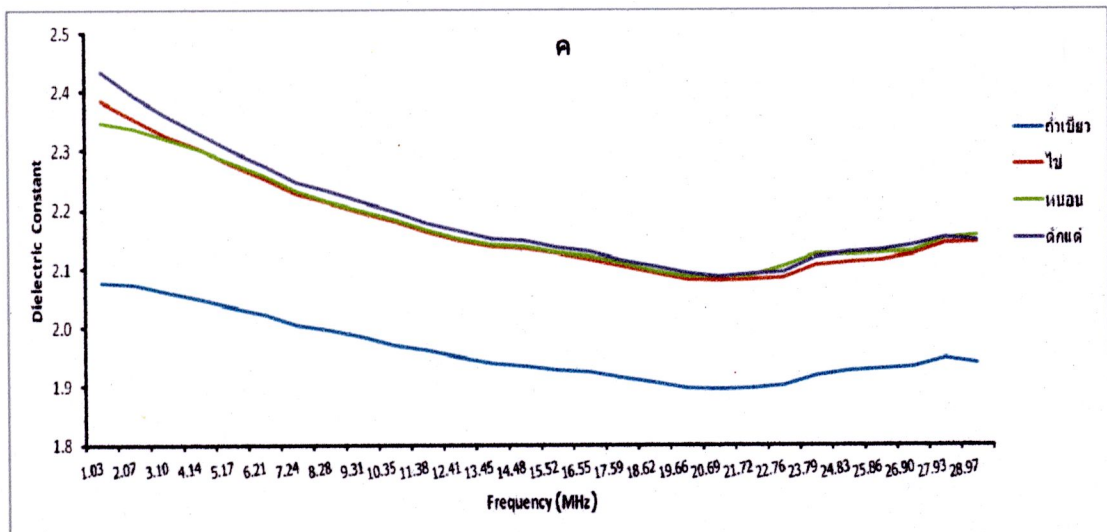
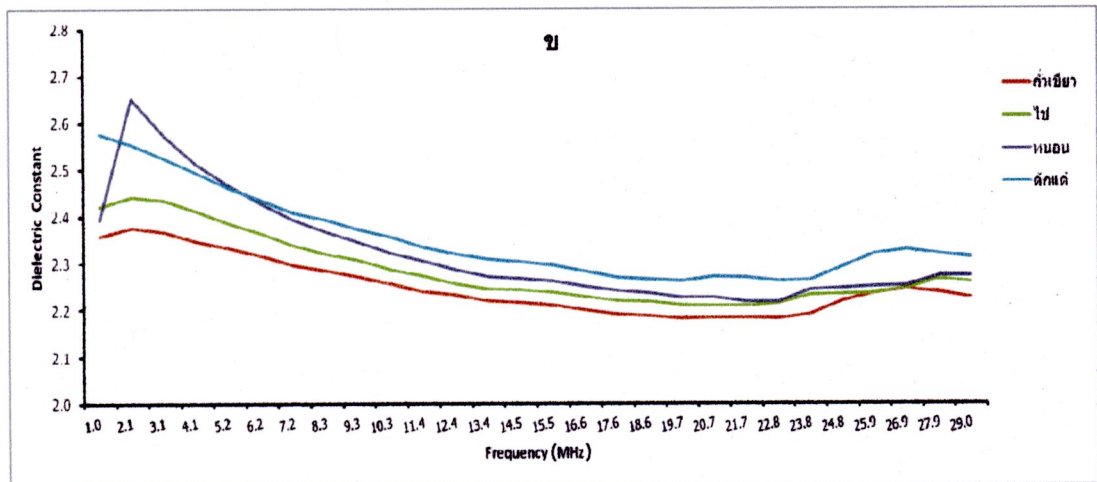
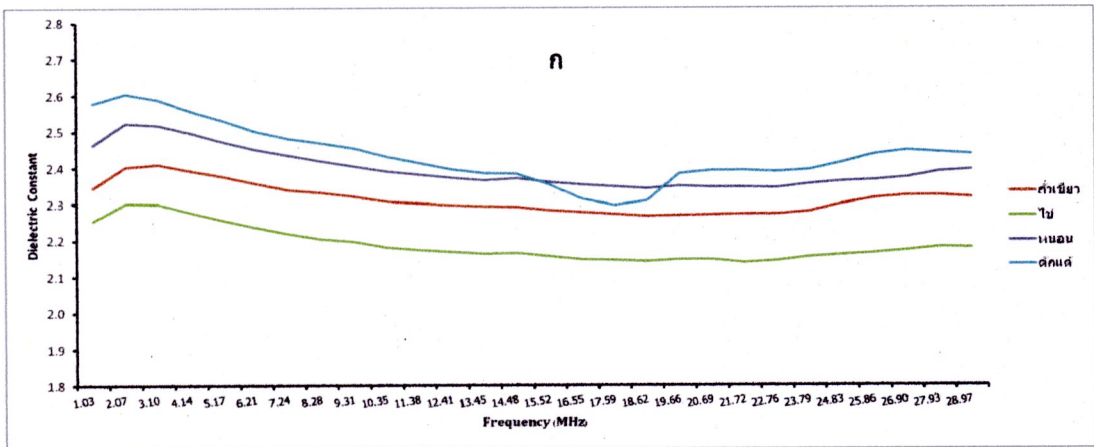


บทที่ 4

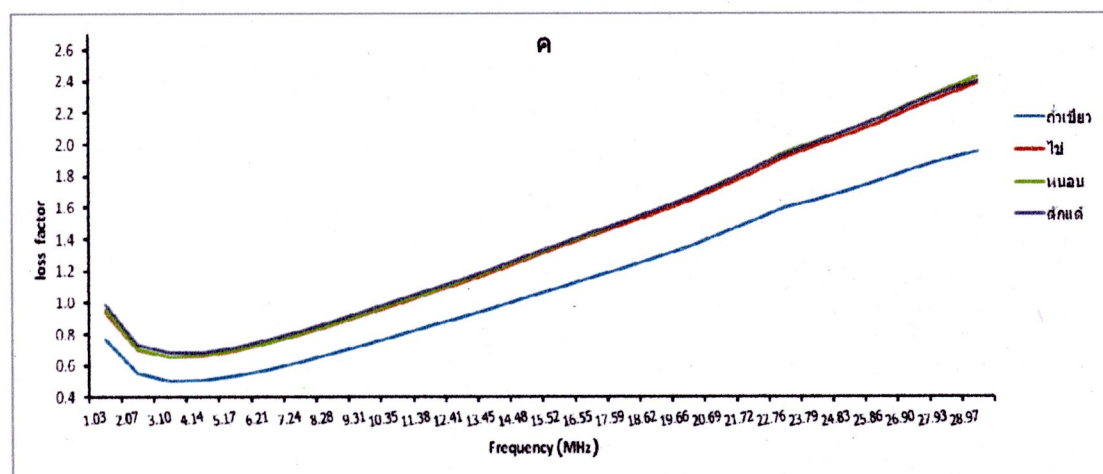
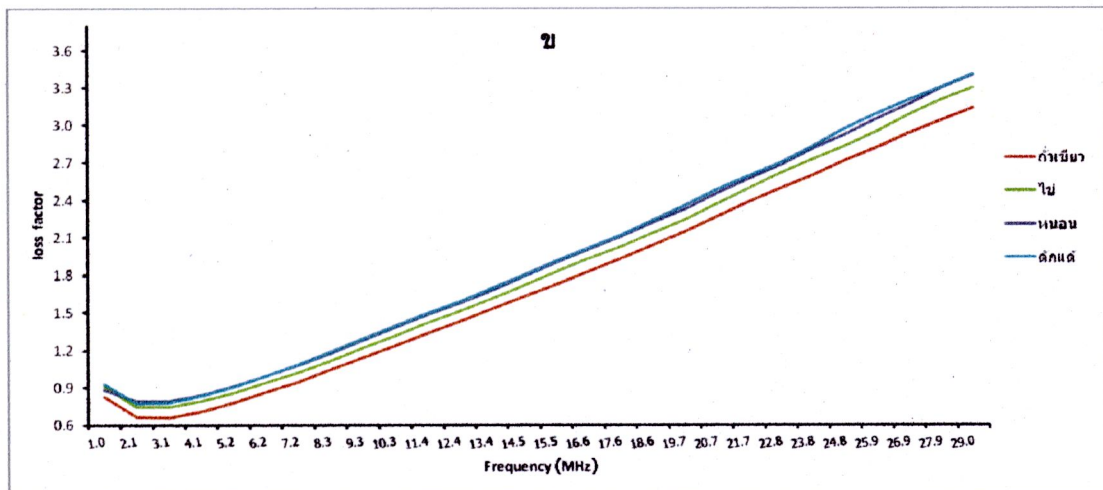
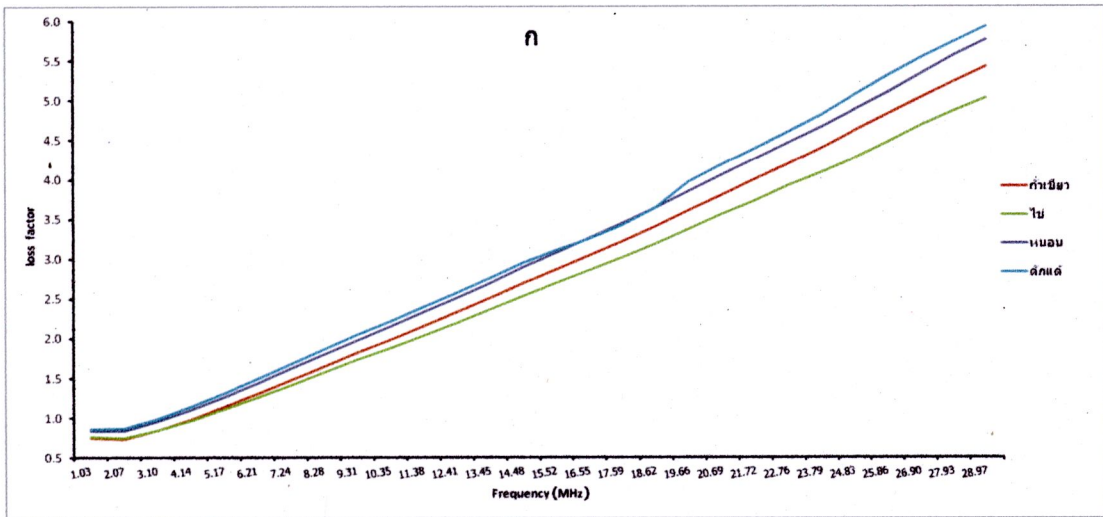
ผลและวิจารณ์การทดลอง

การทดลองที่ 1 ศึกษาหาคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของถั่วเขียวและระยะการเจริญเติบโตต่าง ๆ ของถั่วเขียว

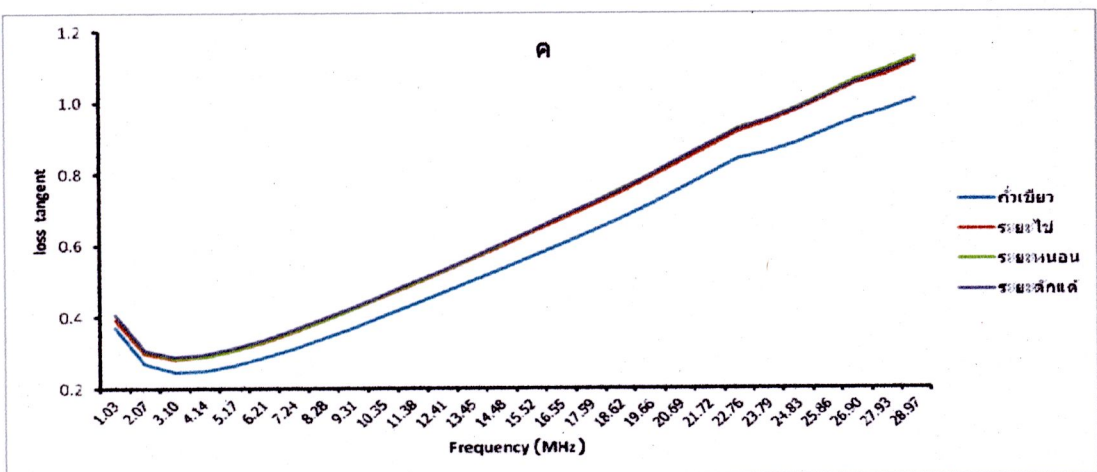
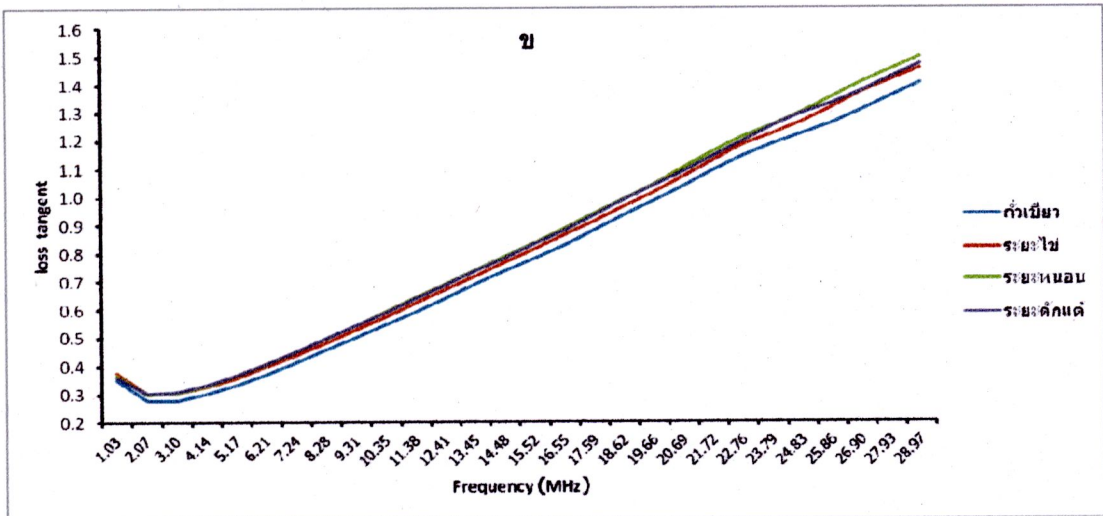
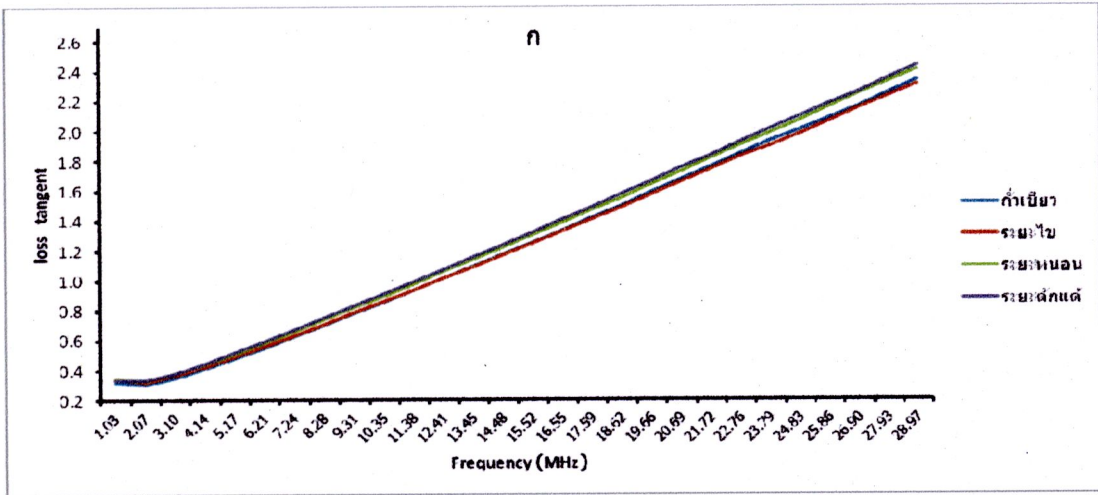
ทดสอบการวัดค่าการสะสมพลังงานไฟฟ้า (dielectric constant; ϵ') และค่าการปลดปล่อยพลังงาน (loss factor; ϵ'') ที่ช่วงความถี่ 0-30 MHz ด้วยเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ความแม่นยำสูง หัววัดแบบ open-ended coaxial พบว่า เมล็ดถั่วเขียวที่ความชื้น 11 เปอร์เซ็นต์และเมล็ดถั่วเขียวที่มีไข่ (ระยะไข่) เมล็ดถั่วเขียวที่มีหนอน (ระยะหนอน) และเมล็ดถั่วเขียวที่มีดักแด้ (ระยะดักแด้) ที่ระยะเพลท 0.50, 1.00 และ 1.50 เซนติเมตร ตามลำดับ มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant; ϵ') ของเมล็ดถั่วเขียว ระยะไข่ ระยะหนอนและระยะดักแด้ลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นที่ระยะเพลท 0.50, 1.00 และ 1.50 เซนติเมตร (ภาพ 4.1) ตามลำดับ ค่าแฟกเตอร์การสูญเสีย (loss factor; ϵ'') และค่าลอสมแทนเจน ($\tan \delta$) ของเมล็ดถั่วเขียว ระยะไข่ ระยะหนอนและระยะดักแด้เพิ่มขึ้นตามค่าความถี่ที่ใช้ในการวัดที่ระยะเพลท 0.50, 1.00 และ 1.50 เซนติเมตร ตามลำดับ (ภาพ 4.2 และ 4.3) เมื่อพิจารณาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant; ϵ') ค่าแฟกเตอร์การสูญเสีย (loss factor; ϵ'') และค่าลอสมแทนเจน (loss tangent; $\tan \delta$) ที่ความถี่ 26.89 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใกล้เคียงกับความถี่ 27.12 MHz ที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้ ดังแสดงในตาราง 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



ภาพ 4.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ') ของถั่วเขียว และถั่วเขียวที่มีด่างถั่วเขียว ระยะไข่ ระยะหนอน และระยะดกแดด นำไปวัดคุณสมบัติไดอิเล็กทริก ที่ระยะห่างเพลท 0.50(ก) 1.00(ข) และ 1.50 (ค) เซนติเมตร



ภาพ 4.2 แฟกเตอร์การสูญเสีย (ϵ'') ของถั่วเขียว และถั่วเขียวที่มีคั่วถั่วเขียว ระยะไข่ ระยะหนอน และระยะดักแด่ นำไปวัดคุณสมบัติไดอิเล็กทริก ที่ระยะห่างเพลท 0.50(ก) 1.00 (ข) และ 1.50(ค) เซนติเมตร



ภาพ 4.3 ค่าลอสมแทนเจน ($\tan \delta$) ของถั่วเขียว และถั่วเขียวที่มีดั่งถั่วเขียว ระยะไข่ ระยะหนอน และระยะคักเค้ นำไปวัดคุณสมบัติไดอิเล็กทริก ที่ระยะเพลาท 0.50(ก) 1.00(ข) และ 1.50 (ค) เซนติเมตร

ตาราง 4.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant; ϵ') ของเมล็ดถั่วเขียว ระยะไข่ ระยะหนอน และระยะดักแด้ของด้วงถั่วเขียว ที่วัดจากเครื่องอิมพีแดนซ์ความแม่นยำสูง หัววัดแบบ open-ended coaxial ที่ระยะเพลทต่างกัน ที่ความถี่ 26.89 MHz

กรรมวิธี	ระยะห่างของเพลท ^{1/} $\pm$ SD (เซนติเมตร)		
	0.50	1.00	1.50
เมล็ดถั่วเขียว	2.323 $\pm$ 0.061d	2.245 $\pm$ 0.040c	1.933 $\pm$ 0.005a
ไข่	2.173 $\pm$ 0.069b	2.247 $\pm$ 0.019c	2.123 $\pm$ 0.004b
หนอน	2.372 $\pm$ 0.025d	2.253 $\pm$ 0.033c	2.128 $\pm$ 0.017b
ดักแด้	2.446 $\pm$ 0.024d	2.329 $\pm$ 0.016e	2.138 $\pm$ 0.013b

^{1/}ค่าเฉลี่ยในสดมภ์ และแถวเดียวกันตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยวิธี Least Significant Difference

ตาราง 4.2 ค่าแฟกเตอร์การสูญเสีย (loss factor; ϵ'') ของเมล็ดถั่วเขียว ระยะไข่ ระยะหนอนและระยะดักแด้ของด้วงถั่วเขียว ที่วัดจากเครื่องอิมพีแดนซ์ความแม่นยำสูง หัววัดแบบ open-ended coaxial ที่ระยะเพลทต่างกัน ที่ความถี่ 26.89 MHz

กรรมวิธี	ระยะห่างของเพลท ^{1/} $\pm$ SD (เซนติเมตร)		
	0.50	1.00	1.50
เมล็ดถั่วเขียว	5.031 $\pm$ 0.303f	2.929 $\pm$ 0.089c	1.843 $\pm$ 0.016a
ไข่	4.674 $\pm$ 0.280e	3.080 $\pm$ 0.083cd	2.232 $\pm$ 0.005b
หนอน	5.332 $\pm$ 0.132g	3.165 $\pm$ 0.089d	2.263 $\pm$ 0.036b
ดักแด้	5.528 $\pm$ 0.173g	3.197 $\pm$ 0.028d	2.259 $\pm$ 0.033b

^{1/}ค่าเฉลี่ยในสดมภ์ และแถวเดียวกันตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยวิธี Least Significant Difference

ตาราง 4.3 ค่าลอสมแทนเจน (loss tangent; $\tan \delta$) ของเมล็ดถั่วเขียว ระยะไข่ ระยะหนอนและ ระยะดักแด้ของด้วงถั่วเขียว ที่วัดจากเครื่องอิมพีแดนซ์ความแม่นยำสูง หัววัดแบบ open-ended coaxial ที่ระยะเพลทต่างกัน ที่ความถี่ 26.89 MHz

กรรมวิธี	ระยะห่างของเพลท ^{1/} $\pm$ SD (เซนติเมตร)		
	0.50	1.00	1.50
เมล็ดถั่วเขียว	$2.163 \pm 0.074e$	$1.304 \pm 0.012c$	$0.954 \pm 0.007a$
ไข่	$2.149 \pm 0.061e$	$1.370 \pm 0.025d$	$1.051 \pm 0.003b$
หนอน	$2.247 \pm 0.041f$	$1.405 \pm 0.020d$	$1.063 \pm 0.009b$
ดักแด้	$2.259 \pm 0.050f$	$1.373 \pm 0.003d$	$1.056 \pm 0.009b$

^{1/}ค่าเฉลี่ยในสครมภ์ และแถวเดียวกันตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ โดยวิธี Least Significant Difference

จากตาราง 4.1 พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในเมล็ดถั่วเขียว ไข่ หนอน และดักแด้ ที่ระยะเพลท 0.50, 1.00 และ 1.50 เซนติเมตร มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และมี interaction ระหว่างปัจจัยแรก (เมล็ดถั่วเขียว ไข่ หนอน และดักแด้) และปัจจัยที่สอง (ระยะเพลท 0.50, 1.00 และ 1.50 เซนติเมตร) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ที่ระยะเพลทเดียวกัน (1.00 และ 1.50 เซนติเมตร) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของถั่วเขียว ระยะไข่ ระยะหนอน และระยะดักแด้ มีค่าเพิ่มขึ้นในทำนองเดียวกัน ยกเว้นที่ระยะเพลท 0.50 เซนติเมตร ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในระยะไข่ คือ 2.173 ± 0.069 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเมล็ดถั่วเขียว 2.323 ± 0.061 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกทั้ง 3 ระยะการเจริญเติบโตของแมลง (ระยะไข่ ระยะหนอน และระยะดักแด้) และเมล็ดถั่วเขียว ที่ระยะเพลท 1.00 และ 1.50 เซนติเมตรเพิ่มขึ้น ยกเว้นที่ระยะเพลท 0.50 เซนติเมตร ในระยะไข่ของด้วงถั่วเขียว (ตาราง 4.1) เนื่องจากความจุไฟฟ้า (Capacitance, C) ของแผ่นตัวนำขนาน (ในที่นี้คือแผ่นเพลทอะลูมิเนียมขนาด 10×10 เซนติเมตร) แปรผันตรงกับพื้นที่ของแผ่นตัวนำและแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำหรือลดพื้นที่ของแผ่นตัวนำ ความจุทางไฟฟ้าก็จะลดลง นอกจากนั้นแล้วในคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับความถี่ ความชื้น อุณหภูมิและความหนาแน่น (Nelson, 1992) ในการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กทริก

ของน้ำยางพารา ในความเข้มข้นของน้ำยางพาราสดค่อน้ำที่ความเข้มข้นของน้ำยางสด 100.00, 66.67, 50.00, 40.00, 33.33, 28.57, 25.00 และ 22.22 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส วัดช่วงความถี่ตั้งแต่ 20 MHz–1.5 GHz พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าแฟกเตอร์การสูญเสีย และค่าลอสมแทนเจน จะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น (วุฒิไกรและคณะ, 2551) สอดคล้องกับการทดลอง Jiao *et al.* (2011) ที่ศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของถั่ว black-eyed (*Vigna unguiculata*) และถั่วเขียว (*Vigna radiata*) ที่ความถี่ 4 ระดับได้แก่ 8.8, 12.7, 16.8, 20.9 เปอร์เซ็นต์ และ 10.2, 14.4, 18.2, 22.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับซึ่งเป็นความถี่ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของด้วงถั่วเขียว (*Callosobruchus maculatus*) ในระยะตัวอ่อน (ระยะหนอนและดักแด้) และตัวเต็มวัย ด้วยเครื่องมือพีแคนซ์ ที่ความถี่ 10-1800 MHz ที่ช่วงอุณหภูมิ 20-60 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสีย ลดลงกับความถี่ที่เพิ่มขึ้น แต่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความชื้นเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับ Guo *et al.* (2010) ศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของถั่วชิกพี (chickpea) ถั่วลันเตา (green pea) ถั่วเลนทิล (lentil) และถั่วเหลือง (soybean) ที่ความถี่ 10-1800 MHz และที่อุณหภูมิ 20-90 องศาเซลเซียส พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าแฟกเตอร์การสูญเสียของตัวอย่างถั่วลดลงกับความถี่ที่เพิ่มขึ้น แต่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความชื้นเพิ่มขึ้น

จากตาราง 4.2 พบว่า ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียในเมล็ดถั่วเขียว ระยะไข่ ระยะหนอน และระยะดักแด้ ที่ระยะเพลท 0.50, 1.00 และ 1.50 เซนติเมตร มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และมี interaction ระหว่างปัจจัยแรก (เมล็ดถั่วเขียว ระยะไข่ ระยะหนอน และระยะดักแด้) และปัจจัยที่สอง (ระยะเพลท 0.50, 1.00 และ 1.50 เซนติเมตร) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียในเมล็ดถั่วเขียว ระยะไข่ ระยะหนอน และระยะดักแด้ ลดลงเมื่อระยะเพลท (0.50, 1.00 และ 1.50 เซนติเมตร) เพิ่มขึ้นตามลำดับ (ตาราง 4.2) แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในทางตรงกันข้าม ที่ระยะเพลท (0.50, 1.00 และ 1.50 เซนติเมตร) เดียวกัน ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียในเมล็ดถั่วเขียว ระยะไข่ ระยะหนอน และระยะดักแด้ เพิ่มขึ้น ที่ระยะเพลท 0.50 เซนติเมตร ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียในเมล็ดถั่วเขียวความชื้น 11 เปอร์เซ็นต์ (5.031 ± 0.303) แตกต่างจากระยะไข่ (4.674 ± 0.280) แต่ในระยะหนอนและระยะดักแด้มีค่าแฟกเตอร์การสูญเสีย (5.332 ± 0.132 และ 5.528 ± 0.173) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ที่ระยะเพลท 1.00 เซนติเมตร ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียในระยะไข่ ระยะหนอน และระยะดักแด้ (3.080 ± 0.083 , 3.165 ± 0.089 และ 3.197 ± 0.028) ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่ในระยะหนอนและระยะดักแด้ แตกต่างจากในเมล็ดถั่วเขียวความชื้น 11 เปอร์เซ็นต์ (2.929 ± 0.089) สำหรับที่ระยะเพลท 1.50 เซนติเมตร ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียในเมล็ด

ถั่วเขียวความชื้น 11 เปอร์เซ็นต์ (1.843 ± 0.016) แตกต่างจากในระยະไข่ ระยະหนอน และระยະคักแค้ (2.232 ± 0.005 , 2.263 ± 0.036 และ 2.259 ± 0.033) ตามลำดับ

จากตาราง 4.3 พบว่า ค่าลอสมแทนเจน ($\tan \delta$) ในเมล็ดถั่วเขียวที่ความชื้น 11 เปอร์เซ็นต์ ระยະไข่ ระยະหนอน และระยະคักแค้ ที่ระยະเพลท 0.50, 1.00 และ 1.50 เซนติเมตร มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และมี interaction ระหว่างปัจจัยแรก (เมล็ดถั่วเขียว ระยະไข่ ระยະหนอน และระยະคักแค้) และปัจจัยที่สอง (ระยະเพลท 0.50, 1.00 และ 1.50 เซนติเมตร) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ตาราง 4.3) ค่า $\tan \delta$ ในเมล็ดถั่วเขียว ระยະไข่ ระยະหนอน และระยະคักแค้ ลดลงเมื่อระยະเพลท (0.50, 1.00 และ 1.50 เซนติเมตร) เพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในทางตรงกันข้าม ที่ระยະเพลท 1.00 และ 1.50 เซนติเมตรเดียวกัน ค่า $\tan \delta$ ในระยະไข่ ระยະหนอน และระยະคักแค้ มีแตกต่างกันทางสถิติกับค่า $\tan \delta$ ในเมล็ดถั่วเขียวความชื้น 11 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับที่ระยະเพลท 0.50 เซนติเมตร ค่า $\tan \delta$ ในเมล็ดถั่วเขียวความชื้น 11 เปอร์เซ็นต์และระยະไข่ (2.149 ± 0.061) แตกต่างจากในระยະหนอนและระยະคักแค้ (2.247 ± 0.041 , 2.259 ± 0.050) (ตาราง 4.3)

เมื่อพิจารณาที่ระยະเพลททั้ง 3 ระยະ (0.50, 1.00 และ 1.50 เซนติเมตร) พบว่า ที่ระยະเพลท 1.50 เซนติเมตร มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียและค่าลอสมแทนเจน มีการเบี่ยงเบน (standard deviation) ของข้อมูลน้อยกว่าที่ระยະเพลท 0.50 และ 1.00 เซนติเมตร ดังนั้นมีความเหมาะสมในการบ่งชี้คุณสมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric property)

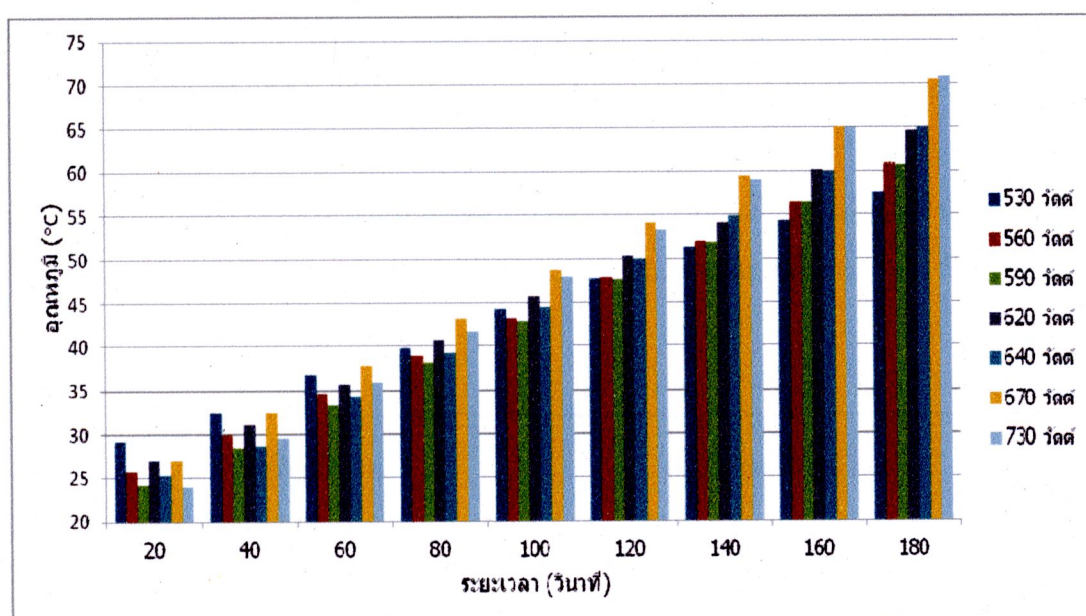
เมื่อพิจารณาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ') ค่าแฟกเตอร์การสูญเสีย (ϵ'') และค่าลอสมแทนเจน ($\tan \delta$) ที่ความถี่ 26.89 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใกล้เคียงกับความถี่ 27.12 MHz พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant; ϵ') ในเมล็ดถั่วเขียวความชื้น 11 เปอร์เซ็นต์ ระยະไข่ ระยະหนอน และระยະคักแค้ มีค่าเท่ากับ 1.933, 2.123, 2.128 และ 2.138 ตามลำดับ ค่าแฟกเตอร์การสูญเสีย (loss factor; ϵ'') ในเมล็ดถั่วเขียวความชื้น 11 เปอร์เซ็นต์ ระยະไข่ ระยະหนอน และระยະคักแค้ มีค่าเท่ากับ 1.843, 2.232, 2.263 และ 2.259 ตามลำดับ และค่าลอสมแทนเจน ($\tan \delta$) ในเมล็ดถั่วเขียวความชื้น 11 เปอร์เซ็นต์ ระยະไข่ ระยະหนอน และระยະคักแค้ มีค่าเท่ากับ 0.954, 1.051, 1.063 และ 1.056 ตามลำดับ

ดังนั้นถั่วเขียวที่มีด้วงถั่วเขียว (ระยະไข่ ระยະหนอน และระยະคักแค้) มีความสามารถในการสะสม (dielectric constant; ϵ') และปลดปล่อยพลังงานไฟฟ้า (loss factor; ϵ'') ได้ดีกว่าเมล็ดถั่วเขียวความชื้น 11 เปอร์เซ็นต์ที่ไม่มีด้วงถั่วเขียวทั้ง 3 ระยະการเจริญเติบโต สำหรับค่าลอสมแทนเจน (loss tangent; $\tan \delta$) แสดงให้เห็นถึงระดับการทะลุทะลวงของสนามไฟฟ้าและระดับการ

กระจายพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ค่าเหล่านี้ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าวัตถุนั้นจะเกิดความร้อนได้ดีขึ้น นั่นคือ ถั่วเขียวที่มีดวงถั่วเขียว (ระยะไข่ ระยะหนอน และระยะดกแก่) สามารถดูดซับพลังงานคลื่นความถี่วิทยุกระจายเป็นพลังงานความร้อนได้เร็วกว่าเมล็ดถั่วเขียวที่ไม่มีแมลงติดอยู่ภายใน การทดลองของ Jiao *et al.* (2011) พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของระยะตัวอ่อนดวงถั่วเขียว (ระยะหนอนและระยะดกแก่) ที่ความถี่ 40, 200 และ 915 MHz มีค่าเท่ากับ 50, 36 และ 30 ตามลำดับ มีค่าลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น แต่สูงกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของระยะตัวเต็มวัยดวงถั่วเขียว ที่ความถี่ 200 และ 915 MHz มีค่าเท่ากับ 34 และ 28 ตามลำดับ ยกเว้นที่ความถี่ 40 MHz ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของระยะตัวเต็มวัยดวงถั่วเขียว มีค่าเท่ากับ 55 สูงกว่าในระยะตัวอ่อนดวงถั่วเขียว (ระยะหนอนและระยะดกแก่) สำหรับค่าแฟกเตอร์การสูญเสียของระยะตัวอ่อนดวงถั่วเขียว (ระยะหนอนและระยะดกแก่) ที่ความถี่ 40, 200 และ 915 MHz มีค่าเท่ากับ 168, 40 และ 15 ตามลำดับ มีค่าลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น แต่สูงกว่าค่าแฟกเตอร์การสูญเสียของระยะตัวเต็มวัยดวงถั่วเขียว ที่ความถี่ 40, 200 และ 915 MHz มีค่าเท่ากับ 104, 29 และ 10 เนื่องจากปริมาณความชื้นที่สูงขึ้นในระยะตัวอ่อนดวงถั่วเขียว (ระยะหนอนและระยะดกแก่) มีความชื้นเท่ากับ 70.8 เปอร์เซ็นต์ มากกว่าระยะตัวเต็มวัยดวงถั่วเขียว มีความชื้นเท่ากับ 43.9 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์การสูญเสียของแมลงกับเมล็ดถั่ว ที่ความถี่ 27 MHz (RF) และ 915 MHz (MW) พบว่า ที่ความถี่ทั้งสอง ดวงถั่วเขียวปลดปล่อยพลังงานความร้อนได้เร็วกว่าเมล็ดถั่วที่ไม่มีการเข้าทำลายของแมลง Guo *et al.* (2008; 2010) พบว่า ที่ความถี่ 27 MHz และ 915 MHz ที่ฟังก์ชันของอุณหภูมิ ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียของระยะตัวอ่อนสูงกว่าตัวเต็มวัยของดวงถั่วเขียว และสูงกว่าถั่วที่มีความชื้น (web base) สูงทั้ง 4 ชนิด คือ ถั่วชิกพี (chickpea) 20.9 เปอร์เซ็นต์ ถั่ว black-eyed 20.9 เปอร์เซ็นต์ ถั่วเลนทิล (lentil) 21.5 เปอร์เซ็นต์ และถั่วเขียว 21.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

การทดลองที่ 2 ศึกษาหาระยะการเจริญเติบโตของด้วงถั่วเขียวที่มีความทนทานที่สุดเมื่อผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่ระดับพลังงานที่เหมาะสม

จากการทดลองเพื่อหาระดับพลังงาน (power) เมื่อผ่านคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz แก่ถั่วเขียวความชื้นเริ่มต้น 11 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับพลังงาน 530, 560, 590, 620, 640, 670 และ 730 วัตต์ บันทึกอุณหภูมิทุก ๆ เวลา 20 วินาที จนครบ 180 วินาที พบว่า เมื่อให้ระดับพลังงานที่สูงขึ้น อุณหภูมิภายในถุงบรรจุถั่วเขียวเพิ่มสูงขึ้นตามระดับพลังงานและระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น (ภาพ 4.4)



ภาพ 4.4 กราฟแสดงอุณหภูมิของถั่วเขียวความชื้น 11 เปอร์เซ็นต์ ที่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่ระดับพลังงานต่าง ๆ

เนื่องจากถั่วเขียวดูดซับพลังงานเมื่อผ่านคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz เกิดการหมุนของโมเลกุลภายในวัตถุ 27,120,000 ครั้งต่อวินาที ผลของการหมุนและเสียดสีกันทำให้ความร้อนเกิดภายในวัตถุและกระจายออกมาภายนอก (Cwikinski, 2001) ซึ่งการดูดซับพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นอยู่กับการคุณสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ') แฟกเตอร์การสูญเสีย (ϵ'') และค่าลอสมแทนเจน ($\tan \delta$) ของเมล็ดถั่วเขียว (ตาราง 4.1, 4.2 และ 4.3)

ดังนั้นคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่ระดับพลังงาน 640 วัตต์เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับถั่วเขียวความชื้นเริ่มต้น 11 เปอร์เซ็นต์ เพราะค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิ

เป้าหมายที่ต้องการ (target temperature) มีการเบี่ยงเบนของข้อมูลน้อย (standard deviation) อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้ต้องคำนึงถึงความสม่ำเสมอในการดูดซับพลังงานและการกระจายพลังงานความร้อนของตัวเขียวภายในอุ้งบรรจุ เพราะถ้าเลือกใช้ระดับพลังงานที่สูงเป็นระยะเวลานานเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่าย

จากการทดสอบผลของคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่ระดับพลังงาน 640 วัตต์ ระยะเวลา 120 วินาที อุณหภูมิสุดท้ายเฉลี่ย 49.9 ± 0.4 องศาเซลเซียส โดยใช้ด้วงตัวเขียวทั้ง 3 ระยะ คือ ระยะไข่ ระยะหนอน และระยะดักแด้ที่ติดอยู่บนหรือในเมล็ด มาผ่านคลื่นความถี่วิทยุ พบว่า ด้วงตัวเขียวในระยะดักแด้มีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การตายน้อยที่สุด คือ 22.91 ± 4.97 เปอร์เซ็นต์ ระยะไข่ และระยะหนอน พบการตายคือ 30.88 ± 8.73 และ 30.90 ± 4.60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) (ตาราง 4.4)

ตาราง 4.4 เปอร์เซ็นต์การตายเฉลี่ยของด้วงตัวเขียว *Callosobruchus maculatus* ทั้ง 3 ระยะการเจริญเติบโตที่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่ระดับพลังงาน 640 วัตต์ ระยะเวลา 120 วินาที

ระยะการเจริญเติบโต	เปอร์เซ็นต์การตาย $\pm$ SE ^{1/}
ไข่	30.88 ± 8.73 ns
หนอน	30.90 ± 4.60
ดักแด้	22.91 ± 4.97

^{1/}ค่าเฉลี่ยในสดมภ์เดียวกันตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยวิธี Least Significant Difference (LSD=9.03)

เนื่องจากในระยะไข่ ระยะหนอน และระยะดักแด้ ต่างมีปริมาณน้ำในร่างกายมาก และสามารถในการสะสมพลังงาน (E') และปลดปล่อยพลังงานไฟฟ้า (E'') ไม่แตกต่างกัน (ตาราง 4.1 และ 4.2) ที่ความถี่ 26.89 MHz ระยะเพลท 1.50 เซนติเมตร การตายของด้วงตัวเขียวเกิดจากการตอบสนองต่อคลื่นความถี่วิทยุ เนื่องจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ เกิดจากการส่งผ่านสนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง ทำให้วัสดุทั้งที่อยู่ภายในและที่ผิวได้รับพลังงานพร้อม ๆ กันโดยทำให้วัสดุเกิดความร้อนอย่างทั่วถึงพร้อมกัน ซึ่งต่างกับการให้

ความร้อนโดยใช้ลวดความร้อนหรือการพาความร้อนโดยลม ในกรณีดังกล่าวความร้อนจะค่อย ๆ แพร่จากบริเวณผิวไปยังด้านในของวัสดุ (ยุทธพงศ์, 2549) ดังนั้นเมื่อนำเมล็ดถั่วเขียวที่มีด้วงถั่วเขียวเข้าทำลาย เกิดความร้อนได้เร็วกว่าเมล็ดถั่วเขียวปกติ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของคลื่นความถี่วิทยุ ที่ Wang *et al.* (2002) พบว่า ความร้อนจากการใช้คลื่นความถี่วิทยุเกิดขึ้นมาจากการตอบสนองภายในร่วมกันระหว่างพลังงานของความยาวคลื่น และคุณสมบัติไดอิเล็กทริก ซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของน้ำ ผลของการตอบสนองร่วมดังกล่าวทำให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบของโมเลกุลน้ำซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในวัตถุที่ประกอบไปด้วยน้ำ และคลื่นความถี่วิทยุสามารถก่อให้เกิดความร้อนได้มากในวัตถุที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (Cwiklinski and Höersten, 1999)

อย่างไรก็ตามระยะพักแค้นอัตราการตายไม่แตกต่างจากระยะไข่และหนอน ร่างกายของแมลงมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวผนังลำตัวกับปริมาตรในอัตราส่วนที่สูง เมื่อได้รับความร้อน การสูญเสียน้ำเพียงเล็กน้อยมีผลรุนแรงต่อสมดุลของน้ำในร่างกายของแมลง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้แมลงในระยะไข่ และดักแด้ มีการสูญเสียน้ำ ส่วนในระยะหนอนซึ่งเป็นระยะที่แมลงมีการกินและเจริญเติบโต และมีปริมาณน้ำมาก อย่างไรก็ตาม ระยะหนอนของด้วงถั่วเขียวอาศัยอยู่ภายในเมล็ด ซึ่งโครงสร้างของเมล็ดอาจมีผลช่วยให้การสูญเสียน้ำลดความรุนแรงลง (Chapman, 1998) การควบคุมแมลงศัตรูโรงเก็บโดยใช้คลื่นความถี่วิทยุ ภายใต้สภาวะที่เหมือนกัน แมลงแต่ละชนิด และแต่ละระยะการเจริญเติบโตตอบสนองต่อคลื่นความถี่วิทยุแตกต่างกันไป เนื่องจากคุณลักษณะทางสรีรวิทยาที่แตกต่างกันซึ่งอาจจะเป็นทางชีวภาพ หรือกายภาพ หรือองค์ประกอบภายในร่างกายที่แตกต่างกัน และเมื่อแมลงได้รับความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุจะเกิดการสูญเสียน้ำหนักและมีการรับออกซิเจนเพิ่มขึ้นเหมือนกับระยะหนอนที่ได้รับบาดเจ็บ และเกิดการสร้างโปรตีนเพิ่มขึ้น (heat shock protein) เพื่อซ่อมแซมส่วนของร่างกายที่ถูกทำลาย ทำให้แมลงสามารถอยู่รอดต่อไปได้ (Nelson, 1996)

กรณีมอดแป้ง (red flour beetle; *Tribolium castaneum* (Herbst) แมลงศัตรูที่พบมากในโรงงานอาหารสัตว์ มาผ่านคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าระยะหนอน มีเปอร์เซ็นต์การตายมากที่สุดคือ 92.06 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ ตัวเต็มวัย ไข่ และดักแด้ เท่ากับ 91.58, 81.98 และ 72.9 ตามลำดับ (กรรณิการ์, 2552) ต่างจากการใช้คลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่ระดับอุณหภูมิ 48-52 องศาเซลเซียส ระยะการเจริญเติบโตของมอดแป้ง (red flour beetle: *Tribolium castaneum*) ที่มีความทนทานต่อคลื่นความถี่วิทยุได้ โดยระยะหนอนวัยแก่ (วัย 6-8) มีความทนต่อคลื่นความถี่วิทยุ มากที่สุด รองลงมา ได้แก่ ระยะดักแด้ ตัวเต็มวัย ไข่ และหนอนวัยอ่อน ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 52 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที สามารถกำจัด

หนอนวัยแก่ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ (Johnson *et al.*, 2004) อาจเป็นไปได้ว่าหนอนวัยแก่ที่ Johnson *et al.* (2004) นำมาศึกษาลดกิจกรรมการกินและการเคลื่อนไหว เมื่อได้รับ RF จึงมีการตอบสนองที่น้อยกว่าระยะหนอนวัยอ่อน นอกจากนี้ระยะหนอนของมอดแป้ง (confused flour beetle: *Tribolium confusum*) มีความไวต่อความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุที่ 11 MHz โดยการตายของระยะหนอนมากกว่าระยะตัวเต็มวัย (Webber *et al.*, 1964) ระยะตัวเต็มวัย หนอน คักแค้ และไข่ของมอดแป้ง (*T. confusum*) และ Granary weevil (*Sitophilus granarius*) มาผ่านคลื่นไมโครเวฟที่ 2450 MHz ตัวเต็มวัยของแมลงทั้ง 2 ชนิดมีอัตราการตายมากกว่าระยะอื่น ๆ และระยะไข่มีการตายน้อยที่สุด (Baker *et al.*, 1956) ในการศึกษาการใช้ RF กับด้วงคาเคิล (*Tenebroides mauritanicus*) ซึ่งเป็นแมลงศัตรูโรงเก็บชนิดหนึ่ง พบว่าระยะหนอนของมีอัตราการตายที่คลื่นความถี่วิทยุที่ 39 MHz มากกว่าระยะตัวเต็มวัย ซึ่งให้ผลในการทำงานเกี่ยวกับการทดลองเดียวกับการศึกษาของกรณิการ์ (2552) ที่พบว่าระยะหนอนในวงศ์ Tenebrionidae ที่มีแนวโน้มอ่อนแอต่อ RF (Nelson and Kantack, 1966)

สำหรับแมลงศัตรูในโรงเก็บของข้าวสาร ฅณณ (2551) นำผีเสื้อข้าวสาร (*Corcyra cephalonica* (Stainton)) ในระยะการเจริญเติบโต ระยะไข่ หนอน คักแค้ และตัวเต็มวัย มาผ่านคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่า ระยะไข่ และระยะคักแค้ของผีเสื้อข้าวสาร มีเปอร์เซ็นต์การตาย 98.90 และ 98.35 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นระยะที่มีอัตราการรอดชีวิตมากที่สุด ส่วนระยะตัวเต็มวัย และตัวหนอนตาย 100 เปอร์เซ็นต์ สำหรับมอดหัวป้อม (lesser grain borer: *Rhyzopertha dominica* (F.)) ผ่านคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 180 วินาที พบว่ามอดหัวป้อมระยะตัวเต็มวัย เป็นระยะที่ทนทานต่อความร้อนที่เกิดจากคลื่นความถี่วิทยุมากที่สุดรองลงมาได้แก่ ระยะคักแค้ หนอน และไข่ ตามลำดับ (กฤษณา, 2552) อาจกล่าวได้ว่า แมลงในระยะหนอนที่มีผนังลำตัวบางมีปริมาณน้ำในร่างกายมากกว่าแมลงระยะอื่น ๆ และระยะไข่ ซึ่งมีขนาดเล็ก แม้ว่าจะมีปริมาณน้ำน้อยกว่าระยะหนอน แต่เนื่องจากมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของลำตัวกับปริมาตรของร่างกายที่สูง ซึ่งมีผลทำให้ไวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำหรือสิ่งแวดล้อมภายนอกที่มากกระทบจึงทำให้ระยะหนอนวัยอ่อนและระยะไข่ของแมลงมีแนวโน้มอ่อนแอต่อ RF มากกว่าระยะตัวเต็มวัยกับระยะคักแค้

จำนวนแมลงรุ่นลูกด้วงถั่วเขียวเฉลี่ยทั้ง 3 ระยะการเจริญเติบโตที่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่ระดับพลังงาน 640 วัตต์ ระยะเวลา 120 วินาที หลังจากเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ พบว่า จำนวนแมลงรุ่นลูกของด้วงถั่วเขียวระยะหนอนและคักแค้ที่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุ คือ 47.8 ± 4.23 ตัว และ 56.1 ± 2.40 ตัว ตามลำดับ มีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนแมลงรุ่นลูกด้วงถั่วเขียวระยะหนอนและคักแค้ ในกรรมวิธีชุด

ควบคุม คือ 65.6 ± 3.61 ตัว และ 67.8 ± 2.89 ตัว ตามลำดับ ระยะหนอนและดักแด้ตอบสนองกับกรรมวิธีที่ได้ผ่านคลื่นความถี่วิทยุ ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) ส่วนแมลงระยะไข่ในชุดควบคุมพบว่า ให้แมลงรุ่นลูก 24.6 ± 1.49 ตัว แตกต่างจากการนำแมลงระยะหนอน ระยะดักแด้ในชุดควบคุมอาจมีผลมาจากการนำแมลงระยะไข่ซึ่งอยู่ภายนอกเมสส์ได้รับผลกระทบจากการแยกเลี้ยงเมสส์เดี่ยวในภาชนะ (96 well plate) ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) จากกรรมวิธีที่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุเท่ากับ 18.1 ± 1.19 ตัว (ตาราง 4.5) แมลงจากชุดที่ผ่าน RF เหลือเจริญเติบโตให้แมลงรุ่นลูกด้วงถั่วเขียวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากชุดควบคุม ($P<0.05$) เนื่องจากความร้อนจะมีผลต่อระบบประสาท (nervous system) ที่ควบคุมการทำงานของระบบต่อมไร้ท่อ (endocrine system) และระบบอวัยวะต่าง ๆ ทำงานไม่เป็นไปตามปกติ เช่น มีผลในการยับยั้งการสร้าง vitellin ซึ่งเป็นโปรตีนสำคัญในการสร้างและพัฒนาของไข่ของแมลง และการเพิ่มขึ้น Juvenile hormone (JH) ซึ่งเป็นฮอร์โมนที่มีหน้าที่ควบคุมการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแมลงไม่ให้เป็นตัวเต็มวัย ถ้ามี JH ลดลงส่งผลให้แมลงระยะตัวอ่อนมีการลอกคราบมากขึ้น หรือมีระยะการเจริญเติบโตผิดปกติ (Neven, 2000)

ตาราง 4.5 จำนวนแมลงรุ่นลูกด้วงถั่วเขียว *Callosobruchus maculatus* ทั้ง 3 ระยะการเจริญเติบโตเฉลี่ยที่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่ระดับพลังงาน 640 วัตต์ ระยะเวลา 120 วินาที หลังจากเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

ระยะการเจริญเติบโต	จำนวนแมลงรุ่นลูกด้วงถั่วเขียว $\pm$ SE ^{1/}	
	ชุดควบคุม	ชุด RF
ไข่	24.6 ± 1.49 c	18.1 ± 1.19 c
หนอน	65.6 ± 3.61 a	47.8 ± 4.23 b
ดักแด้	67.8 ± 2.89 a	56.1 ± 2.40 b

^{1/} ค่าเฉลี่ยในสดมภ์ และแถวเดียวกันตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์โดยวิธี Least Significant Difference (LSD = 4.03)

การทดลองที่ 3 ศึกษาหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้ด้วงถั่วเขียวตายอย่างสมบูรณ์

จากผลการทดลองที่ 2 ด้วงถั่วเขียวระยะไข่ ระยะหนอน และระยะดักแด้ให้ผลในการตอบสนองต่อความร้อนไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) ดังนั้นจึงใช้ด้วงถั่วเขียวระยะดักแด้เป็นตัวแทนของระยะต่าง ๆ เนื่องจากเป็นระยะที่อยู่ในเมสส์ถั่วเขียว นำไปให้คลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ในการทดลองที่ 3 ที่พลังงาน 640 วัตต์ ที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน พบว่า เมื่อให้คลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่ระดับพลังงาน 640 วัตต์ เป็นระยะเวลา 120, 140, 160, 180, 200 และ 220 วินาที อุณหภูมิเฉลี่ยภายในตัวอย่างทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 49.3 ± 0.7 , 54.9 ± 0.6 , 60.1 ± 1.1 , 65.0 ± 0.6 , 69.4 ± 0.4 และ 74.5 ± 0.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์การตายของด้วงถั่วเขียวระยะดักแด้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) การให้คลื่นความถี่วิทยุที่ระดับพลังงาน 640 วัตต์ ที่ระยะเวลา 140, 160 และ 180 วินาที มีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การตายของดักแด้ด้วงถั่วเขียว คือ 64.96 ± 6.28 , 59.54 ± 2.77 และ 65.90 ± 4.15 ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) แต่การให้คลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่ระดับพลังงาน เป็นระยะเวลา 220 วินาที อุณหภูมิสุดท้ายเฉลี่ยเท่ากับ 74.5 ± 0.5 องศาเซลเซียส ทำให้ด้วงถั่วเขียวระยะดักแด้ตาย 100 เปอร์เซ็นต์ (ตาราง 4.6) ซึ่งถือเป็นการตายของด้วงถั่วเขียวระยะดักแด้ที่สมบูรณ์

ตาราง 4.6 เปอร์เซ็นต์การตายเฉลี่ยของด้วงถั่วเขียวระยะดักแด้และอุณหภูมิ ที่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่ระดับพลังงาน 640 วัตต์ ระยะเวลาต่าง ๆ

ระยะเวลา (วินาที)	อุณหภูมิสุดท้าย $\pm$ SD (องศาเซลเซียส)	เปอร์เซ็นต์การตาย $\pm$ SE ^{1/}
120	49.3 ± 0.7	50.85 ± 3.65 d
140	54.9 ± 0.6	64.96 ± 6.28 bc
160	60.1 ± 1.1	59.54 ± 2.77 cd
180	65.0 ± 0.6	65.90 ± 4.15 bc
200	69.4 ± 0.4	75.31 ± 5.17 b
220	74.5 ± 0.5	100 a

^{1/}ค่าเฉลี่ยในสคริปต์เดียวกันตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยวิธี Least Significant Difference (LSD=5.90)

ดังนั้นระยะพักแ่ของด้วงถั่วเขียวที่ได้รับคลื่นความถี่วิทยุที่ 27.12 MHz ระดับพลังงาน 640 วัตต์เป็นเวลา 220 วินาที อุณหภูมิสุดท้ายเฉลี่ยเท่ากับ 74.5 ± 0.5 องศาเซลเซียสมีอัตราการตาย ไม่แตกต่างจากระยะไข่และหนอน (ตาราง 4.4) ฤๅษณา (2552) ศึกษาคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่อุณหภูมิ 55, 60, 65 และ 70 องศาเซลเซียส โดยทุกอุณหภูมิใช้เวลา 90, 120, 150 และ 180 วินาที พบว่า ตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไปทำให้มอดหัวป้อมตายไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับ Janhang *et al.* (2005) ที่ใช้คลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ความชื้น 10.4 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 70, 75, 80 และ 85 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 180 วินาที พบว่า มอดหัวป้อมตาย 100 เปอร์เซ็นต์ในทุกกรณี นอกจากนี้ พัทยา และ สุชาดา (2549) พบว่าเมื่อให้มอดหัวป้อมเข้าทำลายข้าวเปลือกในอัตรา 125 ตัวต่อ 1 กิโลกรัมแล้ว นำมาผ่านคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่อุณหภูมิ 70, 75, 80 และ 85 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 180 วินาที มอดหัวป้อมตาย 100 เปอร์เซ็นต์เช่นกัน

เมื่อเปรียบเทียบความร้อนแบบไดอิเล็กทริกโดยใช้คลื่นความถี่วิทยุกับความร้อนจากไอน้ำร้อน Menon and Subramanyam (2000) ศึกษาการใช้ไอน้ำร้อนชนิด steam heat กำจัดแมลงในอาคารและเครื่องมือผลิตแป้ง ที่ระดับอุณหภูมิ 48 องศาเซลเซียส และจับเวลาเมื่ออุณหภูมิถึงระดับที่ต้องการเป็นเวลา 36 ชั่วโมง สามารถทำให้มอดแป้งระยะตัวเต็มวัยตายได้อย่างสมบูรณ์ แต่ระยะพักแ่มีการตายเพียง 50 เปอร์เซ็นต์ ผลสอดคล้องกับ Mahroof *et al.* (2003a) พบว่าพักแ่ของมอดแป้งที่อาศัยอยู่ในโรงงานผลิตอาหารสัตว์ และแป้งสาธิตมีทนทานต่อความร้อนจากไอน้ำร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24-36 ชั่วโมง ในระหว่างกระบวนการผลิตอาหารมากที่สุด ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินี้เป็นการเพิ่มทีละน้อย และบางพื้นที่มีการกระจายความร้อนอย่างไม่สม่ำเสมอ จึงมีอุณหภูมิไม่ถึง 50 องศาเซลเซียส ทำให้มอดแป้งสามารถปรับตัวโดยการสังเคราะห์โปรตีนชนิด heat shock proteins เพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิต การสังเคราะห์ heat shock proteins ที่มากขึ้นนี้ เพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายของเซลล์ภายในร่างกาย (Neven, 2000) ทำให้มอดแป้งสามารถอยู่รอดได้ แต่ในสภาพห้องปฏิบัติการพบว่า หนอนวัยอ่อนของมอดแป้งมีความทนทานต่อความร้อนมากที่สุด โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับมอดแป้งระยะไข่ หนอนวัยแก่ ผักแด้ และตัวเต็มวัย Mahroof *et al.* (2003b) สำหรับการให้ความร้อนโดยคลื่นความถี่วิทยุ อัตราความเร็วในการให้ความร้อนของคลื่นความถี่วิทยุนั้นเร็วกว่าการใช้ไอน้ำร้อนของ Mahroof *et al.* (2003a, b) โดยที่การใช้คลื่นความถี่วิทยุมีอัตราความเร็วในการให้ความร้อน 3 องศาเซลเซียสต่อนาที จึงทำให้การใช้คลื่นความถี่วิทยุในการกำจัดมอดแป้งใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่า (กรรณิการ์, 2552) ซึ่งคลื่นความถี่วิทยุทำให้เกิดความสั่นสะเทือนของโมเลกุลในตัววัตถุแล้วจึงเกิดเป็นพลังงานความร้อนขึ้นกระจาย

ตัวไปยังส่วนอื่น ๆ โดยกระบวนการนำความร้อน และสามารถเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในการทดลอง ใช้คลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที มีอัตราเร็วในการให้ความร้อนโดยเฉลี่ย 11.4 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งเป็นอัตราที่ช้ากว่าการทดลองของ Johnson *et al.* (2004) และช้าว่าการทดลองของกฤษณา (2552) ผ่านคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 180 วินาที มีอัตราเร็วในการให้ความร้อน 12.5 องศาเซลเซียสต่อ นาที จึงมีการกระจายความร้อนได้ช้ากว่า อีกทั้งขนาด รูปร่าง และคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์นำมาทดลองแตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อการกระจายของความร้อน นอกจากนี้แมลงที่ใช้ทดลองในแต่ละพื้นที่ ซึ่งได้แก่ เเขตร้อนและเขตอบอุ่น มีคุณลักษณะทางชีวภาพ หรือกายภาพที่แตกต่างกันทำให้มีความทนทานต่อความร้อนต่างกัน

4. การวิเคราะห์คุณภาพถั่วเขียว

จากการนำถั่วเขียว มาผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่พลังงาน 640 วัตต์ ระยะเวลา 220 วินาที อุณหภูมิสุดท้ายเฉลี่ยเท่ากับ 74.5 ± 0.5 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นระยะเวลาที่สามารถกำจัดด้วงถั่วเขียวได้สมบูรณ์ที่สุด นำมาตรวจสอบคุณภาพถั่วเขียวที่เปลี่ยนแปลงโดยเปรียบเทียบกับคุณภาพของถั่วเขียวที่ไม่ได้ผ่านคลื่นความถี่วิทยุ (ชุดควบคุม)

4.1 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

4.1.1 ความชื้น (moisture content)

จากการตรวจสอบความชื้นของเมล็ดถั่วเขียว โดยวิธีอบลมร้อน (hot-air oven method) หลังจากให้คลื่นความถี่วิทยุที่พลังงาน 640 วัตต์ ระยะเวลา 220 วินาที อุณหภูมิสุดท้ายเฉลี่ยเท่ากับ 74.5 ± 0.5 องศาเซลเซียส จากความชื้นเมล็ดเริ่มต้น 11.0 เปอร์เซ็นต์ ลดลงเป็น 10.6 เปอร์เซ็นต์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ตาราง 4.7) กระบวนการใช้คลื่นความถี่วิทยุสามารถลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ลงได้อย่างรวดเร็ว ที่อุณหภูมิ 70, 75 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1, 3 และ 5 นาที พบว่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ลดลงตามระดับอุณหภูมิและระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ความชื้นเมล็ดพันธุ์ลดลง 2.4 เปอร์เซ็นต์ จากความชื้นเริ่มต้น 13.03 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 นาที (พัทยา, 2550) ในเมล็ดพันธุ์ข้าวบาร์เลย์ที่ให้ความร้อนด้วยคลื่น RF ที่อุณหภูมิ 60, 65, 70 และ 75 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 0, 1 และ 3 นาที พบว่า ความชื้นเมล็ดพันธุ์เริ่มต้น 14.3 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณความชื้นเมล็ดพันธุ์ข้าวบาร์เลย์ลดลง เมื่อระยะเวลาและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณความชื้นเมล็ดลดลงน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ (Akaranuchat *et al.*, 2007) สำหรับเมล็ด

ข้าวโพดที่ให้คลื่น RF ที่ระดับอุณหภูมิ 4 ระดับ คือ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4, 5, 6, 7 และ 8 นาที แก่เมล็ดพันธุ์ข้าวโพด ที่มีความชื้นเมล็ดเริ่มต้น 12.5 เปอร์เซ็นต์ (w.b.) พบว่า ความชื้นในเมล็ดมีแนวโน้มลดลงตามระดับของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น (กรกิตต์, 2552) สอดคล้องกับการให้คลื่นความถี่วิทยุแก่เมล็ดพันธุ์ข้าวโพด 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 180 วินาที สามารถลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ลงได้ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ ที่ความชื้นเริ่มต้นเมล็ดพันธุ์ 10 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ความชื้นเริ่มต้น 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ลงได้ 0.8 เปอร์เซ็นต์ (ปรัชญา, 2548) เนื่องจากภายในเมล็ดจะประกอบไปด้วยโมเลกุลของน้ำซึ่งอยู่ในรูป physically bound water คือ น้ำที่จับกับ grain substrate อย่างหลวม ๆ ด้วยแรงระหว่างโมเลกุล (molecular attraction) น้ำในสถานะนี้ระเหยออกได้ง่าย เมื่อให้คลื่น RF แก่เมล็ด ซึ่งเป็นไปตามหลักการให้ความร้อนด้วยพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กล่าวไว้ว่าการดูดซับพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ') ของวัตถุที่ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ค่านี้แสดงถึงความสามารถของสารประกอบในวัตถุที่สามารถกักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ได้เมื่อนำสารประกอบนั้นไปไว้ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ แฟกเตอร์การสูญเสีย (ϵ'') เป็นค่าพลังงานที่สูญเสียไปเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในวัตถุ หากค่านี้สูงแสดงว่าเกิดความร้อนได้สูง (Hastea *et al.*, 1988) เมล็ดพันธุ์ที่ความชื้นสูงเมื่อให้ RF แก่เมล็ด เมล็ดจะดูดซับพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้ดีกว่าเมล็ดที่มีความชื้นเมล็ดพันธุ์ต่ำ สอดคล้องกับ Jiao *et al.* (2011) ศึกษาคุณค่าที่ไดอิเล็กทริกและแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกของถั่ว black-eyed (*Vigna unguiculata*) และถั่วเขียว (*Vigna radiata*) ที่ความชื้นในเมล็ด 8.8, 12.7, 16.8, 20.9 เปอร์เซ็นต์ และ 10.2, 14.4, 18.2, 22.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พบว่า ค่าที่ไดอิเล็กทริกและแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกของถั่วทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้นตามความชื้นที่สูงขึ้น แสดงว่าเมล็ดที่ความชื้นสูงสามารถดูดซับพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้เร็วกว่าที่ความชื้นในเมล็ดที่ต่ำ ผลของการตอบสนองร่วมดังกล่าว ทำให้อุณหภูมิภายในเมล็ดสูงขึ้น แรงดันภายในของเมล็ดอันเนื่องมาจากโมเลกุลของน้ำได้รับพลังงานจนเกิดการเคลื่อนที่ กลายเป็นความดันที่สูงกว่าภายนอกเมล็ดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า จะทำให้น้ำในเมล็ดเคลื่อนออกมาจากภายในเมล็ดเพื่อรักษาสมดุลของความดันนี้ ทำให้ความชื้นในเมล็ดลดลง ยิ่งอุณหภูมิสูงมากขึ้นการเคลื่อนที่ของน้ำจากในเมล็ดออกสู่ภายนอกก็จะเป็นไปได้มากเท่านั้น (Cwiklinski and Höersten, 1999) ในกระบวนการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์โดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่น RF และไมโครเวฟ ระดับพลังงานที่เกิดจากการให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแก่เมล็ดพันธุ์จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นในเมล็ด โดยที่ระดับความชื้นในเมล็ดที่สูงส่งผลให้เมล็ดมีการดูดซับพลังงานและมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทและนำพาความร้อนในเมล็ดเกิดได้สูง (Christoph *et al.*, 2000)

สอดคล้องกับ Shivhare *et al.* (1992) รายงานว่า การลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดมีความสัมพันธ์กับค่าการดูดซับพลังงานของเมล็ด ระยะเวลาที่ให้ความร้อนแก่เมล็ด ซึ่งมีความสัมพันธ์อย่างมากต่อระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของเมล็ดและอัตราการลดความชื้นที่เกิดขึ้น Jolicoeur *et al.* (1982) พบว่า ความชื้นในเมล็ดพันธุ์จะมีความสัมพันธ์อย่างมากต่อระดับอุณหภูมิสุดท้ายของเมล็ดภายหลังจากที่ได้รับคลื่นไมโครเวฟ โดยพบว่าในเมล็ดถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำจะมีการดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟน้อยกว่าเมล็ดที่มีความชื้นเริ่มต้นสูง

ตาราง 4.7 ผลการวิเคราะห์ความชื้น ค่าสี L^* a^* b^* และค่าความแข็งของเมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุ ที่ระดับพลังงาน 640 วัตต์ ระยะเวลา 220 วินาที

กรรมวิธี	ความชื้น (%)	ความแข็ง (N)	L^*	a^*	b^*
ชุดควบคุม	11.0a	536.11a	37.16a	-1.22a	22.70a
RF 220 s	10.6b	527.55b	36.11b	-1.10b	24.46b

ค่าเฉลี่ยในสมบัตินี้เดียวกันตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ โดยวิธี t-test

4.1.2 ความแข็งของเมล็ด

จากการตรวจสอบความแข็งของเมล็ดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสอาหาร (Texture analyzer; TA-Xtplus) หัวกดแบบ Cylinder aluminium 40 mm. หลังจากให้คลื่นความถี่วิทยุที่พลังงาน 640 วัตต์ ระยะเวลา 220 วินาที อุณหภูมิสุดท้ายเฉลี่ยเท่ากับ 74.5 ± 0.5 องศาเซลเซียส จากความแข็งของเมล็ด 536.11 N ลดลงเป็น 527.55 N อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ตาราง 4.7) ความแข็งในที่นี้เป็นสมบัติทางกลของวัสดุเป็นสมบัติที่บ่งบอกความแข็งแรงหรือความทนทานของวัสดุ วัสดุนั้นจะแข็งแรงหรือทนทานมากน้อยเพียงใดเราสามารถให้แรงกระทำในลักษณะต่าง ๆ ต่อวัสดุนั้น เช่น แรงดึง แรงฉีก หรือแรงกระแทก แล้วประเมินผลการตอบสนองของวัสดุต่อแรงที่ได้รับ หากวัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยมักแตกหักเสียหายหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้เมื่อใช้แรงกระทำเพียงเล็กน้อย ในทางกลับกันหากวัสดุที่แข็งแรงมากกว่ามักแตกหักเสียหายหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ยาก (ปิยวรรณ, 2548)

4.1.3 ค่าสี L* a* b*

จากการนำถั่วเขียวมาผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่พลังงาน 640 วัตต์ ระยะเวลา 220 วินาที จะทำให้ค่า a* (a-value) ในที่นี้แสดงค่าสีเขียว และค่า b* (b-value) ในที่นี้แสดงค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้น จากชุดควบคุมที่ไม่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ส่วนค่าความสว่าง L* (L-value) มีค่าลดลงจากชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ดังแสดงในตาราง 4.7 เมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุทำให้สีของเมล็ดถั่วเขียวมีลักษณะเป็นสีเขียวคลดลงและสีเหลืองเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ระหว่างการให้ความร้อน คลอโรฟิลล์ซึ่งเป็นสารสีเขียว มีโมเลกุลขนาดใหญ่ประกอบด้วยวงแหวน pyrrole 4 วงยึดด้วยมีเทนคาร์บอน ตรงกลางเป็นอะตอมแมกนีเซียมซึ่งจับกับไนโตรเจนด้วยพันธะโคเวเลนต์ 4 พันธะและมีหมู่ฟิโทลในโมเลกุลจึงใช้ตรึงรงควัตถุไวต่อแสงให้กับโครงสร้างส่วนไฮโดรโฟบิกของเยื่อลามาเลลาในคลอโรพลาสต์จึงมีสมบัติไม่ละลายน้ำ คลอโรฟิลล์จัดเป็น conjugated protein เมื่อถูกความร้อนจะแปรสภาพไป โดยที่เซลล์เนื้อเยื่อของพืชถูกทำลายบางส่วน มีผลให้การแพร่ผ่านเยื่อรอบ ๆ chloroplast เกิดมากขึ้น และกรดในพืชถูกปล่อยออกมาทำปฏิกิริยากับคลอโรฟิลล์สร้าง pheophytin เนื่องจากการแทนที่ของไฮโดรเจนในตำแหน่งแมกนีเซียมเกิดเป็นรงควัตถุสีเหลือง

นอกจากนี้การใช้คลื่นความถี่วิทยุที่ระดับความถี่ 27.12 MHz ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยให้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุที่ 4 ระดับอุณหภูมิคือ 60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5, 10 และ 15 นาที พบว่า การใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ข้าวสารมีสีเหลืองเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากปฏิกิริยา maillard reaction ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่สารเกิดสีน้ำตาลโดยไม่ใช้เอนไซม์เมื่อได้รับความร้อน โดยถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการเกิดสีน้ำตาลจะสูงขึ้น การให้คลื่นความถี่วิทยุเป็นระยะเวลา 15 นาที ในทุกระดับอุณหภูมิ ส่งผลทำให้ข้าวสารมีค่าความสว่าง (L*) เพิ่มขึ้นแต่ไม่มีผลต่อค่าสีเหลืองของข้าว ยกเว้นการใช้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ทุกช่วงเวลามีค่าสีเหลือง (b*) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (พลากร, 2551) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของบุญมีและคณะ (2548) พบว่าการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นดัชนีความขาวลดลง การใช้เครื่องลดความชื้นชนิดลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่มีดัชนีความขาว 46.13 น้อยกว่าการลดความชื้นด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสทำให้ข้าวสารมีดัชนีความขาว 50.46 และที่ 50 องศาเซลเซียส ข้าวสารมีดัชนีความขาว 46.30

4.1.4 การวัดค่าความหนืดโดยใช้เครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA)

การเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำแป้งดิบถั่วเขียว ที่ได้จากตรวจวัดด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) จะแสดงค่าต่าง ๆ ได้แก่ ความหนืดสูงสุด (peak) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ค่าความคงทนต่อการกวนของแป้งหรือความเหนียว (breakdown) ความหนืดจากการคืนตัว (setback) และค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของความหนืด (pasting temperature) จากตาราง 4.8 ถั่วเขียวที่ไม่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุ (ชุดควบคุม) พบว่า แป้งดิบถั่วเขียว (แป้งฟาลว์) ค่าความหนืดสูงสุด ค่าความคงทนต่อการกวนของแป้ง ค่าความหนืดสุดท้าย ค่าการคืนตัวของแป้ง และค่าอุณหภูมิเริ่มต้นความหนืด มีค่าเท่ากับ 660.50 RVU, 107.33 RVU, 970.00 RVU, 309.50 RVU และ 73.34 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเมื่อผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่ระดับพลังงาน 640 วัตต์ ระยะเวลา 220 วินาที ค่าความหนืดสูงสุด ค่าความคงทนต่อการกวนของแป้ง ค่าความหนืดสุดท้าย ค่าการคืนตัวของแป้ง และค่าอุณหภูมิเริ่มต้นความหนืด มีค่าเท่ากับ 759.67 RVU, 131.83 RVU, 1104.33 RVU, 344.67 RVU และ 75.83 องศาเซลเซียส ตามลำดับดังแสดงในตาราง 4.8 ค่าความหนืดสูงสุด ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าอุณหภูมิเริ่มต้นความหนืด ในชุดควบคุมและที่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) ค่าความคงทนต่อการกวนของแป้ง มีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ในชุดควบคุมและที่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุ แสดงให้เห็นว่าเมล็ดแป้งที่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุมีความแข็งแรงมากกว่าเมล็ดถั่วเขียวที่ไม่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุ แป้งสามารถทนแรงต่าง ๆ อุณหภูมิในการทำให้เมล็ดแป้งแตกได้ดีกว่า สำหรับแป้งสตาร์ช Chung *et al.* (2000) พบว่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชถั่วเขียวด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) พบว่าอุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ชพองตัวเท่ากับ 71.9 องศาเซลเซียส ความหนืดเมื่อสตาร์ชพองตัวสูงสุดเท่า 249 RVU ความหนืดเมื่อสตาร์ชเย็นตัวเท่ากับ 260 RVU

ตาราง 4.8 ผลการวิเคราะห์ค่า Rapid Visco Analyzis (RVA) ของเมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุ ที่ระดับพลังงาน 640วัตต์ ระยะเวลา 220 วินาที

กรรมวิธี	ค่าความหนืดสูงสุด (RVU)	ค่าความคงทนต่อการกวนของแป้ง (RVU)	ค่าความหนืดสุดท้าย (RVU)	ค่าการคืนตัวของแป้ง (RVU)	ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นความหนืด (°C)
ชุดควบคุม	660.50ns	107.33a	970.00ns	309.50ns	73.34ns
RF 220 s	759.67	131.83b	1104.33	344.67	75.83

ค่าเฉลี่ยในสมรภูมิตีเดียวกันตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ โดยวิธี t-test

4.1.5 คุณสมบัติไดอิเล็กทริก

การวัดค่าการสะสมพลังงานไฟฟ้าในเมล็ดถั่วเขียว พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและแฟกเตอร์การสูญเสีย ก่อนผ่านคลื่นความถี่วิทยุ (ชุดควบคุม) มีค่าเท่ากับ 2.117 ± 0.021 และ 2.074 ± 0.027 ตามลำดับ (ตาราง 4.9) หลังผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่ระดับพลังงาน 640 วัตต์ ระยะเวลา 220 วินาที มีค่าเท่ากับ 2.126 ± 0.009 และ 2.085 ± 0.023 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ กาญจนานและนรินทร์ (2552) พบว่า ข้าวเปลือกเหนียวพันธุ์สันป่าตอง 1 ที่ผ่านการอบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้นจากข้าวเมล็ดสด ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่เพิ่มของเมล็ดข้าวความสัมพันธ์ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับที่พบในการทดสอบคุณสมบัติไดอิเล็กทริกในกล้วยพบว่า ค่าไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นตามปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่เพิ่มขึ้น (กาญจนานและนรินทร์, 2551) ผลของการเพิ่มขึ้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกตามปริมาณคาร์โบไฮเดรตซึ่งมีสูตรทั่วไปเป็น $(C_6H_{10}O_5)_n$ เมื่อโครงสร้างดังกล่าวอยู่ในสนามไฟฟ้าย่อมเกิดโพลาไรเซชันคล้ายกับที่เกิดในโมเลกุลของน้ำและวัสดุทั่ว ๆ ไปการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์โบไฮเดรตจึงเป็นให้ค่าไดอิเล็กทริกของข้าวเพิ่มขึ้น (กาญจนานและนรินทร์, 2552) ดังนั้นการเพิ่มของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียในถั่วเขียวหลังผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่ระดับพลังงาน 640 วัตต์ ระยะเวลา 220 วินาทีสัมพันธ์กับปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่เพิ่มขึ้นในตาราง 4.9

ตาราง 4.9 ผลการวิเคราะห์ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ') และค่าแฟกเตอร์การสูญเสีย (ϵ'') ของเมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุ ที่ระดับพลังงาน 640 วัตต์ ระยะเวลา 220 วินาที

กรรมวิธี	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ')	ค่าแฟกเตอร์การสูญเสีย (ϵ'')
ชุดควบคุม	$2.117 \pm 0.021a$	$2.074 \pm 0.027a$
RF 220 s	$2.126 \pm 0.009b$	$2.085 \pm 0.023b$

ค่าเฉลี่ยในสคริปต์เดียวกันตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ โดยวิธี t-test

4.2 การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

จากการตรวจสอบคุณภาพทางเคมีในเมล็ดถั่วเขียว พบว่า ปริมาณคาร์โบไฮเดรตก่อนผ่านคลื่นความถี่วิทยุ (ชุดควบคุม) มีค่าเท่ากับ 59.42 เปอร์เซนต์ หลังผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่ระดับพลังงาน 640 วัตต์ ระยะเวลา 220 วินาที มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 60.69 เปอร์เซนต์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ปริมาณโปรตีน ไขมัน และเยื่อใย ก่อนผ่านคลื่นความถี่วิทยุ (ชุดควบคุม) มีค่าเท่ากับ 20.76, 0.82 และ 4.55 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ หลังผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่ระดับพลังงาน 640 วัตต์ ระยะเวลา 220 วินาที มีค่าเท่ากับ 20.27, 0.57 และ 4.35 เปอร์เซนต์ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ปริมาณเถ้าและอะไมโลส หลังผ่านคลื่นความถี่วิทยุ มีค่าเท่ากับ 3.48 และ 28.79 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) (ตาราง 4.10) จากชุดควบคุมที่ไม่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุ

ตาราง 4.10 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของเมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุ ที่ระดับพลังงาน 640 วัตต์ ระยะเวลา 220 วินาที

กรรมวิธี	คาร์โบไฮเดรต (%)	โปรตีน (%)	ไขมัน (%)	เยื่อใย (%)	เถ้า (%)	อะไมโลส (%)
ชุดควบคุม	59.42a	20.76a	0.82a	4.55a	3.38ns	28.85ns
RF 220 s	60.69b	20.27b	0.57b	4.35b	3.48	28.79

ค่าเฉลี่ยในสคริปต์เดียวกันตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ โดยวิธี t-test

ปริมาณคาร์โบไฮเดรตเพิ่มขึ้นหลังผ่านคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่ระดับพลังงาน 640 วัตต์ ระยะเวลา 220 วินาที อุณหภูมิสุดท้ายเฉลี่ยเท่ากับ 74.5 ± 0.5 องศาเซลเซียส (ตาราง 4.10) แต่จากการศึกษาของ ปรัชญา (2548) ปริมาณคาร์โบไฮเดรตรวมในเมล็ดพันธุ์งาที่ความชื้นเริ่มต้น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่อุณหภูมิ 60, 70, 80, 85 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 180 วินาที การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ให้แก่เมล็ดพันธุ์งาไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคาร์โบไฮเดรต แต่มีผลกระทบต่อคุณภาพเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ให้คลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่อุณหภูมิ 70, 75 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1, 3 และ 5 นาที พบว่า อุณหภูมิในการให้คลื่นความถี่วิทยุมีผลทำให้ปริมาณคาร์โบไฮเดรตรวมในเมล็ดพันธุ์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในขณะที่ระยะเวลาในการให้คลื่นความถี่วิทยุไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์โบไฮเดรตรวมในเมล็ดพันธุ์ข้าว (พัทยา, 2550)

ปริมาณโปรตีนรวมในเมล็ดถั่วเขียวในการทดลองนี้ลดลงหลังผ่านคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่ระดับพลังงาน 640 วัตต์ ระยะเวลา 220 วินาที อุณหภูมิสุดท้ายเฉลี่ยเท่ากับ 74.5 ± 0.5 องศาเซลเซียส (ตาราง 4.10) แตกต่างจากในเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังการให้คลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่อุณหภูมิ 70, 75 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1, 3 และ 5 นาที พบว่า ระดับอุณหภูมิและระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลต่อปริมาณโปรตีนรวมในเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (พัทยา, 2550) ในเมล็ดพันธุ์ข้าวบาร์เลย์ที่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่อุณหภูมิ 60, 65, 70 และ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 1 และ 3 นาที พบว่า ปริมาณโปรตีนรวมในเมล็ดข้าวบาร์เลย์ก่อนผ่านคลื่นความถี่วิทยุมีเท่ากับ 10.7 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) ในเมล็ดข้าวบาร์เลย์ที่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุในระยะเวลาและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ปริมาณโปรตีนรวมมีค่าอยู่ระหว่าง 10.4-10.7 เปอร์เซ็นต์ (Akaranuchat *et al.*, 2007) สำหรับเมล็ดข้าวสารขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่อุณหภูมิ 40, 45, 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 นาที พบว่า ข้าวสารที่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส มีปริมาณโปรตีนเฉลี่ยเท่ากับ 8.06, 8.16 และ 7.77 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) จากชุดควบคุมที่ไม่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุปริมาณโปรตีนเฉลี่ยเท่ากับ 9.45 เปอร์เซ็นต์ (ณคนิณ, 2551) นอกจากนี้ในเมล็ดพันธุ์งาที่ความชื้นเริ่มต้น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่ระดับอุณหภูมิ 60, 70, 80, 85 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 180 วินาที พบว่าความชื้นเมล็ดพันธุ์งาเริ่มต้นและระดับอุณหภูมิที่ให้แก่เมล็ดพันธุ์งาไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดอะมิโนรวมในเมล็ด (ปรัชญา, 2548)

ปริมาณอะไมโลสในเมล็ดถั่วเขียวไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 MHz ที่ระดับพลังงาน 640 วัตต์ ระยะเวลา 220 วินาที อุณหภูมิสุดท้ายเฉลี่ยเท่ากับ 74.5 ± 0.5 องศา

เซลเซียส (ตาราง 4.10) แต่ในข้าวสารขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านคลื่นความถี่วิทยุตั้งแต่ 40-60 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณอะไมโลสเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยที่ 60 องศาเซลเซียส ปริมาณอะไมโลสมีค่าเท่ากับ 17.35 เปอร์เซ็นต์ (ณณิน, 2551) สอดคล้องกับงานวิจัยของ กฤษณา (2552) นำข้าวสารขาวดอกมะลิ 105 ไปผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่ 27.17 MHz อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสระยะเวลา 150 วินาที ซึ่งเป็นอุณหภูมิและระยะเวลาที่ทำให้มอดหัวป้อมตาย 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่า มีปริมาณอะไมโลสเพิ่มขึ้นเป็น 17.68 เปอร์เซ็นต์ จากปริมาณอะไมโลส 14.10 เปอร์เซ็นต์ก่อนนำไปผ่านคลื่นความถี่วิทยุ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

สำหรับคุณภาพทางเคมี (proximate analysis) ในผลิตภัณฑ์อาหารเลี้ยงสัตว์ หลังการผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที ซึ่งเป็นอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดมอดแป้ง พบว่า ปริมาณโปรตีน ไขมัน เยื่อใย เถ้า และสารสกัดที่ปราศจากไนโตรเจน ก่อนผ่านคลื่นความถี่วิทยุมีค่า 21.20, 8.10, 2.80, 6.87 และ 50.16 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ หลังจากผ่านคลื่นความถี่วิทยุมีค่า 22.30, 7.26, 2.78, 6.35 และ 51.24 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) (กรรณิการ์, 2552) การใช้คลื่นความถี่วิทยุทำให้ความร้อนภายในตัวของแมลงเกิดขึ้นได้เร็วกว่าผลิตผลที่แมลงทำลาย จึงส่งผลให้แมลงตายโดยที่ไม่ทำให้ผลิตผลเสียรสชาติ และคงลักษณะ โครงสร้างทางอาหารได้ (Wang and Tang, 2001)