

คู่มือคอร์สตัดแปลงเรือไฟฟ้า (Boat EV)

รวมเล่ม — คู่มือผู้สอน + แบบฝึกหัดผู้เรียน · 14 บท

เกี่ยวกับคู่มือเล่มนี้

สำหรับ ผู้สอนและผู้เรียน — เรียนและทำแบบฝึกหัดไปพร้อมกัน

เนื้อหา ตั้งแต่ลงเรือจริง คำนวณระบบ เครื่องมือ แบต/BMS มอเตอร์ ปรับจูน ชาร์จ/เชื่อม ความปลอดภัย จนถึงการติดตั้ง ดูแล และเลือกอุปกรณ์

ก่อนลงมือ อ่านบท 10 ความปลอดภัยทุกครั้ง — ไฟฟ้า + น้ำ เสี่ยงถึงชีวิต

สารบัญ

บท	หัวข้อ
1	ลงเรือจริง — อ่านระบบก่อนเรียนทฤษฎี
2	คำนวณระบบพลังงานเรือไฟฟ้า
3	เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า (แคลมป์มิเตอร์ · มัลติมิเตอร์ · IR)
4	การย้ายสายและขั้วต่อ (หางปลาชนิดต่าง ๆ)
5	พื้นฐานการต่อแบตเตอรี่ LiFePO ₄ (+ ระบบจริง 24S)
6	BMS และ Active Balance
7	ตรวจและต่อระบบมอเตอร์ (+ เครื่องทดสอบ)
8	ปรับจูนผ่านแอป (Fardriver + JK BMS)
9	Charge/Discharge และ Spot Welding
10	ความปลอดภัยและการรับมือเหตุฉุกเฉิน
11	การติดตั้งบนเรือและการกันน้ำ
12	ชาร์จเจอร์ โซลาร์ และการเก็บเรือ
13	เลือกใบพัด-มอเตอร์ และอภิธานศัพท์
14	การดูแลรักษาและการแก้ปัญหา

การพิมพ์

1 sheet = 1 หน้า A4 · สั่ง Print ได้ทั้งเล่มต่อเนื่อง · เผลยอยู่แยกไฟล์ answer-key.html (สำหรับผู้สอน)

ลงเรื่องจริง — อ่านระบบก่อนเรียนทฤษฎี

คอร์สเรือไฟฟ้า · วัน 1 เข้า (1) · สังเกตและจดค่าจากระบบจริงบนเรือ

นิยาม · หน้าที่ · ความสำคัญ

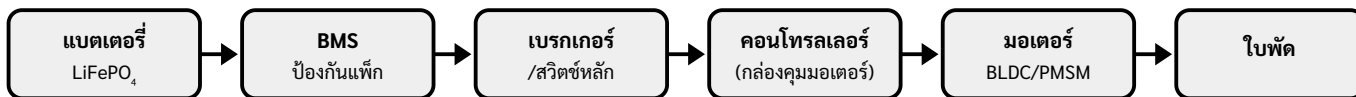
นิยาม การลงเรือไฟฟ้าจริงเพื่อสังเกตและจดค่าการทำงานของระบบ ก่อนเรียนทฤษฎี

หน้าที่ ทำให้เห็นภาพรวมระบบ (แบตเตอรี่ → มอเตอร์ → ใบพัด) และความสัมพันธ์ คันเร่ง-กระแส-ความเร็ว จากของจริง

ความสำคัญ สร้างพื้นฐานจากประสบการณ์ตรง ทำให้เรียนทฤษฎีบทต่อ ๆ ไปเข้าใจง่ายและเชื่อมโยงได้

1 โഴ้พลังงานของเรือไฟฟ้า (ไฟวิ่งจากไหนไปไหน)

ทิศทางการไหลของพลังงาน →



พลังงานไหลจากแบตเตอรี่ ผ่านการป้องกันและการควบคุม ไปหมุนใบพัดดันเรือ

2 หน้าจอ/มอนิเตอร์บอกอะไรบ้าง

ค่าที่อ่าน	หน่วย	ความหมาย
แรงดันแบตเตอรี่	V	ระดับ "แรงดัน" ของแพ็ค — ลดลงเมื่อแบตเตอรี่ใกล้หมด
กระแส	A	ปริมาณไฟที่ "ดึง" ออกไปใช้ขณะนั้น
กำลัง	W	อัตราการใช้พลังงาน = แรงดัน × กระแส (V × A)
SOC	%	เปอร์เซ็นต์พลังงานที่เหลือในแบตเตอรี่
ความเร็วเรือ	km/h	เรือวิ่งเร็วแค่ไหน
รอบมอเตอร์	RPM	มอเตอร์หมุนกี่รอบต่อนาที
อุณหภูมิ	°C	ความร้อนของมอเตอร์/คอนโทรลเลอร์ — สูงเกินคืออันตราย

3 ความสัมพันธ์ที่ต้องสังเกต

เร่งคันเร่งมากขึ้น กระแสมากขึ้น → กำลังมากขึ้น → เร็วขึ้น แต่พลังงานหมดเร็วขึ้น

ทวนน้ำ/ลมแรง/บรรทุกหนัก ใช้กระแสมากขึ้น ถึงจะวิ่งความเร็วเท่าเดิม

กระแสสูง ๆ แรงดันแบตเตอรี่จะ "ตก" ลงชั่วคราว (voltage sag) แล้วดีดกลับเมื่อผ่อนคันเร่ง

กำลัง $W = V \times A$ · ใช้กำลังมาก = พลังงานหมดเร็ว

△ ความปลอดภัยก่อนขึ้นเรือ

สวมเสื้อชูชีพทุกคน · ห้ามจับขั้วแบตเตอรี่ด้วยมือเปียก · ระวังของโลหะตกคร่อมขั้ว (ลัดวงจร) · รู้ตำแหน่ง "เบรกเกอร์/สวิตช์ตัดไฟฉุกเฉิน" ก่อนออกรเรือ

รู้จักเรือไฟฟ้า

เรือไฟฟ้าคืออะไร · ข้อดี-ข้อเสีย · มีอะไรบ้าง

4 เรือไฟฟ้าคืออะไร

เรือไฟฟ้า คือเรือที่ใช้ แบตเตอรี่ เป็นแหล่งพลังงาน ส่งไฟให้ มอเตอร์ไฟฟ้า หมุนใบพัดดันเรือ แทนการใช้เครื่องยนต์เบนซิน/ดีเซล

ข้อดี

เงียบ ไม่สั่น

ไม่มีควัน ไม่มีน้ำมันรั่วลงน้ำ (ดีต่อแหล่งน้ำ)

บำรุงรักษาน้อย ไม่ต้องเปลี่ยนน้ำมันเครื่อง

ออกตัวนุ่ม แรงบิดต้นดี

ข้อเสีย / ข้อควรระวัง

ต้องวางแผนระยะ — แบตหมดกลางน้ำลำบาก

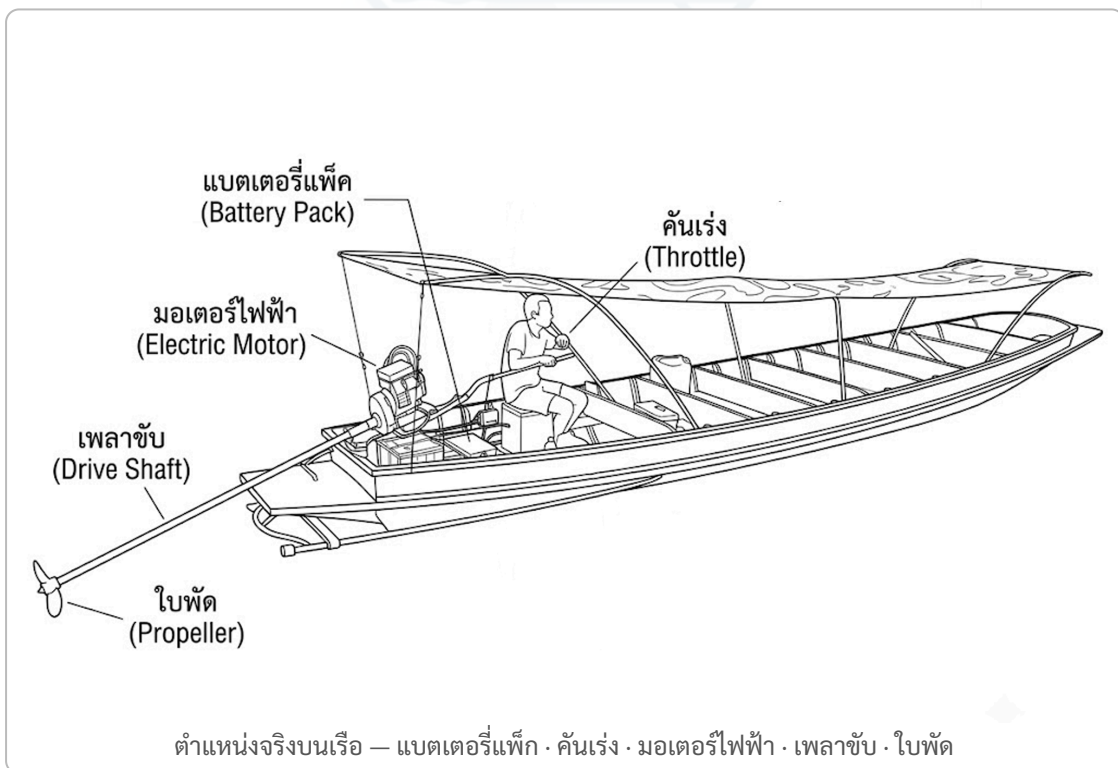
ชาร์จใช้เวลา (หลายชั่วโมง)

ต้นทุนแบตเตอรี่สูง

ต้องกันน้ำระบบไฟฟ้าให้ดี

5 ส่วนประกอบหลักของเรือไฟฟ้า

ส่วนประกอบ	ทำหน้าที่
แบตเตอรี่ + BMS	เก็บพลังงาน (หัวใจของเรือ) และวงจรป้องกันแบตเตอรี่
กล่องควบคุม (คอนโทรลเลอร์)	แปลงไฟจากแบตเตอรี่และคุมความเร็ว/กำลังของมอเตอร์
ชุดคันเร่ง	ส่งสัญญาณบอกคอนโทรลเลอร์ว่าจะเร่งแค่ไหน
มอเตอร์ + ใบพัด	เปลี่ยนไฟฟ้าเป็นการหมุน ดันน้ำให้เรือเคลื่อน



เชื่อมโยง

ทั้ง 4 ส่วนนี้ต่อกันเป็น "โซ่พลังงาน" ในหัวข้อที่ 1 — ไฟวิ่งจากแบตเตอรี่ ผ่านการป้องกันและการควบคุม ไปออกที่ใบพัด

แบบฝึกหัด — สังเกตและบันทึกระบบบนเรือ

จดค่าจริงจากหน้าจอที่ระดับคันเร่งต่าง ๆ แล้วคำนวณกำลัง

ข้อ 1 ตารางบันทึกการสังเกต (จดค่าจริงจากหน้าจอ)

เร่งคันเร่งที่ระดับ จดค่าที่อ่านได้ แล้วคำนวณ กำลัง = แรงดัน x กระแส

คันเร่ง (%)	ความเร็ว (km/h)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กำลัง $W = V \times A$	อุณหภูมิ (°C)
0					
25					
50					
75					
100					

ข้อ 2 ตอบคำถามจากการสังเกต

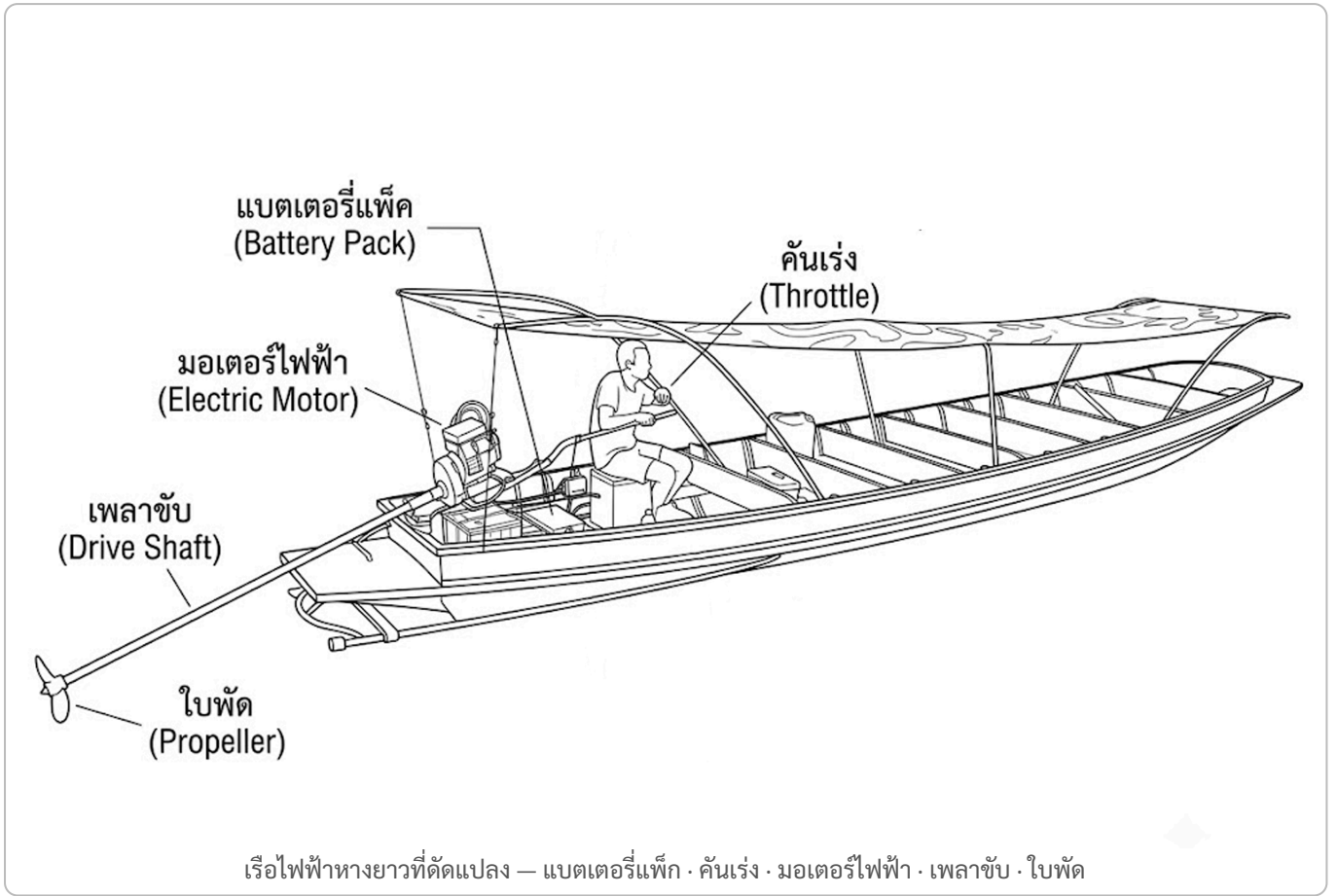
2.1 เมื่อเร่งคันเร่งเพิ่มขึ้น กระแสและแรงดันเปลี่ยนไปอย่างไร?

2.2 ตอนวิ่งทวนน้ำกับตามน้ำ ที่ความเร็วเท่ากัน กระแสต่างกันอย่างไร? เพราะอะไร?

สรุปสิ่งที่ได้เรียนรู้

คำนวณระบบพลังงานเรือไฟฟ้า

คอร์สเรือไฟฟ้า · วัน 1 เข้า (2) · พลังงาน กระแส และระยะเวลาวิ่ง



นิยาม · หน้าที่ · ความสำคัญ

นิยาม	การคำนวณพลังงาน กระแส และระยะเวลาวิ่งของระบบไฟฟ้าในเรือ
หน้าที่	ใช้สูตร Wh / กำลัง / เวลา และค่า C-rate, DOD เพื่อประเมินว่าวิ่งได้ไกล/นานแค่ไหน และเลือกขนาดแพ็ค
ความสำคัญ	วางแผนพลังงานให้พอกับเส้นทาง ไม่ให้แบตหมดกลางน้ำ และเลือกแบต/สายที่เหมาะสม

คำนวณระบบพลังงานเรือไฟฟ้า

สูตรหลัก · C-rate · พลังงานใช้ได้จริง · ตัวอย่างคำนวณเต็ม

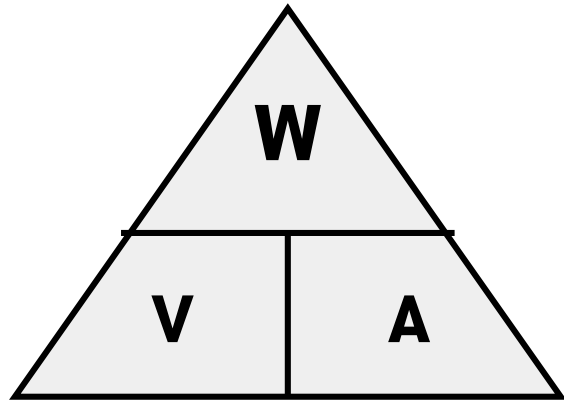
1 สูตรหลักที่ต้องใช้

$$\text{พลังงาน (Wh)} = \text{แรงดัน (V)} \times \text{ความจุ (Ah)}$$

$$\text{กำลัง (W)} = \text{แรงดัน (V)} \times \text{กระแส (A)}$$

$$\text{เวลาวิ่ง (ชม.)} = \text{พลังงานใช้ได้ (Wh)} \div \text{กำลังเฉลี่ย (W)}$$

$$\text{ระยะทาง} = \text{ความเร็ว} \times \text{เวลา}$$



ปิดค่าที่อยากรู้: ปิด $W = V \times A$ · ปิด $V = W \div A$ · ปิด $A = W \div V$

2 C-rate (อัตราการจ่าย/ชาร์จ)

1C = จ่าย/ชาร์จจนหมดใน 1 ชั่วโมง

$$\text{กระแส} = \text{C-rate} \times \text{ความจุ (Ah)}$$

$$0.5C \text{ ของ } 100Ah = 50 \text{ A (หมดใน } \sim 2 \text{ ชม.)}$$

$$1C \text{ ของ } 100Ah = 100 \text{ A (หมดใน } \sim 1 \text{ ชม.)}$$

3 พลังงานใช้ได้จริง

ไม่ควรลากแบตเตอรี่จนหมดเกลี้ยง — เพื่อ margin เพื่อยืดอายุแบตเตอรี่

ใช้จริงประมาณ 80–90%

ของพลังงานเต็ม (เช่น แบต 2,560 Wh ใช้จริง $\sim 2,048$ – $2,304$ Wh)

4 ตัวอย่างคำนวณเต็ม (แพ็คเกจ 24S 280Ah + มอเตอร์ 15 kW)

- แรงดันแพ็คเกจ = $24 \times 3.2 = 76.8 \text{ V}$ (24S LiFePO₄)
- พลังงานเต็ม = $76.8 \text{ V} \times 280 \text{ Ah} = 21,504 \text{ Wh} \approx 21.5 \text{ kWh}$
- ใช้ได้จริง 80% = $21,500 \times 0.80 \approx 17,200 \text{ Wh}$
- มอเตอร์เร่งเต็ม 15 kW → กระแส = $15,000 \div 76.8 \approx 195 \text{ A}$ ($\approx 0.7C$ ของ 280Ah — แพ้กรับไหว)
- เล่นเดินทางใช้กำลังเฉลี่ย $\sim 5 \text{ kW}$ → เวลาวิ่ง = $17,200 \div 5,000 \approx 3.4$ ชั่วโมง
- ถ้าเร่งเต็ม 15 kW ตลอด → วิ่งได้แค่ $17,200 \div 15,000 \approx 1.1$ ชั่วโมง

△ จุดสำคัญ

"15 kW" คือกำลัง

สูงสุด

ไม่ใช่กำลังที่ใช้ตลอดเวลา — เวลาวิ่งจริงคิดจาก "กำลังเฉลี่ยตอนเล่นเดินทาง" · และกระแสสูง $\sim 195 \text{ A}$ ต้องใช้สายใหญ่ + เบรกเกอร์/BMS พิกัดสูงตามไปด้วย (ดูบท 04, 06, 07)

หมายเหตุ

ให้ใช้ "กำลังเฉลี่ยจริง" ที่จดมาจากใบงานวันลงเรือ เพราะกระแสจริงเปลี่ยนตามคลื่น ลม และน้ำหนักบรรทุก

DOD กับการวางแผนพลังงานเรื่องจริง

ใช้แบตเตอรี่แคโทดถึงคุ้ม · ตัวอย่างระบบ 24S

5 DOD (Depth of Discharge) — ใช้แบตเตอรี่แคโทด

DOD คือ "ใช้ความจุไปกี่เปอร์เซ็นต์" ก่อนชาร์จใหม่ เช่น ใช้ไป 80% แล้วชาร์จ = DOD 80%

ยิ่งใช้ลึก (ลากแบตเตอรี่จนเกือบหมด) อายุแบตเตอรี่ยิ่งสั้นลง — เป็นความสัมพันธ์ผกผัน เพราะการคายประจุลึกทำให้วัสดุในเซลล์ขยาย-หดตัวมาก เกิดความเครียดสะสม

DOD เฉลี่ยที่ใช้	อายุการใช้งานโดยประมาณ
100% (ลากจนหมด)	สั้นสุด
80%	ปานกลาง
50%	ยาวสุด (อาจเกิน 2 เท่าของ 100%)

LiFePO₄ ทนกว่า

ลงได้ถึง 100% (มี BMS กันให้) โดยไม่พังทันที แต่ถ้าทำประจำอายุจะสั้นลงมาก — แนะนำใช้จริงราว

80%

เพื่อ buffer นี้คือที่มาของ "ใช้พลังงานได้จริง 80-90%" ในการคำนวณ

6 ตัวอย่างวางแผนเรื่องจริง (แพ็ค 24S 280Ah)

- พลังงานเต็ม = $76.8 \text{ V} \times 280 \text{ Ah} = 21,504 \text{ Wh} \approx 21.5 \text{ kWh}$
- ใช้ได้จริง 80% (DOD 80%) = $21,500 \times 0.80 \approx 17,200 \text{ Wh}$
- เดินเบาประหยัด ใช้กำลังเฉลี่ย 3,000 W → เวลาวิ่ง = $17,200 \div 3,000 \approx 5.7$ ชั่วโมง
- ถ้าแล่น 10 km/h → ระยะ $\approx 10 \times 5.7 \approx 57 \text{ km}$

เทียบกับชุดฝึก 24V 100Ah (2.56 kWh)

จะเห็นว่าแพ็คเกจจริง 24S เก็บพลังงานมากกว่า ~8 เท่า จึงวิ่งได้ไกลและนานกว่ามาก

เลือกขนาดอุปกรณ์ตัดแปลงเรือไฟฟ้า

เลือกขนาดมอเตอร์ให้เหมาะกับขนาดเรือ น้ำหนักบรรทุก และเส้นทางใช้งาน

7 เลือกขนาดมอเตอร์ตามชนิดเรือ

เลือกขนาดมอเตอร์จากขนาดเรือ น้ำหนักบรรทุก จำนวนผู้โดยสาร และความเร็วที่ต้องการใช้ — ตารางนี้แบ่งตามลักษณะการใช้งาน 3 แบบ: ในคลอง/แม่น้ำ · แม่น้ำสายใหญ่ · ใกล้เคียงฝั่ง

ลำดับ	รายการ	รายละเอียด		
		แบบ 1 คลอง/แม่น้ำ	แบบ 2 แม่น้ำ	แบบ 3 ชายฝั่ง
1	ขนาดเรือ ก×ย×ส (ม.) ประมาณ	1.4×8×0.4	1.8×9×0.6	2.4×9.7×1.2
2	กินน้ำลึก (ม.)	0.4	0.4	0.7
3	น้ำหนักบรรทุก (ตัน)	0.8	1.6	3.4
4	จำนวนผู้โดยสาร (คน)	8–10	10–12	10–12
5	ความเร็วทำการ (กม./ชม.)	15	15	15
6	ขนาดมอเตอร์ (kW)	7	12	18

* หมายเหตุ

หากเรือมีขนาด/หน่วยใกล้เคียงกับแบบใด สามารถพิจารณาเลือกขนาดมอเตอร์ตามตารางได้

เลือกขนาดแบตเตอรี่ตามระยะทางการชาร์จ

ยิ่งวิ่งไกลต่อการชาร์จ 1 ครั้ง ยิ่งต้องใช้แบตเตอรี่ความจุมากขึ้น

8 เลือกขนาดแบตเตอรี่ตามระยะทาง

$$\text{ขนาดแบตเตอรี่ (kWh)} \approx \text{ระยะทาง (กม.)} \times \text{อัตราใช้พลังงาน (kWh/กม.)} \div 0.8$$

อัตราใช้พลังงานตามขนาดมอเตอร์: $7 \text{ kW} = 0.40 \cdot 12 \text{ kW} = 0.45 \cdot 18 \text{ kW} = 0.50 \text{ kWh/กม.}$ (หาร 0.8 เพราะใช้แบตเตอรี่จริง ~80%)

ลำดับ	ขนาดมอเตอร์ (kW)	ผู้โดยสาร (คน)	ระยะทางต่อชาร์จ 1 ครั้ง (กม.)	ขนาดแบตเตอรี่ (kWh)
1	7	8-10	5	3
2			10	5
3			15	8
4			20	10
5			25	13
6			30	15
7	12	10-12	5	3
8			10	6
9			15	8
10			20	11
11			25	14
12			30	17
13	18	10-12	5	4
14			10	6
15			15	9
16			20	13
17			25	16
18			30	20

หมายเหตุ

ค่าในตารางคำนวณจากอัตราการใช้พลังงานข้างต้นและใช้แบตเตอรี่ 80% — เพื่อ buffer ให้เลือกขนาดเท่ากับหรือมากกว่าค่าในตาราง

ที่มาข้อมูลหัวข้อ 7-8 (เลือกขนาดอุปกรณ์ตัดแปลงเรือไฟฟ้า): กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) — <https://kc.dede.go.th/knowledge-view-file.aspx?p=221>

แบบฝึกหัด — คำนวณพลังงานและระยะเวลาวิ่ง

แสดงวิธีคิดในช่องที่กำหนด (ใช้สูตรหน้าใบความรู้)

ข้อ 1 หาพลังงานของแพ็ก

แพ็ก 24V 100Ah มีพลังงานเต็มที่ Wh?

วิธีคิด

คำตอบ (Wh)

ข้อ 2 หากำลังและเวลาวิ่ง

จากแพ็กข้อ 1 ดึงเฉลี่ย 30A → กำลังกี่ W? และถ้าใช้ได้จริง 85% จะวิ่งได้กี่ชั่วโมง?

กำลัง (W)

เวลาวิ่ง (ชม.)

วิธีคิด

ข้อ 3 ออกแบบขนาดแพ็ก

อยากวิ่ง 4 ชั่วโมง ที่กำลังเฉลี่ย 600W ต้องมีพลังงานใช้ได้กี่ Wh? และต้องมีแพ็กกี่ Ah ที่ 24V (เพื่อใช้ได้ 85%)?

พลังงานใช้ได้ (Wh)

ความจุ (Ah)

วิธีคิด

ข้อ 4 งบประมาณ (วางแผนการใช้ไฟ)

ประมาณการใช้ไฟแต่ละช่วง แล้วรวมเป็น Wh ที่ต้องใช้ทั้งหมด

ช่วงการใช้งาน	กำลัง (W)	เวลา (ชม.)	พลังงาน (Wh)
ออกตัว/เร่ง			
แล่นเดินทาง			
เดินเบา/จอดรอ			
รวมพลังงานที่ต้องใช้			

ข้อ 5 เลือกขนาดมอเตอร์และแบตเตอรี่

เรือยาว ~9 ม. บรรทุก ~1.6 ตัน ผู้โดยสาร 12 คน ต้องการวิ่ง 20 กม. ต่อการชาร์จ 1 ครั้ง — ใช้ ตารางที่ 7 และ 8 เลือกขนาดมอเตอร์และแบตเตอรี่

ขนาดมอเตอร์ (kW)

ขนาดแบตเตอรี่ (kWh)

สรุปสิ่งที่ได้เรียนรู้

เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า

คอร์สเรือไฟฟ้า · วัน 1 บ่าย (1) · มัลติมิเตอร์ · clamp meter · IR · โหลดทดสอบ

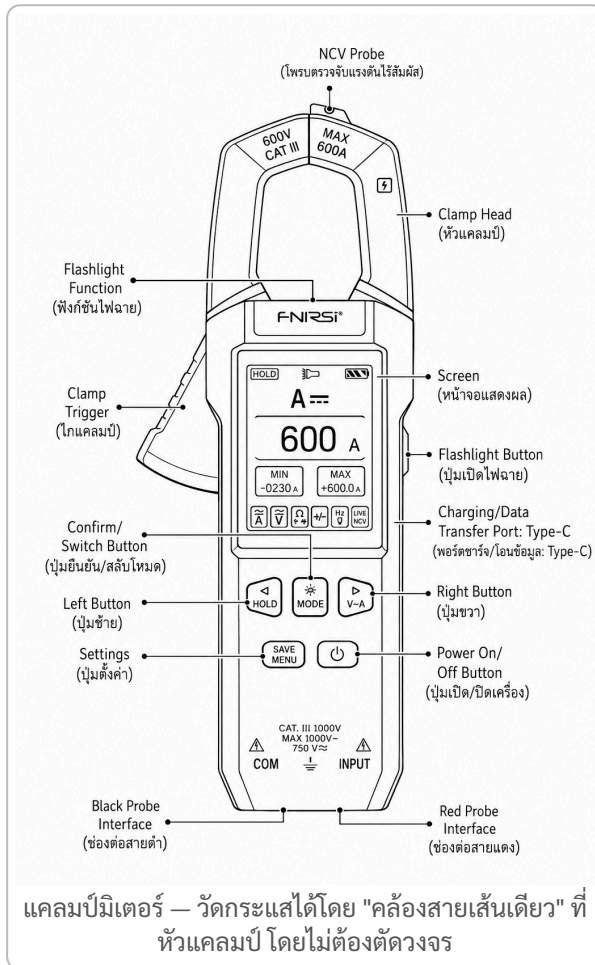
นิยาม · หน้าที่ · ความสำคัญ

นิยาม เครื่องมือวัดค่าทางไฟฟ้า เช่น มัลติมิเตอร์ แคลมป์มิเตอร์ และเครื่องวัดความต้านทานภายใน (IR)

หน้าที่ วัดและตรวจสอบแรงดัน กระแส ความต้านทาน เพื่อหาความผิดปกติและคัดเซลล์

ความสำคัญ เป็นพื้นฐานของการตรวจ ซ่อม และประกอบอย่างปลอดภัย — วัดเป็นจึงทำงานถูกและกันอันตราย

1 ส่วนประกอบของแคลมป์มิเตอร์ (Clamp meter)



จุดสำคัญ

หัวแคลมป์คล้องสายวัดกระแส

เส้นเดียว

ไม่ต้องตัดวงจร · กด

ZERO

ก่อนวัดทุกครั้ง · ห้ามคล้อง 2 เส้นพร้อมกัน (อ่านได้ 0) — ปุ่ม/ข้ออื่น ๆ ดูชื่อกำกับในภาพ

มัลติมิเตอร์และการต่อวัด

ย่านวัด · วัดแรงดัน/กระแส · IR · โหลดทดสอบ

2 มัลติมิเตอร์ — ย่านวัดและการต่อ

ย่าน	ใช้วัด	ต่อแบบ
DCV \Rightarrow V	แรงดันไฟตรง	ขนาน (คร่อม)
DCA \Rightarrow A	กระแสไฟตรง	อนุกรม
Ω	ความต้านทาน	คร่อม (ตัดไฟก่อน)
)))	ต่อเนื่อง (มีเสียงบี๊บ)	คร่อม

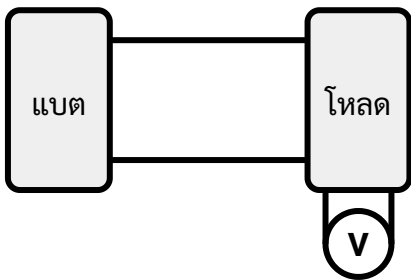
สายดำ เสียบรู COM

สายแดง เสียบรู V Ω mA (วัดกระแสสูงใช้รู 10A)

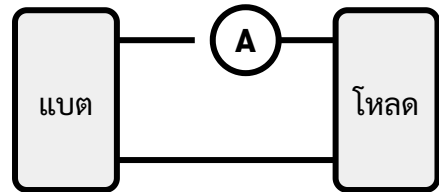
เลือกย่าน ให้สูงกว่าค่าที่คาดไว้

3 วัดแรงดัน (คร่อม) เทียบกับ วัดกระแส (อนุกรม)

วัดแรงดัน = คร่อม (ขนาน)



วัดกระแส = แทรกในวงจร (อนุกรม)



วัด V ต่อ "คร่อม" จุดที่ต้องการ · วัด A ต้อง "ตัดวงจรแล้วแทรกมิเตอร์เข้าไป"

4 IR meter และโหลดทดสอบ

IR ต่ำ ($m\Omega$) = เซลล์ดี จ่ายกระแสได้ดี

IR สูง = เซลล์เสื่อม/ขั้วหลวม

โหลดทดสอบ จ่ายโหลดแล้วดูแรงดันตก เซลล์ดีตกน้อย

⚠ ความปลอดภัยในการวัด

ห้ามเอาสายวัด "กระแส" ไปคร่อมแรงดัน (= ลัดวงจรทันที) · ระวังลืมหายค้าย่าน A แล้วไปจิ้มแรงดัน · ใช้สายวัดที่มีฟิวส์ · ตรวจสอบขั้ว/ย่านก่อนแตะจุดวัดทุกครั้ง

ความต้านทานภายใน (IR) และการคัดเซลล์

ทำไมต้องวัด IR · ใช้คัดและจัดกลุ่มเซลล์อย่างไร

5 ค่า IR บอกอะไรเกี่ยวกับเซลล์

ความต้านทานภายใน (Internal Resistance: IR) คือความต้านทานต่อกระแสไฟ "ภายในตัวเซลล์เอง" มีหน่วยเป็น มิลลิโห์ม ($m\Omega$) เกิดจากรอยต่อภายในและปฏิกิริยาเคมี

ค่า IR	หมายความว่า
ต่ำ ($m\Omega$ น้อย)	เซลล์ดี จ่ายกระแสได้ดี ร้อนน้อย แรงดันตกน้อยตอนโหลด
สูงผิดปกติ	เซลล์เสื่อม/ขั้วหลวม ร้อนง่าย แรงดันตกมากตอนโหลด

โยงกับ $V=I \times R$

ที่กระแสเท่ากัน เซลล์ IR สูงจะเสียแรงดัน (ร้อน) มากกว่า — ในแพ็คเกจที่ต่อขนาน เซลล์ IR ต่ำจะถูกบังคับให้ทำงานหนักกว่าเพื่อน

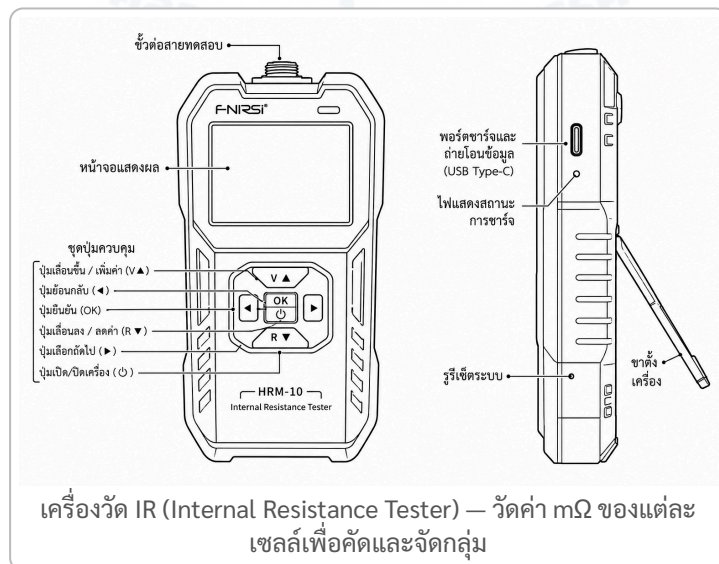
6 ใช้ IR คัดและจัดกลุ่มเซลล์

ก่อนแพ็คเกจ ให้ วัด IR ทุกเซลล์ จดบันทึก แล้วจัดเซลล์ที่ IR ใกล้เคียงกันไว้ "แถว/กลุ่มขนานเดียวกัน" เพื่อให้แต่ละกลุ่มจ่ายกระแสได้เท่า ๆ กัน แพ็คเกจสมดุล อายุยืน

ตัวอย่าง

วัดได้ IR = 18, 19, 20, และ 35 $m\Omega$ → เซลล์ 35 $m\Omega$ เป็นตัวแปลก (สูงผิดปกติ) ควรแยกออก ไม่เอามาปนกับกลุ่ม 18–20 $m\Omega$ เป้าหมายคือให้ "ผลรวม IR ของแต่ละแถวใกล้เคียงกันมากที่สุด"

ใช้กับแบตเตอรี่สองได้ เซลล์มีสองแต่ละก้อนเชื่อมไม่เท่ากัน — วัด IR แล้วจัดก่อนที่ค่าใกล้เคียงกันไว้กลุ่มเดียวกัน จึงนำมาประกอบเป็นแพ็คเกจที่สมดุลและปลอดภัยได้



ขั้นตอนนี้คือขั้นที่ 2 ของการแพ็คเกจ (ดูบท Charge/Discharge & Spot Welding)

แบบฝึกหัด — ใช้เครื่องมือวัด

วัดค่าจริง บันทึก และเลือกวิธีต่อให้ถูกต้อง

ข้อ 1 วัดและบันทึกแรงดัน/IR รายเซลล์

วัดเซลล์ทีละก้อน จดค่า แล้ว วงกลมเซลล์ที่ "อ่อนสุด" (แรงดันต่ำหรือ IR สูงผิดปกติ)

เซลล์	1	2	3	4	5	6	7	8
แรงดัน (V)								
IR (mΩ)								

เซลล์อ่อนสุดคือก้อนที่ __ เพราะ

ข้อ 2 เลือกวิธีต่อมิเตอร์

- วัดแรงดัน → ต่อมิเตอร์แบบ _____
- วัดกระแส → ต่อมิเตอร์แบบ _____
- วัดความต้านทาน → ต้อง _____ ไฟก่อน
- ใช้ clamp meter ต้องกด _____ ก่อนวัด

ข้อ 3 เช็กलिस्टความปลอดภัยก่อนวัด

- หมุนปุ่มไปย่านที่ถูกต้องก่อนแตะจุดวัด
- เสียบสายดำที่ COM, สายแดงที่ขั้วที่เหมาะสมกับย่าน
- ไม่เอาย่านกระแส (A) ไปคร่อมแรงดัน
- ตรวจสอบสายวัด/ฉนวนไม่ชำรุด มีฟิวส์
- เลือกย่านสูงกว่าค่าที่คาด แล้วค่อยลดลง

สรุปสิ่งที่ได้เรียนรู้

การย้ายสายและขั้วต่อ

คอร์สเรือไฟฟ้า · วัน 1 ปาย (2) · เลือกลาย · ทางปลา · connector

นิยาม · หน้าที่ · ความสำคัญ

นิยาม การต่อสายไฟเข้ากับทางปลา/ขั้วต่อด้วยการย้ำให้แน่น และการเลือกลาย/ขั้วให้เหมาะกับกระแส

หน้าที่ ทำจุดต่อไฟฟ้าที่แข็งแรง นำไฟดี ทนกระแส ไม่หลุด ไม่ร้อน

ความสำคัญ จุดต่อหลวมหรือสายเล็กเกินไป = ร้อน ไฟไหม้ แรงดันตก — การย้ำที่ดีคือหัวใจความปลอดภัยของระบบไฟฟ้า

1 เลือกลายตามกระแส

สายใหญ่ขึ้น = ทนกระแสได้มากขึ้น และแรงดันตกน้อยลง

ขนาดสาย (mm ²)	≈ AWG	กระแสโดยประมาณ (A)
2.5	13	~20
4	11	~30
6	9	~40
10	7	~60
16	5	~80
25	3	~110
35	2	~150

หมายเหตุ

ค่าในตารางเป็นค่า

โดยประมาณ

— ค่าจริงขึ้นกับชนิดฉนวน อุณหภูมิ และความยาวสาย ให้ยึดสเปคของสายที่ใช้จริงเป็นหลัก และเลือกเผื่อ

2 สายเล็กเกินไป = ร้อน = อันตราย

เมื่อกระแสไหลผ่านสาย จะเกิดความร้อนตามสูตร $\text{ความร้อน} = I^2 \times R$ (I คือกระแส, R คือความต้านทานของสาย) — สังเกตว่า กระแสถูก "ยกกำลังสอง" ดังนั้นกระแสมากขึ้นนิดเดียว ความร้อนพุ่งขึ้นมา

สายเล็กเกินกระแส → ร้อนจัด → ฉนวนละลาย → ไฟไหม้

สายเล็ก/ยาว → แรงดันตกมาก → เสียพลังงาน มอเตอร์อ่อนแรง

จุดต่อ/ทางปลาหลวม → ความต้านทานสูงเฉพาะจุด → ร้อนเฉพาะจุดนั้น

△ บนเรือยิ่งต้องระวัง

ความสั่นสะเทือนและความชื้นทำให้จุดต่อหลวมและกัดกร่อนง่าย — ย้ำให้แน่น เลือกลายเผื่อ และกันน้ำจุดต่อ

สาย Power / สาย Control และการเลือกขั้วต่อ

เลือกสายและคอนเนกเตอร์ให้เหมาะกับงาน · ตัวอย่างเรื่องจริง

3 สาย Power / สาย Control และขั้วต่อ (Connector)

สาย Power	เส้นใหญ่ ทนกระแสสูง (แบตเตอรี่-คอนโทรลเลอร์-มอเตอร์)	Connector	กระแสโดยประมาณ
		XT60	~60 A
สาย Control/Signal	เส้นเล็ก (คันเร่ง, สาย balance, สัญญาณ)	XT90	~90 A
สีแดง = +	สีดำ = -	Anderson SB50	~50 A
	เสมอ	Anderson SB175	~175 A

แรงดันตก (Voltage drop)

สายยาว + กระแสสูง = แรงดันตกมาก สิ้นเปลือง → ใช้สายใหญ่ขึ้นและเดินให้สั้น

4 เลือกขั้วแอนเดอร์สัน + ตัวอย่างเรื่องจริง

เลือกพิกัดแอมป์ของขั้วต่อให้ สูงกว่ากระแสใช้งานจริง (เผื่อไว้) เช่น 30A / 50A / 120A

ตัวอย่าง (ระบบเรือ 24S = 76.8V)

มอเตอร์ 3,000W ดึงกระแส = $3000 \div 76.8 \approx$

39 A

→ เลือกขั้วแอนเดอร์สัน

50A

(พอลและเผื่อ) และสายราว

10 mm²

(เพื่อความร้อน/ระยะ)

จะเห็นว่าเพราะใช้แรงดันสูง กระแสจึงไม่มาก สายและขั้วเลยไม่ต้องใหญ่มาก

ชนิดของหางปลาและหัวต่อสายไฟ

เลือกชนิดให้เหมาะกับงาน · ภาพรวมหางปลาแต่ละแบบ

5 หางปลา/หัวต่อ มีกี่แบบ

หางปลากลม (Ring) รุกกลม ชั้นน็อต/สตั๊ดยึดแน่น — นิยมกับขั้วแบตเตอรี่และปั๊บน้ำ

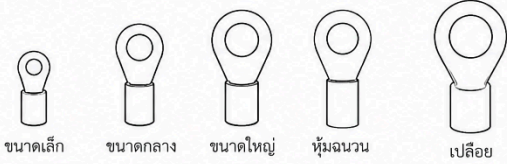
หางปลาแบบเสียบ (Spade/Blade) เสียบ-ถอดง่าย — ใช้กับขั้วเสียบ/สวิทช์

หัวต่อสายแบบกลม (Bullet) เสียบสวมกลม — ใช้ต่อ/ถอดสายเข้าหากัน

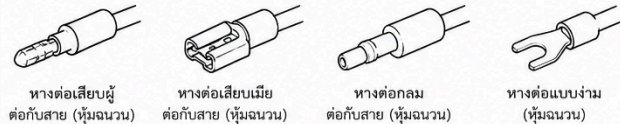
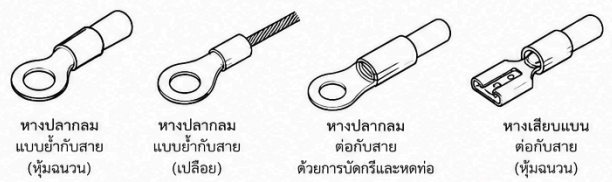
ปลอกหุ้ม/ปลอกหด หุ้มหางปลาและจุดต่อ กันช็อต/กันน้ำ

ชนิดของหางปลาและหางต่อสายไฟ

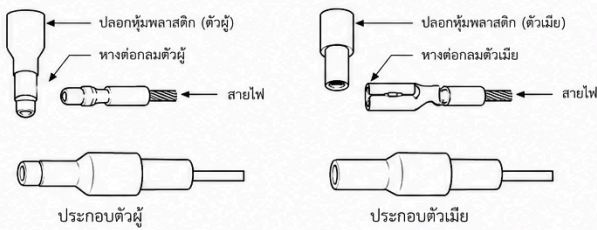
1. หางปลากลม (หางปลาแบบสวมประกอบ)



2. หางปลาและหางต่อสายเปลือย

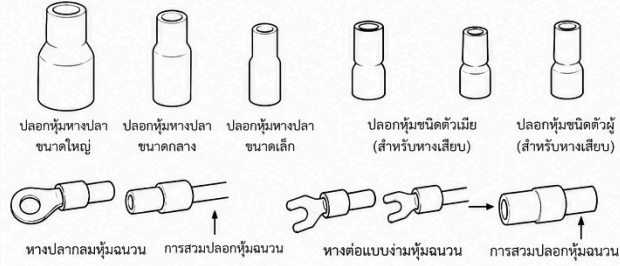


3. หางต่อสายแบบกลม (Bullet Connectors)



หมายเหตุ: ใช้สำหรับต่อสายแบบถอดเสียบได้ สะดวก รวดเร็ว และเชื่อมต่อแน่นหนา

4. ปลอกหุ้มและฉนวนสำหรับหางปลาและหางต่อสาย



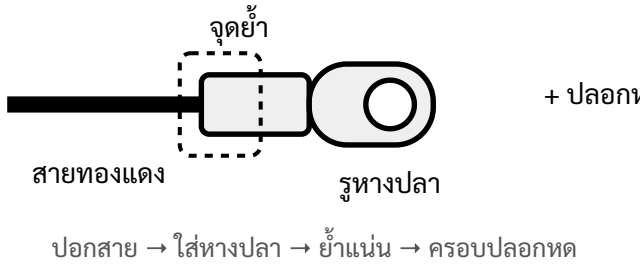
! ข้อควรระวัง: เลือกขนาดหางปลาและปลอกหุ้มให้เหมาะสมกับขนาดสายไฟ และตรวจสอบการยึดหรือบัดกรีให้แน่นหนาเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน

ผังชนิดของหางปลา/หัวต่อสายไฟ — เลือกขนาดให้พอดีกับสายและขั้วที่จะต่อ

หางปลาและการย้ำให้แน่น

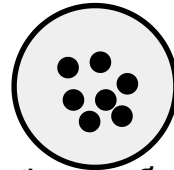
วิธีย้ำ · ย้ำดี vs ย้ำไม่ดี

6 หางปลา + การย้ำ



เลือกรูหางปลา	ตามขนาดสตัด/น็อต
เลือกปลอกท	ตามขนาดสาย
คีมย้ำ	hex/ไฮดรอลิก (สายใหญ่), ratchet (สายเล็ก)

7 ย้ำดี vs ย้ำไม่ดี



ดี ✓ แน่นเต็ม

ย้ำดี = ทองแดงอัดแน่นเต็มปลอก ดึงไม่หลุด



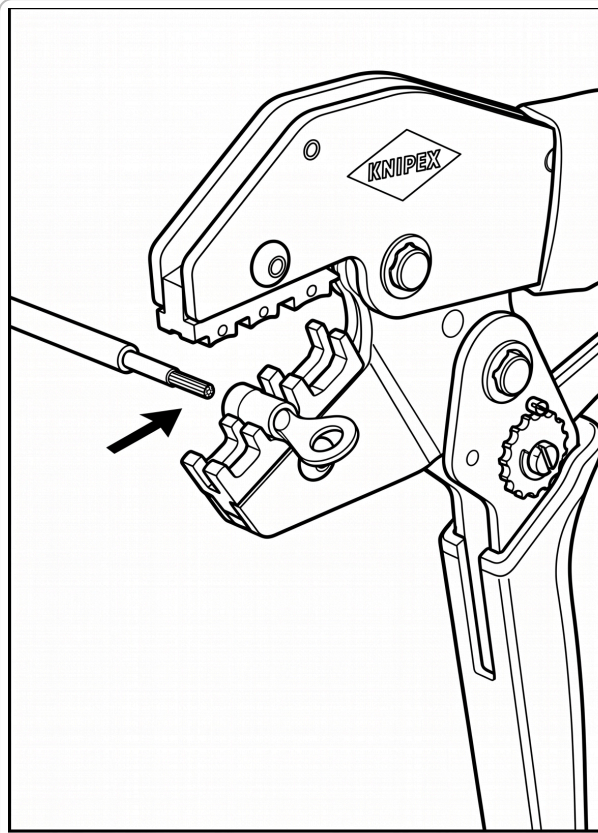
ไม่ดี ✗ หลวม/มีช่อง

⚠ ขั้วหลวม = ร้อน = ไฟไหม้
ย้ำให้แน่นและทดสอบดึงทุกเส้น

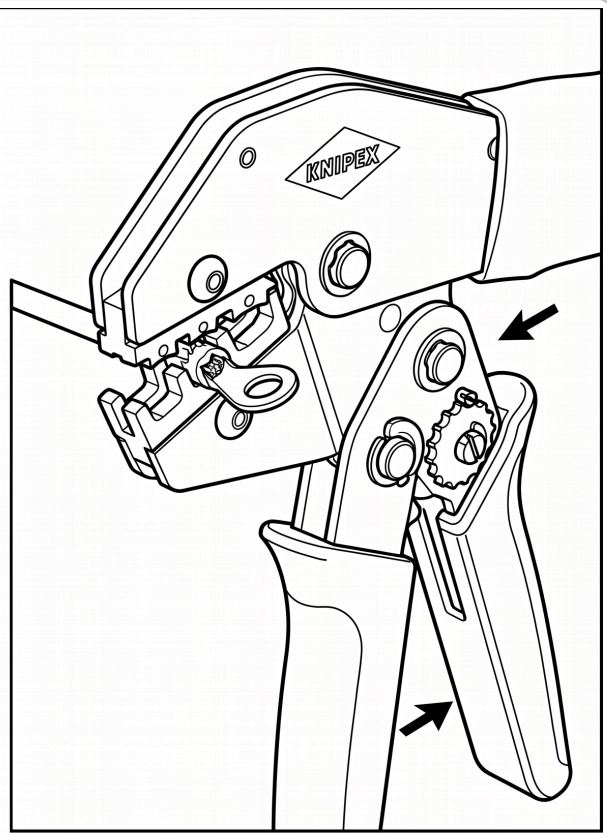
ขั้นตอนการย่ำสายไฟ (ภาพจริง)

สอดสายเข้าหางปลา แล้วย่ำด้วยคีมจนแน่น

8 วิธีย่ำหางปลาให้แน่น



1. สอดสายไฟที่ปอกฉนวนแล้วเข้าในหางปลา



2. ย่ำหางปลาด้วยคีมย่ำจนแน่น

1) สอดสายไฟที่ปอกฉนวนแล้วเข้าในหางปลา 2) ย่ำหางปลาด้วยคีมย่ำจนแน่น

เคล็ดลับ

ปอกฉนวนยาวพอดีปลอกหางปลา (ทองแดงไม่โผล่ยาว/ไม่สั้นเกิน) · ใช้คีมย่ำที่เหมาะสมกับขนาดสาย · ย่ำเสร็จ

ทดสอบดึง

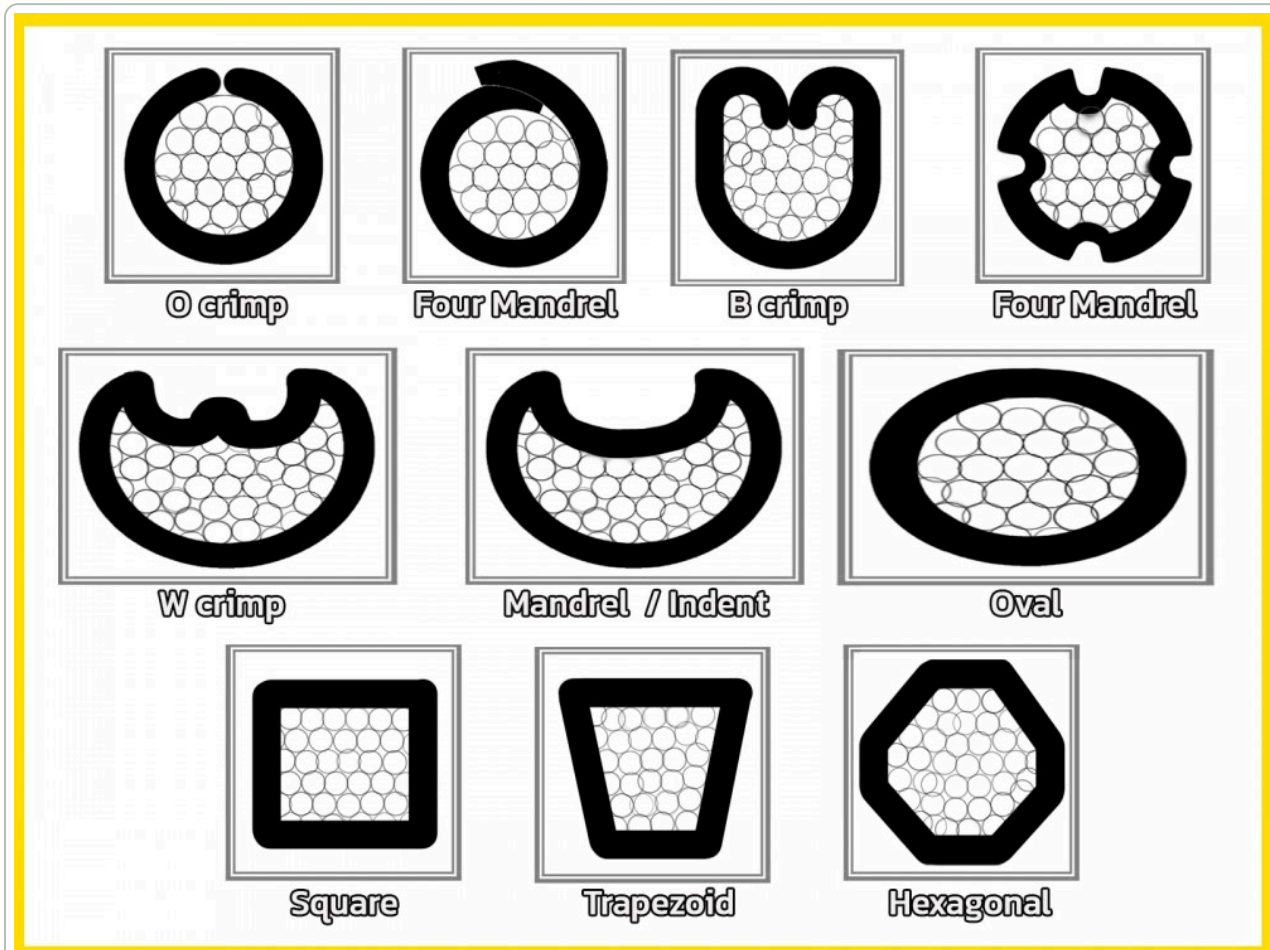
ต้องไม่หลุด แล้วครอบปลอกหุ้ม

รูปแบบหน้าตัดของรอยย้า (Crimp Profiles)

หน้าตัดรอยย้าแต่ละแบบ — เลือกให้ตรงกับทางปลาและคิมย้าที่ใช้

9 หน้าตัดรอยย้ามีหลายแบบ

เมื่อมองรอยย้า "ตามขวาง" (ตัดขวาง) จะเห็นรูปทรงต่างกันตามแบบของคิม/แม่พิมพ์ — เส้นกลม ๆ ข้างในคือเส้นลวดทองแดงของสายที่ถูกบีบให้แน่นเป็นเนื้อเดียว



หน้าตัดรอยย้าแบบต่าง ๆ — O / B / W crimp · Four Mandrel · Mandrel/Indent · Oval · Square · Trapezoid · Hexagonal

O / Oval / Hexagonal บีบรอบด้านสม่ำเสมอ ทองแดงแน่นเต็ม — นิยมกับทางปลาปลอกกลม (งานเรือทั่วไป)

B / W / Indent crimp กดเป็นร่องเข้ากลาง ม้วนปลอกหุ้มลวด — มักใช้กับขั้วต่อแบบ open-barrel

Square / Trapezoid หน้าตัดเหลี่ยม ใช้กับแม่พิมพ์เฉพาะแบบ

หลักสำคัญ

ไม่ว่าหน้าตัดแบบไหน เป้าหมายเดียวกันคือ

ทองแดงถูกบีบแน่น ไม่มีช่องว่าง

— แน่นพอดี (ไม่หลวมจนความต้านทานสูง/ร้อน และไม่บีบจนลวดขาด) · ใช้

คิมย้าให้ตรงกับชนิดทางปลา

เสมอ

แบบฝึกหัด — เลือกสาย ย้ำ และเลือกขั้วต่อ

ใช้ตารางในใบความรู้ประกอบการตอบ

ข้อ 1 เลือกขนาดสายตามกระแส

- โหลดต่อเนื่อง 60 A → ใช้สายอย่างน้อย _____ mm²
- โหลดต่อเนื่อง 100 A → ใช้สายอย่างน้อย _____ mm²
- โหลดต่อเนื่อง 150 A → ใช้สายอย่างน้อย _____ mm²

ข้อ 2 จับคู่ขั้วต่อกับกระแสที่เหมาะสม

งานที่ต้องการ	เลือก connector
สายแบตหลัก ~150 A	
สายมอเตอร์เล็ก ~60 A	
สายเสริม ~50 A	

ข้อ 3 เช็กลิสต์การย้ำ + บันทึกผลทดสอบดึง (Pull test)

- ปอกฉนวนยาวพอดีกับปลอกหางปลา ไม่สั้น/ยาวเกิน
- เลือกหางปลาตรงขนาดสายและรูสตัด
- ย้ำด้วยคีมที่เหมาะสมกับขนาด แน่นเต็มปลอก
- ครอบปลอกหด/หุ้มฉนวนซ้ำเปลี่ยน
- ทดสอบดึง — ไม่หลุด ไม่ขยับ

เส้นที่	ขนาดสาย (mm ²)	ดึงแล้วหลุด? (ใช่/ไม่)	ผ่าน/ไม่ผ่าน
1			
2			
3			

สรุปสิ่งที่ได้เรียนรู้

พื้นฐานแบตเตอรี่ลิเทียม (LiFePO₄)

คอร์สเรือไฟฟ้า · วัน 2 เข้า (1) · รู้จักลิเทียม · การต่อ S/P · เลือกแพ็คเกจ

นิยาม · หน้าที่ · ความสำคัญ

นิยาม ความรู้เรื่องเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียม และการต่อแบบอนุกรม (S)/ขนาน (P) เป็นแพ็คเกจ

หน้าที่ กำหนดแรงดันด้วยจำนวน S และกำหนดความจุด้วยจำนวน P ให้ตรงกับระบบเรือ

ความสำคัญ แบตคือหัวใจของเรือไฟฟ้า เข้าใจ S/P และชนิดเซลล์จึงออกแบบแพ็คเกจได้ถูก ปลอดภัย และคุ้มค่า

1 จากตะกั่วกรด สู่อิเทียม

เมื่อก่อนรถและเรือไฟฟ้าใช้ แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (แบบเดียวกับแบตเตอรี่รถยนต์) ราคาถูกก็จริง แต่ หนักมาก เก็บพลังงานต่อน้ำหนักได้น้อย และอายุสั้น (ชาร์จได้ไม่กี่รอบ) พอเอามาลงเรือยิ่งทำให้เรืออืดและกินพื้นที่

ปัจจุบันจึงเปลี่ยนมาใช้ แบตเตอรี่ลิเทียม เพราะธาตุลิเทียมเป็นโลหะที่เบาที่สุด จึงเก็บพลังงานได้มากในน้ำหนักที่เบากว่า แถมอายุยาวกว่าหลายเท่า

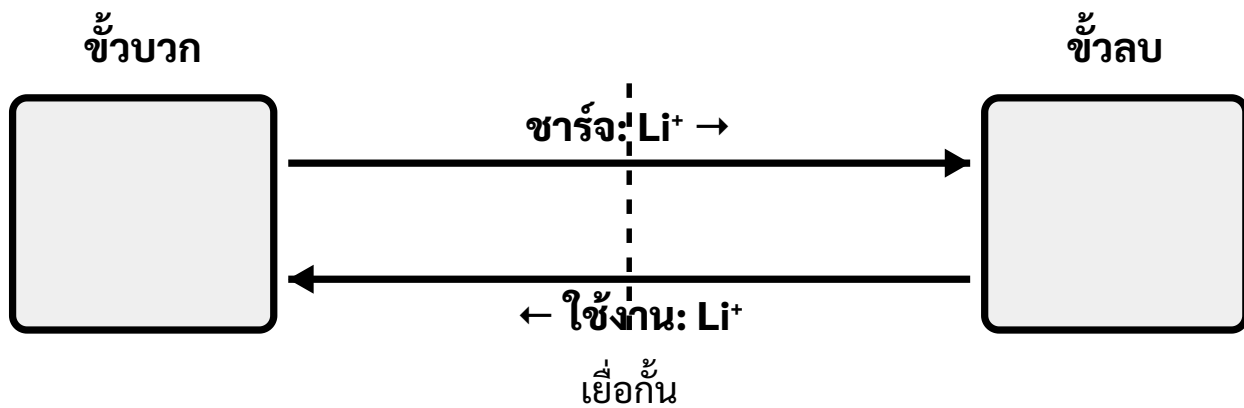
เทียบที่ 12V 100Ah	ตะกั่วกรด	LiFePO ₄ (ลิเทียม)
น้ำหนักโดยประมาณ	~30 กก.	~13 กก.
ใช้พลังงานได้จริง	~50%	เกือบ 100%
อายุการใช้งาน (รอบชาร์จ)	~300-500	3,000-5,000

สรุปสั้น

ลิเทียม = เบากว่าครึ่ง · ใช้พลังงานได้มากกว่าเท่าตัว · อยู่ได้นานกว่าราว 10 เท่า — คุ้มกว่ามากสำหรับเรือ

2 ลิเทียมไอออนทำงานอย่างไร (เข้าใจง่าย)

ภายในเซลล์มี 2 ขั้ว (ขั้วบวกกับขั้วลบ) คั่นด้วย เยื่อกั้น (separator) และมีน้ำยา (อิเล็กโทรไลต์) ให้ไอออนวิ่งผ่าน



ชาร์จ = ดันไอออนไปเก็บที่ขั้วลบ · ใช้งาน = ไอออนวิ่งกลับ ปลอ่ยไฟออกมา

เปรียบเทียบให้จำง่าย

เหมือน "สูบน้ำขึ้นถังสูง" ตอนชาร์จ แล้ว "ปล่อยน้ำไหลลงมาปั่นกังหัน" ตอนใช้งาน — ไอออนวิ่งไป-กลับซ้ำได้หลายพันรอบ จึงนำกลับมาชาร์จใหม่ได้เรื่อย ๆ

ชนิดของแบตเตอรี่ลิเทียม

ลิเทียมมีหลายเคมี — แต่ละชนิดเด่นคนละด้าน

3 ชนิดของแบตเตอรี่ลิเทียม

ชนิด	แรงดัน/เซลล์	จุดเด่น	นิยมใช้กับ
LCO	3.7 V	ความจุสูง	มือถือ / แล็ปท็อป
LMO	3.7 V	เสถียร ปลอดภัย	เครื่องมือไฟฟ้า / การแพทย์
LFP (LiFePO ₄) ★	3.2 V	ปลอดภัยสูง อายุยาว ทนร้อน	รถ/เรือไฟฟ้า
NMC	3.6–3.7 V	กำลังสูง พลังงานหนาแน่น	รถยนต์ไฟฟ้า
NCA	3.6 V	พลังงานสูง อายุยาว (แพง)	EV ระดับสูง
LTO	2.4 V	ชาร์จไว ทนรอบมาก (ความจุต่ำ)	ระบบสำรองไฟ

เรือของเราใช้ LFP (LiFePO₄)

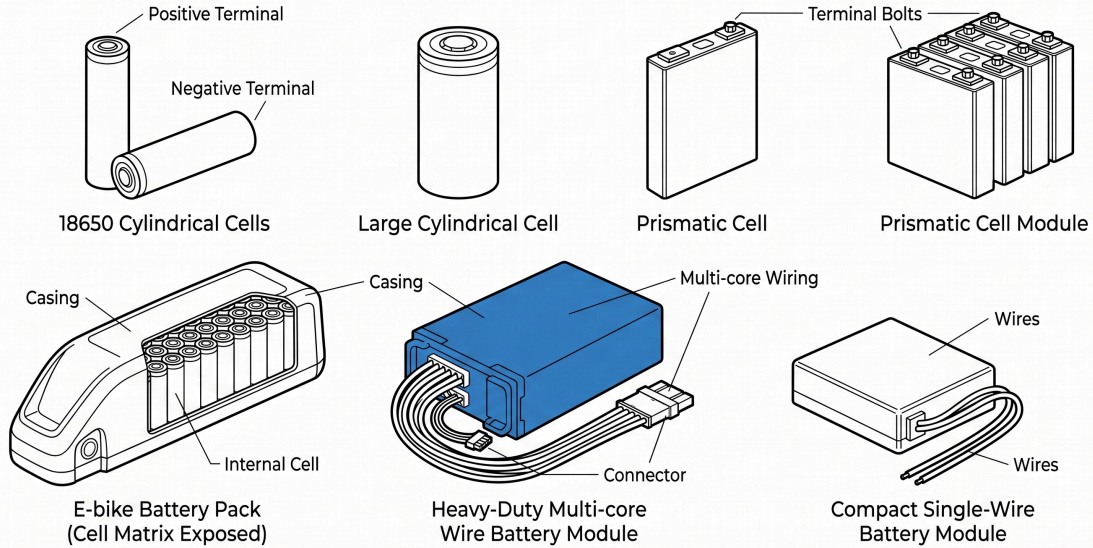
— เหตุผลเต็มอยู่ช่วงเลือกแบตเตอรี่ยี่ห้อ

รูปทรงของเซลล์และแพ็คเกจลิเทียม

นอกจาก "ชนิดเคมี" ยังมีหลาย "รูปทรง" ให้เลือกใช้

รูปทรงที่พบบ่อย

EXAMPLES OF LITHIUM-ION BATTERY SYSTEMS



ตัวอย่างรูปทรงเซลล์/แพ็คเกจลิเทียม — ทรงกระบอก, ปริซึม, โมดูล และแพ็คเกจสำเร็จ

ทรงกระบอก (Cylindrical) เช่น 18650 / 21700 — เล็ก ง่าย นิยมทำแพ็คเกจ e-bike/เรือเล็ก

ทรงกระบอกใหญ่ ความจุต่อก้อนสูงกว่า

ปริซึม (Prismatic) ก้อนสี่เหลี่ยมความจุสูง (เช่น 280Ah) นิยมงานเรือ/โซลาร์

โมดูล / แพ็คเกจสำเร็จ ประกอบเป็นชุดพร้อมสายและขั้วต่อ

การต่อแบตเตอรี่ — อนุกรม (S) / ขนาน (P)

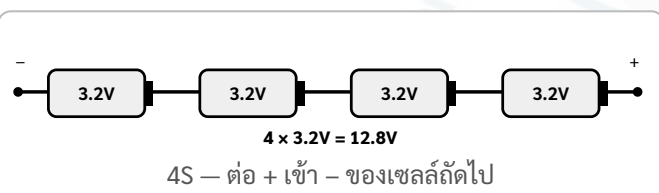
เซลล์พื้นฐาน LiFePO_4 · ต่อ S เพิ่มโวลต์ · ต่อ P เพิ่ม Ah

4 ข้อมูลพื้นฐานเซลล์ LiFePO_4

รายการ	ค่า
แรงดัน Nominal	3.2 V / เซลล์
แรงดันชาร์จเต็ม	3.65 V / เซลล์
แรงดันต่ำสุด (ตัดการจ่าย)	2.5 V / เซลล์
ตัวอย่างความจุ	100 Ah

5 ต่ออนุกรม (Series)

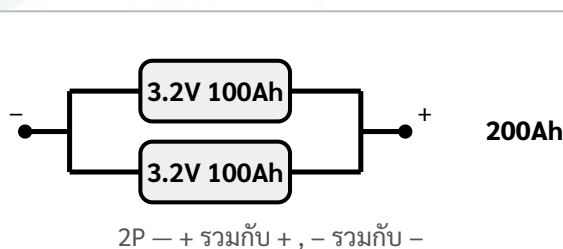
แรงดันรวม เพิ่มขึ้น · ความจุ (Ah) เท่าเดิม



$$\text{แรงดันรวม} = \text{จำนวนเซลล์} \times 3.2V$$

6 ต่อขนาน (Parallel)

แรงดัน เท่าเดิม · ความจุรวม เพิ่มขึ้น



$$3.2V \ 100Ah + 3.2V \ 100Ah = 3.2V \ 200Ah$$

เปรียบเทียบการต่อ และอ่านชื่อแพ็ค

อนุกรม vs ขนาน · 4S2P / 8S1P หมายความว่าอะไร

7 เปรียบเทียบการต่อ

รูปแบบ	แรงดัน (V)	ความจุ (Ah)	ใช้เมื่อ
อนุกรม (Series)	เพิ่มขึ้น ▲	เท่าเดิม	ต้องการแรงดันสูงขึ้น
ขนาน (Parallel)	เท่าเดิม	เพิ่มขึ้น ▲	ต้องการความจุ/กระแสมากขึ้น

8 อ่านชื่อแพ็คแบตเตอรี่ (S = อนุกรม, P = ขนาน)

S = จำนวนก้อนที่ต่ออนุกรม (กำหนดแรงดัน) · P = จำนวนชุดที่ต่อขนาน (กำหนดความจุ)

ชื่อแพ็ค	จำนวนเซลล์	แรงดัน (3.2V/เซลล์)	ความจุ (เซลล์ 100Ah)
4S1P	4	12.8 V	100 Ah
4S2P	8	12.8 V	200 Ah
8S1P	8	25.6 V	100 Ah

จำง่าย

ต่ออนุกรมเพิ่ม "โวลต์" · ต่อขนานเพิ่ม "แอมป์-ชั่วโมง (Ah)" · จำนวนเซลล์ทั้งหมด = S × P

เลือก LiFePO₄ และต่อใช้จริงในเรือ

ทำไม่ต้อง LFP · เลือกจำนวน S/P ตามระบบเรือ

9 ทำไมเรือเราเลือก LiFePO₄

ปลอดภัยที่สุด	ในกลุ่มลิเทียม โครงสร้างเคมีเสถียร ไม่ลุกไหม้/ระเบิดง่ายแม้ร้อนหรือถูกเจาะ — สำคัญมากบนเรือกลางน้ำที่หนีไฟลำบาก
อายุยาว	3,000–5,000 รอบ ชาร์จเกือบทุกวันก็ใช้ได้หลายปี
ทนความร้อนและจ่ายกระแสต่อเนื้อได้ดี	เหมาะกับมอเตอร์เรือที่กินกระแสนาน ๆ
แรงดันนิ่ง 3.2V	ตลอดการใช้งาน ทำให้คำนวณ/ออกแบบระบบง่าย

ข้อแล็ก

พลังงานต่อน้ำหนักร้อยกว่า NMC เล็กน้อย และแรงดันต่อเซลล์ต่ำกว่า (ต้องใช้เซลล์จำนวนมากขึ้นเพื่อให้ได้แรงดันเท่ากัน) แต่แล็กกับความปลอดภัยและอายุที่คุ้มกว่ามากสำหรับงานเรือ

10 เลือกจำนวน S ตามแรงดันระบบเรือ

จำนวนอนุกรม (S) กำหนดแรงดัน · จำนวนขนาน (P) กำหนดความจุ/ระยะวิ่ง

$$S = \text{แรงดันที่ต้องการ} \div 3.2V \cdot P = \text{ความจุที่ต้องการ} \div \text{ความจุต่อเซลล์} \cdot \text{เซลล์ทั้งหมด} = S \times P$$

ระบบเรือ	LiFePO ₄ (3.2V)	NMC (3.6–3.7V)
12V	4S (12.8V)	3S–4S
24V	8S (25.6V)	7S
48V	15S–16S (48–51V)	13S
72V	22S–24S	20S

ข้อสังเกต

ชนิดเซลล์ต่างกัน → จำนวน S ต่างกัน เพราะแรงดันต่อเซลล์ไม่เท่ากัน (คู่มือช่างเดฟใช้ NMC จึง 48V=13S, 72V=20S — แต่เรือเราใช้ LFP ต้องใช้ S มากกว่า)

ตัวอย่าง อยากได้แพ็คเกจเรือ 24V 20Ah จากเซลล์ทรงกระบอก 3.2V 5Ah → ต้อง 8S4P = 32 เซลล์ (8 อนุกรม ได้ 25.6V · 4 ขนาน ได้ 20Ah)

ระบบจริงบนเรือ — 24S LiFePO₄

12V/24V คือชุดฝึก · เรือใช้งานจริงต้องการแรงดันสูงกว่ามาก

11 ทำไมเรือจริงใช้แรงดันสูง

ระบบ 12V/24V ที่ใช้ในแบบฝึกหัด เป็น "ชุดฝึก/ทดสอบ" เพื่อให้เข้าใจหลัก S/P ก่อน แต่เรือใช้งานจริงต้องการกำลังสูง (มอเตอร์หลายกิโลวัตต์) จึงใช้แรงดันสูงกว่ามาก — ที่นิยมคือ 24S ขึ้นไป

$$\text{กำลัง } P = V \times I \rightarrow \text{แรงดันสูง ทำให้ กระแสต่ำลง ที่กำลังเท่ากัน}$$

ผลคือ สายไฟเล็กลง ร้อนน้อยลง สูญเสียพลังงานน้อยลง และมอเตอร์ทำกำลังได้มากขึ้น

มอเตอร์ 3,000W	ที่ 24V	ที่ 76.8V (24S)
กระแสที่ต้องดึง ($I = P \div V$)	~125 A	~39 A
ขนาดสายที่ต้องใช้	ใหญ่มาก	เล็กลงเยอะ

เรือลำใหญ่

อาจใช้สูงกว่านี้อีก เช่น 48S-96S (150-300V) ตามกำลังมอเตอร์ที่ต้องการ

12 ตัวอย่างแพ็คเกจจริง 24S LiFePO₄

จำนวนเซลล์	24 ก้อนต่ออนุกรม (24S)
แรงดัน Nominal	$24 \times 3.2 = 76.8 \text{ V}$
แรงดันชาร์จเต็ม	$24 \times 3.65 = 87.6 \text{ V}$
แรงดันตัดต่ำ	$24 \times 2.5 = 60 \text{ V}$ (ตั้งปลอดภัยที่ ~2.8V/เซลล์ = 67.2 V)
BMS	24S · สาย balance B-, B1 ... B24 รวม 25 เส้น

ตัวอย่างคำนวณ (เซลล์ปริซึม LiFePO₄ 280Ah ที่นิยมในงานเรือ ต่อ 24S1P)

- แรงดัน 76.8 V · ความจุ 280 Ah → พลังงาน = $76.8 \times 280 = 21,504 \text{ Wh} \approx 21.5 \text{ kWh}$
- มอเตอร์เรือเล่นเดินทางเฉลี่ย 3,000 W → เวลาวิ่ง $\approx 21,500 \times 0.9 \div 3,000 \approx 6.4$ ชั่วโมง
- น้ำหนักแพ็คเกจ 130 กก. (เซลล์ 280Ah หนัก ~5.4 กก. × 24)

เปรียบเทียบ	ชุดฝึก/ทดสอบ	เรือใช้งานจริง
การต่อ	4S – 8S	24S ขึ้นไป
แรงดัน Nominal	12.8 – 25.6 V	76.8 V
ใช้ทำอะไร	เรียนหลัก S/P	ขับมอเตอร์จริง

แบบฝึกหัดการต่อแบตเตอรี่

เขียนสัญลักษณ์การต่อให้ถูกต้องตามแบบอนุกรม (S)/ขนาน (P) แล้วคำนวณ V และ Ah

สัญลักษณ์ที่ใช้

เซลล์ตัวอย่าง 1 ก้อน =

1.5V, 6Ah

.

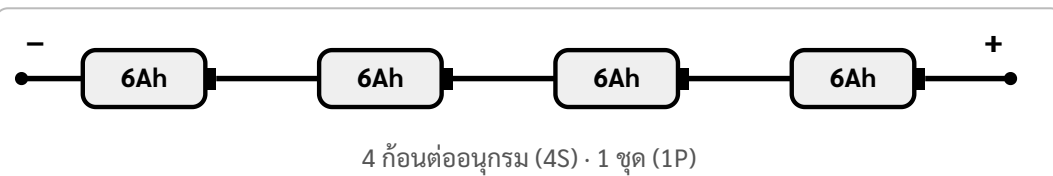
+

= ขั้วบวก .

-

= ขั้วลบ . (ใช้ตัวเลขกลม ๆ เพื่อฝึกหลัก S/P ก่อน — หลักเดียวกับ LiFePO₄)

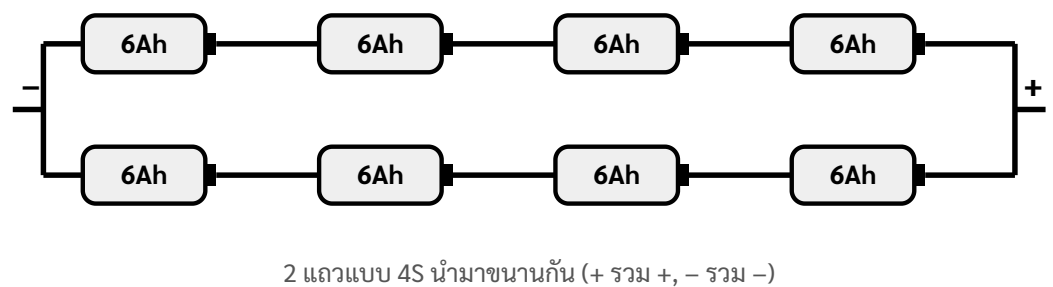
ข้อ 1 ต่อแบบ 4S1P (อนุกรม 4 ก้อน)



แรงดันรวม (V)

ความจุรวม (Ah)

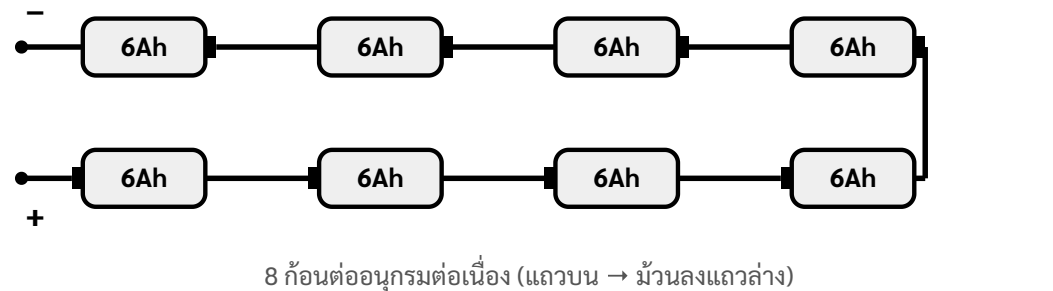
ข้อ 2 ต่อแบบ 4S2P (อนุกรม 4 ขนาน 2 ชุด)



แรงดันรวม (V)

ความจุรวม (Ah)

ข้อ 3 ต่อแบบ 8S1P (อนุกรม 8 ก้อน)



แรงดันรวม (V)

ความจุรวม (Ah)

ข้อ 4 ออกแบบเอง — วาดและบันทึกวิธีคิด

โจทย์: ต้องการแพ็ค **12V 12Ah** จากเซลล์ **1.5V 6Ah** — ต้องต่อแบบที่ **S** ที่ **P**? จงวาดการต่อในพื้นที่ด้านล่าง แล้วเขียนวิธีคิด

ที่ S (อนุกรม)

ที่ P (ขนาน)

ใช้เซลล์ทั้งหมดกี่ก้อน

พื้นที่วาดการต่อ (ใช้สัญลักษณ์เซลล์ + ขั้ว + / -)

อธิบายวิธีคิด

สรุปสิ่งที่ได้เรียนรู้

BMS และ Active Balance

คอร์สเรือไฟฟ้า · วัน 2 เข้า (2) · หน้าที่ BMS · บาลานซ์ · เลือก · เดินสาย

นิยาม · หน้าที่ · ความสำคัญ

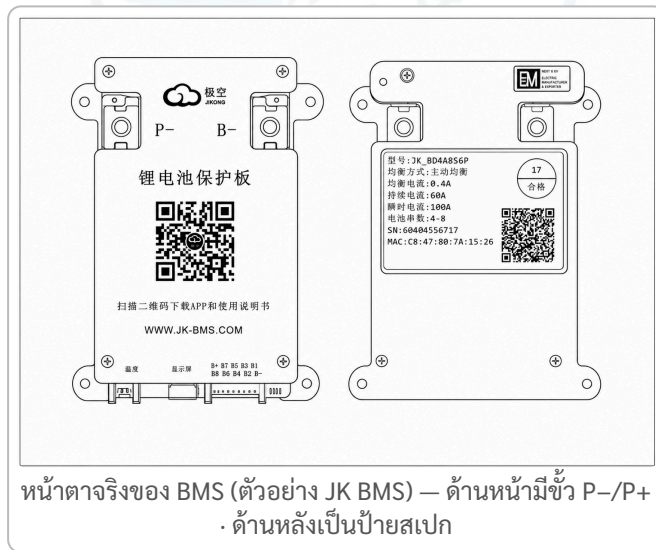
นิยาม BMS (Battery Management System) คือวงจรจัดการและป้องกันแบตเตอรี่ พร้อมการปรับสมดุลเซลล์ (balance)

หน้าที่ กันชาร์จเกิน จ่ายต่ำเกิน กระแสเกิน อุณหภูมิเกิน และทำให้เซลล์แรงดันเท่ากัน

ความสำคัญ เป็นด้านความปลอดภัยของแพ็ก ป้องกันแบตเตอรี่เสียหาย/ไฟไหม้ และยืดอายุการใช้งาน

1 BMS ทำหน้าที่อะไร

หน้าที่	ป้องกันอะไร
กันชาร์จเกิน (OVP)	เซลล์แรงดันสูงเกิน (เกิน ~3.65V)
กันจ่ายต่ำเกิน (UVP)	เซลล์แรงดันต่ำเกิน (ต่ำกว่า ~2.5V)
กันกระแสเกิน/ลัดวงจร	ดึงกระแสมากเกินไป หรือไฟช็อต
กันอุณหภูมิเกิน	แพ็กร้อน/เย็นเกินไป
บาลานซ์ (Balance)	ทำให้ทุกเซลล์แรงดันเท่ากัน



2 Passive vs Active Balance

Passive เผาพลังงานเซลล์สูงทิ้งเป็นความร้อน (ช้า, กระแสระดับ mA)

Active ย้ายพลังงานจากเซลล์สูงไปเซลล์ต่ำ (เร็วกว่า, ประหยัดกว่า, กระแสระดับ A)

ทำไมต้องบาลานซ์

ถ้าเซลล์ไม่เท่ากัน เซลล์ที่อ่อนสุดจะถึงขีดจำกัดก่อน ทำให้ BMS ตัดทั้งแพ็กเร็ว ใช้ความจุได้ไม่เต็ม

เลือก BMS และโครงสร้างแพ็ค

เลือกตามชนิดแบตเตอรี่ · จำนวน S · พิกัดกระแส · แล้วดูโครงสร้างแพ็ค

3 เรื่องที่ต้องดูตอนเลือก BMS

1) ตรงชนิดแบตเตอรี่ — LFP กับ NMC ใช้ BMS คนละเบอร์ เพราะแรงดันตัดต่างกัน ใช้ผิดเซลล์เสียหาย

ชนิด	ตัดต่ำ/เซลล์	ชาร์จเต็ม/เซลล์
LFP (LiFePO ₄)	~2.5-2.8 V	3.65 V
NMC	~3.0 V	4.2 V

2) ตรงจำนวน S — BMS ต้องตรงจำนวนเซลล์อนุกรม เช่น 4S, 8S, หรือ 24S สำหรับเรื่องจริง

3) พิกัดกระแสพ่วง + เผื่อกระชาก — มอเตอร์ตอนออกตัวดึงกระแสพุ่งสูง ควรเลือก BMS เพื่อพิคไว้ราว 3 เท่า ของกระแสใช้งานต่อเนื่อง

ตัวอย่าง

มอเตอร์ดึงต่อเนื่อง 50A → เลือก BMS ที่ทนต่อเนื่อง $\geq 50A$ และทนพิคได้ $\sim 150A$ · งานแพ็คใหญ่ควรเลือกแบบ

Active balance

เพราะปรับสมดุลได้เร็วกว่า

4 โครงสร้างแพ็ค

สาย balance

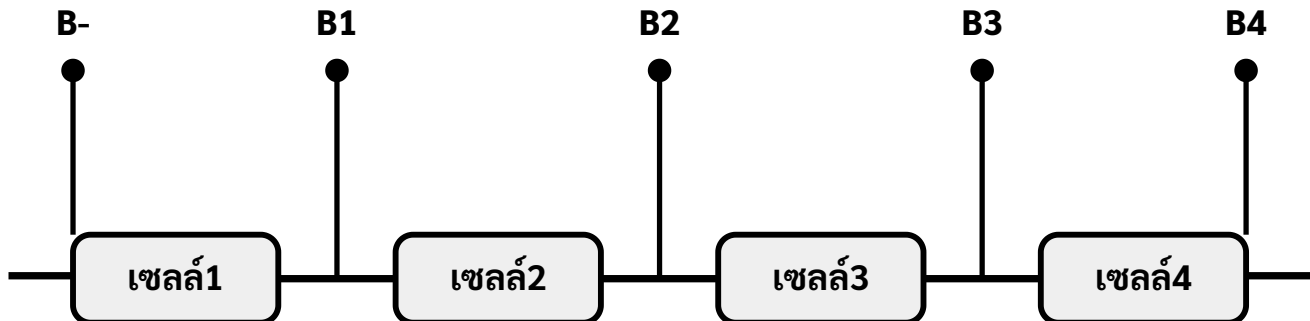


เซลล์ → บัสบาร์/นิกเกิล → สาย balance → BMS → ขั้วออก

สาย balance / sense — ไล้ B-, B1, B2 ...

ตำแหน่งแท็บ · จำนวนเส้น · ลำดับการต่อ · แท็กจริง

5 สาย balance / sense — ไล้ B-, B1, B2 ...



4S ใช้สาย balance 5 เส้น (B-, B1, B2, B3, B4) ต่อที่ "รอยต่อระหว่างเซลล์" ทุกจุด

จำนวนสาย balance = จำนวน S + 1 · 4S = 5 เส้น · 8S = 9 เส้น

△ ลำดับสำคัญมาก

ต่อ

B-

ก่อน แล้วไล้

B1 → B2 → ... → Bn

ตามลำดับ · ห้ามสลับเส้น (BMS อ่านผิด/พังได้) · ห้ามให้สาย balance ลัดกัน (เกิดประกายไฟ)

6 สาย balance ในแท็กจริง

แท็ก	จำนวนสาย balance (S + 1)	ใช้กับ
4S	5 เส้น	ชุดฝึก 12V
8S	9 เส้น	ชุดฝึก 24V
24S	25 เส้น	เรือจริง 76.8V

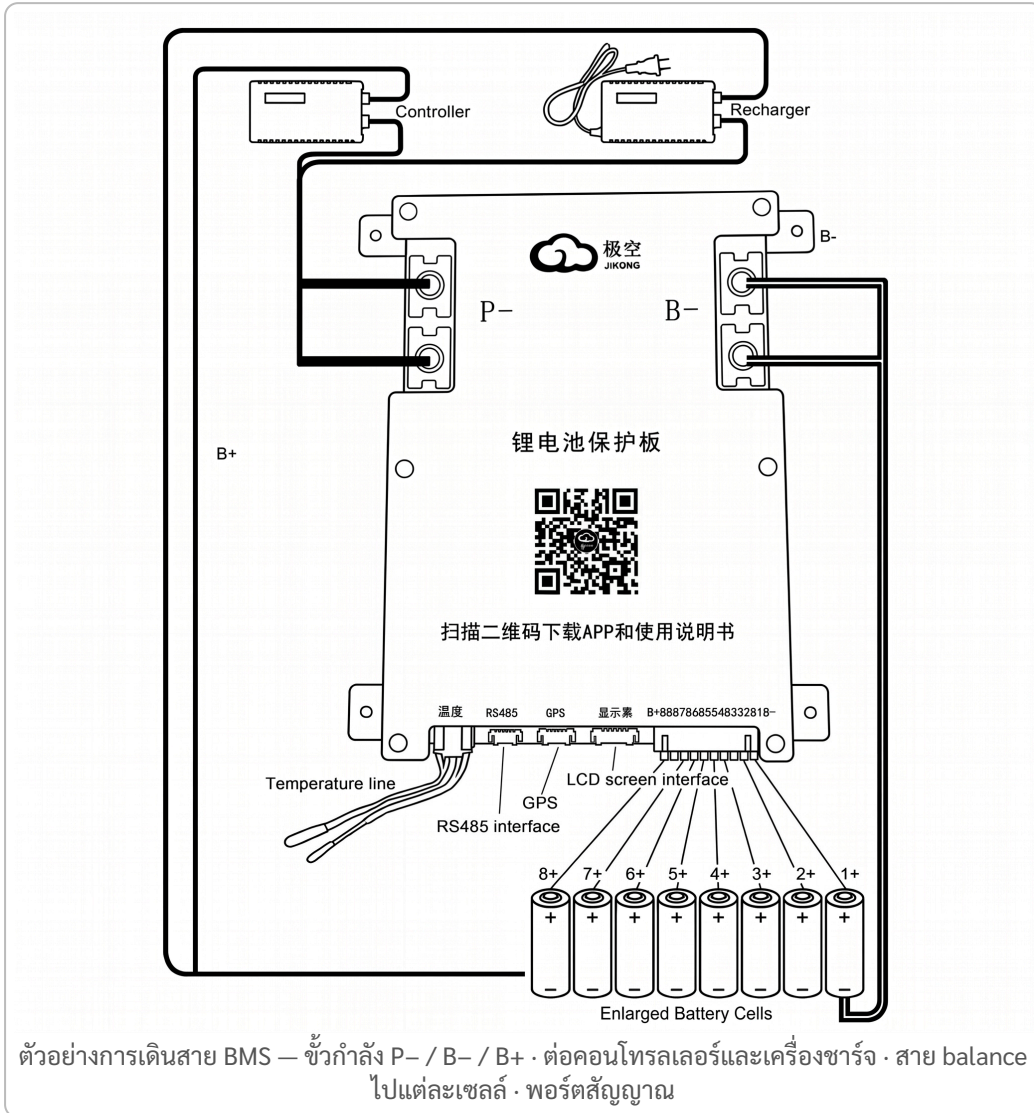
△ แท็กใหญ่ยิ่งต้องระวัง

24S มี 25 เส้น ต่อผิดลำดับหรือหลวมแม้เส้นเดียว ก็ทำให้ BMS อ่านผิด/ตัดทำงานผิดได้ — ต่อ B- ก่อน แล้วไล้ที่ละเส้นและวัด ยืนยันทุกจุด

การต่อสายของ BMS (ภาพรวม)

ขั้วไฟกำลัง · สาย balance · พอร์ตสัญญาณ

7 แผนภาพการเดินสาย BMS



B- / B+	ต่อขั้วลบ/บวกของแพ็คเกจ
P-	ขั้วลบออกไปใช้งาน (เข้าคอนโทรลเลอร์/โหลด)
สาย balance	ไปทุกจุดต่อเซลล์ (1+ ถึงก่อนสุดท้าย)
พอร์ตสัญญาณ	อุณหภูมิ (Temp) · RS485 · GPS · จอ LCD
เครื่องชาร์จ/คอนโทรลเลอร์	ต่อที่ฝั่งขั้วกำลัง

แบบฝึกหัด — ไล่สาย BMS และตรวจแพ็ค

เซลล์ LiFePO_4 3.2V/เซลล์

ข้อ 1 แรงดันสะสมของแต่ละแท็บ (เทียบ B-)

ถ้าทุกเซลล์ = 3.2V แรงดันที่วัดได้ระหว่างแต่ละแท็บกับ B- ควรไล่ขึ้นเท่าไร? (เติมในตาราง)

แท็บ	B-	B1	B2	B3	B4
แรงดันเทียบ B- (V)	0				

แพ็ค 8S ต้องใช้สาย balance ทั้งหมด _____ เส้น

ข้อ 2 เรียงลำดับการต่อสาย balance

เขียนหมายเลข 1-5 หน้ารายการ ให้ถูกตามลำดับการต่อ

- ต่อ B3
- ต่อ B-
- ต่อ B2
- ต่อ B4 (เส้นสุดท้าย)
- ต่อ B1

ข้อ 3 วิเคราะห์ปัญหา

3.1 ถ้าแอป BMS อ่านเซลล์หนึ่งได้ 0.00V แปลว่าอะไร? ตรวจอะไรก่อน?

3.2 ถ้าแรงดันแท็บไม่ไล่ขึ้นตามลำดับ (เช่น B2 น้อยกว่า B1) บอกอะไร?

สรุปสิ่งที่ได้เรียนรู้

ตรวจและต่อระบบมอเตอร์

คอร์สเรือไฟฟ้า · วัน 2 ปาย (1) · คอนโทรลเลอร์ · มอเตอร์ · คันเร่ง · เบรกเกอร์

นิยาม · หน้าที่ · ความสำคัญ

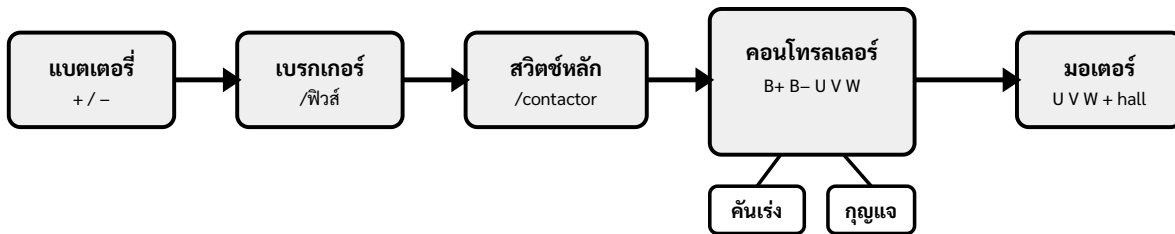
นิยาม	ระบบขับเคลื่อน = คอนโทรลเลอร์ + มอเตอร์ + คันเร่ง + อุปกรณ์ป้องกัน (เบรกเกอร์/สวิตช์)
หน้าที่	เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เป็นการหมุนใบพัดตามที่คันเร่งสั่ง
ความสำคัญ	เป็นส่วนที่ทำให้เรือเคลื่อนที่ — ต่อถูกและปลอดภัยจึงใช้งานได้จริง ไม่อันตราย

1 ส่วนประกอบของระบบขับเคลื่อน

ส่วนประกอบ	หน้าที่ / สายที่เกี่ยวข้อง
คอนโทรลเลอร์	กล่องคุมมอเตอร์ (เช่น Fardriver) — รับไฟ B+/B- จ่ายเฟส U/V/W
มอเตอร์ BLDC/PMSM	สายเฟส U/V/W (เส้นใหญ่ 3) + สาย hall sensor (เส้นเล็ก ~5)
คันเร่ง (Hall)	3 สาย: +5V, สัญญาณ (~0.8–4.2V วัตจริง), GND
สวิตช์กุญแจ / contactor	สั่งเปิด-ปิดระบบ / ตัดไฟหลัก
เบรกเกอร์ / ฟิวส์	ตัดไฟเมื่อกระแสเกิน ป้องกันสาย/อุปกรณ์
Precharge	ลดประคายไฟตอนสับไฟเข้าคอนโทรลเลอร์

2 แผนผังการเดินไฟ

เส้นใหญ่ = สายไฟกำลัง (Power) · เส้นเล็ก = สายสัญญาณ



แบตเตอรี่ → เบรกเกอร์/ฟิวส์ → สวิตช์หลัก → คอนโทรลเลอร์ → เฟส U/V/W → มอเตอร์; คันเร่ง+กุญแจ เข้าพอร์ตสัญญาณ

3 ขนาดเบรกเกอร์/ฟิวส์

ขนาด \approx กระแสต่อเนื่อง \times 1.25–1.5

เช่น ระบบดึงต่อเนื่อง 80A → เลือกเบรกเกอร์ ~100–120A

4 เฟส & Hall หมุนผิด

ถ้ามอเตอร์หมุนผิดทาง/กระตุก → สลับคู่สายเฟส หรือจับคู่ hall-phase ใหม่ (มัก auto-learn ในแอปได้)

⚠ ความปลอดภัยสำคัญมาก

ต่อสายตอน "เบรกเกอร์ปิด" เสมอ · ห้ามต่อ/ถอดขณะมีไฟหรือมีโหลด · ใบพัดหมุน = อันตราย ต้องยกเรือพ้นน้ำหรือถอดใบพัด
ก่อนทดสอบบนบก · ตรวจขั้ว +/- ก่อนจ่ายไฟ · ใช้ precharge กันสปาร์กตอนสับไฟ

ระบบขับเคลื่อนเรือไฟฟ้าทำงานอย่างไร

มอเตอร์ · คอนโทรลเลอร์ · คันเร่ง ทำงานร่วมกัน

5 มอเตอร์ BLDC/PMSM ทำงานอย่างไร

BLDC/PMSM คือมอเตอร์ไฟฟ้า ไร้แปรงถ่าน ทำงานด้วยไฟ 3 เฟส (U/V/W) คอนโทรลเลอร์จะสลับไฟเข้าทั้งสามเฟสสลับกันอย่างรวดเร็ว ทำให้สนามแม่เหล็กหมุน และดึงให้โรเตอร์ (กับใบพัด) หมุนตาม

แรงบิดทันที ออกตัวมีกำลังตั้งแต่รอบต่ำ เหมาะกับการดันเรือ

เงียบ + บำรุงรักษาน้อย ไม่มีแปรงถ่านสึกหรอ

รอบ/แรงบิด เป็นตัวกำหนดความเร็วเรือผ่านใบพัด

6 คันเร่งและคอนโทรลเลอร์คุยกันอย่างไร

1. คันเร่ง (hall) ส่ง "แรงดันสัญญาณ" บอกว่าจะเอากำลังแค่ไหน — ตอนปล่อยประมาณ 0.8V ตอนเต็มประมาณ 4.2V (ค่าจริงต้องวัด)
2. คอนโทรลเลอร์ รับสัญญาณ แล้วจ่ายกระแสเข้ามอเตอร์มากขึ้นตามที่สั่ง → เรือเร็วขึ้น
3. hall sensor ในมอเตอร์ คอยบอกตำแหน่งโรเตอร์ ให้คอนโทรลเลอร์สลับเฟสถูกต้องจังหวะ มอเตอร์จึงหมุนเรียบ

เมื่อสายไม่เข้าคู่

ถ้าลำดับเฟส U/V/W หรือสาย hall ไม่ตรงกัน มอเตอร์จะ

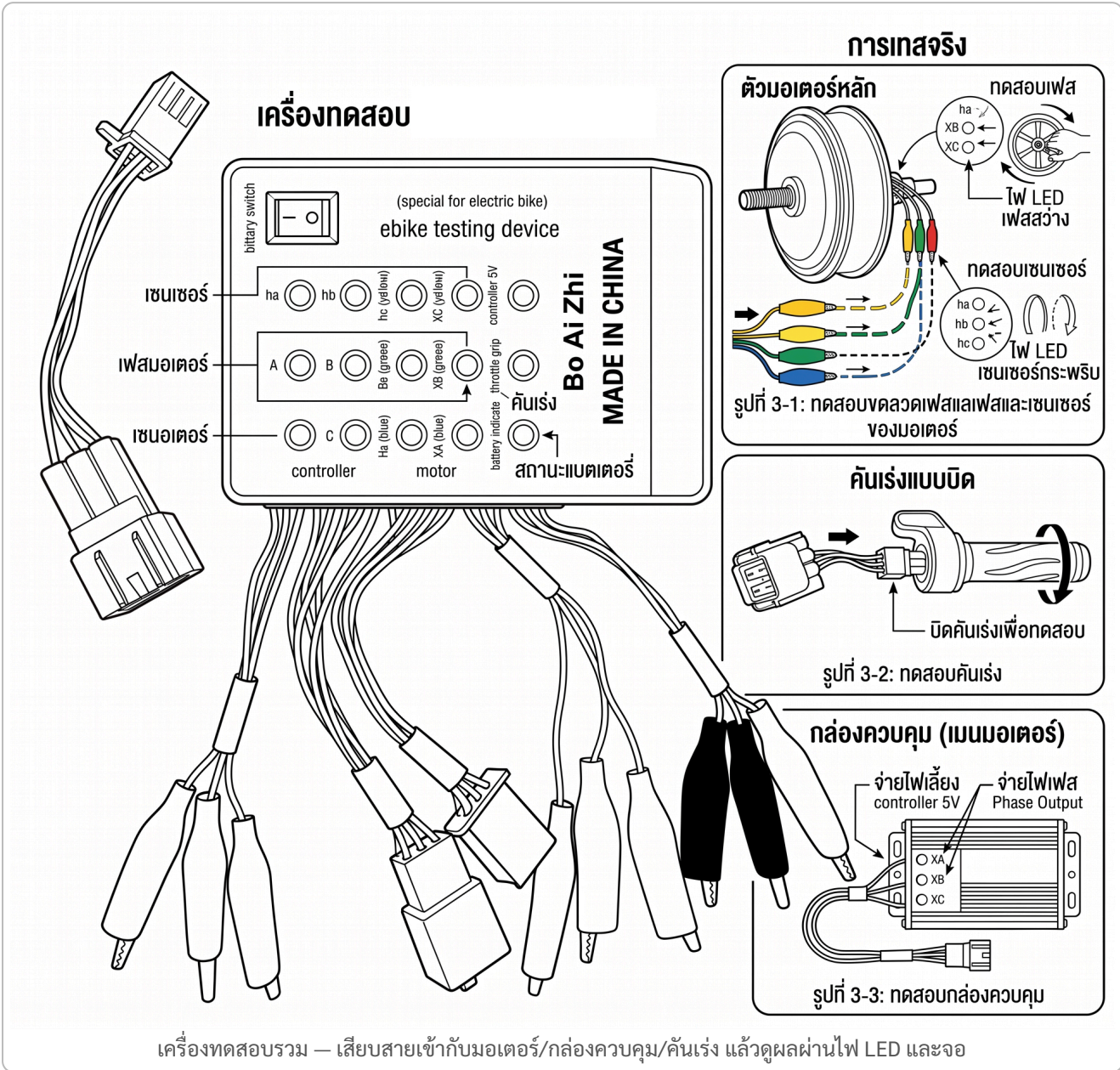
กระตุก/หมุนผิดทาง/ไม่ออกตัว

— แก้ได้ด้วยการสลับคู่เฟส หรือใช้ฟังก์ชัน auto-learn ในแอปจับคู่ hall-phase ใหม่

เครื่องทดสอบระบบมอเตอร์ (ebike testing device)

ตรวจมอเตอร์ · เซนเซอร์เฟส (hall) · กล่องควบคุม · คันเร่ง · สถานะแบตเตอรี่

7 ใช้เครื่องทดสอบหาจุดเสียได้เร็ว



ทดสอบมอเตอร์ ดูเฟส (U/V/W) และเซนเซอร์ hall ว่าครบ/ปกติไหม (ดูจากไฟ LED ไล่จังหวะ)

ทดสอบกล่องควบคุม จ่ายไฟเลี้ยง 5V และดูสัญญาณเฟสออก (Phase Output)

ทดสอบคันเร่ง บิดคันเร่งแล้วดูค่าสัญญาณว่าไล่ขึ้น-ลงปกติ

ดูสถานะแบตเตอรี่ ตรวจแรงดันเบื้องต้น

ช่วยได้มาก

เวลาเจอมอเตอร์กระตุก/ไม่ออกตัว ใช้เครื่องนี้แยกได้ว่าปัญหามีที่ มอเตอร์ เซนเซอร์ กล่องควบคุม หรือคันเร่ง โดยไม่ต้องเดา

อ่านป้ายสเปกมอเตอร์ (Nameplate)

ป้ายข้างมอเตอร์บอกพิกัดสำคัญ — ใช้เลือกสาย เบรกเกอร์ และตั้งค่าคอนโทรลเลอร์

8 ตัวอย่างป้ายมอเตอร์จริง



ป้ายมอเตอร์ขับเคลื่อน — Zhejiang Founder Motor · รุ่น TZ160X030

รายการ	ค่า
รุ่นมอเตอร์	TZ160X030
จำนวนเฟส	3 เฟส
แรงดันพิกัด	115 V
กำลังต่อเนื่อง	15 kW
กำลังสูงสุด (Peak)	30 kW
แรงบิดต่อเนื่อง	30 N·m
แรงบิดสูงสุด (Peak)	110 N·m
รอบสูงสุด	7,600 rpm
ระบายความร้อน	อากาศตามธรรมชาติ
ระดับป้องกัน	IP67
ระดับฉนวน	Class H
ลักษณะงาน (Duty)	S9

กำลังต่อเนื่อง vs สูงสุด 15 kW คือใช้ได้ยาว ๆ · 30 kW คือเร่งสั้น ๆ ชั่วครู่ — คิดสาย/เบรกเกอร์/แบตจาก "ค่าต่อเนื่อง" เป็นหลัก

3 เฟส 115 V คือไฟ AC ที่คอนโทรลเลอร์ป้อนออกขา U/V/W — ไม่ใช่แรงดันแบต (DC) ที่ต่อเข้า B+/B-

IP67 กันฝุ่น + จุ่มน้ำตื้นชั่วคราวได้ — เหมาะกับเรือ แต่ยังต้องกันน้ำจุดต่อสายเอง

Class H ฉนวนทนความร้อนสูง **S9** งานโหลดแปรผันไม่สม่ำเสมอ (เร่ง-ผ่อนตามคลื่น/ลม)

เชื่อมโยงการคำนวณ (บท 2)

มอเตอร์ 15 kW ต่อเนื่องบนแพ็ก 76.8 V → กระแสราว $15,000 \div 76.8 \approx$

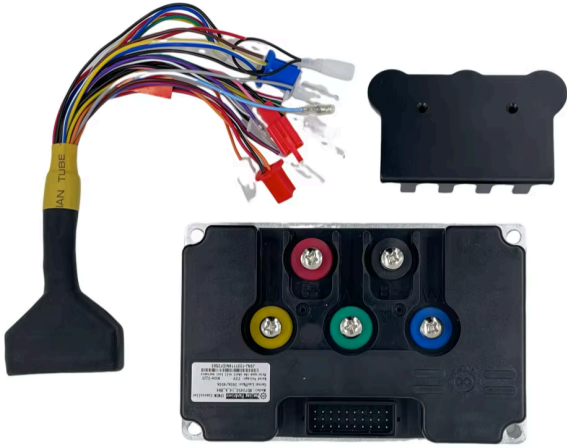
195 A

— ต้องใช้สายใหญ่ + เบรกเกอร์/BMS พิกัดสูงตาม

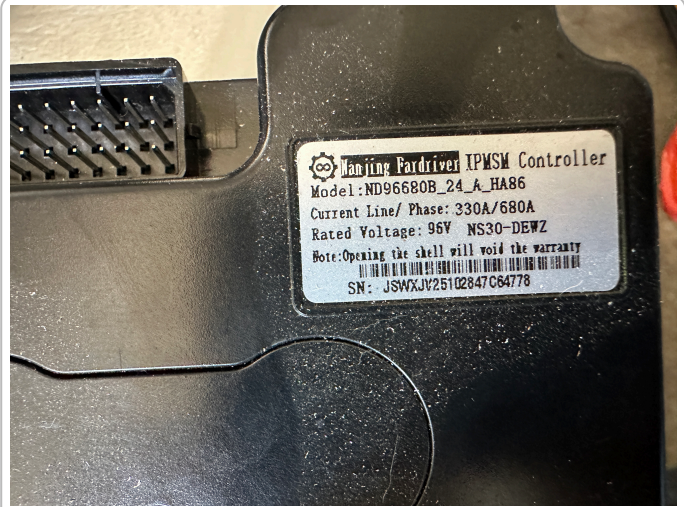
กล่องคอนโทรลเลอร์ (Controller)

สมองของระบบขับเคลื่อน — รับไฟ DC จากแบตเตอรี่ เป็นเป็น 3 เฟสจ่ายมอเตอร์ และอ่านป้ายพิกัด

9 รู้จักกล่องคอนโทรลเลอร์ Fardriver



กล่องคอนโทรลเลอร์ + ชุดสาย (B+/B- กำลัง · U/V/W เฟส · สายสัญญาณ) และฝาครอบ



ป้ายสเปกข้างกล่อง — Nanjing Fardriver

รายการ	ค่า
ผู้ผลิต	Nanjing Fardriver
ชนิด	IPMSM Controller (คุมมอเตอร์แม่เหล็กถาวร)
รุ่น	ND96680B_24_A_HA86
กระแส Line / Phase	330 A / 680 A
แรงดันพิกัด	96 V

กระแส Line vs Phase Line 330A = กระแสฝั่งแบตเตอรี่ (DC) · Phase 680A = กระแสฝั่งมอเตอร์ (เฟส) ที่สูงกว่าตอนเร่ง

แรงดันพิกัด 96 V ใช้กับระบบไม่เกิน 96V — แพ็กเรือจริง 24S LiFePO₄ (76.8V nominal · ชาร์จเต็ม 87.6V) อยู่ในพิกัดพอดี

IPMSM คุมมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรฝังภายใน (กลุ่มเดียวกับ BLDC/PMSM ในหัวข้อ 5) — ต่อ B+/B- เข้าไฟแบตเตอรี่, U/V/W ออกมอเตอร์, ชุดสายเล็กคือสัญญาณ

เปิดฝา = หมดประกัน ("Opening the shell will void the warranty") — ตั้งค่าผ่านแอป Fardriver (บท 8) ไม่ต้องเปิดกล่อง

จับคู่กับมอเตอร์ (หัวข้อ 8)

มอเตอร์ 15 kW ต่อเนื่องดึงกระแสฝั่งแบตเตอรี่ ~195 A — คอนโทรลเลอร์ตัวนี้รับ Line ได้ถึง 330 A จึงมีเฮดรูมเหลือสำหรับช่วงเร่งพีค

แบบฝึกหัด — ต่อและทดสอบระบบมอเตอร์

เน้นความปลอดภัยและลำดับขั้นตอน

ข้อ 1 เลือกขนาดเบรกเกอร์

ระบบดึงกระแสต่อเนื่อง 80A ควรเลือกเบรกเกอร์ขนาดประมาณเท่าไร? (แสดงวิธีคิดจากตัวคูณ 1.25–1.5×)

วิธีคิด

ขนาดเบรกเกอร์ (A)

ข้อ 2 วัดแรงดันคั่นแรง

เปิดกุญแจ วัดแรงดันสายสัญญาณคั่นแรงที่ตำแหน่งต่าง ๆ (ค่าจริงขึ้นกับคั่นแรง)

ตำแหน่งคั่นแรง	ปล่อยสุด	ครึ่ง	เต็มสุด
แรงดันสัญญาณ (V)			

ข้อ 3 เช็กลิสต์เปิดเครื่องอย่างปลอดภัย (เรียงลำดับ)

เขียนหมายเลข 1–5 ให้ถูกลำดับก่อน-หลัง

- ยกเรือพันน้ำ / ถอดใบพัด (กรณีทดสอบบนบก)
- ตรวจสอบ +/- และความแน่นของทุกจุดต่อ
- สับเบรกเกอร์/เปิดสวิตช์หลัก (ผ่าน precharge)
- เปิดกุญแจ แล้วเร่งคั่นแรงเบา ๆ สังเกตมอเตอร์
- ตรวจสอบว่าเบรกเกอร์ปิดอยู่ก่อนต่อสายทั้งหมด

ข้อ 4 วิเคราะห์ปัญหา

มอเตอร์กระตุก/ไม่ออกตัว สาเหตุที่เป็นไปได้มีอะไรบ้าง? (เฟส / hall / คั่นแรง)

สรุปสิ่งที่ได้เรียนรู้

ปรับจูนผ่านแอป (Fardriver + JK BMS)

คอร์สเรือไฟฟ้า · วัน 2 ปาย (2) · monitor และ tuning

นิยาม · หน้าที่ · ความสำคัญ

นิยาม การเชื่อมต่อแอป (Fardriver / JK BMS) เพื่อดูค่าการทำงาน (monitor) และปรับตั้งค่า (tuning)

หน้าที่ ดูแรงดัน กระแส อุณหภูมิ และค่ารายเซลล์ พร้อมตั้งค่ากระแส/แรงดันตัด/ความเร็วให้เหมาะสม

ความสำคัญ ทำให้ใช้ระบบได้เต็มประสิทธิภาพ ปลอดภัย และจับอาการผิดปกติได้ก่อนเสียหาย

1 แอป Fardriver (คอนโทรลเลอร์)

เชื่อมต่อผ่าน Bluetooth

Battery Current กระแสแบตเตอรี่สูงสุด

Phase Current กระแสเฟสสูงสุด

Low Voltage แรงดันตัดต่ำ

Max Speed จำกัดความเร็ว

Regen เบรกคืนพลังงาน

Throttle คาลิเบรตคันเร่ง

2 แอป JK BMS (แบตเตอรี่)

Cell V แรงดันรายเซลล์

Delta ผลต่าง = สูงสุด - ต่ำสุด

Balance เปิด/ปิด active balance

OVP ตัดสูง ~3.6-3.65V/เซลล์

UVP ตัดต่ำ ~2.5-2.8V/เซลล์

Temp / SOC อุณหภูมิ / พลังงานเหลือ

3 ค่าตัดต่ำ = แรงดันต่อเซลล์ × จำนวน S

แรงดันตัดรวม = (แรงดันต่อเซลล์ที่ตั้ง) × จำนวน S

แรงดัน
25.6 V

กระแส
40 A

รอบ
RPM

อุณหภูมิ
°C

เซลล์
รายก้อน

หน้า monitor: ดู V, A, RPM, อุณหภูมิ และแรงดันรายเซลล์

⚠ ปรับอย่างระวัง

ค่อย ๆ เพิ่มกระแสทีละน้อย · อย่าตั้งเกินสเปคมอเตอร์/ขนาดสาย ·

ห้ามปิดระบบป้องกัน (protection)

· จดค่าก่อนปรับไว้เสมอเพื่อย้อนกลับ

ปรับค่าแต่ละตัวมีผลอย่างไร

เข้าใจผลก่อนปรับ · ทำไม่ต้องเฝ้าดูระหว่างใช้

4 ปรับแล้วเกิดอะไรขึ้น

พารามิเตอร์	เพิ่มค่าแล้ว...	ข้อควรระวัง
Battery Current	แรงขึ้น แต่เปลืองและร้อนขึ้น	อย่าเกินสเปคสาย/BMS
Phase Current	แรงบิดออกตัวมากขึ้น	อย่าเกินสเปคมอเตอร์
Low Voltage (ตัดต่ำ)	ตั้งสูง=ใช้ไม่หมด / ตั้งต่ำ=ลากแบตเตอรี่	ต่ำไปแบตเตอรี่เสื่อมเร็ว
Max Speed	วิ่งได้เร็วขึ้น	ความปลอดภัย
Regen	เบรกคืนพลังงานแรงขึ้น	ปรับให้นุ่ม ไม่กระชาก

หลักทอง

ค่อย ๆ ปรับทีละนิด จดค่าก่อนปรับไว้ทุกครั้ง และห้ามปิดระบบป้องกัน (protection)

5 ทำไมต้องเฝ้าดู (monitor) ระหว่างใช้

Cell delta	(ผลต่างเซลล์สูงสุด-ต่ำสุด) — ถ้ากว้างขึ้นเรื่อย ๆ แปลว่ามีเซลล์เริ่มมีปัญหา
อุณหภูมิ	— สูงผิดปกติให้ผ่อนคันเร่ง/หยุดพัก
กระแส	— เกินค่าที่ตั้งบ่อย ๆ อาจต้องลดโหลดหรือทบทวนการตั้งค่า

ค่าตัดต่ำของเรือจริง (24S LiFePO₄)

ตั้งที่ 2.8V/เซลล์ × 24 =

67.2 V

(ถ้าตั้งที่ 2.5V/เซลล์ = 60V ซึ่งลึกลงไปสำหรับใช้ประจำ)

แบบฝึกหัด — monitor และตั้งค่า

เซลล์ LiFePO_4

ข้อ 1 คำนวณแรงดันตัดต่ำ

- แพ้ก 8S ตั้งตัดที่ 2.8V/เซลล์ → ตั้งแรงดันตัดรวม = _____ V
- แพ้ก 4S ตั้งตัดที่ 2.8V/เซลล์ → ตั้งแรงดันตัดรวม = _____ V

วิธีคิด

ข้อ 2 บันทึกค่าก่อน/หลังปรับ (Fardriver)

พารามิเตอร์	ก่อนปรับ	หลังปรับ
Battery Current (A)		
Phase Current (A)		
Low Voltage (V)		
Max Speed		

ข้อ 3 อ่านหน้าจอ JK BMS

จากแรงดันรายเซลล์ (8S) ต่อไปนี้ จงหาค่าและตอบ

เซลล์	1	2	3	4	5	6	7	8
V	3.31	3.33	3.30	3.45	3.32	3.31	3.30	3.32

เซลล์สูงสุด / ต่ำสุด

Delta (V)

ควร balance ไหม?

ข้อ 4 ค่าจำกัดปลอดภัยของแพ้ก/มอเตอร์เรา

รายการ	ค่าที่ตั้ง
OVP ต่อเซลล์ (V)	
UVP ต่อเซลล์ (V)	
กระแสแบตสูงสุด (A)	
อุณหภูมิเตือน ($^{\circ}\text{C}$)	

สรุปสิ่งที่ได้เรียนรู้

Charge/Discharge และ Spot Welding

คอร์สเรือไฟฟ้า · ช่วงเสริมหลังจบ · ชาร์จ · ทดสอบความจุ · ประกอบแพ็ก

นิยาม · หน้าที่ · ความสำคัญ

นิยาม การชาร์จ/คายประจุแบบ (CC/CV และทดสอบความจุ) และการเชื่อมจุด (spot weld) ในการประกอบแพ็ก

หน้าที่ เต็ม/ทดสอบพลังงานอย่างถูกวิธี และต่อเซลล์เข้าด้วยกันด้วยการเชื่อมที่ปลอดภัย

ความสำคัญ ชาร์จผิดหรือเชื่อมไม่ดีทำให้แบตเตอรี่เสื่อม เสีย หรือเกิดอันตราย — ทำถูกจึงได้แพ็กที่ดีและทนทาน

1 การชาร์จ LiFePO₄ แบบ CC/CV

แรงดันชาร์จเต็ม = 3.65V × จำนวน S

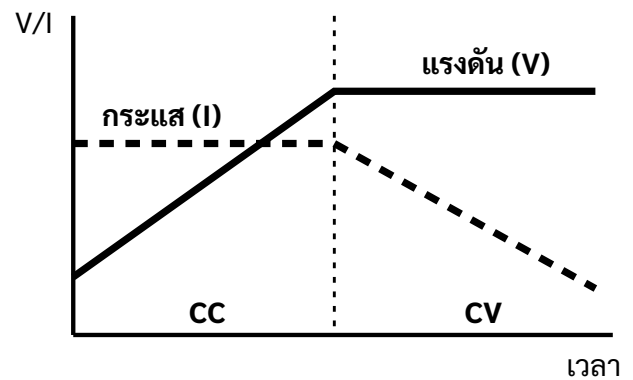
4S = 14.6 V

8S = 29.2 V

24S (เรือจริง) = 87.6 V

กระแสชาร์จ ทั่วไป ≤ 0.5C (ทำได้ถึง 1C)

CC กระแสคงที่จนแรงดันถึงค่าเต็ม → CV แรงดันคงที่ กระแสค่อย ๆ ลด BMS บาลานซ์/ตัดเมื่อเต็ม



2 ทดสอบความจุ (Discharge test)

ปล่อยกระแสคงที่จนแรงดันถึงจุดตัด แล้ววัด Ah ที่จ่ายได้จริง = ความจุจริง ของแพ็ก (เทียบกับค่าที่ระบุไว้)

เครื่องมือและวัสดุสำหรับแพ็กแบตเตอรี่

อุปกรณ์ที่ต้องเตรียม · งานเรื่อเน้นการกั้นน้ำเป็นพิเศษ

3 รายการเครื่องมือ/วัสดุ

#	อุปกรณ์	หน้าที่
1	มิเตอร์วัด IR	วัดความต้านทานภายในเซลล์ (คัตเซลล์)
2	มัลติมิเตอร์ดิจิทัล	วัดแรงดัน/กระแส
3	หัวแร้ง + ตะกั่ว	บัดกรีสาย (ลงนิกเกิล/บัสบาร์ ไม่ลงผิวเซลล์)
4	เครื่องสปอต (Spot welder)	เชื่อมแผ่นนิกเกิลเข้าขั้วเซลล์
5	รางใส่เซลล์ (โฮลเดอร์)	ยึดเซลล์ให้เป็นระเบียบ + ช่วยระบายความร้อน
6	แผ่น/ลวดนิกเกิล	เชื่อมขั้ว มักใช้หนา 0.15-0.2 มม.
7	เทปกั้นความร้อน	ติดทับรอยสปอต กันชื้น/ความร้อนสะสม
8	เทปกั้นขีตขั้วบวก (แหวน)	แปะขอบขั้วบวกกันขีตตอนสปอต
9	แผ่นอีพ็อกซีกันขีต	หนา ≥ 2 มม. หุ้มกันกระแทก
10	เทปใยสับปะรด (Filament)	รัดแพ็กให้แน่นหนา
11	ท่อหด PVC	ท่อชั้นนอก กันน้ำ/กันขีต
12	ขั้วต่อแอนเดอร์สัน	ปลั๊กจ่ายไฟ เลือกแอมป์ให้พอ (30/50/120A)
13	สายไฟ DC	ต่อจาก BMS ไปโพลด เลือกหน้าตัดทนกระแส (กันไหม้)
14	BMS	วงจรจัดการแบต กัน OVP/UVP/กระแสเกิน
+	ซิลิโคนกันน้ำ	สำหรับเรื่อ ยิ่งปิดช่องว่างกันน้ำเข้าแพ็ก

เลือก BMS

ให้ตรงชนิดแบต (LFP/NMC แรงดันตัดต่างกัน), ตรงจำนวน S, และเผื่อกระแสกระชากไว้ราว

3 เท่า

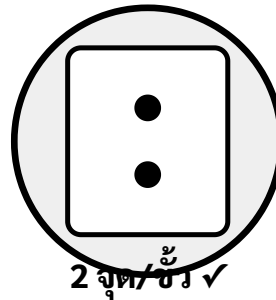
ของกระแสใช้งานปกติ

Spot Welding — เชื่อมจุดแผ่นนิกเกิล

เชื่อมนิกเกิลเข้าขั้วเซลล์ด้วยกระแสพัลส์ · เน้นความปลอดภัย

4 Spot Welding (เชื่อมจุดแผ่นนิกเกิล)

เชื่อม	แผ่นนิกเกิลเข้าขั้วเซลล์ด้วยกระแสพัลส์สูง-สั้น
ไม่บัดกรีตรงเซลล์	เพราะความร้อนค้างทำเซลล์เสื่อม/เสีย
ตั้งพลังงาน/พัลส์	ตามความหนา นิกเกิล
เชื่อมดี	= 2 จุดต่อขั้ว ดึงไม่หลุด ไม่ทะลุแผ่น



นิกเกิล
บนขั้วเซลล์

เชื่อม 2 จุด ให้แน่น ทดสอบดึง (pull test)

⚠ ความปลอดภัยสำคัญมาก

สวมแว่นตา · ห้ามลัดขั้วเซลล์ (โลหะคร่อมขั้ว) · ระวัง thermal runaway (ความร้อนสะสม → ลูกไหม้) · ทำในที่อากาศถ่ายเท · มีถังทราย/เครื่องดับเพลิงใกล้มือ

ขั้นตอนการแพ็คเกจเตอร์ (10 ขั้นตอน)

ลำดับการทำงานจริง — อิงคู่มือช่างเดฟ ปรับสำหรับ LiFePO_4 และงานเรือ

5 ลำดับการแพ็คเกจ

1. ชาร์จเซลล์ให้เต็มเท่ากันทุกก้อน — ให้ทุกเซลล์เริ่มที่แรงดันเดียวกัน
2. วัดและจัดกลุ่มค่า IR — วัด IR ทุกเซลล์ จดบันทึก แล้วจัดลงโหนดอร์ให้ "ผลรวม IR แต่ละแถวใกล้เคียงกัน" (แพ็คเกจจะสมดุลอายุขึ้น)
3. ตัดแผ่นนิกเกิล (0.15–0.2 มม.) ให้พอดีกับระยะของเซลล์
4. สปอตแผ่นนิกเกิล — เริ่มจากขั้วบวกด้วยนิกเกิลเส้นเดี่ยวก่อน แล้วสปอตเส้นคู่จนครบทั้งสองด้าน ยิ่งหลายจุดต่อขั้ว (เช่น 4 จุด) ให้แน่น
5. ติดเทปกั้นความร้อน ทับริยสปอต กันความร้อนสะสม/ซ้อต
6. ต่อสาย BMS — ถอดสาย balance ออกจากบอร์ดก่อน แล้วบัดกรีเริ่มจาก B- ไล่ B1, B2 ... ถึง B+ เสร็จแล้ววัดแรงดันที่ B+/C- ว่าไฟออกถูกต้อง
7. ต่อสายไฟใช้งาน — บัดกรีสาย B+/C- จาก BMS เข้าขั้วแอนเดอร์สัน เตรียมจ่ายไฟ/ชาร์จ
8. หุ้มอีพ็อกซี่ + รัดเทปใยสัประด ให้แน่น กันกระแทก
9. หุ้มท่อหด PVC เป่าลมร้อนให้รัดรูป แล้ว ยิงซิลิโคนปิดช่องว่างกันน้ำ (สำคัญมากบนเรือ)
10. ชาร์จเต็มอีกครั้ง ก่อนนำไปติดตั้งในเรือ

⚠ จุดสำคัญ

บัดกรีสาย BMS ลงบน "แผ่นนิกเกิล/บัสบาร์" เท่านั้น

ห้ามจี้หัวแร้งบนผิวเซลล์โดยตรง

— ความร้อนจากการบัดกรี (280–380°C นานหลายวินาที) ทำลายซิลและเคมีภายในเซลล์ · รอยสปอตให้ความต้านทานต่ำกว่า บัดกรีมาก (0.1–0.5 mΩ เทียบ 1–5 mΩ)

แบบฝึกหัด — ชาร์จ ทดสอบความจุ และเชื่อมจุด

เซลล์ LiFePO₄ 3.65V (ชาร์จเต็ม) · ความจุ 100Ah

ข้อ 1 คำนวณค่าชาร์จ

- แพ้ก 4S ชาร์จเต็มที่แรงดัน = _____ V
- แพ้ก 8S ชาร์จเต็มที่แรงดัน = _____ V
- กระแสชาร์จ 0.5C ของแพ้ก 100Ah = _____ A

ข้อ 2 บันทึกการทดสอบความจุ

ปล่อยกระแสคงที่ จดแรงดันตามเวลา จนถึงจุดตัด แล้วสรุป Ah ที่ได้

เวลา (นาที)	0	30	60	90	120
แรงดันแพ้ก (V)					

กระแสที่ปล่อย = _____ A · ความจุจริงที่วัดได้ = _____ Ah

ข้อ 3 เช็กลิสต์คุณภาพรอยเชื่อม + Pull test

- เชื่อม 2 จุดต่อขั้ว ดัดแน่นทั้งสองจุด
- ไม่มีรอยทะลุ/ไหม้แผ่นนิกเกิล
- ดึงแผ่นนิกเกิลแล้วไม่หลุด
- ขั้วเซลล์ไม่ร้อนผิดปกติหลังเชื่อม

จุดที่	2 จุดครบ?	ดึงหลุด?	ผ่าน/ไม่ผ่าน
1			
2			

ข้อ 4 แบบทดสอบความปลอดภัย (จริง/เท็จ)

- ___ บัดกรีสายเข้าขั้วเซลล์โดยตรงดีกว่าการเชื่อมจุด
- ___ ความร้อนสะสมในเซลล์อาจทำให้เกิด thermal runaway (ลุกไหม้)
- ___ ขณะเชื่อม/ประกอบแบตเตอรี่ ควรมีเครื่องดับเพลิงหรือถังทรายใกล้มือ
- ___ การเอาโลหะคร่อมขั้วบวก-ลบของเซลล์ทำได้อันตราย

สรุปสิ่งที่ได้เรียนรู้

ความปลอดภัยและการรับมือเหตุฉุกเฉิน

คอร์สเรือไฟฟ้า · อ่านก่อนลงมือทุกครั้ง · ไฟฟ้า + น้ำ = ต้องระวังเป็นพิเศษ

นิยาม · หน้าที่ · ความสำคัญ

นิยาม หลักความปลอดภัยและการรับมือเหตุฉุกเฉินของระบบไฟฟ้า-แบตเตอรี่บนเรือ

หน้าที่ ป้องกันอุบัติเหตุ (ไฟดูด ไฟไหม้ คนตกน้ำ) และกำหนดวิธีรับมือเมื่อเกิดเหตุ

ความสำคัญ ไฟฟ้า + น้ำ เสี่ยงถึงชีวิต ความปลอดภัยต้องมาก่อนเสมอ

1 ทำไมระบบไฟฟ้าบนเรือต้องระวังเป็นพิเศษ

ไฟฟ้า + น้ำ อยู่ด้วยกัน นำไฟฟ้า ถ้าไฟรั่วลงตัวเรือ/ลงน้ำ เสี่ยงไฟดูดทั้งคนบนเรือและคนในน้ำ

แรงดันสูง ระบบเรือจริง $24S = 76.8V$ (ชาร์จเต็ม $87.6V$) — สัมผัสโดยตรงอันตรายได้

กระแสสูงมาก แบตเตอรี่จ่ายกระแสลัดวงจรได้หลายร้อยแอมป์ในพริบตา → ประกายไฟ/โลหะหลอม/ไฟไหม้

พลังงานเยอะ แพ้กเรือเก็บพลังงานระดับหลาย kWh ถ้าเกิดเหตุจึงรุนแรง

อยู่กลางน้ำ หนีไฟ/ขอความช่วยเหลือยากกว่าบนบก

2 ไฟไหม้แบตเตอรี่ (Thermal Runaway)

thermal runaway คือเซลล์ร้อนจนเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ ร้อนขึ้นเองจนลุกไหม้ — หยุดยาก และ ลุกซ้ำได้

สาเหตุที่พบ

สัญญาณเตือน

ลัดวงจร (โลหะคร่อมขั้ว)

แบตเตอรี่ผิดปกติ

ชาร์จเกิน / ตั้งค่าผิด

บวม / ผิดรูป

เจาะ/กระแทก/บวม

มีควัน / กลิ่นฉุน (ฉีแมว)

ร้อนเกิน / จุดต่อหลวมจนร้อน

มีเสียงฟู่ / รั่ว

⚠️ ขั้นตอนเมื่อแบตเตอรี่เริ่มร้อน/บวม/มีควัน

1. ตัดไฟทันที

(สวิตช์หลัก/เบรกเกอร์) และหยุดชาร์จ

2. ถ้าไฟยังเล็ก ใช้น้ำดับเพลิงชนิด ABC

หรือ

ราดน้ำปริมาณมากเพื่อลดความร้อน

— แต่

ต้องตัดไฟก่อนเสมอ

(ห้ามราดน้ำขณะวงจรยังมีไฟ เสี่ยงไฟดูด)

3. แบตเตอรี่ไหม้

ลุกซ้ำได้

ต้องทำให้เย็นและเฝ้าดูต่อ

4. ถ้าคุมไม่ได้ —

นำเรือเข้าฝั่ง/ละทิ้งพื้นที่

สวมชูชีพ และขอความช่วยเหลือ ชีวิตคนสำคัญกว่าทรัพย์สิน

คนตกน้ำ · ตัดไฟฉุกเฉิน · ปฐมพยาบาล

รู้ก่อน ทำถูก ปลอดภัยทั้งคนช่วยและคนเจ็บ

3 คนตกน้ำ / สงสัยไฟรั่วลงน้ำ

⚠ ห้ามกระโดดลงน้ำทันทีถ้าสงสัยว่ามีไฟรั่ว
น้ำที่มีไฟฟ้าทำให้คนเป็นอัมพาตชั่วคราวและจมน้ำได้ (Electric Shock Drowning)

1. ตัดไฟทั้งระบบทันที ก่อนเข้าช่วย
2. โยนห่วงชูชีพ/เชือก หรือยื่นไม้พาย (อุปกรณ์ไม่นำไฟฟ้า) ให้คนเกาะ
3. ดึงขึ้นเรือ/เข้าฝั่ง แล้วปฐมพยาบาล
4. เรียกความช่วยเหลือ/หน่วยฉุกเฉิน

4 อุปกรณ์ความปลอดภัยที่ต้องมีประจำเรือ

สวิตช์ตัดไฟหลัก/เบรกเกอร์ ติดในจุดที่เอื้อมถึงเร็ว รู้ตำแหน่งทุกคน

เสื้อชูชีพ ครอบคลุมคนบนเรือ

ถังดับเพลิงชนิด ABC + ถังทราย

ถุงมือฉนวน สำหรับงานไฟฟ้า

ชุดปฐมพยาบาล + เบอริโทรฉุกเฉิน

ก่อนออกเรือทุกครั้ง

ตรวจสอบว่าอุปกรณ์เหล่านี้อยู่ครบ พร้อมใช้ และทุกคนรู้ตำแหน่ง

5 ปฐมพยาบาลผู้ถูกไฟดูด

1. ตัดไฟก่อน — อย่าแตะตัวผู้ป่วยขณะยังมีไฟ (ใช้สิ่งไม่นำไฟฟ้าเชี่ยสายออก)
2. เช็การหายใจ/ชีพจร ถ้าหยุดหายใจให้ ทำ CPR ทันที
3. เรียกหน่วยแพทย์ฉุกเฉิน · ดูแลแผลไหม้/ให้ความอบอุ่น

แบบฝึกหัด — ความปลอดภัยและเหตุฉุกเฉิน

ฝึกตัดสินใจให้ถูกในสถานการณ์จริง

ข้อ 1 เช็กลิสต์ความปลอดภัยก่อนออกเรือ

- เสื้อชูชีพครบทุกคน
- รู้ตำแหน่งสวิตช์/เบรกเกอร์ตัดไฟฉุกเฉิน
- ถังดับเพลิง ABC และถังทรายพร้อมใช้
- ตรวจสอบแบตเตอรี่/จุกต่อ ไม้ร้อน ไม้บวม ไม้มีกลิ่น
- สายไฟ/ขั้วต่อแน่น ไม่มีรอยไหม้ ไม่มีน้ำขัง
- มีชุดปฐมพยาบาล + เบอร์โทรฉุกเฉิน

ข้อ 2 เจอเหตุแบบนี้ ทำอะไร "ก่อน" เป็นอันดับแรก

- 2.1 แบตเตอรี่ร้อนจัดและมีควัน → _____
- 2.2 คนตกน้ำ และสงสัยว่ามีไฟรั่วลงน้ำ → _____
- 2.3 เพื่อนถูกไฟดูดยังเกาะสายอยู่ → _____

ข้อ 3 ถูก/ผิด

- ___ ราคาน้ำใส่แบตเตอรี่ไฟกำลังใหม่ได้ทันที โดยไม่ต้องตัดไฟก่อน
- ___ แบตเตอรี่ที่ดับไฟแล้วอาจลุกขึ้นมาใหม่ได้ ต้องเฝ้าดูต่อ
- ___ ถ้าสงสัยไฟรั่วลงน้ำ ควรตัดไฟก่อนเข้าช่วยคนตกน้ำ
- ___ การลัดวงจรขั้วแบตเตอรี่เทียมไม่อันตราย เพราะแรงดันต่อเซลล์ต่ำ

สรุปสิ่งที่ได้เรียนรู้

การติดตั้งบนเรือและการกันน้ำ

คอร์สเรือไฟฟ้า · วางแบตเตอรี่ · ยึดกันขยับ · กันน้ำ · ไฟล์

นิยาม · หน้าที่ · ความสำคัญ

นิยาม การติดตั้งแพ็คเกจและระบบไฟฟ้าลงเรืออย่างมั่นคงและกันน้ำ

หน้าที่ ยึดแบตเตอรี่/อุปกรณ์ให้อยู่กับที่ กันน้ำ กันลัดวงจร และวางให้เรือสมดุล

ความสำคัญ เรือโคลงและมีน้ำ — ติดตั้งไม่ดีคือแบตเตอรี่/น้ำเข้า/ลัดวงจร/เรือเสียสมดุล เสี่ยงอันตราย

1 วางแบตเตอรี่ไหนให้เรือสมดุล

วางต่ำและกลางลำ ให้จุดศูนย์ถ่วงต่ำ เรือนิ่ง ไม่โคลงง่าย

กระจายน้ำหนักซ้าย-ขวาเท่ากัน เรือไม่เอียงข้าง

อย่าวางท้ายสุด/หัวสุด จนเรือเงยหัวหรือปุกหน้า (เสียทริม กินพลังงาน)

ลองวาดเอง วาดผังเรือ (มองจากบน) แล้วทำเครื่องหมายตำแหน่งที่จะวาง **แพ็คเกจ · ไฟล์ · สวิตช์ตัดไฟ · มอเตอร์** ให้เรือสมดุลและศูนย์ถ่วงต่ำ

พื้นที่วาดผังวางแบตเตอรี่บนเรือ (มองจากบน)

ง่าย

แบตเตอรี่ = บัลลาสต์ วางให้ถูกที่ช่วยให้เรือทรงตัวดี เล่นนิ่งและประหยัด

2 ยึดแบตเตอรี่กันขยับ

คลื่น/เรือโคลง ทำให้ของหนักไถลได้ — แบตต้อง **ยึดแน่น ไม่ขยับ** ทุกทิศ

ใช้สายรัด/กล่องยึด/ฐานล็อกที่แข็งแรง

กันแบตกระแทกขอบคม รองด้วยยาง/โฟม

แบตเตอรี่ = ขั้วหลวม/สายขาด/ลัดวงจร และเสียสมดุลเรือ

3 กันน้ำ (IP rating) และการระบายอากาศ

IP	ความหมาย
IP65	กันฝุ่น + กันน้ำสาด
IP67	กันฝุ่น + จุ่มน้ำตื้นชั่วคราวได้

ยกแบตเตอรี่ให้พ้นน้ำท้องเรือ (bilge) ไม่ให้แช่น้ำ

กล่องแบตเตอรี่ แต่ต้องมี **ช่องระบายอากาศ** (แบตคายความร้อน/แก๊สได้)

ขั้วต่อกันน้ำ ใช้ปลอกหุ้ม + ซิลิโคน + ต่อมร้อยสาย (cable gland)

เนื้อหาประกอบการสอนติดตั้งเรือไฟฟ้า ผลิตโดย วสท. กง. ชม. วิชาการระยะคลองบางมดศรีนคร

△ กั้นน้ำ vs ระบายอากาศ

ปิดสนิทกั้นน้ำได้ แต่ต้องไม่อับจนความร้อน/แก๊สสะสม — ออกแบบให้กั้นน้ำเข้าแต่ระบายอากาศออกได้

ฟิวส์ · การเดินสาย · แบบฝึกหัด

ป้องกันลัดวงจร และไฟกวางฟุ้งติดตั้ง

4 ฟิวส์/สวิตช์ตัดไฟ ไกล่ชั่วคราว

ติดตั้งฟิวส์/เบรกเกอร์หลักใกล้ตู้ควบคุมที่ดีที่สุด ถ้าสายเส้นนั้นลัดวงจร ฟิวส์จะตัดทันที กันไฟไหม้ทั้งเส้น

สวิตช์ตัดไฟหลัก ติดในจุดที่เอื้อมถึงเร็ว เพื่อตัดไฟฉุกเฉิน

เลือกฟิวส์ตามกระแสใช้งาน (เพื่อ 1.25–1.5x คูบท 7)

5 เดินสายในสภาพชื้น

ยึดสายเป็นระยะ ไม่ให้สั่นกับขอบคม/สันจนฉนวนสึก

กันน้ำทุกจุดต่อ (ปลอกหุ้ม/ซีลโคน) กันการกัดกร่อน

แยกสายไฟกำลังออกจากสายสัญญาณ ลดสัญญาณรบกวน

ข้อ 1 เช็กลิสต์การติดตั้งบนเรือ

- แบตวางต่ำ-กลางลำ น้ำหนักสมดุลซ้าย-ขวา
- ยึดแบตแน่น ไม่ขยับเมื่อเรือโคลง
- แบตพื้นน้ำห้องเรือ มีกล่อง/กันน้ำ + ระบายอากาศ
- ฟิวส์หลักติดใกล้ตู้ควบคุม
- สวิตช์ตัดไฟฉุกเฉินเอื้อมถึงง่าย
- จุดต่อทุกจุดกันน้ำ ไม่มีสายสีขบคม

ข้อ 2 ตอบคำถาม

2.1 ทำไมจึงวางแบตไว้ "ต่ำและกลางลำ"? _____

2.2 ฟิวส์หลักควรติดตรงไหน เพราะอะไร? _____

2.3 กล่องแบตปิดสนิทกันน้ำ 100% มีข้อเสียอะไร? _____

สรุปสิ่งที่ได้เรียนรู้

ชาร์จเจอร์ โซลาร์ และการเก็บเรือ

คอร์สเรือไฟฟ้า · เลือกเครื่องชาร์จ · โซลาร์เสริม · เก็บแบตเตอรี่ไม่ใช้

นิยาม · หน้าที่ · ความสำคัญ

นิยาม การเลือกเครื่องชาร์จให้ตรงแพ็ก การเสริมพลังงานด้วยโซลาร์ และการเก็บแบตเตอรี่ไม่ใช้งาน

หน้าที่ เต็มไฟกลับเข้าแพ็กอย่างถูกวิธี และรักษาสภาพแบตเตอรี่ให้พร้อมใช้และอายุยืน

ความสำคัญ ชาร์จผิดสเปคหรือเก็บผิดวิธี ทำให้แบตเตอรี่เสื่อมเร็ว เสียหาย หรือเกิดอันตราย

1 เลือกเครื่องชาร์จให้ตรงแพ็ก

ชนิดต้องเป็น LiFePO_4 (ชาร์จแบบ CC/CV) — ห้ามใช้ที่ชาร์จตะกั่วกรด/ชนิดชนิด

แรงดันชาร์จ = $3.65\text{V} \times \text{จำนวน S}$ ต้องตรงกับแพ็ก

กระแสชาร์จ $\leq 0.5\text{C}$ (ทำได้ถึง 1C แต่ 0.5C เย็นกว่า อายุยืนกว่า)

เลือกที่ชาร์จ: แรงดัน = $3.65 \times \text{S}$ · กระแส $\leq 0.5 \times \text{ความจุ(Ah)}$

ตัวอย่างเรือจริง 24S 280Ah

ใช้ที่ชาร์จ LiFePO_4

87.6 V

กระแสชาร์จ $\leq 0.5\text{C} =$

140 A

(เลือกตามที่ระบบรับไหวและ BMS อนุญาต)

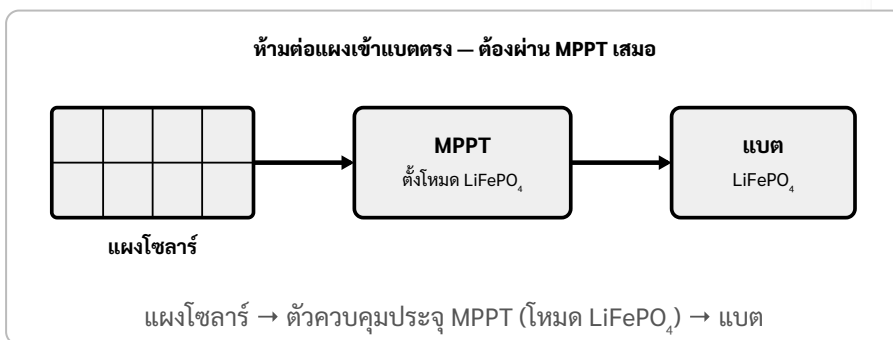
2 โซลาร์เสริม (Solar)

นิยามบนเรือ — ชาร์จเต็มระหว่างจอด/แล่น ช่วยยืดระยะและลดการฟุ้งที่ชาร์จบนฝั่ง

แผงโซลาร์ → ตัวควบคุมประจุ (MPPT) → แบต เสมอ (ห้ามต่อแผงเข้าแบตเตอรี่)

ตั้งค่า MPPT ให้เป็นโหมด LiFePO_4 และตรงจำนวน S (แรงดันชาร์จ/ตัดถูกต้อง)

กำลังแผงคิดเป็นวัตต์ (W) — ยิ่งมาก ยิ่งเต็มเร็ว แต่ต้องมีพื้นที่บนเรือ



3 การเก็บเรือ/แบตเตอรี่ไม่ใช้นาน

เก็บที่ ~50% SOC (ไม่เต็ม ไม่หมด) ดีต่ออายุแบตเตอรี่ที่สุด

เก็บในที่ เย็นและแห้ง หลีกเลี่ยงแดด/ความร้อน

ปิดสวิตช์/ถอดโหนด กันไฟค้อย ๆ ไหลทิ้ง (parasitic drain)

ตรวจแรงดันทุก 1-2 เดือน (หาประกอบแผงชาร์จเรือไฟฟ้าให้หน่อยได้) (LiFePO4 คายประจุเองช้า แต่ควรเช็ค)

△ **ตอนชาร์จ**

ทำในที่อากาศถ่ายเท ไม่ทิ้งชาร์จข้ามคืนโดยไม่เฝ้า และให้ BMS ทำงานเสมอ

แบบฝึกหัด — ชาร์จและเก็บรักษา

เลือกค่าชาร์จให้ตรงแพ็ค และวางแผนการเก็บ

ข้อ 1 เลือกค่าที่ชาร์จ

- แพ็ค 8S 100Ah → แรงดันที่ชาร์จ = _____ V · กระแส 0.5C = _____ A
- แพ็ค 24S 280Ah → แรงดันที่ชาร์จ = _____ V · กระแส 0.5C = _____ A

วิธีคิด

ข้อ 2 โซลาร์ — ต่อถูกไหม

- 2.1 ต่อแผงโซลาร์เข้าแบตเตอรี่โดยตรงได้ไหม? เพราะอะไร? _____
- 2.2 ต้องตั้งตัวควบคุมประจุ (MPPT) เป็นโหมดอะไร? _____

ข้อ 3 เช็กลิสต์ก่อนเก็บเรือนาน

- ชาร์จ/คายให้เหลือราว 50% SOC
- ปิดสวิตซ์ตัดไฟหลัก / ถอดโพลด
- เก็บในที่เย็น แห้ง พ้นแดด
- ตั้งเตือนตรวจแรงดันทุก 1-2 เดือน

สรุปสิ่งที่ได้เรียนรู้

เลือกใบพัดและมอเตอร์ให้เข้ากับเรือ

คอร์สเรือไฟฟ้า · จับคู่กำลัง/ใบพัด/ความเร็วเรือ

นิยาม · หน้าที่ · ความสำคัญ

นิยาม การเลือกขนาดมอเตอร์และใบพัดให้เหมาะกับน้ำหนัก ขนาด และความเร็วของเรือ

หน้าที่ ส่งกำลังลงน้ำได้เต็มที่ ไม่ขาด ไม่เกิน เพื่อความเร็วและประหยัดพลังงานที่สุด

ความสำคัญ จับคู่ผิด = เรือไม่มีแรง/ช้า หรือมอเตอร์-คอนโทรลเลอร์ร้อนและพังเร็ว

1 จับคู่กำลังมอเตอร์กับเรือ

กำลัง (kW) ที่ต้องการขึ้นกับ น้ำหนัก/ขนาดเรือ และ ความเร็วที่อยากได้

ลักษณะเรือ	กำลังโดยประมาณ
เรือเล็ก พายเที่ยว/ตกปลา	~1–3 kW
เรือกลาง บรรทุกบ้าง	~3–8 kW
เรือใหญ่/บรรทุกหนัก/ต้องการเร็ว	~8–15 kW ขึ้นไป

แรงบิด vs รอบ

เรือต้องการ "แรงบิด" ดันน้ำมากกว่ารอบสูง — มอเตอร์/เกียร์ที่ให้แรงบิดดีที่รอบใช้งานจึงเหมาะกับเรือ (ค่ากำลังจริงให้ยืนยันจากการทดลองวิ่ง)

2 ใบพัด — ขนาด (diameter) และพิตช์ (pitch)

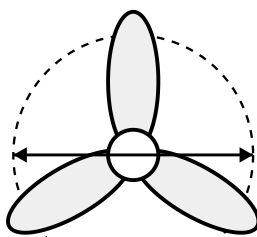
พิตช์มาก (pitch สูง) ดันไกลต่อรอบ = เร็วขึ้น แต่กินกำลัง/แรงบิดต้นน้อย

เส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ ดันน้ำได้มาก = แรงบิด/แรงดันต้นดี

ใบเล็ก/พิตช์น้อยไป → รอบสูงแต่ไม่มีแรง · ใบใหญ่/พิตช์มากไป → มอเตอร์และคอนโทรลเลอร์

ร้อน

(ดึงกระแสเกิน)



เส้นผ่านศูนย์กลาง (\varnothing)

พิตช์มาก = เร็ว แต่กินกำลัง · \varnothing ใหญ่ = แรงบิดดี

ใบพัด — เส้นผ่านศูนย์กลาง (ดันน้ำ/แรงบิด) และพิตช์ (ระยะดันต่อรอบ)

⚠️ สังเกตอุณหภูมิ

ถ้าแรงแล้วกระแส/ความร้อนพุ่งเร็วเกินไปแต่เรือไม่เร็วขึ้น แสดงว่าใบพัด "หนัก" เกินกำลังมอเตอร์ — ลดพิตช์/ขนาดลง

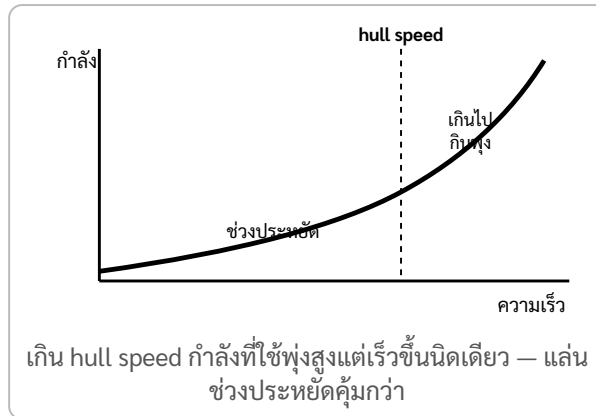
3 Hull speed — ความเร็วจำกัดของตัวเรือ

เรือทรงตันน้ำ (displacement) มี "ความเร็วเพดาน" ตามความยาวลำเรือ

เนื้อหาประกอบการสอนติดตั้งแปลงเรือไฟฟ้า ผลิตโดย วิทยาลัยชุมชนอารยะคลองบางมดสร้างสรรค์

เร่งได้ hull speed → ใช้พลังงานสมเหตุสมผล

เร่งเกิน hull speed → กระแส/พลังงานพุ่งมาก แต่เร็วขึ้นนิดเดียว (คุ้มน้อย)



นัยต่อการออกแบบ

วางแผนให้เรือเล่น "ช่วงประหยัด" ได้/ใกล้ hull speed จะได้ระยะทางต่อชาร์จไกลที่สุด (เชื่อมกับการคำนวณบท 2)

อภิธานศัพท์ (Glossary)

คำศัพท์ที่ใช้บ่อยทั้งคอร์ส — ไว้เปิดอ้างอิงเร็ว

4 คำศัพท์ไฟฟ้าและแบตเตอรี่

ศัพท์	ความหมาย
V (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้า — แรงดันของแบตเตอรี่/ระบบ
A (แอมป์)	กระแสไฟฟ้า — ปริมาณไฟที่ไหลขณะนั้น
Ah / mAh	ความจุ — จ่ายกระแสได้ที่แอมป์ต่อชั่วโมง (mAh = Ah/1000)
Wh / kWh	พลังงาน = V × Ah (kWh = 1000 Wh)
W (วัตต์)	กำลัง = V × A — อัตราการใช้พลังงาน
C-rate	อัตราจ่าย/ชาร์จเทียบความจุ (1C = หมดยุคใน 1 ชม.)
DOD	Depth of Discharge — ใช้ความจุไปกี่ % (ยิ่งลึกอายุยิ่งสั้น)
SOC	State of Charge — พลังงานที่เหลือใน %
IR	ความต้านทานภายในเซลล์ (mΩ) — ต่ำ = เซลล์ดี
S / P	อนุกรม (เพิ่มโวลต์) / ขนาน (เพิ่ม Ah) เช่น 24S = 24 ก้อนอนุกรม
LiFePO ₄ (LFP)	เซลล์ลิเทียมเหล็กฟอสเฟต 3.2V/เซลล์ ปลอดภัย อายุยาว

5 คำศัพท์ BMS · มอเตอร์ · อุปกรณ์

ศัพท์	ความหมาย
BMS	วงจรจัดการ/ป้องกันแบตเตอรี่ และบาลานซ์เซลล์
Balance	ปรับทุกเซลล์ให้แรงดันเท่ากัน
OVP / UVP	ตัดเมื่อแรงดันสูงเกิน / ต่ำเกิน
BLDC / PMSM	มอเตอร์ไร้แปรงถ่าน ใช้ไฟ 3 เฟส (U/V/W)
Hall sensor	เซนเซอร์บอกตำแหน่งโรเตอร์ให้คอนโทรลเลอร์
NCV	ตรวจไฟรั่วแบบไม่ต้องสัมผัส
MPPT	ตัวควบคุมประจุโซลาร์ที่ดึงกำลังแสงได้สูงสุด
IP rating	ระดับการกันฝุ่น/กันน้ำ เช่น IP67
Precharge	วงจรลดประกายไฟตอนสับไฟเข้าคอนโทรลเลอร์
Spot weld	เชื่อมแผ่นนิเกิลเข้าขั้วเซลล์ด้วยกระแสพัลส์
Hull speed	ความเร็วเพดานของเรือทรงตันน้ำ

แบบฝึกหัด — เลือกใบพัดและมอเตอร์

ฝึกจับคู่กำลัง/ใบพัดกับเรือ

ข้อ 1 เลือกกำลังมอเตอร์

เรือลำเล็กพาย 2 คน ตกปลาเจียบ ๆ ความเร็วไม่สูง ควรเลือกมอเตอร์ราวกี่ kW? และเรือบรรทุกหนักต้องการเร็วล่ะ?

เรือเล็ก (kW)

เรือใหญ่/เร็ว (kW)

ข้อ 2 อาการใบพัดไม่เหมาะสม

2.1 เร่งแล้วรอบขึ้นเร็วแต่เรือไม่ค่อยพุ่ง — ใบพัดเป็นอย่างไร? _____

2.2 เร่งแล้วกระแส/ความร้อนพุ่ง แต่เรือไม่เร็วขึ้น — ใบพัดเป็นอย่างไร? _____

ข้อ 3 วิธีวิ่งให้ประหยัด

ทำไมการแล่นได้/ใกล้ hull speed จึงได้ระยะทางต่อชาร์จไกลที่สุด?

สรุปสิ่งที่ได้เรียนรู้

การดูแลรักษาและการแก้ปัญหา

คอร์สเรือไฟฟ้า · บำรุงรักษาประจำ · อาการเสีย-สาเหตุ-วิธีแก้

นิยาม · หน้าที่ · ความสำคัญ

นิยาม	การตรวจเช็คดูแลระบบตามรอบ และการไล่หาสาเหตุเมื่อเกิดอาการผิดปกติ
หน้าที่	ทำให้ระบบพร้อมใช้เสมอ ยืดอายุอุปกรณ์ และแก้ปัญหาได้ตรงจุด
ความสำคัญ	ดูแลสม่ำเสมอช่วยกันเหตุเสีย/อันตรายกลางน้ำ และประหยัดค่าซ่อมระยะยาว

1 ตารางบำรุงรักษาประจำ

เมื่อไร	ตรวจอะไร
ทุกครั้งก่อนออกเรือ	แรงดันแบตเตอรี่/SOC · ชั่ว/จุดต่อแน่น ไม้ร้อน ไม้บวม · อุปกรณ์ความปลอดภัยครบ
รายเดือน	ผลต่างเซลล์ (cell delta) ในแอป · ความแน่นของหางปลา/สาย · สภาพก้านน้ำ/การกัดกร่อน
รายปี	ทดสอบความจุกจริง (เทียบกับค่าเดิม) · ตรวจ IR เซลล์ · ตรวจฟิวส์/เบรกเกอร์/สวิตช์

2 เมื่อไรควรเปลี่ยนแบตเตอรี่/เซลล์

ความจุกจริงเหลือ < ~70-80% ของค่าเดิม (วิ่งได้สั้นลงชัดเจน)	
IR สูงขึ้นมาก	เทียบกับตอนใหม่ (เซลล์เสื่อม ร้อนง่าย)
เซลล์บวม/ผิดรูป/รั่ว	→ หยุดใช้ทันที (อันตราย)
cell delta กว้างผิดปกติ และบาลานซ์แล้วไม่ดีขึ้น	

ตารางแก้ปัญหา (อาการ → สาเหตุ → วิธีแก้)

ไล่จากง่ายไปยาก · ตัดไฟก่อนแก้ไขเสมอ

3 อาการที่พบบ่อย

อาการ	สาเหตุที่เป็นไปได้	วิธีแก้
เปิดแล้วเรือไม่ออกตัว	เบรกเกอร์/สวิตช์ไม่เปิด · คันเร่งเสีย · BMS ตัด	เช็คเบรกเกอร์/กุญแจ · วัดสัญญาณคันเร่ง · ดูสถานะ BMS
มอเตอร์กระตุก/สั่น	เฟส U/V/W หรือสาย hall ไม่เข้าคู่	สลับคู่เฟส หรือ auto-learn hall-phase ในแอป
วิ่งได้ระยะสั้นลง	แบตเตอรี่เสื่อม · เซลล์อ่อนดิ่งทั้งแพ็คเกจ · ใบบัดหนัก	วัดความจุ/IR/cell delta · ทดลองลดพิตซ์ใบบัด
BMS ตัดบ่อย	กระแสเกิน · เซลล์ถึงค่าตัด · อุณหภูมิสูง	ลดโหลด/ผ่อนคันเร่ง · บาลานซ์ · ตรวจสอบค่าตั้ง
ชาร์จไม่เข้า	ที่ชาร์จผิดสเปค · BMS ตัด · จุดต่อหลวม	เช็คแรงดันที่ชาร์จ = $3.65 \times S$ · รีเซ็ต/ตรวจสอบ BMS · ชนซ้ำ
แบตเตอรี่ร้อนผิดปกติ	จุดต่อหลวม · สายเล็กเกิน · เซลล์เสื่อม	ตัดไฟ · ชน/ย้ายใหม่ · เปลี่ยนสายใหญ่ขึ้น · ตรวจสอบเซลล์

⚠ ก่อนแก้ทุกครั้ง

ตัดไฟหลักและถอดโหลด · ถ้าพบเซลล์บวม/ร้อน/มีกลิ่น ให้หยุดและทำตามบทความปลอดภัย (บท 10)

ข้อ 1 ตารางบันทึกการบำรุงรักษา

วันที่	แรงดันแพ็คเกจ (V)	cell delta (V)	สิ่งที่ตรวจ/แก้

ข้อ 2 วิเคราะห์อาการ

2.1 เรือวิ่งได้ระยะสั้นลงเรื่อย ๆ — จะตรวจอะไรบ้าง? _____

2.2 มอเตอร์กระตุกตอนออกตัว — สาเหตุที่ควรเช็คก่อน? _____

2.3 ก่อนลงมือแก้ไฟฟ้าทุกครั้งต้องทำอะไรก่อน? _____

สรุปสิ่งที่ได้เรียนรู้
