

การออกแบบวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ควบคุมด้วยบอร์ด Arduino  
สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแผ่นฟิล์มบาง  
A Design Buck Converter with Arduino Board for Amorphous Solar Panel

พรวัฒน์ ศรีสวัสดิ์ ธีรภัทร สิงห์เดช และ องอาจ แสตไหม<sup>1</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี<sup>1</sup>

Pornwat Srisawas Theerapat Singhdech and Ong-art Sadmai<sup>1</sup>

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi<sup>1</sup>

E-mail : ong-art.s@en.rmutt.ac.th<sup>1\*</sup>

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ สำหรับใช้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแผ่นฟิล์มบาง เพื่อหาประสิทธิภาพของบัคคอนเวอร์เตอร์และการทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบแผ่นฟิล์มบาง ที่มีแรงดันจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุด 100 โวลต์ วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์จะรักษาระดับแรงดันขาออกไม่เกิน 40 โวลต์ จากระดับแรงดันขาเข้าในช่วง 70 – 85 โวลต์ กระแสตรง การทำงานของระบบควบคุมจะทำการตรวจสอบแรงดันทางด้านออกของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ หากแรงดันที่วัดมีค่ามากกว่า 40 โวลต์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งสัญญาณ PWM ให้กับวงจรขับเคลื่อน TLP250 เพื่อทำการควบคุมแรงดันทางด้านออก ที่ความถี่สวิตช์ 31 กิโลเฮิร์ตซ์ รักษาแรงดันไฟฟ้าด้านออกให้คงที่ ไม่เกิน 40 โวลต์ ผลการทดลองพบว่า วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ สามารถรักษาแรงดันให้คงที่และจ่ายกระแสให้กับโหลดได้ในช่วงเวลา 9.00-16.00 น. กระแส 0.48 แอมแปร์ แรงดัน 39.84 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 19.12 วัตต์ ตามลำดับ

**คำสำคัญ :** วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ สัญญาณ PWM แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบแผ่นฟิล์มบาง

**Abstract**

This research aims to design Buck converter for using with amorphous crystalline silicon. Finding efficiency of buck converter and operation of buck converter and amorphous crystalline silicon solar panel which has a maximum voltage 100 volts, buck converter circuit will maintain output voltage level not over 40VDC from input voltage 70-85VDC. The operation of control system has been inspection output voltage of buck converter circuit while output dc voltage has been measured more than 40VDC, microcontroller (Arduino) has been sent PWM signals to the TLP250 gate circuit to controlled the output voltage at 31 kHz switching frequency and maintain output voltage 40VDC. The experimental result shows that buck converter can be operated from 9 am. - 4 pm. The current is 0.48A, 39.84VDC and 19.12W respectively.

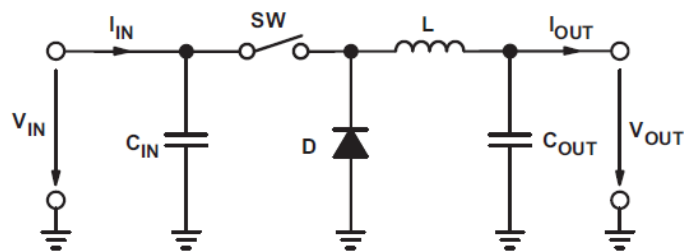
**Key words:** Buck converter, Microcontroller, PWM, Amorphous crystalline silicon solar panel

## 1. บทนำ

การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์มีหลายชนิดแต่ละชนิดมีระดับแรงดันที่แตกต่างกัน งานวิจัยฉบับนี้ จึงได้นำเอาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแผ่นฟิล์มบาง มาทำการทดลองเนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ แรงดันค่อนข้างสูงมาก จนกระทั่งหาอุปกรณ์มาต่อใช้งานในการประจุกระแสให้กับแบตเตอรี่ ค่อนข้างยาก เนื่องจากส่วนใหญ่เครื่องประจุกระแส (Charge Regulator) ที่มีท้องตลาดมีแรงดันทางด้านเข้าที่รับแรงดันจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่เกิน 40 โวลต์ ซึ่งน้อยกว่าแรงดันที่ออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางมาก งานวิจัยฉบับนี้จึงทำการออกแบบวงจร buck converter มาช่วยลดแรงดันกระแสตรงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้เหมาะสมกับขนาดแรงดันที่เครื่องประจุกระแสที่มีในท้องตลาดสามารถทนได้ วงจร buck converter มีคุณสมบัติในการควบคุมแรงดันทางด้านออกของวงจร buck converter ให้ต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า เช่นรับแรงดันเข้าวงจร buck converter 100 โวลต์ สามารถควบคุมแรงดันที่ออกจากวงจร buck converter ไม่เกิน 40 โวลต์ จึงเรียกว่า วงจรลดทอนระดับแรงดัน หรือวงจร buck converter [1] เพื่อรักษาระดับแรงดันทางด้านออกของวงจร buck ให้คงที่ งานวิจัยนี้ใช้การควบคุมแบบปิด (Close Loop) มีหลักการทำงานคือการอ่านค่าแรงดันทางด้านออกของวงจร buck converter หากแรงดันที่อ่านได้มีค่ามากกว่า 40 โวลต์ วงจรควบคุม (ไมโครคอนโทรลเลอร์) จะลด  $f_s$  (วงจรรักษาเกต) ของมอสเฟต โดยการทำให้ช่วงเวลา  $T_{ON}$  มีการเปลี่ยนแปลงแบบอัตราโนมิตีจะทำให้วงจร buck converter ได้แรงดันทางด้านออกตามการออกแบบที่ต้องการ

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการคำนวณของวงจร buck converter

วงจร buck converter [1] เป็นวงจรสำหรับลดขนาดของแรงดันกระแสตรงทางด้านเข้าให้มีค่าแรงดันทางด้านออกตามที่ต้องการ โดยจะมีการต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เพื่อให้ได้แรงดันที่เป็นไฟตรงมากยิ่งขึ้น การทำงานของวงจร buck converter จะอาศัยการตัดต่อของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น มอสเฟต หรือ ไอจีบีที ควบคุมการเปิดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ด้วยความถี่ของการสวิตช์ (Switching) ทำให้ได้แรงดันตามที่ต้องการ สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแผ่นฟิล์มบาง (Amorphous Silicon) เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีแรงดันสูง กระแสต่ำ เช่น 100V 0.8A ทำให้มีปัญหาในการนำไปใช้งานในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด โดยตรงหรือเพื่อการประจุกระแสให้กับแบตเตอรี่ได้ เพราะตัวประจุกระแสมีค่าแรงดันประมาณ 40 โวลต์ ซึ่งต่ำกว่าแรงดันจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ค่อนข้างมาก ดังนั้นในการออกแบบวงจร buck converter จึงออกแบบแรงดัน  $V_{in}$  100 โวลต์ โดยออกแบบให้แรงดันทางด้านออกของวงจร buck converter ไม่เกิน 40 โวลต์ ไม่ว่าแรงดันจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมากกว่า 40 โวลต์ก็ตาม โดยการให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ปรับความถี่ของการสวิตช์แบบอัตราโนมิตี



รูปที่ 1 วงจรพื้นฐานของวงจร buck converter (Buck Converter Power Stage)

## 2.1 การออกแบบวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ [1, 2]

การหาค่าตัวที่ใช้เคิลสูงสุด เพื่อให้แรงดันทางด้านออกของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์มีค่าคงที่ 40 โวลต์ทช ทุกการเปลี่ยนแปลงของแรงดันจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 40 – 100 โวลต์ เมื่อกำหนดค่าแรงดันขาเข้าวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ 100 โวลต์ และแรงดันขาออกคงที่ 40 โวลต์ กำหนดให้ประสิทธิภาพของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 90

ค่าตัวที่ใช้เคิลสูงสุด เมื่อ กำหนดให้ประสิทธิภาพของบัคคอนเวอร์เตอร์ที่ร้อยละ 90

$$D = \frac{V_{\text{Out}}}{V_{\text{in,Max}} \times \eta} = \frac{40}{100 \times 0.9} = 0.44$$

ตัวต้านทานโหลด เมื่อกำหนดให้กระแสไหลสูงสุดที่ 1A

$$R = \frac{V_o}{I_o} = \frac{40V}{1A} = 40\Omega$$

ค่าต่ำสุดของขนาดตัวเหนี่ยวนำที่ทำให้กระแสไหลต่อเนื่อง

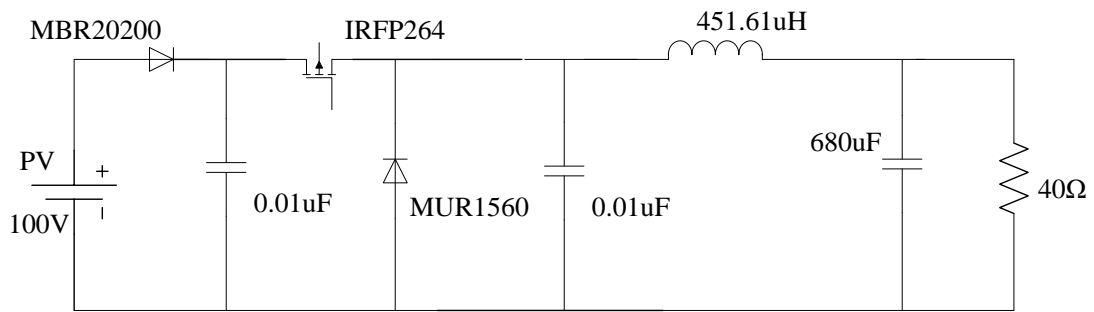
$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f_{\text{sw}}} = \frac{(1-0.44) \times 40\Omega}{2 \times 31,000} = \frac{22.4}{62,000} = 361.29\mu\text{H}$$

กำหนดให้ตัวเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่กว่าค่าต่ำสุด 25% เพื่อให้แน่ใจว่ากระแสที่ตัวเหนี่ยวนำจะไหลต่อเนื่อง

$$L_{\max} = 1.25L_{\min} = (1.25) (361.29\mu\text{H}) = 451.61\mu\text{H}$$

ค่าสูงสุดและต่ำสุดของกระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$I_{L,\max} = V_O \left( \frac{1}{R} + \frac{(1-D)}{2Lf} \right) = 40 \left( \frac{1}{40} + \frac{(1-0.44)}{2 \times (451.61 \times 10^{-6}) \times 31,000} \right) = 40 \left( \frac{1}{40} + \frac{0.56}{28} \right) = 1.8 \text{ A}$$
$$I_{L,\min} = V_O \left( \frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right) = 40 \left( \frac{1}{40} - \frac{(1-0.44)}{2 \times (451.61 \times 10^{-6}) \times 31,000} \right) = 0.2 \text{ A}$$

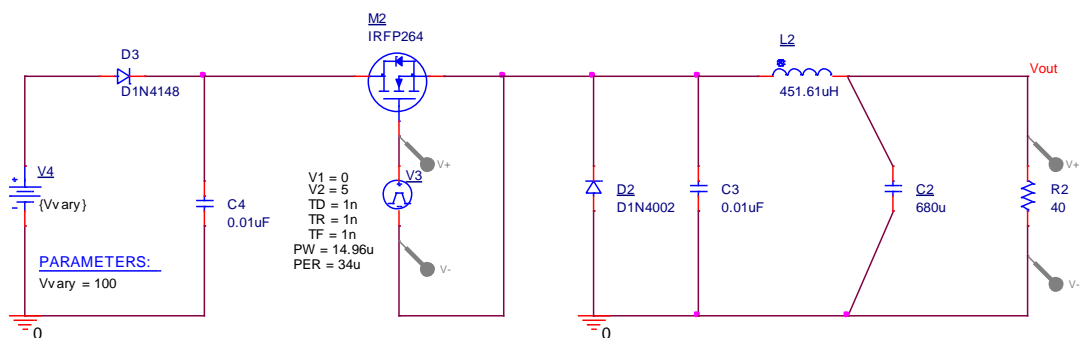


รูปที่ 2 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบ

จากรูปที่ 2 ส่วนประกอบของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้มาจากเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ในวงจรได้แก่ สวิตช์การทำงานหรือการใช้ มอสเฟต, ไดโอดฟื้นตัวเร็ว, ไดโอด, ตัวเหนี่ยวนำ , ตัวเก็บประจุด้านออก และตัวต้านทานโหลด การออกแบบกำหนดแรงดันด้านเข้า  $V_{in}$  มีค่าเท่ากับ 0-100 โวลต์ โดยมีพิกัดที่มากกว่าแรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ การสร้างความถี่สวิตช์ 31 กิโลเฮิรตซ์จากบอร์ด Arduino ดิวตี้ไซเคิลมีค่าตั้งแต่ร้อยละ 0-90 และแรงดันด้านออกที่ต้องการเท่ากับ 40 โวลต์ ค่าการคำนวณของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแผ่นฟิล์มบาง โดยค่ากระแสโหลด  $I_{out}$  และค่าความต้านทานโหลด  $R_{out}$  มีค่า 40 โอห์ม ค่าดิวตี้ไซเคิล ร้อยละ 44

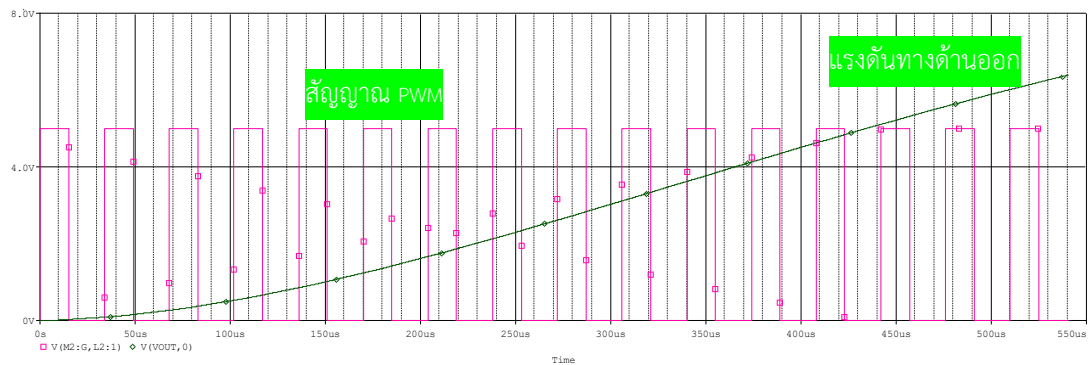
## 2.2 การจำลองระบบด้วยโปรแกรม Orcad Lite

จากรูปที่ 3 ส่วนประกอบวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ ที่นำมาทำการจำลองระบบเพื่อทดสอบหาค่าแรงดันทางด้านออกของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ ประกอบด้วยแรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์ สวิตช์จากรูปที่ 1 ถูกแทนค่าด้วยมอสเฟตกำลัง, ไดโอดฟื้นตัวเร็วไดโอด, ตัวเหนี่ยวนำ, ตัวเก็บประจุด้านออก และตัวต้านทานโหลด ดังวงจรในรูปที่ 3 โดยแรงดันทางด้านออกของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ คือแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_2$  ผลของการทดลอง แสดงให้เห็นดังรูปที่ 3 – 6



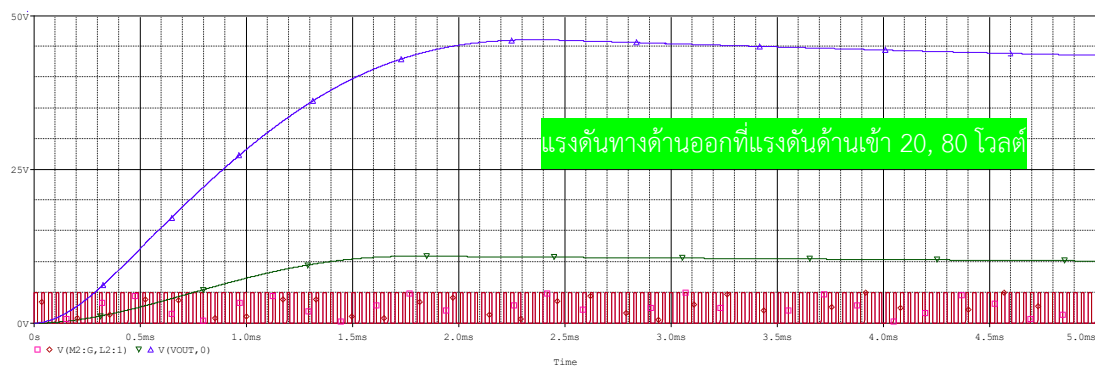
รูปที่ 3 การจำลองวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม Pspice

## 2.3 ผลการจำลองวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์ ด้วยโปรแกรม Orcad Lite

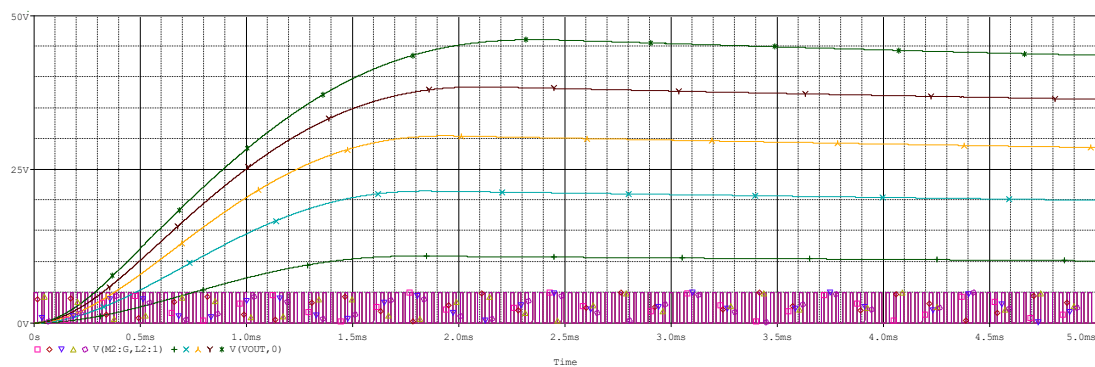


รูปที่ 4 สัญญาณ PWM สำหรับควบคุมสวิตช์

จากรูปที่ 4 แสดงสัญญาณ PWM ที่จะนำไปขับมอสเฟต โดยมีความถี่ 31kHz มีคาบเวลา 34us ปรับค่าช่วงเวลา  $T_{on}$  ที่ร้อยละ 44 ส่วนรูปที่ 5 แสดงแรงดันทางด้าออกของวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์ที่แรงดันทางด้าเข้า 20V และ 80V ซึ่งจากแรงดันที่วัดได้จากวงจรจะมีค่าต่ำกว่า 40V โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่ หรือประมาณร้อยละ 40 เช่นที่ แรงดันขาเข้า 20 โวลต์แรงดันที่ได้จากวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์ที่ขาออกประมาณ 8 โวลต์ เป็นต้น



รูปที่ 5 แรงดันทางด้าออกของวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์ ที่แรงดันทางด้าเข้า 20, 80V



รูปที่ 6 แรงดันทางด้าออกของวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์ ที่แรงดันทางด้าเข้า 20 - 100V

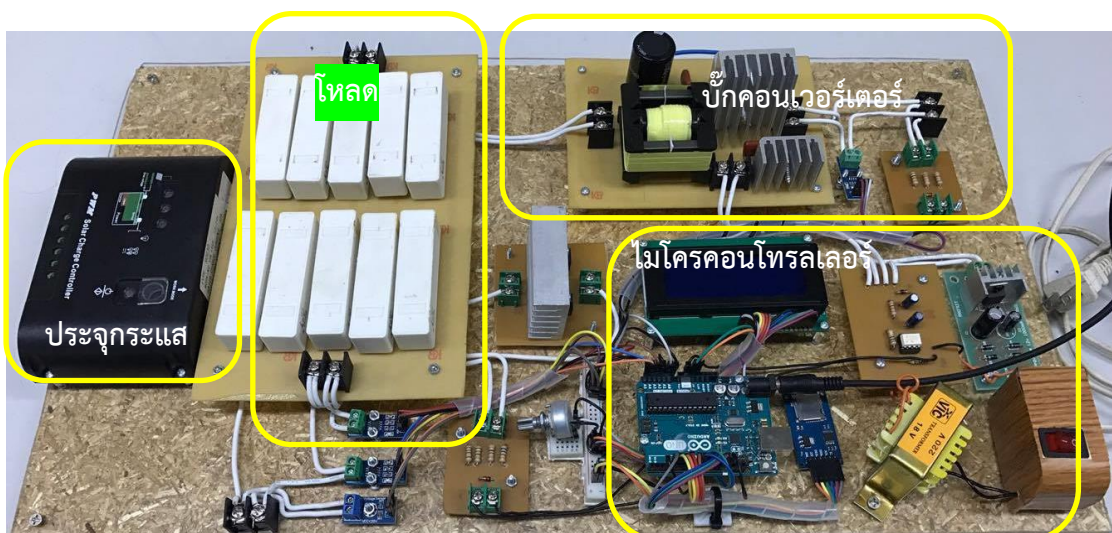
จากรูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันขาเข้าวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ 20 – 100 โวลต์ โดยมีการเปลี่ยนแปลงแต่ละขั้นที่ 20, 40, 60, 60, 80, 100 โวลต์ตามลำดับ โดยกำหนดค่าความต้านทานโหลด ที่ 40 โอห์ม คงที่ตลอดการทดลอง พบว่าถ้าค่าแรงดันทางด้านเข้า 100V ค่าตัวชี้เซลล์ ( $T_{on}$ ) ร้อยละ 44 ค่าแรงดันทางด้านออก จะเท่ากับ 40 โวลต์ ดังนั้นถ้ามีแรงดัน 60 โวลต์ มาเข้าวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ ระบบควบคุมความถี่ของการสวิตช์ของมอสเฟต ถูกกำหนดให้ทำแบบอัตโนมัติอยู่แล้วด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยมีการปรับค่าตัวชี้เซลล์ แบบอัตโนมัติที่ร้อยละ 44 – 100 ตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ดังนั้นถ้าแรงดันขาเข้าบัคคอนเวอร์เตอร์ 40 โวลต์ ค่าตัวชี้เซลล์ ที่ใช้จะมีค่าเท่ากับร้อยละ 100

### 3. การออกแบบวงจรขับ PWM

การขับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ (Mosfet IRFP264) จำเป็นจะต้องมีสัญญาณไปขับที่ขาเกตและขาอิมิตเตอร์ของ Mosfet IRFP264 เพื่อให้สวิตช์ในที่นี้คือมอสเฟตทำงานเพื่อ ปิด-เปิด วงจรตามที่กำหนดได้ โดยในโครงงานนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 เป็นบอร์ดสำหรับสร้างสัญญาณ Pulse Width Modulation (PWM) ไปกระตุ้นให้ Mosfet ทำงานตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยจะใช้ขา 3 ของบอร์ด Arduino ส่งสัญญาณ PWM ไปให้กับวงจรขับเกต TLP250 TCCR2A และ TCCR2B คือ การใช้สัญญาณภายนอกแบบมีคาบนั้นเป็นสัญญาณ Clock ป้อนให้วงจรตัวนับที่อยู่ภายใน [3]

### 4. วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

นำอุปกรณ์ที่คำนวณได้จากการออกแบบในแต่ละส่วนได้แก่ วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์(Buck Converter) วงจรขับขาเกต(Gate Driver) เซนเซอร์วัดแรงดันและกระแส วงจรสร้าง PWM (Arduino) จอแสดงผล(LCD) และตัวประจุกระแส รูปที่ 7 แสดงแผงวงจรการทดลอง บัคคอนเวอร์เตอร์กับอุปกรณ์ในการตรวจวัด แรงดัน กระแส และจอแสดงข้อมูล

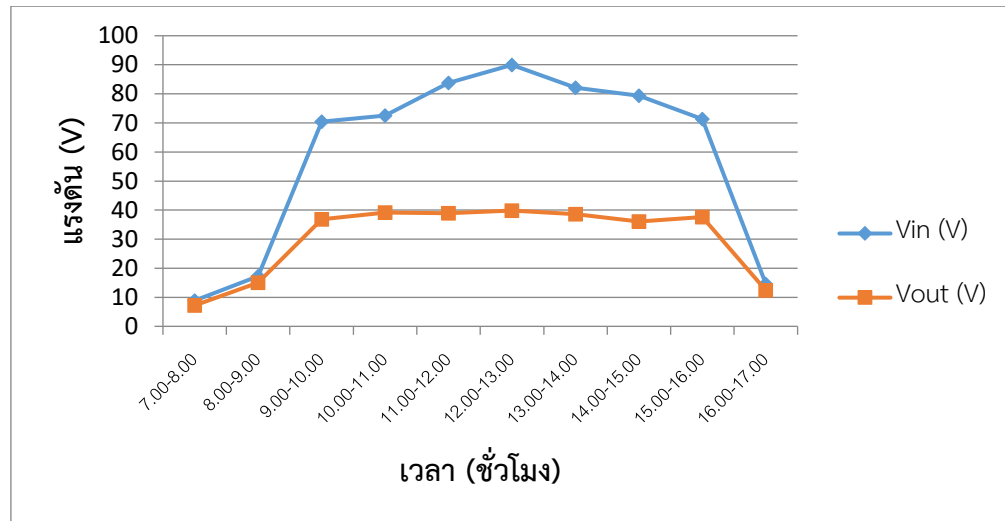


รูปที่ 7 อุปกรณ์ชุดทดลองของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

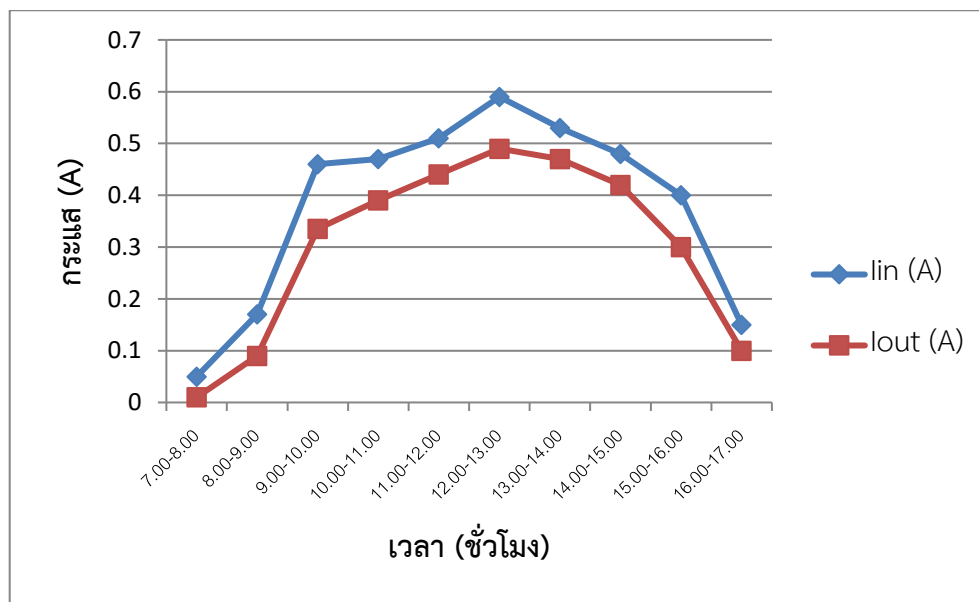
จากรูปที่ 7 เป็นชุดทดลองสำหรับทดสอบ โดยนำไปทดสอบกับแหล่งจ่ายปรับค่าได้ (Voltage Variable Transformer) ก่อนนำไปทดสอบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแผ่นฟิล์มบาง พบว่าทำงานได้ดี ซึ่งวัดกระแสได้ 0.5

แอมแปร์ ที่แรงดันน้อยกว่า 80V ในการปรับปรุงการทดลองครั้งที่ 2 โดยการปรับตัวต้านทานโหลดใหม่ ตามการ  
 ออกแบบที่จ่ายกระแส 1 แอมแปร์ ดังรูปที่ 2 ที่ออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่ 451.61 ไมโครเฮนรี และความต้านทาน 40  
 โอห์ม โดยมีผลการทดลอง ดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9

## 5. ผลการทดลอง



รูปที่ 8 แรงดันทางด้านเข้าและด้านออกจากวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 9 กระแสทางด้านเข้าและด้านออกจากวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

## 6. การอภิปรายผลและสรุป (Discussion and Conclusion)

การออกแบบบ๊ิกคอนเวอร์เตอร์ สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแผ่นฟิล์มบาง ใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาด 451.61 ไมโครเฮนรี่กับตัวต้านทานโหลด 40 โอห์ม กระแส 1A เมื่อนำไปทดลองต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบแผ่นฟิล์มบาง พบว่าวงจรบ๊ิกคอนเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้ จ่ายกระแสให้กับเครื่องประจุกระแส เพื่อนำไปประจุกระแสของแบตเตอรี่ได้ ในช่วงเวลา 9.00 – 16.00 น. วงจรบ๊ิกคอนเวอร์เตอร์ ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ในการควบคุมการสวิตช์ของมอสเฟต ให้รักษาแรงดันทางด้านออกของวงจรบ๊ิกคอนเวอร์เตอร์ให้คงที่ในช่วง 36 – 40 โวลต์ แสดงผลด้วยแรงดันและกระแสตรงผ่านจอ LCD การควบคุมแรงดันทางด้านออก จะปรับที่ค่าดิวิตีไซเคิล 0 - 98% ทำงานโดยอัตโนมัติ โดยการตรวจวัดแรงดันทางด้านออกของวงจรบ๊ิกคอนเวอร์เตอร์ ก่อนที่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งความถี่ให้กับมอสเฟตเพื่อควบคุมแรงดันทางด้านออกให้อยู่ในช่วงแรงดันที่เหมาะสมตามการออกแบบ กระแสที่ได้จากการประจุแบตเตอรี่ จะมีค่าน้อยมากเนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแผ่นฟิล์มบางผลิตกระแสได้น้อย มีค่าประสิทธิภาพของวงจรบ๊ิกคอนเวอร์เตอร์ขณะทำงานเมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 36.77% ของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะเห็นได้ว่าวงจรบ๊ิกคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบไว้ สามารถนำไปใช้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดแรงดันสูง เพื่อใช้ในการผลิตกำลังไฟฟ้า การพัฒนางจรบ๊ิกคอนเวอร์เตอร์เพื่อใช้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดแรงดันสูงๆ อาจจะลดแรงดันเพื่อนำไปประจุแบตเตอรี่ได้โดยตรง ไม่มีการใช้ตัวประจุกระแสอาจจะทำให้ประสิทธิภาพของวงจรบ๊ิกคอนเวอร์เตอร์ตัวนี้สูงขึ้น หรืออาจจะใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว (Mono Crystalline Silicon) ต่อแบบอนุกรม เพื่อให้แรงดันสูงขึ้นก่อนนำไปใช้งานกับวงจรบ๊ิกคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบไว้

## 7. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

คณะผู้วิจัย ต้องขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้สนับสนุนงบประมาณเงินรายได้ในการทำวิจัย ประจำปี 2561 จนงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## 8. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] วีระเชษฐ์ ชื่นเงิน และ วุฒิพล ธาราธิเรศเรษฐ์. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 12. กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินตติ้ง; 2555.
- [2] Texas Instrument. Basic Calculation of Buck Converter's Power Stage [Internet]. 2018 [Cited 2018 March 12] available from : <https://www.ti.com/lit/an/slva477b/slva477b.pdf> (in Thai)
- [3] Arduino. PWM [Internet]. 2018 [Cited 2018 March 20] available from : <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM> (In Thai)
- [4] Cristri AW, Iskandar RF. Analysis and Design of Dynamic Buck Converter with Change in Value of Load Impedance. Procedia Engineering. 2017;170:398-403.
- [5] Xie J, Yan Y, editors. Principle of Power Electronic Converter. PCIM Asia 2017; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management; 2017 27-29 June 2017.
- [6] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. พจนานุกรมศัพท์วิศวกรรมไฟฟ้า ฉบับ ว.ส.ท. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัท โกลบอล กราฟฟิค จำกัด, 2550.