เทคโนโลยีแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์จะเป็นทางเลือกใหม่หรือไม่

รังสิมา หญีตสอน[1*]

วันที่รับ 15 กรกฎาคม 2562 วันที่แก้ไข 7 สิงหาคม 2562 วันตอบรับ 8 สิงหาคม 2562

บทคัดย่อ

เศรษฐกิจยุคใหม่กำลังถูกขับเคลื่อนด้วยเทคโนโลยีและนวัตกรรม อุตสาหกรรมที่ขับเคลื่อนด้วยเศรษฐกิจยุคใหม่สามารถแบ่งออกเป็น อุตสาหกรรมเป้าหมายระยะสั้น-ระยะกลาง และเป้าหมายระยะยาว ทั้งนี้อุตสาหกรรมด้านเทคโนโลยีพลังงานทางเลือก (Alternative energy technology) เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมเป้าหมายระยะยาว องค์ประกอบสำคัญประการหนึ่งสำหรับการขับเคลื่อนอุตสาหกรรมด้านเทคโนโลยีพลังงานทางเลือกคือ ทรัพยากรบุคลากรที่มีความรู้ความเข้าใจในเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง บทความนี้จึงนำเสนอข้อมูลทางวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ (Redox flow battery) ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีพลังงานทางเลือก เพื่อให้เป็นความรู้พื้นฐานประกอบการพิจารณาการนำเทคโนโลยีแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์มาใช้สำหรับอุตสาหกรรมในประเทศไทย ทั้งนี้ พลังงานทางเลือกหลักของประเทศไทย ได้แก่ พลังงานจากแสงอาทิตย์และพลังงานจากลม แต่พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานทางเลือกเหล่านี้ยังขาดความเสถียร ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีระบบการกักเก็บพลังงาน (Energy storage system) มาใช้ร่วมกับพลังงานทางเลือกดังกล่าว เพื่อกักเก็บพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินที่ผลิตได้ และจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใช้ในช่วงที่ไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ ระบบการกักเก็บพลังงานยังช่วยให้พลังงานที่ได้มีความเสถียรและมีประสิทธิภาพต่อการนำไปใช้งาน สมบัติที่สำคัญของแบตเตอรี่ที่นิยมนำไปใช้งาน ได้แก่ ความหนาแน่นของพลังงานที่สูง รอบการอัดและคายประจุมากกว่า 1,000 รอบ มีขนาดเล็กและบาง นอกจากนี้ ผู้ใช้ยังให้ความสำคัญกับอายุการใช้งาน การคายประจุด้วยตัวเอง การบำรุงรักษาและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน บทความนี้จะนำเสนอหลักการการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปไฟฟ้าเคมีด้วยแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ 4 ประเภท ได้แก่ วาเนเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ (Vanadium redox flow battery) ไฮโดรเจน-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ (Hydrogen bromine flow battery) ไฮโดรเจน-ไอโอดีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ (Hydrogen iodine flow battery) และพอลิซัลไฟด์-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ (Polysulfide bromine flow battery) รวมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำไปใช้งานกับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด (Lead acid battery) และแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium ion battery) ตลอดจนการประยุกต์ใช้งานและทิศทางในอนาคตของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์

คำสำคัญ : แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ วาเนเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ ไฮโดรเจน-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ ไฮโดรเจน-ไอโอดีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ ไฮโดรเจน-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ การกักเก็บพลังงาน

---

[1] ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้แต่ง, อีเมล์: rungsima.y@sci.kmutnb.ac.th

Will redox flow battery technology be a new choice?

Rungsima Yeetsorn[1*]

Abstract

The new economy referring to the on-going development evolves from new technologies and innovations. The industries driven by the new economy can be categorized into short-to-long term and long-term targets. An alternative energy industry emphasized on this article is one of the long-term target industries. The key element for driving the alternative energy industry is industrial personnel with knowledge and understanding of related technologies. Therefore, this article is intended to present scientific information about redox flow batteries, one of the alternative energy technologies, in order to provide a basic knowledge for considering the use of the redox flow batteries in Thailand industry such as for power generation, thermal use, and transport development. Nowadays, wind and solar energy mainly account for Thailand energy production, however; wind and solar sources rely on uncontrolled recourses. Power generations from wind turbines and solar cells are intermittent and inconstant, thus they cannot be used to provide steady energy. The integrated energy is a synergism concept involving separate units act simultaneously and in coordination. An energy storage device can be adopted and identified as the ultimate solution to increase the stability of the energy production system. New batteries should acquire high energy densities, deliver 1000 charge/discharge cycles and be paper-thin. In addition, users also pay attention to longevity, load characteristics, maintenance requirements, self-discharge and operational costs. This article presents the principle of electrical energy storage in form of electrochemistry as a redox flow battery. Four redox flow batteries addressed on this paper are a vanadium redox flow battery, a hydrogen bromine flow battery, a hydrogen iodine flow battery, and a polysulfide bromine flow battery. The performance comparisons between redox flow battery and lead-acid battery, and between redox flow battery and lithium ion battery are stated as well as applications and future directions of the redox flow battery.

Keywords : Energy storage, Flow battery, Vanadium redox flow battery, Hydrogen-Bromine flow battery, Hydrogen- iodine flow battery, Polysulfide-Bromine flow battery

---

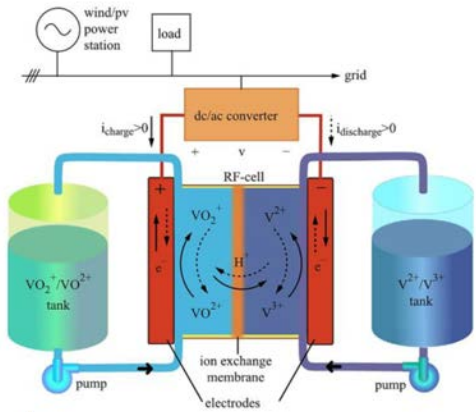
[1] Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: rungsima.y@sci.kmutnb.ac.th

1. เพราะเหตุใดแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์จึงได้รับความสนใจจากนักวิจัยและอุตสาหกรรมในประเทศไทย

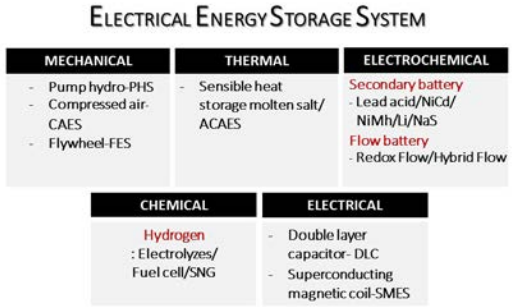
ปัจจุบันอุตสาหกรรมทั่วโลกมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วส่งผลให้ความต้องการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้น แหล่งวัตถุดิบหลักที่ใช้ผลิตพลังงาน ได้แก่ เชื้อเพลิงจากฟอสซิล จากการสำรวจการใช้พลังงานของทั่วโลกตั้งแต่ปี ค.ศ. 2013 ถึงปี ค.ศ.2016 [1] พบว่าปริมาณการใช้ฟอสซิลลดลงจาก 78.3 เป็น 75.5% เนื่องจากเริ่มมีการผลิตพลังงานจากพลังงานทางเลือกที่เพิ่มขึ้นจาก 19.1 เป็น 24.5% พลังงานทางเลือกหลักที่ใช้กันทั่วโลก [2] คือ พลังงานจากลม (4%) พลังงานจากชีวมวล (2%) และพลังงานแสงอาทิตย์ (1.5%) รัฐบาลไทยตระหนักในประเด็นนี้ จึงกำหนดให้มีการใช้พลังงานทางเลือกและพลังงานทดแทนเพิ่มขึ้น ดังจะเห็นได้ว่ากระทรวงพลังงานได้ขับเคลื่อนนโยบายพลังงาน 4.0 ที่เร่งพัฒนาระบบการกักเก็บพลังงาน (Energy storage) โดยเน้นเรื่องเทคโนโลยีและนวัตกรรมเพื่อลดความเสี่ยงและสร้างเสถียรภาพให้กับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทางเลือกและพลังงานทดแทน [3] นอกจากนี้ยังเป็นการสร้างความมั่นคงด้านพลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานภายในประเทศอีกด้วย อีกทั้งกลไกการขับเคลื่อนเศรษฐกิจเพื่ออนาคตได้ถูกผลักดันด้วย 10 อุตสาหกรรมเป้าหมาย ประกอบด้วย 5 อุตสาหกรรมเดิม (First S-curve) และ 5 อุตสาหกรรมอนาคต (New S-curve) [4] ทั้งนี้เทคโนโลยีพลังงานทดแทน หรือพลังงานทางเลือกสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมยานยนต์สมัยใหม่ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ และหุ่นยนต์เพื่ออุตสาหกรรม เป็นต้น

เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญเพื่อรองรับการกักเก็บพลังงาน โดยเฉพาะพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานทางเลือก ได้แก่ พลังงานจากแสงอาทิตย์ ลม และน้ำ แต่พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานทางเลือกเหล่านี้ยังขาดความเสถียร เนื่องจากความสามารถในการผลิตพลังงานเหล่านี้ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศและสถานที่ในการติดตั้ง เพื่อให้พลังงานทางเลือกเหล่านี้มีความเสถียรต่อการใช้งานในอนาคต ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบการกักเก็บพลังงาน (Energy storage system) มาใช้ร่วมกับการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทางเลือก (ลมและเซลล์แสงอาทิตย์) เพื่อกักเก็บพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินที่ผลิตได้ และจ่ายพลังงานไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้ในช่วงที่ไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างระบบบูรณาการพลังงานทางเลือก [2]

นอกจากนี้ ระบบการกักเก็บพลังงานยังช่วยให้พลังงานที่ได้มีความเสถียรและมีประสิทธิภาพต่อการนำไปใช้งาน

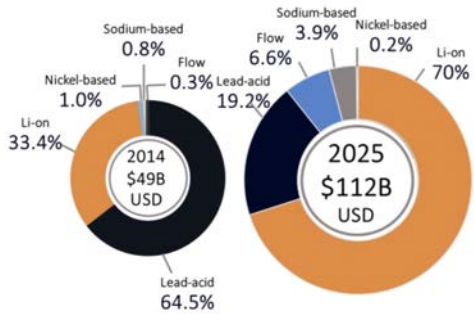


รูปที่ 2 การจำแนกชนิดการกักเก็บพลังงานรูปแบบต่างๆ

รูปแบบการกักเก็บพลังงานสามารถจำแนกออกได้เป็น 5 ประเภท [5] (แสดงรายละเอียดในรูปที่ 2) ได้แก่ การกักเก็บในรูปของพลังงานเชิงกล เช่น การกักเก็บในรูปแบบของปั๊มน้ำแบบสูบกลับ (Pumped hydro) การกักเก็บ

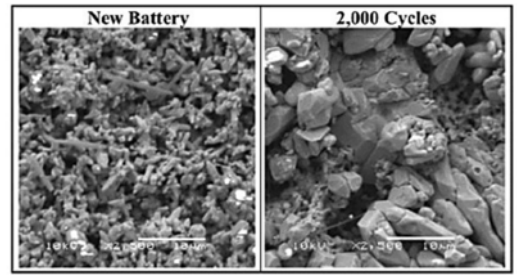
ในรูปของพลังงานความร้อน เช่น การกักเก็บความร้อนจากเกลือหลอมเหลว (Sensible heat storage molten salt) การกักเก็บในรูปของพลังงานเคมีไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่และแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ การกักเก็บในรูปของพลังงานเคมี เช่น การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี ผ่านอุปกรณ์ที่ใช้กระบวนการแยกสลายด้วยไฟฟ้า หรือที่เรียก ว่าอิเล็กโทรไลเซอร์ (Electrolyzer) และการกักเก็บในรูปของพลังงานไฟฟ้า เช่น ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด (Supercapacitor หรือ double layer capacitor)

แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมสูงสุด (รูปที่ 3 [6]) ข้อมูลทางสถิติแสดงให้เห็นว่าในปี 2014 มีความต้องการในการนำแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดไปใช้งานประมาณ 64.5% แต่มีการคาดการณ์ว่าความต้องการแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดลดลงเหลือ 19.2% เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้มีข้อจำกัดเรื่องอายุการใช้งาน



รูปที่ 3 ส่วนแบ่งทางการตลาดของแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ ในปีค.ศ. 2014 และการคาดการณ์ในปี ค.ศ. 2025 [6]

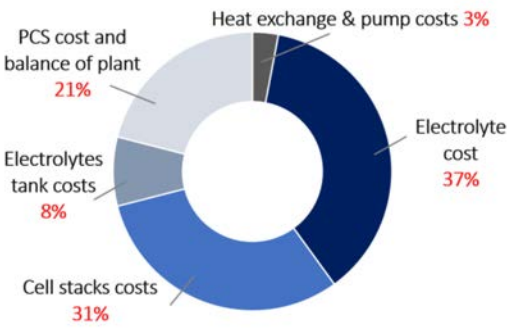
เมื่อมีการคายประจุ (Discharge) และอัดประจุ (Charge) ซ้ำหลายรอบจะเกิดการเสื่อมสภาพของขั้วแคโทดและแอโนด รวมทั้งการเสื่อมสภาพจากการระเหยของกรดซัลฟิวริก ซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์อีกด้วย การเสื่อมสภาพของขั้วแคโทด ซึ่งเป็นแผ่นตะกั่ว และขั้วแอโนด ซึ่งเป็นตะกั่วออกไซด์ จะเกิดปฏิกิริยาซัลเฟชัน (Sulfation) [7] และเกิดเป็นผลึกเลดซัลเฟต (PbSO4 : Lead (II) sulfate) ซึ่งผลึกดังกล่าวไม่สามารถนำไฟฟ้าได้และแผ่นตะกั่วยังสูญเสียพื้นที่ผิวสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์อีกด้วย เมื่อ PbSO4 เปลี่ยนรูปไปเป็นโลหะตะกั่ว (Pb) (ดังแสดงในรูปที่ 4) เนื่องจากมีรอบการอัดประจุเป็นจำนวนมาก จะส่งผลต่อความเป็นรูพรุนและพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยา (Active area) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานและรอบการทำงานของแบตเตอรี่ลดลง



รูปที่ 4 การเสื่อมสภาพของขั้วแบตเตอรี่เมื่อมีการอัดประจุ 2,000 รอบ [7]

แบตเตอรี่ที่ได้รับความสนใจแทนการใช้แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คือ แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน มีการคาดการณ์ว่าในปี ค.ศ. 2025 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนจะมีส่วนแบ่งตลาดประมาณ 70% (รูปที่3) เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้มีความหนาแน่นของพลังงานสูง (100-200 Wh/kg) ประสิทธิภาพการทำงานสูงถึง 95% และมีจำนวนรอบการใช้งานประมาณ 4,000-8,000 รอบ [8] ขั้วอิเล็กโทรดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประกอบไปด้วย Li-Metal oxide (ขั้วแคโทด) และคาร์บอน (ขั้วแอโนด) ซึ่งจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเมื่อมีการอัดและคายประจุ หากต้องการนำแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนไปใช้งานที่ต้องการการกักเก็บพลังงานในปริมาณมากจะต้องเสียค่าวัสดุสูงมาก สำหรับการขยายขนาดของแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดด้านความทนทานต่อความร้อน [9] จึงทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของเซลล์และการเกิดความร้อนต่อเนื่อง (Thermal runaway) เนื่องจากแบตเตอรี่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงและการเสื่อมสภาพของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ราคาที่สูงของลิเทียมยังคงเป็น

อุปสรรคของอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณลิเทียมที่มีในตลาดโลก (ประมาณ 35,000 ตันต่อปี) ไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ในการผลิตแบตเตอรี่สำหรับใช้งานในอุตสาหกรรม [10] จากข้อมูลดังกล่าวทำให้แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์เป็นทางเลือกของอุตสาหกรรม ดังจะเห็นจากส่วนแบ่งตลาดที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 0.4% เป็น 6.6% (รูปที่ 3) ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้ถือว่าเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจที่สุดในแง่ของกำลังการผลิตที่ไม่จำกัด (Unlimited capacity) มีความยืดหยุ่นในการออกแบบเพื่อความปลอดภัย (Flexible security design) มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (Fast response) [11] ในมุมของการเพิ่มกำลังการผลิตของเซลล์แบตเตอรี่ชนิดนี้ สามารถทำได้โดยขยายขนาดของภาชนะที่ใช้บรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ส่งผลให้ความสามารถในการผลิตและกักเก็บกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์มีค่าประสิทธิภาพต่อรอบการใช้งานสูงถึง 85% มีจำนวนรอบการใช้งานมากกว่า 13,000 รอบ ซึ่งมากกว่าแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด และแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่มีรอบการใช้งานเท่ากับ 3,000 และ 8,000 รอบ อีกทั้งเวลาในการคายประจุของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์มีค่ามากกว่าของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด และแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน 10 เท่า



รูปที่ 5 ค่าลงทุนการติดตั้งของวาเนเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ [13]

หากพิจารณาค่าการลงทุนในการติดตั้งอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (Capital cost) [12] พบว่าค่าการลงทุนในการติดตั้งของการกักเก็บพลังงานโดยใช้แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ในหน่วยของค่าใช้จ่ายเชิงพลังงาน (Energy cost) ประมาณ 150-1,000 $/kWh ซึ่งน้อยกว่าค่าการลงทุนในการติดตั้งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน โดยมีค่าเท่ากับ 500-2,500 $/kWh สำหรับการพิจารณาค่าใช้จ่ายเชิงกำลังไฟฟ้า (Power cost) ของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์จะเห็นได้ว่ามีค่าเท่ากับ 600-1,500 $/kW ซึ่งยังมากกว่าค่าใช้จ่ายสำหรับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (175-400 $/kW) ค่าการลงทุนในการติดตั้งของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ส่วนใหญ่มาจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์คิดเป็น 37% และชุดเซลล์อนุกรม (Stack cell) คิดเป็น 31% ของค่าการลงทุนในการติดตั้งทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 5 กรณีการเปรียบเทียบการลงทุนในการติดตั้งของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ พบว่า ค่าการลงทุนดังกล่าวสูงกว่าการลงทุนของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดอยู่มาก คือระหว่าง 150-1,000 $/kWh และ 200-400 $/kWh ในกรณีของ Energy cost เมื่อเปรียบเทียบด้วย Power cost จะแนวโน้มเดียวกันกับ Energy cost คือมีค่าเท่ากับ 600-1,500 $/kW และ 300-600 $/kW แต่เมื่อเปรียบเทียบจำนวนรอบการใช้งานระหว่างแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดและแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ พบว่า แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์มีจำนวนรอบการใช้งานมากกว่า 13,000 รอบ ส่วนแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดมีจำนวนรอบการใช้งานประมาณ 3,000 รอบ ทำให้ค่าการลงทุนในการติดตั้งที่คิดจากจำนวนรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์มีค่าต่ำกว่าแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ซึ่งค่าการลงทุนเมื่อพิจารณาจำนวนรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์เท่ากับ 5-80 และของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดเท่ากับ 20-100 $/kWh per cycle หากพิจารณาเรื่องความสามารถของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ พบว่า มีค่าที่บอกถึงความสามารถของแบตเตอรี่ในการนำเอาความจุที่มีอยู่ออกมาใช้งาน (Depth of discharge: DOD) มากกว่า 95% [13] แสดงให้เห็นว่ามีความสามารถใช้งานได้ในช่วงความลึกของการคายประจุที่สูง (High depth of discharge) ส่งผลให้จำนวนรอบการใช้งานมากขึ้น ต่างจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมที่มีอายุ

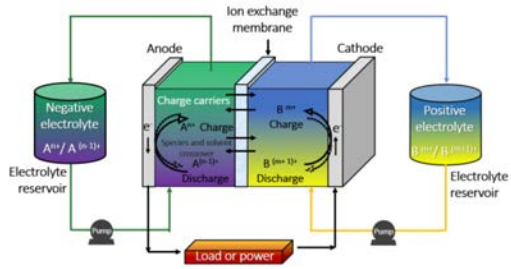
การใช้งานลดลง เมื่อดึงกระแสออกมาใช้งานในขณะที่ DOD ต่ำกว่า 50% [14]

ทั้งนี้สามารถสรุปจุดเด่นของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ได้ดังต่อไปนี้ มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า 20 ปี โดยสามารถคายและอัดประจุได้มากกว่า 10,000 รอบ สามารถใช้พลังงานไฟฟ้าที่จัดเก็บไว้ได้มากกว่า 95% โดยไม่เกิดการเสื่อมสภาพ จัดเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในถังบรรจุอิเล็กโทรไลต์แทนการบรรจุไว้ในเซลล์อย่างแบตเตอรี่ชนิดอื่น อัตราการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าระหว่างจัดเก็บ (Self-discharge) ต่ำ มีโอกาสในการเกิดระเบิดเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนน้อย เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดในแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์มีน้อยกว่าระดับวิกฤต มีการบริหารจัดการความร้อนที่เกิดขึ้นในเซลล์ได้ดี

2. หลักการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์

แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์มีหลักการทำงานที่คล้ายกับเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) เซลล์เชื้อเพลิงจัดเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบกัลวานิกเซลล์ (Galvanic cell) คือ เปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า แต่แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั้งชนิดกัลวานิกและอิเล็กโทรไลติกเซลล์ (Electrolytic cell) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถผันกลับได้ (Reversible reaction) กล่าวคือ หากต้องการกักเก็บพลังงานไฟฟ้า แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเคมี (Charging) ผ่านกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) หากต้องการการคายประจุ หรือการนำไปใช้งาน แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ทำหน้าที่เป็นเซลล์กัลวานิก สามารถเรียกแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ว่า แบตเตอรี่ชนิดทุติยภูมิ (Secondary battery) คือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในระบบสามารถผันกลับได้ ทำให้สามารถอัดและคายประจุได้ แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์มีองค์ประกอบหลักเหมือนกับเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ เยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Polymer electrolyte membrane) แผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว (Bipolar plates) และขั้วไฟฟ้า (Negative electrode และ Positive electrode) โดยมีบทบาทและหน้าที่เหมือนกับองค์ประกอบในเซลล์เชื้อเพลิง

การทำงานของระบบแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ [15,16] ประกอบไปด้วยภาชนะบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้งสองฝั่งที่ติดตั้งอยู่ภายนอกเซลล์ เมื่อระบบทำงานสารละลาย อิเล็กโทรไลต์จะถูกป้อนเข้าสู่เซลล์โดยผ่านปั๊ม เข้าสู่องค์ประกอบที่เรียกว่าอิเล็กโทรด ซึ่งทำหน้าที่เป็นพื้นที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Active area) เยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน ซึ่งเป็นฉนวน ทำหน้าที่กั้นกลางระหว่างฝั่งแอโนดและแคโทด เพื่อป้องกันการลัดวงจร เยื่อเลือกผ่านดังกล่าวเป็นเยื่อเลือกผ่านประจุที่เรียกว่า แนฟฟิออน (Nafion) หรือพอลิเมอร์ ที่มีชื่อทางเคมีว่า Sulfonated tetrafluoroethylene based fluoro-copolymer



รูปที่ 6 แผนภาพรีดอกซ์แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ (ปรับปรุงจาก [15])

ภายในระบบแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ ประกอบด้วย การอัดประจุและการคายประจุ (ดังรูปที่ 6) ซึ่งเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ ส่วนของกระบวนการคายประจุ สารละลายแอโนไลต์ (Anolyte) จะถูกป้อนไปยังฝั่งแอโนดโดยผ่านปั๊ม จากนั้นสารละลายแอโนไลต์จะเคลื่อนที่ไปตามช่องทางการไหลบนแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว (Bipolar plates) อิเล็กโทรไลต์จะแพร่ไปยังอิเล็กโทรดส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และได้ผลิตภัณฑ์คือ อิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในระบบจะเคลื่อนที่ออกจากอิเล็กโทรดกลับไปยังแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วออกสู่วงจรไฟฟ้าภายนอกจากฝั่งแอโนดไปยังฝั่งแคโทด ประจุที่ทำหน้าที่เป็นตัวพา (Charge-carrying species) สามารถเคลื่อนที่จากแอโนดไปแคโทดได้โดยตรงผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน สารละลายแคโทรไลต์ (Catholyte) ถูกป้อนเข้าสู่ระบบด้านแคโทดโดยปั๊ม สารละลายแคโทไลต์

จะผ่านไปยังช่องทางการไหลของแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว และแพร่ไปยังอิเล็กโทรดที่มีรูพรุนทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) จากการทำปฏิกิริยากันระหว่างสาระละลายแคโทรไลต์โปรตอน และอิเล็กตรอน การอัดประจุประกอบไปด้วยเกิดปฏิกิริยารีดักชันในสาระละลายแอโนไลต์ และปฏิกิริยาออกซิเดชันในแคโทรไลต์

แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์สามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ตามชนิดของสถานะของพื้นที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (Electroactive species) [17] ซึ่งประกอบไปด้วย (1) พื้นที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามีสถานะเป็นของเหลวทั้งสองด้านของเซลล์ ทั้งนี้ พลังงานเคมีจะถูกเก็บสะสมไว้ในสาระละลายอิเล็กโทรไลต์ (2) พื้นที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามีสถานะเป็นของแข็งทั้งสองด้านของเซลล์ พลังงานเคมีจะถูกเก็บสะสมบนแผ่นอิเล็กโทรดที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (3) แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ชนิดผสม (Hybrid redox flow battery) ที่พื้นที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของทั้งสองด้านของเซลล์มีสถานะแตกต่างกัน

ตารางที่ 1 ปฏิกิริยารีดอกซ์และศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์แต่ละชนิด [18]

Cathode redox reactions	Anode redox reactions	OCV (V)
$VO_2^+ + 2H^+ + e^- \rightleftharpoons VO^{2+} + H_2O$	$V^{2+} \rightleftharpoons V^{3+} + e^-$	1.260
$Br_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2Br^-$	$H_2 \rightleftharpoons 2H^+ + 2e^-$	1.090
$I_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2I^-$	$H_2 \rightleftharpoons 2H^+ + 2e^-$	0.540
$2NaBr \rightleftharpoons 2e^- + Br_2 + 2Na$	$2Na^+ + (x-1)Na_2S_x + 2e^- \rightleftharpoons xNa_2S_{x-1}$	1.515

ตัวอย่างการเปรียบเทียบปฏิกิริยารีดอกซ์และแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (Open circuit voltage: OCV) ของวาเนเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ ไฮโดรเจน-โบรมีนโฟลว์แบตเตอรี่ ไฮโดรเจน-ไอโอดีนโฟลว์แบตเตอรี่ และพอลิซัลไฟด์-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ แสดงในตารางที่ 1

วาเนเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ถือเป็นแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ที่ผู้คนทั่วโลกให้ความสนใจมากที่สุด เนื่องจากเป็นนวัตกรรมเครื่องกักเก็บและจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อใช้เป็นแหล่งกักเก็บและจ่ายพลังงานไฟฟ้าทั้งชนิดติดตั้งในโรงงานและแบบเคลื่อนที่ให้กับภาคอุตสาหกรรมและภาคขนส่ง แบตเตอรี่ชนิดนี้ใช้สารละลายวาเนเดียมเป็นอิเล็กโทรไลต์ทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทด สารละลายวาเนเดียมที่นำมาใช้ในวาเนเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟล์ประกอบไปด้วยวาเนเดียมที่มี ออกซิเดชั่นสเตท 4 ชนิด ได้แก่ V^{2+} [V(II)], V^{3+} [V(III)], VO^{2+} [V(IV)] และ VO^{2+} [V(V)] ปฏิกิริยาการอัดประจุ (Charge) คายประจุ (Discharge) และปฏิกิริยารวม แสดงดังสมการที่ 1-3 [19] (หมายเหตุ: ปฏิกิริยาไปข้างหน้าเป็นกระบวนการคายประจุ และปฏิกิริยาย้อนกลับเป็นปฏิกิริยาการอัดประจุ)

Negative (-): oxidation

$$V^{2+} \rightleftharpoons V^{3+} + e^- \qquad E^\circ = -0.26\ V \quad (1)$$

Positive (+): reduction

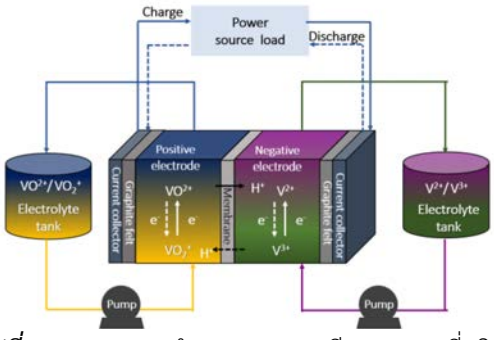
$$VO_2^+ + 2H^+ + e^- \rightleftharpoons VO^{2+} + H_2O \quad E^\circ = 1.00\ V \quad (2)$$

Overall:

$$V^{2+} + VO_2^+ + 2H^+ \rightleftharpoons V^{3+} + VO^{2+} + H_2O$$
$$E^\circ = 1.26\ V \quad (3)$$

ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์วาเนเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์เมื่อเปิดวงจร หรือที่เรียกว่า Open-circuit voltage (OCV) มีค่าเท่ากับ 1.26 V ทั้งนี้ สารละลาย อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือ วาเนดิลซัลเฟต (Vanadyl (IV) sulfate: $VOSO_4$) ซึ่งมีความเข้มข้นเท่ากับ 2.0 M และสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้มีความเข้มข้นเท่ากับ 2.5 M หากพิจารณาค่า OCV ที่ระดับการเก็บประจุของแบตเตอรี่ (State of charge: SOC) เท่ากับ 50% เท่ากับ 1.35 V ส่วนที่ SOC เท่ากับ 100% ค่า OCV จะเท่ากับ 1.6 V สาเหตุที่วาเนเดียมแบตเตอรี่ชนิด

รีดอกซ์โฟลว์ยังไม่ประสบความสำเร็จในการผลิตและจำหน่ายเชิงพาณิชย์เท่าที่ควรเนื่องมาจากความหนาแน่นของพลังงาน (Energy density) ยังมีค่าต่ำ (10-50 Wh/kg) เมื่อเทียบกับการกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (100-200 Wh/kg) หรือเซลล์เชื้อเพลิง (800-1,300 Wh/kg) ความหนาแน่นของพลังงานขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายวาเนเดียมที่ใช้ ข้อจำกัดของการกำหนดความเข้มข้นของสารละลายคือ การเสื่อมสภาพขององค์ประกอบภายใน หากวาเนเดียมเข้มข้นเกิน 2.0 M จะทำให้เกิดการตกตะกอนเป็นวาเนเดียม (V) ออกไซด์ (V2O5) และวาเนเดียมสเตท V5+ ที่เกิดขึ้นเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงเกินไป ส่งผลให้เยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนและอิเล็กโทรดเกิดการเสื่อมสภาพ อีกปัจจัยที่เป็นอุปสรรคของการนำวาเนเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์มาใช้ในเชิงพาณิชย์คือ ราคาในการติดตั้งที่สูงถึง 500 kW/h ซึ่งค่าใช้จ่ายที่สูงนี้ส่วนใหญ่มาจากราคาของสารละลายวาเนเดียมและส่วนประกอบสำคัญในเซลล์ เช่น เมมเบรนและอิเล็กโทรด



รูปที่ 7 แผนภาพการทำงานของวานาเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ [20]

ไฮโดรเจน-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ (รูปที่ 8) จัดเป็นโฟลว์แบตเตอรี่อีกชนิดที่น่าสนใจอีกเช่นกัน เนื่องจากไฮโดรเจน-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์มีหลักการทำงานคล้ายกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton-exchange membrane fuel cells: PEMFC) แต่แตกต่างกัน 2 ประการหลัก คือ เซลล์เชื้อเพลิงจะทำหน้าที่เป็นเพียงแหล่งกำเนิดพลังงาน (Energy generator) แต่ไฮโดรเจน-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์จะทำหน้าที่เป็นทั้งแหล่งกำเนิดพลังงานและแหล่งกักเก็บพลังงาน อีกประการหนึ่งคือ PEMFC มีสารตั้งต้นเป็นวัฏภาคของแก๊สเท่านั้น ส่วนไฮโดรเจน-โบรมีนแบตเตอรี่รีดอกซ์โฟลว์มีทั้งวัฏภาคของแก๊สและของเหลว จุดเด่นของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ชนิดนี้คือ ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีราคาต่ำกว่าชนิดวาเนเดียมรีดอกซ์โฟลว์ อีกประการหนึ่งคือ พลังงานจลน์ในการเกิดปฏิกิริยาของไฮโดรเจนและโบรมีนในแบตเตอรี่ชนิดนี้ส่งผลให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำและสามารถเกิดได้อย่างรวดเร็วกว่าวาเนเดียมแบตเตอรี่รีดอกซ์โฟลว์ [21] ในมุมมองของประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรเจน-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ แบตเตอรี่ชนิดนี้มีความหนาแน่นของพลังงานสูงเท่ากับ 1.4 W-cm^2 และมีความสามารถในการทำงานได้ยาวนานมากกว่า 10,000 h เมื่อเซลล์ที่ใช้มีพื้นที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 10-25 cm^2 แบตเตอรี่ชนิดนี้มีกลไกในการทำปฏิกิริยาในการอัดประจุและคายประจุแสดงดังสมการที่ 4-6 [22]

Negative (-): oxidation

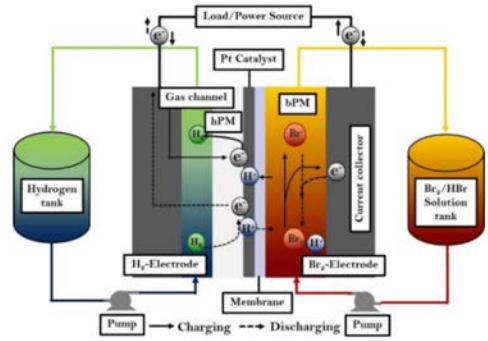
$$H_2 \rightleftharpoons 2H^+ + 2e^- \qquad E^\circ = 0.000\ V \qquad (4)$$

Positive (+): reduction

$$Br_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2Br^- \qquad E^\circ = 1.098\ V \qquad (5)$$

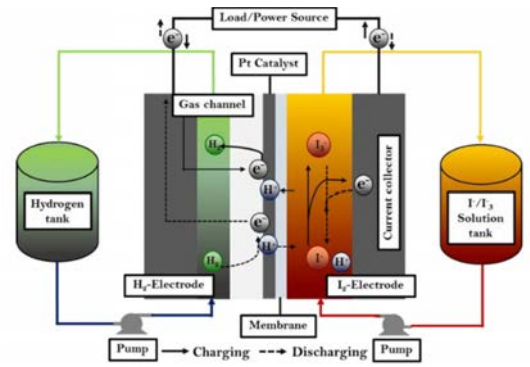
Overall:

$$H_2 + Br_2 \rightleftharpoons 2HBr \qquad E^\circ = 1.098\ V \qquad (6)$$



รูปที่ 8 แผนภาพไฮโดรเจน-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ [22]

หลักการทำงานของไฮโดรเจน-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ (รูปที่ 9) คือ แก๊สไฮโดรเจนถูกป้อนทางขั้วแอโนดและโบรมีนจากสารละลายกรดไฮโดรโบรมิก (Hydrobromic acid) ถูกป้อนทางขั้วแคโทด ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากไฮโดรเจน-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์มีค่าเท่ากับ 1.098 V [22] อย่างไรก็ตาม โบรมีนจัดเป็นสารเคมีที่มีพิษต่อการนำไปใช้งาน ซึ่งส่งผลต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม โดยโบรมีนถูกจัดอยู่ในกลุ่มของสารก่อมะเร็ง (Carcinogen) สารอันตราย และสารตั้งต้นในการทำอาวุธ (Chemical Information Management Unit: CIMU) จึงทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานเชิงอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้การพิจารณานำสารประกอบไฮโดรฮาโลเจนชนิดอื่นมาใช้แทนโบรมีนจึงได้รับความสนใจในการทำวิจัยเพื่อพัฒนาโฟลว์แบตเตอรี่ เช่น การนำไอโอดีนมาใช้แทนที่โบรมีนสำหรับสร้างไฮโดรเจน-ไอโอดีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์



รูปที่ 9 ไดอะแกรมของไฮโดรเจน-ไอโอดีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์

ปฏิกิริยาในการอัดประจุและคายประจุของไฮโดรเจน-ไอโอดีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์แสดงในสมการที่ 7-9 [22]

Negative (-): oxidation

$$H_2 \rightleftharpoons 2H^+ + 2e^- \qquad E^0 = 0.000\ V \quad (7)$$

Positive (+): reduction

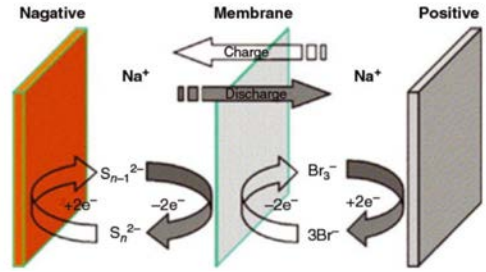
$$I_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2I^- \qquad E^0 = 0.536\ V \quad (8)$$

Overall:

$$H_2 + I_2 \rightleftharpoons 2HI \qquad E^0 = 0.536\ V \quad (9)$$

ข้อดีของไฮโดรเจน-ไอโอดีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ แบตเตอรี่ คือ ให้พลังงานสูง วัสดุมีราคาถูก และไม่เป็นพิษ รวมทั้งพลังงานจลน์ที่ส่งผลต่อความสามารถในการละลายของ I^-/I_3^- มากกว่า Br^-/Br_3^- (มากกว่า 8 mol/L) ศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยารีดอกซ์ในแบตเตอรี่ชนิดนี้มีความเหมาะสมสามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำภายในระบบ [23] เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของไฮโดรเจน-ไอโอดีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์เท่ากับ 0.536 V

โซเดียมพอลิซัลไฟด์-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ (Sodium polysulfide bromine flow battery) หรือ พอลิซัลไฟด์-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ (Polysulfide bromine flow battery) เป็นโฟลว์แบตเตอรี่อีกชนิดหนึ่งที่นักวิจัยทั่วโลกกำลังทำการวิจัยและพัฒนา การทำงานของพอลิซัลไฟด์-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์มีการป้อนเข้าของสารละลายเกลืออิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ สารละลายโซเดียมโบรไมด์ (Sodium bromide) และสารละลายโซเดียมพอลิซัลไฟด์ (Sodium polysulfide)



รูปที่ 7 ปฏิกิริยารีดอกซ์ในพอลิซัลไฟด์-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ [24]

ทั้งนี้ สารละลายโซเดียมโบรไมด์ถูกป้อนเข้าด้านแคโทดจากภาชนะบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และป้อนสารละลายโซเดียมพอลิซัลไฟด์เข้าทางด้านแอโนด ไอออนที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ขั้วแอโนด คือ S_{x+1}^{2-}/S_x^{2-} และ Br_2/Br^- เป็นไอออนที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด สภาวะในการทำปฏิกิริยา เช่น สนามไฟฟ้า (Electric field) และความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient) ส่งผลให้เกิดการ

เปลี่ยนแปลงของไอออนในสารละลายแคโทรไลต์ เช่น เมื่อมีโบรมีน (Br_2) ปริมาณมากเกินพอภายใต้สภาวะการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะทำให้เกิด Br_3^- หรือ Br_5^- ในสารละลายแคโทรไลต์ Br_2 สามารถเคลื่อนที่ข้ามผ่านแผ่นเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนจากด้านแคโทดไปแอโนดและทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนที่อยู่บริเวณอิเล็กโทรด ทางด้านฝั่งสารละลายแอโนไลต์ โดยซัลเฟอร์สามารถจับกับไอออนของซัลไฟด์ โดยคั่นกลางด้วยแผ่นเยื่อแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange membrane) ซึ่งยอมให้ Na^+ สามารถแพร่ผ่านได้ รูปที่ 7 แสดงการเกิดปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองด้านของพอลิซัลไฟด์-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ และกลไลของปฏิกิริยารีดอกซ์ในแบตเตอรี่ชนิดนี้แสดงในสมการที่ 10-12 [25]

At the cathode:

$$2NaBr \rightleftharpoons 2e^- + Br_2 + 2Na^+ \qquad E^0 = 1.087\ V \qquad (10)$$

At the anode:

$$2Na^+ + (x\text{-}1)\ Na_2S_x + 2e^- \rightleftharpoons xNa_2S_{x-1} \quad E^0 = -0.428\ V,$$

note: x=2-4 (11)

Overall:

$$2NaBr + (x\text{-}1)\ Na_2S_x \rightleftharpoons Br_2 + xNa_2S_{x-1} \quad E^0 = 1.515\ V$$

note: x=2-4 (12)

โดยทั่วไปแล้ว OCV ของพอลิซัลไฟด์-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิด รีดอกซ์โฟลว์มีค่าอยู่ในช่วง 1.54-1.60 V ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์และสถานะของการอัดและคายประจุของระบบ เนื่องจากพอลิซัลไฟด์-โบรมีนแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ใช้สารคู่ควบรีดอกซ์ (Redox couple) ที่เป็นไอออนของธาตุต่างชนิดกัน อาจส่งผลให้อาจเกิดการเจือปนของเคมีคอลสปีชี่ (Chemical species) ที่สามารถข้ามผ่านแผ่นเยื่อแลกเปลี่ยนไอออนและนำไปสู่ประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ลดลง

3. การประยุกต์ใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์

การนำแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ไปใช้งานนั้นสัมพันธ์กับคุณลักษณะของแบตเตอรี่ชนิดนี้ดังที่ได้กล่าวในข้างต้น เช่น อายุการใช้งานที่ยาวนาน เนื่องจากอิเล็กโทรดของแบตเตอรี่ชนิดนี้เสื่อมสภาพน้อย หรือไม่เปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีในสภาวะการใช้งานปกติทำให้มีรอบการอัดและคายประจุสูง สาเหตุหลักคือแบตเตอรี่ชนิดนี้มีการถ่ายเทและกระจายความร้อนที่ดี การพาความร้อนของอิเล็กโทรดโดยการใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นตัวช่วยในการกระจายและการจัดการความร้อนทำให้ไม่เกิดความร้อนสะสมสูงในระหว่างการใช้งาน ประเด็นที่สองคือไม่มีการสูญเสียไฟฟ้าระหว่างโหมดสแตนด์บาย หรือการรอคอยการใช้งาน ทั้งนี้ เนื่องจากระบบประกอบด้วยภาชนะบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์แยกจากกัน จึงทำให้มีโอกาสคายประจุด้วยตัวเองได้น้อยมาก การบำรุงรักษาแบตเตอรี่ชนิดนี้ต่ำ เนื่องจากสภาวะการอัดประจุเหมือนกันทุกเซลล์ทำให้ไม่เกิดการอัดประจุเกินกำลัง (Overcharging) [26] คุณสมบัติที่น่าสนใจสำหรับการใช้งานอีกประการคือสามารถรีไซเคิลได้และปลอดภัย ตัวอย่างเช่น วาเนเดียมในแบตเตอรี่ที่หมดอายุการใช้งานสามารถนำมาใช้ใหม่ได้ แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์จะไม่ได้รับผลกระทบจากความต้องการพลังงานที่ผันผวน [27] ซึ่งจะส่งผลอย่างรุนแรงต่อการลดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ความต้องการพลังงานที่ผันผวนเกิดจากอัตราการอัดประจุสูงสุดมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงอัตราการคายประจุสูงสุด คุณสมบัติที่สำคัญประการสุดท้ายคือ ปรับขนาดของแบตเตอรี่ให้เหมาะกับความจุพลังงาน (Energy capacity) ที่ต้องการได้ โดยไม่ต้องเปลี่ยนขนาดของเซลล์ ซึ่งสามารถทำได้โดยการปรับขนาดภาชนะบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์แทน [28] จากคุณสมบัติสำคัญดังกล่าวทำให้แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ถูกนำมาใช้กับงานที่ต้องการปรับระดับความต้านทาน หรือโหลด (Load leveling) [29] เนื่องจากจ่ายพลังงานได้สูงในระยะเวลานาน แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์สามารถตอบสนองการใช้งานน้อยกว่า 1 sec และมีการอัดประจุเกินกำลัง (Over

load capacity) ได้จำนวนครั้งมากกว่าแบตเตอรี่ทั่วไป [30] ดังนั้น แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์จึงใช้เป็นอุปกรณ์สำรองกำลังไฟฟ้าเพื่อให้มีการใช้งานอย่างมีคุณภาพและสามารถนำไปใช้งานได้จริง โดยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและการเปลี่ยนความถี่ [31] อุปกรณ์ดังกล่าวคือ เครื่องสำรองไฟฟ้าและปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Uninterruptible power supply: UPS) ใช้สำหรับจ่ายไฟเมื่อเกิดไฟฟ้าดับ หรือกำลังไฟฟ้าไม่พอ เพื่อป้องกันการลดลงของแรงดันไฟฟ้า (Voltage sag protection) ประเด็นของการใช้แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์เป็นเครื่องจ่ายไฟฟ้าสำรองนั้น มีข้อมูลที่น่าสนใจคือ แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์สามารถเริ่มต้นทำงานได้ภายใน 1 min [32] แม้แบตเตอรี่ไม่ได้ใช้งานมาเป็นเวลานาน รวมทั้งสามารถใช้สำหรับการสำรองพลังงานไฟฟ้าได้เป็นเวลานาน เพราะสามารถออกแบบภาชนะบรรจุอิเล็กโทรไลต์ได้ตามขนาดที่ต้องการ การนำแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ไปใช้งานที่ชัดเจนอีกประเภทหนึ่งคือ ช่วยให้ระบบพลังงานทดแทนมีความเสถียร เช่น ใช้กับระบบกังหันลม (Wind turbine system) หรือระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic cell) [33] เนื่องจากพลังงานทดแทนดังกล่าวไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าในบางช่วงเวลาได้ เช่น เมื่อไม่มีลม ไม่มีแดด หรือช่วงกลางคืน แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์สามารถกักเก็บพลังงานไฟฟ้าระหว่างที่ระบบพลังงานทดแทนผลิตได้ และจ่ายพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ระบบพลังงานทดแทนไม่สามารถทำงานได้ ทำให้ไม่เกิดภาวะการผันผวนของการจ่ายพลังงานไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีการนำแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์มาใช้ร่วมกับระบบจ่ายไฟฟ้าที่ปกติ เรียกว่า Electrical grid เช่น บริษัท CellCube Energy Storage Systems and Pangea Energy ของประเทศแคนาดา ได้ติดตั้งระบบวาเนเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ขนาด 50 MW/200 MWh เพื่อใช้ควบคู่กับ Electrical grid ในประเทศออสเตรเลีย [34] แบตเตอรี่ที่เชื่อมต่อกับ Electrical grid จะเก็บพลังงาน ไฟฟ้าส่วนเกินในช่วงเวลาที่มีการใช้งานน้อยและปล่อยพลังงานไฟฟ้าในช่วงที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงสุด แต่ปัญหาที่พบบ่อยคือ แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ที่ใช้ในระบบนี้ยังมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะทำงานต่ำ ส่งผลให้มีค่าต้นทุนในการผลิตพลังงานสูง ดังที่กล่าวไปแล้วว่าทุกเซลล์ของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์จะใช้อิเล็กโทรไลต์ร่วมกัน ทั้งนี้ สามารถออกแบบให้มีการอัดและคายประจุในจำนวนเซลล์แบตเตอรี่ที่ต่างกันได้ จึงทำให้สามารถใช้แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์เป็นอุปกรณ์แปลงพลังงานชนิด DC/DC AC/DC AC/AC หรือ DC/AC ทั้งนี้ขึ้นกับการออกแบบการอัดและคายประจุ รวมทั้งการควบคุมความถี่ของพลังงานไฟฟ้า [35] เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์สามารถอัดประจุได้อย่างรวดเร็ว โดยการเปลี่ยนไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้งานด้านยานยนต์ในประเภทของรถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า ซึ่งจำเป็นต้องใช้พลังงานรวดเร็วที่สุดเทียบเท่ากับการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ แต่ข้อจำกัดสำหรับแบตเตอรี่ชนิดนี้คือมีความหนาแน่นพลังงานต่ำ จึงทำให้รถยนต์มีระยะการขับขี่สั้น [36] แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์สามารถใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าแบบระบบเดี่ยวได้ เช่น ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าให้กับสถานีส่งสัญญาณโทรศัพท์มือถือในแถบทะเลแคริบเบียน ทั้งนี้ได้จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านระบบ Microgrid [37] แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ยังสามารถใช้เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าในสมาร์ทฟาร์ม หรือนำไปใช้เป็นแหล่งกักเก็บไฟฟ้าในพื้นที่ชนบทห่างไกลความเจริญ หรือสถานที่ที่ไฟฟ้าไม่สามารถเข้าถึง ด้านการใช้งานทางการทหารนั้นแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์เริ่มเข้ามามีบทบาทมากขึ้นดังตัวอย่างต่อไปนี้

ปกติฐานปฏิบัติการทางการทหารใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเครื่องยนต์ดีเซลแบบดั้งเดิม สำหรับให้พลังงานไฟฟ้าในการปฏิบัติการทางทหารระยะไกล การขนส่งเพื่อส่งน้ำมันดีเซลมีราคาแพงและเสี่ยงชีวิต หากผลิตกระแสไฟฟ้าทดแทนที่เงียบสงบอย่างแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ เพื่อทดแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล ไม่เพียงแต่เป็นประโยชน์ต่อระบบนิเวศน์ แต่ยังก่อประโยชน์เชิงกลยุทธ์ในการปฏิบัติการทางการทหารอีกด้วย เมื่อกล่าวถึงระบบสาธารณูปโภคฐานทัพถาวรได้มีการพัฒนาเปลี่ยนแปลงการผลิตกำลังไฟฟ้าไปสู่การผลิตไฟฟ้าโดย

ใช้พลังงานทดแทน สำหรับการเตรียมพลังงานไฟฟ้าสำรองเชิงกลยุทธ์ เพื่อให้แน่ใจว่าการปฏิบัติการทางการทหารสามารถทำได้อย่างต่อเนื่อง แม้แต่ในช่วงเวลาที่ไฟฟ้าขัดข้อง นอกจากนี้ยังมีการนำระบบการกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์มาใช้ทางการทหาร เช่น ใช้เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานของสถานีวิทยุทางทหาร หรือใช้เป็นสถานีในการอัดประจุไฟฟ้าให้กับยุทโธปกรณ์ทางการทหาร รวมทั้งสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์สมัยใหม่ โดยเป็นระบบติดตั้งอยู่กับสถานีจ่ายไฟฟ้า สำหรับการเติมพลังงานไฟฟ้าให้กับยานยนต์ที่ใช้ไฟฟ้า อาจนำแบตเตอรี่ชนิดนี้ไปใช้กับหุ่นยนต์เพื่ออุตสาหกรรมในอนาคตอีกด้วย

4. อนาคตของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์

แม้ว่าการนำเทคโนโลยีแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์มาใช้งานจริงในด้านต่างๆ ยังมีข้อจำกัด เนื่องจากอุปสรรคทางเทคนิคและเศรษฐกิจ แต่นักวิเคราะห์ชี้ว่ายังมีโอกาสทางการตลาดที่จะเติบโตเพิ่มขึ้น เพราะอุตสาหกรรมและประชากรโลกต้องการใช้กระแสไฟฟ้ามากขึ้น โดยเฉพาะจากแหล่งพลังงานทดแทนหรือพลังงานหมุนเวียน ซึ่งต้องการการจ่ายพลังงานที่สม่ำเสมอ ไม่ผันผวนเนื่องจากสภาพอากาศ พร้อมใช้งานและมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ เพราะเอกลักษณ์ที่สำคัญของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ที่สำคัญ ได้แก่ การเพิ่มกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าจะอิสระต่อกัน กล่าวคือ หากต้องการเพิ่มความจุของพลังงานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยเพิ่มปริมาตรของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ หากต้องการเพิ่มกำลังไฟฟ้าสามารถทำได้โดยเพิ่มพื้นที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ จุดเด่นที่สำคัญของแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ คือ สามารถคายประจุได้ตั้งแต่ช่วงเวลาในหน่วยนาทีจนถึงชั่วโมง และสามารถคายประจุได้ลึกโดยไม่ทำให้วัสดุที่เป็นองค์ประกอบเกิดการเสื่อมสภาพ รอบการคายและอัดประจุทำได้อย่างรวดเร็ว ในสหรัฐอเมริกา บริษัท Enervault and Deeya Energy เป็นตัวอย่างหนึ่งของบริษัทเอกชนที่ให้ความสนใจอย่างมากกับการลงทุนพัฒนาและสร้างนวัตกรรมด้านแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ การหมดอายุของสิทธิบัตรเกี่ยวกับแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ในปี ค.ศ. 2006 ได้จุดประกายการแข่งขันทางอุตสาหกรรมเพื่อการพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดนี้ในเชิงพาณิชย์ และมีการคาดการณ์ว่าจะมีการขยายตัวของตลาดแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์จนมีมูลค่า 4.5 พันล้านเหรียญสหรัฐฯ ภายในปี ค.ศ. 2028 [38] ทั้งนี้ เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์สามารถแข่งขันกับแบตเตอรี่ชนิดอื่นในแง่ของอายุการใช้งาน ความปลอดภัย และความน่าเชื่อถือสำหรับการใช้งานที่อยู่กับที่ ระบบสาธารณูปโภคทั่วโลกกำลังทดสอบการใช้แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ เช่น โครงการนำร่องในประเทศจีน ซึ่งกำลังอยู่ระหว่างการก่อสร้างแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ที่ใหญ่ที่สุดในโลก (200 MW/800 MWh) [38] หากประสบความสำเร็จโครงการนี้จะถูกจำลองแบบเพื่อนำไปใช้ทั่วประเทศและอาจจะนำไปใช้ในยุโรปและสหรัฐอเมริกาด้วยเช่นกัน ปัจจุบันได้มีการจัดจำหน่ายวาเนเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์เชิงพาณิชย์เรียบร้อยแล้ว โดยมีการประเมินมูลค่าทางเศรษฐกิจได้ประมาณ 6 พันล้านเหรียญสหรัฐ [38] หากพิจารณาด้านการตลาดของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน พบว่า แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์มีข้อจำกัดในเรื่องของราคา ซึ่งกระทรวงพลังงานของสหรัฐฯ ได้กำหนดว่าแบตเตอรี่ที่จะนำมาใช้ในการกักเก็บพลังงานจะต้องมีราคาในการติดตั้งต่ำกว่า 250 $/kW และประสิทธิภาพในการใช้งานต้องมากกว่า 75% แต่ถ้าหากใช้งานในระยะยาวค่าการติดตั้งต้องไม่สูงกว่า $150 kW/h และประสิทธิภาพของระบบควรมากกว่า 80% และต้องมีอายุการใช้งานยาวนานกว่า 10 ปี [39] จากข้อกำหนดที่กล่าวมาข้างต้นว่า พบว่า แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์มีข้อจำกัดในเรื่องของราคาอันเนื่องมาจากวาเนเดียมและวัสดุที่ใช้เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งยังมีราคาสูง หากมีการพัฒนาและผลิตในเชิงพาณิชย์มากขึ้น ราคาของวัสดุเหล่านี้จะลดลง โดยวัสดุที่ใช้เป็นองค์ประกอบของเซลล์แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ ได้แก่ วัสดุที่เป็นอิเล็กโทรดเยื่อเลือกผ่าน และแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว เป็นต้น ตัวอย่างการพัฒนา เช่น การพัฒนาโครงสร้างของอิเล็กโทรดที่

ให้มีพื้นที่ผิวมากและมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา หรือการพัฒนาเยื่อเลือกผ่านที่มีความจำเพาะเจาะจงสูง ควบคุมการเคลื่อนที่ผ่านของตัวทำไอออนที่ต้องการได้ดี มีความเสถียรสูง และราคาไม่สูง ส่วนแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วที่จะนำมาใช้ในเซลล์อนุกรมที่มีการขยายขนาดจะต้องมีสมบัติที่ส่งเสริมให้เพิ่มความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าได้

5. สรุป

เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงาน (Energy Storage) นับเป็นหนึ่งองค์ประกอบสำคัญในอุตสาหกรรมเป้าหมาย (S-Curve) ของประเทศไทย รวมถึงอุตสาหกรรมด้านพลังงาน โดยเฉพาะธุรกิจการผลิตไฟฟ้า แต่ระบบกักเก็บพลังงานที่บูรณาการกับระบบพลังงานทางเลือก (Alternative energy system) หรือระบบพลังงานทดแทน (Renewable energy system) ยังไม่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งนี้ เนื่องจากข้อจำกัดหลายประการ เช่น ต้นทุน อายุการใช้งาน และการบำรุงรักษา เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงาน ซึ่งเป็นที่คุ้นเคยกันดีคือแบตเตอรี่ มีวิธีการทำงาน คือ การนำเอาพลังงานส่วนเกินมากักตุนไว้ เพื่อนำออกมาใช้ในยามที่ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ระบบสามารถใช้แก้ปัญหาความไม่สม่ำเสมอในการผลิตไฟฟ้าให้มีความเสถียรมากยิ่งขึ้น การเติบโตของตลาดเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานได้ปรับตัวดีขึ้นมากในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา และคาดการณ์ว่าในช่วง 10 ปีข้างหน้า ตลาดนี้จะเติบโตเฉลี่ยราวปีละ 40% แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์เป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่จะมีบทบาทในอุตสาหกรรมด้านพลังงานมากขึ้น เนื่องจากมีสมบัติเด่นคือ เป็นแบตเตอรี่ที่มีความสามารถในการอัดประจุไฟฟ้าเข้าไปในแบตเตอรี่ได้ใหม่หลายครั้งและอัดประจุได้รวดเร็ว ในปริมาณความจุที่ไม่จำกัดของแหล่งกักเก็บ โดยการนำสารละลายอิเล็คโทรไลต์ ที่ใช้แล้วออกมาจากแบตเตอรี่ แล้วนำสารละลายอิเล็คโทรไลท์ที่อัดประจุไฟฟ้าแล้วเข้าไปแทนที่ กระบวนการนี้สามารถทำได้ในกรณีที่ไม่มีแหล่งพลังงานสำหรับป้อนเข้าไปในระบบ ซึ่งกระบวนการทำงานดังกล่าวเป็นลักษณะเฉพาะของแบตเตอรี่ที่ดี เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บและจ่ายไฟฟ้าได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะใช้สำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาดย่อม ซึ่งใช้พลังงานหมุนเวียนเป็นแหล่งพลังงานในการผลิตไฟฟ้าดังที่ได้กล่าวมาแล้ว บทความนี้ได้กล่าวถึงข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ที่เป็นความรู้พื้นฐานที่สำคัญสำหรับนำไปประกอบการพิจารณาเลือกใช้แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์ สำหรับงานในอุตสาหกรรมสมัยใหม่ต่อไป

หากเปรียบเทียบแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์กับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด หรือแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน แบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์สามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าโดยการขยายขนาดของถังบรรจุอิเล็กโทรไลต์ได้ตามความต้องการ โดยไม่ต้องเพิ่มปริมาณ หรือขนาดของเซลล์ ดังนั้น จึงสามารถนำไปใช้งานกับระบบขนาดใหญ่ง่ายกว่าแบตเตอรี่อีกสองชนิดดังกล่าว อีกทั้งแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์มีการคายประจุด้วยตัวเองต่ำมาก จึงส่งผลให้สามารถเก็บพลังงานได้เป็นระยะเวลายาวนาน ส่งผลให้ความต้องการในการบำรุงรักษาต่ำ [40] แต่อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาที่ความหนาแน่นของพลังงาน พบว่าแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์มีความหนาแน่นของพลังงานต่ำกว่าแบตเตอรี่ทั้งสองชนิด ตัวอย่างเช่น วาเนเดียมแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์มีความหนาแน่นของพลังงานประมาณ 25 Wh/kg ซึ่งมีค่าความหนาแน่น พลังงานนี้ต่ำกว่าความหนาแน่นพลังงานของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด (30-40 Wh/kg) และของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (80-200 Wh/kg) [41]

เมื่อพิจารณาในมุมมองด้านสิ่งแวดล้อม พบว่าแบตเตอรี่ชนิดรีดอกซ์โฟลว์มีความยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น ตัวอย่างเช่น เมื่อวานาเดียมรีดอกซ์โฟลว์แบตเตอรี่หมดอายุการใช้งาน วานาเดียมจะถูกนำมารีไซเคิล 100 % เนื่องจากอิเล็กโทรไลต์ของแบตเตอรี่ชนิด รีดอกซ์โฟลว์ไม่เกิดการเสื่อมสภาพ จึงสามารถนำมาเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลได้ง่าย ทั้งนี้ สามารถทำได้โดยการสกัดวานาเดียมออกจากอิเล็กโทรไลต์ [41] เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานอื่นต่อไป

ในกรณีของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด เมื่อหมดอายุการใช้งานจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากตะกั่ว ซึ่งเป็นโลหะหนัก เป็นพิษ และนำกลับมาใช้ใหม่ไม่ได้ ส่วนการรีไซเคิลอิเล็กโทรไลต์ของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนนั้นยังอยู่ในระดับการวิจัย ซึ่งยังไม่สามารถนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ [42]

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Renewable energy policy network for the 21st century. (2017). Renewables 2017 global status report. Retrieved from http://www.ren21.net/gsr-2017/

[2] Alotto, P., Guarnieri, M., & Moro, F. (2014). Redox flow batteries for the storage of renewable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 29, 325-335.

[3] Pongpanit, J. (2017), Sustainable *Energy. Annual report* 2017, 6-151. Retrieved from www.agecoal.com/en/ir_finance_anual.php

[4] Office of industrial economic. (2017), New engine of growth. 1, 1-40. Retrieved from www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/publications/newengineofgrowth.pdf

[5] Aneke, M., & Wang, M. (2016). Energy storage technologies and real life applications–A state of the art review. *Applied Energy,* 179, 350-377.

[6] Desjardins, J. (2016). The Battery Series Part 3: Explaining the Surging Demand for Lithium-Ion Batteries. Retrieved from https://www.visualcapitalist.com/explaining-surging-demand-lithium-ion-batteries/

[7] PVEducation. (2019). Battery voltage and capacity in non-equilibrium. Retrieved from https://www.pveducation.org/pvcdrom/batteries/ battery-voltage-and-capacity-in-non-equilibrium

[8] Alotto, P., Guarnieri, M., Moro, F., (2014). Redox flow batteries for the storage of renewable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 325–335.

[9] Deng, D. (2015). Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. *Energy Science & Engineering*, 3 (5), 385-418.

[10] ภิตินันท์ อินมูล, (2019). สถานการณ์ลิเทียมในตลาดโลก. Retrieved from http://164.115.27.97/digital/items/show/8882?type=1

[11] Xu, Q., & Zhao, T. S. (2015). Fundamental models for flow batteries. *Progress in Energy and Combustion Science*, 49, 40-58.

[12] Zhang, H., Li, X., & Zhang, J. (2017). Redox Flow Batteries: *Fundamentals and Applications*. New York, NY: CRC Press.

[13] Moore, M., Counce, R., Watson, J., & Zawodzinski, T. (2015). A comparison of the capital costs of a Vanadium redox-flow battery and a regenerative hydrogen-Vanadium fuel cell. *Journal of Advanced Chemical Engineering.* 5, 1-3.

[14] Irena, (2016), Overview of Technical Characteristics for Batteries. *Energetica INDIA*, 56-58. Retrieved from http://www.energetica-india.net/download.php?seccion=articles&archivo=FYIXqID0q8kY59sersZouimhbWalRf0a40GBBEs0oF3mxWTfw8PTj.pdf

[15] Weber, A. Z., Mench, M. M., Meyers, J. P., Ross, P. N., Gostick, J. T., & Liu, Q. (2011). Redox flow batteries: a review. *Journal of Applied* Electrochemistry, 41 (10), 1137.

[16] Pan, F., & Wang, Q. (2015). Redox species of redox flow batteries: *A review. Molecules,* 20 (11), 20499-20517.

[17] Leung, P., Li, X., De León, C. P., Berlouis, L., Low, C. J., & Walsh, F. C. (2012). Progress in redox flow batteries, remaining challenges and their applications in energy storage. *Rsc Advances,* 2(27), 10125-10156.

[18] Zhang, H., Li, X., & Zhang, J. (2017). Redox Flow Batteries: Fundamentals and Applications. New York, NY: CRC Press.

[19] Cunha, Á., Martins, J., Rodrigues, N., & Brito, F. P. (2015). Vanadium redox flow batteries: a technology review. *International Journal of Energy Research,* 39(7), 889-918.

[20] Mojapelo, F., & Kikomarov. M. (2018). Energy storage & vanadium redox flow batteries 101. *Bushveld energy.* 1-65. Retrieved from http://www.bushveldminerals.com/wp-content/uploads/2018/11/Energy-storage-101.pdf

[21] Lin, G., Chong, P. Y., Yarlagadda, V., Nguyen, T. V., Wycisk, R. J., Pintauro, P. N., & Weber, A. Z. (2016). Advanced hydrogen-bromine flow batteries with improved efficiency, durability and cost. *Journal of The Electrochemical Society,* 163(1), A5049-A5056.

[22] Oh, K., Kang, T. J., Park, S., Tucker, M. C., Weber, A. Z., & Ju, H. (2017). Effect of flow-field structure on discharging and charging behavior of hydrogen/bromine redox flow. *Electrochimica* Acta, 1-47.

[23] Zhao, Y., Wang, L., & Byon, H. R. (2013). High-performance rechargeable lithium-iodinebatteries using triiodide/iodide redox couples in an aqueous cathode. *Nature communications,* 4, 1896.

[24] Zhou, H., Zhang, H., Zhao, P., & Yi, B. (2006). A comparative study of carbon felt and activated carbon-based electrodes for sodium polysulfide/bromine redox flow battery. *Electrochimica Acta,* 51(28), 6304-6312.

[25] Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in natural science,* 19(3), 291-312.

[26] European Associaton for Storage of Energy. (2019). Electrochemical energy Storage. Retrieved from http://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE_TD_Flow Battery.pdf

[27] Doetsch, C., & Burfeind, J. (2016). Vanadium Redox Flow Batteries. *In Storing Energy.* 227-246.

[28] Chalamala, B. R., Soundappan, T., Fisher, G. R., Anstey, M. R., Viswanathan, V. V., & Perry, M. L.(2014). Redox flow batteries: an engineering perspective. *Proceedings of the IEEE,* 102(6), 976-999.

[29] Negishi, A. (1999). Electrolyte of vanadium redox flow battery for load leveling. *Bulletin of the Electromechanical Laboratory,* 63, 27-34.

[30] Emura, K. (2005). Recent progress in vanadi um redox flow battery. *Proceedings of Electrical Energy Storage Applications and Technologies (EESAT),* Osaka, Japan.

[31] Lotspeich, C., & Van Holde, D. (2002). Flow batteries: has really large scale battery storage come of age?. *ACEEE's Summer Study on Energy Efficiency in Buildings.* 3. 211-224.

[32] Shinzato, T., Emura, K., Yamanishi, K., Deguchi, H., Miyake, S., Hara, T., Suzuki, K. (2019). Vanadium Redox-flow Battery for Voltage Sag. *Sumitomo Electric Industries, Ltd.,* Osaka, Japan.

[33] Holzman, D. C. (2007). The vanadium advantage: flow batteries put wind energy in the bank. Environmental health perspectives. 115, 358-316.

[34] Kelly, G. (2019). CellCube and Pangea Energy Have Signed LOI for 50MW/200MWh in Australia. Retrieved from https://globalrenewablenews.com/article/energy/category/energy storage/143/767894/cellcube-and-pangea-energy-have-signed-loi-for-50mw-200mwh-in-australia-.html

[35] Devic, A., Ierides, M., Suarez, E. (2018). Battery energy storage. *Suschem,* 13.

[36] Chen, R., Kim, S., & Chang, Z. (2017). Redox Flow Batteries: Fundamentals and Applications. In Redox-Principles and Advanced Applications. *IntechOpen.* Retrieved From https://www.intechopen.com/books/redox-principles-andadvanced-applications/redox-flow-batteries-fundamentals-and-applications

[37] Gildmeister energy solution, (2019). Flow battery applications for the utility world. Retrieved from http://vsunenergy.com.au/wp-content/uploads/2016/11/Utility-Flyer.pdf

[38] IDTechEx, (2019). Redox Flow Batteries 2018 2028: Markets, Trends, Applications. Retrieved from https://www.idtechex.com/de/research-report/redox-flow-batteries-2018-2028-markets-trends-applications/605

[39] Leung, P., Li, X., De León, C. P., Berlouis, L., Low, C. J., & Walsh, F. C. (2012). Progress in redox flow batteries, remaining challenges and their applications in energy storage. *Rsc Advances,* 2 (27), 10125-10156.

[40] Vikram, S., Soeun, K., Jungtaek, K., and Hye, B. (2019). Aqueous organic redox flow batter ies. Nano Research, 1-14.

[41] นวดล เหล่าศิริพจน์, วรพล เกียรติกิตติพงษ์, บุญรอด สัจจกุลนุกิจ, มยุรพันธ์ สัจจกุลนุกิจ และพรรณนิภา ดอกไม้งาม. (2012), โครงการศึกษาประเมินและจัดทำแผนงานวิจัยพลังงานทดแทน (Energy stroage) ตามกรอบแผนพลังงานทดแทน 15 ปี Retrieved from http://e-lib.dede.go.th/mm-data/Bib14393.pdf

[42] Dassisti, M., Mastrorilli, P., Rizzuti, A., Cozzolino, G., Chimienti, M., Olabi, A. G., and Carbone, A. (2016). Vanadium: a transition metal for sustainable energy storing in redox flow batteries. In Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 1-24.