บทความวิจัย

# การพัฒนาชุดทดลองกระตุ้นผลผลิตก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าโดยใช้พัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

นิรุทธิ์ จันธิมา* สาลินี อาจารีย์ และ ดุสิต งามรุ่งโรจน์
ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และสังคม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 3154 4038 อีเมล: mangmao53@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2019.03.004
รับเมื่อ 12 ธันวาคม 2561 แก้ไขเมื่อ 21 มกราคม 2562 ตอบรับเมื่อ 25 มกราคม 2562 เผยแพร่ออนไลน์ 11 มีนาคม 2562
© 2019 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชุดทดลองกระตุ้นผลผลิตก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าโดยใช้พัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูง โดยใช้วงจรเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ที่มีตัวเก็บประจุขนาด 10 นาโนฟารัด ต่อตัวต้านทาน 500 กิโลโอห์ม ที่ระยะแกปเท่ากับ 3.56 มิลลิเมตร ได้แรงดันไฟฟ้าที่เกิดการสปาร์คที่ 11,800 โวลต์ จากการทดลองได้แรงดันไฟฟ้าความต่างศักย์สูงที่จำนวนชั้นของวงจรเท่ากับ 5, 10 และ 15 ได้แรงดันไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเท่ากับ 48,000, 93,000 และ 140,000 โวลต์ ตามลำดับ โดยรูปคลื่นที่ได้เป็นลักษณะของสวิตชิงอิมพัลส์มีรูปแบบความกว้างหน้าคลื่นและหลังคลื่น ($T_1/T_2$) เท่ากับ 0 และ 3,400 ไมโครวินาที ตามลำดับ เมื่อทดลองใช้พัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงดังกล่าวกระตุ้นก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าที่ทำมาจากก้อนขี้เลื้อยใส่ถุงจำนวน 24 ก้อน แบ่งเป็น 4 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มควบคุมที่ไม่ได้รับการกระตุ้น 2) กลุ่มที่กระตุ้นด้วยพัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงจำนวน 20 ครั้ง ที่ 50,000 โวลต์ 3) กลุ่มที่กระตุ้นด้วยพัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงจำนวน 20 ครั้ง ที่ 100,000 โวลต์ และ 4) กลุ่มที่กระตุ้นด้วยพัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงจำนวน 20 ครั้ง ที่ 150,000 โวลต์ ผลการทดลองพบว่า ผลผลิตของก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าที่ทำการทดลองในระยะเวลา 60 วัน 1) กลุ่มควบคุมให้ผลผลิตรวมน้อยที่สุด คือ 754 กรัม 2) กลุ่มที่กระตุ้นด้วยพัลส์ไฟฟ้า 50,000 โวลต์ ให้ผลผลิตรวมที่ 806 กรัม 3) กลุ่มที่กระตุ้นด้วยพัลส์ไฟฟ้า 100,000 กิโลโวลต์ ให้ผลผลิตรวมที่ 849 กรัม 4) กลุ่มที่กระตุ้นด้วยพัลส์ไฟฟ้า 150,000 โวลต์ ให้ผลผลิตรวมเยอะที่สุดที่ 853 กรัม โดยผลผลิตรวมของเห็ดนางฟ้าที่กระตุ้นด้วยพัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงด้วยพัลส์ไฟฟ้า 150,000 โวลต์ ให้ผลผลิตสูงสุด โดยให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 13 เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม

**คำสำคัญ**: พัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูง สวิตชิงอิมพัลส์ เห็ดนางฟ้า

การอ้างอิงบทความ: นิรุทธิ์ จันธิมา สาลินี อาจารีย์ และ ดุสิต งามรุ่งโรจน์, "การพัฒนาชุดทดลองกระตุ้นผลผลิตก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าโดยใช้พัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูง," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 29, ฉบับที่ 3, หน้า 495–506, ก.ค.–ก.ย. 2562.

วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 29 ฉบับที่ 3 ก.ค.–ก.ย. 2562
*The Journal of KMUTNB., Vol. 29, No. 3, Jul.–Sep. 2019*

Research Article

# The Deployment of Pulse High Voltage Generator for Stimulating Pleurotus Sajor-Caju Mushroom

Nirut Janthima*, Salinee Acharry and Dusit Ngamrungroj
Department of Social and Applied Science, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 3154 4038, E–mail: mangmao53@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2019.03.004
Received 12 December 2018; Revised 21 January 2019; Accepted 25 January 2019; Published online: 11 March 2019
© 2019 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

**Abstract**

This research aims to develop a pulse high voltage generator for stimulating Pleurotus Sajor-Caju mushroom by using impulse generator circuit. The circuit was developed with 10 nF of capacitor, 500 kOhm of resistor and 3.56 mm distance of spark gap, resulting in 11,800 V for sparking. The experiments consisted of the pulse high voltage generator with 5, 10 and 15 stages which would obtain 48,000, 93,000 and 140,000 V, respectively. Specifically, it is a switching impulse. The front time and tail time ($T_1/T_2$) of wave form are 0 and 3,400 ms. The stimulation was done on Pleurotus Sajur-Caju mushroom, made from a bag of sawdust-based for growing Pleurotus Sajur-Caju mushroom. From the total of 24 bags, they were divided into four groups during the stimulation: Group 1 for 50,000 V, Group 2 for 100,000 V, Group 3 for 150,000 V and Group 4 for the control group which was not at all stimulated by pulse high voltage. During the experiment, each mushroom was stimulated by pulse high voltage 20 times and allowed 60 days for growing. The total yield of mushroom revealed that the minimum productivity was found to be the control group which was only 754 grams. As for the experimental groups, they were 806 grams for the 50,000 V group, 849 grams for the 100,000 V group and the maximum was 853 grams for the 150,000 V group. It can be concluded that the maximum productivity of Pleurotus Sajor-Caj mushroom could be stimulated with 150,000 V pulse high voltage, which increased its productivity by 13% when comparing to the control group.

**Keywords**: Pulse High Voltage Generator, Switching Impulse, Pleurotus Sajor-Caju Mushroom

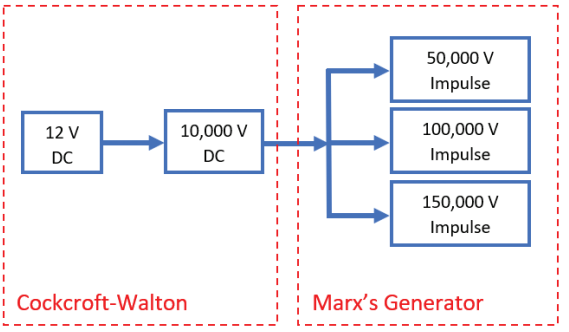
Please cite this article as: N. Janthima, S. Acharry, and D. Ngamrungroj, "The deployment of pulse high voltage generator for stimulating Pleurotus Sajor-Caju mushroom," *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 3, pp. 495–506, Jul.–Sep. 2019 (in Thai).

## 1. บทนำ

ในประเทศญี่ปุ่นนักเก็บเห็ดป่ามักจะสังเกตเห็นว่า ในบริเวณพื้นที่ที่มีการเกิดฟ้าผ่ามาก่อนนั้น เห็ดมักจะมีการเจริญเติบโตมากกว่าบริเวณทั่วไป ลักษณะดังกล่าวยังไม่ได้รับการยืนยันอย่างเป็นทางการ แต่นักวิจัยให้ประเด็นความเป็นไปได้ไว้ 2 ประการ ประการแรกคือผลจากฟ้าผ่านั้นทำให้รากเห็ด (Hyphae) เกิดรอยร้าว (Crack) และเกิดการเจริญเติบโตขึ้นมาใหม่จากรอยร้าวดังกล่าว [1] ความเป็นไปได้อีกอย่างหนึ่งคือเกิดจากกระบวนการทางเอนไซม์ เนื่องจากพลังงานจากฟ้าผ่านั้นก่อให้เกิดสารเอนไซม์บางอย่างที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อเห็ด [2] นักวิจัยบางกลุ่มรายงานว่าเป็นผลกระทบมาจากการเกิดไอออนในอากาศ (Air Ions) ที่อยู่ในดิน ในขณะที่เกิดฟ้าผ่า ทำให้เกิดสารอาหารที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของเห็ด [3], [4]

การสร้างพัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเพื่อจำลองคล้ายกับฟ้าผ่า (Pulse High Voltage) ชั่วขณะหนึ่งหรืออิมพัลส์ (Impulse) เพื่อนำมาทดลองกระตุ้นเชื้อเห็ด [5], [6] นั้นได้รับรายงานจากนักวิจัยหลายคนมาตั้งแต่ปี 1950 [7] โดย Mibuchi รายงานว่าผลผลิตของเห็ดหอม (Lentinula Edodes) เพิ่มขึ้นหลังจากได้รับการกระตุ้นโดยไฟฟ้าแรงสูงจากเครื่องกระตุ้นพัลส์ไฟฟ้าแรงสูง (Impulse Generator) ด้วยขนาดความกว้างของคลื่น 40 ไมโครวินาที โดยปริมาณผลิตของเห็ดหอมเพิ่มขึ้นถึง 2 เท่า เมื่อเทียบกับเห็ดหอมที่ไม่ได้รับการกระตุ้น [8], [9] อีกทั้งยังทดลองเพิ่มผลผลิตด้วยวิธีดังกล่าวกับเห็ด Matsutake [10] และเห็ด Nameko [11] โดยการใช้ไฟฟ้าแรงสูงในการกระตุ้นเพื่อให้เกิดผลบางอย่างนั้นได้รับการแพร่หลายในปัจจุบัน ทั้งในด้านทางการแพทย์และทางการเกษตร ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้พัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเพื่อกระตุ้นผลผลิตก้อนเชื้องานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและพัฒนาชุดทดลองกระตุ้นผลผลิตก้อนเชื้อเห็ดโดยใช้พัลส์ความต่างศักย์สูง โดยเลือกใช้เห็ดนางฟ้าเป็นกลุ่มทดลอง เนื่องจากเป็นเห็ดที่นิยมและมีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย ซึ่งการทำให้ผลผลิตเห็ดนางฟ้าเพิ่มขึ้นได้จะมีประโยชน์ในทางพาณิชย์เป็นอย่างมาก

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 2 ประการ คือ เพื่อพัฒนาชุดทดลองกระตุ้นผลผลิตก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าแบบขนาดเล็กโดยใช้พัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูง และเพื่อทดลองหาผลผลิตที่เพิ่มของก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าที่ได้หลังจากการกระตุ้นด้วยพัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูง




**รูปที่ 1** แผนผังการสร้างเครื่องกำเนิดพัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

## 2.วิธีการวิจัย

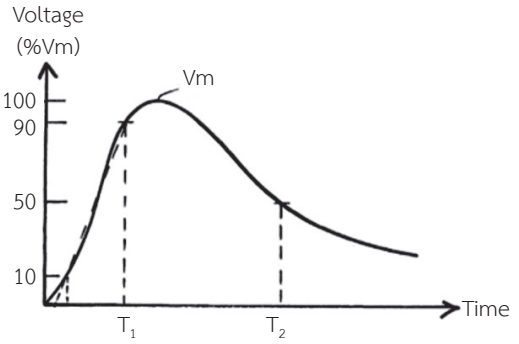
### 2.1 เครื่องกำเนิดพัลส์ความต่างศักย์สูง (Pulse High Voltage Generator)

2.1.1 เงื่อนไขและข้อกำหนด

พัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ต้องการแรงดันไฟฟ้าที่ใช้สำหรับกระตุ้นก้อนเชื้อเห็ดอยู่ 3 ระดับ คือ 50,000, 100,000 และ 150,000 โวลต์ ตามลำดับ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวเป็นช่วงต่ำสุด และสูงสุดโดยประมาณที่มีผลต่อผลผลิตของเห็ด [8] เครื่องกำเนิดพัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงของงานวิจัยนี้ใช้แหล่งจ่ายจากแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 7.2 แอมแปร์-ชั่วโมง ซึ่งมีขนาดเล็กน้ำหนักไม่มาก

การสร้างเครื่องกำเนิดพัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเริ่มจากการเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ ไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 10,000 โวลต์ เพื่อที่จะใช้ป้อนเป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรกำเนิดอิมพัลส์ซึ่งจะให้แรงดันออกมาเป็นพัลส์ความต่างศักย์สูงที่ 50,000, 100,000 และ 150,000 โวลต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 1

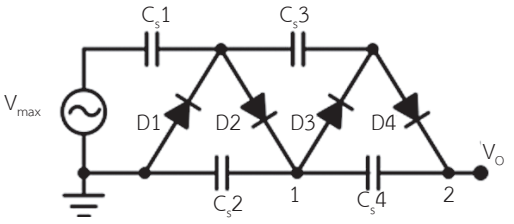
การสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 10,000 โวลต์ ใช้



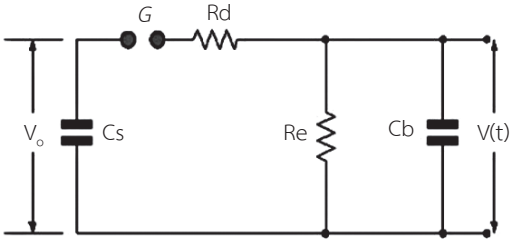

**รูปที่ 2** รูปแบบของคลื่นอิมพัลส์ โดย $T_1$ คือระยะเวลาของหน้าคลื่นชัน และ $T_2$ คือระยะเวลาหลังคลื่นที่มีค่าครึ่งหนึ่งของจุดสูงสุด ($V_m$) [14]

วงจรทวีคูณแรงดันของ Cockcroft-Walton [12] ดังรูปที่ 2 เป็นตัวกำเนิด ส่วนเครื่องกำเนิดพัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงนั้นใช้วงจร Marx's Generator [13] แบบตัวเก็บประจุเก็บพลังงาน (Capacitor Energy Storage) ดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้บางอย่างต้องทนไฟฟ้าแรงสูงได้ในระดับ 150,000 โวลต์ขึ้นไป ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาสูง ดังนั้นอุปกรณ์บางอย่างที่ใช้ในวงจรจึงต้องดัดแปลงบางส่วนเพื่อให้เกิดความเหมาะสม เช่น ตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับเก็บพลังงาน ($C_s$) ดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ในแรงดันไฟฟ้าที่ 10,000 โวลต์ มีค่าความจุที่ต่ำคืออยู่ที่ 10 นาโนฟารัด ต่อตัวแต่ทนไฟฟ้าระดับสูงได้ และตัวเก็บประจุโหลด ($C_b$) ที่ต้องทนแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 150,000 โวลต์ จึงต้องตัดออกไปด้วยข้อจำกัดดังที่กล่าวมา ซึ่งตามทฤษฎีแล้วจะมีผลทำให้รูปคลื่นที่ได้มีช่วงหน้าคลื่น ($T_1$) ที่ชันขึ้นจากปกติ [13]

รูปแบบคลื่น (Wave Form) มาตรฐานของคลื่นอิมพัลส์มีอยู่ 2 แบบ คือ รูปคลื่นฟ้าผ่า (Lightning Impulse) และรูปคลื่นสวิตชิงอิมพัลส์ (Switching Impulse) [8] จากเงื่อนไขที่กล่าวมาเบื้องต้นจึงทำให้งานวิจัยนี้เลือกรูปคลื่นสวิตชิงอิมพัลส์ เพราะมีความเหมาะสมสอดคล้องกับอุปกรณ์ที่มีและสามารถที่จะสร้างได้จริง โดยตามรูปแบบมาตรฐานของรูปคลื่น สวิตชิงอิมพัลส์ต้องมีความกว้างของหน้าคลื่นและหลังคลื่น ($T_1/T_2$) เท่ากับ 250/2500 ไมโครวินาที โดยค่า $T_1$ ± ร้อยละ 20 และ $T_2$ ± ร้อยละ 60 [13] ตามรูปที่ 2




**รูปที่ 3** วงจรทวีคูณแรงดัน (Voltage Multipliers Circuit) ขนาด 2 ขั้นบันได [12]




**รูปที่ 4** วงจรเครื่องกำเนิดอิมพัลส์พื้นฐาน

2.1.2 วงจรทวีคูณแรงดัน (Voltage Multiplier)

การสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 10,000 โวลต์ นั้นในงานวิจัยนี้เลือกใช้วงจรทวีคูณแรงดันของ Cockcroft-Walton ซึ่งวงจรจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักๆ คือ ไดโอด (Diode) และตัวเก็บประจุ (Capacitor) ดังรูปที่ 3 จึงเป็นวงจรที่สร้างได้ง่ายให้แรงดันที่สูง สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายประเภท และมีค่าใช้จ่ายไม่สูง [15] อีกทั้งใช้กระแสน้อยเหมาะสมสำหรับแบตเตอรี่ 12 โวลต์ แบบพกพาได้

การสร้างวงจรทวีคูณแรงดันนั้นอันดับแรก ต้องแปลงแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ ให้เป็นกระแสสลับก่อนโดยผ่านวงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator) และผ่านหม้อแปลง (Transformer) เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นให้มีแรงดันสูงสุด ($V_{max}$) อยู่ที่ประมาณ 1,000 โวลต์ ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแล้วจึงจ่ายให้กับวงจรทวีคูณแรงดัน โดยแรงดันที่จ่ายออกมาของวงจรทวีคูณแรงดันนั้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนขั้น (Stage) ของวงจร ดังสมการที่ (1)

$$V_o = 2nV_{max} \quad (1)$$

โดยที่ $V_o$ คือ ขนาดของแรงดันจ่ายออก (โวลต์)

$n$ คือ เป็นจำนวนขั้นบันได

$V_{max}$ คือ แรงดันค่าสูงสุดที่จ่ายเข้าวงจร (โวลต์)

แต่ทั้งนี้การสร้างวงจรทวีคูณแรงดันนั้นในทางปฏิบัติจะให้แรงดันจ่ายออกมานั้นต่ำกว่าในทางทฤษฎี โดยมีค่าที่วัดได้เพียงร้อยละ 67 จากทฤษฎีเท่านั้นอธิบายได้ดังสมการที่ (2) [12]

$$V_d = \frac{2}{3}(2 n_p V_{max}) \quad (2)$$

โดยที่ $V_d$ คือ ขนาดของแรงดันจ่ายออก (โวลต์) ที่จำนวนขั้นบันได $n_p$

$n_p$ คือ เป็นจำนวนขั้นบันไดที่เหมาะสม

$V_{max}$ คือ แรงดันค่าสูงสุดที่จ่ายเข้าวงจร

จากการคำนวณพบว่าที่จำนวนขั้นบันได ($n_p$) ที่จะทำให้แรงดันที่จ่ายออกเหมาะสมในงานวิจัยนี้คือ 8 ขั้นบันได สำหรับแรงดันค่าสูงสุดที่จ่ายเข้า ($V_{max}$) คือเท่ากับ 1,042 โวลต์

2.1.3 วงจรกำเนิดอิมพัลส์

การสร้างเครื่องกำเนิดพัลส์ความต่างศักย์สูงในงานวิจัยนี้ต้องการพัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงที่เป็นลักษณะของการจำลองฟ้าผ่าซึ่งมีลักษณะรูปคลื่นที่เรียกว่าอิมพัลส์ ลักษณะของคลื่นอิมพัลส์นั้นมีรูปแบบมาตรฐานที่ช่วงความกว้างของหน้าคลื่นและหลังคลื่น ($T_1/T_2$) เท่ากับ 250/2,500 ไมโครวินาที ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยวงจรเครื่องกำเนิดอิมพัลส์แบบพื้นฐานนั้นแสดงดังรูปที่ 4

วงจรเรื่องกำเนิดอิมพัลส์นั้นจะประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุ ตัวต้านทานและช่องสปาร์คแกปจากรูปที่ 3 โดย $V$ จะเป็นตัวอัดแรงดันให้กับตัวเก็บประจุ $C_s$ ซึ่งจะทำหน้าที่เก็บพลังงานเอาไว้ เมื่อถึงเวลาที่ $t$ หนึ่งๆ $C_s$ ก็จะเกิดการคายประจุออกมา ผ่านช่องว่างแกป $G$ เกิดเป็นแรงดันอิมพัลส์ โดยตัวต้านทาน $R_d$ และ $R_e$ จะทำหน้าที่ปรับรูปร่างหน้าคลื่นและหลังคลื่นตามลำดับ รวมถึงตัวเก็บประจุ $C_b$ ที่เป็นตัวเก็บประจุโหลดด้วย อธิบายได้ดังสมการที่ (3) [16]

$$V(t) = V_o\left[e^{\frac{-t}{R_e C_s}} - e^{\frac{-t}{R_d C_b}}\right] \quad (3)$$

โดยที่ $V_o$ คือ แรงดันของแหล่งจ่าย (โวลต์)

$V(t)$ คือ แรงดันอิมพัลส์ที่เวลาใดๆ (วินาที)

$G$ คือ ช่องว่างสปาร์คแกป

$C_s$ คือ ตัวเก็บประจุเก็บพลังงาน

$C_b$ คือ ตัวเก็บประจุโหลด

$R_d$ คือ ความต้านทานหน่วง

$R_e$ คือ ความต้านทานปล่อยประจุ

ระยะของช่องว่างแกป นั้นทำหน้าที่เป็นเหมือนสวิตช์ในการปลดพลังงานที่เก็บไว้ในตัวประจุ $C_s$ ให้คายออกมา อธิบายได้ดังสมการที่ (4) [17]

$$V_{min} = E\, d \quad (4)$$

โดยที่ $V_{min}$ คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการเบรคดาวน์ (โวลต์)

$E$ คือ ค่า Dielectric Strength ของวัสดุตัวฉนวน (โวลต์/เมตร)

$d$ คือ ระยะห่างของแกป (เมตร)

ในงานวิจัยนี้ต้องการแรงดันความต่างศักย์ไฟฟ้า ($V_o$) ที่ทำให้เกิดการสปาร์คผ่านตัวนำอากาศในวงจรอยู่ที่ 10,000 โวลต์ ดังนั้นจากการคำนวณจะได้ระยะแกป ($d$) เท่ากับ 3.33 มิลลิเมตร

ในการออกแบบเครื่องกำเนิดพัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงในงานวิจัยนี้ จะใช้วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น (Multi Stage Impulse) ดังรูปที่ 5 เพื่อให้เกิดการเพิ่มแรงดันที่สูงขึ้นตามจำนวนชั้น อธิบายได้ดังสมการที่ (5) [18]

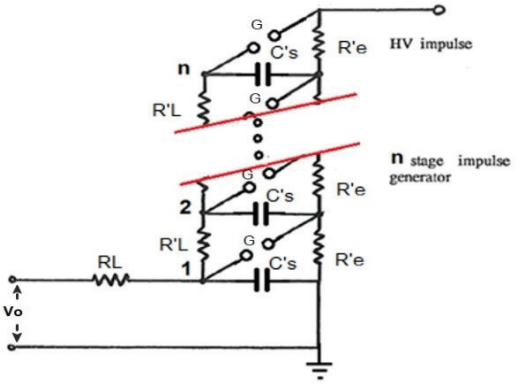
$$V_{impulse} = nV'_0 \quad (5)$$

โดยที่ $V_{impulse}$ คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าอิมพัลส์ (โวลต์)

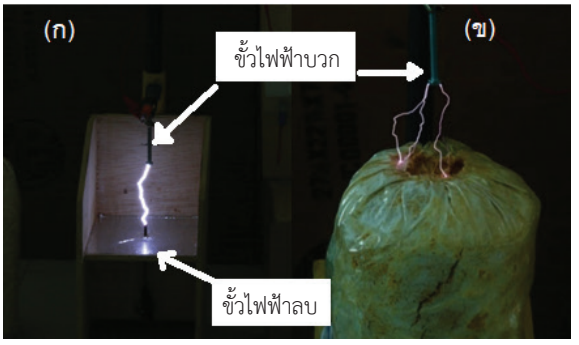
$n$ คือ จำนวนชั้น

$V'_0$ คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าแต่ละชั้น (โวลต์)

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้จำนวนชั้นในการสร้างพัลส์ความต่างศักย์สูงอยู่ที่ 5, 10 และ15 ดังนั้นจึงจะได้พัลส์ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีขนาดแรงดันสูงสุดเท่ากับ 50,000,




**รูปที่ 5** วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น โดยมีจำนวนชั้นเท่ากับ $n$ ชั้น




**รูปที่ 6** (ก) การใช้พัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงอาร์ค (Arc) ผ่านอากาศ (ข) การใช้พัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงกระตุ้นก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้า โดยการสปาร์คผ่านก้อนเชื้อเห็ด

**รูปที่ 7** (ก) โรงเรือนขนาดเล็กคลุมด้วยแผ่นพลาสติก (ข) การวางก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าในโรงเรือน

100,000 และ 150,000 โวลต์ ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม พลังงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่จำนวนชั้นนั้นๆจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความจุไฟฟ้า ($C_s$) โดยรวมและความต่างศักย์ไฟฟ้าอิมพัลส์ ($V_{impusle}$) ที่ออกมาของวงจรที่จำนวนชั้น $n$ ใดๆ ดังสมการที่ (6) [13]

$$W_e = \frac{1}{2} C_T V_{impulse}^{\ 2} \qquad (6)$$

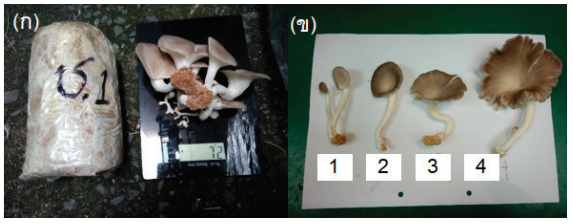
โดยที่ $W_e$ คือ พลังงานของวงจรเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ (จูล)
$C_T$ คือ ความจุไฟฟ้า $C_s$ โดยรวมของวงจร (ฟารัด)

### 2.2 การกระตุ้นผลผลิตของเห็ดนางฟ้า โดยใช้พัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

การกระตุ้นก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าโดยใช้พัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูง เริ่มจากการนำก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าแบบถุงพลาสติกที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อและหยอดหัวเชื้อแล้วประมาณ 1–2 สัปดาห์ เส้นใยของเชื้อเห็ดเจริญเติบโตได้เต็มที่ได้ทั่วถุงแล้วพร้อมสำหรับการเปิดดอก โดยเตรียมทั้งหมด 24 ก้อน นำก้อนเชื้อทั้งหมดไปกระตุ้นด้วยพัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูง โดยแบ่งเป็น 4 กลุ่มทดลอง กลุ่มละ 6 ก้อน แต่ละกลุ่มให้กระตุ้นพัลส์ไฟฟ้าที่ 50,000, 100,000 และ 150,000 โวลต์ จำนวน 20 ครั้ง ติดต่อกันโดยแต่ละครั้งห่างกันประมาณ 10 วินาที และกลุ่มควบคุมตามลำดับ ดังรูปที่ 6 (ข)

การกระตุ้นก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าโดยการสปาร์คพัลส์ไฟฟ้าผ่านก้อนเชื้อเห็ดโดยตรง ขั้วไฟฟ้าบวกและลบของแท่นกระตุ้นก้อนเชื้อเห็ดที่ทำการสปาร์คนั้นเป็นโลหะตัวนำไฟฟ้าที่ทำจากเหล็กโดยระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและก้อนเชื้อเห็ดจะอยู่ที่ประมาณ 2–3 เซนติเมตร ดังรูปที่ 6 (ก) และ (ข) ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการสปาร์คอย่างเหมาะสม กล่าวคือ หากระยะน้อยไปหรือมากไปนั้นจะไม่เกิดการสปาร์คขึ้น

ก้อนเชื้อเห็ดที่ได้รับการกระตุ้นแล้วจะนำไปเก็บไว้ในโรงเรือนพลาสติกขนาด กว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ 1.5 × 0.7 × 1.0 เมตร ดังรูปที่ 7 (ก) โดยวางตัวอย่างก้อนเชื้อเห็ดสลับคละกันไปมาไว้ข้างในโรงเรือน ดังรูปที่ 7 (ข) อุณหภูมิโรงเรือนจะอยู่ระหว่าง 28–33 องศาเซลเซียส มีการรักษาความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ระหว่างร้อยละ 70–85 โดยการรดน้ำและพื้นที่ตั้งโรงเรือนจะมีแสงแดดส่องเล็กน้อย ทั้งนี้เพื่อ




**รูปที่ 8** (ก) เห็ดนางฟ้าที่เก็บผลผลิตได้แล้วนำมาชั่งเพื่อบันทึกค่าน้ำหนัก (ข) ระยะการเจริญการเติบโตของเห็ดนางฟ้าที่ระยะต่างๆ

เป็นการสร้างสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการออกดอกของเห็ดนางฟ้า

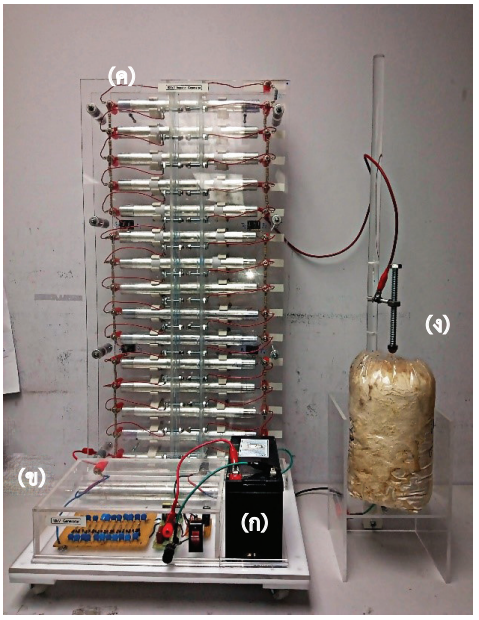
การทดลองหาผลผลิตของก้อนเชื้อเห็ดที่ได้กระตุ้นไฟฟ้าแล้วทั้ง 4 กลุ่มตัวอย่าง โดยทำการบันทึกผลการทดลองวัดค่าผลผลิตเป็นหน่วยกรัมต่อหนึ่งก้อนเชื้อเห็ดดังรูปที่ 8 (ก) ผลผลิตที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างนำมาเปรียบเทียบผลผลิตที่ได้กับกลุ่มควบคุม โดยจะทำการเก็บผลผลิตของก้อนเชื้อเห็ดทั้ง 4 กลุ่มตัวอย่าง เป็นเวลาทั้งหมด 60 วัน

อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติจริงนั้นงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวอย่างก้อนเชื้อเห็ดทั้งหมดกลุ่มละ 8 ก้อน มาทดลองกระตุ้นโดยคัดเลือกก้อนที่สมบูรณ์ที่สุดจำนวน 6 ก้อน มาทำการวัดค่าผลผลิตและวิเคราะห์ต่อไป

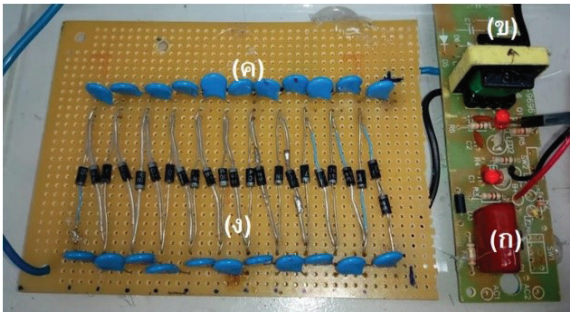
การเก็บผลผลิตของก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้านั้นจะเก็บเมื่อเห็ดนางฟ้าเจริญเติบโตได้เต็มที่อยู่ในระยะที่เหมาะสม ดังรูปที่ 8 (ข) ระยะที่เหมาะสมต่อการเก็บผลผลิตคือระยะการเจริญเติบโตที่ 3–4 โดยเครื่องชั่งดิจิทัลที่ใช้วัดคือยี่ห้อ Electronic Kitchen Scale รุ่นขนาด 5,000 กรัม ค่าความละเอียด 1 กรัม

### 3. ผลการวิจัย

เครื่องกำเนิดพัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงที่สร้างออกมานั้นมีขนาดความกว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ 30 × 33 × 66 เซนติเมตร น้ำหนักรวม 9 กิโลกรัม ดังรูปที่ 9 ซึ่งประกอบไปด้วย แบตเตอรี่ 12 โวลต์ 7.2 แอมแปร์-ชั่วโมง ดังรูปที่ 9 (ก) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 10,000 โวลต์ ดังรูปที่ 9 (ข) เครื่องกำเนิดพัลส์ไฟฟ้าขนาด 100,000 โวลต์ ดังรูปที่ 9 (ค) และแท่นกระตุ้นก้อนเชื้อเห็ด ดังรูปที่ 9 (ง)




**รูปที่ 9** (ก) แบตเตอรี่ 12 โวลต์ (ข) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 10,000 โวลต์ (ค) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูงขนาด 100,000 โวลต์ (ง) แท่นกระตุ้นก้อนเชื้อเห็ด




**รูปที่ 10** (ก) วงจรออสซิลเลเตอร์ (ข) หม้อแปลง (ค) ตัวเก็บประจุ 10 นาโนฟารัด (ง) ไดโอด 1N4007

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 10,000 โวลต์ ประกอบไปด้วย วงจรออสซิลเลเตอร์ หม้อแปลงอัตราขยาย 1 : 100 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก 10 นาโนฟารัด 1,000 โวลต์ และไดโอดเบอร์ 1N4007 1,000 โวลต์ ดังรูปที่ 10 เมื่อทดลองวัดแรงดันไฟฟ้าที่ออกมานั้นได้ค่าตามตารางที่ 1

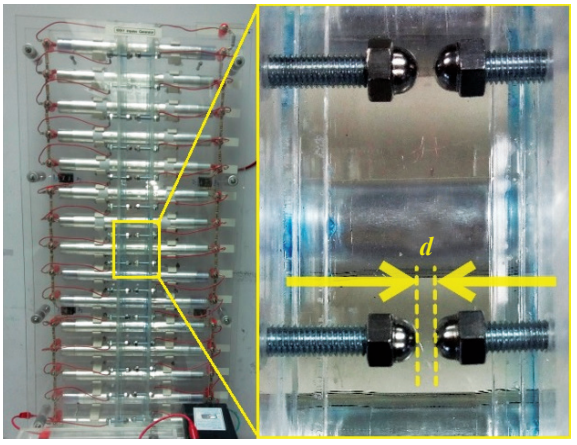
**ตารางที่ 1** แรงดันไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 10,000 โวลต์ ที่ขั้นบันไดที่ 1 ถึง 11

| จำนวนขั้นบันได | แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (โวลต์) | แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (โวลต์) |
|---|---|---|
| 1 | 1,838 | 1,348 |
| 2 | 3,484 | 1,338 |
| 3 | 4,994 | 1,342 |
| 4 | 6,388 | 1,345 |
| 5 | 7,650 | 1,348 |
| 6 | 8,920 | 1,356 |
| 7 | 10,170 | 1,360 |
| 8 | 11,410 | 1,358 |
| 9 | 12,640 | 1,361 |
| 10 | 13,840 | 1,364 |
| 11 | 14,970 | 1,347 |

เครื่องกำเนิดพัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงขนาดแรงดัน 100,000 โวลต์ ที่สร้างออกมานั้นประกอบไปด้วยตัวต้านทาน 0.5 เมกกะโอห์ม ขนาด 3 วัตต์ ซึ่งใช้เป็นตัวต้านทานปล่อยประจุ ($R_e$) ส่วนตัวเก็บประจุเก็บพลังงานมีค่าเท่ากับ 10 นาโนฟารัด 12,000 โวลต์ ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุชนิดแผ่นเพลท (Plate Capacitor) ที่ผู้วิจัยทำขึ้นมาเองโดยเฉพาะ และแกปที่ใช้ในวงจรทำมาจากเหล็กสกรูโดยขั้วสปาร์คเป็นแหวนหุ้มลักษณะครึ่งทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 11 เมื่อทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างระยะแกปของวงจรขณะใช้งานและคำนวณค่าแรงดันที่ออกมาโดยใช้สมการที่ (5) ค่าที่ได้ดังตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** ระยะห่างของสปาร์คแกป ที่เกิดการสปาร์คที่แรงดันต่างๆ

| ระยะแกป $d$ (มิลลิเมตร) | แรงดันระหว่างแกป (โวลต์) | แรงดันที่ $n$ = 5 (โวลต์) | แรงดันที่ $n$ = 10 (โวลต์) | แรงดันที่ $n$ = 15 (โวลต์) |
|---|---|---|---|---|
| 4.60 ± 0.10 | 14,500 | 72,500 | 145,000 | 217,500 |
| 3.56 ± 0.10 | 11,800 | 59,000 | 118,000 | 177,000 |
| 3.26 ± 0.10 | 8,100 | 40,500 | 81,000 | 121,500 |
| 2.48 ± 0.10 | 7,700 | 38,500 | 77,000 | 115,500 |



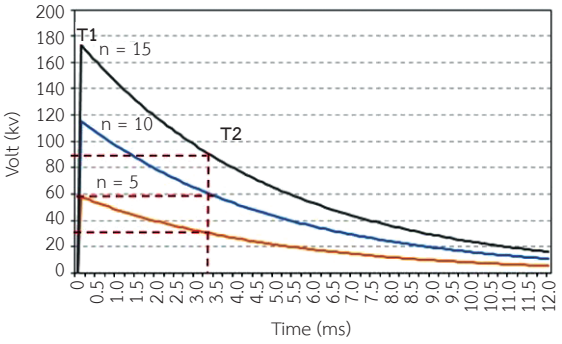

**รูปที่ 11** ระยะห่างแกปซึ่งมีระยะเท่ากับ $d$ เท่ากันหมด

เครื่องกำเนิดพัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเมื่อทำการกระตุ้นเห็ดนั้นใช้กระแสเพียง 410 มิลลิแอมป์ ซึ่งแบตเตอรี่ที่ใช้สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 7.2 แอมแปร์-ชั่วโมง ได้ ดังนั้นจึงเพียงพอตลอดการใช้งานในระยะเวลาสูงสุดประมาณ 15 ชั่วโมง สายไฟที่ใช้ในวงจรเพื่อเป็นสื่อนำไฟฟ้าในวงจรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร 300 โวลต์ ทนความร้อน 80 องศาเซลเซียล ประกอบกับใช้แผ่นอะคริลิคขนาดความหนา 4 มิลลิเมตร ขึ้นไปเป็นฉนวนไฟฟ้ากั้นและกระแสไฟฟ้าในวงจรที่ใช้ไม่สูงมากนั้นจึงเลือกใช้ขนาดดังกล่าว โดยบางจุดต้องใช้แผ่นอะคริลิคที่มีความหนาถึง 12 มิลลิเมตร

### 3.1 จำลองและวัดรูปคลื่นอิมพัลส์

เครื่องกำเนิดพัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงที่สร้างออกมานั้นให้สัญญาณออกมาเป็นลักษณะของรูปคลื่นสวิตชิงอิมพัลส์ที่คำนวณแล้วอาจมีขนาดที่สูงถึง 200,000 โวลต์ ดังตารางที่ 2

โดยคลื่นสวิตชิงอิมพัลส์นั้นเมื่อทำการจำลองรูปแบบของคลื่นโดยใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดการสปาร์คของระหว่างแกปตามสมการที่ (5) และสมการที่ (3) ซึ่งเป็นสมการเอกซ์โพเนนเชียลที่อธิบายถึงความค่าของแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์ที่เวลาใดๆ ซึ่งมีตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในวงจร ได้แก่ ค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์เก็บพลังงาน ($C_s$) ความต้านทานปล่อยประจุ ($R_e$) ตัวเก็บประจุโหลด ($C_b$) และความต้านทานหน่วง ($R_d$) ซึ่ง




**รูปที่ 12** รูปคลื่นอิมพัลส์ของเครื่องกำเนิดพัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงที่จำนวนชั้นเท่ากับ 5, 10 และ 15

จากเขื่อนไขที่กำหนดมานั้นตัวเก็บประจุโหลดไม่มีในวงจรและความต้านทานหน่วงเท่ากับศูนย์ โดยระยะช่องว่างแกปที่ใช้ตามตารางที่ 2 คือ 3.56 ± 0.10 มิลลิเมตร

เมื่อทำการจำลองจะได้กราฟดังรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าคลื่นอิมพัลส์จากการคำนวณของวงจรที่จำนวนชั้นเท่ากับ 5, 10 และ 15 มีช่วงหน้าคลื่น $T_1$ ที่ชันมากและช่วงหลังคลื่นค่า $T_2$ จะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 3.4 มิลลิวินาที เท่ากันทั้งสามรูปคลื่น อย่างไรก็ตาม ค่าดังกล่าวซึ่งเป็นค่าในทางทฤษฎีซึ่งสาเหตุที่ $T_1$ ชันมากจนเป็นศูนย์เนื่องจากตัวแปร $C_b$ ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุปรับหน้าคลื่นไม่มีในวงจร และสาเหตุที่หางคลื่น $T_2$ ยาวกว่าที่กำหนดเนื่องจากทางผู้วิจัยเลือก $R_e$ ให้สูงขึ้นจากปกติ ทั้งนี้สามารถวิเคราะห์ตามสมการที่ (3) ได้ว่าตัวแปร $R_e$ นั้นแปรผันตาม $T_2$ ซึ่งที่ $T_2$ เท่ากับ 2.4 มิลลิวินาที $R_e$ จะน้อยมาก ส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่าน $R_e$ จะมากขึ้นและ $R_e$ ที่ใช้ต้องทนกำลังวัตต์มากขึ้น ซึ่งมีราคาแพงและเป็นข้อจำกัดทางผู้วิจัยเองที่ได้กำหนดไว้

เมื่อทดลองวัดหาสัญญาณรูปคลื่นโดยใช้ High Voltage Probe ของยี่ห้อ Fluke รุ่น 80K-40 ประกอบกับวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) ต่อเข้ากับออสซิลโลสโคปจะได้รูปร่างสัญญาณที่ออกมาดังรูปที่ 13 และตารางที่ 3

**รูปที่ 13** ตัวอย่างสัญญาณของรูปคลื่นอิมพัลส์ที่จำนวนชั้นเท่ากับ 5 มีแรงดันสูงสุดเท่ากับ 48,000 โวลต์ $T_1$ เท่ากับ 200 ไมโครวินาที และ $T_2$ เท่ากับ 1,000 ไมโครวินาที

**ตารางที่ 3** แรงดันไฟฟ้าสูงสุดของคลื่นอิมพัลส์ที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป

| ระยะแกป $d$ (มิลลิเมตร) | แรงดันระหว่างแกป (โวลต์) | แรงดันที่ $n$ = 5 (โวลต์) | แรงดันที่ $n$ = 10 (โวลต์) | แรงดันที่ $n$ = 15 (โวลต์) |
|---|---|---|---|---|
| ± 0.10 | 11,800 | 48,000 ± 10,000 | 93,000 ± 16,000 | 140,000 ± 24,000 |

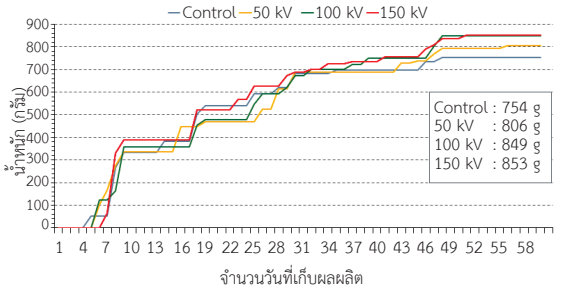
**ตารางที่ 4** ปริมาณผลผลิตก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าทั้ง 4 กลุ่ม กลุ่มละ 6 ก้อน ที่เก็บผลผลิตได้

| กลุ่มตัวอย่าง | ผลผลิตก้อนเชื้อเห็ด (กรัม) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | No.1 | No.2 | No.3 | No.4 | No.5 | No.6 |
| Control | 138 | 137 | 142 | 112 | 137 | 88 |
| 50kV | 122 | 115 | 148 | 151 | 139 | 131 |
| 100kV | 184 | 122 | 143 | 139 | 128 | 133 |
| 150kV | 169 | 146 | 130 | 131 | 125 | 152 |

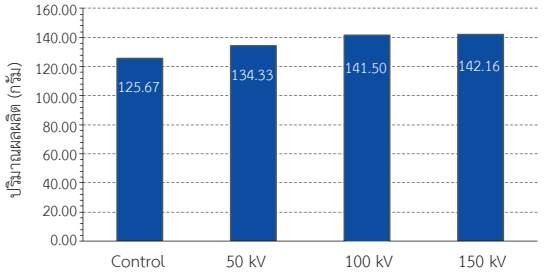
### 3.2 ผลผลิตของก้อนเชื้อเห็ด

ผลผลิตของก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าทั้ง 4 กลุ่มตัวอย่างที่เก็บได้ทั้งหมดในระยะเวลา 60 วัน ดังตารางที่ 4

พบว่าในการเก็บผลผลิตกลุ่มตัวอย่างที่กระตุ้นด้วยพัลส์ไฟฟ้า 150 กิโลโวลต์ให้ผลผลิตเฉลี่ยมากที่สุดคือ 142.16 กรัมต่อก้อน กลุ่มตัวอย่างที่กระตุ้นด้วยพัลส์ไฟฟ้า 100 กิโลโวลต์




**รูปที่ 14** ปริมาณผลผลิตรวมทั้งหมดของกลุ่มตัวอย่างก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าระยะเวลา 60 วัน




**รูปที่ 15** ผลผลิตรวมเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้า

ให้ผลิตเฉลี่ยรองลงมาคือ 141.50 กรัมต่อก้อน กลุ่มตัวอย่างที่กระตุ้นด้วยพัลส์ไฟฟ้า 50 กิโลโวลต์ ให้ผลผลิตเฉลี่ยที่ 134.33 กรัมต่อก้อน และกลุ่มตัวอย่างที่ให้ผลผลิตเฉลี่ยน้อยที่สุด คือกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้รับการกระตุ้น มีผลผลิตเฉลี่ย 125.67 กรัมต่อก้อน ดังแสดงในแผนภูมิรูปที่ 15 ผลผลิตของกลุ่มตัวอย่างก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าที่เก็บทั้งหมด 3–4 รอบในระยะเวลาทั้งหมด 60 วัน นับจากวันที่เปิดดอกและกระตุ้นด้วยพัลส์ไฟฟ้า มีผลผลิตรวมทั้งหมดเป็นดังรูปที่ 14 จะเห็นว่ากลุ่มควบคุมที่ไม่ได้รับการกระตุ้นให้ผลผลิตที่น้อยที่สุดคือ 754 กรัม กลุ่มที่กระตุ้นด้วยพัลส์ไฟฟ้า 50 กิโลโวลต์ ให้ผลผลิต 806 กรัม กลุ่มที่กระตุ้นด้วยพัลส์ไฟฟ้า 100 กิโลโวลต์ ให้ผลผลิต 849 กรัม และกลุ่มที่กระตุ้นด้วยพัลส์ไฟฟ้า 150 กิโลโวลต์ ให้ผลผลิตมากที่สุดคือ 853 กรัม

ทั้งนี้ตามธรรมชาติการออกดอกผลผลิตของก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้านั้นแต่ละก้อนจะมีระยะช่วงพักก้อนและวันที่ออกผลผลิตที่แตกต่างกันออกไป ยิ่งในรอบผลผลิตที่ 2–4 ก็จะแตกต่างกันมากขึ้น ดังนั้นจึงไม่สามารถเลือกวันเก็บผลผลิตได้ จึงใช้วิธีเก็บผลผลิตทุกวันใดก็ตามเมื่อมีดอกเห็ดเจริญเติบโตจนถึงระยะที่ 3–4 เท่านั้นตามที่ได้กล่าวมา

## 4. อภิปรายผลและสรุป

จากการทดลองสร้างเครื่องกำเนิดพัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงและการกระตุ้นผลผลิตก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้า สามารถสรุปได้ 2 ประเด็น คือ

1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอิมพัลส์ขนาด 100,000 โวลต์ นั้น สามารถสร้างคลื่นอิมพัลส์แบบสวิตชิงที่มีความกว้างของหน้าคลื่นและหลังคลื่น ($T_1/T_2$) เท่ากับ 0/3,400 ไมโครวินาที ในทางทฤษฎี แต่สามารถวัดค่าจริงออกมาได้ 200/1,000 ไมโครวินาที ซึ่งเทียบกับมาตรฐานรูปคลื่นอิมพัลส์สวิตชิงอยู่ที่ 250/2,500 ไมโครวินาที จะได้ว่าค่า $T_1$ มีค่าผิดพลาดร้อยละ 20 และ $T_2$ มีค่าผิดพลาดร้อยละ 60 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของรูปคลื่นอิมพัลส์สวิตชิง โดยค่าแรงดันไฟฟ้าความต่างศักย์สูงที่ใช้จริงในการทดลองนี้คือ 48,000, 93,000 และ 140,000 โวลต์ มีค่าผิดพลาดได้ถึงประมาณ ± ร้อยละ 20

พลังงานของเครื่องพัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงของเครื่องนี้จากสมการที่ (6) ที่จำนวนชั้น $n$ = 5, 10 และ 15 มีพลังงานเท่ากับ 2.5 จูล 4.3 จูล และ 6.5 จูล ตามลำดับ

2) ผลผลิตของก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าที่ได้จากการกระตุ้นด้วยพัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงนั้น พบว่ากลุ่มตัวอย่างที่กระตุ้นด้วยพัลส์ไฟฟ้า 150 กิโลโวลต์ นั้น ให้ผลผลิตมากที่สุด คือ 142.16 กรัมต่อก้อน โดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 13 เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้รับการกระตุ้น ทั้งนี้อาจสรุปได้ว่าผลผลิตที่ได้เพิ่มขึ้นนั้นไม่มีความชัดเจนมากจนเป็นนัยสำคัญเท่าที่ควร เป็นไปได้ว่าการกระตุ้นด้วยพัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงกับก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้านั้นสามารถเพิ่มผลผลิตได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ผลการทดลองในงานวิจัยนี้สามารถสร้างชุดทดลองกระตุ้นผลผลิตก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าโดยใช้พัลส์ความต่างศักย์สูงขนาดเล็กได้จริงจากแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ แต่พลังงานที่ได้อยู่ในระดับ 2–7 จูล เป็นไปได้ว่าอาจจะน้อยเกินสำหรับก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้า จึงทำให้ผลผลิตเห็ดนางฟ้าเพิ่มขึ้นเพียง

ประมาณร้อยละ 10 แต่ทั้งนี้เมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ได้กล่าวอ้างอิงมาเบื้องต้นนั้น พัลส์ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงสามารถเพิ่มผลผลิตของเห็ดหอมได้เกือบมากถึง 2 เท่า แต่ถ้าหากนำงานวิจัยชิ้นนี้ไปต่อยอดหรือประยุกต์ใช้ทดลองกับเห็ดสายพันธุ์ชนิดอื่นในประเทศไทย เช่น เห็ดตับเต่า เห็ดเผาะ เห็ดหลินจือ เป็นต้น ซึ่งเป็นเห็ดที่มีราคาสูง อาจจะเป็นการเพิ่มผลผลิตอย่างได้ผลอย่างดีก็เป็นไปได้

**5. กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบคุณคณาจารย์หลักสูตรการจัดการนวัตกรรมเพื่อธุรกิจและอุตสาหกรรม ภาควิชาวิทยาศาตร์ประยุกต์และสังคม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้คำแนะนำทางด้านการวิจัย และขอขอบคุณทางบริษัท เมเซอร์โทรนิกซ์ จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านเครื่องมืออุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องมือวัดสำหรับงานวิจัยนี้

**เอกสารอ้างอิง**

[1] S. Tsukamoto, H. Kudoh, S. Ohga, K. Yamamoto, and H. Akiyama, "Development of an automatic electrical stimulator for mushroom sawdust bottle," in *Proceeding of the 15th IEEE international Pulse Power Conference*, 2005, pp. 1437–1440.

[2] S. Ohga, S. Iida, and S. Koo, "Effect of electric impulse on fruit body production of Lentinula edodes in the sawdust-based substrate," *Mushroom Science and Biotechnology*, vol. 9, pp. 7– 12, 2001.

[3] S. Ohga, "Application of electric pulsed on fruit body production of edible and medicinal mushroom," *CNU Journal of Agricultural Science*, vol. 39, no. 4, pp. 591–594, 2012.

[4] K. Takaki, K. Yoshida, T. Saito, T. Kusaka, R. Yamaguchi, K. Takahashi, and Y. Sakamoto, "Effect of electrical stimulation on fruit body formation in cultivating mushrooms," *Microorganisms*, vol. 2, no. 1, pp. 58–72, 2014.

[5] R. Ibrahim, K. M. Aziz, A. M. Arshad, and S. M. Z. S. Hasan, "Enhancing mushroom production using physical treatment prior to fruiting body formation," *Malaysian Society of Applied Biology*, vol. 44, no. 1, pp. 69–73, 2015.

[6] S. Tsukamoto, H. Kudoh, S. Ohga, K. Yamamoto, and H. Akiyama, "Development of an automatic electrical stimulation for mushroom sawdust bottle," presented at the 2005 IEEE Pulse Power Conference, Monterey, CA, USA, June 2005.

[7] K. Takaki, N. Yamazaki, S. Mukaigawa, T. Fujiwara, H. Kofujita, K. Takahasi, M. Narimatsu, and K. Nagane, "Improvement of edible mushroom yield by electric stimulations," *Journal of Plasma and Fusion Research Series*, vol. 8, pp. 556–559, 2009.

[8] Y.Mibuchi and M. Yamamoto, "Kyushu electric power corporation," Japan, Research Report No. 87004, 1984.

[9] K. Takaki, R. Yamaguchi, T. Kusaka, H. Kofujita, K. Takahashi, Y. Sakamoto, M. Narimatsu, and K. Nagane, "Effects of pulse voltage stimulation on fruit body formation in Lentinula edodes cultivation," in *Proceedings the 7th International Symposium on Non-Thermal/ Thermal Plasma Pollution Control Technology and Sustainable Energy*, 2010, pp. 108–112.

[10] I. Ferzana and O. Shoji, "The response of fruit body formation on tricholoma matsutake in situ condition by applying electric pulse stimulator," *International Scholarly Research Network*, pp. 1–6, 2012.

[11] K. Takaki, N. Yamazaki, S. Mukaigawa, T. Fujiwara, H. Kofujita, K. Takahasib, M. Narimatsuc, and K. Naganed, "Effect of pulsed high-voltage stimulation on pholiota Nameko Mushroom yield," in *Proceedings of the 2nd Euro-Asian Pulsed Power Conference*, 2008, pp. 1062–1065.

[12] K. Tonmitra and A. Suksri, "Bipolar high voltage DC generator ±100kV 5 mA," *KKU Engineering Journal*, vol. 31, no. 4, pp. 361–375, 2004.

[13] N. Praihong, D. Choosin, and T. Panmai, "The impulse voltage generator 200 kV 4 kJ," Thesis, Bachelor Degree of Technology, Department of Electrical and Electronics Technology, Faculty of Engineering, Burapha University, 2007.

[14] R. Sheeba, M. Jayaraju, T. Kunju, and N. Shanavs, "Simulation of impulse voltage generator and impulse testing of insulator using MATLAB simulink," *World Journal of Modelling and Simulation*, vol. 8, no. 4, pp. 302–309, 2012.

[15] J. Emery, "Cockcroft-Walton voltage multiplier," *Multiplier*, vol.13, pp. 280–287, 2013.

[16] A. Suksri, "High voltage engineering," Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, 2008.

[17] J. Kluss, and W. Larzelere, "Reconfiguration of 3 MV Marx generator into a modern high efficiency system," in *Proceedings of the 25th Nordic Insulation Symposium*, 2017, pp. 1–6.

[18] A. Ur-Rehman and N. Khan, "Design and fabrication of a high voltage lightning impulse generator," *Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 69–73, 2016.