

Article

วัสดุสำหรับการกักเก็บพลังงาน Materials for Energy storage

กนกพร จันทรสุวรรณ^{1,*} และ มนตรี เลื่องชวณนท์²Kanokporn Jantasuwarn^{1,*} and Montri Luengchavanon²¹หลักสูตรเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110²ศูนย์พลังงานลมและระบบกักเก็บพลังงาน คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110¹Energy Technology Program, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,
Hatyai Campus, Hatyai, Songkhla 90110, Thailand²Wind Energy and Energy Storage System Centre, Faculty of Environmental Management,
Prince of Songkla University, Hatyai Campus, Hatyai, Songkhla 90110, Thailand

*Corresponding author E-mail: 5940311101@psu.ac.th

วันที่รับบทความ: 13 กุมภาพันธ์ 2565, วันแก้ไขบทความ: 14 พฤษภาคม 2565, วันตอบรับบทความ: 14 พฤษภาคม 2565

Received: 13th February 2022, Revised: 14th May 2022, Accepted: 14th May 2022

บทคัดย่อ

การคาดการณ์ว่าพลังงานจากฟอสซิลไม่เพียงพอต่อการใช้งานและจะหมดไปในที่สุด ในขณะเดียวกัน การอุปโภคพลังงานฟอสซิล ยังก่อผลกระทบทางลบต่อสิ่งแวดล้อม เป็นเหตุผลที่ต้องหาแหล่งพลังงานสะอาดที่เหมาะสมกว่า อย่างไรก็ตาม พลังงานทางเลือกมีลักษณะที่ไม่ต่อเนื่องขาดความสม่ำเสมอ ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้น ระบบกักเก็บพลังงานจึงมีความสำคัญมาก ในบทความนี้เป็นการรวบรวมบทความที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีวัสดุกักเก็บพลังงานรูปแบบใหม่ ด้วยประสิทธิภาพและการใช้งานที่น่าสนใจ

คำสำคัญ: วัสดุกักเก็บพลังงาน, ความร้อน, ตัวเก็บประจุยิ่งยวด, แบตเตอรี่

Abstract

Owing to depletion of fossil fuel resources being and negative effects from consumption of these limited fuels, there is a need to provide other compensating green sources of energy. However, many renewable energy sources are irregular and intermittent, unpredictable by their character, so energy storage systems are needed. This article reviews various emerging energy storage materials. Their performance and application characteristics are compared.

Keywords: Energy storage material, Heat, Supercapacitor, Battery

บทนำ

ปัจจุบันประชากรมีความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มมากยิ่งขึ้น แต่ในทางกลับกันพลังงาน เช่น น้ำมัน เชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ ลดน้อยลงเรื่อย ๆ จึงไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ในอนาคต และเป็นปัญหาในการก่อสภาวะโลกร้อน ทำให้มีการนำพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ มาใช้ทดแทนพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป แต่อย่างไรก็ตาม พลังงานหมุนเวียนก็ยังมีขีดจำกัดในการผลิต ในขณะเดียวกันปริมาณการผลิตขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม ณ เวลานั้น ๆ ซึ่งทำให้มีกำลังการผลิตที่ไม่แน่นอน ไม่สามารถควบคุมได้ ทำให้มีการคิดค้นการจัดเก็บพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ สำหรับการกักเก็บพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ เพิ่มขึ้น เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการ สามารถใช้งานได้ตลอดเวลา ทำให้การใช้พลังงานทดแทนมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น และช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศได้อีกด้วย ดังนั้น เทคโนโลยีใดก็ตามที่สามารถกักเก็บพลังงาน (ความร้อน ไฮโดรเจน หรือ ไฟฟ้า) ที่ผลิตในช่วงเวลาหนึ่ง เพื่อนำออกมาใช้ตอบสนองความต้องการในอีกช่วงเวลาหนึ่งได้โดยใช้วัสดุที่แตกต่างกัน คือเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงาน ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่สามารถทำงานร่วมกับระบบอื่น ๆ โดยสามารถช่วยให้เกิดการยกระดับการบริหารจัดการทั้งในฝั่งของอุปสงค์และอุปทานพลังงานให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ระบบกักเก็บพลังงานจึงมีความจำเป็นสำหรับระบบไฟฟ้าในอนาคตเป็นอย่างมาก โดยจะเป็นการสนับสนุนการรักษาสมดุลของระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะในระบบที่มีการใช้พลังงานหมุนเวียนเนื่องจากมีความไม่แน่นอนจน รวมถึงยังตอบสนองด้านโหลดและยังช่วยรักษาเสถียรภาพและคุณภาพไฟฟ้าได้อีกด้วย ปัจจุบันเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานสามารถสร้างได้หลายรูปแบบ เช่น

- การเก็บพลังงานในรูปของความร้อน เป็นการกักเก็บพลังงานความร้อนในรูปของการทำความร้อนหรือความเย็นด้วยวัสดุตัวกลาง โดยใช้วัสดุเป็น โซเดียมอะซิเตท (Sodium acetate), กรดโดเดคาโนอิก (Dodecanoic acid), ขยะพลาสติก (Waste plastic), โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride), พาราฟิน (Paraffin), กราไฟท์ออกไซด์ (Graphite oxide), กราไฟท์นาโนเพลท (Graphite nanoplate: GNP), ออกตาเดซิล ไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Octadecyl trimethyl ammonium bromide), วิตามินซี (Ascorbic acid), วัสดุเปลี่ยนเฟสสำหรับไมโครแคปซูล (Micro-encapsulated phase change materials), ในวัสดุ MXenes เป็นชั้นสองมิติของสารอนินทรีย์ วัสดุเหล่านี้ประกอบด้วยชั้นหนาไม่กึ่งต่อมของโลหะทรานซิคาร์ไบด์/พอลิเอทิลีนไกลคอล (MXene-wrapped bio-based pomelo peel foam/Polyethylene glycol), นาโนทองแดง (Nano-copper), ทองแดง (Copper)

- การเก็บพลังงานในรูปของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor) โดยใช้วัสดุเป็น ถ่านกัมมันต์/วุ้น (Activated carbon/Agar), กราฟีน (Graphene), คอปเปอร์(II) ไนเตรตไตรไฮเดรต (Copper(II) nitrate trihydrate), โซเดียมไฮดรอกไซด์/โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (NaOH/KOH), คาร์บอน (Carbon), แอมโมเนียมเมทัลฟอสเฟต (Ammonium metal phosphates), ไนลอน-6 (Nylon-6), กรดฟอร์มิก (Formic acid), สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate), กรดออร์โธฟอสฟอริก (Ortho-phosphoric acid), กราฟีน (Graphene), ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide), กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid), กรดกำมะถัน (Sulphuric acid (H_2SO_4)), ผงแกรไฟต์ (Graphite powder), พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride: PVDF), คาร์บอนดำ (Carbon black), อะเซทิลีน (Acetylene), เอ็น-เมทิล-2-ไพโรลิโดน (N-methyl-2-pyrrolidone), แอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ไดซัลเฟต (Ammonium peroxydisulphate)

- การเก็บพลังงานในรูปของความร้อนทางเคมี (Thermochemical) โดยใช้วัสดุเป็น หินปูน (Limestone), อะลูมิเนียมไนเตรต (Aluminum nitrate nonahydrate), ซีเรียมไนเตรตเฮกซาไฮเดรต (Cerium nitrate hexahydrate), กรดน้ำส้ม (Acetic acid), อะลูมิเนียมออกไซด์/ซีเรียมออกไซด์ แบบโคปสารร่วมและใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นสารหลัก (Al_2O_3/CeO_2 co-doped CaO-based)

- การเก็บพลังงานในรูปของแบตเตอรี่ลิเทียมรูปแบบใหม่ โดยใช้วัสดุเป็น คาร์บอน (Carbon), แอมโมเนียมเมทัลฟอสเฟต (Ammonium metal phosphates), โครงสร้าง 3 มิติ ของลิเทียมไอออนซิลิกอนออกไซด์ร่วมกับท่อนาโนคาร์บอนลักษณะคล้ายหยดน้ำขนาดเล็ก ($3D-Li_2FeSiO_4/Carbon$ nanotubes microspheres)

- การเก็บพลังงานในรูปของความร้อนจากแสงอาทิตย์ (Solar thermal energy) โดยใช้วัสดุเป็น เอ็นเตตราโคเซน (n-Tetracosane), เมลามีน ฟอรัมาลดีไฮด์ (Melamine formaldehyde), โซเดียมลอริลซัลเฟต (Sodium lauryl sulphate), กรดน้ำส้ม (Acetic acid: AA), ไตรเอทิลลามีน (Triethylamine: TEA)
- การเก็บพลังงานในรูปของไฟฟ้าเคมีระดับไมโคร (Micro-electrochemical energy) โดยใช้วัสดุเป็น เซรามิก (Ceramic), โบรอนคาร์ไบด์เป็นขั้วอิเล็กโทรด (Boron carbide (B_4C) as the electrode), ซูโครส (Sucrose), กราฟีน (Graphene), แอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต (Ammonium persulfate), กรดกำมะถัน, นิกเกิล-โคบอลต์-แมงกานีส จัดรูปแบบชั้นแบบดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Ni-Co-Mn layered double hydroxide), คาร์บอนและอนุภาคนาโนไฮบริด (Carbon-based and nanohybrid)
- การเก็บพลังงานในรูปของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitor) โดยใช้วัสดุเป็น พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์, พอลิเมทิล เมทาคริเลต (Polymethyl methacrylate: PMMA or acrylic), ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)
- การเก็บพลังงานไฮโดรเจนในรูปของแบตเตอรี่ โดยใช้วัสดุเป็นอิเล็กโทรดของ Ni-Cd, Li-decorated B_3S monolayers

ความร้อน

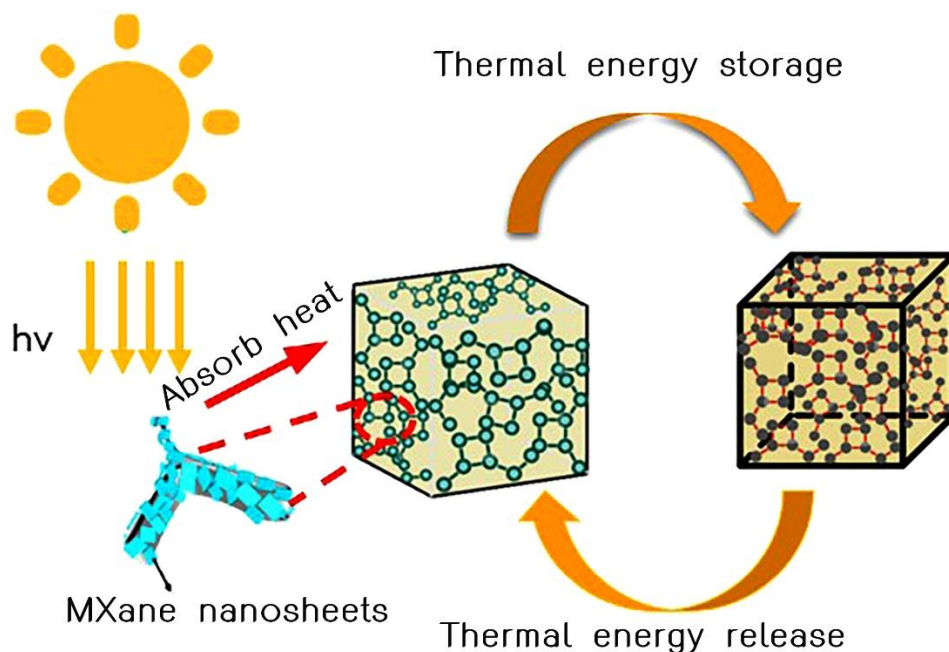
การเก็บพลังงานในรูปของความร้อน มีการวัสดุที่ใช้หลากหลายเพื่อนำมาเก็บเป็นพลังงาน เช่น ในปี ค.ศ. 2020 การกักเก็บพลังงานความร้อนโดยใช้วัสดุเปลี่ยนเฟสสำหรับไมโครแคปซูล Micro-encapsulated phase change materials (MePCMs) เป็นวัสดุและวิธีการลดค่าการนำความร้อนด้วยการหุ้มพาราฟิน (Paraffin) ร่วมกับกราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide: GO) ซึ่งเป็นวิธีที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย จากงานวิจัยนี้พบว่า การหุ้มด้วย GO และ กราฟีนนาโนเพลต (Graphite nanoplatelets: GNP) สามารถเพิ่มการนำความร้อนจาก 0.67 W/mK เป็น 0.90 W/mK ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1] นอกจากนี้การกักเก็บพลังงานในรูปของความร้อนให้มีประสิทธิภาพสามารถใช้วัสดุได้อีกหลายชนิดในการกักเก็บพลังงาน เช่น การศึกษาการวัสดุเปลี่ยนเฟสคอมโพสิตที่มีความเสถียร โดยวิธีการเปลี่ยนโครงสร้างวัสดุกักเก็บพลังงานและกราฟีน การทำให้ชุ่มด้วยกรดโดเดคาโนอิก (Dodecanoic: DA) โดยการเติมด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ในแหล่งกำเนิดจากโซเดียมอะซิเตตซึ่งเป็นของแข็งและมีขนาดเฉพาะพื้นที่ผิวมีเสถียรภาพทางการเพิ่มความร้อนสูงและอัตราส่วนการไหลของ MePCMs ขนาดใหญ่ (81.1%) มีรูปทรงที่ดี และประหยัดการใช้คาร์บอน นอกจากนี้ คาร์บอน 1D และ/หรือ 2D เมื่อประเมินประสิทธิภาพของคุณสมบัติทางเคมี เทอร์โมเคมี และเคมีฟิสิกส์ แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มความจุในการจัดเก็บพลังงานได้สูงถึง 157.6 kJ/kg ซึ่งสูงกว่าพลังงานที่คาดการณ์ไว้ถึง 101.4% คอมโพสิตชนิดนี้ยังเผยให้เห็นการแปลงในรูปความร้อนที่เพิ่มขึ้นประมาณ 78% และการนำความร้อนสูงถึง 159.1% เมื่อเทียบกับ PCM แบบเก่าที่มีความนำเชื่อถือสูง [2] การเพิ่มประสิทธิภาพจัดเก็บพลังงานความร้อนที่ถูกนำมาใช้กับการทดลองด้วยการนำพลาสติกที่ใช้แล้วมาเป็นวัสดุในการกักเก็บพลังงานความร้อน วิเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขของมวลที่แตกต่างกัน อัตราการไหล อุณหภูมิ ด้วยอัตราการไหลที่สูงขึ้น สามารถลดระยะเวลาระหว่างการชาร์จลง ในขณะที่การปลดปล่อยอัตราการไหลของมวลมีประสิทธิภาพต่ำกว่า [3]

วัสดุเปลี่ยนเฟสสำหรับไมโครแคปซูล (MePCMs) ที่มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลว 28 °C ถูกใช้กักเก็บพลังงานเพื่อควบคุมคุณสมบัติทางความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน อนุภาคของ (Nanoparticle-enhanced phase change materials: NEPCM) ถูกผสมกับแกรไฟต์แบบขยายตัว (Expanded graphite: EG) เพื่อปรับปรุงอัตราการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน อนุภาค MePCM ทำจากแกนพาราฟินที่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาค 45 μm สามารถเปลี่ยนเฟสของแข็ง/ของเหลว และกักเก็บของพลังงานความร้อนไว้ได้เนื่องจากความร้อนแฝงของการเปลี่ยนเฟส ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนกับหม้อน้ำ ท่อทองแดง ด้วยอลูมิเนียมที่กักเก็บอยู่ในรูปของ MePCMs หรือส่วนผสมคอมโพสิต แกรไฟต์แบบขยายตัว (EG) เสริมด้วย MePCMs คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของ MePCMs และ NEPCM รวม EG ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในการนำความร้อน 132% และการลดลง 28% ความร้อนจำเพาะที่เหมาะสมของคอมโพสิต MePCM รวม EG ที่มีอัตราส่วนมวล 70% ของ MePCM และ 30% ของ EG เทียบกับ MePCM บริสุทธิ์ ในส่วนของอัตราการ

ชาร์จและการคายประจุของตัวแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการไหลแบบต่าง ๆ พบว่า การใช้ EG ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน และความสามารถของตัวแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างการชาร์จโดยเฉพาะ และกระบวนการคายประจุเพิ่มขึ้น การใช้ MePCM ร่วม EG ช่วยลดอุณหภูมิที่ลดลงที่ได้รับแลกเปลี่ยนความร้อนประมาณ 15 °C เมื่อเทียบกับกรณีของ MePCM บริสุทธิ์ [4]

สำหรับการปรับปรุงวัสดุกักเก็บพลังงานในการกรองน้ำทะเลด้วยแสงอาทิตย์ พาราฟินถูกเลือกมาใช้งาน เพราะเป็นวัสดุเปลี่ยนเฟส อนุภาคนาโนของไทเทเนียมออกไซด์ โดยชุบในพาราฟิน และผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์รูปแบบต่าง ๆ ทำให้ผลผลิตน้ำสะสมโดยรวมต่อวันเพิ่มขึ้นเป็น 6.6 L/m²/day เมื่อมีการใช้พาราฟินที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไทเทเนียมออกไซด์แทนการใช้พาราฟินจากฟอสซิล จึงสรุปได้ว่าวัสดุกักเก็บพลังงานที่เพิ่มระดับอนุภาคนาโนเป็นขั้นตอนต่อไปของการวิจัยและพัฒนาในลักษณะของการแยกน้ำทะเลด้วยแสงอาทิตย์กับวัสดุเปลี่ยนเฟส เนื่องจากให้ผลผลิตที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับพาราฟินที่ไม่ผ่านการขัดอนุภาคเนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพมีความร้อนที่เพิ่มขึ้น [5]

วัสดุเปลี่ยนเฟส (PCM) ได้รับความสนใจอย่างมากจากนักวิจัยและมีได้รับการพัฒนาอย่างกว้างขวางในด้านการกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ ในที่นี้คือ โฟมเปลือกส้มโอ และ พอลิเอทิลีนไกลคอล (Pomelo peel foam: PPF/Polyethylene glycol: PEG) ได้รับการออกแบบและจัดทำด้วยการใช้แผ่นนาโน MXene ในระดับชั้นที่บางมากเพื่อวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการแปลงแสงเป็นความร้อน การกักเก็บพลังงานความร้อนและการนำความร้อนด้วยการรวมแผ่นนาโน MXene เข้ากับ PPF ทำให้ประสิทธิภาพการแปลงแสงเป็นความร้อนดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัดการใช้ PEG ในรูปแบบที่วัสดุมีเสถียรภาพการเปลี่ยนเฟสคอมโพสิต (Free cooling based phase change materials: FCPCM) เพิ่มขึ้นจาก 86.9 wt.% (FCPCM-1) เป็นเฟสอื่น ๆ 96.2 wt.% (FCPCM-2, FCPCM-3 และ FCPCM-4) และการนำความร้อนที่ได้รับ PPF@MXene/PEG FCPCMs ได้รับการปรับปรุงแสดงให้เห็นว่า PPF@MXene/PEG FCPCM สามารถนำไปใช้อย่างเต็มประสิทธิภาพในด้านพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ [6] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 รูปแบบการส่งผ่านแสงไปเป็นพลังงานความร้อนเพื่อการกักเก็บ [6]

การเก็บพลังงานในรูปของไฟฟ้าเคมี ใช้วัสดุเป็น $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2$ ถูกสังเคราะห์โดยวิธีการผสมแบบเปียก และเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเก็บพลังงานเทอร์โมเคมี โดยวัสดุที่ใช้ CaO ผสมด้วย $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2$ ภายใต้ความดันคาร์บอนเตสูง นอกจากของปริมาณของ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2$ ที่ความดันคาร์บอนเตสูงมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บพลังงานของวัสดุสังเคราะห์ องค์ประกอบหลักของวัสดุสังเคราะห์ CaO , $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ และ CeO_2 เมื่อมี Al_2O_3 และ CeO_2 ปริมาณ 5 wt.% ถูกผสมบน CaO วัสดุสังเคราะห์แสดงความสามารถในการกักเก็บพลังงานสูงสุดและมีเสถียรภาพมากที่สุดภายใต้ความดันคาร์บอนเต 1.3 MPa ในช่วง 30 รอบ ไอออน Ce^{3+} ที่อยู่บนพื้นผิวของวัสดุสังเคราะห์สามารถเชื่อมต่อออกซิเจนได้ นอกจากนี้วัสดุสังเคราะห์ยังมีคุณสมบัติพื้นฐานที่แข็งแรง มีพื้นผิว และปริมาณรูพรุนขนาดใหญ่ ในระหว่างการจัดเก็บพลังงานหลาย ๆ รอบ ประสิทธิภาพการจัดเก็บพลังงานสูงขึ้น [7]

การจัดเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ โดยใช้เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (Melamine formaldehyde: MF) ไมโครแคปซูลที่มีแกน (n-Tetracosane: n-Tetra) เป็นวัสดุเปลี่ยนเฟส (PCM) โดยไมโครแคปซูลถูกรวม (0-25 wt.%) ลงในระบบอีพ็อกซีไฟโพรเมอร์-โพลียูรีเทน (Epoxy primer-polyurethane: EP-PU) สำหรับการจัดเก็บพลังงานความร้อน พบว่า n-Tetra ที่รวมอยู่ในไมโครแคปซูล (MF-n-Tetra) ละลายที่อุณหภูมิ 53.07 °C ด้วยความร้อนแฝงของการหลอม 134.74 J/g และตกผลึกที่ 48.81 °C ด้วยความร้อนแฝงสูง 133.32 J/g พบว่าคุณสมบัติการเปลี่ยนเฟสของวัสดุเคลือบเพิ่มขึ้น โดยอัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อนต้องได้รับการวัดปริมาณตามระยะเวลาที่ใช้ในชั้นวัสดุเพื่อให้ได้อุณหภูมิสมดุล 60 °C [8]

ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

การเก็บพลังงานในรูปของ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor) โดยใช้วัสดุที่ชนิดต่าง ๆ เช่น การนำวัสดุคาร์บอนสำหรับขั้วอิเล็กโทรดเพื่อพัฒนาอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน โดยผลิตคาร์บอนจากธรรมชาติประเภทต่าง ๆ ด้วยการสังเคราะห์กราฟีนและผลิตภัณฑ์คาร์บอน/อนุพันธ์ ล้วนมีผลต่อประสิทธิภาพของ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด [9] การตกตะกอนร่วมอย่างง่ายสำหรับการสังเคราะห์นาโนบีดส์ (Nanobeads) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) เทคนิคการหาลักษณะเฉพาะ เช่น การเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ผง (P-XRD), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope: FESEM) และเทคนิคการกระตุ้นสสารด้วยพลังงานแสงอินฟราเรด (Fourier transform infrared spectroscopy: FTIR) ศึกษาความจุเฉพาะทางเคมีไฟฟ้าแสดงค่า $69.1 \text{ mA}\cdot\text{hg}^{-1}$ (771 Fg^{-1}) ที่ 0.83 Ag^{-1} การรักษาความจุเพื่อใช้เป็นวัสดุขั้วอิเล็กโทรดสำหรับอุปกรณ์ กักเก็บพลังงาน 82.1% มากกว่า 1,000 รอบ ต่อการชาร์จ/การคายประจุ และค่าความต้านทานในการถ่ายเทประจุที่ต่ำมาก (R_{ct}) [10] ไนโตรเจน ออกซิเจน และฟอสฟอรัส กลายเป็นสิ่งสำคัญสำหรับวัสดุที่สามารถกักเก็บและแปลงพลังงาน แอมโมเนียม โลหะ ฟอสเฟต (NH_4MPO_4 , $M = \text{Mn}^{2+}, \text{Ni}^{2+}, \text{Co}^{2+}, \text{Fe}^{2+}$ ฯลฯ) เป็นวัสดุที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถการขนส่งอิเล็กตรอนได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้การมีอยู่ของไฟฟ้าปริมาณมากขึ้นและเป็นศูนย์กลางที่มีการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์สูง และการขนส่งไอออนอย่างรวดเร็วเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำ การสังเคราะห์ของมิติต่าง ๆ (0D-3D) ของวัสดุเหล่านี้ คือ สะดวก และแข็งแรง ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้า [11] จากการใช้นิลอน-6 (PA6) พอลิอะนิลีน (PANI) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduce graphere oxide: rGO) ในการเตรียมนาโนคอมโพสิตด้วยเทอร์นารีเฟส (PA6/rGO/PANI) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ยอดเยียมมากขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูง ความต้านทานการถ่ายเทประจุต่ำ มีความเสถียรของรอบสูง และความสามารถในอัตราการไหลไอออนที่มากกว่าปกติ การวัดค่าการปลดปล่อยประจุไฟฟ้าแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการย้อนกลับโดยมีการกักเก็บความจุประมาณ ~98% อุปกรณ์ตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบสมมาตรที่ผลิตขึ้นจาก PA6/rGO/PANI 1:2 มีความจุจำเพาะที่น่าสนใจมาก (38 Fg^{-1}) พลังงานจำเพาะ ($\sim 3.66 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$) และกำลังจำเพาะ ($\sim 234.84 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$) การสะสมประจุอย่างมีนัยสำคัญบนพื้นผิวอิเล็กโทรด ซึ่งเป็นผลมาจากผลการทำงานร่วมกันของ PA6 และ PANI ต่อการเสริมผิวหน้าของ rGO คุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าที่ยอดเยียมบ่งบอกถึงการใช้งานที่เป็นไปได้ในเครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถแทนที่แบตเตอรี่ในอนาคต [12] การจัดเก็บพลังงานพลังงานไฟฟ้าเคมีขนาดเล็กโดยใช้ผงโบรอนคาร์ไบด์ (B_4C) ซึ่งเป็นที่รู้จักกัน

อย่างแพร่หลาย มีความหนาแน่นต่ำ ความแข็งแรง สารเคมีที่มีความเป็นพิษและอาจมีผลต่อสิ่งแวดล้อมบ้าง เนื่องจากเป็นวัสดุเซรามิกแข็ง การใช้ $B_4C@C$ ในงานของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดขนาดเล็ก (Micro supercapacitor: MSCs) แสดงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมีที่โดดเด่น เช่น ความจุ $7.33 \text{ mF}\cdot\text{cm}^{-2}$ การกักเก็บความจุ 100.94% หลังจาก 50,000 รอบ ช่วงอุณหภูมิการทำงานกว้าง (-25 ถึง 75°C) มีการลดประสิทธิภาพภายใต้สภาวะการโค้งงอที่แตกต่างกัน เสถียรภาพด้านสิ่งแวดล้อมที่โดดเด่นและเหนือกว่ามาตรฐาน [13]

แบตเตอรี่

การจัดเก็บพลังงานของแบตเตอรี่ลิเทียมด้วยวัสดุโพลีไอออน (Polyanion-Type $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$) เนื่องจากเป็นวัสดุเชิงบวกชั้นสูง ต้นทุนต่ำความปลอดภัยสูง จากผลวิจัยการทำให้แห้งแบบสเปรย์อย่างง่ายเพื่อสร้างท่อนาโนคาร์บอนสามมิติ (3D CNTs) บน (3D- $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{CNTs}$) ให้คุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่เหนือกว่า ด้วยความจุจำเพาะจาก $169.1 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ที่ 0.1 C นอกจากนี้ ยังให้ความจุในการปล่อย $104.1 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ที่ 5 C มากกว่า 500 รอบ ด้วยอัตราส่วนการกักเก็บความจุประมาณ 91.2% [14] การจัดเก็บพลังงานผสมผสานโดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนผนังด้านเดียว (Single-walled carbon nanotubes: SWCNTs) และ Ni-Co-Mn ไฮดรอกไซด์สองชั้น ด้วยอัตราส่วนน้ำหนักของสารตั้งต้นของ SWCNTs และ Ni-Co-Mn ไฮดรอกไซด์สองชั้นเป็น 10:90 แสดงความจุสูงสุดที่ 912 Cg^{-1} ที่ 1 Ag^{-1} ในขณะที่ ใช้นาโนไฮบริดคาร์บอนผนังด้านเดียวสามารถทำด้วยน้ำหนักสารตั้งต้นอัตราส่วน 30:70 อัตราการคงตัวสูงสุด 65% จาก 1 Ag^{-1} (672 Cg^{-1}) ถึง 50 Ag^{-1} ($435 \text{ C}\cdot\text{g}^{-1}$) และความจุที่ดีที่สุด 70% หลังจาก 10,000 รอบ กลไกการถ่ายเทประจุของ Ni-Co-Mn ไฮดรอกไซด์สองชั้นในระหว่างการชาร์จ/การปลดปล่อยจะถูกตรวจสอบผ่านการดูดซับรังสีเอกซ์ในแหล่งกำเนิดใกล้เคียงแบบตรึง แสดงให้เห็นถึงการกักเก็บพลังงานที่ใช้งานได้จริง อุปกรณ์จัดเก็บพลังงานได้รับเสริมแต่งและทดสอบในรูปแบบเซลล์แบบพกพา มีการประเมินแสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่ดีสำหรับการใช้งานระบบจัดเก็บพลังงานแบบออนเนกประสงค์มากขึ้น [15]

การจัดเก็บพลังงานไฟฟ้ามีความต้องการที่เพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันต้องการย่อขนาดของระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งต้องใช้วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องที่มีความหนาแน่นของพลังงานสูง วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกไดอิเล็กทริกพอลิเมอร์เป็นฉนวนสูงและมีอัตราการสลายตัวสูง มีความแข็งแรง จากการปรับปรุงการเป็นฉนวนและความต้านทานการสลายตัว นำมาใช้ประโยชน์ในโครงสร้างนาโนคอมโพสิตโดยการผสมไปพร้อม ๆ กัน ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า การผสมวัสดุนาโนไดอิเล็กทริกกับวัสดุ PVDF/PMMA/ TiO_2 ให้ความต้านทานการสลายตัวที่ 387 kV/mm เมื่อเทียบกับ PVDF ที่บริสุทธิ์ทำให้ความหนาแน่นของพลังงานเพิ่มขึ้นประมาณ 5.8 J/cm^3 และประสิทธิภาพ 77% จากคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการแสดงลักษณะโครงสร้างบ่งชี้ว่าสามารถเพิ่มการใช้งานให้สูงกว่าระดับปานกลางโดยการเติมอนุภาคนาโนของ TiO_2 และการปรับปรุงความแข็งแรงในการสลายตัวจากการผสม PMMA ที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดี [16]

การจัดเก็บพลังงานไฮโดรเจนในอิเล็กโทรดของแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียมแบบพกพา ซึ่งความจุโดยน้ำหนักสารออกฤทธิ์ของอิเล็กโทรดนิกเกิลออกไซด์ มีค่าเท่ากับ $22 \text{ wt}\%$ และมีความจุเชิงปริมาตร $444.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ผลลัพธ์ที่สูงกว่าเดิมถึง 4 เท่า สำหรับโลหะไฮโดรด์ และวัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างระดับนาโน ตลอดจนข้อกำหนดสำหรับการกักเก็บพลังงานไฮโดรเจนของกระทรวงพลังงาน สหรัฐอเมริกา มีความหนาแน่นพลังงานรวมของไฮโดรเจนที่เก็บไว้ในสารออกฤทธิ์ของอิเล็กโทรดนิกเกิลออกไซด์ เท่ากับ $79.40 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ และ $160.24 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$ ส่วนพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับแก๊ซโซลีน คือ $46 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ และ $32.7 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$ ความจุจำเพาะของอิเล็กโทรดแคดเมียม ของสารออกฤทธิ์มีค่าเท่ากับ $16.9 \text{ wt}\%$ $404.4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ในขณะที่มีความหนาแน่นของการกักเก็บพลังงานไฮโดรเจนที่เก็บไว้ในอิเล็กโทรดแคดเมียมของสารออกฤทธิ์เท่ากับ $60.99 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ และ $145.80 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$ [17]

ศักยภาพของการประยุกต์ใช้ด้วย B₃S monolayer และไม่มี Li เนื่องจากวัสดุกักเก็บไฮโดรเจน (HSMs) ได้ศึกษาโดยใช้การคำนวณ DFT พบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุล H₂ และ B₃S monolayer บริสุทธิ์นั้นเล็กน้อยเกินไปที่จะตอบสนองความต้องการของ HSM ที่เหมาะสมที่สุด พลังงานที่จำเป็นขนาดใหญ่ (3.00–3.30 eV) ของอะตอม Li บน B₃S monolayer ส่งผลกระทบต่อการจัดกลุ่ม Li การดูดซับพลังงานต่อ H₂ สำหรับโมเลกุลของ H₂ บน B₃S monolayer ที่ประกอบด้วย Li อยู่ในระดับปานกลางระหว่าง 0.167 และ 0.208 eV และพบว่าลักษณะของการเกิดไฟฟ้าสถิตของปฏิกิริยาระหว่าง H₂ และ Monolayers ที่ประกอบด้วย Li ความจุของน้ำหนักและปริมาตร 7.7 wt.% และ 94.8 g/L ตามลำดับ อุณหภูมิของการดูดซับ บ่งชี้ว่า B₃S monolayers ที่ประกอบด้วย Li เนื่องจาก HSMs มีการย้อนกลับได้สูงเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 224 K และการจำลอง AIMD แสดงให้เห็นว่าโมเลกุลของ H₂ ไม่มีอุปสรรคทางจลนศาสตร์สำหรับการดูดซับ ดังนั้น Monolayers ที่ประกอบด้วย Li จึงเป็นวัสดุที่สามารถย้อนกลับได้และมีความจุสูงสำหรับการจัดเก็บพลังงานไฮโดรเจน ตรงตามเป้าหมายของ U.S. DOE [18]

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบวัสดุที่มีการค้นคว้าจากนักวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในระบบกักเก็บพลังงาน

ชนิดการกักเก็บพลังงาน (Type of power sources)	วัสดุ (Material)	ปริมาณการเก็บ พลังงาน (Capacity)	ปี (Year)	ประเทศ (Countries)	อ้างอิง (References)
Electric, capacitor	PVDF, PMMA, TiO ₂	387 kV/mm	2020	China	[16]
Hybrid energy	Electrode, Ni–Co–Mn layered double hydroxide, Carbon-based, Nanohybrid	678 C/g	2020	Taiwan	[15]
Hydrogen energy	Electrodes of the Ni–Cd	444.2 kg·m ⁻³	2021	Russia	[17]
Hydrogen energy	Li-decorated B ₃ S monolayers	94.8 g/L	2021	China	[18]
Lithium	3D-Li ₂ FeSiO ₄ /CNTs microsphere	169.1 mAh/g, 102,812.8 Wh/kg	2019	China	[14]
Micro-electrochemical	Ceramic, Boron carbide (B ₄ C) as the electrode, Sucrose, Graphene, ammonium persulfate, sulphuric acid (H ₂ SO ₄)	7.33 mF·cm ⁻²	2020	China	[13]
Solar thermal	n-Tetracosane, Melamine and formaldehyde, Sodium lauryl sulphate, Acetic acid (AA), Triethylamine (TEA)	134.74 J/g และ 133.32 J/g	2020	India	[8]
Supercapacitor	Activated carbon (Agar), Graphene, Electrode	226 F/g, 0.00452 kWh/g	2020	India	[9]
Supercapacitor	Copper(II) nitrate trihydrate, NaOH and KOH	69.1 mAh/g (771 F/g)	2020	India	[10]

ชนิดการกักเก็บพลังงาน (Type of power sources)	วัสดุ (Material)	ปริมาณการเก็บพลังงาน (Capacity)	ปี (Year)	ประเทศ (Countries)	อ้างอิง (References)
Supercapacitor, Batteries	Carbon, Electrode, Cathode, Ammonium metal phosphates	1,400 F/g, 0.028 kWh/g	2020	South Africa	[11]
Thermal	Sodium acetate, Dodecanoic acid	157.6 kJ/kg, 0.0332712968 kWh/g	2019	China	[2]
Thermal	Waste plastic, Polyvinylchloride	1,295 J/Kg·K	2020	India	[3]
Thermal	Microencapsulated phase change materials (MePCMs), Paraffin, Graphite Oxide (GtO), GNP, Octadecyl trimethyl ammonium bromide (OTAB), Ascorbic acid (VC)	0.67 W/mK to 0.90 W/mK	2020	China	[1]
Thermal	Micro-encapsulated phase change materials (MEPCMs)	25 kJ/kg	2020	India	[4]
Thermal	Titanium oxide	6.6 L/m ² /day	2020	India	[5]
Thermal energy	MXene-wrapped bio-based pomelo peel foam/ Polyethylene glycol	158 J/g	2020	China	[6]
Thermochemical	Limestone, Aluminum nitrate nonahydrate, Cerium nitrate hexahydrate, Acetic acid, Al ₂ O ₃ /CeO ₂ co-doped CaO-based	2500 kJ/kg, 0.5277807233 kWh/g	2020	China	[7]

สรุป

จากการที่ทั่วโลกตื่นตัวเรื่องสภาวะโลกร้อนจึงมีการลดการใช้พลังงานจากฟอสซิล และหันมาใช้พลังงานสะอาดให้มากขึ้น เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม ความร้อน อย่างไรก็ตาม พลังงานจากธรรมชาติมีเสถียรภาพต่ำมาก ให้พลังงานไม่ต่อเนื่อง ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ ดังนั้น ระบบกักเก็บพลังงาน เป็นทางออกที่ดีเพื่อใช้ในการจัดการพลังงานให้ใช้งานได้ทุกสภาพอากาศ ด้วยเหตุนี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกักเก็บพลังงาน การกักเก็บพลังงานด้วยวัสดุชนิดต่าง ๆ กำลังเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและมีความสนใจเป็นอย่างมาก โดยการกักเก็บพลังงานแต่ละชนิดสามารถใช้วัสดุและวิธีการที่แตกต่างกันเพื่อให้เกิดความเหมาะสม ทั้งทางด้านเทคนิควิธีการ ระยะเวลา ค่าใช้จ่าย และชนิดของพลังงาน เพื่อจะทำให้การกักเก็บพลังงานได้อย่างเหมาะสม และมีประสิทธิภาพ โดยที่การกักเก็บพลังงานจะต้องส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด และเกิดความคุ้มค่ามากที่สุด ที่น่าสังเกตคือนอกจากสารเคมีผสมชนิดใหม่ การเปลี่ยนสภาพวัสดุเป็นอนุภาคนาโนก็สามารถให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการกักเก็บพลังงานจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไปตามแหล่งพลังงานและความเหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Zhou, C. Li, H. Wu and S. Guo, "Construction of hybrid graphene oxide/graphene nanoplates shell in paraffin microencapsulated phase change materials to improve thermal conductivity for thermal energy storage", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 597, 124780 (2020).
- [2] D. G. Atinafu, C. Wang, W. Dong, X. Chen, M. Du, H. Gao and G. Wang, "In-situ derived graphene from solid sodium acetate for enhanced photothermal conversion, thermal conductivity, and energy storage capacity of phase change materials", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 205, 110269 (2020).
- [3] P. Negi, Y. Singh and R. Dobriyal, "Process investigations on the use of waste plastic as thermal energy storage material", *Materials Today: Proceedings*, 28, 1372-1375 (2020).
- [4] T.-H. Wang, T.-F. Yang, C.-H. Kao, W.-M. Yan and M. Ghalambaz, "Paraffin core-polymer shell micro-encapsulated phase change materials and expanded graphite particles as an enhanced energy storage medium in heat exchangers", *Advanced Powder Technology*, 31, 2421-2429 (2020).
- [5] D. D. W. Rufuss, S. Arulvel, S. Iniyan and L. Suganthi, "Numerical study of titanium oxide nanoparticle enhanced energy storage material in solar desalination", *Materials Today: Proceedings*, 43, 805-808 (2021).
- [6] X. Sheng, D. Dong, X. Lu, L. Zhang and Y. Chen, "MXene-wrapped bio-based pomelo peel foam/polyethylene glycol composite phase change material with enhanced light-to-thermal conversion efficiency, thermal energy storage capability and thermal conductivity", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 138, 106067 (2020).
- [7] H. Sun, Y. Li, X. Yan, J. Zhao and Z. Wang, "Thermochemical energy storage performance of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2$ co-doped CaO-based material under high carbonation pressure", *Applied Energy*, 263, 114650 (2020).
- [8] A. T. Naikwadi, A. B. Samui and P. A. Mahanwar, "Melamine-formaldehyde microencapsulated n-Tetracosane phase change material for solar thermal energy storage in coating", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 215, 110676 (2020).
- [9] B. K. Saikia, S. M. Benoy, M. Bora, J. Tamuly, M. Pandey and D. Bhattacharya, "A brief review on supercapacitor energy storage devices and utilization of natural carbon resources as their electrode materials", *Fuel*, 282, 118796 (2020).
- [10] S. Verma, M. Goyal, S. Kumar, S. Vadivel and B. Paul, "Enhanced electrochemical performance of copper oxide nanobeads a potential electrode material for energy storage devices", *Chemical Physics Letters*, 749, 137472 (2020).
- [11] K. Raju, "Ammonium metal phosphates: Emerging materials for energy storage", *Current Opinion in Electrochemistry*, 21, 351-357 (2020).
- [12] S. Palsaniya, H. B. Nemade and A. K. Dasmahapatra, "Hierarchical Nylon-6/reduced graphene oxide/polyaniline nanocomposites with enhanced dielectric properties for energy storage applications", *Journal of Energy Storage*, 32, 101821 (2020).
- [13] Y. Chang, X. Sun, M. Ma, C. Mu, P. Li, L. Li, M. Li, A. Nie, J. Xiang, Z. Zhao, J. He, F. Wen, Z. Liu and Y. Tian, "Application of hard ceramic materials B_4C in energy storage: Design $\text{B}_4\text{C}@\text{C}$ core-shell nanoparticles as electrodes for flexible all-solid-state micro-supercapacitors with ultrahigh cyclability", *Nano Energy*, 75, 104947 (2020).
- [14] H. Yan, X. Xue, Y. Fu, X. Wu and J. Dong, "Three-dimensional carbon nanotubes-encapsulated $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ microspheres as advanced positive materials for lithium energy storage", *Ceramics International*, 46, 9729-9733 (2020).

- [15] K.-J. Tsai, C.-S. Ni, H.-Y. Chen and J.-H. Huang, "Single-walled carbon nanotubes/Ni-Co-Mn layered double hydroxide nanohybrids as electrode materials for high-performance hybrid energy storage devices", *Journal of Power Sources*, 454, 227912 (2020).
- [16] Y. Liu, J. Gao, R. Yao, Y. Zhang, T. Zhao, C. Tang and L. Zhong, "Enhanced energy storage performance in a PVDF/PMMA/TiO₂ blending nanodielectric material", *Materials Chemistry and Physics*, 250, 123155 (2020).
- [17] N. E. Galushkin, N. N. Yazvinskaya and D. N. Galushkin, "Nickel-cadmium batteries with pocket electrodes as hydrogen energy storage units of high-capacity", *Journal of Energy Storage*, 39, 102597 (2021).
- [18] Y. Yong, S. Hu, Z. Zhao, R. Gao, H. Cui and Z. Lv, "Potential reversible and high-capacity hydrogen storage medium: Li-decorated B₃S monolayers", *Materials Today Communications*, 29, 102938 (2021).