

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยเรื่องการควบคุมกำลังของการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟสำหรับกระบวนการอบแห้งที่ควบคุมอุณหภูมิได้มีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาเตาอบไมโครเวฟเชิงพาณิชย์ ขนาดความจุ 30 ลิตร ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ กำลัง 900 วัตต์ ให้สามารถควบคุมระดับอุณหภูมิคงที่ตลอดกระบวนการให้ความร้อน เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานอบแห้ง ดังนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาและทำความเข้าใจถึงความสำคัญของอุณหภูมิต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ในงานอบแห้ง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หลักการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับวัสดุ การหาค่าความร้อนที่เกิดบนวัสดุภายในเตาอบไมโครเวฟ หลักการทำงานของเตาอบไมโครเวฟเชิงพาณิชย์ การสร้างคลื่นไมโครเวฟด้วยแมกนีตรอน การควบคุมกำลังไฟฟ้า เทคนิคการควบคุมโคริสเตอร์โดยการควบคุมเฟส การตรวจจับอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส เทอร์มอไพล์ ปრაกฏการณ์ซีเบค ปრაกฏการณ์ทอมสัน

#### 2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นที่ไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่า 299,792,458 เมตรต่อวินาที โดยทั่วไปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากการรวมตัวของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีลักษณะตั้งฉากกันและกันพร้อมเคลื่อนที่ไปยังทิศทางเดียวกันหรือเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามหลักทฤษฎีแม็กซ์เวลล์ที่กล่าวไว้ว่า เมื่อสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กหรือเมื่อสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า แสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ 2.1 ถึง 2.4 เฉลิมพล (2548)

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

โดยที่

$\nabla$  แทน ตัวกระทำทางแคลคูลัสเวกเตอร์ เป็นค่าคงที่ตามระบบพิกัดแกนประสานสามแกน

$\vec{E}$  แทน ความเข้มสนามไฟฟ้าเป็นปริมาณเวกเตอร์

$\vec{D}$  แทน ค่าความหนาแน่นสนามไฟฟ้า เป็นปริมาณเวกเตอร์

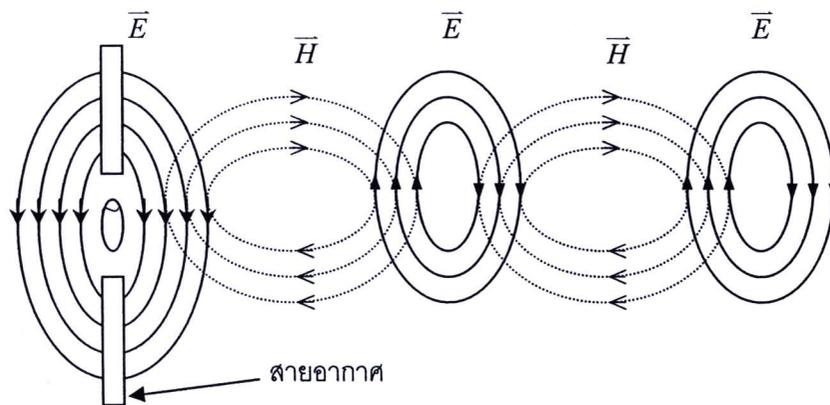
$\vec{H}$  แทน ความเข้มสนามแม่เหล็ก เป็นปริมาณเวกเตอร์

$\vec{B}$  แทน ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก เป็นปริมาณเวกเตอร์

$\vec{J}$  แทน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เป็นปริมาณเวกเตอร์

$\rho$  แทน ค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้า เป็นปริมาณสเกลาร์

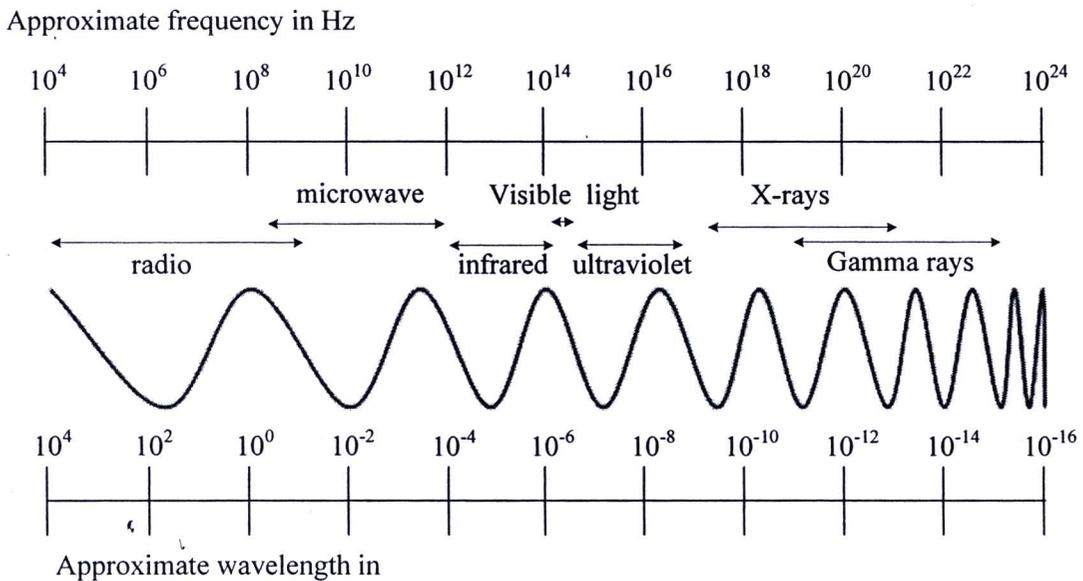
การอธิบายพฤติกรรมการเกิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้สายอากาศที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลามีลักษณะเป็นเส้นวงปิดเกี่ยวโยงกันและกันดังแสดงในภาพ 2.1



ภาพ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

จากภาพ 2.1 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นส่งผลทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเดินทางไปยังบริเวณที่ห่างออกไปจากสายอากาศที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคลื่น โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง

ปัจจุบันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกนำมาใช้ในงานต่าง ๆ โดยแบ่งตามช่วงความถี่หรือช่วงของความยาวคลื่นสามารถดูได้จากภาพ 2.2 ที่ใช้แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic spectrum)



ภาพ 2.2 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

[http://www.vias.org/wirelessnetw/wndw\\_04\\_04.html](http://www.vias.org/wirelessnetw/wndw_04_04.html) [online].

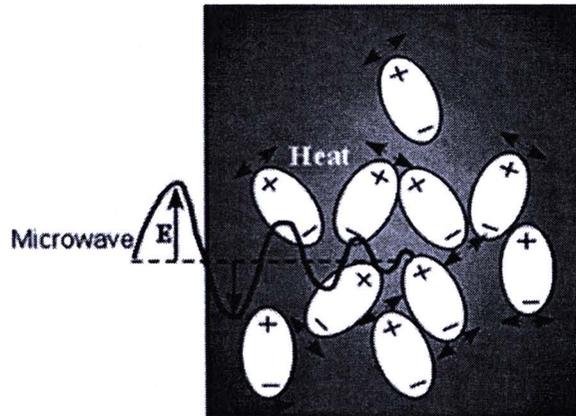
(25 พฤศจิกายน 2553)

จากสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงดังภาพ 2.2 พบว่าช่วงความถี่ที่นำมาใช้งานกับอาหาร คือ ความถี่ไมโครเวฟมีความยาวคลื่นระหว่าง 1 มิลลิเมตร ถึง 1 เมตร

## 2.2 การให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับวัสดุ

### 2.2.1 หลักการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับวัสดุ

ในการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุใช้ช่วงความถี่คลื่นที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 1 มิลลิเมตร ถึง 1 เมตร โดยความร้อนที่ได้เกิดจากการเสียดสีของโมเลกุลวัสดุที่หมุนตามจำนวนครั้งต่อวินาทีในการสลับขั้วของเส้นแรงไฟฟ้าที่วิ่งผ่าน แสดงดังภาพ 2.3 โดยระดับความร้อนที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความถี่ และความเข้มของเส้นแรงไฟฟ้า ความถี่ที่สามารถนำมาใช้ในการทำความร้อนกับวัสดุต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของสถาบัน International Telecommunication คือความถี่ 915 เมกะเฮิรตซ์ และความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ (สายสนม, 2543 ; Singh and Heldman, 2001)



ภาพ 2.3 การเกิดความร้อนเมื่อวัสดุได้รับคลื่นไมโครเวฟ  
<http://mail.vcharkarn.com/varticle/38525>[online]. (25 พฤศจิกายน 2553)

### 2.2.2 การหาค่าความร้อนบนวัสดุที่เกิดขึ้นจากคลื่นไมโครเวฟ

ค่าความร้อนบนวัสดุที่เกิดจากการเสียดสีของโมเลกุลวัสดุเนื่องจากการหมุนตามการสลับขั้วเส้นแรงไฟฟ้าที่วิ่งผ่านสามารถหาค่าได้จากสมการ 2.5

$$P = 2\pi f \epsilon_r \epsilon_0 \tan \delta |E_i|^2 \quad (2.5)$$

โดยที่

- $E_i$  แทน ขนาดของความเข้มสนามไฟฟ้าภายในเตาอบ
- $f$  แทน ความถี่คลื่นของเตาอบไมโครเวฟ
- $\epsilon_0$  แทน ค่าความนำทางไฟฟ้าของอากาศภายในห้องอบ
- $\epsilon_r$  แทน ค่าความนำทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุที่ใช้ออบแห้ง
- $\tan \delta$  แทน ตัวบอกถึงการสูญเสียกำลังงานในวัสดุ

จากสมการ 2.5 สามารถนำไปหาค่าความสมดุลทางความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุที่สัมพันธ์โดยตรงกับกำลังไฟฟ้าและมวลวัสดุสามารถหาค่าได้จากสมการ 2.6

$$P = M \frac{d\theta}{dt} s \quad (2.6)$$

โดยที่

- $P$  แทน กำลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้
- $M$  แทน มวลของวัสดุ
- $\frac{d\theta}{dt}$  แทน อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลา
- $s$  แทน ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ

การเปลี่ยนแปลงค่าของอุณหภูมิที่ปรากฏบนวัสดุในขณะที่ทำการอบแห้งจะสัมพันธ์กับกำลังงานไฟฟ้าที่ป้อนกับมวลของวัสดุสามารถหาได้จากสมการ 2.7

$$\Delta T = \frac{P}{sM} \quad (2.7)$$

โดยที่

$\Delta T$  แทน อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

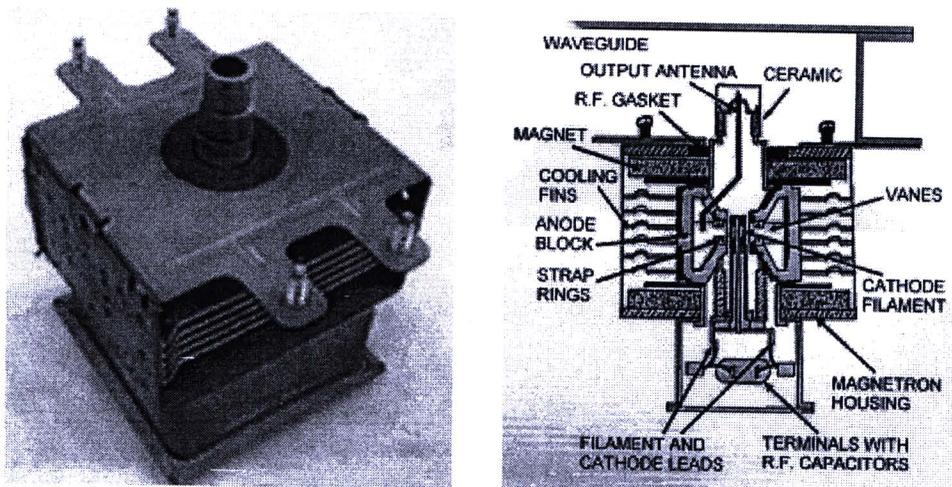
### 2.3 การทำงานของเตาอบไมโครเวฟเชิงพาณิชย์

#### 2.3.1 หลักการทำงานของเตาอบไมโครเวฟ

โดยทั่วไปเตาอบไมโครเวฟเชิงพาณิชย์จะมีตัวตั้งเวลาเพื่อใช้ควบคุมการทำงานของเตาอบไมโครเวฟพร้อมสวิตช์กลไกสลับตรวจสอบการปิดประตูเพื่อความปลอดภัยก่อนเริ่มทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ เข้าสู่ระบบโดยมีหลอดแมกนีตรอนเป็นตัวสร้างคลื่นไมโครเวฟส่งผ่านท่อนำคลื่นป้อนเข้าสู่ห้องอบ โดยที่ปากทางเข้าสู่ห้องอบจะมีการใช้พัดลมกวนให้คลื่นสะท้อนไปมาลงสู่วัสดุในห้องอบให้เกิดความร้อนขึ้นตามระยะเวลาที่ตั้งไว้

#### 2.3.2 การสร้างคลื่นไมโครเวฟด้วยหลอดแมกนีตรอน

เตาอบไมโครเวฟเชิงพาณิชย์อาศัยแมกนีตรอนในการให้กำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ลักษณะรูปร่างและโครงสร้างของแมกนีตรอนแสดงดังภาพ 2.4



ภาพ 2.4 รูปร่างและโครงสร้างของแมกนีตรอน

<http://mail.vcharkarn.com/varticle/38525>[online]. (25 พฤศจิกายน 2553)

จากภาพ 2.4 แมกนีตรอนจะประกอบด้วยไส้หลอดทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทดถูกบรรจุอยู่ในช่องสุญญากาศโดยส่วนของผนังรอบ ๆ ช่องสุญญากาศทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดมีไว้สำหรับสร้างสนามไฟฟ้าส่วนสนามแม่เหล็กมีวงแหวนแม่เหล็กถาวรเป็นตัวสร้างโดยหลักการสร้างคลื่นไมโครเวฟของแมกนีตรอนอาศัยสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในลักษณะตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและเคลื่อนที่ไปทางเดียวกันเกิดเป็นคลื่นไมโครเวฟขึ้น กระบวนการสร้างคลื่นไมโครเวฟของแมกนีตรอนเริ่มจากการจ่ายกำลังงานไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำค่าประมาณ 3 - 4 โวลต์ กระแส 10 แอมแปร์ให้ไส้หลอดเกิดความร้อนปล่อยอิเล็กตรอนออกมาบังคับวิ่งผ่านสนามไฟฟ้าความเข้มสูงที่อาศัยการจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงไปยังขั้วแคโทดเทียบกับขั้วแอโนดผลทำให้อิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมาถูกบังคับให้เคลื่อนที่ภายใต้ความเข้มสูงของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้คลื่นไมโครเวฟออกมาที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ตามโครงสร้างภายในช่องสุญญากาศระหว่างขั้วแคโทดกับขั้วแอโนด

## 2.4 การควบคุมกำลังไฟฟ้า

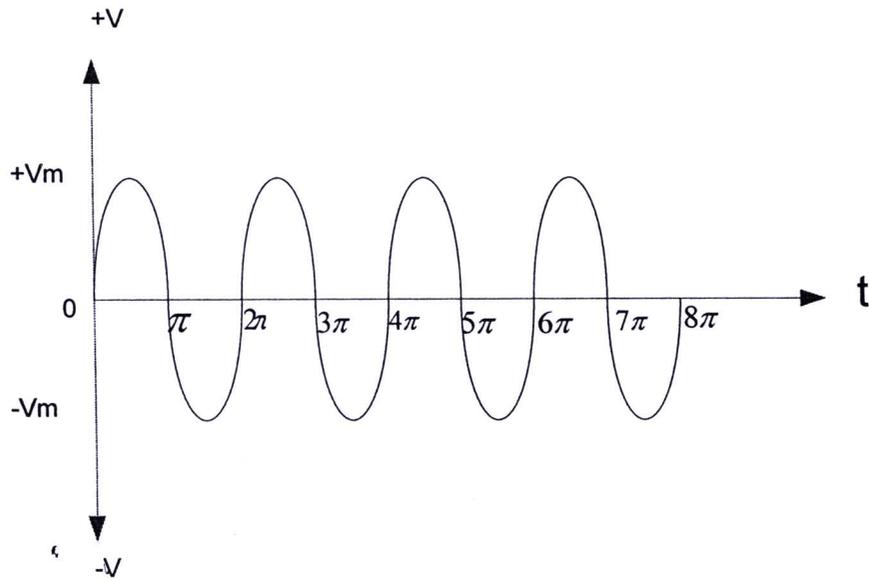
การควบคุมกำลังไฟฟ้า หมายถึง การกำหนดปริมาณกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ปรากฏใช้งานที่โหลดในระดับต่าง ๆ ตามที่ต้องการได้

### 2.4.1 รูปแบบการควบคุมกำลังไฟฟ้า

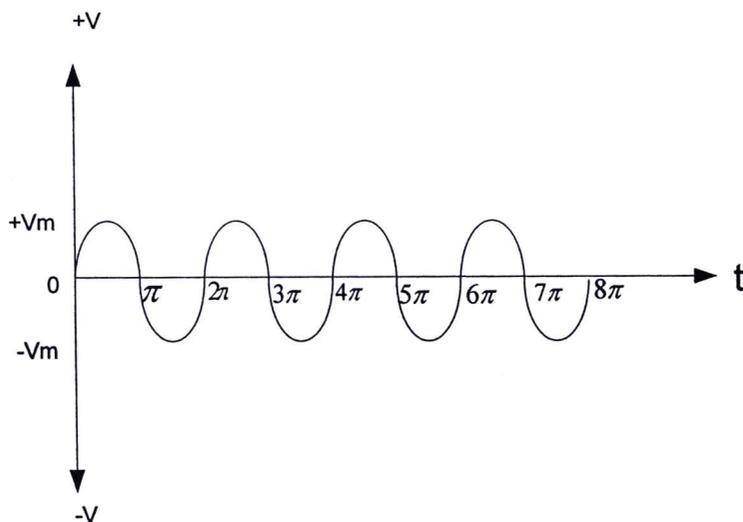
ในงานวิจัยนี้นำเสนอรูปแบบการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ใช้วิธีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าปรากฏที่โหลดจำนวน 5 รูปแบบ ดังนี้

#### 1. การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ (Linear resistive control)

เป็นเทคนิคการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ต่ออนุกรมกับโหลด ควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายผ่านโหลดให้มากหรือน้อยตามการปรับค่าความต้านทาน คือ เมื่อปรับค่าความต้านทานน้อยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจะมากกำลังไฟฟ้าปรากฏที่โหลดมากตามแต่ถ้าปรับให้มีค่าความต้านทานมากกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านได้น้อยกำลังไฟฟ้าปรากฏที่โหลดลดตามข้อดีของการควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ คือ ต่อวงจรง่าย สะดวก ราคาถูก ส่วนข้อเสีย คือ เกิดการสูญเสียกำลังงานที่ตัวต้านทานในรูปความร้อนสูงรูปสัญญาณไฟฟ้าก่อนและหลังการควบคุมแสดงได้ดังภาพ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ



ภาพ 2.5 รูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าก่อนถูกควบคุมแบบ Linear resistive control

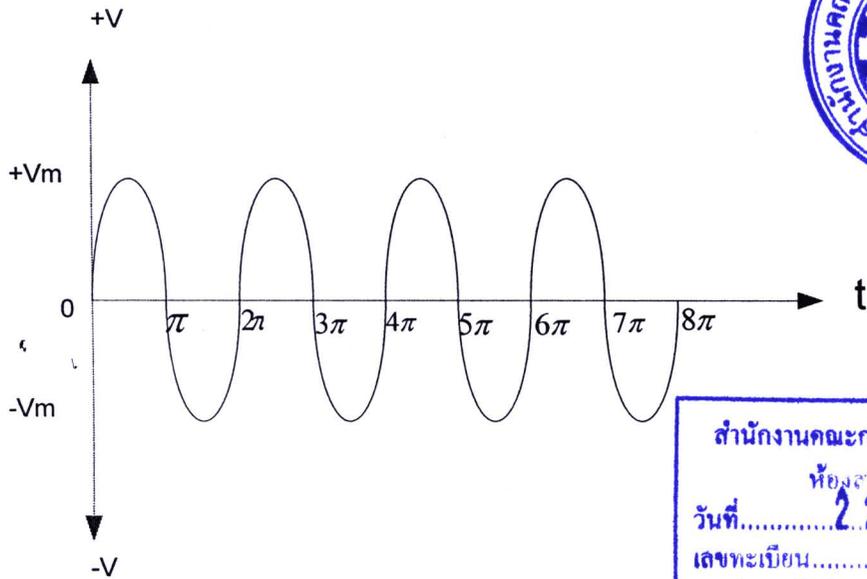


ภาพ 2.6 รูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าหลังถูกควบคุมแบบ Linear resistive control

## 2. การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบใช้หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าแรงดัน (Variable transformer control)

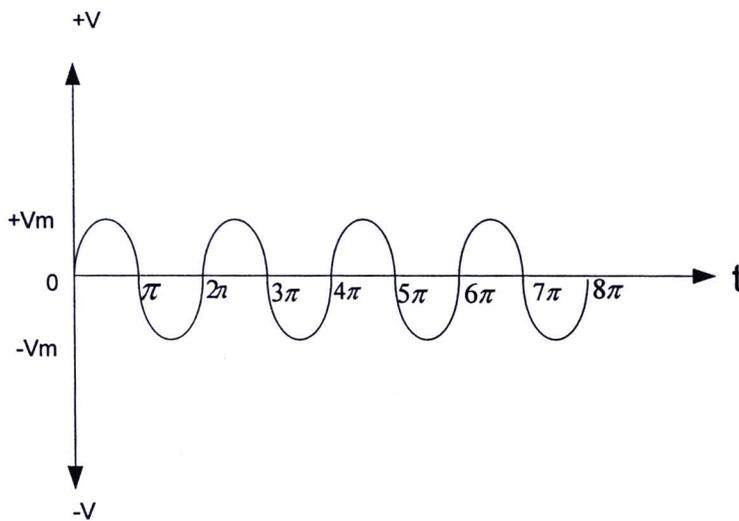
เป็นเทคนิคการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถปรับค่าแรงดันทางด้านขดทุติยภูมิได้หลายระดับมาทำการปรับเลือกกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไปยังโหลด ข้อดี คือ ใช้งาน

ง่าย สะดวก ข้อเสีย คือ ราคาแพง และไม่สามารถควบคุมแบบที่ต้องการความละเอียดสูงได้ รูป  
 สัญญาณไฟฟ้าก่อนและหลังการควบคุม แสดงได้ดังภาพ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ  
 ห้องเลขที่.....วิจัย.....  
 วันที่..... 22 ส.ค. 2555.....  
 เลขทะเบียน..... 248025.....  
 เลขเรียกหนังสือ.....

ภาพ 2.7 รูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าก่อนถูกควบคุมแบบ Variable transformer control

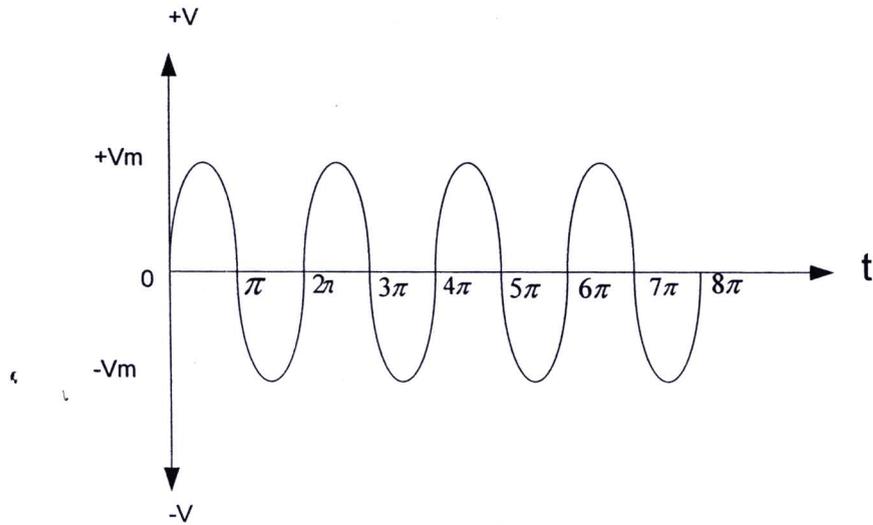


ภาพ 2.8 รูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าหลังถูกควบคุมแบบ Variable transformer control

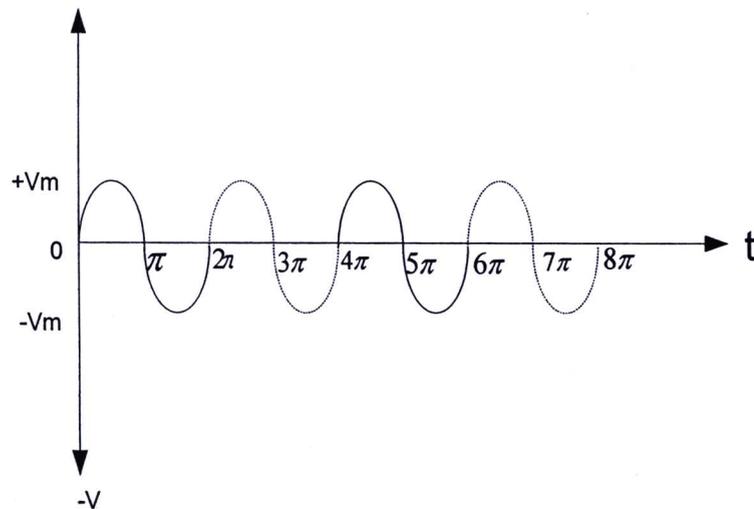
3. การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบใช้สวิตช์ตัดต่อ (Integral cycle control)

เป็นเทคนิคการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ใช้สวิตช์ต่ออนุกรมกับโหลด เพื่อทำการเปิดและ  
 ปิดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นช่วง ๆ ตามจังหวะการเปิดและปิดของสวิตช์ ข้อดี คือ ง่าย สะดวก

ราคาถูก และสามารถใช้อัตโนมัติตั้งโปรแกรมควบคุมได้ ข้อเสีย คือไม่สามารถกำหนดค่ากระแสที่ปล่อยไปยังโหลดจังหวะที่ปิดวงจรให้มีหลายค่าได้ รูปแบบสัญญาณไฟฟ้าก่อนและหลังการควบคุมแสดงได้ดังภาพ 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ



ภาพ 2.9 รูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าก่อนถูกควบคุมแบบ Integral cycle control

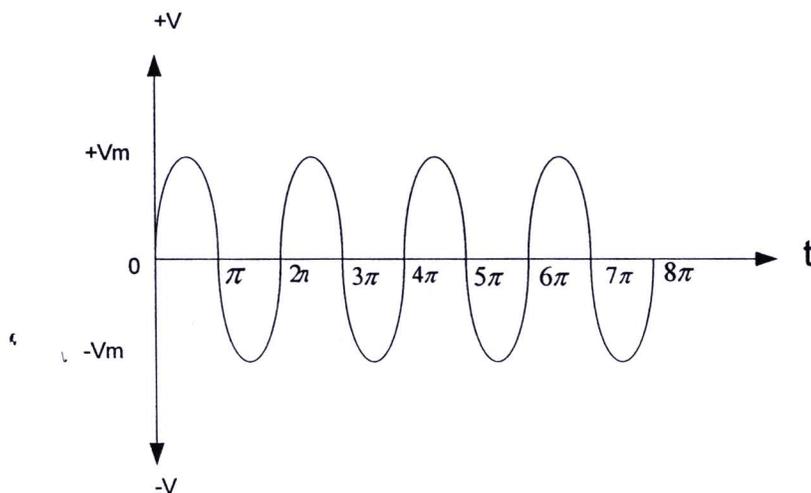


ภาพ 2.10 รูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าหลังถูกควบคุมแบบ Integral cycle control

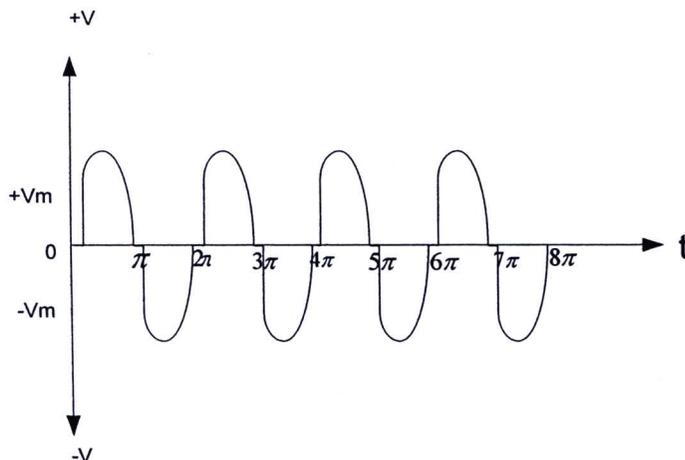
#### 4. การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบควบคุมมุม (Phase control)

เป็นเทคนิคการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กลุ่มไคริสเตอร์มาต่ออนุกรมกับโหลดเป็นวงจรควบคุมกำลังไฟฟ้าปรากฏที่โหลดโดยทำการกำหนดมุมจุดฉนวนการ

ทำงานของไคริสเตอร์ควบคุมกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่โหลด รูปแบบสัญญาณไฟฟ้าก่อนและหลังการควบคุมแสดงได้ดังภาพ 2.11 และ 2.12 ตามลำดับ



ภาพ 2.11 รูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าก่อนถูกควบคุมแบบ Phase control

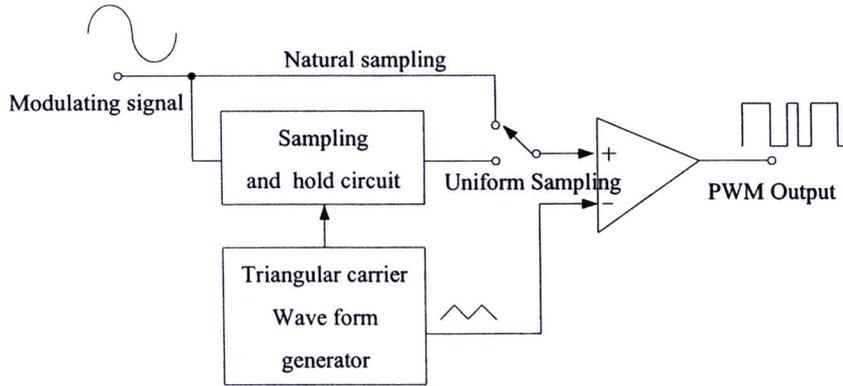


ภาพ 2.12 รูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าหลังถูกควบคุมแบบ Phase control

##### 5. การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบ Pulse Width Modulation control

เป็นเทคนิคการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ใช้กระบวนการมอดูเลตเป็นสัญญาณกระตุ้นการนำกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่โหลดปกติสัญญาณ PWM สามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบใหญ่ ๆ คือ PWM ที่เกิดจากการสุ่มแบบธรรมชาติ (Natural sampling ;

NPWM) และเกิดจากการสุ่มแบบยูนิฟอร์ม (Uniform sampling ; UPWM) หลักวิธีการสร้างสัญญาณ PWM ทั้งสองแบบแสดงดังภาพ 2.13

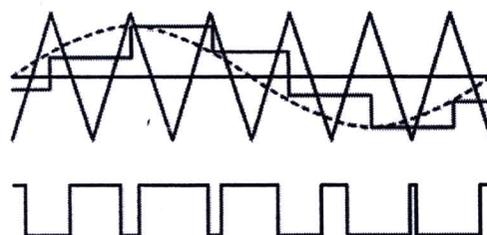


ภาพ 2.13 วิธีการกำเนิดสัญญาณ PWM

จากภาพ 2.13 กรณีที่เป็นการกำเนิดสัญญาณ NPWM สัญญาณข่าวสาร (Modulating signal) จะถูกเปรียบเทียบแรงดันสัญญาณสามเหลี่ยมซึ่งเป็นสัญญาณพาห์ ในกรณีที่เป็นการกำเนิดสัญญาณ UPWM สัญญาณข่าวสารจะผ่านวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ (Sample and hold) ก่อนเข้าเปรียบเทียบแรงดันกับสัญญาณสามเหลี่ยม สัญญาณ PWM ทั้งสองแบบแสดงดังภาพ 2.14 และ 2.15 ตามลำดับ



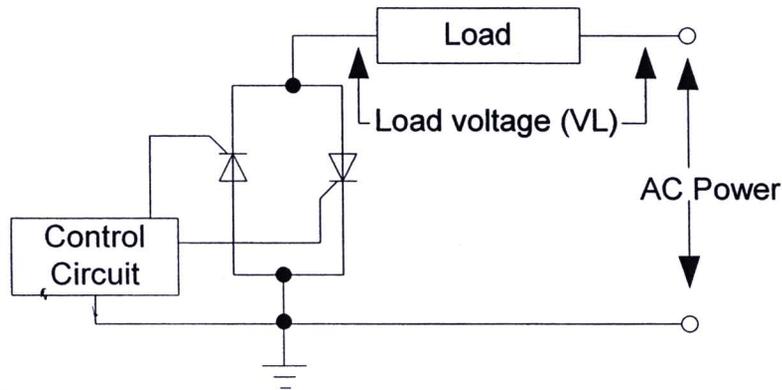
ภาพ 2.14 สัญญาณ PWM แบบ NPWM



ภาพ 2.15 สัญญาณ PWM แบบ UPWM

### 2.4.2 เทคนิคการควบคุมไคริสเตอร์โดยการควบคุมมุม

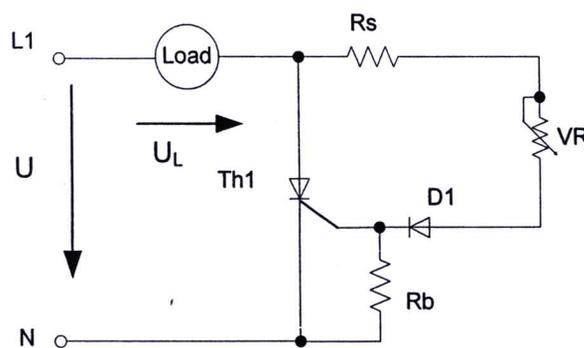
ไคริสเตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทหนึ่งที่มีโครงสร้าง 3 รอยต่อนิยมใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยเทคนิควิธีการควบคุมมุมการจุดชนวนการทำงานที่มุมต่าง ๆ หลักการต่อวงจรควบคุมมุมจุดชนวนไคริสเตอร์แสดงดังตามภาพ 2.16



ภาพ 2.16 การต่อวงจรควบคุมสำหรับเทคนิคการควบคุมไคริสเตอร์โดยการควบคุมมุม

ภาพ 2.16 อธิบายการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยปรากฏที่โหลดจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามการควบคุมการทำงาน หรือ การปรับค่ามุมจุดชนวนของไคริสเตอร์นั้นคือ เมื่อปรับค่ามุมจุดชนวนมากจะทำให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยลดลง ข้อดี คือ สามารถกำหนดกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ออกโหลดได้ตามต้องการง่าย ข้อเสีย คือ ราคาแพงหากต้องการควบคุมที่กำลังงานสูง ๆ วิธีการต่อวงจรควบคุมมุมสามารถต่อได้ 2 แบบ คือ

1. ใช้ตัวต้านทานต่อเป็นวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage divider triggering circuit)



ภาพ 2.17 วงจร Voltage divider triggering circuit

จากภาพ 2.17 สามารถทำการจุดจนวนการทำงานให้กับเอสซีอาร์ (Th1) ได้โดยการปรับค่าความต้านทานเพื่อสร้างแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_b$  เป็นแรงดันจุดจนวนควบคุมกำลังปรากฏที่โหลด โดยแรงดันที่ปรากฏสามารถหาได้จากสมการ 2.8

$$U = U_F + U_{GT} + I_{GT} (R + R_S) \quad (2.8)$$

โดยที่

$U_F$  แทน แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอด D1 ขณะนำกระแส

$U_{GT}$  แทน แรงดันที่ขาเกตต่ำสุดที่สามารถทำให้เอสซีอาร์ทำงานได้

$I_{GT}$  แทน กระแสไฟฟ้าที่ขาเกตต่ำสุดที่สามารถทำให้เอสซีอาร์ทำงานได้

$R_S$  แทน ตัวต้านทานที่ใช้จำกัดค่ากระแสไฟฟ้าให้กับวงจรถาเกตไม่ให้เกินกว่าค่า  $I_{GT}$  ค่า  $R_S$  ต่ำสุดหาได้จากสมการ 2.9

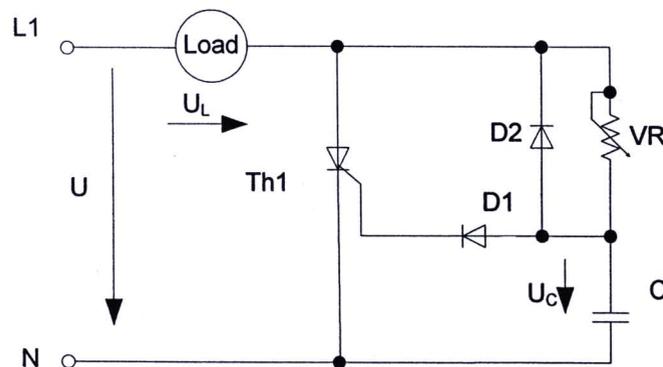
$$R_S \geq \frac{U}{I_{GTM}} \quad (2.9)$$

$R_b$  แทน ตัวต้านทานรักษาเสถียรภาพเลือกค่าที่แรงดันตกคร่อมแล้วไม่เกิน  $U_{GTM}$  ของเอสซีอาร์ ค่า  $R_b$  สูงสุดหาได้จากสมการ 2.10

$$R_b \leq \frac{(R + R_S)U_{GTM}}{U - U_{GTM}} \quad (2.10)$$

เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ขาเอโนดและกระแสเกตมีเฟสตรงกันจึงสามารถปรับค่ามุม Firing delay angle ได้ไม่เกิน 90 องศา ดังนั้นในการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏโหลดจึงสามารถควบคุมได้แค่เพียง 100 เปอร์เซ็นต์จนถึง 50 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

## 2. ใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่อเป็นวงจรแบ่งแรงดัน (RC triggering circuit)



ภาพ 2.18 RC triggering circuit

จากภาพ 2.18 เป็นการประยุกต์ใช้หลักการของวงจร RC network มาช่วยจุดจนวนซึ่งผลการทำงานของวงจร RC network ที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุมีเฟสล่าหลังกับ

แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้ามาในวงจรจึงทำให้ค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าที่ไปตกคร่อมตัวเก็บประจุอยู่ที่มุมเกินกว่า 90 องศา การปรับค่ามุมจุดฉนวนในการควบคุมสามารถทำได้ระหว่าง 0 ถึง 180 องศา ดังนั้นการควบคุมกำลังไฟฟ้าปรากฏที่โหลดจึงสามารถควบคุมได้มากขึ้นกว่าแบบ Voltage divider triggering circuit

ขั้นตอนในการออกแบบวงจรเพื่อเลือกค่าตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุสามารถหาได้จากสมการ 2.11 และ 2.12

$$RC \geq \frac{1.3T}{2} \quad (2.11)$$

โดยที่

T แทน คาบเวลา (Time period ) ของรูปคลื่นแรงดัน ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจร  
ค่าสูงสุดของตัวต้านทาน R สามารถคำนวณได้ตามสมการ 2.13

$$R \leq \frac{U - V_{GT} + V_P}{I_{GT}} \quad (2.12)$$

## 2.5 การตรวจจับอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส

การตรวจจับอุณหภูมิแบบไม่สัมผัสในงานวิจัยนี้ ได้ทำการใช้ตัวตรวจจับอุณหภูมิแบบเทอร์โมไพร์รับรังสีความร้อนมาแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าส่งต่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผล ออกมาในรูปค่าของอุณหภูมิตัวตรวจจับที่เลือกใช้ประกอบด้วยเทอร์มอคับเปิด 8 ชุด ทำหน้าที่รับรังสีความร้อนที่มากกระทบบนรอยต่อของเทอร์มอคับเปิดทั้ง 8 เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างปลายร้อนและปลายเย็นได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าตามปริมาณรังสีความร้อนส่งต่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลแสดงค่าอุณหภูมิและควบคุมการทำงานของระบบต่อไป

### 2.5.1 เทอร์มอไพร์

เป็นอุปกรณ์วัดการแผ่รังสีความร้อนที่ประกอบด้วยเทอร์มอคับเปิดสองชุด หรือมากกว่ามาเชื่อมปลายต่อปลายเข้าด้วยกันเมื่อมีรังสีความร้อนมาตกกระทบบนรอยต่อด้านหนึ่งทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างปลายร้อนและปลายเย็นก่อเกิดเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น โดยขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณรังสีความร้อนที่ถูกดูดไว้ได้ตามปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกว่าด้วยเรื่องการแปลงไฟฟ้าจากความร้อน

### 2.5.2 ปรากฏการณ์ซีเบค

โทมัส โจแฮนน์ ซีเบค (Thomas Johann Seebeck) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ค้นพบเมื่อปี ค.ศ.1821 ซึ่งจะว่าด้วยเรื่องการให้ความร้อนที่รอยต่อของตัวนำสองชนิดแล้วจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลได้แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ (Back electromotive force) การแปลงความร้อนเป็นไฟฟ้าถูกกำหนดเป็นความสัมพันธ์ตามสมการ 2.13 และ 2.14

$$\Delta V = \alpha \Delta T \quad (2.13)$$

$$\bar{E} = \alpha \nabla T \quad (2.14)$$

โดยที่

$V$  แทน ความต่างศักย์ไฟฟ้า

$\bar{E}$  แทน ความเข้มสนามไฟฟ้า

$T$  แทน อุณหภูมิ

$\alpha$  แทน สัมประสิทธิ์ซีเบค

### 2.5.3 ปปรากฏการณ์ทอมสัน

วิลเลียม ทอมสัน (William Thomson) นักฟิสิกส์ชาวสก็อตค้นพบเมื่อปี ค.ศ. 1954 ซึ่งจะว่าด้วยเรื่องการจ่ายกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำสองจุดที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันทิศทางของความร้อนจะขึ้นอยู่กับการไหลของกระแสไฟฟ้าแสดงดังสมการ 2.15

$$\tau = T \frac{d\alpha}{dT} \quad (2.15)$$

โดยที่

$\tau$  แทน สัมประสิทธิ์ทอมสัน

### 2.6 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน

จุดคุ้มทุน คือ จุดที่รายได้ออกกับรายรับเท่ากัน หรือ กำไรเป็นศูนย์ การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน เป็นการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของต้นทุน รายได้ และผลกำไรที่ปริมาณการผลิตต่าง ๆ โดยที่จุดคุ้มทุนเหมาะกับโครงการระยะสั้นที่มีเงื่อนไขต่าง ๆ คงที่ตลอดโครงการสามารถหาจุดคุ้มทุนได้จากสมการ 2.16

$$\text{Break - even point} = \frac{TFC}{Pd - TOC} \quad (2.16)$$

โดยที่

TFC แทน ต้นทุนคงที่รวม (บาท)

Pd แทน รายรับจากการผลิต (บาทต่อกิโลกรัม)

TOC แทน ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการรวม (บาท)

### 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การควบคุมกำลังของการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟสำหรับกระบวนการอบแห้งที่ควบคุมอุณหภูมิได้ ประกอบด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ และการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้า ดังรายละเอียดต่อไปนี้



### 2.7.1 การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจากการประยุกต์เตาอบไมโครเวฟเชิงพาณิชย์มาใช้ให้ความร้อนแก่วัตถุในงานอบแห้งจากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลประกอบผู้วิจัยพบว่า มีนักวิจัยหลายท่านทำการศึกษาทดลองและได้ผลอันเป็นประโยชน์ต่อการนำไปเป็นแนวทางในการศึกษาของงานวิจัยนี้เป็นอย่างมากซึ่งรายละเอียดข้อมูลที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

รัชดา และ ณัทเดชธร (2547) รายงานว่า จากการทำวิจัย เรื่องการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อยางโดยใช้คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงาน 1,200 วัตต์ พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อยางจากการทดลองเทียบกับการคำนวณโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม Abaqus ® ให้ผลลัพธ์การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ออกมาสอดคล้องกันทั้งสองวิธี คือ การกระจายตัวสม่ำเสมอ ผู้วิจัยจึงอ้างอิงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ได้จากงานวิจัยนี้มาใช้เป็นแนวทางการศึกษา

ผดุงศักดิ์ (2546) รายงานว่า จากการทำวิจัย เรื่องกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยใช้ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมในการอธิบายการเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Thermal runaway effect พบว่าที่ค่าความชื้นลดลงทำให้คลื่นไมโครเวฟสามารถส่งผ่านเนื้อวัสดุได้มากเป็นผลทำให้ค่า Dielectric loss มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นการที่ทราบคุณลักษณะของปรากฏการณ์ Thermal runaway Effect ทำให้สามารถนำข้อมูลมาควบคุมการทำงานของระบบให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นซึ่งมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพยิ่งขึ้นตาม ผู้วิจัยจึงสนใจทำการควบคุมระดับค่าอุณหภูมิในการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟให้คงที่ เพื่อไม่ให้เกิดปรากฏการณ์ Thermal runaway Effect ในงานอบแห้ง

ณัฐศักดิ์ (2543) รายงานว่า จากการทำวิจัย เรื่องการทดลองลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วลิสงพันธุ์ไทนาน 9 (จากศูนย์ขยายพันธุ์พืชที่ 7 จังหวัดลำปาง) โดยให้กำลังความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟด้วยเครื่องอบไมโครเวฟที่ระดับกำลังงานและระยะเวลาการให้ความร้อนที่ต่างกันมาใช้เป็นแนวทางในการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วลิสงและลดการปนเปื้อนเชื้อราโดยวางแผนการทดลองแบบ Random complete block ประกอบด้วย 2 ปัจจัยสำคัญ คือ ระดับกำลังความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟกำหนดที่ 80, 240, 400, 560 และ 800 วัตต์ และระยะเวลาที่ใช้กำหนดที่ 120, 180, 240, 300, 360, 540, 720 และ 900 วินาที ผู้วิจัยจึงอ้างอิงปัจจัยในการทดสอบทั้ง 2 ปัจจัยตามแต่เพิ่มความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิกงที่เพื่อเพิ่มช่วงระยะเวลาการอบแห้งที่สามารถรองรับความต้องการมากขึ้น

โสภา และ คำนึ่ง (2546) รายงานว่า จากการทำวิจัย เรื่องคุณลักษณะในการอบกล้วยน้ำว้าด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยให้กำลังความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟด้วยเครื่องอบไมโครเวฟที่

ระดับกำลังงานและระยะเวลาการให้ความร้อนที่ต่างกัน คือ 180, 300, 450, 600 และ 800 วัตต์ หรือ 0.36, 0.60, 0.90, 1.20 และ 1.60 วัตต์ต่อกรัม และระยะเวลาการให้ความร้อนที่ต่างกัน คือ 30, 40, 65 และ 135 วินาที พบว่า เวลาในการอบแห้งรวมจะลดลงตามระดับพลังงานไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้นแต่ผลิตภัณฑ์จะแตกปริและฉีกขาดเมื่อให้ระดับพลังงานไมโครเวฟสูงและเกิดจุดไหม้สีน้ำตาลถึงดำกระจายทั่วไปในระดับพลังงานไมโครเวฟต่ำ ผู้วิจัยได้นำหลักการกำหนดกำลังงานการให้ความร้อนวัตต์ต่อกรัมมาเป็นแนวทางในการศึกษา

กิตินันท์ และ คณะ (2550) รายงานว่า จากการทำวิจัย เรื่องผลของการใช้กระบวนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟก่อนการอบด้วยลมร้อนต่อคุณภาพและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของกล้วยอบแห้งโดยการใช้ไมโครเวฟที่กำลัง 1 วัตต์ต่อกรัม เป็นเวลา 5 นาที ก่อนการอบด้วยลมร้อนจะช่วยลดระยะเวลาของการอบด้วยลมร้อนลงได้ 14.28 เปอร์เซ็นต์ ผู้วิจัยเล็งเห็นประโยชน์ด้านการลดระยะเวลาการอบแห้งมาเป็นแนวทางในการศึกษาพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อหวังว่าจะช่วยประหยัดพลังงานได้

#### 2.7.2 การควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้า

การควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าปกติต้องอาศัยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาสร้างเป็นวงจรควบคุมจังหวะการจ่ายไฟฟ้าให้กับหลอดแมกนีตรอนโดยได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องประกอบดังนี้

ยุทธพงศ์ และ คณะ (2548) รายงานว่า จากการทำวิจัย เรื่องการพัฒนาระบบการให้ความร้อนเพื่อการอบแห้งเนื้อปลาด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่าได้ทำการพัฒนาในส่วนชุดวงจรความต่างศักย์แรงสูงเพื่อควบคุมหลอดแมกนีตรอนให้จ่ายกำลังคลื่นไมโครเวฟตามที่ต้องการรวมถึงการพัฒนาที่นำคลื่น ระบบแมชชีงเตาอบ และเครื่องต้นแบบซึ่งคาดว่าผลที่ได้จะนำไปประยุกต์ใช้ในการอบวัสดุที่มีมูลค่าสูงในแง่เศรษฐกิจ เช่น ยาสมุนไพรหรือยางพาราได้ต่อไปทั้งนี้ผู้วิจัยได้นำแนวทางการพัฒนาชุดควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้หลอดแมกนีตรอนมาพัฒนาร่วมกับเทคนิคการป้อนกลับค่าอุณหภูมิที่ตรวจจับได้