

ระบบประจุแบตเตอรี่ Li-Po โดยใช้ TENG  
TENG Micro Power Charger



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อปีการศึกษา 2563 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ระบบประจุแบตเตอรี่ Li-Po โดยใช้ TENG  
TENG Micro Power Charger

โดย

ปภพ ทองยวน

รามิล ศรีแย้ม

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.จิรวุฒน์ ปานกลาง



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ **ปีการศึกษา 2563** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

ภาควิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบประจุแบตเตอรี่ Li-Po โดยใช้ TENG

TENG Micro Power Charger

จัดทำโดย นายปภพ ทองยวน รหัสนักศึกษา 60010572

นายรามิล ศรีแย้ม รหัสนักศึกษา 60010870

ปริญญานิพนธ์นี้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

(รศ.จิรวัดน์ ปานกลาง)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หัวข้อโครงการ	ระบบการประจุแบตเตอรี่ Li-Po โดยใช้ TENG			
นักศึกษา	นายปภพ	ทองยวน	รหัสนักศึกษา	60010572
	นายรามิล	ศรีแย้ม	รหัสนักศึกษา	60010870
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต			
ภาควิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์			
ปีการศึกษา	2563			
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ	รศ.จิรวัดน์ ปานกลาง			

### บทคัดย่อ

แหล่งกำเนิดกำลังงานไฟฟ้า TENG (Triboelectric Nanogenerator) ที่สามารถจ่ายแรงดันและกระแสจากตัวเองได้เมื่อได้รับปริมาณทางฟิสิกส์ที่เหมาะสม เช่น การกระทบหรือเสียดสี แต่กำลังที่ได้ ออกมานั้นมีปริมาณน้อยโดย TENG มีหลักการการทำงานแบบไฟฟ้าสถิตซึ่งจะได้แรงดันที่มาก แต่มีกระแสที่น้อยในระดับนาโนแอมป์ถึงไมโครแอมป์ ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบระบบเพื่อนำกำลังที่ได้ดังกล่าวนำไปเก็บไว้ในแบตเตอรี่ขนาด 18650 โดยระบบประกอบด้วย 1.ภาครับพลังงานไฟฟ้าจะทำการปรับค่ากระแสและแรงดันให้เหมาะสมกับวงจร และ 2. ภาคประจุที่จะทำการควบคุมการประจุแบตเตอรี่ เมื่อสร้างระบบเสร็จระบบเสร็จแล้วพบว่าระบบชาร์จดังกล่าวสามารถเริ่มทำงานได้ตั้งแต่แรงดันที่ออกจาก TENG เท่ากับ 0V- 5Vขึ้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

<b>Project Title</b>	TENG MICRO POWER CHARGER		
<b>Student</b>	Mr.Paphop Thongyuan	Student ID	60010572
	Mr.Ramill Sriyaem	Student ID	60010870
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering		
<b>Program</b>	Electronics Engineering		
<b>Year</b>	2020		
<b>Project Advisor</b>	Assoc.prof Jirawat Panglang		

### ABSTRACT

Power supply TENG (Triboelectric Nanogenerator) the voltage and current can be supplied by itself when appropriate physical quantities are obtained. Such as bumps or ribbing. But the power that is coming out is small. TENG has a electrostatic principle which produces a very loud force. But there is a small current at the nano-amp to micro-amp level. Therefore, a system was designed to carry the said energy into a single 18650 battery. The system consists of 1.The receiver will adjust the current and voltage to suit the circuit and 2.The charge sector to control the battery charge. When the system was built, it was found that the charging system was able to start working from the TENG outlet voltage of 0V-5V or higher.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use<sup>II</sup> only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการระบบการประจุแบตเตอรี่ Li-Po โดยใช้ TENG (TENG Micro Power Charge) นี้สำเร็จไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือและคำปรึกษาจาก รศ.จิรวรรณ ปานกลาง อาจารย์ที่ปรึกษา พี่ที่อยู่คณะวิทยาศาสตร์ และนักศึกษาชั้นปีที่ 4 ในความดูแลของ รศ.จิรวรรณ ปานกลาง ทุกคน ที่คอยให้ความรู้แนวทางในการแก้ไขปัญหาในระหว่างการทำชิ้นงานนี้ ตลอดจนสามารถทำชิ้นงานนี้ให้ออกมาสมบูรณ์ได้

สุดท้ายนี้ คณะผู้จัดทำหวังว่าโครงการฉบับนี้จะมีประโยชน์แก่ผู้สนใจและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้



คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use<sup>III</sup> only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปริญญานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	2
1.4 ระยะเวลาในการทำปริญญานิพนธ์	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	3
2.1 Triboelectric nano generator	3
2.2 หลักการทำงานแล้วโครงสร้างของ TENG	4
2.3 โหมดการทำงานของ TENG	7
2.3.1 Contact-separation mode	7
2.3.2 Lateral-sliding mode	8
2.3.3 Freestanding layer mode	8
2.3.4 Single-electrode mode	9
2.4 แนวทางการพัฒนา TENG	9
2.5 แนวทางการประยุกต์ใช้งาน TENG	10
2.5.1 แหล่งพลังงานระดับไมโครและนาโนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พกพาขนาดเล็ก	10
2.5.2 เซนเซอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยตัวเอง (Self-powered sensors)	10
2.5.3 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูง	10
2.5.4 พลังงานทดแทนที่จากน้ำทะเลหรือพลังงานสีน้ำเงิน (Blue energy)	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6	วงจรเรียงกระแส	11
2.7	วงจรกรองลดแรงดันกระเพื่อม (Ripple Filters)	13
2.8	Schottky Diode	14
2.8.1	ข้อดีของ Schottky Diode	14
2.8.2	ข้อเสียของ Schottky Diode	14
2.9	อุปกรณ์ชาร์จแบตเตอรี่ (Battery charger)	15
2.10	แบตเตอรี่ขนาด 18650	15
<b>บทที่ 3</b>	<b>วิธีการดำเนินงาน</b>	<b>17</b>
3.1	คุณสมบัติของอุปกรณ์	17
3.1.1	คุณสมบัติของ TENG (Triboelectric Nanogenerator)	17
3.1.2	การเลือกใช้อุปกรณ์	17
3.2	อุปกรณ์ภายในวงจร	17
3.3	ขั้นตอนการดำเนินงาน	18
3.3.1	ออกแบบโครงงานสร้างแทนเหยียบ TENG	18
3.3.2	Rectifier and filter	19
3.3.3	วงจร Charger	21
3.4	วงจรรวม	22
3.5	ภาพชิ้นงานรวมทั้งหมด	24
<b>บทที่ 4</b>	<b>การทดลองและผลการทดลอง</b>	<b>26</b>
4.1	แรงดันที่วัดได้จาก TENG (Triboelectric Nanogenerator)	26
4.2	กระแสที่วัดได้จาก TENG (Triboelectric Nanogenerator)	27
4.3	แรงดันขาออกของวงจร Rectifier	29
4.4	กราฟการชาร์จและคายของตัวเก็บประจุ	29
4.5	ทดลองการทำงานของ LTC4071	31
4.6	ทดลองชาร์จจาก TENG เข้า Battery 18650 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	32
<b>บทที่ 5</b>	<b>วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง</b>	<b>33</b>
5.1	สรุปผลการทดลอง	33
5.2	วิจารณ์ผลการทดลอง	33
<b>บรรณานุกรม</b>		<b>34</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับงานวิจัยสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของ TENG	3
2.2 การเกิดไฟฟ้าสถิต	4
2.3 Triboelectric Series แสดงความเป็นสัณยต์บวกลบหรือลบหลังการถ่ายเทประจุ	5
2.4 หลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต	6
2.5 แรงดันเอาต์พุตของ TENG	7
2.6 Contact-separation mode	7
2.7 Lateral-sliding mode	8
2.8 Freestanding layer mode	8
2.9 Single-electrode mode	9
2.10 การประยุกต์ใช้งานและ TENGs road map	11
2.11 วงจรชนิดเรียงกระแสเต็มลูกคลื่นแบบบริจด์	12
2.12 แสดงการทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริจด์	12
2.13 วงจรกรองแรงดันกระแสเพื่อม	13
2.14 Schottky diode	14
2.15 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่ 18650	16
3.1 โครงสร้างแท่นเหยียบ TENG	18
3.2 การเกิดแรงดันของ TENG	18
3.3 วงจร Rectifier	19
3.4 แรงดันเอาต์พุตจาก TENG	19
3.5 วงจรภายในตัวเก็บประจุ	20
3.6 วงจร Charger	21
3.7 วงจรรวม (Charger)	22
3.8 ลาย PCB ด้าน Top layer	23
3.9 ลาย PCB ด้าน Bottom layer	23
3.10 ชิ้นงานด้านซิวลอบ (Teflon)	24
3.11 ชิ้นงานด้านซิวบวก (Aluminum Tape)	24
3.12 ภาพรวมชิ้นงานทั้งหมด	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 แรงดันที่วัดได้จาก TENG	26
4.2 แรงดันเมื่อต่อโหลด 10MΩ	27
4.3 แรงดันเมื่อต่อโหลด 6MΩ	27
4.4 กราฟความสัมพันธ์กระแสและแรงดัน	28
4.5 วงจร Rectifier	28
4.6 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ	29
4.7 กราฟการชาร์จของตัวเก็บประจุ	29
4.8 กราฟการคายประจุของตัวเก็บประจุ	30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use<sup>VII</sup> only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 การทดลองการทำงานของ LTC4071	31
4.2 การชาร์จใน 1 ชั่วโมง	32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use<sup>VIII</sup> only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปริญญานิพนธ์

พลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) คือ พลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานที่สามารถผลิตหรือกักเก็บพลังงานนั้นขึ้นได้เอง สามารถหมุนเวียนเก็บเกี่ยวพลังงาน (Harvesting energy) เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ไม่มีวันหมดสิ้น โดยส่วนใหญ่เป็นพลังงานสะอาด (Green-energy) ที่ได้มาจากสิ่งแวดล้อมเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ,พลังงานกล ,พลังงานแสง ,พลังงานความร้อน เป็นต้น

ปี 2562 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานหมุนเวียนในปริมาณ 14,136 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปีก่อนร้อยละ 8.8 เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาด เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อยู่รอบตัวและสามารถเก็บเกี่ยวได้ จึงเป็นทางเลือกในอนาคตของอุตสาหกรรมการผลิตพลังงาน พลังงานหมุนเวียนหลายชนิดสามารถทำการเก็บเกี่ยวได้ผ่านวัสดุเก็บเกี่ยวพลังงาน (energy harvesting materials) ไม่ว่าจะเป็นวัสดุกึ่งตัวนำ (semiconductor) ที่เป็นพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) สำหรับใช้เก็บเกี่ยวพลังงานแสง และ วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric) สำหรับการเก็บเกี่ยวความแตกต่างกันของอุณหภูมิ และแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า แต่หากกล่าวถึงแหล่งกำเนิดพลังงานหมุนเวียนที่ไม่มีข้อจำกัดในด้านการเก็บเกี่ยว สามารถเก็บเกี่ยวได้ตลอด 24 ชั่วโมง ทั้งเวลากลางวันและกลางคืน ทุกสภาพอากาศและฤดูกาล คงหนีไม่พ้นพลังงานกล (Mechanical energy)

พลังงานกลสามารถเก็บเกี่ยวและเปลี่ยนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยผ่านวัสดุที่มีสมบัติพิเศษที่เรียกว่า ไตรโบอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ (triboelectric nanogenerator; TENG) โดยปกติการเก็บเกี่ยวของ TENG จะอยู่บนพื้นฐานของ 2 ปรากฏการณ์ คือ การเกิดประจุไฟฟ้าจากการสัมผัสเสียดสี (contact electrification) และ การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic induction) โดยเมื่อนำวัสดุต่างชนิดกัน 2 ชนิดมาสัมผัสขัดถูกันจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวของวัสดุที่สัมผัสขัดถูกัน และในตัววัสดุจะเกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าให้พื้นผิวฝั่งตรงข้ามของวัสดุมีประจุไฟฟ้าที่มีประจุตรงกันข้ามเกิดขึ้น และเมื่อต่อเข้ากับโหลดภายนอก (External load) ก็จะมีการไหลของกระแสไฟฟ้าจากขั้วตัวนำอีกด้านไปยังอีกด้าน โดย TENG ได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นและนำเสนอในปี 2012 โดยศาสตราจารย์ Z. L.Wang และเกิดการพัฒนาก้าวกระโดดจนถึงปัจจุบัน จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าประสิทธิภาพของ TENG นั้น ขึ้นกับปัจจัยหลายปัจจัยไม่ว่าจะเป็น การออกแบบโครงสร้างของ TENG การเลือกใช้วัสดุคู่สัมผัสที่ใช่รูปแบบพื้นฐานของ TENG รวมถึงวงจรไฟฟ้าที่เลือกใช้กับ TENG ซึ่งการพัฒนา ยังคงดำเนินการอย่างต่อเนื่อง และจากรายงานพบว่าประสิทธิภาพของ TENG แปรผันตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุ แต่การเพิ่มพื้นที่หรือขนาดของตัวอุปกรณ์ก็มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา ห้ามมิให้นำไปใช้เพื่อการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ขีดจำกัดต่อการติดตั้งในพื้นที่จำกัด ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ TENG จึงเป็นเรื่องที่ท้าทาย

โครงการจึงเป็นโครงการที่ใช้องค์ความรู้ทั้งด้านอิเล็กทรอนิกส์และเคมีคอนดักเตอร์ในด้านของเคมีคอนดักเตอร์โครงการนี้จะใช้ TENG (Triboelectric Nanogenerator) เป็นแหล่งจ่ายพลังงานแต่พลังงานที่ได้นั้นมันขนาดน้อยมากจึงต้องพึ่งการทำงานของส่วนอิเล็กทรอนิกส์โดยมีวงจร Charge pump วงจร AC-DC Converter วงจร low voltage charger เพื่อให้พลังงานที่มีขนาดน้อยสามารถชาร์จเก็บใส่แบตเตอรี่ได้ พลังงานพวกนี้เป็นพลังงานที่ได้เปล่า ผู้จัดทำจึงเห็นว่าถ้าเราสามารถเก็บพลังงานพวกนี้ไว้ได้จะเป็นประโยชน์ในอนาคตอย่างแน่นอน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1.2.1 เพื่อนำพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริก TENG (Triboelectric nano generator) เก็บสะสมไว้และสามารถนำมาประยุกต์

1.2.2 เพื่อเป็นแนวทางการสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานกล จากพลังงานโดยรอบ (ambient energy) เพื่อเป็นตัวสร้างพลังงานไฟฟ้าในอนาคต

1.2.3 เพื่อให้ TENG (Triboelectric nano generator) เป็นที่แพร่หลายในการใช้พัฒนาพลังงานทางเลือก

## 1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1.3.1 สามารถนำพลังงานจาก TENG ชาร์ตเก็บในแบตเตอรี่รี 18650 ได้

## 1.4 ระยะเวลาในการทำปริญญานิพนธ์

ตั้งแต่วันที่ 5 มกราคม 2564 ถึงวันที่ 25 เมษายน 2564

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถนำความรู้ที่ได้จากการเรียนภาคทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ในเชิงปฏิบัติได้

1.5.2 พัฒนาระบบการคิด วิเคราะห์ แก้ปัญหา และออกแบบชิ้นงานได้

1.5.3 สามารถศึกษาค้นคว้าหาความรู้เพิ่มเติมตัวเองภายนอกห้องเรียนได้

1.5.4 มีทักษะการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

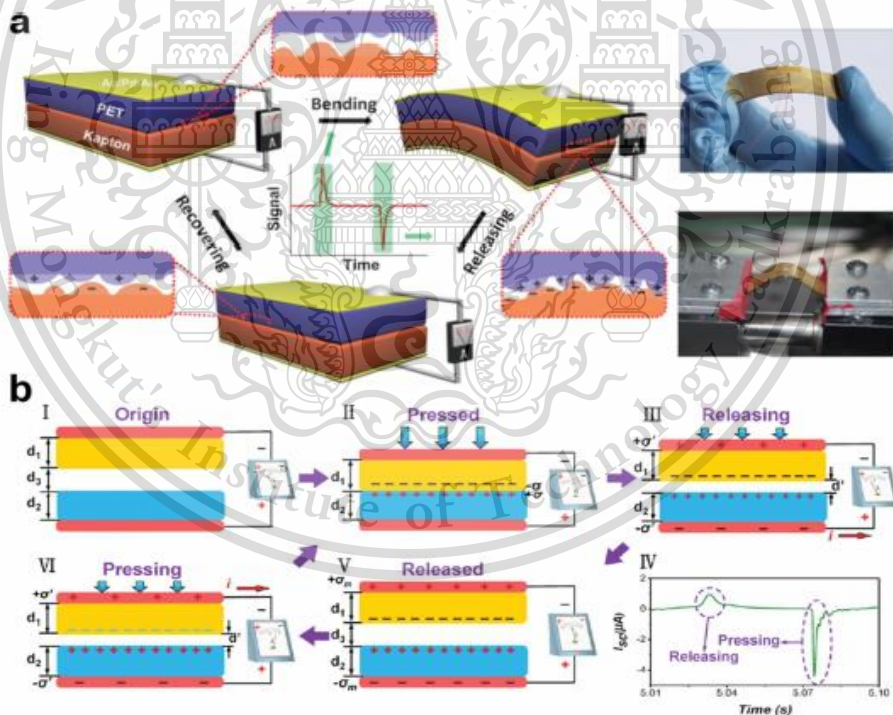
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี

### 2.1 Triboelectric nano generator

ไตรโบอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ (triboelectric nanogenerator; TENG) โดยปกติการเก็บเกี่ยวของ TENG จะอยู่บนพื้นฐานของ 2 ปรากฏการณ์ คือ การเกิดประจุไฟฟ้าจากการสัมผัสเสียดสี (contact electrification) และการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic induction) โดยเมื่อนำวัสดุต่างชนิดกัน 2 ชนิดมาสัมผัสขัดถูกันจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวของวัสดุที่สัมผัสขัดถูกัน และในตัววัสดุจะเกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าให้พื้นผิวฝั่งตรงข้ามของวัสดุมีประจุไฟฟ้าที่มีประจุตรงกันข้ามเกิดขึ้น และเมื่อต่อเข้ากับโหลดภายนอก (External load) ก็เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าจากขั้วตัวนำอีกด้านไปยังอีกด้าน โดย TENG ได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นและนำเสนอในปี 2012 โดยศาสตราจารย์ Z. L.Wang และเกิดการพัฒนาย่างก้าวกระโดดจนถึงปัจจุบัน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของ TENG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

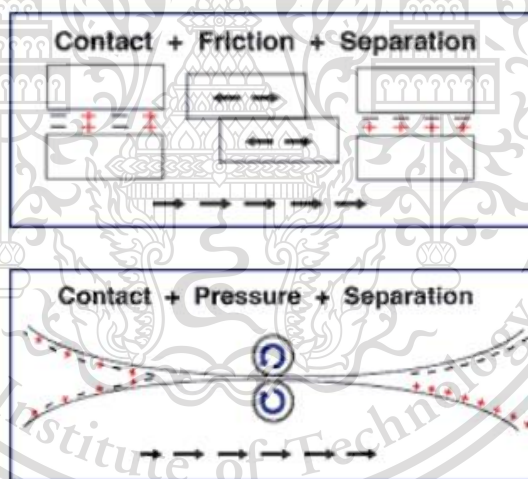
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.2 หลักการทำงานและโครงสร้างของ TENG

เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกแล้ว TENG จะให้แรงดันไฟฟ้าสูงกว่ามาก มีวิธีการประดิษฐ์ที่ง่าย ขั้นตอนการสร้างไม่ซับซ้อน มีวัสดุที่หลากหลายในการเลือกใช้ ทำให้ TENG ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก TENG สามารถเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้หลักการพื้นฐานรวมกันระหว่าง

### 1. หลักการเกิดไฟฟ้าสถิต (Triboelectrification effect)

โดยทั่วไปเราจะสามารถสังเกตเห็นปรากฏการณ์เกี่ยวกับไฟฟ้าสถิตได้เมื่อเกิดปรากฏการณ์แบบใหญ่ๆ (Macroscopic) เช่น ฟ้ายแลบ, ฟ้ายผ่า เป็นต้น แต่จริงๆ แล้ว ไฟฟ้าสถิตนั้นอาจจะเกิดขึ้นได้อยู่ตลอดเวลาในระบบเล็กๆ (Microscopic) ด้วย ตัวอย่างเช่น เสื้อผ้าที่ขยับถูติดตัว, การเกิดฝุ่นหนาเกาะจับตามหน้าจอของเครื่องรับโทรทัศน์, การเกิดไฟฟ้าดูดเมื่อเราจับโลหะบางประเภทเช่นลูกบิดประตู สัตว์เลี้ยง หรือแม้แต่วัสดุอื่น นอกจากนี้ยังอาจเห็นได้จากการทำงานของพลาสติกสำหรับห่อของยังถูกแรงดูดติดอยู่กับวัสดุที่มันห่อหุ้มอยู่



รูปที่ 2.2 การเกิดไฟฟ้าสถิต

ไฟฟ้าสถิตเกิดได้หลายวิธี วิธีหนึ่งที่ย่อยคือเมื่อมีการสัมผัสแล้วแยกจากกันหรือถูกันระหว่างวัสดุสองชนิด (เรียกว่าเกิดปรากฏการณ์ Triboelectric - ดูรูปที่ 1) ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุจากที่วัสดุทั้งสองเป็นกลางทางไฟฟ้า (คือมีประจุบวกประจุลบและลบเท่ากัน) ไปเป็นว่าวัสดุทั้งสองนั้น ชั้นหนึ่งมีประจุบวกมากกว่า และอีกชั้นหนึ่งมีประจุลบมากกว่า ทั้งนี้ การที่วัสดุใดจะมีประจุชนิดใดมากกว่าภายหลังจากการเสียดสีกันนั้น ขึ้นกับชนิดของวัสดุทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

**Triboelectric series**

No.	Materials	No.	Materials	No.	Materials
1	Aniline-formol resin	17	Styrene-acrylonitrile copolymer	33	Polyacrylonitrile
2	Polyformaldehyde 1.3-1.4	18	Styrene-butadiene copolymer	34	Acrylonitrile-vinyl chloride
3	Ethylcellulose	19	Wood	35	Polybisphenol carbonate
4	Polyamide 11	20	Hard rubber	36	Polychloroether
5	Polyamide 6-6	21	Acetate, Rayon	37	Polyvinylidene chloride (Saran)
6	Melanimeformol	22	Polymethyl methacrylate (Lucite)	38	Poly(2,6-dimethyl polyphenyleneoxide)
7	Wool, knitted	23	Polyvinyl alcohol	39	Polystyrene
8	Silk, woven	24	Polyester (Dacron) (PET)	40	Polyethylene
9	Polyethylene glycol succinate	25	Polyisobutylene	41	Polypropylene
10	Cellulose	26	Polyurethane flexible sponge	42	Polydiphenyl propane carbonate
11	Cellulose acetate	27	Polyethylene terephthalate	43	Polyimide (Kapton)
12	Polyethylene glycol adipate	28	Polyvinyl butyral	44	Polyethylene terephthalate
13	Polydiallyl phthalate	29	Formo-phenolique, hardened	45	Polyvinyl chloride (PVC)
14	Cellulose (regenerated) sponge	30	Polychlorobutadience	46	Polytrifluorochloroethylene
15	Cotton, woven	31	Butadiene-acrylonitrile copolymer	47	Polytetrafluoroethylene (Teflon)
16	Polyurethane elastomer	32	Natural rubber		

รูปที่ 2.3 Triboelectric Series แสดงความเป็นศักย์บวกหรือลบหลังการถ่ายเทประจุ

รูปที่ 2.5 แสดงศักย์ไฟฟ้า (อำนาจประจุ) ของวัสดุต่างๆหลังจากการเสียดสีกัน เช่นเมื่อเรานำแท่งแก้วถูกับผ้า PVC หรือไวนิล จะทำให้แท่งแก้วแสดงอำนาจเป็นประจุบวกเนื่องจากเสียอิเล็กตรอนไป และผ้า PVC หรือไวนิลแสดงอำนาจเป็นประจุลบเพราะมีอิเล็กตรอนส่วนเกินเพิ่มมา (นั่นคือแท่งแก้วเสียอิเล็กตรอนให้กับผ้าไวนิล) ยิ่งนำวัสดุสองชนิดที่อยู่ห่างกันมากในตารางมาถูกัน ยิ่งทำให้ความน่าจะเป็นในการถ่ายเทประจุให้แก่กันรุนแรงมากกว่าการนำวัสดุที่ใกล้กันในตารางมาถูกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

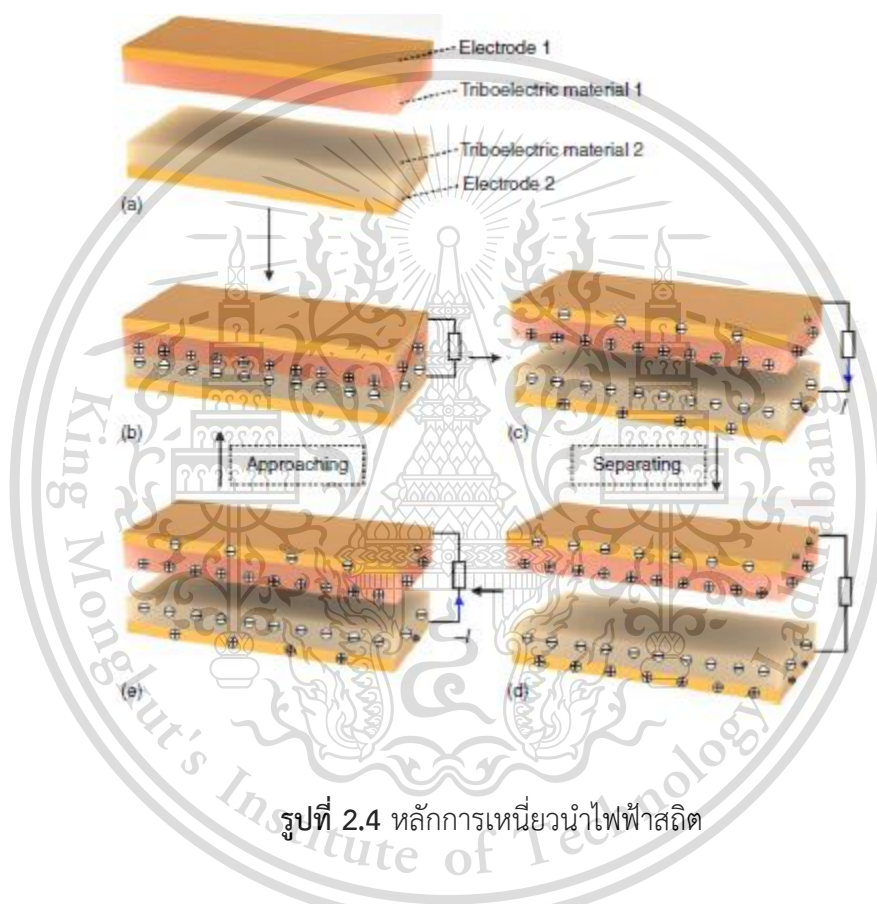
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ประจุที่เกิดขึ้นนี้จะไม่ไปไหน (คือไม่เคลื่อนที่ไปไหน หากไม่มี "ทาง" ให้มันวิ่งไป) ดังนั้นเราจึงเรียกประจุเหล่านี้ว่าเป็นประจุสถิต หรือไฟฟ้าสถิต (Electrostatic - คืออยู่เฉยๆ)

## 2. หลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต (Electrostatic introduction)

หลังจากเกิดประจุไฟฟ้าชั่วคราวข้ามชั้นที่ผิวของทั้ง 2 วัสดุแล้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำให้ไฟฟ้าที่ขั้วโลหะ มีประจุตรงข้ามกับสภาพประจุที่พื้นผิวของวัสดุ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากขั้วโลหะและไหลออกมาสู่วงจรไฟฟ้าภายนอกระหว่างขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 2.4 หลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต

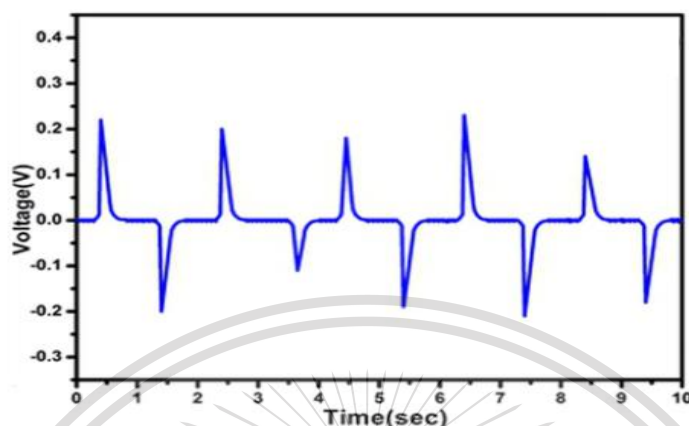
รูปที่ 2.4 แสดงหลักการทำงาน TENG โดยใช้วัสดุ 2 ชนิดและมีขั้วโลหะที่ด้านหลังของวัสดุทั้งสอง เมื่อวัสดุกำลังเข้าใกล้จนถึงสัมผัสกัน จะเกิด Electrification effect จากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าแผ่นที่ทำหน้าที่เป็น Positive เกิดประจุบวกส่วนเกินที่พื้นผิว ในขณะที่วัสดุที่ทำหน้าที่เป็น Negative เกิดประจุลบส่วนเกินที่พื้นผิว เมื่อวัสดุเริ่มห่างจากกัน จะทำให้เกิด Electrostatic induction ที่ขั้วโลหะโดยประจุที่เกิดจากการเหนี่ยวนำที่ขั้วโลหะ จะมีประจุตรงข้ามกับสภาพประจุส่วนเกินที่ผิวของวัสดุ ส่งผลให้อิเล็กตรอนเกิดการไหลระหว่างขั้วโลหะ เพื่อทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วโลหะทั้ง 2 ด้านมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เท่ากัน อิเล็กตรอนที่เกิดการไหลจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในทิศทางตรงข้าม เกิดเป็นสัญญาณเอาต์พุตตาม  
จังหวะการสัมผัสและปล่อยดังรูปที่ 2.5



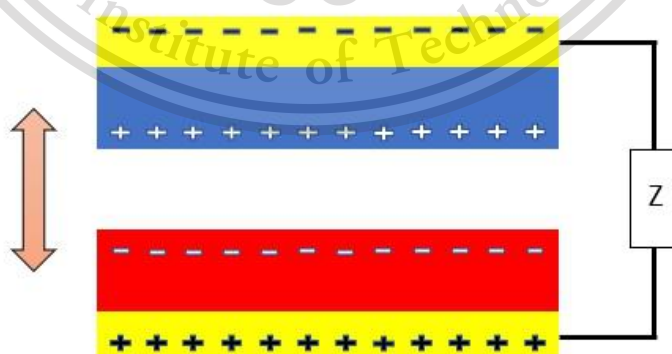
รูปที่ 2.5 แรงดันเอาต์พุตของ TENG

## 2.3 โหมดการทำงานของ TENG

เมื่อแผ่นทั้งสองเข้าใกล้จนสัมผัสกันจะเกิด Electrification effect เพื่อให้แผ่นทั้งสองสัมผัสกันจึงมีโหมดการทำงานหลักๆอยู่ 4 โหมด ได้แก่

### 2.3.1.Contact-separation mode

วัสดุที่ต่างกัน 2 ชนิดวางประกบกันพร้อมกับขั้วโลหะที่ด้านบนและด้านล่างของโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.10 ระหว่างวัสดุทั้ง 2 ชนิด มีช่องว่างอากาศเล็กน้อย แรงกลภายนอกทำให้วัสดุทั้ง 2 ชนิดสัมผัสและแยกออกจากกัน แรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นตามจังหวะของการให้แรงเชิงกล



รูปที่ 2.6 Contact-separation mode

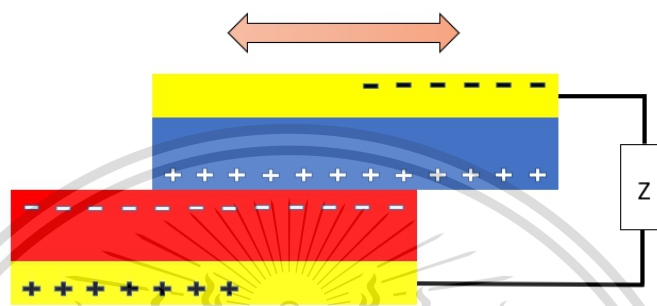
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ที่โรงเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 2.3.2.Lateral-sliding mode

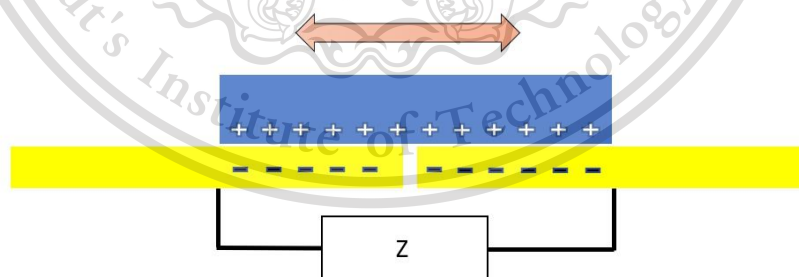
TENGs มีโครงสร้างคล้ายกับอันแรก การทำงานในรูปแบบนี้ขึ้นอยู่กับเคลื่อนไหวแบบเลื่อนระหว่างพื้นผิว ดังรูปที่ 2.11 พื้นผิวของวัสดุทั้ง 2 ชนิดจะไม่สัมผัสกันโดยทันที แต่จะเสียดสีกันตามทิศทางการเลื่อนในแนวนอน การเกิดไฟฟ้าสถิตที่รอยต่อและการเหนี่ยวนำประจุเปลี่ยนแปลงตามพื้นที่ผิวสัมผัสเกิดจากการเลื่อน



รูปที่ 2.7 Lateral-sliding mode

### 2.3.3.Freestanding layer mode

TENGs รูปแบบนี้ได้รับการวิจัยว่าเป็นการออกแบบที่ให้ประสิทธิภาพการเกิดพลังงานสูงที่สุด เป็นรูปแบบที่ขึ้นกับการเคลื่อนที่ระหว่างชั้น Triboelectric และวัสดุขั้วโลหะ 2 ขั้ว โดยวัสดุ Triboelectric จะเลื่อนไปตามแนวนอนเพื่อสัมผัสหรือเสียดสีกับขั้วโลหะที่อยู่นิ่ง เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่าง 2 ขั้วโลหะ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.8 Freestanding layer mode

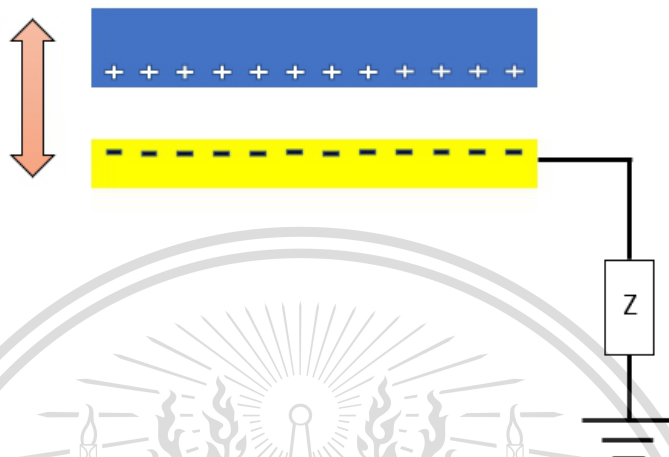
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 2.3.4. Single-electrode mode

TENGs รูปแบบนี้ประกอบด้วยขั้วโลหะเพียงข้างเดียว การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและสร้างกระแสไฟฟ้าผ่านโหลดภายนอก



รูปที่ 2.9 Single-electrode mode

## 2.4 แนวทางการพัฒนา TENG

จากหลักการทำงานของ TENG ที่อธิบายไป ปัจจัยที่สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของ TENG มี 2 ปัจจัยหลักคือ การเพิ่มประสิทธิภาพของ Triboelectrification effect และการเพิ่มประสิทธิภาพของ Electrostatic effect

การเพิ่มประสิทธิภาพของ Triboelectrification effect สามารถทำได้ เช่น

(1) เลือกชนิดของวัสดุที่นำมาประกอบเป็น TENG โดยการเลือกคู่วัสดุที่มีค่าการรับและให้อิเล็กตรอนที่แตกต่างกัน โดยสามารถเลือกดูได้จาก ตาราง Triboelectric series

(2) การเพิ่มความหนาแน่นประจุไฟฟ้าไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric charge density)

2.4.1 การปรับปรุงองค์ประกอบของวัสดุสามารถทำได้โดยการปรับปรุงสภาพทางเคมีของพื้นผิว เช่น การเพิ่มหมู่ฟังก์ชัน เอมีน (-NH<sub>3</sub>) การปรับปรุงองค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ เช่น การใช้วัสดุคอมโพสิต โดยการใช้วัสดุที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูงเป็นสารเติม หรือวัสดุนาโนที่ช่วยปรับปรุงค่าทางไฟฟ้า เช่น BaTiO<sub>3</sub> ท่อนาโนคาร์บอน กราฟีน เป็นต้น ซึ่งสามารถเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าได้ถึง 150 เท่า

2.4.2 การปรับปรุงพื้นที่ผิวสัมผัส เช่น การเพิ่มโครงสร้างนาโน-ไมโครที่พื้นผิว

2.4.3 การเปลี่ยนเงื่อนไขทางสิ่งแวดล้อม เช่น การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมและค่าความชื้นที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.5 แนวทางการประยุกต์ใช้งาน TENG

นับตั้งแต่มีการคิดค้นครั้งแรกในปีพ.ศ.2555 ได้มีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาเกี่ยวกับการนำ TENG ไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ เช่น การแพทย์ สิ่งแวดล้อม อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สวมใส่ได้ เซนเซอร์ ระบบ IoTs ระบบความปลอดภัย เป็นต้น ซึ่งสามารถแบ่งประเภทการประยุกต์ใช้งาน TENG ได้ 4 ประเภทหลัก

### 2.5.1 แหล่งพลังงานระดับไมโครและนาโนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พกพาขนาดเล็ก

จากการพัฒนาอย่างรวดเร็วของระบบ IoTs และเครือข่ายเซนเซอร์ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กจำนวนมากนี้ ต้องได้รับพลังงานเพื่อขับเคลื่อนอย่างเหมาะสม เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นี้สามารถพกพาเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆ ดังนั้นการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม จึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ทำงานได้อย่างยั่งยืน เนื่องจาก TENG เป็นอุปกรณ์ที่มีแรงดันเอาต์พุตสูง และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตต่ำ จึงจำเป็นต้องมีวงจรการจัดการพลังงาน (Power management circuit) เพื่อใช้พลังงานที่เก็บเกี่ยวได้อย่างมีประสิทธิภาพในการชาร์จหน่วยเก็บพลังงาน หรือเรียกว่า Self-charging power pack

### 2.5.2 เซนเซอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยตัวเอง (Self-powered sensors)

สำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบ IoTs และเครือข่ายเซนเซอร์ การพัฒนา AI และ Big data ต้องพึ่งพาเครือข่ายเซนเซอร์ที่เชื่อถือได้ แต่เซนเซอร์ส่วนใหญ่ต้องอาศัยแหล่งพลังงานขับเคลื่อนจากภายนอก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีเซนเซอร์ ซึ่งสามารถตอบสนองกับการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยไม่ต้องอาศัยแหล่งพลังงาน เช่น เซนเซอร์แบบแอคทีฟ ตัวอย่างเช่น สามารถใช้ TENG เป็นเซนเซอร์สำหรับตรวจจับการเคลื่อนที่หรือการสั่น ในการใช้งานด้าน Human-machine interfacing ,AI ,หุ่นยนต์ ซึ่งสามารถส่งสัญญาณเอาต์พุตแบบไร้สายโดยไม่ต้องขยายสัญญาณ

### 2.5.3 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูง

จากสมบัติของเด่นของ TENG ที่ได้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสูง สามารถนำไปประยุกต์ใช้งาน เช่น Electro spray ,Optical devices ,Microplasma ,Field emission เป็นต้น

### 2.5.4 พลังงานทดแทนที่จากน้ำทะเลหรือพลังงานสีน้ำเงิน (Blue energy)

ใช้ TENG เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นน้ำทะเล เนื่องจาก TENG ให้ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานที่ความถี่ต่ำได้ดี Prof.Z.L.Wang ได้นำเสนอ TENG road map โดยขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 นวัตกรรมการออกแบบ (Design innovation) มีความจำเป็นต้องออกแบบโครงสร้าง TENG ที่ดีที่สุด ที่สามารถนำไปประยุกต์ต่อได้ในการทำงานทั้ง 4 แบบ
- ขั้นตอนที่ 2 การออกแบบที่เฉพาะเจาะจงกับการใช้งาน เลือกว่าวัสดุที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยคำนึงถึงสภาพแวดล้อมการทำงานและ

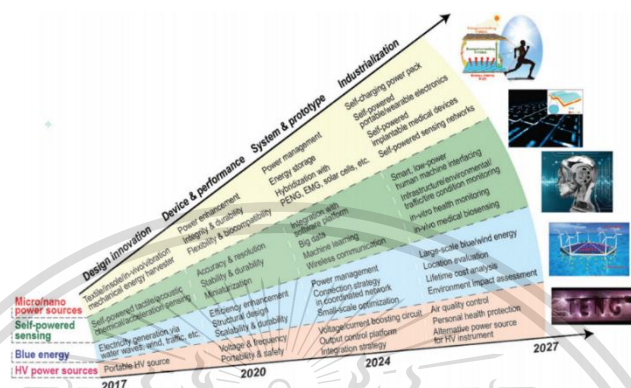
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รวมไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- ขั้นตอนที่ 3 การสร้างระบบ การทดสอบต้นแบบ และการพัฒนาผลิตภัณฑ์ เป็นขั้นตอนที่สำคัญและใช้เวลานาน เพื่อพัฒนา TENG ไปสู่เชิงพาณิชย์
- ขั้นตอนที่ 4 การพัฒนาสู่อุตสาหกรรม อุตสาหกรรมที่ใช้ TENG และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องจะสามารถนำไปใช้ประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย



รูปที่ 2.10 การประยุกต์ใช้งานและ TENGs road map.

## 2.6 วงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแสเป็นวงจรไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติในการแปลงสัญญาณกระแสสลับให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้าหรือมีคุณสมบัติยอมให้ไฟฟ้าไหลผ่านไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งที่ได้จากตัวเรียงกระแสจะมีลักษณะเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ รูปร่างคล้ายพัลส์ Pulsating (DC) และจะมีแรงดันกระเพื่อม (Ripple Voltage) อุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการแปลงสัญญาณได้แก่ ไดโอด สามารถแบ่งออกได้ 2 รูปแบบ คือ

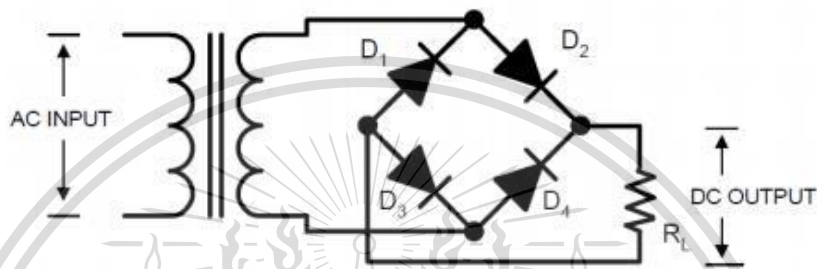
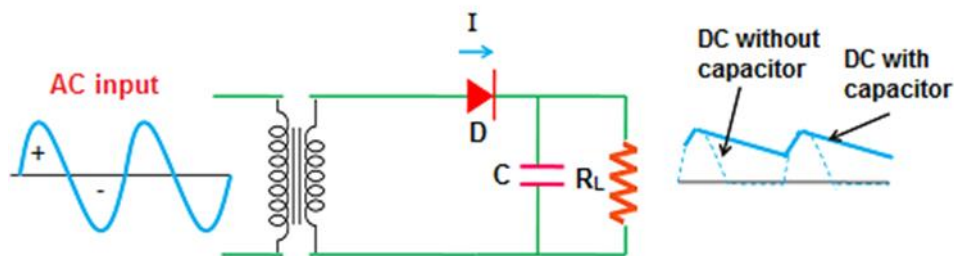
วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half wave rectifier) และวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น Full (wave rectifier) โดยในที่นี้เราจะใช้วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นแบบบริดจ์ Full wave (bridge rectifier) ในการออกแบบโดยมีลักษณะการทำงานดังนี้

วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์เป็นวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นชนิดหนึ่งซึ่งมีข้อดีคือสามารถใช้ร่วมกับหม้อแปลงธรรมดาได้ จโดยไม่จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงชานเตอร์แทปเซ็นเตอร์ (center tap transformer) โดยวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์บวกและวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

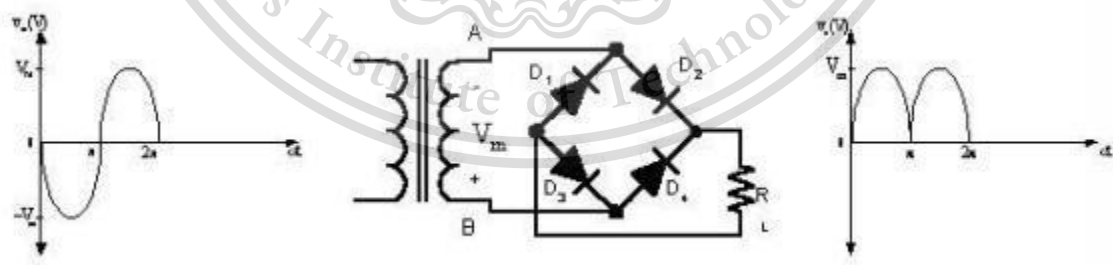
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.11 วงจรชนิดเรียงกระแสเต็มลูกคลื่นแบบบริดจ์

เมื่อทำการใส่สัญญาณขาเข้า(input) ซีกบวกของไฟฟ้ากระแสสลับ ไดโอดตัวที่D1และD4 จะอยู่ในสภาวะไบอัสตรง(forward bias) กระแสไฟฟ้าจึงไหลครบวงจรเกิดสัญญาณขาออก(output)โดยไดโอดตัวอื่นๆจะอยู่ในสภาวะไบอัสกลับ(reverse bias)เมื่อสัญญาณขาเข้า (input) สลับเป็นสัญญาณซีกลบ ไดโอดตัวที่D2และ D3จะอยู่ในสภาวะไบอัสตรงforward(bias)กระแสไฟฟ้าจึงไหลครบวงจรเกิดสัญญาณขาออก(output)โดยไดโอดตัวอื่นๆ จะอยู่ในสภาวะไบอัสกลับreverse(bias)

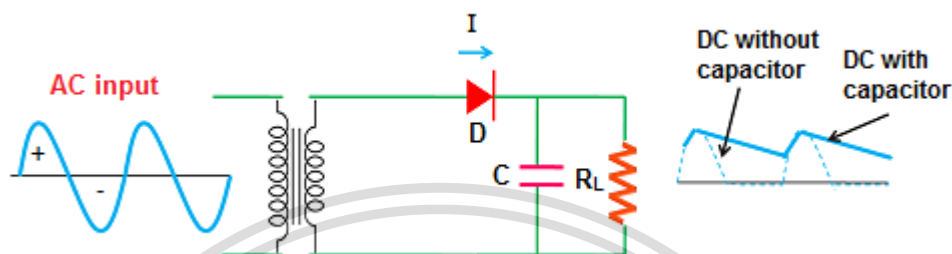


รูปที่2.12 แสดงการทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 วงจรกรองแรงดันกระเพื่อม (Ripple Filters)

วงจรฟิลเตอร์เป็นวงจรที่ใช้สำหรับกรองแรงดันไฟฟ้าจากวงจรเรกติไฟร์ให้มีการกระเพื่อมลดลง เนื่องจากแรงดันที่ได้จากวงจรเรกติไฟร์ที่เรียกว่าพัลส์เซตติงดีซี(pulsating DC)วงจรฟิลเตอร์ที่นิยมใช้ใน ปัจจุบันคือวงจรคาปาซิเตอร์ฟิลเตอร์จะอยู่ระหว่างวงจรเรกติไฟร์กับโหลด



รูปที่ 2.13 วงจรกรองแรงดันกระเพื่อม

วงจรคาปาซิเตอร์ฟิลเตอร์(Capacitor Filter Circuit) เมื่อมีแรงดันจากวงจรเรกติไฟร์มาป้อนที่ วงจรฟิลเตอร์จะทำให้ตัวเก็บประจุทำการสะสมประจุและเมื่อแรงดันไฟฟ้าจากวงจรเรกติไฟร์มีค่าต่ำกว่า แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุของฟิลเตอร์ตัวเก็บประจุจะคายประจุให้กับโหลดเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆดังรูป

### 2.7.1 วงจรรักษาระดับแรงดันคงที่ (Voltage Regulator)

วงจรรักษาระดับแรงดันคือ แรงดันที่จ่ายระหว่างไฟตรงไม่คงค่ากับโหลด มีหน้าที่จ่ายไฟตรง ให้ กับโหลดและรักษาแรงดันให้คงตัวขณะที่

- โหลดเปลี่ยน นั่นคือกระแสขาออกเปลี่ยนแปลง
- แรงดันของแหล่งจ่ายไฟตรงไม่คงค่าเปลี่ยนแปลง รวมถึงลรอบของลูกคลื่นด้วย (Ripple)
- อุณหภูมิของวงจรเปลี่ยนแปลง

สัญญาณที่ออกมาจากเอาต์พุตของวงจรกรองแรงดัน ซึ่งยังไม่เรียบเท่าที่ ควร ยังไม่มีการ เปลี่ยนแปลง ขึ้นๆลงๆ ในลักษณะคล้ายฟันเลื่อย เพราะว่าตัวเก็บประจะเก็บและคายประจุออกมา ตลอดเวลา ถ้าจะนำไปใช้งานเลยก็ได้แต่ต้องไม่ใช้งานกับงานที่ไม่ต้องการความละเอียดของ แหล่งจ่ายไฟ มากนัก ถ้าเป็นงานที่ต้องใช้ความละเอียดของแหล่งจ่ายไฟ วงจรนี้จะใช้งานไม่ได้หนทาง

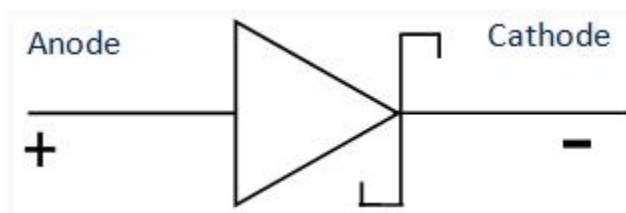
ที่จะนำไปแก้ไขคือ ใช้วงจรเรกกูเลเตอร์ซึ่งจะทำหน้าที่ปรับแต่งสัญญาณที่ไม่ราบอยู่นั้น ให้เรียบ จน เกือบเป็นไฟตรง DC ทั้งหมด

เปอร์เซ็นต์ Load Regulation คืออัตราส่วนระหว่างความแตกต่างของแรงดันตกคร่อมโหลด เมื่อโหลดมีความต้านทานต่ำสุด และ เมื่อโหลดมีความต้านทานสูงสุด มีสูตรดังนี้

$$\% \text{ Load Regulation} = \frac{V_{\text{ripple}}}{V_{DC}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 Schottky Diode



รูปที่ 2.14 Schottky diode

ชื่อของไดโอดนี้ได้รับหลังจากนักฟิสิกส์ชาวเยอรมันวอลเตอร์ H.Schottky นอกเหนือจากชื่อไดโอด Schottky มันจะเรียกว่า Schottky อุปสรรคไดโอดหรือไดโอดผู้ให้บริการร้อน นี่คือไดโอดที่มีทางแยกเคมีคอนดักเตอร์ - โลหะ

อุปกรณ์นี้สามารถแก้ไขความถี่ได้อย่างง่ายดายมากกว่า 300 MHz แรงดันตกไปข้างหน้าของมันยังต่ำมาก (0.15 ถึง 0.45 V) ส่งผลให้ความเร็วในการเปลี่ยนสูงชันและปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบทางแยกในไดโอดนั้นเกิดขึ้นจากโลหะ (เช่นทอง, ทังสเตน, โครเมียม, แพลตตินัม, โมลิบดีนัมหรือซิลิไซด์บางชนิด) และสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอนเจือด้วย N-type ที่นี้ขั้วบวกคือด้านโลหะและแคโทดเป็นด้านเคมีคอนดักเตอร์

### 2.8.1 ข้อดีของ Schottky Diode

- มีเวลาในการกู้คืนที่รวดเร็วเนื่องจากมีปริมาณการจับเก็บที่ต่ำมาก ดังนั้นไดโอดนี้จึงถูกใช้สำหรับแอปพลิเคชันสลับความเร็วสูง
- มีแรงดันไฟต่ำ
- มันมีความจุทางแยกต่ำ
- แรงดันตกคร่อมต่ำ

### 2.8.2 ข้อเสียของ Schottky Diode

- กระแสไฟรั่วย้อนกลับ
- ระดับแรงดันย้อนกลับต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.9 อุปกรณ์ชาร์จแบตเตอรี่(Battery charger)

เครื่องชาร์จแบตเตอรี่หรือเครื่องอัดประจุไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ใส่พลังงานลงในเซลล์สำรองหรือแบตเตอรี่แบบชาร์จซ้ำได้โดยบังคับให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

โพรโตคอลการชาร์จ (แรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าเป็นเวลานานเท่าใดและสิ่งที่จะต้องทำเมื่อชาร์จเสร็จแล้ว) ขึ้นอยู่กับขนาดและประเภทของแบตเตอรี่ที่ชาร์จ แบตเตอรี่บางประเภทมีความทนทานสูงสำหรับการชาร์จไฟเกิน (เช่นการชาร์จต่อหลังจากที่ชาร์จแบตเตอรี่เต็มแล้ว) และสามารถชาร์จใหม่ได้โดยการเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันคงที่หรือแหล่งจ่ายกระแสคงที่ขึ้นอยู่กับประเภทของแบตเตอรี่ เครื่องชาร์จแบบธรรมดาประเภทนี้จะต้องถูกตัดการเชื่อมต่อด้วยตนเองเมื่อสิ้นสุดรอบการชาร์จและแบตเตอรี่บางประเภทจำเป็นต้องใช้หรืออาจใช้ตัวจับเวลาเพื่อตัดกระแสไฟในเวลาที่กำหนดไว้โดยประมาณเมื่อการชาร์จเสร็จสมบูรณ์ แบตเตอรี่ประเภทอื่นไม่สามารถทนต่อการชาร์จไฟเกินได้รับความเสียหาย (ความจุลดลงอายุการใช้งานลดลง) ผ่านความร้อนหรือแม้กระทั่งระเบิด

เครื่องชาร์จแบบหยุดให้กระแสไฟก่อนข้างน้อยเพียงพอที่จะต่อต้านการคายประจุเองของแบตเตอรี่ที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน แบตเตอรี่บางประเภทไม่สามารถทนต่อการชาร์จแบบหยุดได้ทุกชนิด การพยายามทำเช่นนั้นอาจส่งผลให้เกิดความเสียหาย เซลล์แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนใช้ระบบเคมีซึ่งไม่อนุญาตให้มีการชาร์จแบบหยุดไม่ จำกัด

เครื่องชาร์จแบตเตอรี่ที่ช้าอาจใช้เวลาหลายชั่วโมงในการชาร์จให้เสร็จสมบูรณ์ เครื่องชาร์จอัตราสูงอาจคืนค่าความจุส่วนใหญ่ได้เร็วกว่ามาก แต่เครื่องชาร์จอัตราสูงอาจเกินกว่าที่แบตเตอรี่บางประเภทจะทนได้ แบตเตอรี่ดังกล่าวต้องการการตรวจสอบแบตเตอรี่อย่างเข้มข้นเพื่อป้องกันการชาร์จไฟเกิน รถยนต์ไฟฟ้าต้องการเครื่องชาร์จอัตราสูง สำหรับการเข้าถึงสาธารณะการติดตั้งที่ชาร์จดังกล่าวและการสนับสนุนการจัดจำหน่ายเป็นปัญหาในการนำเสนอรถยนต์ไฟฟ้า

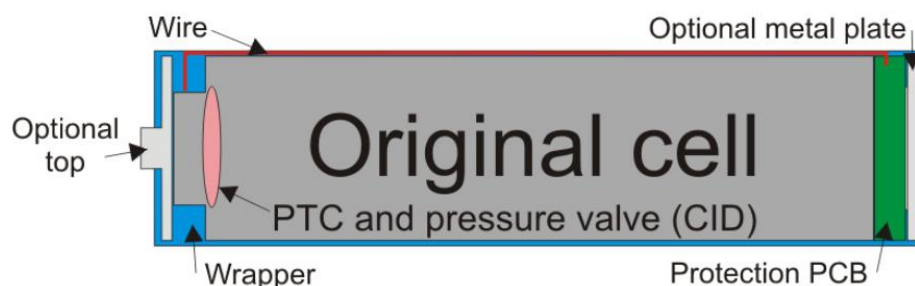
## 2.10 แบตเตอรี่ขนาด 18650

แบตเตอรี่ 18650 ถูกเรียกตามเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของตัว (18mm x 65mm) ด้านในตัวแบตเตอรี่เป็น cell ชนิด Lithium - Ion แบตเตอรี่ชนิดนี้ถูกใช้มาค่อนข้างนานแล้ว เพียงแต่อยู่ในรูปแบบของ Battery Pack จึงไม่ค่อยคุ้นเคยกันมากนัก แต่ในปัจจุบันเนื่องจากแบตเตอรี่ 18650 สามารถจ่ายกระแสได้สูงกว่าแบตเตอรี่ขนาด AA และความจุที่สูงกว่ามาก จึงเป็นที่นิยมแพร่หลายในการใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก ไฟฉายแรงสูง สว่านไฟฟ้า หรือแม้แต่ ชาร์ตแบตสำรอง หรือ Power Bank นั่นเอง แต่ด้วยคุณสมบัติเฉพาะของแบตเตอรี่ชนิด Lithium นั้นไม่เหมือนแบตเตอรี่ธรรมดาเช่น Ni-mh หรือแบตเตอรี่แห้ง ตัวแบตเตอรี่เองต้องจึงมีการออกแบบระบบป้องกันให้มีความปลอดภัยมากขึ้น ซึ่งแต่ละ cell ปรกติจะมีชุดป้องกันด้วยกัน 3 ชั้น โดยระบบป้องกันแบบ PCT และ CID ตามปรกติจะมีอยู่ใน cell อยู่แล้ว ส่วน Protected PCB นั้นขึ้นอยู่กับผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานและเอกสารนี้อาจจะถูกรับไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.15 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่ 18650

1. PCT จะเป็นตัวป้องกันความร้อนของ Cell เกินพิกัด และตัดการทำงานของแบตเตอรี่ลง โดยจะสามารถกลับมาใช้งานได้เมื่ออุณหภูมิเข้าสู่สภาวะปกติ
  2. CID นั้นจะเป็นวาล์วป้องกันความดันภายใน Cell เกินพิกัดจนอาจนำไปสู่การระเบิดได้ โดยวาล์วตัวนี้จะทำหน้าที่ตัดการทำงานของ Cell ถาวร ไม่สามารถคืนสภาวะกลับมาใช้ใหม่ได้อีก หากสังเกตที่ขั้วของแบตเตอรี่จะพบรูเล็กๆ ที่ถูกออกแบบไว้สำหรับระบายแก๊สหากมีแรงดันผิดปกติภายใน cell นั้นเอง
  3. Protected PCB หรือเรียกกันว่า 18650 แบบมีวงจร ซึ่งเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่ฝังไว้ภายในชุดของตัวแบตเตอรี่ ทำหน้าที่คอยป้องกันการใช้กระแสเกิน (Over Current) ป้องกันแรงดันชาร์ตเกิน (Over Charge Voltage) และป้องกันการใช้ไฟในระดับโวลต์ที่ต่ำกว่ากำหนด (Over Discharge) โดยภายในจะมี IC ที่คอย ตรวจสอบอยู่ตลอดเวลาโดย IC ถูกออกแบบให้มีการกินกระแสน้อยมากๆ ในระดับไมโครแอมป์ ซึ่งแทบจะไม่ส่งผลกับปริมาณแบตเตอรี่เลย
- ระดับแรงดันใช้งานปกติของแบตเตอรี่ชนิด lithium จะอยู่ที่ 3.7V โดยแรงดันที่ชาร์จเต็มจะอยู่ที่ 4.2V เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะของ Cell ชนิด lithium นั้น หากมีดีดกระแสไฟจากแบตเตอรี่จนแรงดันต่ำกว่า 2.5V นั้นจะทำให้ cell เสียหายถาวร ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (เครื่องชาร์ตจะไม่ยอมชาร์ตหากแรงดันใน Cell ต่ำกว่าที่กำหนด) ฉะนั้น วงจรป้องกัน Protected PCB จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ทั่วไป โดยผู้ใช้ไม่ต้องกังวลว่าจะใช้งานจากแบตเตอรี่หมดจน cell พัง อีกทั้งหากมีการดีดกระแสเกินกำหนดหรือมีการใช้แรงดันชาร์ตเกินพิกัด วงจรจะทำการตัดการทำงานอัตโนมัติ ส่วน 18650 แบบไม่มีวงจร นิยมใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกออกแบบมาเฉพาะซึ่งมีวงจรควบคุมอยู่ภายนอกแล้ว เช่น วงจร BMS หรือ PCM ซึ่งมีหลักการทำงานคล้ายกัน จึงไม่จำเป็นต้องมีวงจรป้องกันภายในตัว cell ทำให้ประหยัดต้นทุนในการผลิต มักพบเห็นใน Battery Pack

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงาน

### 3.1 คุณสมบัติของอุปกรณ์

ชิ้นงานระบบการประจุแบตเตอรี่ Li-Po โดยใช้ TENG เนื่องจาก TENG สามารถให้พลังงานไฟฟ้า เราต้องการที่จะเก็บพลังงานนั้นไว้ในแบตเตอรี่ Li-Po โดยวงจรประกอบไปด้วย Rectifier และ Charger

#### 3.1.1 คุณสมบัติของ TENG (Triboelectric Nanogenerator)

TENG เป็นแหล่งกำเนิดกำลังงานไฟฟ้า ที่สามารถจ่ายแรงดันและกระแสจากตัวเองได้เมื่อได้รับปริมาณทางฟิสิกส์ที่เหมาะสม เช่น การกระแทกหรือเสียดสี แต่กำลังที่ได้ออกมานั้นมีปริมาณน้อยโดย TENG มีหลักการทำงานแบบไฟฟ้าสถิตซึ่งจะได้แรงดันที่สูง แต่มีกระแสน้อยในระดับนาโนแอมป์ถึงไมโครแอมป์

#### 3.1.2 การเลือกใช้อุปกรณ์

กำลังงานไฟฟ้าที่ได้จาก TENG มีค่าน้อยมากระดับไมโครวัต โดยที่ TENG ให้แรงดันที่สูงแต่มีกระแสน้อยทำให้การเลือกใช้อุปกรณ์จึงต้องเหมาะสม อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้จะต้องทนแรงดันได้สูงเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายภายในวงจรและอุปกรณ์จะต้องสูญเสียพลังงานให้น้อยที่สุด

### 3.2 อุปกรณ์ภายในวงจร

#### 3.2.1 แผ่นอลูมิเนียม (Aluminum Tape)

#### 3.2.2 Teflon (PTFE)

#### 3.2.3 SK310A (Schottky Diode)

#### 3.2.4 Capacitor

#### 3.2.5 LTC4071 (IC Charger)

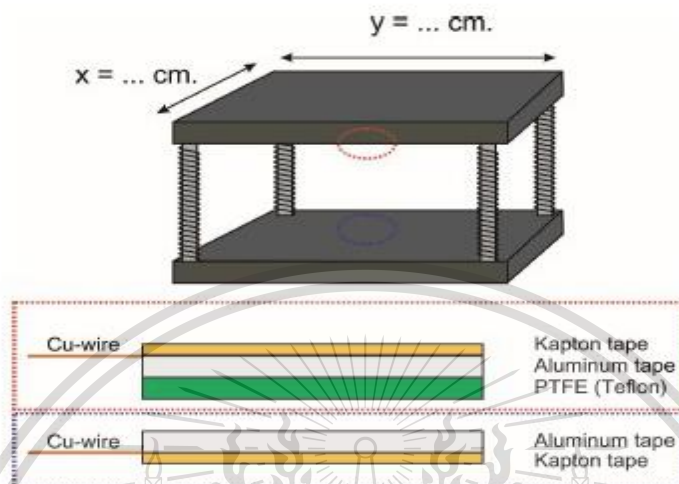
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

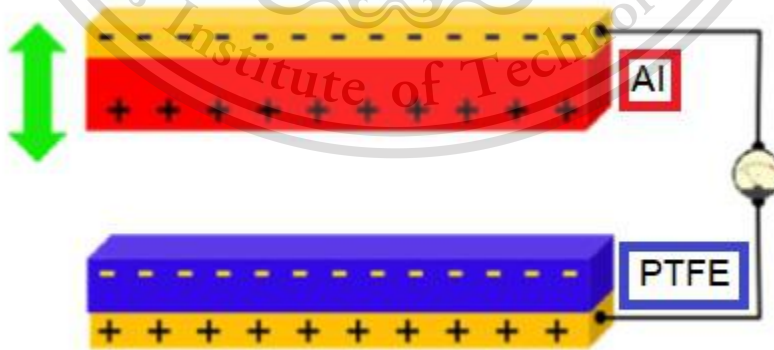
### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

#### 3.3.1 ออกแบบโครงสร้างแท่นเหยียบ TENG



รูปที่ 3.1 โครงสร้างแท่นเหยียบ TENG

เมื่อ TENG (Triboelectric Nanogenerator) ได้รับปริมาณทางฟิสิกส์เช่นการเสียดสีหรือกระทบทำให้เกิดการจ่ายแรงดันออกมา แต่แรงดันที่ได้ขึ้นอยู่กับวัสดุและขนาดของ TENG โดยชิ้นงานของเราได้ออกแบบให้ TENG มีขนาด 15x15 cm โดยประกอบไปด้วย 1. แผ่นอลูมิเนียม 2. แผ่น Teflon 3. แผ่นฉนวน (Kapton tape) นำมาประกอบดังรูปที่ 3.1 วัสดุทั้ง 2 ชั้นต้องได้รับการเสียดสีและแยกออกจากกันเพื่อให้เกิดความต่างศักย์จนทำให้กระแสสามารถไหลได้



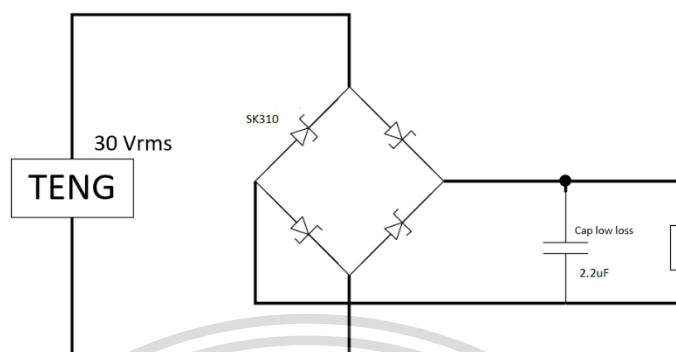
รูปที่ 3.2 การเกิดแรงดันของ TENG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

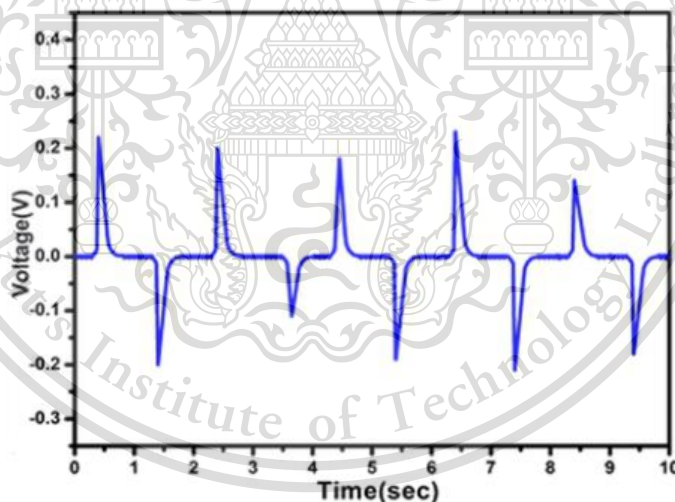
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.3.2 Rectifier and Filter



รูปที่ 3.3 วงจร Rectifier

แรงดันที่ได้ออกจาก TENG มีลักษณะคล้ายไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating current) ทำให้ต้องผ่านวงจร Rectifier ก่อน เพื่อแปลงไฟเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current) เพื่อสามารถนำแรงดันนี้ไปใช้กับ IC charger และนำไปต่อเข้ากับแบตเตอรี่ขนาด 18650



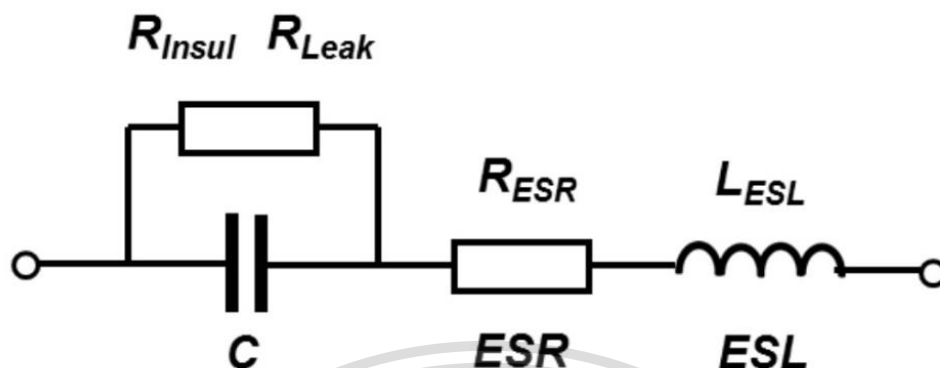
รูปที่ 3.4 แรงดันเอาต์พุตจาก TENG

กำลังไฟฟ้าน้อยจาก TENG ทำให้อุปกรณ์ที่ใช้จะต้องเป็นแบบสูญเสียกำลังงานน้อยที่สุด จึงเลือกใช้ Schottky Diode เพราะมีการสูญเสียกำลังงานน้อย ในส่วนของ filter จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่า Impedance ต่ำเพื่อลดการสูญเสียกำลังงานภายในตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.5 วงจรภายในตัวเก็บประจุ

เมื่อได้กระแสและแรงดันนำกระแสที่วัดได้นำมาใช้หาค่า C จากสูตร

กำหนดให้  $I_o = 9 \mu\text{A}$  ค่าแรงดันกระแสเพิ่มที่รับได้  $\Delta V = 1 \text{ Vpp}$  ความถี่ที่ใช้ทดลอง  $2 \text{ Hz}$

$$C = \frac{I_o}{F_r \Delta V} \quad (3.1)$$

$$C = \frac{9 \times 10^{-6}}{2(2) \times 1}$$

$$C = 2.25 \mu\text{F}$$

ดังนั้นเลือกใช้ตัวเก็บในประจุนี้นวงจรมูลค่า  $2.2 \mu\text{F}$  มาเป็น Filter เพื่อใช้กรองแรงดัน

เมื่อได้ค่า C ที่ต้องการก็ต้องคำนวณค่าแรงดันที่ทนได้ โดยที่กำหนด Safety Margin = 1.75 เท่า

$$C_{wv} = 1.75 \left( V_o + \frac{\Delta V}{2} \right) \quad (3.2)$$

$$C_{wv} = 1.75 \left( 5 + \frac{1}{2} \right)$$

$$C_{wv} = 9.625 \text{ V} \approx 10 \text{ V}$$

เมื่อทำการคำนวณค่าแล้ว จะได้ว่าควรใช้  $C_{wv} \geq 9.625 \text{ V}$  เมื่อกำหนด Safety Margin = 1.75 เท่า ซึ่ง

จากในบทเรียนวิชา Electronic Engineering I ได้กำหนดว่าอัตราภาวทน แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

จะต้องมีค่าอย่างน้อยที่สุด 1.25 - 2 เท่า

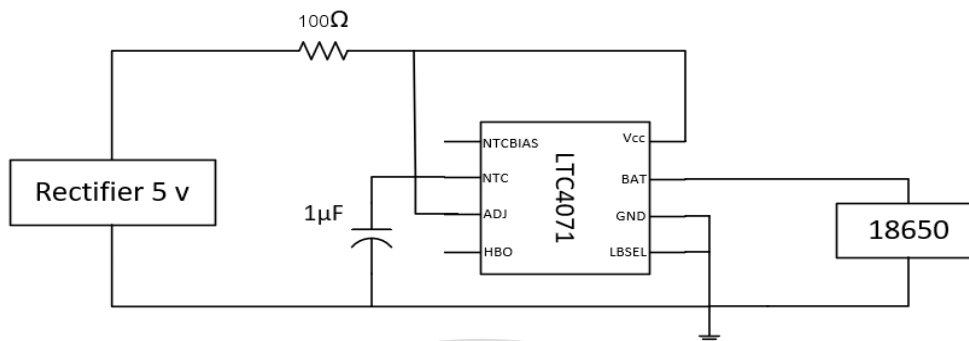
เพราะฉะนั้นตัวเก็บประจุสามารถทนแรงดันได้  $10 \text{ V}$  โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.3.3 วงจร Charger



#### รูปที่ 3.6 วงจร Charger

หลังจากได้แรงดันหลังผ่านวงจร Rectifier ที่ 5 V แล้ว ซึ่ง LTC4071 (IC Charger) ทำงานที่แรงดัน 4.29 V ที่เลือกใช้อุปกรณ์ตัวนี้เพราะว่า อุปกรณ์ตัวนี้สามารถทำงานในกระแสที่ต่ำได้เนื่องจาก TENG มีกระแสที่ต่ำมากขนาดนาโนแอมป์ถึงไมโครแอมป์ จากข้อมูลใน Datasheet ตัวอุปกรณ์สามารถเริ่มทำงานที่กระแส 550nA ซึ่งเพียงพอการทำงานของระบบนี้ และสามารถคำนวณกระแสชาร์จได้ดังนี้ กำหนดให้ แรงดันจาก Rectifier ( $V_{in}$ ) = 5 V ค่าแรงดันที่แบตเตอรี่ที่น้อยสุดของ 18650 = 3.2 V

$$I_{MAX\_CHARGER} = \frac{(V_{in} - V_{BAT\_MIN})}{R_{in}} \quad (3.3)$$

$$I_{MAX\_CHARGER} = \frac{(5 - 3.2)}{100}$$

$$I_{MAX\_CHARGER} = 18 \text{ mA}$$

และสามารถคำนวณหา กำลังงานไฟฟ้าจาก สูตรหา กำลังงานไฟฟ้า  $P = \frac{V^2}{R}$

$$P = \frac{(V_{in} - V_{BAT\_MIN})^2}{R_{in}} \quad (3.4)$$

$$P = \frac{(5 - 3.2)^2}{100}$$

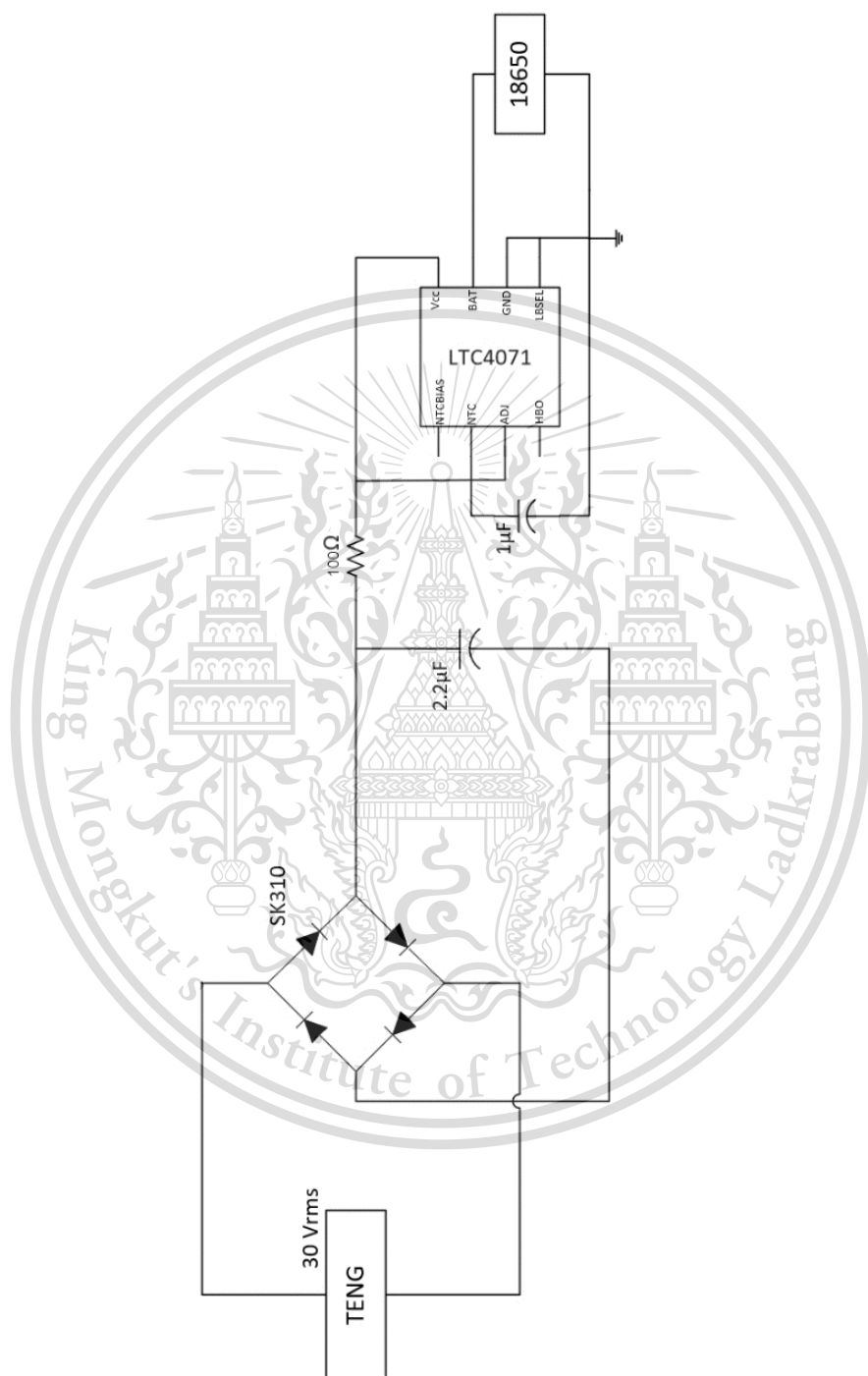
$$P = 32.4 \text{ mW}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 3.4 วงจรรวม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปยังหน่วยงานภายนอกโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.8 ลาย PCB ด้าน Top layer



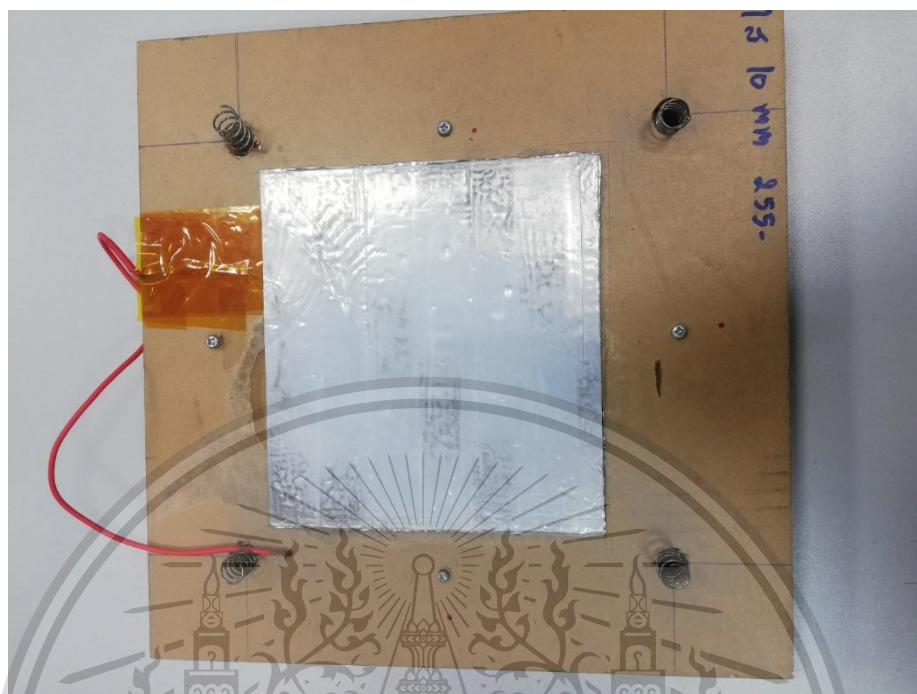
รูปที่ 3.9 ลาย PCB ด้าน Bottom layer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

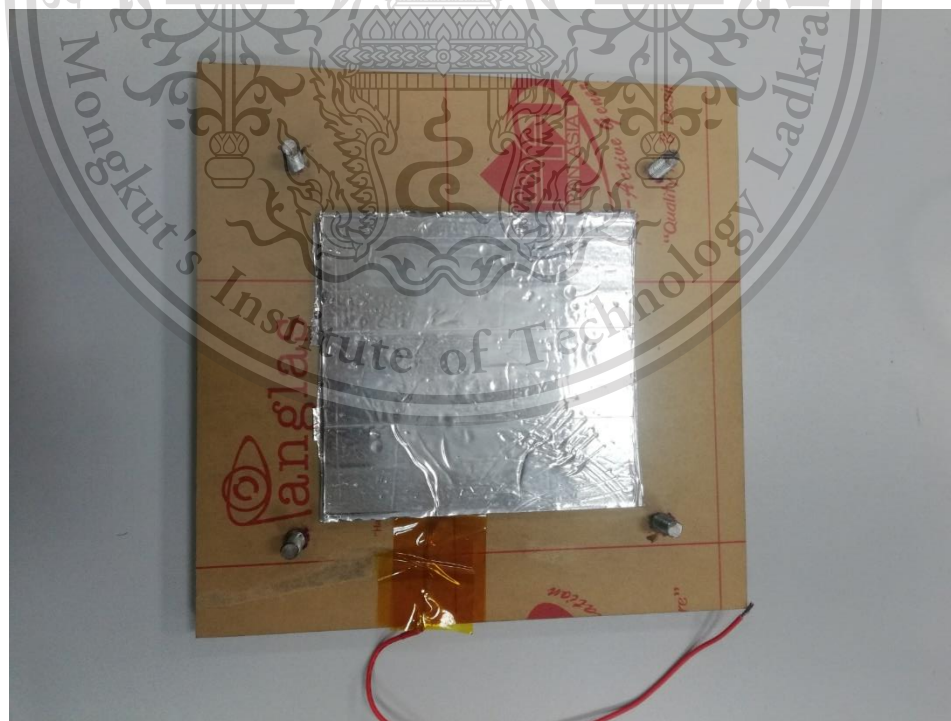
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.5 ภาพชิ้นงานรวมทั้งหมด



รูปที่ 3.10 ชิ้นงานด้านซัลเฟอร์ (Teflon)

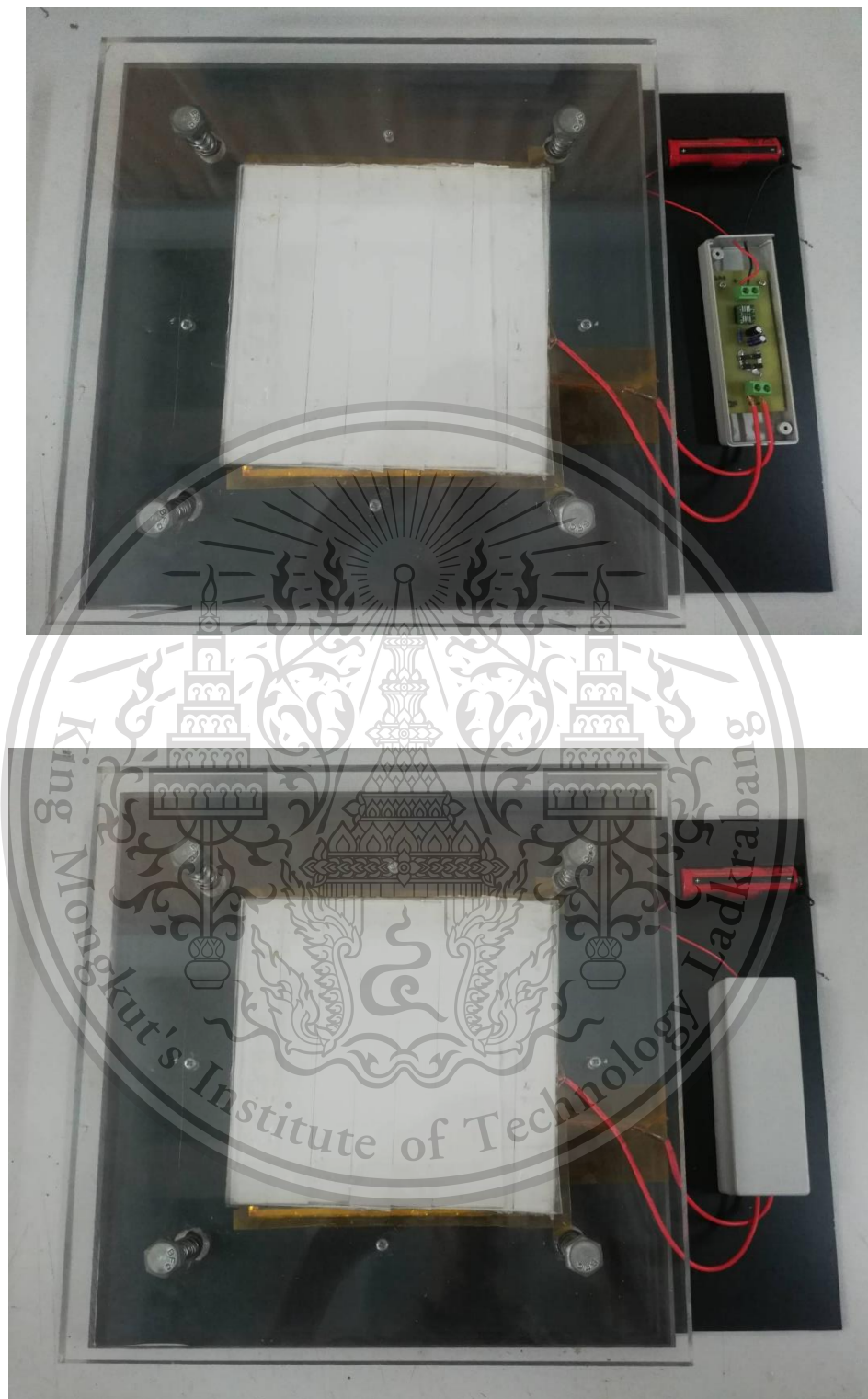


รูปที่ 3.11 ชิ้นงานด้านอลูมิเนียม (Aluminum Tape)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.12 ภาพรวมชิ้นงานทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

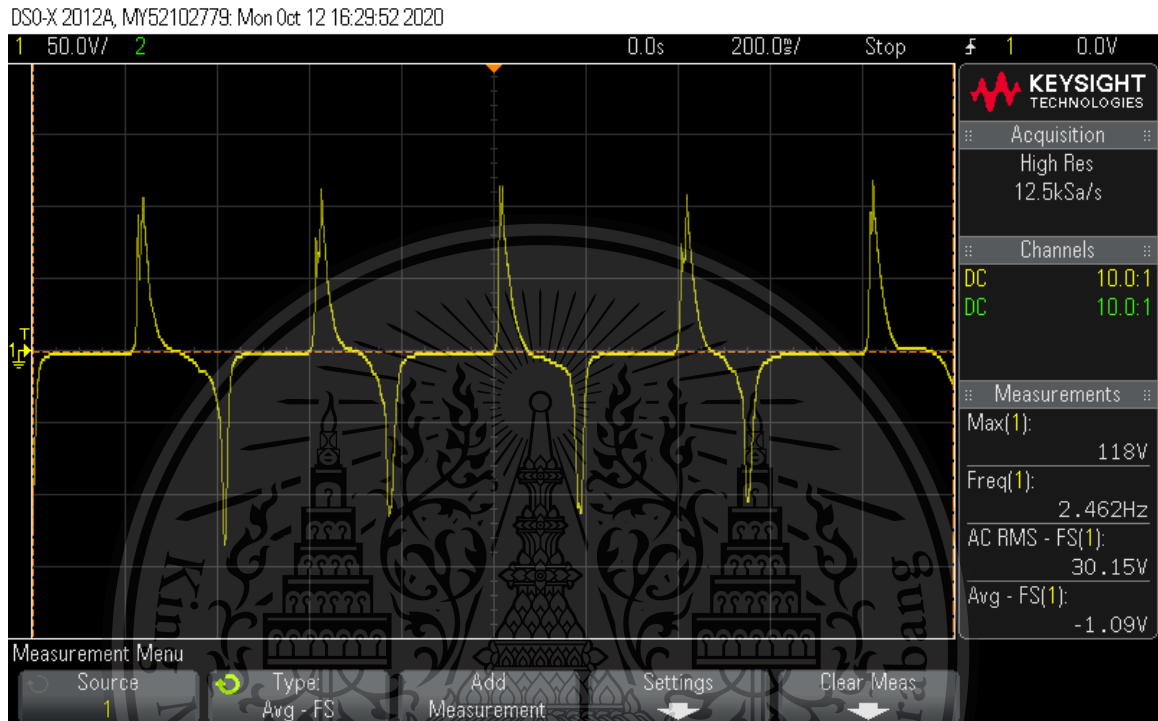
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 แรงดันที่วัดได้จาก TENG (Triboelectric Nanogenerator)



รูปที่ 4.1 แรงดันที่วัดได้จาก TENG

จากวัสดุที่ใช้ทำ 2 ชนิดที่มีขั้วทางไฟฟ้าต่างกันที่มีหลักการทำงานแบบไฟฟ้าสถิต แผ่นที่เลือกใช้ 2 ชนิดชนิดที่เป็นขั้วบวก คือ แผ่นอลูมิเนียม และชนิดที่เป็นขั้วลบคือ แผ่นเทฟลอน (Teflon) เมื่อนำมาทำให้เกิดการถ่ายเทประจุจะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่สูงแต่มีกระแสที่ต่ำระดับไมโครแอมป์ ซึ่งแรงดันที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.1.1 ได้แรงดันสูงสุด ( $V_{max}$ ) เท่ากับ 118 V และแรงดันเฉลี่ยกำลังสอง ( $V_{rms}$ ) เท่ากับ 30.15 V

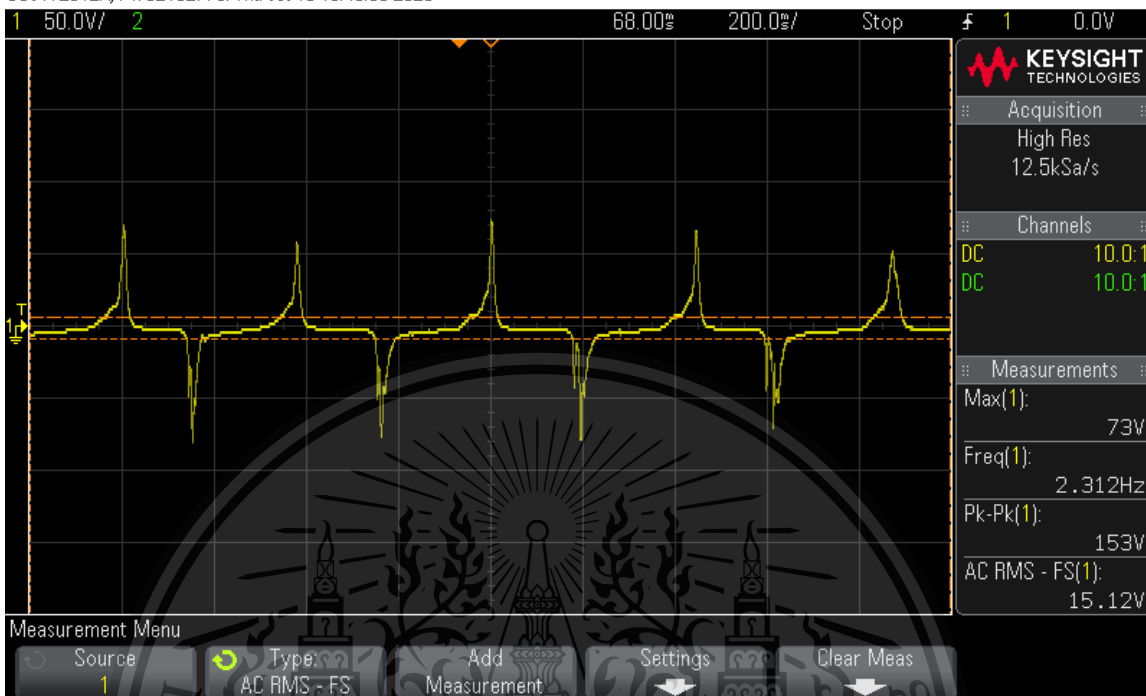
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 4.2 กระแสที่วัดได้จาก TENG (Triboelectric Nanogenerator)

DSO-X 2012A, MY52102779: Thu Oct 15 13:45:39 2020



รูปที่ 4.2 แรงดันเมื่อต่อโหลด 10MΩ

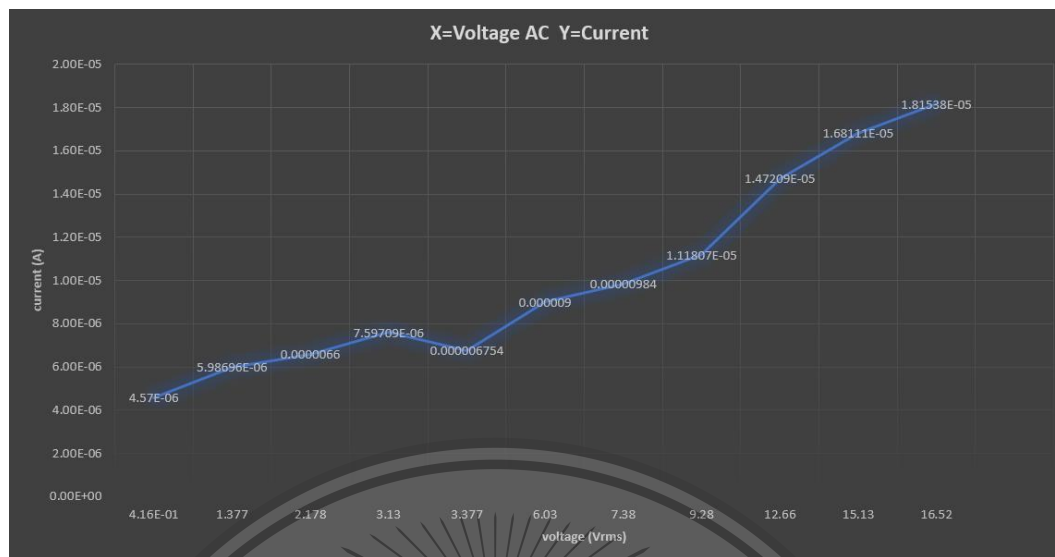
DSO-X 2012A, MY52102779: Thu Oct 15 13:50:38 2020



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รูปที่ 4.3 แรงดันเมื่อต่อโหลด 6MΩ ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

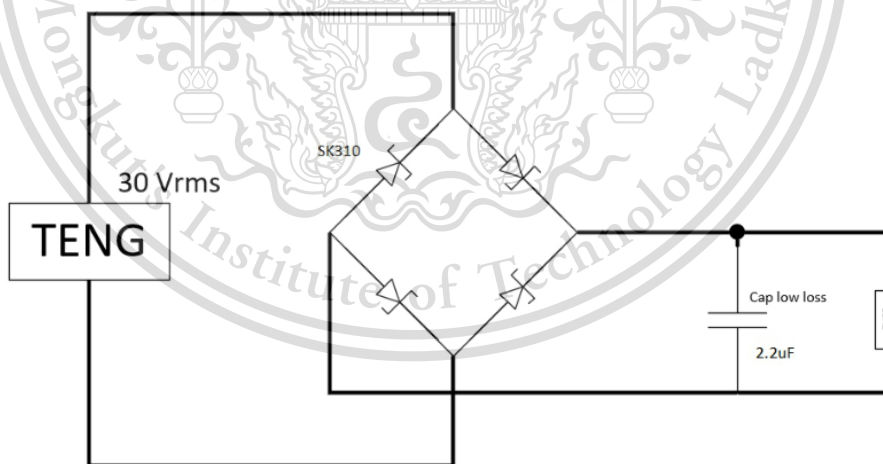
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์กระแสและแรงดัน

แรงดันที่วัดได้จากการต่อโหลดค่า 100kΩ ,300kΩ ,500kΩ ,700kΩ ,1MΩ ,3MΩ ,5MΩ ,6MΩ ,7MΩ ,9MΩ ,10MΩ นำค่าแรงดันที่ได้คำนวณหากระแสจากกฎของโอห์ม ( $V=IR$ ) เลือกใช้  $C = 2.2\mu F$  ใช้สร้างวงจร Rectifier จาก Schottky Diode เบอร์ SK310A



รูปที่ 4.5 วงจร Rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

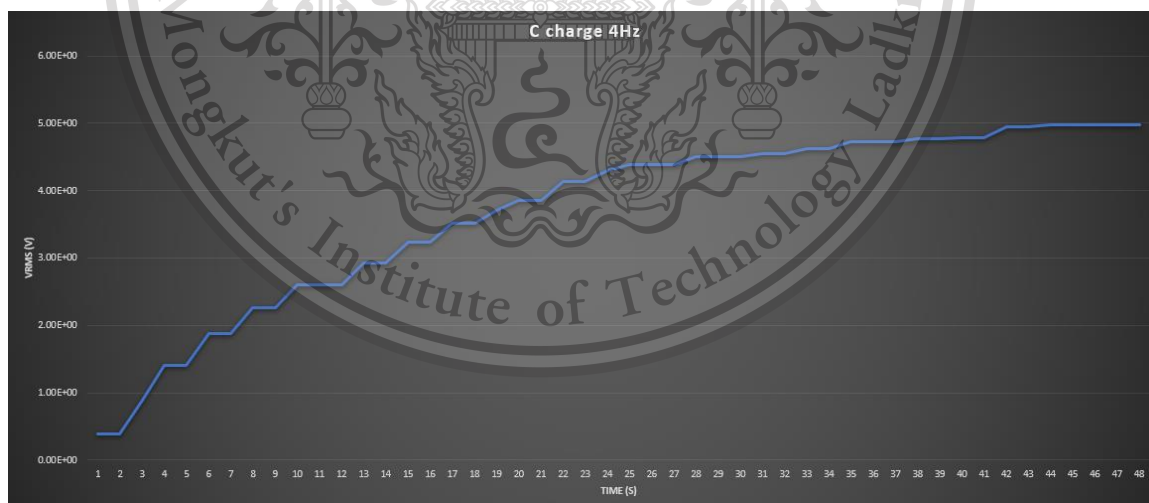
### 4.3 แรงดันขาออกของวงจร Rectifier



รูปที่ 4.6 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ

หลังจากผ่านวงจร Rectifier จะได้ไฟตรงออกมา (Direct Current) แรงดันที่วัดได้นั้นคือแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ จากรูปที่ 4.2.4 หลังจากนั้นทดลองหาช่วงที่ตัวเก็บประจุเต็มและตัวเก็บประจุคาย

### 4.4 กราฟการชาร์จและคายของตัวเก็บประจุ

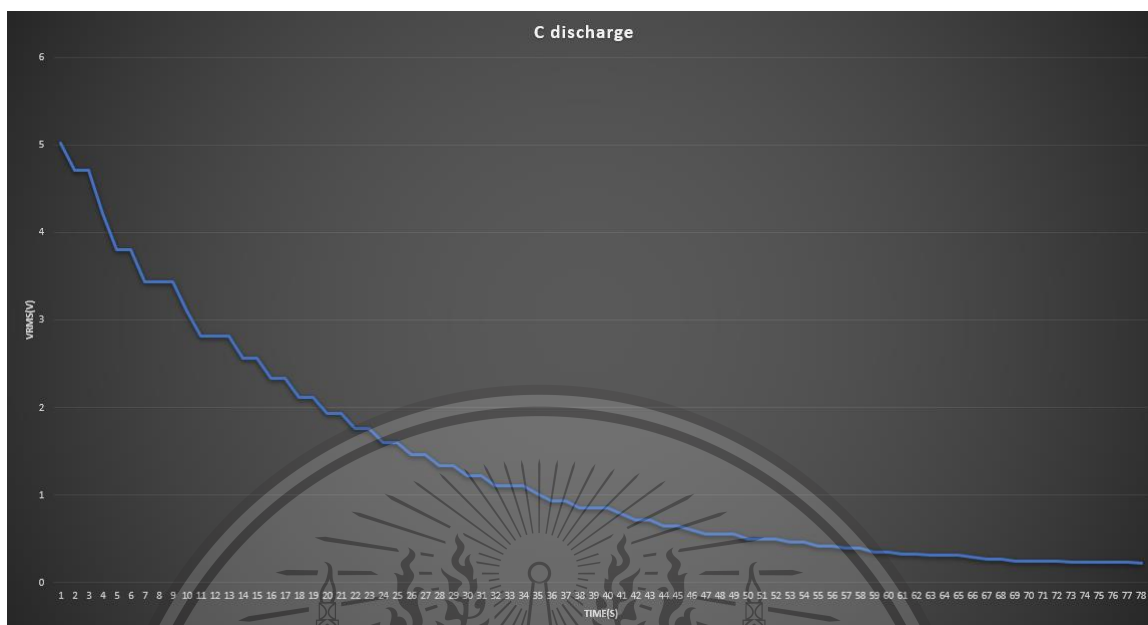


รูปที่ 4.7 กราฟการชาร์จของตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.8 กราฟการคายประจุของตัวเก็บประจุ

ในช่วงที่ตัวเก็บประจุคายประจุออกมาจะเป็นช่วงที่มีกระแสไหลเข้า IC Charger ในส่วนต่อไปทำให้สามารถคำนวณกระแสได้จากสูตร

$$V_c = \frac{1}{C} \int_0^t I_c dt \quad (4.1)$$

จากกราฟช่วงที่มีแรงดันพอสำหรับทำให้ IC Charger ทำงานที่ 4.2 V – 5 V

$$I_c = \frac{C(V_2 - V_1)}{t_2 - t_1} \quad (4.2)$$

$$I_c = \frac{2.2 \mu (5.02 - 4.2)}{1 - 4}$$

$$I_c = 601 \text{ nA}$$

ในส่วนต่อไปจะต้องเลือก IC Charge ที่ทำงานที่กระแส 600 nA และแรงดันตั้งแต่ 4.2 V

จากการค้นคว้าในส่วนของ Charger จะใช้ LTC4071 เป็น IC Charger ซึ่งเริ่มทำงานที่กระแส 550 nA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.5 ทดลองการทำงานของ LTC4071

ทำการทดลองโดยจ่าย Input ด้วย Function Generator ไปยังวงจรที่ออกแบบไว้ โดยค่า Input เริ่มตั้งแต่ 1 - 6.4 V (Vmax) และทำการวัด Output จากส่วน Rectifier และ ส่วน Output ของ IC Charger ที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยค่าที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.4.3

INPUT AC (Vmax)	Rectifier	OUTPUT DC
1	0.81	0.7
2.2	1.2	1.11
3.2	1.91	1.65
4.0	2.57	2.13
4.4	3.8	3.2
4.6	3.8	3.6
4.8	4.2	3.8
5.0	4.29	4.226
5.2	4.36	4.226
5.4	4.48	4.226
5.6	4.54	4.226
5.8	4.66	4.235
6.0	4.82	4.23
6.4	5.1	4.23

ตารางที่ 4.1 การทดลองการทำงานของ LTC4071

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.6 ทดลองชาร์จจาก TENG เข้า Battery 18650 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ทำการวัดแรงดันภายใน Battery 18650 ก่อนทำการทดลองและหลังทำการทดลอง จากนั้นใช้ TENG ชาร์จอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จำนวนการทดลอง 5 ครั้งเพื่อดูผลว่ามีแรงดันเพิ่มขึ้นมากน้อยเท่าไร ในแต่ละวันที่ชาร์จผลที่ได้เป็นไปตามรูปที่ 4.4.4

วันที่	เวลา (ชม.)	แรงดันก่อนชาร์จ	แรงดันหลังชาร์จ	$\Delta V$ (mV)
1	1	3.13379	3.13473	0.94
2	1	3.134	3.13511	1.11
3	1	3.13432	3.1349	0.58
4	1	3.13351	3.13459	1.08
5	1	3.12196	3.1252	3.24

ตารางที่ 4.2 การชาร์จใน 1 ชั่วโมง

จากการทดลองเมื่อนำตัวเลขความแตกต่างของแรงดันก่อนวัดและหลังวัดแบตเตอรี่มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตพบว่า ในเวลา 1 ชั่วโมง TENG สามารถทำให้แรงดันเพิ่มขึ้นเฉลี่ยชั่วโมงละ 1.39 mV แต่เนื่องจากการคำนวณแบบคร่าวๆ เนื่องจากการชาร์จแบตเตอรี่ในแต่ละครั้งจากตารางจะเห็นได้ว่าเป็นค่าที่ไม่คงที่ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของ TENG ในแต่ละวันที่ทำการชาร์จและ TENG ในปัจจุบันก็เป็นกรณีศึกษาอยู่จึงขอสรุปการทดลองนี้ว่า การใช้ TENG เพื่อนำมาเป็นแหล่งพลังงานสำรองหรือพลังงานทางเลือกสามารถใช้ได้แต่ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาสร้าง ,รูปแบบการทำงานของ TENG และการออกแบบโครงสร้างภายใน TENG และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้หลายวิธีเช่น การใช้วัสดุที่มีประสิทธิภาพสูง การเพิ่มขนาดพื้นที่ของ TENG และการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์เข้ามาเป็นตัวช่วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ TENG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 5

### วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ในช่วงแรกของโครงการเป็นไปตามที่ต้องการ โดยแรงดันที่ได้รับจาก TENG (Triboelectric Nanogenerator) ขนาดพื้นที่ที่ใช้  $15 \times 15$  cm ได้แรงดันที่สูงถึง 118 V หลังจากที่ได้แรงดันมาแล้ว นำแรงดันที่ได้มาทดลองต่อโหลดเพื่อหากระแสและจึงนำกระแสที่ได้ไปคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุได้ค่า  $2.77 \mu\text{F}$  ทำการสร้างวงจร Rectifier เพื่อให้แรงดันจาก TENG ที่มีลักษณะคล้ายไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating current) ให้กลายเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current) เพื่อนำไปใช้กับ LTC4071 แรงดันที่วัดได้มีค่า 5.2 V ที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่ง LTC4071 เริ่มทำงานที่แรงดัน 4.29 V และทำการชาร์จด้วย TENG เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลที่ได้คือ สามารถชาร์จให้แรงดันเพิ่มขึ้นได้ชั่วโมงละ 1.39 mV

#### 5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

1. TENG เป็นวัสดุที่มีการทำงานแบบไฟฟ้าสถิตเพราะฉะนั้นจึงต้องใช้เวลาในการเหยียบนานเพื่อให้วัสดุได้มีการเสียดสีกันเพื่อเกิดการถ่ายเทประจุ
2. แรงดันที่ได้จาก TENG ขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่สัมผัส ยิ่งเป็นแผ่นที่กว้างยิ่งได้แรงดันที่สูง ทำให้ในบางครั้งมีการเหวี่ยงของแรงดัน
3. ประสิทธิภาพของ TENG มีค่อนข้างน้อยจึงต้องมีการเพิ่มประสิทธิภาพจากการใช้วงจรภายนอกเพื่อให้

เอกสารนี้เป็นถึงค่าที่ต้องการอย่างรวดเร็วการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บรรณานุกรม

- [1] Navjot Kaur. (2016) . Effective energy harvesting from a single electrode based triboelectric nanogenerator จาก <https://www.nature.com/articles/srep38835>
- [2] ดร.สายชล ศรีแป้น. (2562). เสื้อผ้าอัจฉริยะที่สามารถควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ โดยไม่ต้องใช้แบตเตอรี่ จาก <http://www.thaiphysoc.org/article/91/>
- [3] จิตรยุทธ จุณภาด. (2560). ไฟฟ้าสถิตย์ (Static Electricity) .จาก <http://www.geocities.ws/jitrayut/electrostatics.html>
- [4] <https://thaiconverter.com/article/8/มาทำความเข้าใจกับแบตเตอรี่> 18650
- [5] วงจรเรียงกระแส. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://pattaradech.blogspot.com/> .(วันที่ค้นข้อมูล : 13 ตุลาคม 2563)
- [6] วงจรเรียงกระแส. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <https://sayyedhamid.blogspot.com> .(13 ตุลาคม 2563)
- [7] วงจรเรียงกระแส. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <https://www.audioasylum.com/> .(วันที่ค้นข้อมูล : 14 ตุลาคม 2563)
- [8] วงจรเรียงกระแส. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <https://www.thitiblog.com/blog/> .(วันที่ค้นข้อมูล : 15 ตุลาคม 2563)
- [9] รศ.ดร.วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์. (2563). ไทรโบอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์: คำตอบสำหรับพลังงานยุคใหม่ (รายงานผลการวิจัย). สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

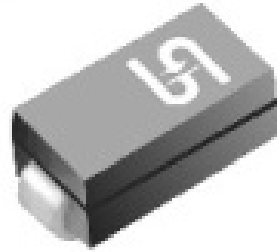
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## Surface Mount Schottky Barrier Rectifier

### FEATURES

- Low power loss, high efficiency
- Ideal for automated placement
- Guardring for overvoltage protection
- High surge current capability
- Moisture sensitivity level: level 1, per J-STD-020
- Compliant to RoHS Directive 2011/65/EU and in accordance to WEEE 2002/96/EC
- Halogen-free according to IEC 61249-2-21 definition



### MECHANICAL DATA

**Case:** DO-214AC (SMA)

Molding compound, UL flammability classification rating 94V-0

Base P/N with suffix "G" on packing code - halogen-free

Base P/N with prefix "H" on packing code - AEC-Q101 qualified

**Terminal:** Matte tin plated leads, solderable per JESD22-B102

Meet JESD 201 class 1A whisker test

with prefix "H" on packing code meet JESD 201 class 2 whisker test

**Polarity:** Indicated by cathode band

**Weight:** 0.07 g (approximately)

**DO-214AC (SMA)**

MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T <sub>A</sub> =25°C unless otherwise noted)											
PARAMETER	SYMBOL	SK 32A	SK 33A	SK 34A	SK 35A	SK 36A	SK 39A	SK 310A	SK 315A	SK 320A	Unit
Maximum repetitive peak reverse voltage	V <sub>RRM</sub>	20	30	40	50	60	90	100	150	200	V
Maximum RMS voltage	V <sub>RMS</sub>	14	21	28	35	42	63	70	105	140	V
Maximum DC blocking voltage	V <sub>DC</sub>	20	30	40	50	60	90	100	150	200	V
Maximum average forward rectified current	I <sub>F(AV)</sub>	3									A
Peak forward surge current, 8.3 ms single half sine-wave superimposed on rated load	I <sub>FSM</sub>	70									A
Maximum instantaneous forward voltage (Note 1) @ 3 A	V <sub>F</sub>	0.55			0.72		0.85		0.95		V
Maximum reverse current @ rated VR T <sub>J</sub> =25 °C T <sub>J</sub> =100 °C T <sub>J</sub> =125 °C	I <sub>R</sub>	0.5			0.2		0.1				mA
		10			5						
					10		0.5				
Voltage Rate of Change (Rated V <sub>R</sub> )	dV/dt	10000									V/μs
Typical thermal resistance	R <sub>θJL</sub>	25									°C/W
	R <sub>θJA</sub>	66									
Operating junction temperature range	T <sub>J</sub>	- 55 to +150									°C
Storage temperature range	T <sub>STG</sub>	- 55 to +150									°C

Note 1: Pulse test with PW=300μs, 1% duty cycle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ORDERING INFORMATION					
PART NO.	AEC-Q101 QUALIFIED	PACKING CODE	GREEN COMPOUND CODE	PACKAGE	PACKING
SK3xxA (Note 1)	Prefix "H"	R3	Suffix "G"	SMA	1,800 / 7" Plastic reel
		R2		SMA	7,500 / 13" Paper reel
		M2		SMA	7,500 / 13" Plastic reel
		F3		Folded SMA	1,800 / 7" Plastic reel
		F2		Folded SMA	7,500 / 13" Paper reel
		F4		Folded SMA	7,500 / 13" Plastic reel
	N/A	E3		Clip SMA	1,800 / 7" Plastic reel
		E2		Clip SMA	7,500 / 13" Paper reel

Note 1: "xx" defines voltage from 20V (SK32A) to 200V (SK320A)

EXAMPLE					
PREFERRED P/N	PART NO.	AEC-Q101 QUALIFIED	PACKING CODE	GREEN COMPOUND CODE	DESCRIPTION
SK36A R3	SK36A		R3		
SK36A R3G	SK36A		R3	G	Green compound
SK36AHR3	SK36A	H	R3		AEC-Q101 qualified

**RATINGS AND CHARACTERISTICS CURVES**

(TA=25°C unless otherwise noted)

FIG. 1 FORWARD CURRENT DERATING CURVE

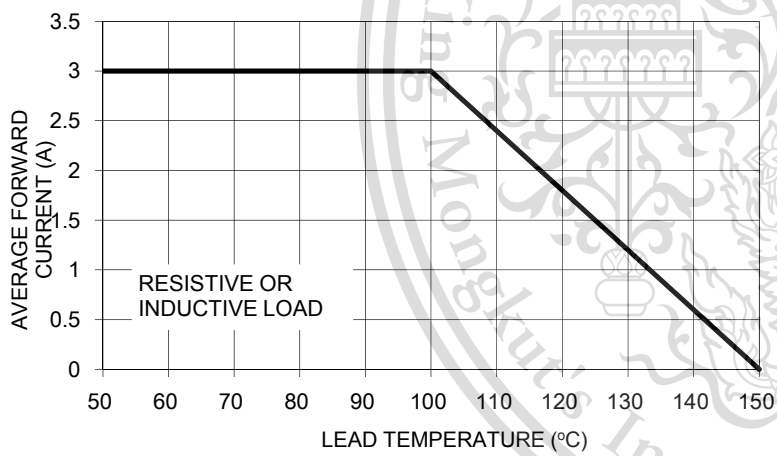


FIG. 2 MAXIMUM NON-REPETITIVE FORWARD SURGE CURRENT

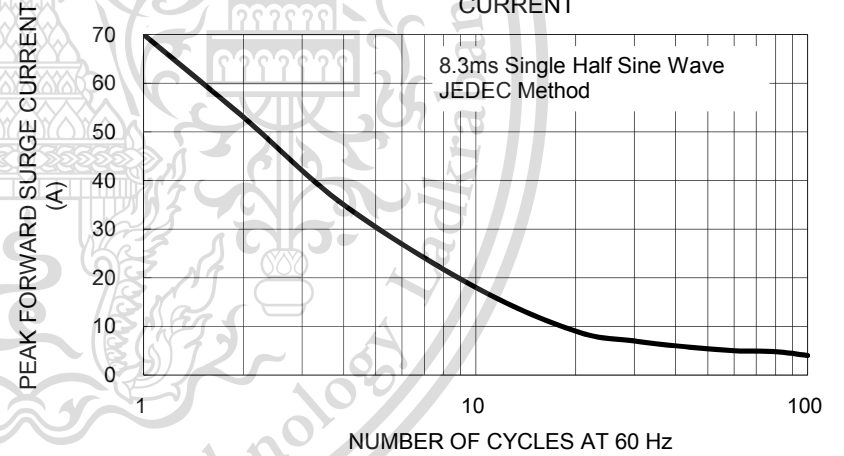


FIG. 3 TYPICAL FORWARD CHARACTERISTICS

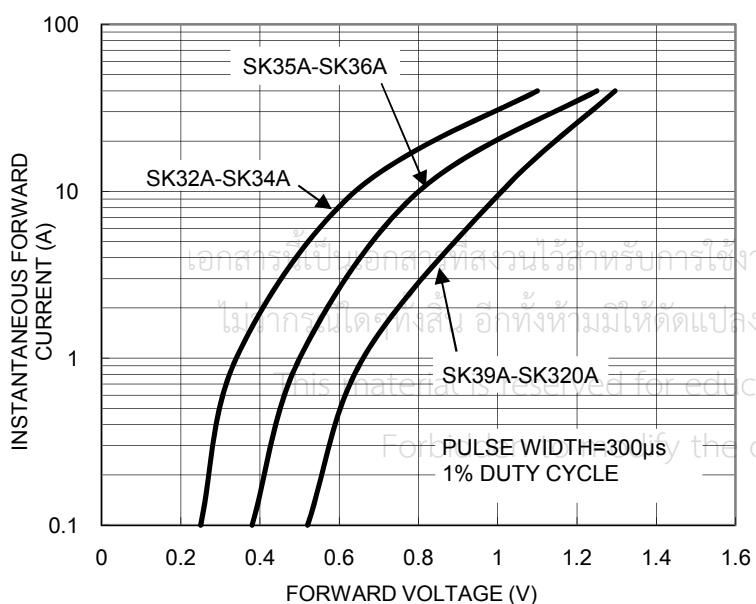


FIG. 4 TYPICAL REVERSE CHARACTERISTICS

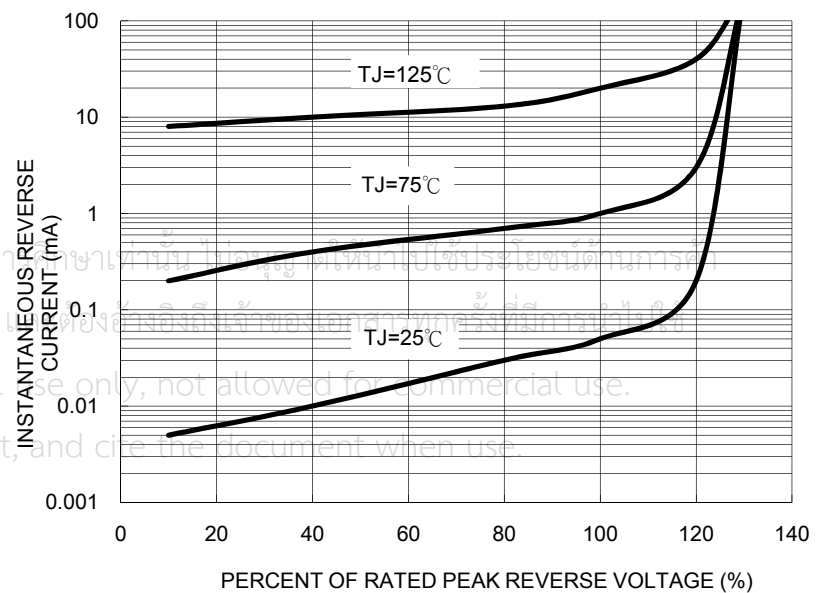


FIG. 5 TYPICAL JUNCTION CAPACITANCE

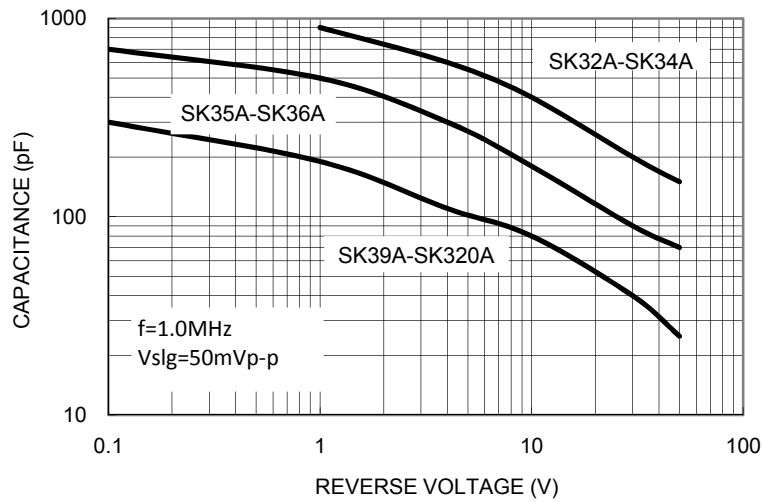
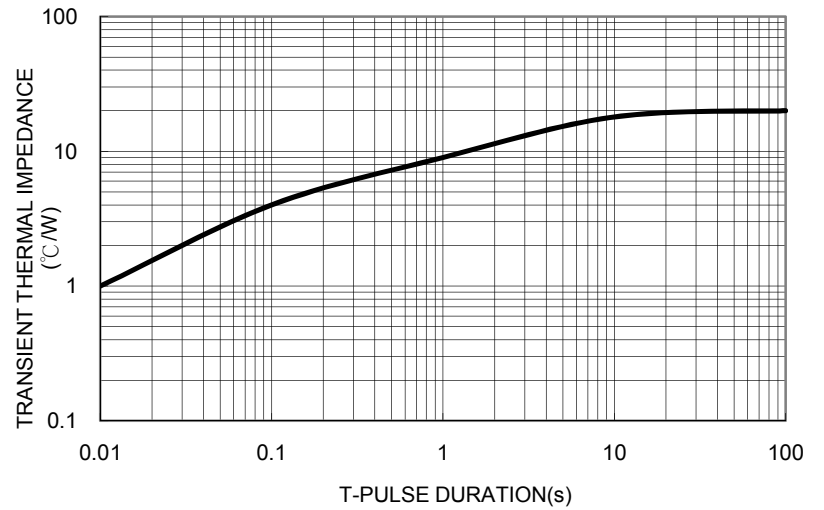
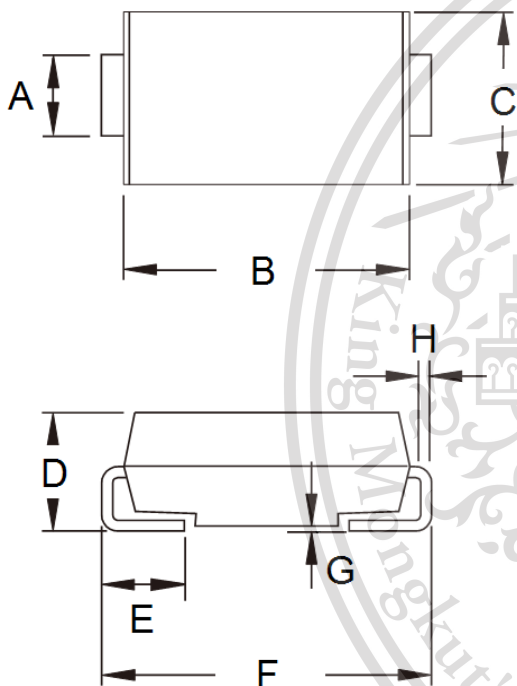


FIG. 6 TYPICAL TRANSIENT THERMAL IMPEDANCE

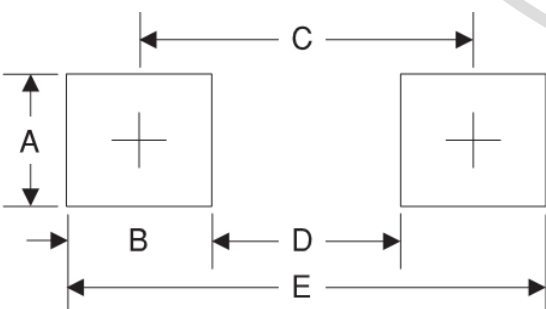


PACKAGE OUTLINE DIMENSIONS



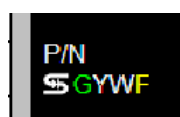
DIM.	Unit (mm)		Unit (inch)	
	Min	Max	Min	Max
A	1.27	1.58	0.050	0.062
B	4.06	4.60	0.160	0.181
C	2.29	2.83	0.090	0.111
D	1.99	2.50	0.078	0.098
E	0.90	1.41	0.035	0.056
F	4.95	5.33	0.195	0.210
G	0.10	0.20	0.004	0.008
H	0.15	0.31	0.006	0.012

SUGGESTED PAD LAYOUT



Symbol	Unit (mm)	Unit (inch)
A	1.68	0.066
B	1.52	0.060
C	3.93	0.155
D	2.41	0.095
E	5.45	0.215

MARKING DIAGRAM



P/N = Specific Device Code  
 G = Green Compound  
 YW = Date Code  
 F = Factory Code

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Do not modify the content, and cite the document when use.

# Li-Ion/Polymer Shunt Battery Charger System with Low Battery Disconnect

## FEATURES

- **Charger Plus Pack Protection in One IC**
- **Low Operating Current (550nA)**
- **Near Zero Current (<0.1nA) Low Battery Disconnect Function to Protect Batteries from Over-Discharge**
- **Pin Selectable Low Battery Disconnect Level: 2.7V or 3.2V**
- 1% Float Voltage Accuracy Over Temperature
- 50mA Maximum Internal Shunt Current
- Pin Selectable Float Voltage Options: 4.0V, 4.1V, 4.2V
- Ultralow Power Pulsed NTC Float Conditioning for Li-Ion/Polymer Protection
- Suitable for Intermittent, Continuous and Very Low Power Charging Sources
- High Battery Status Output
- Thermally Enhanced, Low Profile (0.75mm) 8-Lead (2mm × 3mm) DFN and MSOP Packages

## APPLICATIONS

- Low Capacity, Li-Ion/Polymer Battery Back-Up
- Thin Film Batteries
- Energy Scavenging/Harvesting
- Solar Power Systems with Back-Up
- Memory Back-Up
- Embedded Automotive

## DESCRIPTION

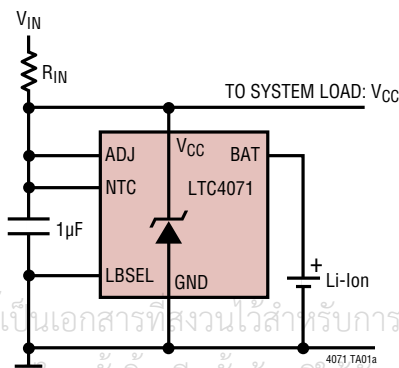
The **LTC®4071** allows simple charging of Li-Ion/Polymer batteries from very low current, intermittent or continuous charging sources. A near-zero current low battery latching disconnect function protects even the lowest capacity batteries from deep discharge and potentially irreparable damage. The 550nA to 50mA operating current makes charging possible from previously unusable sources. With its low operating current the LTC4071 is well suited to charge low capacity Li-Ion or thin film batteries in energy harvesting applications. The unique architecture of the LTC4071 allows for an extremely simple battery charger solution, requiring just one external resistor.

The LTC4071 offers a pin selectable float voltage with ±1% accuracy. The integrated thermal battery qualifier extends battery lifetime and improves reliability by automatically reducing the battery float voltage at NTC thermistor temperatures above 40°C. The LTC4071 also provides two pin selectable low battery disconnect levels and a high battery status output.

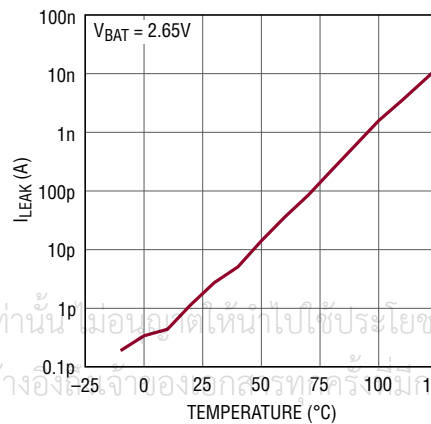
The device is offered in two thermally enhanced packages, a compact low profile (0.75mm) 8-lead (2mm × 3mm) DFN and an 8-lead MSOP package.

All registered trademarks and trademarks are the property of their respective owners.

## TYPICAL APPLICATION



**Battery Disconnect  $I_{LEAK}$  vs Temperature**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามเผยแพร่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงจากแหล่งที่มาที่ใช้

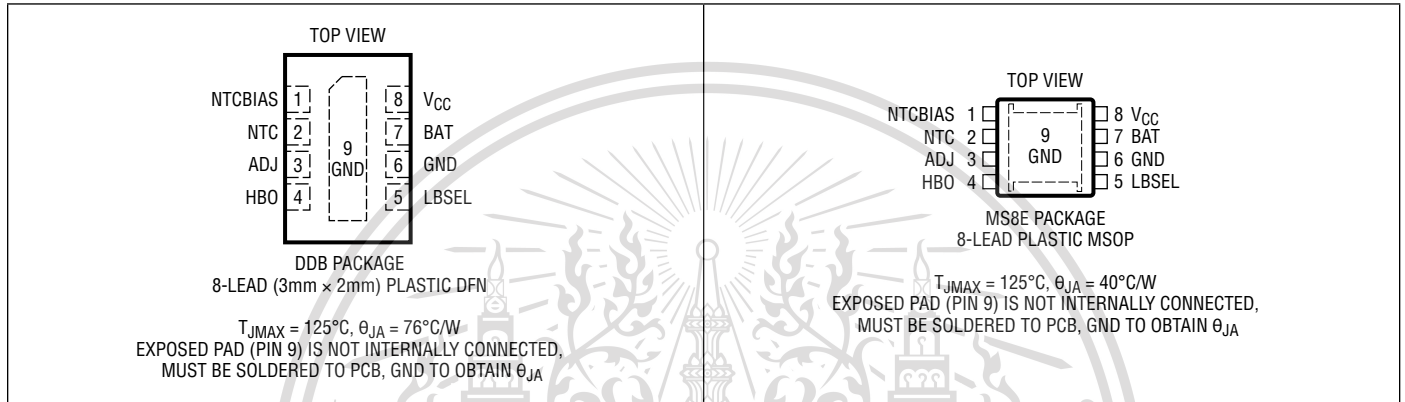
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Rev. D

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Notes 1, 2)

$I_{CC}, I_{BAT}$ .....	$\pm 60\text{mA}$ Continuous	LBSEL Voltage .....	$-0.3\text{V}$ to $6\text{V}$
$I_{BAT}$ .....	$400\text{mA}$ for Single Pulse $< 10\text{ms}$	Operating Junction Temperature Range..	$-40^{\circ}\text{C}$ to $125^{\circ}\text{C}$
$I_{CC}$ .....	$-400\text{mA}$ for Single Pulse $< 10\text{ms}$	Storage Temperature Range .....	$-65^{\circ}\text{C}$ to $150^{\circ}\text{C}$
ADJ, NTC, NTCBIAS, HBO Voltages..	$-0.3\text{V}$ to $V_{CC} + 0.3\text{V}$	Peak Reflow Temperature .....	$260^{\circ}\text{C}$

## PIN CONFIGURATION



## ORDER INFORMATION

LEAD FREE FINISH	TAPE AND REEL	TAPE AND REEL (MINI)	PART MARKING*	PACKAGE DESCRIPTION	TEMPERATURE RANGE
	LTC4071EDD#TRPBF	LTC4071EDD#TRMPBF	LFXF	8-Lead Plastic DFN	$-40^{\circ}\text{C}$ to $125^{\circ}\text{C}$
	LTC4071IDD#TRPBF	LTC4071IDD#TRMPBF	LFXF	8-Lead Plastic DFN	$-40^{\circ}\text{C}$ to $125^{\circ}\text{C}$
LTC4071EMS8E#PBF	LTC4071EMS8E#TRPBF		LTFXG	8-Lead Plastic MSOP	$-40^{\circ}\text{C}$ to $125^{\circ}\text{C}$
LTC4071IMS8E#PBF	LTC4071IMS8E#TRPBF		LTFXG	8-Lead Plastic MSOP	$-40^{\circ}\text{C}$ to $125^{\circ}\text{C}$

Contact the factory for parts specified with wider operating temperature ranges. \*The temperature grade is identified by a label on the shipping container.

[Tape and reel specifications](#). Some packages are available in 500 unit reels through designated sales channels with #TRMPBF suffix.

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

The ● denotes the specifications which apply over the full operating junction temperature range. Conditions are  $V_{NTC} = V_{ADJ} = V_{CC}$ ,  $V_{LBSEL} = \text{GND}$ ,  $T_A = 25^{\circ}\text{C}$  unless otherwise specified. Current into a pin is positive and current out of a pin is negative. All voltages are referenced to GND unless otherwise noted. (Note 2)

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
$V_{\text{FLOAT}}$	Programmable Float Voltage $10\mu\text{A} \leq I_{CC} \leq 25\text{mA}$	$V_{ADJ} = 0\text{V}$ , $0^{\circ}\text{C} < \text{Temp} < 125^{\circ}\text{C}$	3.96	4.0	4.04	V
		$V_{ADJ} = 0\text{V}$	3.88	4.0	4.04	V
		$V_{ADJ} = \text{Float}$ , $0^{\circ}\text{C} < \text{Temp} < 125^{\circ}\text{C}$	4.06	4.1	4.14	V
		$V_{ADJ} = \text{Float}$	3.98	4.1	4.14	V
$I_{CC\text{MAX}}$	Maximum Shunt Current	$V_{CC} > V_{\text{FLOAT}}$	● 50			mA
		$V_{HBO} \text{ Low, ADJ} = V_{CC}$	●	550	1200	nA

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** The ● denotes the specifications which apply over the full operating junction temperature range. Conditions are  $V_{NTC} = V_{ADJ} = V_{CC}$ ,  $V_{LBSEL} = GND$ ,  $T_J = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified. Current into a pin is positive and current out of a pin is negative. All voltages are referenced to GND unless otherwise noted. (Note 2)

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	
<b>Low Battery Disconnect</b>							
$I_{LEAK}$	Battery Disconnect Leakage Current	$V_{CC} < V_{BAT} = 2.65\text{V}$	●	0.01 0.01	25	nA nA	
$R_{DSON}$	Resistance of $V_{CC} - \text{BAT}$ Switch	$I_{BAT} = -1\text{mA}$ , $V_{HBO}$ High		4	6	$\Omega$	
$V_{LBD}$	Low Battery Disconnect	$V_{BAT}$ Falling, $I_{BAT} = -1\text{mA}$ , $LBSEL = V_{CC}$ , $0^\circ\text{C} < \text{Temp} < 125^\circ\text{C}$		2.60	2.70	2.79	V
		$V_{BAT}$ Falling, $I_{BAT} = -1\text{mA}$ , $LBSEL = V_{CC}$	●	2.52	2.70	2.79	V
		$V_{BAT}$ Falling, $I_{BAT} = -1\text{mA}$ , $LBSEL = GND$ , $0^\circ\text{C} < \text{Temp} < 125^\circ\text{C}$		3.05	3.20	3.28	V
		$V_{BAT}$ Falling, $I_{BAT} = -1\text{mA}$ , $LBSEL = GND$	●	2.95	3.20	3.28	V
$V_{LBC\_BAT}$	Low Battery Connect	$V_{BAT}$ Rising, $I_{BAT} = -1\text{mA}$ , $LBSEL = V_{CC}$		2.97		V	
		$V_{BAT}$ Rising, $I_{BAT} = -1\text{mA}$ , $LBSEL = GND$		3.53		V	
$V_{LBC\_VCC}$	Low Battery Connect	$V_{CC}$ Rising, $LBSEL = V_{CC}$		3.6		V	
		$V_{CC}$ Rising, $LBSEL = GND$		4.19		V	
<b>High Battery Status</b>							
$V_{HBTH}$	HBO Threshold ( $V_{FLOAT} - V_{CC}$ )	$V_{CC}$ Rising	●	15	40	75	mV
$V_{HBHY}$	Hysteresis			100			mV
<b>Status Output: HBO</b>							
$V_{OL}$	CMOS Output Low	$I_{SINK} = 1\text{mA}$ , $V_{CC} = 3.7\text{V}$			0.5		V
$V_{OH}$	CMOS Output High	$I_{SOURCE} = -0.5\text{mA}$ , $I_{CC} = 1.5\text{mA}$		$V_{CC} - 0.6$			V
<b>Selection Inputs: ADJ, LBSEL</b>							
$V_{ADJ\_IL}$	ADJ $V_{IL}$	Input Logic Low Level	●		0.3		V
$V_{ADJ\_IH}$	ADJ $V_{IH}$	Input Logic High Level	●	$V_{CC} - 0.3$			V
$I_{ADJ(Z)}$	Allowable ADJ Leakage Current in Floating State		●		$\pm 3$		$\mu\text{A}$
$V_{LBSEL\_IL}$	LBSEL $V_{IL}$	Input Logic Low Level	●		250		mV
$V_{LBSEL\_IH}$	LBSEL $V_{IH}$	Input Logic High Level	●	1.4			V
$I_{LBSEL}$	LBSEL Leakage Current	$0 \leq LBSEL \leq V_{CC}$	●	-5	0	5	nA
<b>NTC</b>							
$I_{NTC}$	NTC Leakage Current	$0\text{V} \leq NTC \leq V_{CC}$	●	-5	0	5	nA
$I_{NTCBIAS}$	Average NTCBIAS Sink Current	Pulsed Duty Cycle $< 0.002\%$		30	50		pA
$NTC_{TH1}$	NTC Comparator Falling Thresholds	$V_{NTC}$ as Percentage of $V_{NTCBIAS}$ Amplitude		35.5	36.5	38	%
$NTC_{TH2}$				28.0	29.0	30.5	%
$NTC_{TH3}$				21.8	22.8	23.8	%
$NTC_{TH4}$				16.8	17.8	18.8	%
$NTC_{HY}$	Hysteresis			30			mV
$\Delta V_{FLOAT(NTC)}$	Delta Float Voltage per NTC Comparator Step	NTC Falling Below One of the $NTC_{TH}$ Thresholds ADJ = 0V ADJ = Floating ADJ = $V_{CC}$		-57 -82 -107	-50 -75 -100	-43 -68 -93	mV mV mV

**Note 1:** Stresses beyond those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. Exposure to any Absolute Maximum Rating condition for extended periods may affect device reliability and lifetime.

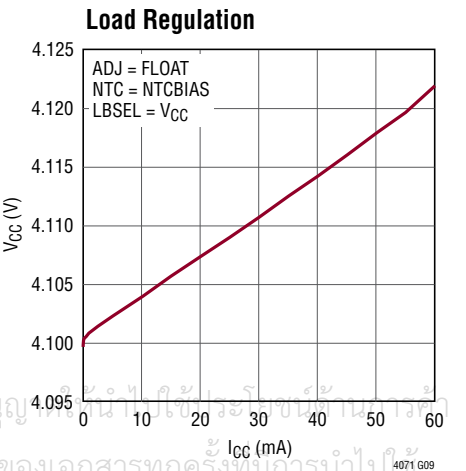
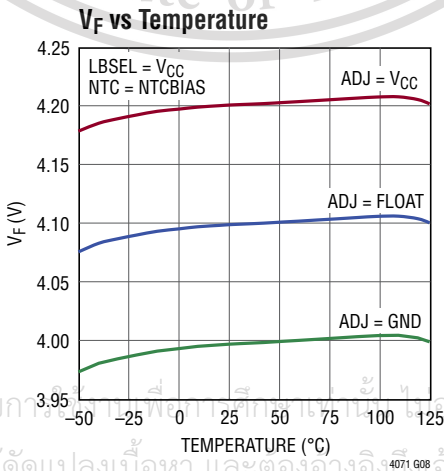
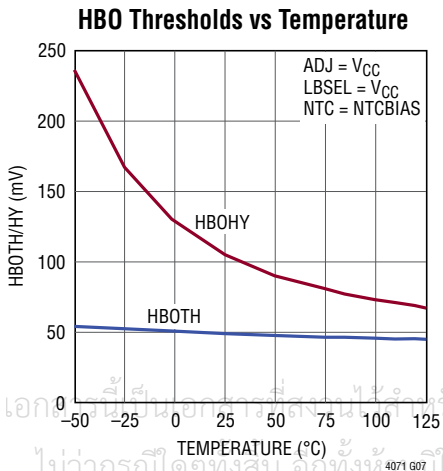
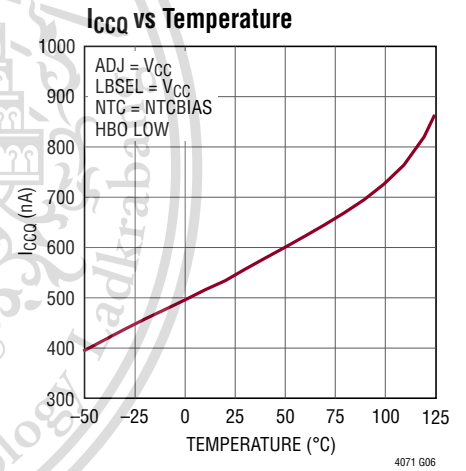
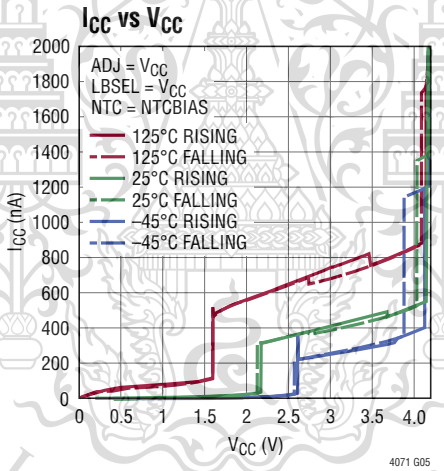
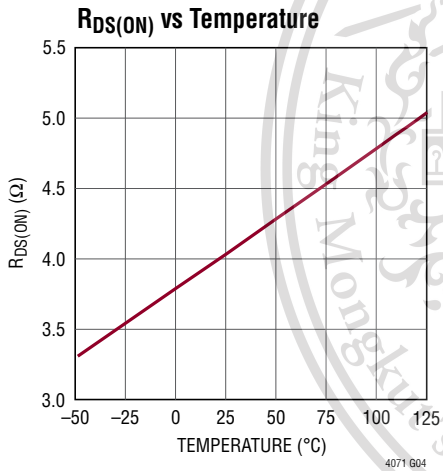
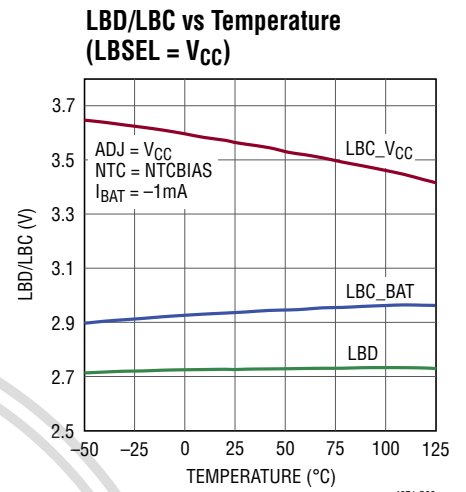
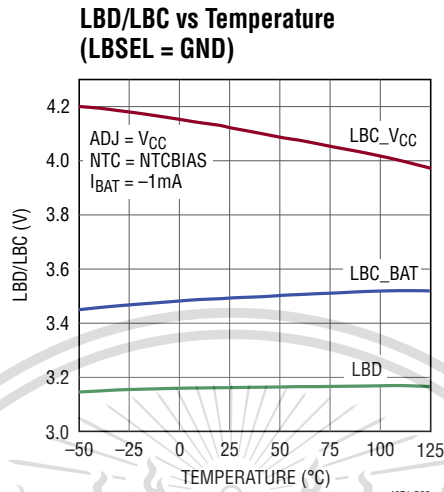
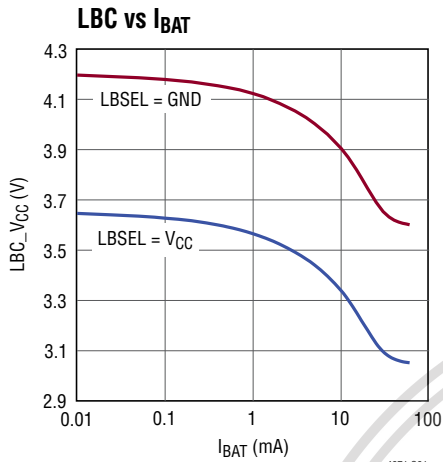
**Note 2:** The LTC4071 is tested under pulsed load conditions such that  $T_J \approx T_A$ . The LTC4071E is guaranteed to meet performance specifications for junction temperatures from  $0^\circ\text{C}$  to  $85^\circ\text{C}$ . Specifications over the

$-40^\circ\text{C}$  to  $125^\circ\text{C}$  operating junction temperature range are assured by design, characterization and correlation with statistical process controls. The LTC4071 is guaranteed over the full  $-40^\circ\text{C}$  to  $125^\circ\text{C}$  operating junction temperature range. Note that the maximum ambient temperature consistent with these specifications is determined by specific operation conditions in conjunction with board layout, the rated package thermal impedance and other environmental factors.

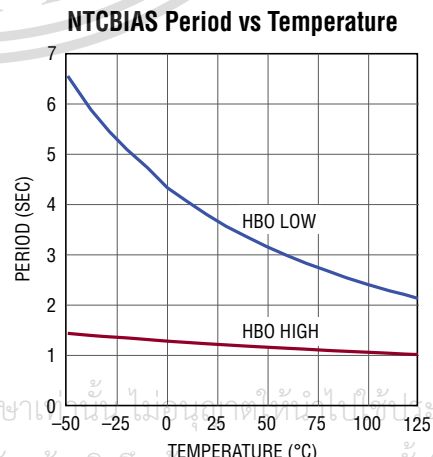
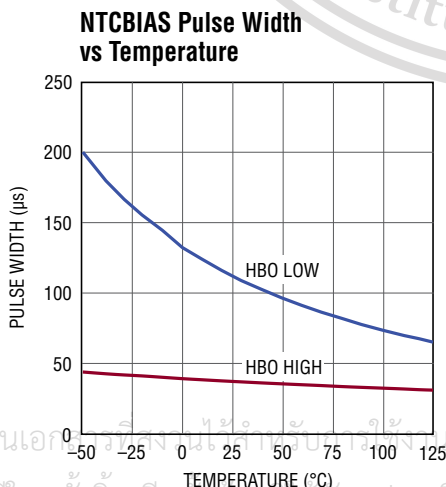
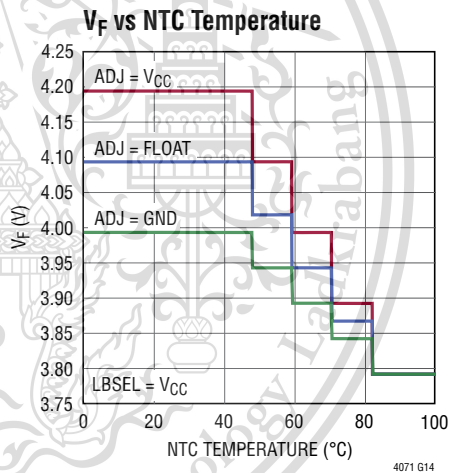
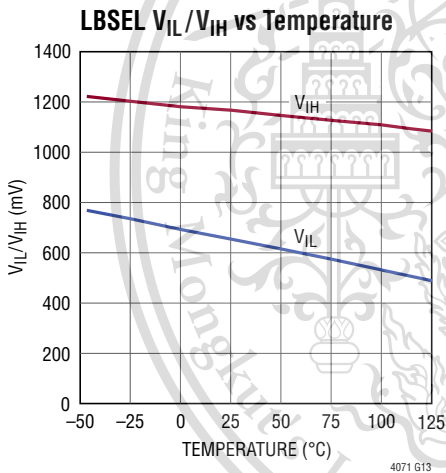
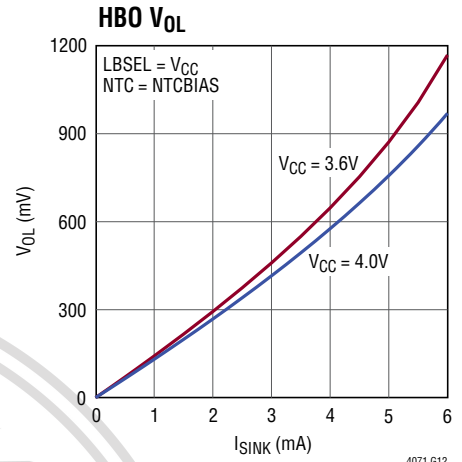
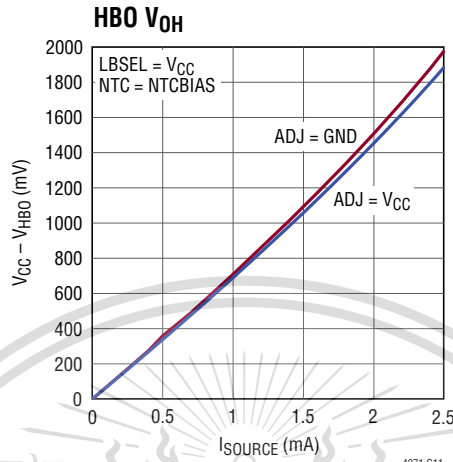
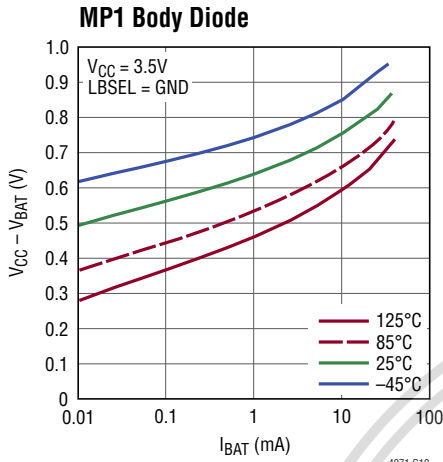
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Rev. D

## TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS $T_A = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.



**TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS**  $T_A = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.



เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทฯ ที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงนิตยสาร นิตยสาร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## PIN FUNCTIONS

**NTCBIAS (Pin 1):** NTC Bias Pin. Connect a resistor from NTCBIAS to NTC, and a thermistor from NTC to GND. Float NTCBIAS when not in use. Minimize parasitic capacitance on this pin.

**NTC (Pin 2):** Input to the Negative Temperature Coefficient Thermistor Monitoring Circuit. The NTC pin connects to a negative temperature coefficient thermistor which is typically co-packaged with the battery to determine the temperature of the battery. If the battery temperature is too high, the float voltage is reduced. Connect a low drift bias resistor from NTCBIAS to NTC and a thermistor from NTC to GND. When not in use, connect NTC to  $V_{CC}$ . Minimize parasitic capacitance on this pin.

**ADJ (Pin 3):** Float Voltage Adjust Pin. Connect ADJ to GND to program 4.0V float voltage. Disconnect ADJ to program 4.1V float voltage. Connect ADJ to  $V_{CC}$  to program 4.2V float voltage. The float voltage is also adjusted by the NTC thermistor.

**HBO (Pin 4):** High Battery Monitor Output (Active High). HBO is a CMOS output that indicates that the battery is almost fully charged and current is being shunted away from  $V_{CC}$ . This pin is driven high when  $V_{CC}$  rises to within  $V_{HBTH}$  of the effective float voltage,  $V_{FLOAT\_EFF}$ . The absolute value of this threshold depends on ADJ and NTC both of which affect the float voltage. HBO is driven low when  $V_{CC}$  falls by more than  $(V_{HBTH} + V_{HBHY})$  below the

effective float voltage. Refer to Table 1 for the effective float voltage.

**LBSEL (Pin 5):** Low Battery Disconnect Select Pin. Connect LBSEL to GND to select a low battery disconnect level of 3.2V, connect LBSEL to  $V_{CC}$  to select a low battery disconnect level of 2.7V. Do not float.

**GND (Pin 6, Exposed Pad Pin 9):** Ground. The exposed package pad has no internal electrical connection but must be connected to PCB ground for maximum heat transfer.

**BAT (Pin 7):** Battery Pin. Battery charge current is sourced from  $V_{CC}$  through this pin when an external supply is present. BAT supplies current to  $V_{CC}$  from this pin when no other source of power is available. If BAT falls below  $V_{LBD}$  this pin disconnects the battery from  $V_{CC}$  protecting the battery from discharge by the load when no external power supply is present.

**$V_{CC}$  (Pin 8):** Input Supply Pin. Attach system load to this pin. The input supply voltage is regulated to 4.0V, 4.1V, or 4.2V depending on the ADJ pin state (see the ADJ pin description for more detail). This pin can sink up to 50mA in order to keep the voltage regulation within accuracy limits. Decouple to GND with a capacitor,  $C_{IN}$ , of at least 0.1 $\mu$ F, use a larger decoupling cap to handle high peak load currents.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Rev. D

## BLOCK DIAGRAM

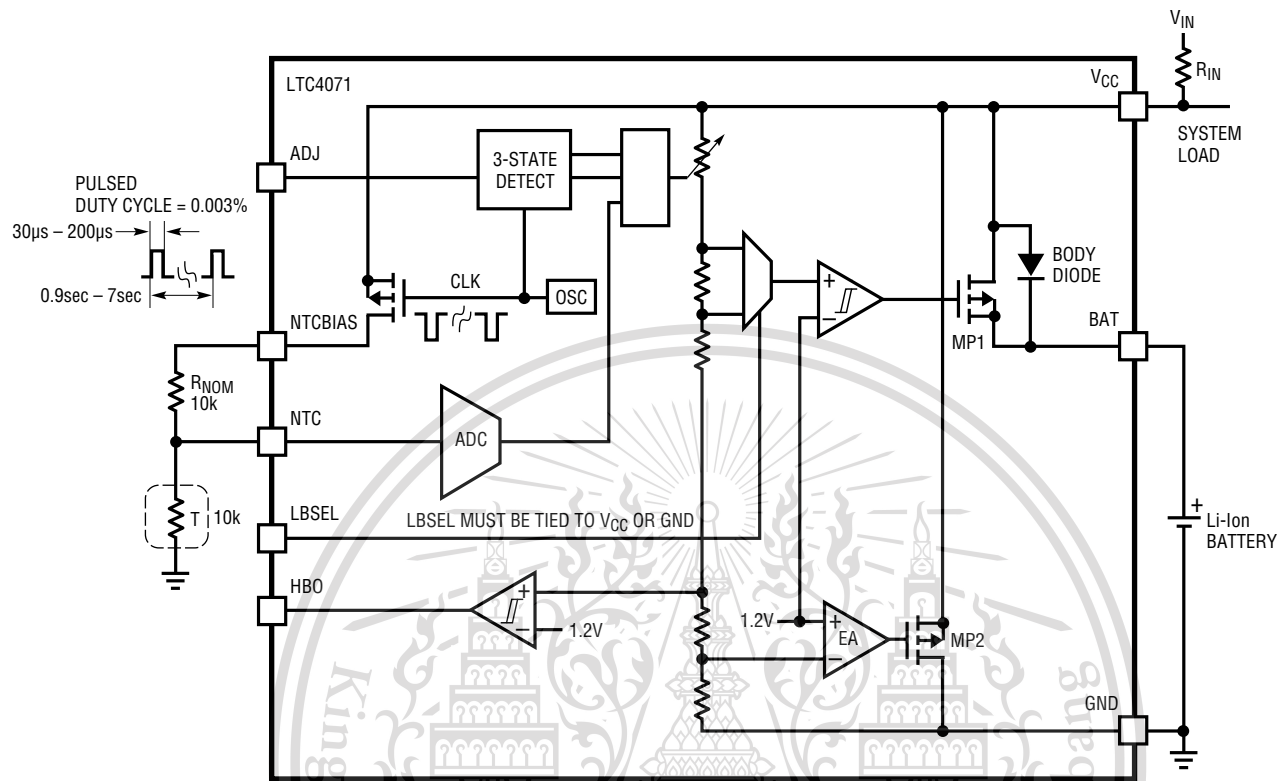


Figure 1. Block Diagram

## OPERATION

The LTC4071 provides a simple, reliable, and high performance battery protection and charging solution by preventing the battery voltage from exceeding a programmed level. Its shunt architecture requires just one resistor from the input supply to charge and protect the battery in a wide range of battery applications. When the input supply is removed and the battery voltage is below the high battery output threshold, the LTC4071 consumes just 550nA from the battery. If the battery voltage falls below the programmable low battery disconnect level, the battery disconnects from  $V_{CC}$ , protecting the battery from over-discharge either by the load connected to  $V_{CC}$  or from the LTC4071 quiescent current.

When an input supply is present the battery charges through the body diode of the internal disconnect PFET, MP1, until the battery voltage rises above the low-battery connect threshold. Select an input voltage large

enough for  $V_{CC}$  to reach  $V_{LBC\_VCC}$  to ensure that MP1 turns on. The user may detect the connected state by observing periodic pulses at the NTCBIAS pin that only occur once  $V_{CC}$  has risen above  $V_{LBC\_VCC}$ , and cease once  $V_{CC}$  falls below  $V_{LBD}$ . Depending on the capacity of the battery and the input decoupling capacitor, the  $V_{CC}$  voltage generally falls to  $V_{BAT}$  when MP1 turns on; rather than  $V_{BAT}$  rising to  $V_{CC}$ . The internal PFET then reconnects the battery to  $V_{CC}$  and the charge rate is determined by the input voltage, the battery voltage, and the input resistor:

$$I_{CHG} = \frac{(V_{IN} - V_{BAT})}{R_{IN}}$$

As the battery voltage approaches the float voltage, the LTC4071 shunts current away from the battery thereby reducing the charge current. The LTC4071 can shunt up to 50mA. The shunt current limits the maximum charge current.

## OPERATION

In cases where the input supply may be shorted to GND when not supplying power, for example with a solar cell, add a diode in series with  $R_{IN}$  to prevent the input from loading the battery. For more information, refer to the photovoltaic charger example in the Applications Information section.

### Adjustable Float Voltage, $V_{FLOAT}$

A built-in 3-state decoder connected to the ADJ pin provides three programmable float voltages: 4.0V, 4.1V, or 4.2V. The float voltage is programmed to 4.0V when ADJ is tied to GND, 4.1V when ADJ is floating (disconnected), and 4.2V when ADJ is tied to  $V_{CC}$ . The state of the ADJ pin (and NTC pins) is sampled for about 36 $\mu$ s about once every 1.2 seconds when HBO is high, and when HBO is low the sampling rate reduces to about once every 3.6 seconds with the same duty cycle. If  $V_{CC}$  falls below  $V_{LBD}$ , the sampling stops. When it is being sampled, the LTC4071 applies a relatively low impedance voltage at the ADJ pin. This technique prevents low level board leakage from corrupting the programmed float voltage.

### NTC Qualified Float Voltage, $\Delta V_{FLOAT(NTC)}$

The NTC pin voltage is compared against an internal resistor divider tied to the NTCBIAS pin. This divider has tap points that are matched to the NTC thermistor resistance/temperature conversion table for a Vishay curve 2 thermistor at temperatures of 40°C, 50°C, 60°C, and 70°C. The curve 2 thermistor is also designated by a B25/85 value of 3490.

Battery temperature conditioning adjusts the float voltage down to  $V_{FLOAT\_EFF}$  when the NTC thermistor indicates that the battery temperature is too high. For a 10k curve 2 thermistor and a 10k NTCBIAS resistor, each 10°C increase in temperature above 40°C causes the float voltage to drop by a fixed amount,  $\Delta V_{FLOAT(NTC)}$ , depending on ADJ. If ADJ is at GND, the float voltage steps down by 50mV for each 10°C temperature increment. If ADJ is floating, the step size is 75mV. And if ADJ is at  $V_{CC}$ , the step size is 100mV. Refer to Table 1 for the range of  $V_{FLOAT\_EFF}$  programming.

**Table 1. NTC Qualified Float Voltage**

ADJ	$\Delta V_{FLOAT(NTC)}$	TEMPERATURE	$V_{NTC}$ AS % OF NTCBIAS	$V_{FLOAT\_EFF}$
GND	50mV	$T < 40^\circ\text{C}$	$V_{NTC} > 36.5$	4.000
		$40^\circ\text{C} \leq T < 50^\circ\text{C}$	$29.0 < V_{NTC} \leq 36.5$	3.950
		$50^\circ\text{C} \leq T < 60^\circ\text{C}$	$22.8 < V_{NTC} \leq 29.0$	3.900
		$60^\circ\text{C} \leq T < 70^\circ\text{C}$	$17.8 < V_{NTC} \leq 22.8$	3.850
		$70^\circ\text{C} < T$	$V_{NTC} \leq 17.8$	3.800
Floating	75mV	$T < 40^\circ\text{C}$	$V_{NTC} > 36.5$	4.100
		$40^\circ\text{C} \leq T < 50^\circ\text{C}$	$29.0 < V_{NTC} \leq 36.5$	4.025
		$50^\circ\text{C} \leq T < 60^\circ\text{C}$	$22.8 < V_{NTC} \leq 29.0$	3.950
		$60^\circ\text{C} \leq T < 70^\circ\text{C}$	$17.8 < V_{NTC} \leq 22.8$	3.875
		$70^\circ\text{C} < T$	$V_{NTC} \leq 17.8$	3.800
$V_{CC}$	100mV	$T < 40^\circ\text{C}$	$V_{NTC} > 36.5$	4.200
		$40^\circ\text{C} \leq T < 50^\circ\text{C}$	$29.0 < V_{NTC} \leq 36.5$	4.100
		$50^\circ\text{C} \leq T < 60^\circ\text{C}$	$22.8 < V_{NTC} \leq 29.0$	4.000
		$60^\circ\text{C} \leq T < 70^\circ\text{C}$	$17.8 < V_{NTC} \leq 22.8$	3.900
		$70^\circ\text{C} < T$	$V_{NTC} \leq 17.8$	3.800

For all ADJ pin settings the lowest float voltage setting is:

$$3.8V = V_{FLOAT\_MIN} = V_{FLOAT} - 4 \cdot \Delta V_{FLOAT(NTC)}$$

This occurs at NTC thermistor temperatures above 70°C, or if the NTC pin is grounded.

To conserve power in the NTCBIAS and NTC resistors, the NTCBIAS pin is sampled at a low duty cycle at the same time that the ADJ pin state is sampled.

### High Battery Status Output: HBO

The HBO pin pulls high when  $V_{CC}$  rises to within  $V_{HBTH}$  of the programmed float voltage,  $V_{FLOAT\_EFF}$ , including NTC qualified float voltage adjustments assuming  $V_{CC}$  has risen above  $V_{LBC\_VCC}$ .

If  $V_{CC}$  drops below the float voltage by more than  $V_{HBTH} + V_{HBHY}$  the HBO pin pulls low to indicate that the battery is not at full charge. The input supply current to the LTC4071 drops to less than 550nA (typ) as the LTC4071 no longer shunts current to protect the battery. And the NTCBIAS sample clock slows to conserve power.

For example, if the NTC thermistor requires the float voltage to be dropped by 100mV ( $ADJ = V_{CC}$  and  $0.29 \cdot V_{NTCBIAS} < V_{NTC} < 0.36 \cdot V_{NTCBIAS}$ ) then the HBO rising threshold is detected when  $V_{CC}$  rises past:

$$V_{FLOAT} - \Delta V_{FLOAT(NTC)} - V_{HBTH} = 4.2V - 100mV - 40mV = 3.96V$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## OPERATION

### Low Battery Disconnect/Connect: LBD/LBC

The low battery disconnect ( $V_{LBD}$ ) and connect ( $V_{LBC}$ ) voltage levels are programmed by the LBSEL pin. As shown in the Block Diagram the battery disconnects from  $V_{CC}$  by shutting off MP1 when the BAT voltage falls below  $V_{LBD}$ . This disconnect function protects Li-Ion batteries from permanent damage due to deep discharge. If the voltage of a Li-Ion cell drops below a certain level, the cell may be permanently damaged. Disconnecting the battery from  $V_{CC}$  prevents the load at  $V_{CC}$  as well as the LTC4071 quiescent current from further discharging the battery.

Once disconnected the  $V_{CC}$  voltage collapses towards ground. When an input supply is reconnected the battery charges through the internal body diode of MP1. The input supply voltage should be larger than  $V_{LBC\_VCC}$  to ensure that MP1 is turned on. When the  $V_{CC}$  voltage reaches  $V_{LBC\_VCC}$ , MP1 turns on and connects  $V_{CC}$  and BAT. While disconnected, the BAT pin voltage is indirectly sensed through MP1's body diode. Therefore  $V_{LBC}$  varies with charge current and junction temperature. Please see the Typical Performance Characteristics section for more information.

### Low Battery Select: LBSEL

The low battery discharge cutoff voltage level is programmed by the LBSEL pin.

The LBSEL pin allows the user to trade-off battery run-time and maximum shelf life. A lower battery disconnect threshold maximizes run time by allowing the battery to fully discharge before the disconnect event. Conversely, by increasing the low battery disconnect threshold more capacity remains following the disconnect event which extends the shelf life of the battery. For maximum run time, tie LBSEL to  $V_{CC}$  so that the battery disconnects at  $V_{CC} = 2.7V$ . For extended shelf life, tie LBSEL to GND so that the battery disconnects at  $V_{CC} = 3.2V$ . If a high peak current event is expected, users may temporarily select the lower disconnect threshold. This avoids disconnecting the battery too early when the load works against the battery series resistance and temporarily reduces  $V_{CC}$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Rev. D

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

For more information [www.analog.com](http://www.analog.com)

## APPLICATIONS INFORMATION

### General Charging Considerations

The LTC4071 uses a different charging methodology from previous chargers. Most Li-Ion chargers terminate the charging after a period of time. The LTC4071 does not have a discrete charge termination. Extensive measurements on Li-Ion cells show that the cell charge current drops to very low levels with the shunt charge control circuit effectively terminating the charge. For improved battery lifetime choose 4.0V or 4.1V float voltage.

The battery disconnect function requires some care in selecting the input supply compliance for charging a battery while powering a load at  $V_{CC}$ . The internal battery disconnect switch remains off while charging the battery through the body diode of the internal switch until  $V_{CC}$  exceeds  $V_{LBC\_VCC}$ . If the source voltage compliance is not greater than  $V_{LBC\_VCC}$ , then the battery will never reconnect to  $V_{CC}$  and the system load will not be able to run on battery power. Users may detect that the battery is connected by monitoring the NTCBIAS pin as it will periodically pulse high once  $V_{CC}$  has risen above  $V_{LBC\_VCC}$ , and stops pulsing once  $V_{CC}$  falls below  $V_{LBD}$ .

The simplest application of the LTC4071 is shown in Figure 2. This application requires only an external resistor to program the charge/shunt current. Assume the wall

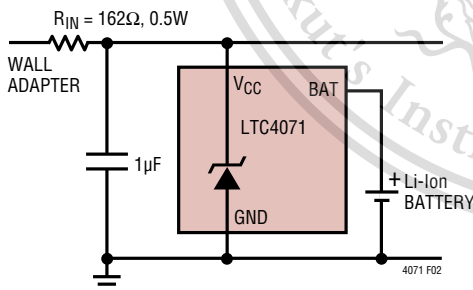


Figure 2. Single-Cell Battery Charger

adapter voltage ( $V_{WALL}$ ) is 12V and the maximum charge current is calculated as:

$$I_{MAX\_CHARGE} = \frac{(V_{WALL} - V_{BAT\_MIN})}{R_{IN}} = \frac{(12V - 3.2V)}{162\Omega} = 54mA$$

Care must be taken in selecting the input resistor. Power dissipated in  $R_{IN}$  under full charge current is given by the following equation:

$$P_{DISS} = \frac{(V_{WALL} - V_{BAT\_MIN})^2}{R_{IN}} = \frac{(12V - 3.2V)^2}{162\Omega} = 0.48W$$

The charge current decreases as the battery voltage increases. If the battery voltage is 40mV less than the programmed float voltage the LTC4071 consumes only 550nA of current, and all of the excess input current flows into the battery. As the battery voltage reaches the float voltage, the LTC4071 shunts current from the wall adapter and regulates the battery voltage to  $V_{FLOAT} = V_{CC}$ . The more shunt current the LTC4071 sinks, the less charge current the battery gets. Eventually, the LTC4071 shunts all the current flowing through  $R_{IN}$ ; up to the maximum shunt current. The maximum shunt current in this case, with no NTC adjustment is determined by the input resistor and is calculated as:

$$I_{SHUNT\_MAX} = \frac{(V_{WALL} - V_{FLOAT})}{R_{IN}} = \frac{(12V - 4.1V)}{162\Omega} = 49mA$$

At this point the power dissipated in the input resistor is 388mW.

The LTC4071 can also be used to regulate series-connected battery stacks as illustrated in Figure 3. Here two LTC4071 devices are used to charge two batteries in series. A single resistor sets the maximum charge/shunt current.

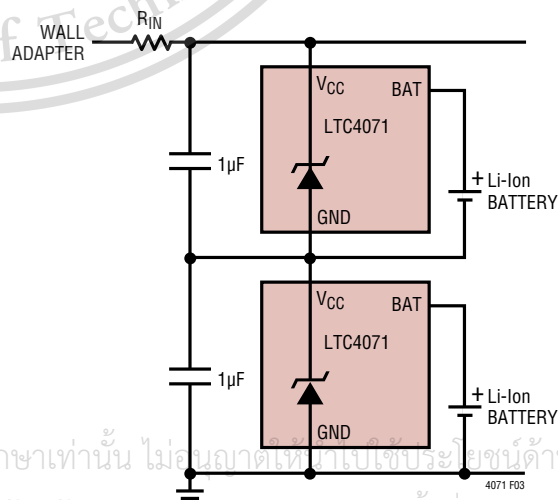


Figure 3. 2-Cell Battery Charger

## APPLICATIONS INFORMATION

The GND pin of the top device is simply connected to the  $V_{CC}$  pin of the bottom device. Care must be taken in observing the HBO status output pin of the top device as this signal is no longer ground referenced. Likewise for the control inputs of the top device; tie ADJ and LBSEL of the top device to the local GND or  $V_{CC}$  pins. Also, the wall adapter must have a high enough voltage rating to charge both cells.

### NTC Protection

The LTC4071 measures battery temperature with a negative temperature coefficient thermistor thermally coupled to the battery. NTC thermistors have temperature characteristics which are specified in resistance-temperature conversion tables. Internal NTC circuitry protects the battery from excessive heat by reducing the float voltage for each 10°C rise in temperature above 40°C (assuming a Vishay thermistor with a  $B_{25/85}$  value of 3490).

The LTC4071 uses a ratio of resistor values to measure battery temperature. The LTC4071 contains an internal fixed resistor voltage divider from NTCBIAS to GND with four tap points;  $NTC_{TH1}$ – $NTC_{TH4}$ . The voltages at these tap points are periodically compared against the voltage at the NTC pin to measure battery temperature. To conserve power, the battery temperature is measured periodically by biasing the NTCBIAS pin to  $V_{CC}$  about once every 1.5 seconds.

The voltage at the NTC pin depends on the ratio of NTC thermistor value,  $R_{NTC}$ , and a bias resistor,  $R_{NOM}$ . Choose  $R_{NOM}$  equal to the value of the thermistor at 25°C.  $R_{NOM}$  is 10k for a Vishay NTHS0402N02N1002F thermistor with a  $B_{25/85}$  value of 3490.  $R_{NOM}$  must be connected from NTCBIAS to NTC. The ratio of the NTC pin voltage to the NTCBIAS voltage when it is pulsed to  $V_{CC}$  is:

$$\frac{R_{NTC}}{(R_{NTC} + R_{NOM})}$$

When the thermistor temperature rises, the resistance drops; and the resistor divider between  $R_{NOM}$  and the thermistor lowers the voltage at the NTC pin.

An NTC thermistor with a different  $B_{25/85}$  value may also be used with the LTC4071. However the temperature trip

points are shifted due to the higher negative temperature coefficient of the thermistor. To correct for this difference add a resistor,  $R_{FIX}$ , in series with the thermistor to shift the ratio:

$$\frac{R_{FIX} + R_{NTC}}{(R_{FIX} + R_{NTC} + R_{NOM})}$$

Up to the internal resistive divider tap points:  $NTC_{TH1}$  through  $NTC_{TH4}$ . For a 100k thermistor with a  $B_{25/85}$  value of 3950, e.g. NTHS0402N01N1003F, at 70°C (with  $R_{NOM} = 100k$ ) choose  $R_{FIX} = 3.92k$ . The temperature trip points are found by looking up the curve 1 thermistor R/T values plus  $R_{FIX}$  that correspond to the ratios for  $NTC_{TH1} = 36.5\%$ ,  $NTC_{TH2} = 29\%$ ,  $NTC_{TH3} = 22.8\%$ , and  $NTC_{TH4} = 17.8\%$ . Selecting  $R_{FIX} = 3.92k$  results in trip points of 39.9°C, 49.4°C, 59.2°C and 69.6°C.

Another technique may be used without adding an additional component. Instead decrease  $R_{NOM}$  to adjust the  $NTC_{TH}$  thresholds for a given R/T thermistor profile. For example, if  $R_{NOM} = 88.7k$  (with the same 100k thermistor) then the temperature trip points are 41.0°C, 49.8°C, 58.5°C and 67.3°C.

When using the NTC features of the LTC4071 it is important to keep in mind that the maximum shunt current increases as the float voltage,  $V_{FLOAT\_EFF}$  drops with NTC conditioning. Reviewing the single-cell battery charger application with a 12V wall adapter in Figure 2; the input resistor should be increased to 165Ω such that the maximum shunt current does not exceed 50mA at the lowest possible float voltage due to NTC conditioning,  $V_{FLOAT\_MIN} = 3.8V$ .

### Thermal Considerations

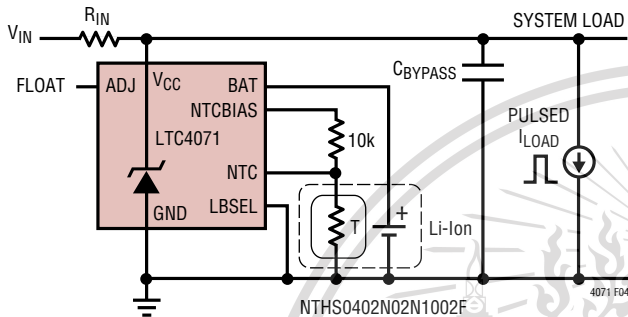
At maximum shunt current, the LTC4071 may dissipate up to 205mW. The thermal dissipation of the package should be taken into account when operating at maximum shunt current so as not to exceed the absolute maximum junction temperature of the device. With  $\theta_{JA}$  of 40°C/W, in the MSOP package, at maximum shunt current of 50mA the junction temperature rise is about 8°C above ambient. With  $\theta_{JA}$  of 76°C/W in the DFN package, at maximum shunt current of 50mA the junction temperature rise is about 16°C above ambient. The junction temperature,  $T_J$ , is calculated depending on ambient temperature,

## APPLICATIONS INFORMATION

$T_A$ , power dissipation, PD (in W), and  $\theta_{JA}$  is the thermal impedance of the package (in  $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ):

$$T_J = T_A + (PD \times \theta_{JA}).$$

The application shown in Figure 4 illustrates how to prevent triggering the low-battery disconnect function under large pulsed loads due to the high ESR of thin-film batteries.



**Figure 4. Adding a Decoupling Capacitor for Large Load Transients**

Table 2 lists some thin-film batteries, their capacities and their equivalent series resistance. The ESR causes  $V_{BAT}$  and  $V_{CC}$  to droop as a product of the load current amplitude multiplied by the ESR. This droop may trigger the low-battery disconnect while the battery itself may still have ample capacity. Adding a bypass capacitor to  $V_{CC}$  prevents large low duty cycle load transients from pulling down on  $V_{CC}$ .

**Table 2. Low Capacity Li-Ion and Thin-Film Batteries**

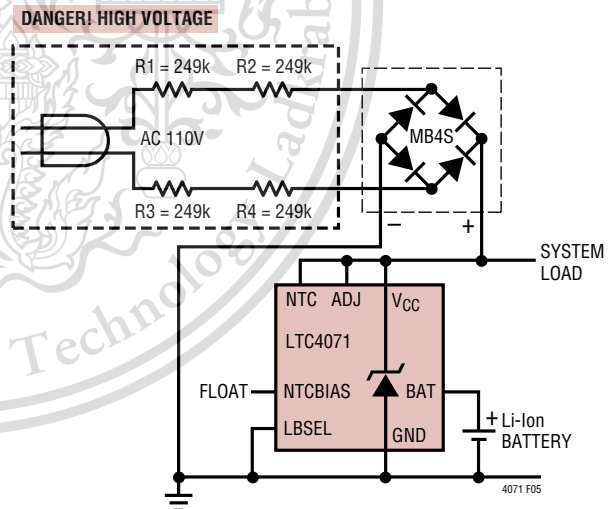
VENDOR	P/N	CAPACITY	RESISTANCE	$V_{MIN}$
CYMBET	CBC012	12 $\mu\text{Ah}$	5k to 10k	3.0V
CYMBET	CBC050	50 $\mu\text{Ah}$	1500 $\Omega$ to 3k	3.0V
GS NanoTech	N/A	500 $\mu\text{Ah}$	40 $\Omega$	3.0V
APS-Autec	LIR2025	20mAh	0.75 $\Omega$	3.0V
APS-Autec	LIR1025	6mAh	30 $\Omega$	2.75V
IPS	MEC225-1P	0.13mAh	210 $\Omega$ to 260 $\Omega$	2.1V
IPS	MEC220-4P	0.4mAh	100 $\Omega$ to 120 $\Omega$	2.1V
IPS	MEC201-10P	1.0mAh	34 $\Omega$ to 45 $\Omega$	2.1V
IPS	MEC202-25P	2.5mAh	15 $\Omega$ to 20 $\Omega$	2.1V
GM Battery	GMB031009	8mAh	10 $\Omega$ to 20 $\Omega$	2.75V

For example, given a 0.1% duty cycle 5ms load pulse of 20mA and a 1.0mAh IPS MEC201-10P solid-state thin-film battery with an equivalent series resistance of 35 $\Omega$ , the voltage drop at  $V_{CC}$  can be as high as 0.7V while the load is on. However once the load pulse ends, the

battery voltage recovers, as the capacity of the battery should provide roughly 50 hours of use for an equivalent 0.1%•20mA = 20 $\mu\text{A}$  load. To prevent load pulses from tripping the low battery disconnect, add a decoupling capacitor from  $V_{CC}$  to GND. The size of this capacitor can be calculated based on how much margin is required from the LBD threshold as well as the amplitude and pulse width of the load transient. For a 1.0mAh battery with a state-of-charge of 3.8V, the margin from LBD is 600mV with LBSSEL tied to GND. For a square-wave load pulse of 20mA with a pulse width of 5ms, the minimum size of the decoupling cap required to hold  $V_{CC}$  above LBD is calculated as follows:

$$C_{BYPASS} = \frac{20\text{mA} \cdot 5\text{ms}}{600\text{mV}} = 166.6\mu\text{F}$$

Take care to select a bypass capacitor with low leakage. The LTC4071 can be used to charge a battery to a 4.2V float voltage from an AC line with a bridge rectifier as shown in the simple schematic in Figure 5. In this example,



**DANGEROUS AND LETHAL POTENTIALS ARE PRESENT IN AC LINE-CONNECTED CIRCUITS! BEFORE PROCEEDING ANY FURTHER, THE READER IS WARNED THAT CAUTION MUST BE USED IN THE CONSTRUCTION, TESTING AND USE OF AC LINE-CONNECTED CIRCUITS. EXTREME CAUTION MUST BE USED IN WORKING WITH AND MAKING CONNECTIONS TO THESE CIRCUITS. ALL TESTING PERFORMED ON AC LINE-CONNECTED CIRCUITS MUST BE DONE WITH AN ISOLATION TRANSFORMER CONNECTED BETWEEN THE AC LINE AND THE CIRCUIT. USERS AND CONSTRUCTORS OF AC LINE-CONNECTED CIRCUITS MUST OBSERVE THIS PRECAUTION WHEN CONNECTING TEST EQUIPMENT TO THE CIRCUIT TO AVOID ELECTRIC SHOCK.**

**Figure 5. 4.2V AC Line Charging, UL Leakage Okay**

## APPLICATIONS INFORMATION

the four input 249k resistors are sized for acceptable UL leakage in the event that one of the resistors short. Here, the LTC4071 will fully charge the battery from the AC line while meeting the UL specification with 104 $\mu$ A of available charge current.

A simple photovoltaic (PV) application for the LTC4071 is illustrated in Figure 6. At low  $V_{CC}$  voltage, PV current flows to both the system at  $V_{CC}$  as well as the battery.

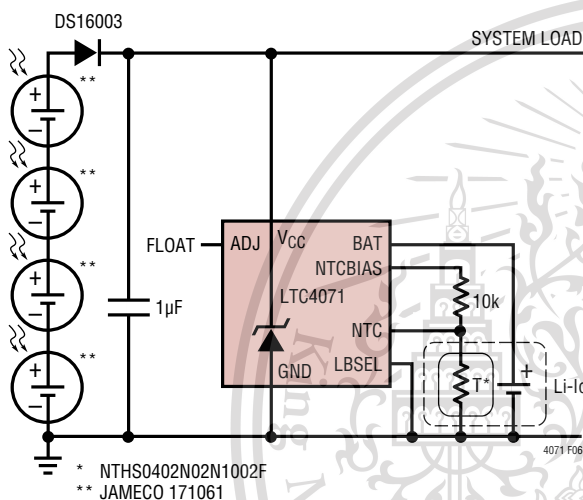


Figure 6. Simple Photovoltaic Charger

When  $V_{CC}$  reaches the programmed float voltage (4.1V with ADJ floating) then the LTC4071 shunts excess current not used by the load, limiting  $V_{CC}$  to 4.1V and effectively reducing the battery charge current to zero. If the PV cells stop supplying current, the battery supports the load at  $V_{CC}$  through the LTC4071. Add a diode in series with the PV cells to prevent reverse leakage of the PV cells from draining the battery. If the battery discharges to the point where  $V_{CC}$  falls below  $V_{LBD}$  (3.2V with LBSEL tied to GND) the LTC4071 disconnects the load from the battery to protect the battery from over discharge.

Typically, solar cells are inherently limited in current, but this circuit may require a resistor,  $R_{IN}$ , in series with the LTC4071 for high current solar cells. Select  $R_{IN}$  such that the LTC4071 never needs to shunt more than 50mA.

The simple schematic in Figure 7 illustrates a complete piezoelectric energy harvesting application using the LTC4071 to charge and protect Li-Ion cells along with the LTC3588-1 to rectify and regulate energy generated from a piezoelectric generator to a fixed 3.3V load.

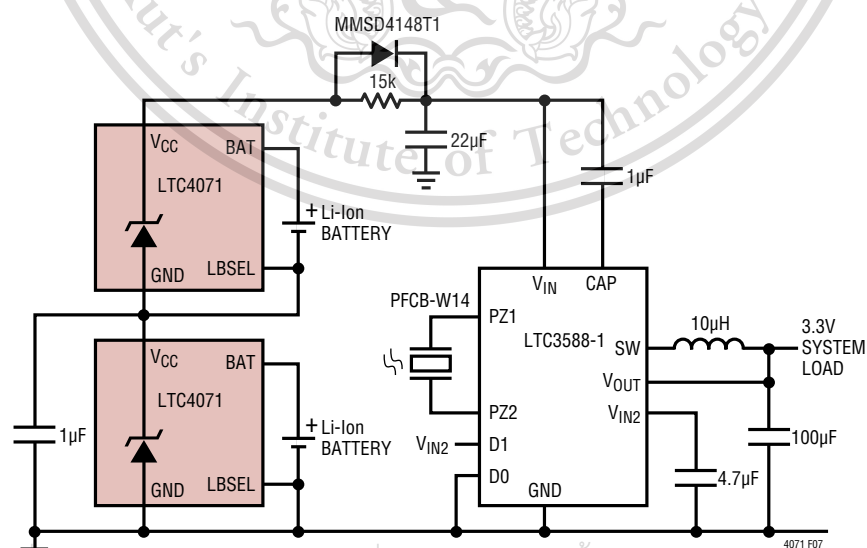


Figure 7. Piezoelectric Energy Harvester with Battery Backup

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## APPLICATIONS INFORMATION

This system has two modes of operation, charging where the batteries are being charged from energy harvested from the piezoelectric generator while the load is negligible. And discharging, where the load is pulling current from the batteries, but insufficient energy is being harvested to power the load.

This application allows the load to periodically draw more current than would otherwise be available from the piezoelectric generator by storing excess charge in a stack of two Li-Ion cells. Each Li-Ion cell is protected from over-charge and over discharge by a LTC4071 shunt regulator. The two LTC4071s regulate  $V_{IN}$  of the LTC3588-1 to 8.2V (with both ADJ pins floating) shunting any excess current that is not used by the load once the batteries achieve their float voltages. When the load requires more current than is available from the piezoelectric generator, the voltage at  $V_{IN}$  droops and current is supplied from the two Li-Ion cells to power the step-down switching regulator. If the load pulls enough current to discharge the batteries below  $V_{LBD}$ , the LTC4071s disconnect the batteries, and  $V_{IN}$  collapses until the piezoelectric generator resumes supplying current.

The application in Figure 8 illustrates how to implement “ship-mode,” where a battery is co-packaged with the LTC4071 and then the entire device is latched-off, leaving the battery fully charged but with the LTC4071 switched off. The co-packaged battery and LTC4071 can then be stored with a long shelf-life before being activated for normal use.

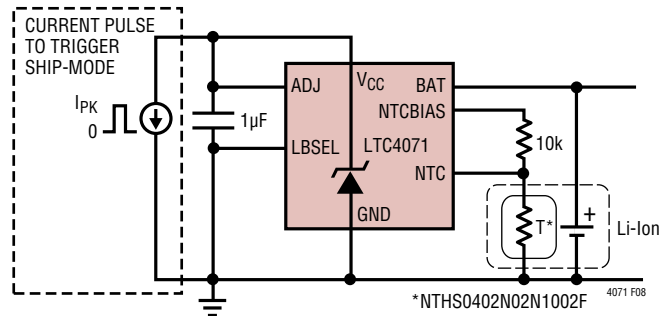


Figure 8. LTC4071 Ship-Mode Application for Extended Shelf Life

Ship-mode is triggered by pulling enough current through the LTC4071 so as to drop  $V_{CC}$  below the LBD threshold. The current pulse amplitude depends on the equivalent series resistance of the battery,  $B_{ESR}$ , summed with the  $R_{DS(ON)}$  of the BAT- $V_{CC}$  FET, the battery voltage,  $V_{BAT}$  and the selected disconnect voltage,  $V_{LBD}$ :

$$I_{PK} = \frac{V_{BAT} - V_{LBD}}{R_{DS(ON)} + B_{ESR}}$$

Users may test that ship mode has been triggered by simply checking if  $V_{CC}$  is at GND and that there are no longer any NTCBIAS pulses.

Re-activation of the LTC4071 and the battery requires either applying power normally, or briefly shorting  $V_{CC}$  to BAT to turn it on.

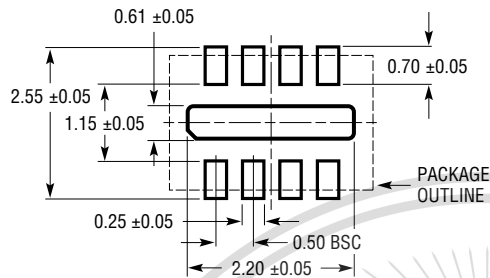
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

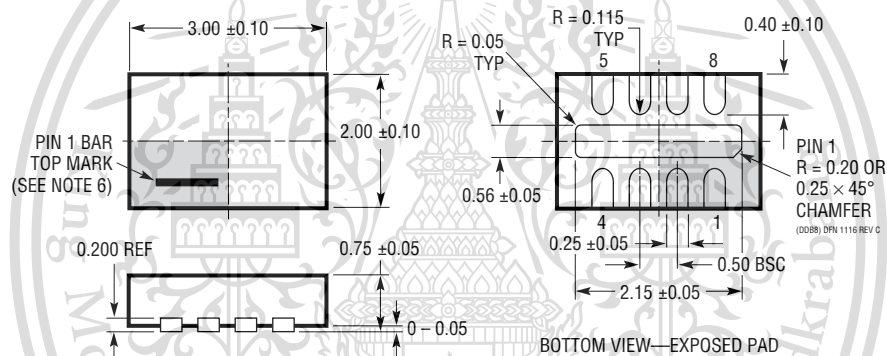
Rev. D

## PACKAGE DESCRIPTION

### DDB Package 8-Lead Plastic DFN (3mm × 2mm) (Reference LTC DWG # 05-08-1702 Rev C)



#### RECOMMENDED SOLDER PAD PITCH AND DIMENSIONS



#### NOTE:

1. DRAWING CONFORMS TO VERSION (WECD-1) IN JEDEC PACKAGE OUTLINE M0-229
2. DRAWING NOT TO SCALE
3. ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
4. DIMENSIONS OF EXPOSED PAD ON BOTTOM OF PACKAGE DO NOT INCLUDE MOLD FLASH. MOLD FLASH, IF PRESENT, SHALL NOT EXCEED 0.15mm ON ANY SIDE
5. EXPOSED PAD SHALL BE SOLDER PLATED
6. SHADED AREA IS ONLY A REFERENCE FOR PIN 1 LOCATION ON THE TOP AND BOTTOM OF PACKAGE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Rev. D

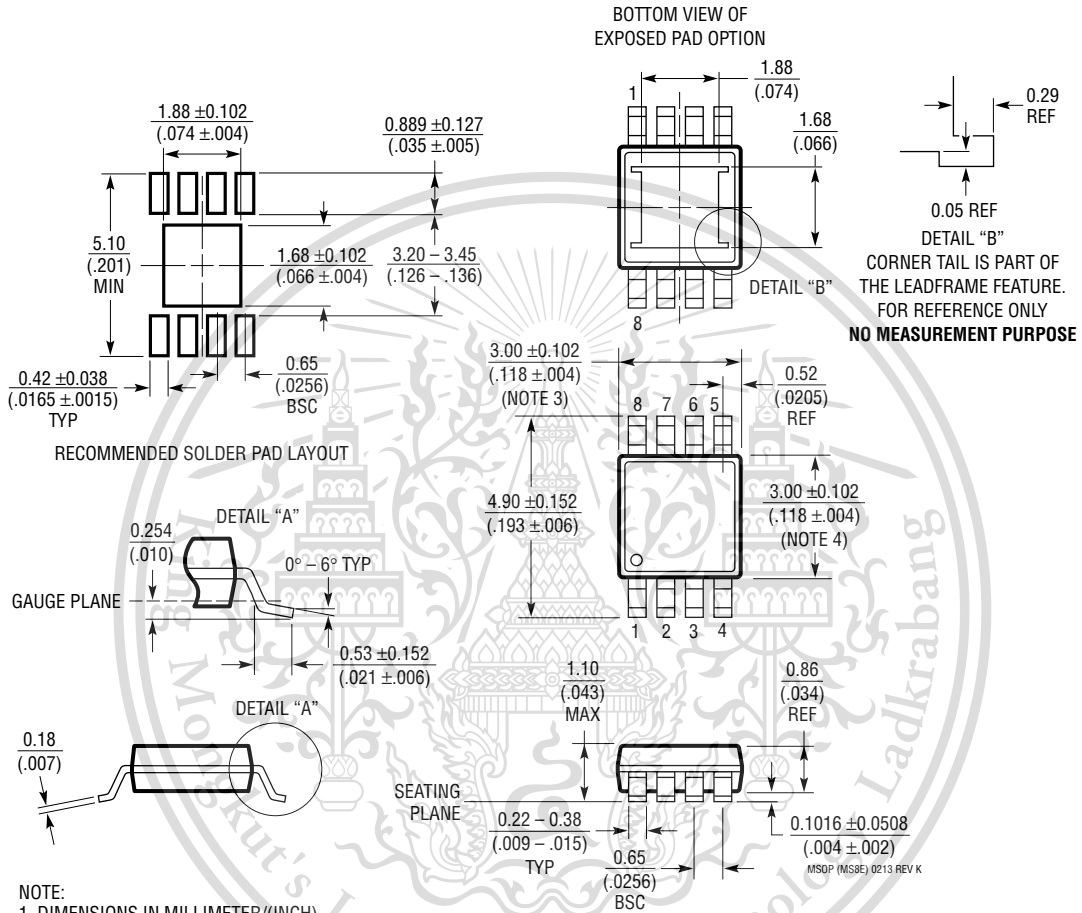
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

For more information [www.analog.com](http://www.analog.com)

15

PACKAGE DESCRIPTION

**MS8E Package**  
**8-Lead Plastic MSOP, Exposed Die Pad**  
 (Reference LTC DWG # 05-08-1662 Rev K)



- NOTE:
1. DIMENSIONS IN MILLIMETER/(INCH)
  2. DRAWING NOT TO SCALE
  3. DIMENSION DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH, PROTRUSIONS OR GATE BURRS. MOLD FLASH, PROTRUSIONS OR GATE BURRS SHALL NOT EXCEED 0.152mm (.006") PER SIDE
  4. DIMENSION DOES NOT INCLUDE INTERLEAD FLASH OR PROTRUSIONS. INTERLEAD FLASH OR PROTRUSIONS SHALL NOT EXCEED 0.152mm (.006") PER SIDE
  5. LEAD COPLANARITY (BOTTOM OF LEADS AFTER FORMING) SHALL BE 0.102mm (.004") MAX
  6. EXPOSED PAD DIMENSION DOES INCLUDE MOLD FLASH. MOLD FLASH ON E-PAD SHALL NOT EXCEED 0.254mm (.010") PER SIDE.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Rev. D

## REVISION HISTORY

REV	DATE	DESCRIPTION	PAGE NUMBER
A	10/10	V <sub>LBD</sub> specification replaced in Electrical Characteristics section.	3
B	4/11	Updated Vishay thermistor part number.	11, 12, 13, 14, 18
C	10/11	Under Note 2, replaced “=” with “≈”. Updated IPS MFR's part numbers. Updated the application example. Updated MFR part number on the Typical Application circuit MEC201-10P.	3 12 12 18
D	2/20	Revised Order Information table	2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

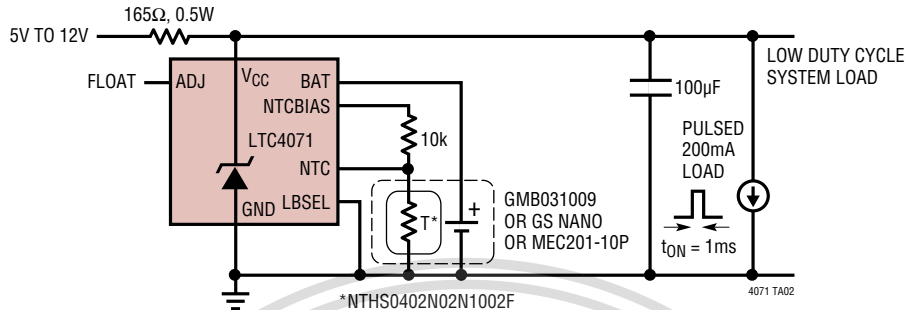
Rev. D

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

17

## TYPICAL APPLICATION

Typical Application with 100µF Bypass Capacitor to Support Large Load Pulse



## RELATED PARTS

PART NUMBER	DESCRIPTION	COMMENTS
LTC3105	400mA Step-Up Converter with 250mV Start-Up and Maximum Power Point Control	A High Efficiency Step-Up DC/DC Converter That Can Operate from Input Voltage As Low As 200mV. A 250mV Start-Up Capability and Integrated Maximum Power Point Controller (MPPT) Enables Operation Directly from Low Voltage, High Impedance Alternative Power Sources Such As Photovoltaic Cells, Thermoelectric Generators (TEGs) and Fuel Cells. A User Programmable MPPC Set Point Maximizes the Energy That Can Be Extracted from Any Power Source. Burst Mode® Operation, with a Proprietary Self Adjusting Peak Current, Optimizes Converter Efficiency and Output Voltage Ripple Over All Operating Conditions.
LTC3108/ LTC3108-1	Ultralow Power Step-Up Converter and Power Manager	A Highly Integrated DC/DC Converter Ideal for Harvesting and Managing Surplus Energy from Extremely Low Input Voltage Sources Such As TEGs (Thermoelectric Generators), Thermopiles and Small Solar Cells. The Step-Up Topology Operates from Input Sources As Low As 20mV. The LTC3108 is Functionally Equivalent to the LTC3108-1 Except for its Unique Fixed V <sub>OUT</sub> Options.
LTC3388	20V High Efficiency Nanopower Step-Down Regulator	High Efficiency Step-Down DC/DC Converter with Internal High Side and Synchronous Power Switches, Draws Only 720nA Typical DC Supply Current at No Load. 50mA of Load Current, Accurate UVLO Disables Converter and Maintains Low Quiescent Current State When the Input Voltage Falls Below 2.3V. 10-Lead MSE and 3mm × 3mm DFN Packages.
LTC3588-1	Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply in 3mm × 3mm DFN and MSOP Packages	High Efficiency Hysteretic Integrated Buck DC/DC; 950nA Input Quiescent Current (Output in Regulation – No Load), 520nA Input Quiescent Current in UVLO, 2.6V to 19.2V Input Operating Range; Integrated Low-Loss Full-Wave Bridge Rectifier, Up to 100mA of Output Current, Selectable Output Voltages of 1.8V, 2.5V, 3.3V or 3.6V.
LTC4054L	Standalone Linear Li-Ion Battery Charger in ThinSOT™	Low Current Version of LTC4054, 10mA ≤ I <sub>CHG</sub> ≤ 150mA, Thermal Regulation Prevents Overheating, C/10 Termination, with Integrated Pass Transistor.
LTC4065L	Standalone 250mA Li-Ion Battery Charger in 2mm × 2mm DFN	Low Current Version of LTC4065, 15mA ≤ I <sub>CHG</sub> ≤ 250mA, 4.2V, ±0.6% Float Voltage, High Charge Current Accuracy: 5%.
LTC4070	Li-Ion/Polymer Shunt Battery Charger System	Low 450nA Operating Current, 50mA Maximum Internal Shunt Current, Boostable to 500mA with External PFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Rev. D