

## บทที่ 5

### สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาการเก็บพลังงานและปล่อยพลังงานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ร่วมกับการขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า โดยใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานช่วงชะลอเบรกและช่วงเบรก หาประสิทธิภาพการทำงานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ศึกษาการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากซูเปอร์คาปาซิเตอร์ให้กับยานพาหนะไฟฟ้า ประสิทธิภาพของยานพาหนะไฟฟ้า ซึ่งในบทนี้จะนำเสนอสรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะของการวิจัยตามลำดับขั้นตอนดังนี้

#### สรุปผล

ผลการทดลองการประจุและปล่อยประจุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์เพื่อหาประสิทธิภาพของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ โดยแบ่งเป็นการทดลองซูเปอร์คาปาซิเตอร์ในการประจุและปล่อยประจุด้วยระดับแรงดันคงที่ตามพิกัดและค่ากระแสต่าง ๆ รวมทั้งการต่อร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้า และประยุกต์ใช้งานร่วมกับยานพาหนะไฟฟ้า ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ คือ เวลา พิกัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าในการประจุและปล่อยประจุ ซึ่งเมื่อการประจุที่แรงดันไฟฟ้าตามพิกัด 48V กระแสไฟฟ้าต่ำ 10A จะทำให้ได้ประสิทธิภาพสูง 98.88% แต่เมื่อการประจุและปล่อยประจุที่กระแสไฟฟ้าสูง 100A จะทำให้ประสิทธิภาพลดลง 91.74% แต่เวลาที่ใช้การประจุจะเร็วกว่าและใช้พลังงานมากกว่าเมื่อเทียบกับที่ใช้กระแสต่ำในการประจุ

2. ซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ ซึ่งเมื่อคำนวณจากพลังงานที่ใช้การประจุ (พลังงานด้านอินพุต) เปรียบเทียบกับพลังงานที่ปล่อยประจุ (พลังงานด้านเอาต์พุต) มีประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ที่ 94.14%

3. ซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าที่สามารถนำมาใช้ขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีความต้านทานอนุกรมภายใน (ESR) เท่ากับ 0.02129 โอห์ม ซึ่งทำให้เกิดกระแสรั่วไหลต่ำ (Leakage current) ตลอดเวลา รวมทั้งเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียภายใน เท่ากับ 3,742 จูล อันเนื่องมาจากความต้านทานอนุกรมภายใน

4. ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่การประจุแรงดันไฟฟ้าคงที่ 48V กระแส 10A 20A 30A 40A 50A 60A 70A 80A 90A และ 100A พบว่าที่กระแสการประจุต่ำจะได้ประสิทธิภาพสูงสุดถึง 98.88% และเมื่อเพิ่มกระแสในการประจุเป็น 100A จะได้ประสิทธิภาพลดต่ำลง 91.97% และค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 94.14% การใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์กับโหลดที่มีกระแสเกิน 20A จะทำให้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ไม่สามารถจ่ายพลังงานได้หมดโดยวงจรภายในของ

ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์จะตัดการจ่ายพลังงานที่แรงดันเฉลี่ย 37.74V ซึ่งทำให้มีพลังงานภายในซูปเปอร์คาปาซิเตอร์หลงเหลือจำนวนมาก

5. การใช้ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานเพื่อขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า (ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงพิกัด 2000W 48V 41A) พบว่าประสิทธิภาพการเก็บพลังงานที่แรงดันตามพิกัด 50.52V กระแส 20.33A ใช้พลังงานขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า จะได้ประสิทธิภาพสูงสุด 97.06% แต่เมื่อเก็บพลังงานและจ่ายพลังงานที่กระแสสูง 79.15A จะได้ประสิทธิภาพลดลง 17.26%

ผลการวิเคราะห์ช่วงเบรกหรือชะลอเบรกพบว่าซูปเปอร์คาปาซิเตอร์จะได้รับการประจุที่แรงดัน 31.06V จากการติดตั้งไดชาร์จ

ผลการวิเคราะห์เวลาช่วงการเก็บประจุ พบว่าซูปเปอร์คาปาซิเตอร์จะใช้เวลาเก็บประจุเร็วที่กระแสชาร์จสูง 79.15A ใช้เวลา 222 วินาที และใช้เวลาเก็บประจุนานสุดที่กระแสชาร์จต่ำ 20.33A ใช้เวลา 447 วินาที

ช่วงที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า น้ำหนักรวมบรรทุก 480 kg ที่กระแสชาร์จ 20.33A ใช้เวลาชาร์จ 447 วินาที (7 นาที 27 วินาที) พลังงานในการชาร์จ 798.29 W ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าได้ 315 วินาที (5 นาที 15 นาที) ใช้พลังงานขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า 822.47W ระยะทางที่วิ่งทดสอบ 1010 เมตร รองลงมาที่น้ำหนักรวมบรรทุก 415 kg ที่กระแสชาร์จ 39.53A ใช้เวลาชาร์จ 310 วินาที (5 นาที 10 วินาที) ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าได้ 388 วินาที (6 นาที 28 นาที) ระยะทางที่วิ่งทดสอบ 1100 เมตร และ ที่น้ำหนักรวมบรรทุก 405 kg กระแสชาร์จ 79.15A ใช้เวลาชาร์จ 222 วินาที (3 นาที 42 วินาที) ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าได้ (6 นาที 21 วินาที) วัฏระยะทางที่วิ่งได้ 1150 เมตร

การใช้ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์เพื่อขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าจะให้ประสิทธิภาพสูงสุด 97.06% ที่กระแสชาร์จ 20.33A และซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าที่มีพิกัดกระแส 41A จะทำให้ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ไม่สามารถจ่ายพลังงานได้หมดโดยวงจรภายในของซูปเปอร์คาปาซิเตอร์จะตัดการจ่ายพลังงานที่แรงดันเฉลี่ย 30.55V ซึ่งทำให้มีพลังงานภายในซูปเปอร์คาปาซิเตอร์หลงเหลือจำนวนมาก

### อภิปรายผล

ผลการวิจัยในครั้งนี้ทำให้ได้แหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) ที่สามารถนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ได้มากกว่าหนึ่งล้านวัฏจักรและไม่เกิดมลภาวะต่อสภาพแวดล้อม ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากผลการทดลองและจากการคำนวณ แสดงถึงประสิทธิภาพการ

ทำงานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์เพื่อเป็นแหล่งจ่ายพลังงานสำหรับขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าสามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการเก็บพลังงานและปล่อยพลังงานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถชาร์จที่ปริมาณกระแสสูงได้ แต่แรงดันไฟฟ้าไม่ควรเกินพิกัด การเปลี่ยนแปลงของแรงดันจะเป็นแบบทันทีทันใด (Transient) และกระแสจะเป็นค่าคงที่ทั้งช่วงการประจุและปล่อยประจุ ในส่วนเวลาที่ใช้ในการประจุจะขึ้นกับกระแส ยิ่งถ้ากระแสสูงเวลาที่ใช้เก็บพลังงานจนเต็มจะเร็วมาก ในขณะที่ประจุที่กระแสต่ำจะใช้เวลานานกว่า

ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของซูเปอร์คาปาซิเตอร์จะให้ประสิทธิภาพสูงสุด 98.88% ที่กระแสชาร์จต่ำ 10A และถ้าชาร์จที่กระแสสูงจะทำให้ประสิทธิภาพลดต่ำลง การใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์กับโหลดที่มีกระแสสูงเกิน 20A จะทำให้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ไม่สามารถจ่ายพลังงานได้หมดโดยวงจรภายในของซูเปอร์คาปาซิเตอร์จะตัดการจ่ายพลังงานที่แรงดันเฉลี่ย 37.74V ซึ่งทำให้มีพลังงานภายในซูเปอร์คาปาซิเตอร์หลงเหลือจำนวนมาก

การใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า พบว่าประสิทธิภาพช่วงการเก็บพลังงานที่แรงดันชาร์จ 50.52V กระแส 20.33A และช่วงที่ใช้พลังงานขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าจะได้ประสิทธิภาพสูงสุด 97.06% แต่เมื่อเก็บพลังงานที่แรงดันชาร์จ 50.49V กระแส 79.15A และใช้พลังงานขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า จะได้ประสิทธิภาพลดลง 17.26% สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jens C. Schroeder, และคณะ (2010)

ผลการวิเคราะห์เวลาช่วงการเก็บประจุ (ชาร์จ) พบว่าซูเปอร์คาปาซิเตอร์จะใช้เวลาชาร์จเร็วที่กระแส 79.15A ใช้เวลา 222 วินาที สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Rares Bodnar, William Redman-White. 2011) และใช้เวลาชาร์จนานสุดที่กระแส 20A ใช้เวลา 447 วินาที

ผลการวิเคราะห์ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า ที่น้ำหนักรวมบรรทุก 480 kg ซูเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าได้ 315 วินาที (5 นาที 15 นาที) ระยะทางที่วิ่งทดสอบ 1010 เมตร รองลงมาที่น้ำหนักรวมบรรทุก 415 kg ซูเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าได้ 388 วินาที (6 นาที 28 นาที) ระยะทางที่วิ่งทดสอบ 1100 เมตร และที่น้ำหนักรวมบรรทุก 405 kg กระแสชาร์จ 79.15A ซูเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าได้ (6 นาที 21 นาที) วัดระยะทางที่วิ่งได้ 1150 เมตร ในระหว่างการทดลองวิ่งที่มีการเบรกหรือชะลอเบรกพบว่าซูเปอร์คาปาซิเตอร์จะได้รับการประจุที่แรงดัน 31.06V จากการติดตั้งไดชาร์จ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Adnan Rafi Al Tahtawi and Arief Syaichu Rohman. (2015)

การใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าที่มีพิกัดกระแส 41A จะทำให้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ไม่สามารถจ่ายพลังงานได้หมดโดยวงจรภายในของซูเปอร์คาปาซิเตอร์จะตัด

การจ่ายพลังงานที่แรงดันเฉลี่ย 30.55V ซึ่งทำให้มีพลังงานภายในซูเปอร์คาปาซิเตอร์หลงเหลือจำนวนมาก แต่ถ้านำไปใช้กับโหลดที่มีกระแสต่ำกว่า 20A ซูเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถที่จะจ่ายพลังงานได้หมดจนแรงดันที่ขั้วเหลือ 0.52V

### ข้อเสนอแนะ

ผลจากการวิจัย มีข้อเสนอแนะเพื่อนำไปใช้ดังนี้

ข้อเสนอแนะเพื่อนำไปใช้งาน

1. การเก็บประจุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถทำได้ที่กระแสสูง ๆ ได้ แต่แรงดันไฟฟ้าไม่ควรใช้เกินพิกัดได้

2. เมื่อต่อขานานซูเปอร์คาปาซิเตอร์ชุดที่ 1 กับชุดที่ 2 ควรมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน เนื่องจากซูเปอร์คาปาซิเตอร์ชุดที่มีแรงดันต่ำกว่าเปรียบเสมือนเป็นโหลดให้กับชุดที่มีแรงดันสูงกว่า

ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยครั้งต่อไป

1. เนื่องจากซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีค่าความต้านทานอนุกรมภายในทำให้เมื่อประจุแรงดันเต็มพิกัดจำเป็นต้องมีวงจรสำหรับปลดออกจากระบบ

2. ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ยี่ห้อ Maxwell รุ่น BMOD0165P048 BXX, 165F, 48V จำนวน 2 ลูก ต่อขานานจะได้เป็นขนาดพิกัดรวม 330F 48V จำนวน 1 ชุด สามารถจ่ายพลังงานได้หมดเมื่อโหลดไม่เกิน 20A

3. ควรศึกษาช่วงแรงดันที่ซูเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power transfer)

4. ควรศึกษาจุดคุ้มทุนสำหรับการนำงานวิจัยไปต่อยอดเพื่อผลิตในเชิงพาณิชย์