงานที่ส่งผ่านไปยังผลิตภัณฑ์ผ่านระบบขั้ว electrode ซึ่งได้เพิ่มอุปกรณ์เชื่อมต่อที่สามารถปรับการให้คลื่นความถี่ภายใน applicator ด้วยเครื่องกำเนิดพลังงาน และสามารถปรับระดับพลังงานที่ส่งไปยังผลิตภัณฑ์ให้ได้รับอัตราการให้ความร้อนที่เหมาะสมได้ ส่วนประกอบของอุปกรณ์เชื่อมต่อโดยทั่วไปสามารถปรับค่าตัวเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าหรือคอยล์เก็บประจุไฟฟ้าซึ่งติดตั้งไว้ใกล้กับระบบ electrode system หรือเครื่องกำเนิดพลังงาน หรือพื้นที่เฉพาะที่อยู่ระหว่าง applicator กับเครื่องกำเนิดพลังงาน เรียกว่า matching boxes เครื่องกำเนิดคลื่น RF แยกส่วนจาก RF applicator โดยเชื่อมต่อโดยใช้ coaxial cable ดังแสดงในภาพ 2.10 โดยเครื่องกำเนิดคลื่น RF กำเนิดความถี่ควบคุมโดย crystal oscillator ความถี่ที่ใช้โดยทั่วไปเช่น 13.56 MHz หรือ 27.12 MHz จุดประสงค์ในการกำหนดความถี่เพื่อลดการรบกวนจากการบริการการสื่อสาร การกำหนดความถี่โดย output impedance (ค่าความฝืดของคอยล์ต่อกระแสไฟฟ้าสลับ) ของเครื่องกำเนิดคลื่น RF ทำให้สะดวก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ต่อการตั้งค่า convenient value (50Ω) ภายใน matching boxes ซึ่งบรรจุ impedance เข้ากับระบบ และสามารถปรับค่าของส่วน RF Applicator ได้ถึง 50Ω ดังนั้นเครื่อง RF generator และส่วน RF applicator จำเป็นต้องทำงานภายใต้ impedance เช่นเดียวกัน สำหรับการเคลื่อนย้ายพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ



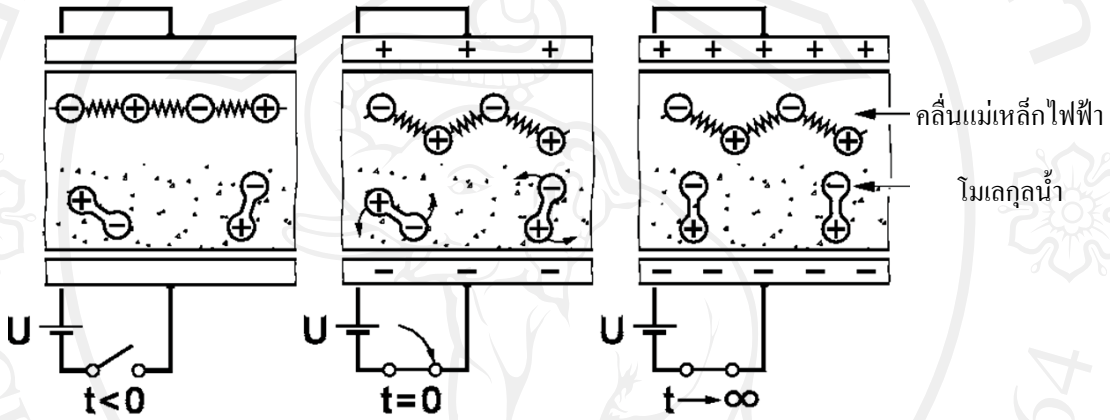
ภาพ 2.10 ระบบการทำงานของเครื่อง Radio Frequency (Cwiklinski, 2001)

กระบวนการกำเนิดความร้อนด้วยเครื่อง RF

เมล็ดพืชมีความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำ (dielectric properties) เมื่อได้รับพลังงานจาก RF ที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงผ่านเข้าไปแบบกระแสสลับที่ความถี่ 27.12 MHz หรือ 27,120,000 ครั้งต่อวินาที ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำและความยาวคลื่นที่ยาวส่งผลให้มีการควบคุมทิศทางของคลื่นได้ดี ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้โมเลกุลภายในเมล็ดพืชเกิดการสั่นสะเทือนตามความถี่ของคลื่น คือวัตถุที่มีโมเลกุล 2 ขั้ว เช่น น้ำมีพันธะ 2 พันธะคือ ไฮโดรเจน โดยการสั่นสะเทือนทำให้เกิดการสะสมพลังงานภายในโมเลกุลจากการกระบวนการ intermolecular friction และ hysteresis โดยขึ้นอยู่กับความถี่และความยาวคลื่นของคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งแรงเสียดทานภายในระหว่างโมเลกุลของน้ำที่อยู่ระหว่างช่องว่างภายในเมล็ดทำให้เกิดความฝืดระหว่างอนุภาค ผลที่ได้คือความร้อนจะเกิดขึ้นตรงโมเลกุลของน้ำ ความร้อนที่สูงกว่าจุดอื่นภายในเมล็ดนี้จะเกิดการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) ความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีการถ่ายเทความร้อนแบบนำ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ความร้อน ซึ่งเป็นการถ่ายเทพลังงานในรูปของอนุภาค ผ่านตัวกลางที่ไม่มีการเคลื่อนที่ เช่น ของแข็งและของเหลวที่มีความหนืดสูง โดยที่ความร้อนจะเริ่มเกิดขึ้นที่น้ำในเมล็ดก่อน หลังจากนั้นความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะมีการถ่ายความร้อนไปสู่จุดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเพื่อรักษาความสมดุลของอุณหภูมิ (equilibrium temperature) จนถึงระดับความร้อนที่ต้องการ (target temperature) (ภาพ 2.11)



ภาพ 2.11 กระบวนการสั่นสะเทือนของโมเลกุลน้ำจนเกิดความร้อน (Cwiklinski, 2001)

ผลของความร้อนจากการให้ความร้อนโดยคลื่นวิทยุ ต่อการกำจัดแมลงในผลผลิตเกษตร

การประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุในกระบวนการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวในผลผลิตเกษตร เมล็ดพันธุ์ เมล็ดพืช และผลิตผลทางการเกษตรอื่นๆ ทั้งนี้เพื่อสนองต่อนโยบายเกษตรและผลิตภัณฑ์อาหารที่สะอาดโดยไม่ใช้สารเคมี (สถาบันวิจัยเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว, 2551) การใช้คลื่นความถี่วิทยุกับผลิตผลทางการเกษตรนั้นเริ่มมีการศึกษามาประมาณ 40 ปีมาแล้วจนถึงปัจจุบันได้มีการประยุกต์คลื่นความถี่วิทยุในระดับอุตสาหกรรมและทางการค้า เพื่อกำจัดสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เช่น เชื้อโรค จุลินทรีย์ และแมลง โดยใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณมาก ซึ่งเป็นการลดขั้นตอนการจัดการ และไม่ทำลายคุณภาพของผลิตภัณฑ์เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการรมสารเคมีโดยใช้ความถี่ที่ 13.56, 27.12 และ 40.68 MHz (Wang and Tang, 2001) Nelson (1996) พบว่า แมลงหลายชนิดที่เข้ามาทำลายผลผลิตทางการเกษตร สามารถถูกควบคุมได้โดยการนำมาผ่านคลื่นความถี่วิทยุในระยะเวลาสั้น ๆ โดยไม่ทำลายผลผลิต โดยทั่วไปแล้วกรรมวิธีในการควบคุมแมลงโดยผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่ประสบความสำเร็จนั้นจะใช้อุณหภูมิที่ 40-90 องศาเซลเซียส โดยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ของผลผลิต ลักษณะของแมลง และธรรมชาติของคลื่นความถี่วิทยุ Nelson and Charity (1972) รายงานว่าสามารถใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อทำการควบคุมแมลงในการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ (stored-grain insect control) โดยการใช้คลื่นความถี่ 39 MHz เป็นเวลา 3 วินาที และ 2,540 MHz 13 วินาที สามารถทำลายตัวเต็มวัยของด้วงงวงข้าว (rice weevils) ในเมล็ดข้าวสาลีได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถใช้ทดแทนการรมด้วยสารเคมี (fumigation) ได้และไม่ทำให้มีสารพิษตกค้างในผลผลิต

Wang *et al*. (2001) ศึกษาการควบคุมแมลงศัตรูของเมล็ดวอลนัท โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุที่ 27 MHz พบว่า ที่ระดับอุณหภูมิ 43 และ 53 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 และ 3 นาที ตามลำดับ สามารถควบคุมตัวหนอน *Cydia pomonella* (L.) (codling moth) วัยที่ 3 และ 4 ที่เข้าทำลายในเมล็ดวอลนัทได้ ส่งผลให้ตัวหนอนตาย 78.6 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของเมล็ดวอลนัท ซึ่งวัดจากปริมาณของเปอร์ออกไซด์ และกรดไขมันรวมทั้งสีของเมล็ดวอลนัท ต่อมา Wang *et al*. (2003) ศึกษาต่อโดยให้คลื่นความถี่วิทยุที่อุณหภูมิ 50 องศาเซสเซียส เป็นเวลา 3 นาที ในการกำจัดแมลง codling moth บริเวณเนื้อด้านในของเมล็ดวอลนัท พบว่า ที่อุณหภูมิและเวลาที่ให้สามารถกำจัดแมลง codling moth ได้โดยไม่ส่งผลต่อคุณภาพของเนื้อวอลนัท สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mitcham *et al*. (2004) จึงได้ศึกษาการใช้คลื่นความถี่วิทยุในการกำจัดแมลง codling moth (*Cydia pomonella*), navel orangeworm (*Amyelois transitella*) และ Indianmeal moth (*Plodia interpunctella*) ที่เป็นแมลงศัตรูสำคัญที่เข้าทำลายและทำให้เกิดความเสียหายต่อคุณภาพของผลผลิตวอลนัท โดยให้คลื่นความถี่วิทยุที่ อุณหภูมิ 47, 50, 53 และ 55 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 นาที พบว่าสามารถฆ่าแมลงได้ 32, 77, 99 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ที่ระดับอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (Wang and Tang, 2004) เป็นระยะเวลา 5 นาที สามารถทำให้ตัวหนอน *Amyelois transitella* Walker (navel orangeworm) วัยที่ 5 ตาย 100 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ปริมาณความชื้นของเมล็ดวอลนัทลดลงไปเพียงเล็กน้อย และไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของวอลนัท นอกจากนี้การใช้คลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ภายใต้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที สามารถกำจัดตัวหนอนวัยที่ 3 ของมอดแป้งในเมล็ดวอลนัทได้อีกด้วย (Tang *et al*., 2004) สอดคล้องกับ Johnson *et al*. (2004) ได้จำแนกระยะการเจริญเติบโตของมอดแป้ง (red flour beetle) ที่มีความทนทานต่อคลื่นความถี่วิทยุ 27 MHz พบว่าหนอนระยะวัยแก่ (วัย 6-8) มีความทนต่อคลื่นความถี่วิทยุ ที่ระดับอุณหภูมิ 48-50 องศาเซลเซียส มากที่สุด รองลงมาได้แก่ ดักแด้ ตัวเต็มวัย ไข่ และหนอนวัยอ่อน ตามลำดับ และพบว่าที่อุณหภูมิ 52 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที สามารถกำจัดหนอนวัยแก่ ในเมล็ดอัลมอนด์วอลนัท และพิสทาชิโอได้ 100 เปอร์เซ็นต์ สำหรับในการค้าวอลนัทเพื่อเป็นทางเลือกในการทดแทนการรมสารเคมี โดยมีการใช้คลื่นความถี่วิทยุในระดับของอุตสาหกรรมวอลนัทขนาดใหญ่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ใช้กำลังไฟที่ 25 kW ความถี่ 27.12 MHz ระดับอุณหภูมิผิวของวอลนัทเฉลี่ย 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที พร้อมกับการลำเลียงวอลนัทไปตามระบบสายพาน ส่งผลให้แมลงศัตรูอันได้แก่ navel orangeworm, codling moth, Indianmeal moth และมอดแป้งตาย 100 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของวอลนัท และสามารถเก็บรักษาวอลนัทภายใต้อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ได้นานถึง 2 ปี (Wang *et al*., 2007b)

Monzon *et al*. (2004) ศึกษาผลของการใช้คลื่นความถี่วิทยุในการกำจัด codling moth และผลต่อคุณภาพผลไม้เชอรี่ พบว่า การใช้คลื่นความถี่วิทยุระยะเวลา 7-10 นาทีที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เพื่อทดสอบการตาย และระยะเวลา 10-20 นาที ที่อุณหภูมิ 48 องศาเซลเซียส เพื่อทดสอบเกี่ยวกับคุณภาพของเชอรี่ พบว่ามีประสิทธิภาพ 100 เปอร์เซ็นต์ ในการกำจัดหนอน codling moth ในเชอรี่และทำให้คุณภาพของเชอรี่ลดลงเพียงเล็กน้อย

สำหรับในประเทศไทยสถานวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวได้มีการศึกษาการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุในผลผลิตทางการเกษตร พบว่ามีประสิทธิภาพและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างแท้จริงในระดับการค้า (สถาบันวิจัยเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว, 2551) ตัวอย่างเช่น ณคณิณ (2551) ศึกษาการใช้คลื่นความถี่วิทยุ (RF) ควบคุมผีเสื้อข้าวสารและผลต่อคุณภาพของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 พบว่า ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 นาที สามารถกำจัดผีเสื้อข้าวสารที่อาศัยปนอยู่ในข้าวสารขาวดอกมะลิได้ดี ในอุณหภูมิที่สูง แต่ใช้เวลาสั้น จะไม่ทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณของสาร 2-acetyl-1-pyrroline กฤษณา (2552) ศึกษาการใช้คลื่นความถี่วิทยุที่อุณหภูมิ 4 ระดับ (55, 60, 65 และ 70 องศาเซลเซียส) ในระยะเวลา 60, 90, 120, 150 และ 180 วินาที และผลของความร้อนเมื่อตำแหน่งของมอดหัวป้อมที่ปะปนไปกับภาชนะบรรจุข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ระดับที่ 1 บนสุด (ผิวหน้าภาชนะบรรจุ) ระดับที่ 2 กึ่งกลางภาชนะ (ลึก 2.5 เซนติเมตร) ระดับที่ 3 ล่างสุด (ลึก 5 เซนติเมตร) พบว่าคลื่นความถี่วิทยุ 70 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 150 วินาที ทำให้แมลงตาย 100 เปอร์เซ็นต์ และทุกตำแหน่งไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังสามารถใช้คลื่นความถี่วิทยุในการกำจัดแมลงร่วมกับวิธีการอื่น ๆ ได้อีกด้วย เพื่อเป็นการประหยัดเวลา และง่ายแก่การจัดการ เช่น การใช้คลื่นความถี่วิทยุร่วมกับวิธีการควบคุมสภาพบรรยากาศ โดยการลดก๊าซออกซิเจน เพิ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น ซึ่งจะเป็นการเพิ่มกระบวนการเกิดเมแทบอลิซึม และความต้องการก๊าซออกซิเจนของแมลงมากขึ้น อย่างไรก็ตามควรคำนึงถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่จะมีต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ และสามารถกำจัดแมลงได้อย่างสมบูรณ์ Janhang *et al.,* 2005 ศึกษาการใช้คลื่นความถี่วิทยุในการกำจัดมอดข้าวเปลือกในเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ขึ้นไปสามารถกำจัดมอดข้าวเปลือกที่เข้าทำลายได้และอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 นาที สามารถ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ลดการเข้าทำลายของเชื้อราที่ติดมากับเมล็ดพันธุ์ข้าวได้ Von Hörsten (2007) ศึกษาการใช้คลื่นความถี่วิทยุในการกำจัดด้วงงวงข้าวเปรียบเทียบกับการใช้ตู้อบลมร้อน พบว่า การใช้คลื่นความถี่วิทยุสามารถจำกัดด้วงงวงข้าวในระยะตัวเต็มวัยได้ดีกว่าการใช้ตู้อบลมร้อนโดยการใช้คลื่นความถี่วิทยุใช้ระดับอุณหภูมิที่ต่ำกว่าและระยะเวลาที่สั้นกว่า นอกจากนี้ยังได้ทดลองในการกำจัดมอดแป้งในอาหารเลี้ยงสัตว์ พบว่า คลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MH ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 นาทีเป็นต้นไป ให้ผลในการกำจัดมอดแป้งทุกระยะการเจริญเติบโตได้ดีที่สุด อีกทั้งยังคงคุณภาพทางเคมีของอาหารไก่ อันได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เยื่อใย เถ้า และสารสกัดที่ปราศจากไนโตรเจน (กรรณิการ์, 2552)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved